

IUEM
Brest

ACTES COLLOQUE INTERNATIONAL International Conference

Connaissance et Compréhension des Risques Côtiers :
Aléas, Enjeux, Représentations, Gestion
Coastal Risks : Hazards, Issues,
Representations, Management

Du 3 au 4 juillet 2014

AVANT-PROPOS

Le Colloque international « Connaissance et compréhension des risques côtiers : Aléas, Enjeux, Représentations, Gestion » a pour but de **renforcer la connaissance et la compréhension sur la vulnérabilité des territoires face aux risques côtiers liés à la mobilité du trait de côte en termes d'érosion et de submersion marine**. Le colloque est soutenu principalement par l'ANR via le projet ANR Cocorisco, ainsi que le LABEX Mer, l'Université de Bretagne Occidentale, Brest Métropole Océane, le Conseil Général du Finistère et la Région Bretagne.

Les objectifs du colloque sont de:

- réunir des spécialistes (chercheurs, doctorants, gestionnaires), au niveau national et international, menant des activités de recherche et d'étude sur la thématique des risques côtiers,
- présenter une sélection de travaux de recherche internationaux disciplinaires et interdisciplinaires sur la thématique des risques côtiers,
- confronter les approches de différents contextes géographiques associant des forçages environnementaux et anthropiques propres à ces régions,
- promouvoir les échanges entre disciplines et discuter des leviers permettant de mettre en œuvre des projets interdisciplinaires,
- promouvoir les échanges entre scientifiques et gestionnaires.

Merci de votre participation, et bienvenue dans le Finistère !

FOREWORD

The aim of the Conference "Coastal Risks: Hazards, Issues, Representations, Management" is to strengthen the knowledge and the understanding of coastal risks in terms of erosion and marine flooding. The conference is supported by the ANR (The French National Research Agency), the LABEX MER (Laboratory of Excellence), the University of Brest (UBO), the Finisitere local council, the Regional Council and the city of Brest (BMO)

The Conference's objectives are:

- To bring together coastal risks experts (researchers, PhD students, managers) at the national and international level,
- To present a selection of both disciplinary and interdisciplinary research projects on coastal risks,
- To compare experiences and approaches used in various geographic contexts linked to particular forcings, both environmental and anthropogenic,
- To promote exchanges between researchers working in different disciplines and to look at how to improve interdisciplinary research
- To promote exchanges between researchers and coastal managers

Thank you very much for your venue, and welcome to Finistère!

Catherine Meur-Férec et Alain Hénaff
LETG-Brest Géomer
IUEM, Université de Bretagne Occidentale

COMITE SCIENTIFIQUE

SCIENTIFIC COMMITTEE

- **Alain Hénaff** (LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, IUEM-UBO)
- **Catherine Meur-Férec** (LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, IUEM-UBO)
- **Christophe Delacourt** (Domaines Océaniques UMR 6538 CNRS, IUEM-UBO)
- **Brigitte Van Vliet- Lanoe** (Domaines Océaniques UMR 6538 CNRS, IUEM-UBO)
- **Iwan Le Berre** (LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, IUEM-UBO)
- **Serge Suanez** (LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, IUEM-UBO)
- **Denis Bailly** (UMR Amure, IUEM-UBO / IFREMER)
- **Guillaume Marie** (Dynamique et gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski)
- **Elisabeth Michel-Guillou** (Centre de Recherche en Psychologie, Cognition et Communication, EA 1285 UBO-Rennes 2)
- **Frédérique Chlous** (UMR PALOC, Muséum National d'Histoire Naturelle)
- **Hélène Martin-Brelot** (Institut de Geoarchitecture EA 2219 UBO)
- **Aurélié Penaud** (Domaines Océaniques UMR 6538 CNRS, IUEM-UBO)
- **Pascal Bernatchez** (Dynamique et gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski)
- **Bernard Fichaud** (LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, IUEM-UBO)
- **Pierre Stephan** (LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, IUEM-UBO)
- **Bernard Hallegouët** (UBO)
- **Yann Rabuteau** (Allegans)
- **Erwan Le Cornec** (Geos AEL)

COMITE D'ORGANISATION

ORGANIZING COMMITTEE

- **Alain Hénaff** (LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, IUEM-UBO)
- **Catherine Meur-Férec** (LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, IUEM-UBO)
- **Christophe Delacourt** (Domaines Océaniques UMR 6538 CNRS, IUEM-UBO)
- **Nicolas Guidicelli** (LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, IUEM-UBO)
- **Yuji Kato** (LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, IUEM-UBO)
- **Manuelle Philippe** (UMR Amure, IUEM-UBO / IFREMER)
- **Véronique Cuq** (LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, IUEM-UBO)
- **Elisabeth Michel-Guillou** (Centre de Recherche en Psychologie, Cognition et Communication, EA 1285 UBO-Rennes 2)
- **Adeline Maulpoix** (LETG-Brest-Géomer, UMR 6554 CNRS, IUEM-UBO)
- **Corinne Floc'h-Laizet** (Institut Universitaire Européen de la Mer - UBO, UMS 3113, Labex MER)

CONFERENCIERS INVITES

GUEST SPEAKERS

Tomasz Boski

Tomasz Boski est professeur de géosciences à l'Université d'Algarve (Portugal) et le coordinateur scientifique du Centre de Recherches Marines et Environnementales. Il a soutenu une thèse de géologie à l'Université Libre de Bruxelles en 1987 et est agrégé de l'université d'Algarve en Sciences Marines et de l'Environnement depuis 2003. Il a occupé les fonctions de géologue pour Contitec S.A. (Brésil), d'assistant chercheur à l'Institut des Matériaux de Construction de Varsovie, de directeur du laboratoire d'analyse du Ministère des Ressources Naturelles de Guinée Bissau, de post-doctorant et professeur associé à l'Université Libre de Bruxelles, et d'assistant professeur à l'Université de Tra-Os-Montes et Alto Duro. Tomasz Boski axe aujourd'hui ses recherches sur les changements climatiques et du niveau marin au cours du quaternaire supérieur, sur la géochimie des processus sédimentaires, et sur une gestion intégrée des territoires et des zones côtières basée sur une approche scientifique. La zone côtière de la péninsule ibérique ainsi que la côte brésilienne constituent ses principaux terrains d'étude.

Tomasz Boski is Professor of geosciences at University of Algarve and Scientific Coordinator of the Center for Marine and Environmental Research. He obtained a Ph.D. in geology at the Free University of Brussels in 1987, and an aggregation in Marine and Environmental Science from the University of Algarve (2003). He held the positions of Geologist for Contitec S.A. (Brazil), Research Assistant at the Institute of Building Materials in Warsaw, director of the analytical laboratory in the Ministry of Natural Resources of Guinea Bissau, post-doc researcher and associate professor at the Free University of Brussels, and assistant professor at the university of Tras-os-Montes and Alto Duro. Tomasz Boski's researches focus now on climate and sea level change during the late quaternary, on geochemistry of sedimentary processes, and on an integrated science-based territorial / coastal management. Coastal zone of Iberian Peninsula and Brazilian shoreline are some of his main study areas.

Détenteur d'un Baccalauréat en Sc. Sociales de l'Université de Moncton en 1968, d'une Maîtrise de l'Université Laval, (1975) et d'un Ph.D. de l'UQAM (1992), le professeur Chouinard est rattaché au département de sociologie et au programme de Maîtrise en études de l'environnement à l'Université de Moncton qu'il a dirigé de 1999 à 2007. Il œuvre depuis 40 ans au développement durable, à l'engagement communautaire, à la gestion des ressources naturelles, à la sensibilisation et à l'éducation à l'environnement ainsi qu'à la construction des capacités communautaires en vue de la prise en charge de leur milieu. Il est co-chercheur dans des recherches à l'échelle nationale et internationale, entre autres, sur *la capture des pêches au Canada* (CRSNG, 2010-2015), *les défis des communautés côtières à l'heure de changements climatiques* (CRSH, 2010-2015), *Adaptation Research, a Trans-disciplinary transnational community and policycentered approach*, [ARTISTICCC](#) (Forum Belmont, 2013-2016).

Omer Chouinard obtained a Bachelor's degree of Social Sciences from the University of Moncton in 1968, a Master's degree of the University of Laval in 1975 and a PhD of the University of Quebec at Montreal (UQAM) in 1992. He is attached to the Department of Sociology and to the Master of Environmental Studies program of the University of Moncton, which he directed from 1999 to 2007. He has been working for nearly 40 years to study different topics like sustainable development, communities' involvement, natural resources management, environmental awareness and education, communities' empowerment for the preservation of their environment. O. Chouinard is currently involved in national and international research projects interested in fisheries catches in Canada (CRSNG, 2010-2015), Coastal communities' challenges in the context of global climate changes (CRSH, 2010-2015), Adaptation Research, a Trans-disciplinary transnational community and policycentered approach, [ARTISTICCC](#) (Forum Belmont, 2013-2016).

Robert D'Ercole

Robert D'Ercole est directeur de recherche à l'IRD depuis 2005 et membre de l'UMR PRODIG (Pôle de Recherche pour l'Organisation et la Diffusion de l'Information Géographique). Il a auparavant été professeur agrégé de géographie avant d'exercer à l'Université des Antilles et de la Guyane (Martinique) et à l'Université de Savoie (Chambéry). Ses premiers travaux sur les risques datent de 1984 mais il est très marqué par l'éruption du Nevado del Ruiz en Colombie le 13 novembre 1985, catastrophe qui a mis en évidence le rôle fondamental de la vulnérabilité, concept alors très peu connu. Depuis, Robert D'Ercole a consacré ses recherches aux questions de vulnérabilité, sous différentes formes et dans plusieurs régions du monde, en particulier dans les pays andins et la Caraïbe. Il a été responsable de plusieurs programmes de recherche dont le [programme PACIVUR](#) de l'IRD qu'il a créé et dirigé de 2006 à 2011 (Programme Andin de recherche et de formation sur la vulnérabilité et les risques en milieu urbain, concernant l'Equateur, le Pérou et la Bolivie). Le dernier projet l'a amené à travailler à Port-au-Prince (Haïti) en 2012 et 2013.

Robert D'Ercole is director of research at the IRD (Institut de Recherche pour le Développement) since 2005. He is also a member of UMR PRODIG. He started his career as associate professor of geography before working at the University of Antilles and French Guyana (Martinique) then at the University of Savoie (Chambéry). He led his first researches on risk in 1984, but the eruption of the volcano "Nevado del Ruiz" in Colombia on 13 November 1985 is a significant event in his life as it enlightened the major role of the little known (at this time) concept of vulnerability. Since then, R. D'Ercole has focused his scientific work on this research topic. He has studied different kinds of vulnerability issues in several regions of the world, especially in the Andean countries and in the Caribbean region. He has been in charge of several research programs like [PACIVUR](#) from IRD, which he created and directed from 2006 to 2011 (Andean research and training program on vulnerability and risks in urban areas, focused on Ecuador, Peru and Bolivia). His last project led him to work in Port-au-Prince (Haiti) in 2012 – 2013.

Job Dronkers a fait ses études à l'Université de Strasbourg avant de préparer une thèse en Physique au Commissariat à l'Énergie Atomique (1975). Ses premiers travaux ont été menés dans le cadre de l'étude de l'impact environnemental du barrage anti-tempête de l'Escaut (Plan Delta, Pays Bas). Il a contribué au développement d'une politique de gestion côtière aux Pays-Bas, basée sur le principe de « travailler avec la nature ». Il a été directeur du Département des études côtières et marines au Ministère de l'Infrastructure et de l'Environnement des Pays Bas et professeur en Physique des Systèmes Côtiers à l'Université d'Utrecht. Depuis sa retraite en 2012, J. Dronkers participe régulièrement à des missions dans des pays africains pour apporter son expertise et des conseils sur la gestion côtière.

Job Dronkers studied at University of Strasbourg and obtained a PhD in physics from the CEA (France's Atomic Energy Commission) in 1975. He began his career by studying the environmental impact of the storm surge barrier from Escaut (Delta Plan, Netherlands). In Netherlands, he has been involved in the development of a coastal management policy based on the principle of “working with nature”. He directed the Department of Marine and Coastal Studies at the Ministry of Infrastructure and the Environment. He has also been professor in Coastal Systems Physics at the University of Utrecht. Since his retirement in 2012, he regularly undertakes missions to advise African countries on coastal management.

Helene Joffe est professeure de psychologie à l'UCL (University College London - Division of Psychology and Language Sciences). Elle est psychologue sociale et de la santé. Son travail porte sur les représentations sociales de différents risques tels que les maladies infectieuses émergentes comme le sida, et plus récemment, elle a travaillé sur les risques de tremblements de terre liés au risque du changement climatique. Son intérêt porte sur la manière dont les personnes de sens commun appréhendent et se comportent face à ces risques, avec une attention particulière portée aux facteurs émotionnels et culturels qui forgent leurs réponses comportementales. Leurs représentations ont des conséquences sur la préparation à l'action, par exemple, la façon dont elles se préparent aux tremblements de terre. Le livre le plus récent, édité par Hélène Joffe, est «*Cities at Risk: Living with Perils in the Twenty First Century* » (Springer, 2013) et elle a publié de nombreux articles dans des revues à comité de lecture et des chapitres portant sur le domaine du risque.

Helene Joffe is Professor of Psychology at UCL (University College London - Division of Psychology and Language Sciences). She is a social and health psychologist. Her work has focused on social representations of a range of risks, starting with emerging infectious diseases such as AIDS and then, more recently, earthquake and climate change related risks. Her interest is in how publics engage with such risks with special attention paid to the emotive and cultural factors that forge their responses. Their representations have consequences for preparatory behaviour, such as how they prepare for earthquakes. Helene Joffe's most recent edited book is '[Cities at Risk: Living with Perils in the Twenty First Century](#)' (Springer, 2013) and she has published a vast range of peer reviewed papers and chapters within the risk area.

-

Christophe Viavattene

Christophe Viavattene est chercheur au Flood Hazard Research Centre – Middlesex University London. Ses activités de recherche sont de type multidisciplinaire et concernent principalement les problèmes de gestion de l'eau et des risques d'inondation. Il a rejoint le centre de recherche en 2007 et depuis a participé à de nombreux projets européens. De 2010 à 2012 il a contribué au [projet Européen CONHAZ](#) (Cost of Natural Hazards), travaillant tout particulièrement sur les coûts associés aux inondations. Christophe Viavattene participe aussi à l'élaboration des méthodes d'évaluation des bénéfices de gestion des risques d'inondation en Angleterre et aux Pays de Galles et a travaillé sur la dernière édition du "manuel multi-couleur" et de son nouveau site web (<http://www.mcm-online.co.uk/>). Christophe Viavattene est actuellement impliqué dans un nouveau [projet européen RISC-KIT](#) (Resilience-Increasing Strategies for Coasts – toolkit) et dirige le groupe de travail sur la mise en place d'un outil d'évaluation des risques côtiers à l'échelle régionale.

Christophe Viavattene is a Senior Research Fellow at the Flood Hazard Research Centre – Middlesex University London. Christophe's research is mainly focussed on water resources and flood risk management through an interdisciplinary perspective. He has joined the Research Centre in 2007 and since then has participated in many EU projects. In 2010-2012 he has contributed to the EU [CONHAZ project](#) (Cost of Natural Hazards), working specifically on the costs of floods. Christophe is also strongly involved in developing the methodologies for assessing the benefits of Flood and Coastal Risk Management in England and Wales and was involved in the latest edition of the Multi-Coloured Manual and its new website (www.mcm-online.co.uk). Christophe is currently involved in a new EU FP7 [project RISC-KIT](#) (Resilience-Increasing Strategies for Coasts – toolkit) and is leading the work package on coastal risk assessment framework for regional scale.

Vulnérabilité : vers un concept opérationnel ?

Vulnerability: to an operational concept?

Robert D'Ercole (IRD – UMR PRODIG)

Depuis une trentaine d'années, la place de la vulnérabilité n'a cessé d'évoluer dans la recherche sur les risques et la gestion de ces derniers. Sans vraiment porter ombrage aux recherches sur l'aléa, même si ces dernières sont parfois englobées dans les études de vulnérabilité, les rapports de force entre aléa et vulnérabilité se sont modifiés. Parmi les raisons qui expliquent cette situation : les incertitudes de plus en plus reconnues en matière d'aléa (prédictions, zonages...) et une approche de la vulnérabilité devenue moins militante, mais plus solide sur le plan méthodologique, plus « scientifique ». Cependant, si la vulnérabilité semble plus crédible qu'à ses débuts, est-elle pour autant devenue plus opérationnelle ? Le conférencier tentera de donner des éléments de réponse à cette question à partir de quelques pistes et de sa propre expérience de recherche sur les vulnérabilités dans les pays du Sud. Parmi ces pistes, l'approche systémique (concrétisée par exemple par le modèle PAR : *Pressure and release*) constitue une avancée indéniable mais, en elle-même, elle permet peut-être davantage de démêler la complexité de la vulnérabilité et donc, de mieux la comprendre, que de la réduire concrètement. La résilience offre une autre piste. Extrait du monde scientifique au sein duquel différentes acceptions sont défendues, le concept est éminemment politique sur le terrain. C'est notamment une manière d'afficher en positif ce que la vulnérabilité présente en négatif même si de nombreux chercheurs soulignent que la résilience n'est pas l'inverse de la vulnérabilité. Les discours des bailleurs de fonds et des politiques considérant la résilience comme un gage de qualité, avec de « bonnes pratiques » et de « bons élèves », ne suffisent cependant pas à rendre opérationnel ce concept et, à travers lui, celui de vulnérabilité. Pour sa part, l'approche par l'enjeu aborde la vulnérabilité à partir des éléments ou ressources du territoire qui permettent son fonctionnement, son développement ou la gestion de situations de crise, en d'autres termes, à partir d'éléments qui interpellent directement les gestionnaires du territoire. L'approche est ainsi davantage opérationnelle que celles qui placent les aléas au premier plan, elle est prometteuse en termes de réduction des vulnérabilités, mais elle demande à être validée sur divers terrains et à différentes échelles. La vulnérabilité intéressant plusieurs champs disciplinaires, on peut aussi aborder la question à partir de la manière dont les différentes disciplines produisent des connaissances. Il est clair que les travaux pluridisciplinaires sur la vulnérabilité qui se sont multipliés ces dernières années ont contribué à donner l'image d'un concept plus crédible et plus opérationnel. Encore faudrait-il, pour que cela se concrétise en termes de gestion, que ces disciplines puissent travailler en interdisciplinarité sur des objets communs plutôt que de juxtaposer des points de vue aussi pertinents soient-ils.

Représentations sociales et risques

Social representations and risks

Helene Joffe (University College London)

Social representations theory provides a tool to examine people's common-sense thoughts and feelings about a given phenomenon, like coastal risk. Such thoughts and feelings can be expressed by individuals but are underpinned by socio-cultural, historical and group-specific ideologies. Thus this talk focuses on how people see risks, pinpointing trends in the content of their common sense about them. Such trends include distancing self from risk, with an abiding 'not me – not my group', 'the risk will not affect me or us' stance. This will be demonstrated by interesting data on flood risk in the UK and people's sense, in high flood risk zones, that flood-risk is of no danger to themselves. Further trends in the human response, including the centrality of blame, trust and control (versus fatalism) will be elucidated. I will contend that people are motivated to represent events in a way that protects the self and in-group from threat; this is a form of symbolic coping, no less important than material coping, in the face of danger.

Améliorer la prise de décision quant à la gestion durable des risques liés aux inondations : pratiques courantes et nouveaux enjeux

Making better sustainable flood risk management decisions: current practices and new challenges

Christophe Viavattene (Middlesex University London)

De nombreuses inondations, telles celles observées en automne 2000 et en été 2007 en Grande Bretagne, en 2002 sur l'Elbe et le Danube, ou encore lors des récentes tempêtes hivernales de l'hiver 2014 ont révélé la fragilité des pays Européens face aux événements extrêmes. La nécessité de réduire les risques et de s'adapter aux changements climatiques est reconnue, mais il est souvent demandé de faire plus avec moins de moyens. Aussi l'évaluation économique offre-t-elle aux gestionnaires un outil d'aide à la décision approprié pour définir et choisir les stratégies à mettre en œuvre. En Angleterre et au Pays de Galles l'évaluation économique des dispositifs de gestion des risques de submersions et d'érosion côtière est requise pour accéder aux fonds nationaux. Le *Multi-Coloured Manuel* (MCM) fournit les méthodes et les données nécessaires à l'évaluation des bénéfices potentiels des schémas de prévention des submersions. La présentation illustrera comment l'évaluation des pertes économiques liées aux submersions est effectuée et comment l'analyse coût-bénéfice permet d'informer la décision quant aux investissements réalisés pour les prévenir. Néanmoins l'évaluation économique se doit de répondre aux nouvelles demandes soulevées par les questions de développement durable, à savoir notamment une meilleure évaluation de la capacité de la résilience d'un système, c'est-à-dire sa capacité à se remettre de l'impact d'une submersion. La seconde partie de la présentation discutera de ces nouveaux enjeux pour la communauté scientifique dans l'objectif d'améliorer la prise de décision.

Evolution du trait de côte et du niveau marin dans le Golfe de Cadix au cours des derniers 13 400 ans

The last 13.4 kyrs of sea level change and coast Line evolution in gulf of Cadiz

Tomasz Boski (Université d'Algarve, Portugal)

Cette communication discute de la mise à jour d'un ensemble de données sur la montée du niveau de la mer (MNM) enregistrée dans des carottes sédimentaires littorales du Golfe de Cadix. Les conclusions sur la nature de l'ensemble du spectre des modifications de l'environnement sont basées à la fois sur le contexte géomorphologique des sédiments analysés, la composition chimique et minéralogique des sédiments, leur contenu microfaunistiques, les données palynologiques et enfin, les marqueurs géochimiques spécifiques. Ces données multiproxies extraites des séquences *sédimentaires* de forage ont été callées dans le temps avec le modèle de l'âge de ^{14}C . Ce set de données a permis d'établir une chronologie de l'évolution des paléovallées envahies par la transgression holocène. La reconstruction paléo-écologique de la séquence sédimentaire de l'Estuaire du Guadiana a enregistré une remontée rapide du niveau marin depuis 13.4 ka cal BP, avec une pause pendant le Dryas récent suivie d'une reprise à 11.500 ans cal BP. L'histoire Holocène de l'évolution côtière est également bien documentée dans les archives sédimentaires de l'estuaire d'Arade et de la Ria Formosa. Les données attestent d'une stabilisation temporaire du niveau de la mer vers 7500 cal BP, après une dernière pulsation de 8 mètres en 700 ans, ce qui correspond à un taux $> 11 \text{ mm/a}$ attribuable à MWP 1c. Depuis lors, le relèvement du niveau marin se poursuit à un rythme beaucoup plus lent, c'est à dire à un taux proche de 1 mm an^{-1} . La réinterprétation des données recueillies dans les six forages de l'Estuaire de Guadiana nous permet de proposer une courbe eustatique pour la Marge SW Ibérique de l'Atlantique. Lorsqu'elle est confrontée aux données altimétriques actuelles des satellites, Jason I Jason II, la tendance naturelle observée, depuis l'Holocène Moyen, permet d'estimer le forçage anthropique du MNM de l'ordre de $1,8 \text{ à } 2 \text{ mm an}^{-1}$.

An updated data set on sea-level rise (SLR) recorded in the coastal sediments of Gulf of Cadiz in Portugal, during the last 13.5 kyrs, is discussed. The inferences about the nature of the whole spectrum of environmental changes are based on geomorphological context of sediments, their bulk chemical and mineralogical composition, microfauna, pollens and specific geochemical markers. In particular, this multiproxy information data set, obtained from borehole sequences and associated with ^{14}C age model, permitted to establish a robust chronology of environmental evolution of river paleovalleys submitted to drowning by the rising marine waters. The study of sedimentary infill sequence, deposited in the accommodation space of the terminal stretches of regional river paleovalleys enabled us to propose the first sea-level rise curve, embracing the time-span of the last 14 millenia. The paleoecological reconstructions combined with chronostratigraphic model of sedimentary record in Guadiana Estuary revealed the fast sea level rise period since ca.13 kyr cal BP, halted during the Younger Dryas and resuming at ca. 11,500 yr cal BP. The Holocene history of coastal evolution is also well documented in the Estuary of Arade and in Ria Formosa, pointing to the sea level stabilization at ca. 7,500 cal BP after a last jump of up to 8 meters in 700 years, which corresponds to the Meltwater pulse 1c. Since then, the upwards movement of the sea surface continued at much slower pace, approximately at a 1.2 mm yr^{-1} rate. The re-interpretation of data gathered in 6 boreholes from Guadiana Estuary enables us to propose the sea-level rise curve for the SW Iberian Atlantic margin. When confronted with the current altimetric data from TOPEX/POSEIDON, Jason I and Jason II satellites, the millennial time-scale natural trend enables to estimate the anthropogenic forcing of SLR to be in order of $1.8 - 2 \text{ mm year}$.

L'adaptabilité au changement climatique : une question de gouvernance à la lumière de la recherche partenariale. Cas de la zone côtière du Littoral acadien du Nouveau-Brunswick

Adaptability to climate change: a governance issue in light of the partnership research. The case of the New-Brunswick Acadian coastal zone

Omer Chouinard (Université de Moncton - Canada)

Le littoral constitue un espace fragile, confronté d'un point de vue physique à des perturbations ponctuelles (cyclone, tempête, inondation, etc.) et graduelles (érosion, augmentation du niveau marin, salinisation des sols, etc.). Cet espace est d'autant plus vulnérable qu'il doit faire face à des pressions anthropiques de plus en plus fortes : urbanisation galopante, pression démographique, concentration de diverses activités économiques (pêche, industrie, tourisme, etc.), pression sur les ressources. Ces dernières années, les orientations proposées par les instances internationales pour réduire la vulnérabilité des zones côtières, qui est renforcée par les impacts du changement climatique et des variations climatiques, se concentrent sur la gestion intégrée des zones côtières (GIZC) et l'adaptation des différents territoires littoraux au niveau contexte climatique (IPCC, 2007, 2013-14). L'observation du processus d'adaptation au sein des sociétés humaines met en évidence deux types d'adaptation. D'une part, il y a l'adaptation planifiée ou organisée, qui est interprétée comme étant le résultat de décisions politiques établies par le secteur public et qui repose en grande partie sur une approche *top down*. Elle renvoie aux actions prises par les gouvernements incluant la législation, les réglementations, les incitations, favorisant des évolutions dans les systèmes socio-économiques dans le but de réduire la vulnérabilité au changement climatique (Burton *et al.*, 2002). D'autre part, il y a l'adaptation spontanée ou autonome qui est largement interprétée comme étant liée aux initiatives du secteur privé qui font face aux modifications actuelles ou futures liées au changement climatique (Smit et Pilifosova, 2001). L'approche partagée ici se concentre sur le processus d'adaptation dans son ensemble en s'appuyant sur une étude empirique des pratiques et des représentations sociales de l'ensemble des acteurs (usagers, résidents, pêcheurs, touristes, experts, autorités, etc.) agissant et interagissant sur l'espace côtier du littoral acadien du sud du Golfe du Saint-Laurent dans la province du Nouveau-Brunswick, au Canada. L'objectif principal de cette recherche est de contribuer à travers l'étude des modèles socio-cognitifs à une meilleure compréhension des pratiques territoriales en termes d'adaptation. Se concentrer à la fois sur les mesures d'adaptation organisée ou planifiée et les actions d'adaptation spontanée permet d'observer les interactions existantes entre les systèmes d'acteurs globaux et locaux, d'identifier et d'analyser les divergences et convergences et ainsi contribuer à la réflexion sur les systèmes de gouvernance et de gestion intégrée participative.

La question générale qui a guidé notre étude se résume ainsi : quelle échelle nous semble la plus appropriée pour l'adaptation au changement climatique ? À notre question générale s'ajoutent trois questions spécifiques :

- Dans quelle mesure l'échelle locale est-elle la plus appropriée pour s'adapter au changement et variations climatiques ?
- Comment l'implication communauté-université, s'inscrivant dans une démarche de recherche-action partenariale, se déroule ?
- Quel est l'apport de la recherche partenariale, en tant que méthode, dans la production des connaissances ?

Vivre sous le niveau marin : l'adaptation au changement climatique dans le delta du Rhin

Living under sea level: adaptation to climate change in the Rhin Delta

Job Dronkers (Pays-Bas)

Autrefois délaissées, les plaines côtières sont désormais occupées par de fortes concentrations urbaines. A l'échelle mondiale, nombre d'entre elles se trouveront, vers la fin du XXI^{ème} siècle, en dessous du niveau des pleines mers de vives eaux. Comment accommoder ces zones urbanisées, dont l'emprise continue de s'accroître, à une telle situation ?

Cette question s'est posée, il y a déjà plusieurs siècles, pour le territoire du delta du Rhin. La réclamation des marécages du delta a produit des terres situées bien plus bas que le niveau des crues fluviales et de la mer. L'aménagement de ces zones basses a été naturellement dicté par la nécessité de s'adapter à la présence dominante de l'eau et aux dynamiques associées. Il est cependant apparu que cette problématique était surmontable grâce à la mise en œuvre d'une infrastructure administrative et technique basée sur l'ingénierie de l'eau. Le progrès de ces techniques, au cours du siècle dernier, a grandement diminué les contraintes de l'eau et augmenté les marges de manœuvre concernant les politiques d'aménagement du territoire.

Avec le changement climatique et la montée du niveau marin, le territoire se retrouve confronté à un nouveau défi. La conscience de ces phénomènes a remis en cause l'idée selon laquelle on peut se fier uniquement aux moyens techniques d'adaptation. Un Haut-Commissaire du Delta a été nommé il y a cinq ans par le gouvernement des Pays-Bas afin de revoir les politiques actuelles de planification, aux niveaux national et régional, et pour coordonner toutes les politiques qui ont un impact potentiel sur les possibilités d'adaptation futures aux conséquences du changement climatique. Un programme évolutif a été développé pour répondre à différents scénarios de changement climatique – le Programme Delta. Cette présentation s'intéressera à l'approche méthodologique constituant la base du Programme Delta. Ces méthodes visent à intégrer différentes échelles de temps dans la prise de décision, à prendre en compte les incertitudes liées aux projections du futur, à éviter des développements qui entraveraient les possibilités d'adaptation futures, à optimiser le rendement économique des mesures prises, à sensibiliser l'opinion publique et à stimuler l'initiative privée. Quelques exemples de mise en œuvre pratique sur le terrain seront présentés.

TABLE DES ARTICLES PAR THEMATIQUE

LIST OF ARTICLES BY THEMATIC

Thématique Aléas / Hazards Thematic

Dépôts évènementiels holocènes du littoral de la région de Temara-Skhirat (Maroc)

D. Chahid, A. Lenoble, L. Boudad, B. Van Vliet-Lanoë 21

Enregistrement des tempêtes holocènes en Bretagne : Chronologie, forçages climatiques et implications

B. Van Vliet-Lanoë, A. Hénaff, J. Goslin, B. Hallégouët, C. Delacourt, A. Penaud, E. le Cornec 28

Évaluation de la submersion côtière grâce à une estimation *in situ* du *wave runup* sur les côtes basses du Bas-Saint-Laurent, Canada (Québec)

D. Didier, P. Bernatchez, G. Marie 36

Comprendre les submersions marines et leurs conséquences : L'apport du retour d'expérience Xynthia pour la définition des données à collecter suite à une submersion

C. Perherin, N. Berenger, L. Bocquier, N. Flouest, S. Moreira 45

Conditions météo-marines et facteurs de prédisposition à l'origine de phénomènes de submersion marine : analyse comparative entre Manche orientale et Mer du Nord méridionale

A. Maspataud, P. Letortu, S. Costa, O. Cantat, A. Héquette, M.-H. Ruz 53

Apport de l'imagerie satellitaire pour le suivi du trait de côte : Prototypes sur Saint-Pierre-et-Miquelon

C. Bosc, L. Chandelier, R. Lagnous, P. Laine, A. Roche 63

L'imagerie satellite au service de la caractérisation des aléas et risques littoraux : Détection d'indicateurs géomorphologiques

A. Dehouck, V. Lafon, A. Robinet, C. Curti, N. Durou, V. Marieu, F. Sabatier, B. Guerinel, C. Vanroye 71

Exposition des îles Wallis et Futuna au risque littoral ; cyclones et tsunamis

T. Hoibian, D. Labrousse, M. Allenbach, E. Liufau, C. Manry, A. Malau 79

Le projet HOMONIM : Une contribution à l'amélioration de la prévision des submersions marines pour la Vigilance Vagues-Submersion

D. Jourdan, D. Paradis, A. Pasquet, H. Michaud, F. Gouillon, R. Baraille, L. Biscara, G. Voineson, P. Ohl 88

Recul du trait de côte et migration dunaire dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Littoraux : Disponibilité et qualité des données. Deux cas d'étude : Calvados et Loire-Atlantique

M. Colin, A. Bolle, P. de Schoesitter 98

Projet VIMERS : Pré-voir les tempêtes majeures à venir pour mieux s’y préparer

A. Roche, G. Jan, R. Sanquer, J. Durand, H. Le Cam, T. Madec, F. Baraer, D. Goutx, Y. Deniaud 107

Réseau Tempête Languedoc-Roussillon : Une démarche régionale pour mieux appréhender les tempêtes marines et leurs impacts sur le littoral

Y. De la Torre, Y. Balouin, H. Heurtefeux, P. Lanzelloti, B. Guérinel, P. Dufresne, C. Garcia..... 115

L’aléa submersion marine sur la rive interne du Bassin d’Arcachon : exposition actuelle, cartographie prévisionnelle et capacité d’atténuation par la restauration des marais salés

F. Bertrand, L. Goeldner-Gianella, B. Anselme, P. Durand, Y.-F. Thomas, A. Sottolichio, N. Sénéchal 124

Présentation de l’International Levee Handbook (ILH) : Traduction de la partie introductive

M. Igigabel, M. Sharp, Y. Deniaud, P. Chassé, R. Tourment, E. Durand, G. Veylon 135

Méthode d’évaluation de l’aléa de rupture d’ouvrages soumis aux sollicitations marines : Application à la protection en enrochements du front de mer de Lacanau

N. Pépin, E. Tena-Davila, A. De Bonviller, J. Dugor..... 143

Enjeux et défis de la vigilance face aux risques côtiers dans des contextes de développement rapide : Présentation du plan régional de prévention des risques côtiers en Afrique de l’Ouest et de la Mission d’Observation du Littoral ouest africain

J.-J. Goussard 154

Thématique Enjeux / Issues Thematic

Cyclonic storm-surge risk: a hedonic case study of residential property in Exmouth, Western Australia

R. Roberts, L. E. Beckley and M. Tull..... 164

Développement d’un modèle d’estimation des dommages économiques engendrés par les phénomènes de submersions marines en France métropolitaine

J.-P. Naulin, D. Moncoulon, A. Quantin 176

Évaluation économique des dommages aux habitations liés à la submersion marine : Mise en place de modèles de prédiction des coûts à partir de données d’assurance

C. André, C. Meur-Férec..... 186

Analyses coûts-bénéfices (ACB) littorales : Des aléas aux enjeux... de nouvelles recommandations pour évaluer l’opportunité des projets littoraux

C. Perherin, N. Christin, C. André 196

Analyse économique des enjeux exposés aux risques côtiers : application au bâti résidentiel de Bretagne

I. Le Berre, D. Bailly, M. Philippe, Y. Kato 204

Identification et cartographie des zones à risque potentiellement mortel face à la submersion marine : l’indice de V.I.E. appliqué à La Faute-sur-Mer (Vendée, France)

A. Creach, D. Mercier, S. Pardo..... 214

From “Le trait de côte, sentier de transmission des risques côtiers” to the “Public perception of coastal flooding and erosion risk” : A short history from the Theseus project	
<i>J. Baztan, J.-P. Vanderlinden, N. Touili, I. O. Kane</i>	224
De nouveaux outils d'observation et de gestion du patrimoine littoral de la Bretagne	
<i>P. Olmos, E. López-Romero, M.-Y. Daire, J.-B. Barreau</i>	234
"Anticipando la Crecida": Tools for the contribution in risk and disaster management due to southeasterly winds and precipitation floods in "La Ribera" district, Buenos Aires province, Argentina	
<i>D. Moreira, E. Briche, M. Falco, F. A. Robledo, A. Murgida, I. Gatti, M. Duville, H. Partucci, M. Re, E. Lecertura, L. Kazimierski, P. Etala, C. Campetella, J. Ruiz, C. Vera, C. Saulo, C. Simionato, M. Saraceno, M. L. Clara, E. D'Onofrio, W. Dragani, M. Bertolotti, M. Saucedo, R. Vidal</i>	244
Exposition des infrastructures routières de l'Est du Québec (Canada) à l'érosion et à la submersion	
<i>S. Drejza, S. Friesinger, P. Bernatchez</i>	252
ROSCOF : Outil d'aide au recensement des ouvrages et structures côtières de France	
<i>A. Roche, X. Bertrand, H. Poirier</i>	261
Influence de la susceptibilité à l'érosion hydrique des bassins-versants sur l'évolution du rivage : exemples dans le sud de la Nouvelle-Calédonie	
<i>P. Dumas, O. Cohen</i>	269
Exposition des infrastructures à l'érosion côtière : Développement d'un outil de planification de l'aménagement côtier, Québec, Canada	
<i>C. Fraser, P. Bernatchez, S. Dugas</i>	279
La vulnérabilité face au risque de submersion marine : Exposition et sensibilité des communes littorales de la région Pays de la Loire (France)	
<i>E. Chevillot-Miot, D. Mercier</i>	289
L'extension des résidences secondaires sur le littoral de l'archipel de Kerkena : Enjeux et risques	
<i>M. Kebaïli Tarchouna</i>	298
Mise en perspective de la vulnérabilité des enjeux à l'érosion et aux différents types d'inondation sur la partie sableuse du littoral du Languedoc-Roussillon	
<i>P. Sauboua, H. Heurtefeux</i>	309

Thématique Représentations / Representations Thematic

Entre conscience collective et expertise profane : connaissances et perceptions sociales liées à l'érosion marine à Lacanau en Gironde	
<i>N. Rocle, B. Bouet, S. Chasseriaud</i>	319
Une vision exclusivement technique du littoral, longtemps imputée aux ingénieurs du génie civil, aujourd'hui dépassée. Étude des cas néerlandais, anglais et français	
<i>S. Gueben-Veniere</i>	328

Représentations des risques côtiers et stratégies d'adaptation : une manière d'appréhender la dimension humaine des risques côtiers

E. Michel-Guillou, C. Meur-Férec 339

Perception *versus* représentation du risque de submersion et autres risques : ce que révèle une querelle sémantique

H. Flanquart..... 353

Thématique Acteurs / Stakeholders Thematic

Quand la mer fait le mur : D'Anjouan (Comores) à Yaté (Nouvelle-Calédonie), paroles et actions autour de l'érosion des rivages insulaires

G. David, P. Dumas, L. Lancelot, C. Sabinot, K. Sinane 366

Analyse des solidarités territoriales facilitant l'adaptation à la montée du niveau de la mer : Quelques enseignements issus du projet SOLTER en Languedoc-Roussillon

H. Rey-Valette, Y. Balouin, C. Bazart, C. Bernier Boissard, V. Clément, O. Delanoë, Y. Foucher, B. Guérinel, C. Hérivaux, R. Morvan, J. Rosaz, B. Rulleau, P. Sauboua, M. Willinger 376

Gestion des risques côtiers et émergence de réseaux d'acteurs dans la Péninsule acadienne (Nord-Est du Nouveau-Brunswick)

J. Guillemot..... 386

Productions et circulation des connaissances sur les risques côtiers. L'exemple de la Bretagne

H. Martin-Brelot, F. Chlous 399

Thématique Politiques intégrées et stratégies / Management policies and strategies Thematic

La gestion des risques côtiers : L'évaluation des politiques publiques pour l'optimisation des performances de gestion des risques

S. Defossez 412

How to establish operational recommendations to manage sea flooding risk on a reclaimed coast? Should the inner shore of the Arcachon Bay (Gironde, France) be depolderised or should the dykes be maintained?

L. Goeldner-Gianella, F. Bertrand 421

Quelle gouvernance des risques littoraux aux îles Loyauté (Nouvelle-Calédonie), dans le cadre du réchauffement climatique ?

M. Le Duff, P. Dumas, M. Allenbach 429

Une stratégie régionale en Aquitaine pour la gestion de la bande côtière

A. Gueguen 437

La vulnérabilité des populations de la côte Est du Cotentin 1700-1914 : L'approche historique dans l'analyse des enjeux, de l'aléa et de la gestion du risque de submersion

S. Noël..... 445

Les sociétés antillaises face aux événements extrêmes : L'exemple des cyclones et des submersions (XVII^e- XX^e siècle)	
<i>J. Desarthe</i>	456
L'érosion des falaises côtières en région PACA : une approche interdisciplinaire géologie/sociologie	
<i>C. Claeys, N. Marçot, L. Fissier, J. Giuliano, T. Lebourg, V. Godard, T. Dewez</i>	465
Faisabilité de la relocalisation des activités et des biens menacés par des risques littoraux en France, l'exemple de Lacanau	
<i>M. Renard</i>	475
Liste des Posters / Posters List	485

THEMATIQUE ALEAS

HAZARDS THEMATIC

Dépôts évènementiels holocènes du littoral de la région de Temara-Skhirat (Maroc)

Driss Chahid^{1,2}, Arnaud Lenoble³, Larbi Boudad¹, Brigitte Van Vliet-Lanoë⁴

1. Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, BP 11201 Zitoune, Meknès, Maroc

l.boudad@fste-umi.ac.ma; chahid_d@yahoo.fr

2. Muséum National d'Histoire Naturelle, Département de Préhistoire, UMR 7194, Institut de Paléontologie Humaine, 1 rue René Panhard, 75013 Paris, France,

3. PACEA UMR CNRS 5199 Université de Bordeaux, Bât B.18. Avenue Geoffroy St Hilaire F- 33 615 Pessac, arnaud.lenoble@u-bordeaux.fr

5. Laboratoire Domaines Océaniques (UMR 6538), Université de Bretagne Occidentale, IUEM, 29280 Plouzané, France, brigitte.vanvlietlanoë@univ-brest.fr

RESUME. El Harhoura (Témara, Maroc du NO), une formation dunaire meuble a été identifiée. Elle est composée d'une succession de dépôts sableux massifs riches en gastéropodes et parfois en coquilles marines complètes ou fragmentées, superposés ou emboîtés, et portant à leur sommet des sols jeunes. Ces unités attestent de dépôts évènementiels, de type tempêtes ou tsunamis. Les datations, effectuées de bas en haut de la coupe, donnent les dates suivantes : 9700 cal BP, 2700 cal BP et 2 300cal BP. A Skhirat, la morphologie, la texture et les structures sédimentaires du cordon littoral récent révèlent un édifice dont la base est constituée d'un washover-fan de tempêtes. La datation des unités inférieure et supérieure permet de situer l'édification de ce dépôt de tempêtes entre 4000 et 7400 cal BP. En direction de la plage, un beachrock contient des amas de moules et de galets de différentes tailles, ainsi que des mégablocs anguleux. Ces éléments signent également un dépôt évènementiel.

MOTS-CLES : Tsunami, Tempêtes, dune, mégablocs

ABSTRACT. A dune has been identified in El Harhoura (Temara, NW Morocco). The dune is composed of a succession of units of superimposed sandy deposits, bearing at their top young soils, full of gastropods and sometimes some marines shells, completes or in debris. These overlapping units attest of extreme events which might be storms or tsunamis. The dune has been dated from the bottom to the top of this section: 9,700 cal BP, 2,700 cal BP and 2,300 cal BP. In Skhirat, the morphology of the recent of dune ridge, its sedimentary structures and its texture show that it is mainly built by of a washover-fan. Dating of the lower and the highest units indicates that this formation was active between 4000 and 7400 cal BP. Toward the coast, the beachrock is composed of concentration of mussels and pebbles of different sizes, as well as boulders. These elements also indicate extreme events.

KEYWORDS: Tsunamis, storms, dune, boulders

1. Introduction

Le littoral atlantique du Maroc est particulièrement exposé aux phénomènes de tsunamis ou de tempêtes. La connaissance des événements passés (récurrence, importance) peut fonder une connaissance du risque lié à ces aléas. La contribution de ces événements catastrophiques à la morphogenèse et à la sédimentation littorale reste cependant peu connue. Quelques études réalisées ces dernières années montrent toutefois que des dépôts de tsunamis existent le long du littoral atlantique marocain. Il y sont représentés par des accumulations de mégas blocs (Mhammdi *et al.*, 2007 ; Medina *et al.*, 2011), d'une part, et de *washover-fans* tsunamogéniques (Leorri *et al.*, 2010 ; Mellas, 2011), d'autre part.

Il est vraisemblable que l'existence passée des événements morphogéniques rares reste sous-estimée. Nous présentons en ce sens de nouvelles évidences de dépôts événementiels holocènes, sur la base de l'étude morphologique, sédimentologique et chronostratigraphique de deux affleurements situés à Rabat et à Skhirat. Notre contribution consiste à montrer la récurrence de ces dépôts événementiels dans ce secteur et à les situer dans un cadre chronologique précis.

2. Les paramètres géologique et géomorphologique

La bande côtière atlantique entre Rabat et Skhirat (fig. 1) est constituée de formations quaternaires formées de plusieurs cordons littoraux allongés et juxtaposés parallèlement au trait de la côte. La falaise vive est creusée dans le dernier cordon et s'interrompt pour former des criques et de courtes plages.

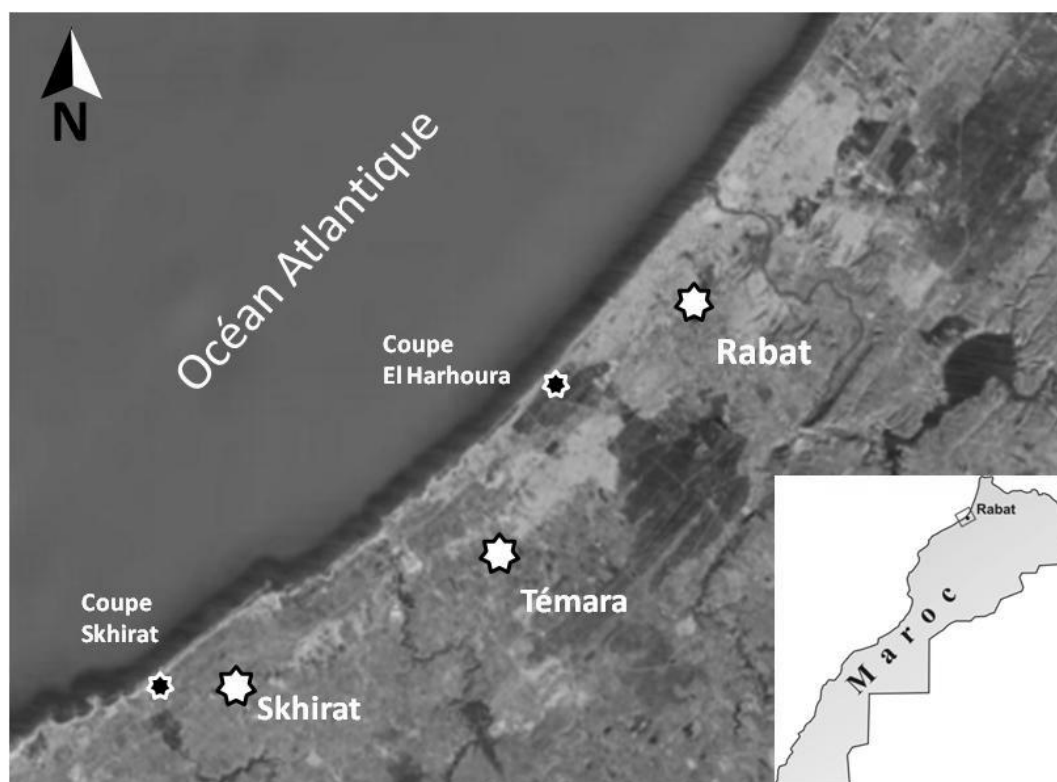


Figure 1. Situation géographique de la région d'étude et localisation des coupes présentées (Image Google Earth, 2014).

3. Méthode d'étude

Trois missions de terrain ont été effectuées ; la première au mois de juin 2012, la deuxième en juin 2013 et la troisième en février 2014. L'étude de terrain consiste à décrire la morphologie, établir la stratigraphie et reconnaître la lithologie des dépôts. Ce travail se complète de la prise de d'échantillons, prélèvements orientés pour l'étude pétrographique, prélèvements de sables meubles pour l'étude granulométrique et prélèvements de matériel (charbon, escargots et coquillages) pour les datations radiométriques. La calibration des datations a été effectuée avec le logiciel Calib 7.0. La correction de l'effet réservoir de l'océan a été réalisée, au besoin, en utilisant la valeur de Delta R du Sud du Faro (Portugal), la seule disponible dans la région.

4. Résultats

4.1. La coupe d'El Harhoura

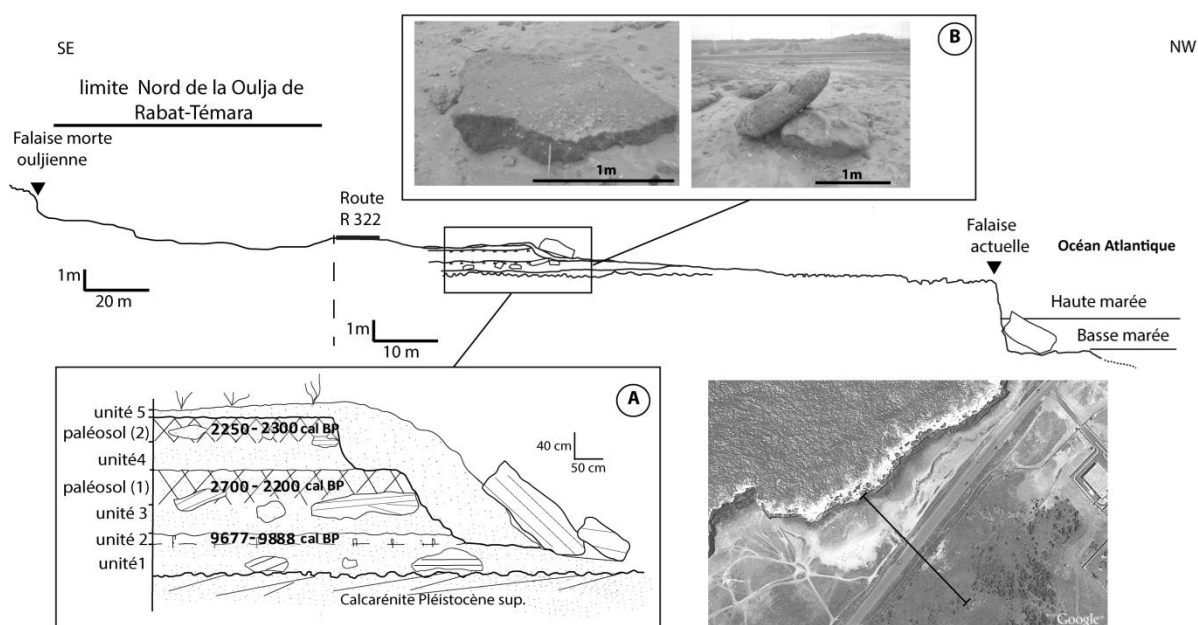


Figure 2. Profil d'El Harhoura, A. Détail de la coupe d'El Harhoura avec les dates obtenues, B. Photos de blocs arrachés et déplacés après les tempêtes de l'hiver 2013-2014.

Un massif de calcarénites pléistocènes porte, à une vingtaine de mètres en recul de la côte et à une altitude de 8 m NGM, une formation dunaire meuble d'une puissance de 2 m au plus (fig.2). Celle-ci est constituée d'une succession de dépôts sableux massifs superposés ou emboîtés, portant à leur sommet des sols organiques jeunes, riches en gastéropodes et parfois en coquilles marines complètes ou fragmentées (amas coquiller avec charbons de bois).

Sous le microscope, ces dépôts se caractérisent par un microfaciès de sable coquillier mal classé à faible diagenèse et à nombreux débris de coquilles anguleuses. Ces caractères témoignent d'une réjuvenation du stock sédimentaire (Vött, 2010 ; Caron, 2011 ; Frébourg, 2008). Ces unités superposées sont ainsi caractéristiques de dépôts événementiels, de type tempête ou tsunami (Frébourg, 2010).

L'épaisseur importante des unités (>25cm), l'absence de lits fins et la faible étendue de la coupe suggère un dépôt de type tempêtes (Morton, 2007), bien que ces critères ne soient pas suffisants pour déterminer de façon certaine le mécanisme de mise en place de ces formations (Tuttle *et al.*, 2004).

Des amas mégablocs anguleux de calcarénites observés sous le paléosol 1 et contre la coupe, suggèrent une mise en place par des tsunamis, au regard de leur volume (15 tonnes) et de leur position imbriquée. Des gastéropodes terrestres frais incorporés dans la première unité ont donné une date maximale de 9 677calBP – 9 888cal BP pour ce dépôt.

Les dates obtenues dans les deux niveaux intermédiaires d'El Harhoura (fig. 2) encadrent des événements qui se corrélaient bien avec les dépôts deux tsunamis du Golfe de Cadiz (Luque *et al.*, 2002 ; Lario *et al.*, 2011) et du littoral marocain (Mellas, 2012), suggérant une origine tsunamogénique potentielle. Le dépôt le plus récent pourrait être contemporaine au tsunami de Lisbonne (Médina *et al.*, 2011 ; Scheffers *et al.*, 2005), ce dernier étant reconnu comme ayant impacté le trait de côte local (synthèse in Mhammedi *et al.*, 2008).

La coupe d'El Harhoura fait donc apparaître une récurrence de dépôts événementiels au cours des derniers millénaires, dont certains au moins sont vraisemblablement liés à des tsunamis.

A l'exception de l'unité de base qui s'accompagne de la mise en place d'un champ de blocs de très grande taille, la distinction tsunami / tempête reste cependant délicate. Cela est en particulier illustré par les tempêtes exceptionnelles qui se sont succédé sur le littoral européen et nord africain cours de la période de janvier-février de l'année 2014. L'impact et les dégâts issus de la force de la houle (> 10 m d'amplitude)- de cette série de tempêtes ont été exceptionnels. Lors de cette période, nous avons revisité la coupe et nous avons constaté que les vagues en ont détruit une grande partie, avec déplacement et arrachement de blocs de tailles variables centimétriques à métriques. Le comportement des tempêtes importantes sur la côte atlantique marocaine semble donc similaire à celui des tsunamis, au moins sur la première cinquantaine de mètres de la bande littorale. Une telle similarité rend difficile la détermination du type de la dynamique responsable des dépôts fossiles à mégablocs remobilisés.

4.2. La coupe de Skhirat

A Skhirat, le littoral prolongeant au Nord de l'embouchure de l'oued Cherrat est constitué d'un cordon récent incluant le site préhistorique de Rouazi où ont été découvertes de nombreuses sépultures (Daugas *et al.*, 1989 ; Texier *et al.*, 2008).

Notre travail consiste à préciser les conditions de formation de ce cordon littoral. La morphologie a révélé un emboîtement de trois corps sédimentaires stratifiés métriques séparés par une surface d'érosion (fig. 3) et surmontant un *beachrock* faiblement consolidé (fig. 3).

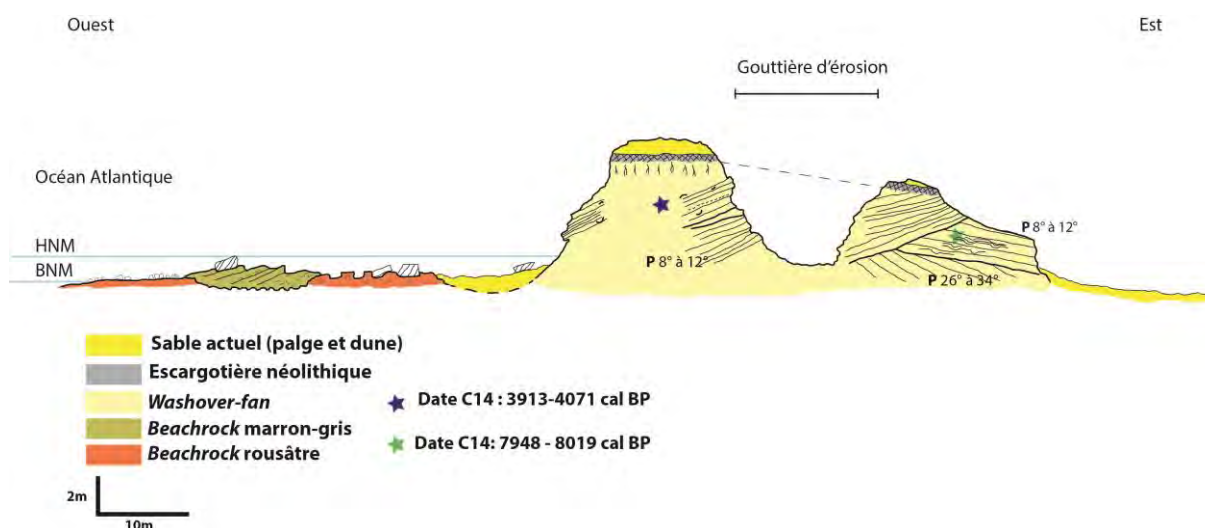


Figure 3. Coupe du cordon littoral de Skhirat et localisation des échantillons datés.

Les structures sédimentaires (litages, figures de charges, lits de coquilles et galets centimétriques) et la texture indiquent que les dépôts de la base de ce cordon relèvent d'une dynamique de déferlement de houle associée à la construction d'un *washover-fan* (Roep *et al.*, 2007, Wang *et al.*, 2007). Au niveau microscopique, ces dépôts se caractérisent par un microfaciès de sables coquilliers à bon classement et diagenèse précoce. Les débris coquilliers sont roulés et similaires à ceux présents dans le sable de la plage actuelle. Ces éléments indiquent que les vagues de tempêtes poussent les sables de plages vers l'*onshore* où ce stock sédimentaire s'accumule sous une morphologie de cordon littoral (Bridge et Demicco, 2008).

La datation des unités inférieure et supérieure situe l'édification de cet éventail de tempête entre 4000 et 7400 cal BP, c'est-à-dire pendant l'Holocène moyen.

Ces deux unités sont coiffées par une dune fixée altérée par un paléosol décarbonatant (rhizomorphes carbonatés) et humifère, coiffé par 3 niveaux d'amas coquillier (moules, murex) avec charbons de bois, puis surmonté par la dune actuelle.

Les *beachrocks* contiennent des amas de moules et de galets de différentes tailles, ainsi que des mégablocs anguleux. Ces derniers sont déposés en trois phases :

- au niveau du *beachrock* rosâtre à coquilles continentales et marines,
- au niveau du *beachrock* marron-gris à lits de moules orientées,
- sur la surface des plages consolidées et sur la plage sableuse actuelle.

Ces éléments signent également un dépôt événementiel (Massari *et al.*, 2009, Gutiérrez-Mas *et al.*, 2012).

Cette configuration de corps sédimentaire sub-linéaires rarement interrompu sauf par les eaux de tempêtes (*washover fan*) indique un environnement micro-tidal dépourvues de marées trop fortes au moins durant l'Holocène moyen et récent.

5. Conclusion

L'identification de ces dépôts « dits événementiels » se base sur la définition de critères analogiques ou/et de différenciation avec les dépôts « modaux » provenant de mécanismes

ordinaires, plus fréquents et d'amplitude moyenne (Bruzzi et Prone, 2000). Les deux coupes étudiées montrent deux cas de réponses de la côte atlantique marocaine aux événements extrêmes durant le Quaternaire.

La coupe d'El Harhoura a enregistré plusieurs niveaux qualifiés de haute énergie où il reste difficile de déterminer s'ils résultent d'un phénomène de tempête ou de tsunami, en particulier parce que le comportement des vagues de tempêtes sur la côte atlantique marocaine présente des similarités avec celles des vagues de tsunamis.

Le cœur du cordon de Skhirat est un cordon de tempêtes et la plage supporte trois épisodes distincts de dépôts de mégablocs résultant d'une dynamique de haute énergie.

Comme perspectives, nous pensons à renforcer et élargir cette étude par l'exploitation de données de micropaléontologie (Dawson et Shi, 2000; Vött *et al.*, 2009) et la recherche de sites de comparaison (tempêtes et tsunamis) sur le littoral atlantique marocain.

Remerciements:

Nous remercions très sincèrement Monsieur Alain Queffelec (ingénieur au Laboratoire PACEA) et Madame Patricia Wils (ingénieur au MNHN) pour leur aide et leurs suggestions lors de la description et l'étude des échantillons au laboratoire.

Bibliographie

- Bridge J., Demicco R. (2008). *Earth Surface Processes, Landforms and Sediment Deposits*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Bruzzi C., Prone A. (2000). Une méthode d'identification sédimentologique des dépôts de tempête et de tsunami : l'exoscopie des quartz, résultats préliminaires, *Quaternaire*, 11 (3-4), p. 167-177.
- Caron V. (2011). Contrasted textural and taphonomic properties of high-energy wave deposits cemented in beach-rocks (St. Bartholomew Island, French West Indies), *Sedimentary Geology*, 237 (3-4), p. 189-208.
- Dawson A.G., Shi S. (2000). Tsunami deposits, *Pure and Applied Geophysics*, 157, p. 875-897.
- Medina F., Mhammdi N., Chiguer A., Akil M., Jaaidi E. B. (2011). The Rabat and Larache boulder fields; new examples of high-energy deposits related to storms and tsunami waves in north-western Morocco, *Natural Hazards*, 59, p. 725-747.
- Massari F., D'Alessandro A., Davaud E. (2009). A coquinoïd tsunamite from the Pliocene of Salento (SE Italy), *Sedimentary Geology*, 221, p.7-18.
- Frébourg G., Hasler C.-A., Le Guern P., Davaud E. (2008). Facies characteristics and diversity in carbonate eolianites, *Facies*, 54, p. 175-191.
- Frébourg G., Hasler C.-A., Davaud E. (2010). Catastrophic event recorded among Holocene eolianites (Sidi Salem Formation, SE Tunisia), *Sedimentary Geology*, 224, p. 38-48.
- Gutiérrez-Mas J. M., Mas R. (2012). Pliocene lithofacies within the marine geologic record from the cadiz bay (SW Spain): Environments and processes, *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 25 (3-4), p. 119-132.
- Lario J., Zazo C., Goy J.L., Silva P.G., Bardaji T., Cabero A., Dabrio C.J. (2011). Holocene palaeotsunami catalogue of SW Iberia, *Quaternary International*, 242, p. 196-200.
- Leorri E., Freitas M.C., Zourarah B., Andrade C., Mellas S., Cruces A., Griboulard R., Lopes V. (2010). Multiproxy approach to characterize an overwash deposit: Qualidia lagoon (Moroccan Atlantic coast), *Geogaceta*, 48, p. 23-27.

- Luque L., Lario J., Civis J., Silva P.G., Zazo C., Goy J.L., Dabrio C.J. (2002). Sedimentary record of a tsunami during Roman times, Bay of Cadiz, Spain, *Journal of Quaternary Science*, 17 (5-6), p. 623-631.
- Mhammdi N., Medina F., Kelletat D., Ahmamou M.F., Aloussi L. (2008). Large boulders along the Rabat coast (Morocco); possible emplacement by the november, 1st, 1755 A.D. tsunami, *Science of Tsunami Hazards*, vol. 27, n°1, p. 17-32.
- Morton R.A., Gelfenbaum G., Jaffe B.E. (2007). Physical criteria for distinguishing sandy tsunami and storm deposits using modern examples, *Sedimentary Geology*, 200, p. 184-207.
- Scheffers A., Kelletat D. (2005). Tsunami relics on the coastal landscape west of Lisbon, Portugal, *Science of Tsunami Hazards*, 23, p. 3-16.
- Roep Th.B., DabrioCristino J., Fortuin A.R., Polo C., María D. (1998).Late highstand patterns of shifting and stepping coastal barriers and washover-fans (late Messinian, Sorbas Basin, SE Spain), *Sedimentary Geology*, 116 (1-2), p. 27-56.
- Tuttle M.P., Ruffman A., Anderson T., Hewitt J. (2004). Distinguishing tsunami from storm deposits in eastern North America.The 1929 Grand Banks tsunami versus the 1991 Halloween storm. *Seismological Research Letters*, 75, p. 117-131.
- Vött A., Brückner H., Brockmüller S., Handl M., May S.M., Gaki-Papanastassiou K., Herd R., Lang F., Maroukian H., Nelle O., Papanastassiou D., (2009). Trace of Holocene tsunamis across the Sound of Lefkada, NW Greece, *Global and Planetary Change*, 66, p. 112-129.
- Vött A., Bareth G. Brückner H., Curdt C., Fountoulis I., Grapmayer R., Hadler H., Hoffmeister D., Klasen N., Lang F., Masberg P., May S. M., Ntageretzis K., Sakellariou D., Willershäuser T. (2010). Beachrock-type calcarenitic tsunamites along the shores of the eastern Ionian Sea (western Greece)-case studies from Akarnania, the Ionian Islands and western Peloponnese, *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplementary issues, vol. 54, n°3, p. 1-50.
- Wang P., Horwitz M.H. (2007). Erosional and depositional characteristics of regional overwash deposits caused by multiple hurricanes, *Sedimentology*, 54, p. 545-564.

Enregistrement des tempêtes holocènes en Bretagne

Chronologie, forçages climatiques et implications.

Brigitte Van Vliet-Lanoë¹, Alain Hénaff², Jérôme Goslin², Bernard Hallégouët², Christophe Delacourt¹, Aurélie Penaud¹, Erwan le Cornec³

(1) UMR 6538 CNRS Domaines Océaniques, IUEM, Brest University, U@B, rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France. Brigitte.vanvlietlanoe@univ-brest.fr

(2) UMR 6554 CNRS LETG-Geomer IUEM, Brest University, U@B, rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France

(3) GEOS AEL, 12 rue Maréchal Foch, 56410 Etel, France

RESUME. Ce travail présente les conditions de forçage climatique induisant la formation des très fortes tempêtes en France du Nord-Ouest et de leurs impacts sédimentaires. Il est basé sur l'étude de l'enregistrement des tempêtes sur la côte ouest de la Bretagne. Dans un premier temps, la récurrence et les mécanismes de forçages sont analysés. Les périodes de fréquence élevée de tempête sont analysées pour les deux derniers siècles pour en extraire les mécanismes de forçage climatique (modes de la NAO et de l'AMO), responsables des tempêtes les plus violentes. Le schéma produit semble aussi valable pour les 6000 dernières années. La plupart des événements enregistrés sont apparemment connectés aux événements de refroidissement, plutôt hivernaux, à une période de transition vers ou depuis une période de NAO décennale négative et à une AMO positive. Des tempêtes monstrueuses apparaissent immédiatement avant l'optimum thermique médiéval : les conditions favorables sont ici une AMO positive, un jetstream instable associé à un mode décennal négatif de la NAO. Dans ce travail nous avons pu définir quatre configurations météorologiques pour expliciter chaque type de tempétuosité rencontrée. Les tempêtes les plus violentes sont associées à un mode négatif de l'AMO associé à une NAO décennale négative (par ex. Petit âge glaciaire) ou une AMO importante associée à une NAO décennale négative, comme au début de l'Optimum du Moyen Age et la période actuelle. Un océan tropical tiède ou chaud en association avec une NAO décennale positive sont tempétueux mais avec une basse fréquence de sting storms. L'augmentation de la force et de la fréquence des tempêtes lors de l'Holocène final est conforme au forçage orbital, mais également à l'augmentation de la fréquence des minima solaires et leurs conséquences climatiques (refroidissement). Cette situation induit régionalement un déficit sédimentaire à la côte, qui va, à terme, amener la disparition des cordons littoraux en Bretagne et augmenter le risque de submersion.

ABSTRACT. This study focuses on the recurring climate conditions required for the largest storms occurring in NW France (Brittany) and their sedimentary consequences. It is based on the analyzed records of storm events along Western Brittany coasts. Firstly, storm recurrence is explored as well as forcing mechanisms. Periods of more frequent storm events over the two last centuries are analyzed in first in order to link these events with possible forcing climatic mechanisms (NAO and AMO modes) triggering the most destructive storms. This sketch seems valid for the last 6000 years. Most recorded events appear to be linked with cooling episodes, mostly in winter, a transition to or from a negative winter NAO decennial mode, a positive AMO mode. Extreme storms occur immediately prior to the Medieval Warm Period. Main storm triggers seems to correspond to a positive AMO mode with an unstable Jetstream configuration driving a negative decennial NAO. In this study, four specific weather configurations were defined to explain each type of recorded storminess. The strongest storms correspond to low AMO and decennial negative NAO modes (e.g. LIA), or high AMO in association with dominant low NAO modes, as during the Early Middle Age and present-day period. Mild or warm tropical ocean in association with a positive NAO mode are stormy but with very low sting storms frequency. Although in agreement with the orbital forcing, increasing storm frequency and intensity in the late Holocene is also connected with the higher frequency in solar minimal activity and its impact on climate (cooling). This situation implies a coastal sedimentary starvation that will result in the disappearance of coastal ridges in Brittany and increase the potential for coastal submersion.

MOTS-CLES : Bretagne, Tempétuosité, Niveau Marin, NAO, AMO, Minimum Solaire, Déficit Sédimentaire.

KEYWORDS: Brittany, storminess, sea level, NAO, AMO, solar low, sedimentary starvation.

AVANT-PROPOS

Le travail présenté ici donne les principaux résultats de la tâche « Archives Géologiques » du **programme ANR COCORISCO (CEP&S, 2010-CEPL-001-01)**. Il ne s'agit donc pas d'un article au sens classique du terme. Ce résumé étendu a pour but de rendre accessible au plus grand nombre les acquis de cette partie du programme.

1. INTRODUCTION

En Europe de l'Ouest, l'activité tempétueuse a été parfois attribuée à des conditions météorologiques générées par une oscillation Nord-Atlantique positive (NAO ; www.ifremer.fr/lpo/thuck/nao/nao.html), en d'autres termes, des conditions de circulation atmosphérique d'ouest et météorologiques chaudes et pluvieuses (Pirazzoli, 2000). L'analyse des longues séquences littorales dunaires d'Europe occidentale a montré que l'impact des tempêtes prévalait surtout pendant des périodes de refroidissement de l'Hémisphère nord (Bärring et Fortuniak, 2009 ; Orford *et al.*, 2000; Clarke et Rendell, 2009), en particulier pendant le Subboréal (Holocène moyen). Les archives écrites et les données instrumentales, bien que discontinues, témoignent du caractère plus tempétueux du Petit Âge Glaciaire par rapport à l'actuel (ca AD 1300-1900) dominé par une NAO décennale surtout négative (Trouet *et al.*, 2009). La période chaude de l'Optimum thermique médiéval est, par contre, associée à une NAO décennale à dominante positive. Les formations de dunes sont généralement attribuées à un contexte de régression marine, mais elles apparaissent à l'Holocène en contexte de montée du niveau marin (transgression). Néanmoins, Orford *et al.* (2000), ont suggéré que leur mise en place se faisait probablement en association avec une régression limitée (moins de 50 cm), sans doute liée à la contraction thermique de l'océan (baisse thermostérique). L'apparition de dunes en contexte transgressif nous semble une anomalie forcée par les activités humaines (érosion des sols fournissant du sable à la côte ; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2014c). Pour les côtes du Nord-Ouest de l'Europe, les synthèses des données météorologiques et climatiques disponibles depuis le XVI^{ème} siècle dans la littérature anglo-saxonne suggèrent que l'augmentation de la fréquence des tempêtes au Petit Âge Glaciaire a induit la construction des massifs dunaires littoraux actuels (Orford *et al.*, 2000 ; Clarke & Rendell, 2009).

Notre étude vise à comprendre l'enregistrement stratigraphique des périodes de tempêtes à l'Holocène moyen et supérieur, dans un secteur de la côte française, celui de l'ouest de la Bretagne, très exposé aux houles atlantiques. Des transects de forage et des suivis stratigraphiques sur coupes ont été effectués puis datés afin de déterminer l'environnement chronologique des dépôts holocènes et les périodes de manifestation de tempêtes. Les formations littorales actuelles recouvrent essentiellement l'Holocène supérieur, surtout depuis l'époque romaine, avec quelques traces d'évènements plus anciens.

2. HISTOIRE DU NIVEAU MARIN RELATIF HOLOCENE DE LA BRETAGNE

L'évolution du niveau marin reconstruit dans ce programme (Goslin *et al.*, 2013 ; Goslin , 2014) atteste d'une remontée progressive du niveau marin depuis la déglaciation, semblable à celle observée à l'échelle de la façade ouest-européenne (cf., entre autres, Shennan et Horton, 2002, Massey *et al.*, 2006) . Une décélération par étapes de la remontée du niveau marin s'observe vers 7500, 6000, 4500 et 3000 cal BP (Goslin *et al.*, 2013 ; Goslin, 2014) (BP = date par rapport à 1950 ; cal = calibration du radiocarbone). Ces ralentissements progressifs de la remontée du niveau marin ont permis la construction des accumulations sédimentaires littorales. D'une manière générale, la zone intertidale actuelle est atteinte par les hautes mers vers 5000 BP. Plusieurs études ont montré que des quantités importantes de sédiment étaient remaniées en zone infratidale (Houser *et al.*, 2008) voire exportées vers le large lors de tempêtes (Goff *et al.*, 2004). Les différents hauts niveaux et bas

niveaux marins holocène précédemment décrits en Bretagne (Morzadec, 1974 ; Guilcher et Hallégouët, 1991, Stéphan, 2011) correspondent en fait à des artéfacts sédimentaires. Comme nous avons pu le démontrer (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2014a), certains de ces artéfacts résultent de terrasses de tempêtes (Mc Kenna *et al.*, 2012) ou des surfaces d'érosion de tempêtes (Retallack et Roering, 2012). De profondes réorganisations des systèmes sédimentaires lagunaires et d'arrière cordon sous l'influence (i) du recul des cordons, (ii) de la tempétuosité mais aussi (iii) de la modifications du lit des cours d'eau côtiers sont aussi invoqués (Goslin *et al.*, 2013 ; Goslin, 2014, Stéphan *et al.*, accepté). L'enregistrement stratigraphique de l'ouest de la Bretagne, très exposé aux grandes tempêtes, est pour cette raison discret pour la première partie de l'Holocène, l'essentiel des formations étant érodé au fur et à mesure de la remontée du niveau marin, notamment en relation avec l'efficacité du travail de la houle. La formation des dunes s'est probablement initiée vers 3000 av JC simultanément avec le ralentissement de la remontée du niveau marin, mais l'essentiel des champs de dunes n'est apparu que depuis 1000 av JC. Les champs de dunes sont plus récents en Bretagne Sud.

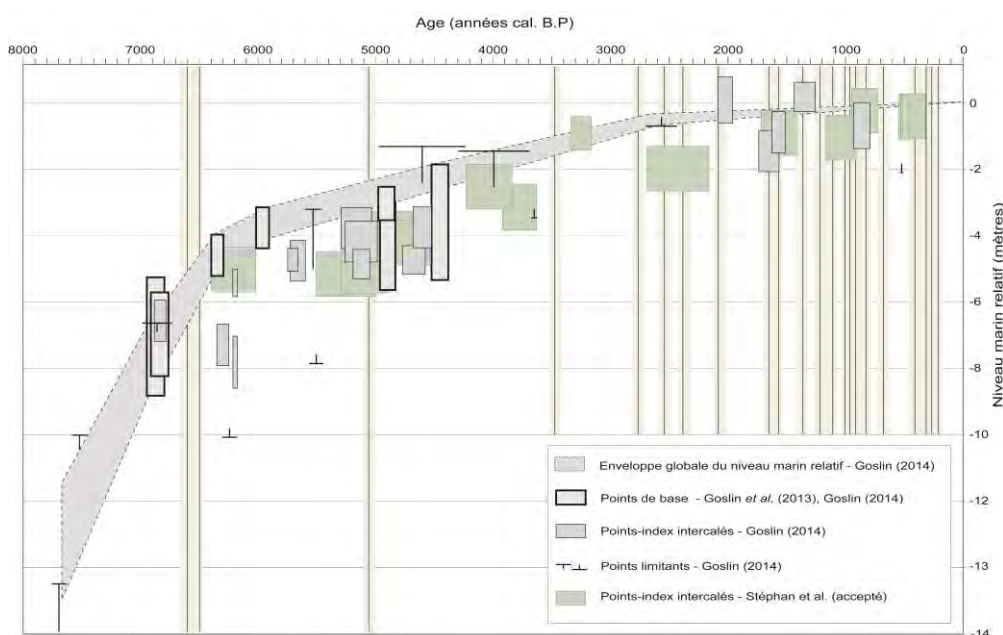


Figure 1: Evolution du niveau marin relatif en Bretagne (Goslin, 2014), à partir des niveaux de tourbes de base (sur substrat non compactable). Les barres verticales grises représentent les périodes de tempête.

3. L'ENREGISTREMENT SEDIMENTAIRE DES TEMPETES

Les faciès de tempêtes reconnus correspondent à des dépôts de débordement (washover washover-fan), avec localement des déformations induites par le déferlement des vagues. Ces épandages de graviers, de galets et de coquilles, tronquent les formations dunaires, érodent les tourbières des marais arrière-dunaires ou provoquent l'arrêt de la tourbification (avec contenant parfois des arbres fossiles) dans ces milieux. Ces faciès de tempêtes ou peuvent ensuite être de nouveau sont enfouis souvent sous des dépôts lacustres, lagunaires ou marins. En présence de washover washover-fans, la stratification est rythmée, avec une alternance de sablons et de sables, ou avec une alternance de malacofaune marine ou saumâtre et de gastéropodes terrestres. Les cordons préhistoriques et de l'époque romaine sont souvent déjà remaniés et repris dans les cordons actuels. Le cordon littoral récent s'est formé à partir de 800-1100 AD (période précédant l'Optimum du Moyen Âge) à aujourd'hui ; il s'agit le plus souvent d'un cordon de type washover-fan, interstratifié par de la dune et coiffé par une dune mince ; il n'en subsiste actuellement que le revers. Une partie du sable est probablement évacuée au large par les tempêtes répétitives et puissantes

(Wolf, 2009 ; Goff *et al.*, 2004), et ce, depuis la période de l'an Mil. Ces cordons ont été fortement érodés au Petit Âge Glaciaire avec également un épandage éolien de sables d'ordre kilométrique vers l'intérieur des terres. Le stock de sables semble donc diminuer rapidement. Lors d'une tempête modérée, ces sables migrent vers la zone infratidale et/ou vers les petits fonds et reviennent généralement à la côte pendant la période calme estivale pour construire une fore-dune. Il faut souligner les pratiques des extractions massives de sable (carrières dans les dunes et les cordons littoraux) ou au large qui, localement depuis la dernière guerre, ont encore fortement fait baisser le stock de sable.

4. L'ENREGISTREMENT DES TEMPÊTES ANCIENNES : Apports de la géologie et des archives.

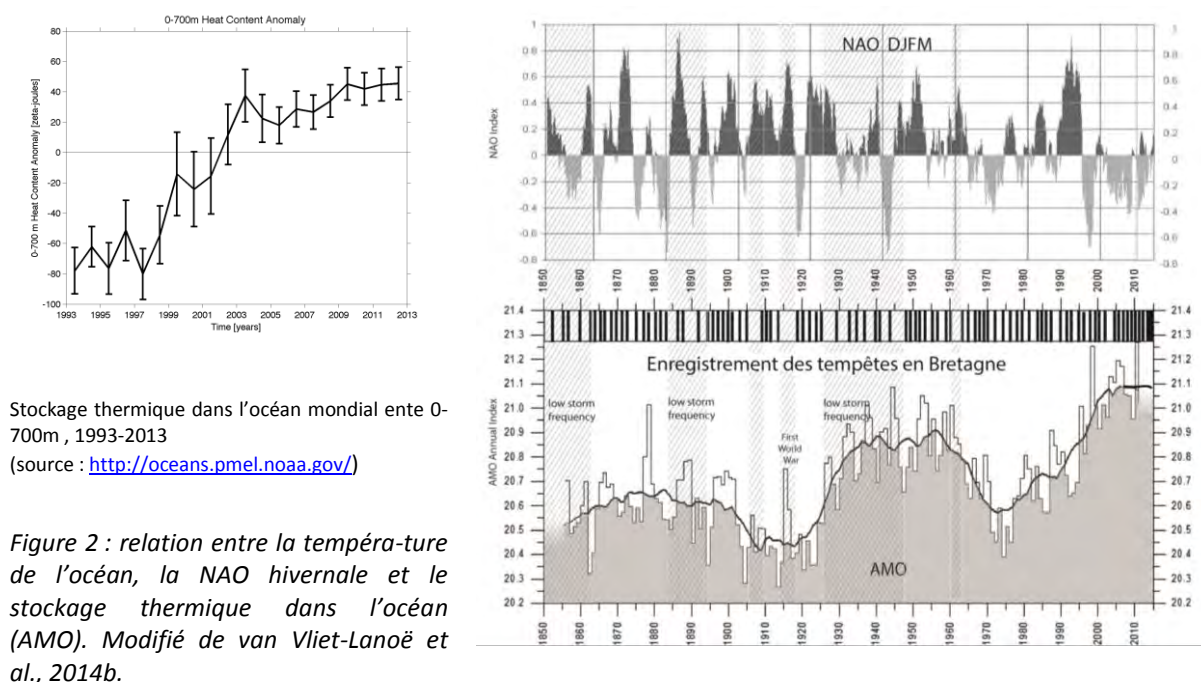
Les données extraites des enregistrements géologiques ont permis de mettre en évidence une série d'événements tempétueux historiques : 125 ± 50 , 310 ± 50 , 400 ± 50 , 640 ± 50 , **800 ± 50** , **900 ± 50** , **1010 ± 50** , **1050 ± 50** , **1100 ± 50** , 1192 ± 50 , 1335 ± 50 , 1597 ± 50 , 1703 ± 50 , 1750 ± 50 , 1806 ± 50 . Pour la partie préhistorique, différents événements ont été observés à 6600 ± 50 cal BP, 6050 ± 50 cal BP, 5500 ± 50 cal BP, 4650 ± 50 cal BP, 3400 ± 100 cal BP, 2750 ± 50 cal BP, 2535 ± 50 cal BP, 2360 ± 50 cal BP, 2060 ± 30 cal BP (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2014a). Ces données ont été consolidées avec les enregistrements stratigraphiques à l'échelle de la Bretagne et des régions avoisinantes. La période 800-1100 apparaît ainsi riche en très grosses tempêtes de rang millénaire. Par ailleurs, l'analyse des archives historiques a permis de mettre en évidence les événements suivants (tableau 1). L'apparition de l'imprimerie dès le 16^{ième} siècle et des registres de navigations contribuent largement à la production de cet inventaire. L'apport des journaux et documents officiels est surtout sensible à partir du 18^{ième} siècle (Lamb et Frydendahl, 2005 ; Marusek, 2010 ; Hénaff *et al.*, 2012). Pour la période 2013-2014, seules les **tempêtes majeures** ont été prises en compte (vents > 120 km/h). Les tempêtes hivernales sont, de loin, les plus fréquentes. Des tempêtes monstreuses ont marqué la mémoire collective comme celle de décembre 1703 (Daniel Defoe), de 1735 ou de 1896.

Siècle	Enregistrement des tempêtes d'après la littérature pour la Bretagne et la Manche Occidentale	Nb
21e	2014 (10), 2013, 2012, 2011, 2010 (2), 2009, 2008, 2007 (4), 2006, 2005, 2004, 2002, 2000 (2),	27
20e	1999(3), 1998, 1996, 1995 (2), 1993, 1992, 1990 (4), 1989 , 1987 , 1986, 1985, 1984, 1982, 1979 (2), 1978 (2), 1976 (2), 1974 (3), 1972 , 1970, 1969 , 1968, 1967(2), 1966, 1965(2), 1964, 1963 (2), 1962, 1961, 1960 (2), 1959, 1957(2), 1955, 1954, 1953, 1952, 1949, 1948 , 1943, 1941, 1940 (2), 1937(2), 1935, 1933, 1930, 1929 (2), 1928 (2), 1927, 1925 1924 (2), 1923 (2), 1920, 1918, 1911, 1910, 1909(2), 1905, <u>1904</u> , 1901, 1900	84
19e	1899, 1898 , <u>1897</u> , 1896 (2), 1894, 1892, 1887, 1886 (4), 1883, 1882 (2), 1881, 1880, <u>1877</u> (2), 1876 , 1875, 1872, 1871, <u>1869</u> , 1867, 1866, 1865 (2), 1864, <u>1863</u> , <u>1860</u> , <u>1857</u> , 1856, 1852, 1846, 1842 (2), 1836, 1838, 1833, 1830, 1828, 1826, 1824 , <u>1821</u> , <u>1820</u> , 1818, 1817, 1811, 1808 , <u>1804</u> (2)	52
18e	1799, 1797, 1796, 1795 , 1791, <u>1781</u> , 1780, 1773, 1770, 1768, <u>1765</u> , 1760, 1758, <u>1756</u> , 1755, 1753, 1752, <u>1751</u> , 1746, <u>1743</u> , 1739, 1738, <u>1736</u> , 1735 , 1724, 1723, 1722, 1717, <u>1714</u> , 1712, 1709, <u>1705</u> , 1703 ,	33
17d	1699, 1671, 1666, 1665 (2), 1659 (2), 1658 , 1638, <u>1606</u> (2),	11
16e	1598, 1597, 1588 , 1560, 1559, 1558, 1555, 1552, 1551, <u>1550</u> , 1544, 1532, <u>1523</u> , 1520, 1519,	15
15e	1418	1
14e	1396 , 1383 , 1382 , 1379, 1372, 1362, 1360, <u>1333</u> , <u>1334</u> , 1320,	10
13e	1284, 1269, 1242, 1224, 1222, 1215 , 1206,	7
12e et plus anciens	1177 , 1777 , 1172 , 1171 , 1169, 1157, 1155, 1125, 1110, 1119, 1099, 1095 , <u>1092</u> , <u>1091</u> , 1075, 1052 , 1030, 1016 , 1014 , 935 , 921 , 900 , <u>803</u> , <u>800</u> , 710, 709 or 700, 640-670, 567 or 540-600, 559 (2), 429, 320, - 55 & -54 BC	

5. LES FORCAGES CLIMATIQUES

Cette approche nous permet d'analyser les conditions de forçages climatiques. Les témoignages de tempêtes les mieux enregistrées, parfois associées à une rupture de cordon observable en stratigraphie, semblent être liés à des épisodes de refroidissement instable après une période chaude. Certaines sont clairement liées à un contexte froid instable. Nos données montrent que des tempêtes hivernales millénaires ont impacté le trait de côte en Bretagne immédiatement avant l'Optimum Médiéval, dans un contexte climatique voisin de l'actuel.

Les ouragans se produisent généralement lorsque l'océan est chaud. Nous pouvons donc prendre en considération un indice représentant les variations du stockage thermique de la chaleur solaire dans l'océan intertropical (rayonnement UV ; fig. 2). Celui-ci est fourni par l'oscillation multidécadale atlantique ou AMO (http://www.pagesperso.univ-brest.fr/~ailliot/doc_conf/huck.pdf). Cette dernière a été anti-corrélée avec l'extension de la banquise et la NAO décennale (Miles *et al.*, 2014). Actuellement, la NAO décennale est négative, la NAO hivernale a été positive et l'AMO est à son maximum (fig.2). Une analyse plus détaillée montre que les tempêtes correspondent le plus souvent à des épisodes de quelques jours de NAO positive (cf. tempête Xynthia, février 2010) à quelques mois (octobre 2013-février 2014), alors que l'AMO est maximale. Les tempêtes régionales extraites des archives nous montrent la même tendance pour les deux oscillations précédentes de l'AMO. Les données géologiques nous montrent un forçage identique pour les derniers 6000 ans, notamment lors des refroidissements associés à des minima d'activité solaire (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2014b) et une pseudo-cyclicité voisine de 1000-1500 ans (cf. Bond *et al.*, 2001). L'augmentation de la fréquence des minima solaires depuis la période romaine (Stuiver *et al.*, 1991) est, avec la baisse du forçage solaire orbital, la raison majeure de l'augmentation de la fréquence et de la violence des tempêtes, un phénomène caractéristique des hauts niveaux marins et des fins de période chaude (Posamentier *et al.*, 1988).



Stockage thermique dans l'océan mondial entre 0-700m, 1993-2013
(source : <http://oceans.pmel.noaa.gov/>)

Quand la NAO décennale est positive, le courant-jet est peu oscillant, il guide les dépressions qui circulent d'Ouest en Est dans un contexte de faible contraste thermique entre l'air polaire (front froid) et l'air tempéré (front chaud) peu marqué. Quand la NAO décennale est négative, le courant jet est sujet à de profondes invaginations qui mettent en contact l'air tropical et l'air polaire, jusqu'au Sud du Maroc et jusqu'en océan Arctique au Nord (fig.3). Les descentes d'air polaire, lourd et froid,

coupent le jet stream et chassent vers le Nord des bouffées d'air tropical humide. Les tempêtes sont importantes quand le jet stream reprend sa trajectoire Ouest-Est et sa vitesse.

Nous avons pu ainsi définir 4 situations météorologiques types (fig.3) :

- Une NAO décennale positive et un océan chaud comme à l'Optimum médiéval et le Global warming, avec tempêtes fréquentes mais peu violentes ;
- Une NAO décennale négative et un océan chaud (AMO positive) comme entre 800 et 1200 ou actuellement, avec tempêtes puissantes et parfois raccourcies amenant directement des tempêtes tropicales (cf. Xynthia) sur l'Europe. C'est une des deux situations très efficaces pour l'érosion côtière ;
- une situation de grand calme, avec une NAO décennale positive et un océan intertropical tiède. Cela correspond à la période des grandes colonisations ;
- Une NAO décennale négative et un océan tiède (AMO négative), situation caractéristique des périodes de minima solaires comme la Tène ou le Petit Âge glaciaire, avec des tempêtes puissantes et destructrices. C'est une des deux situations très efficaces pour l'érosion côtière. C'est ce qui nous attend vers 2030 (prochain petit minimum solaire).

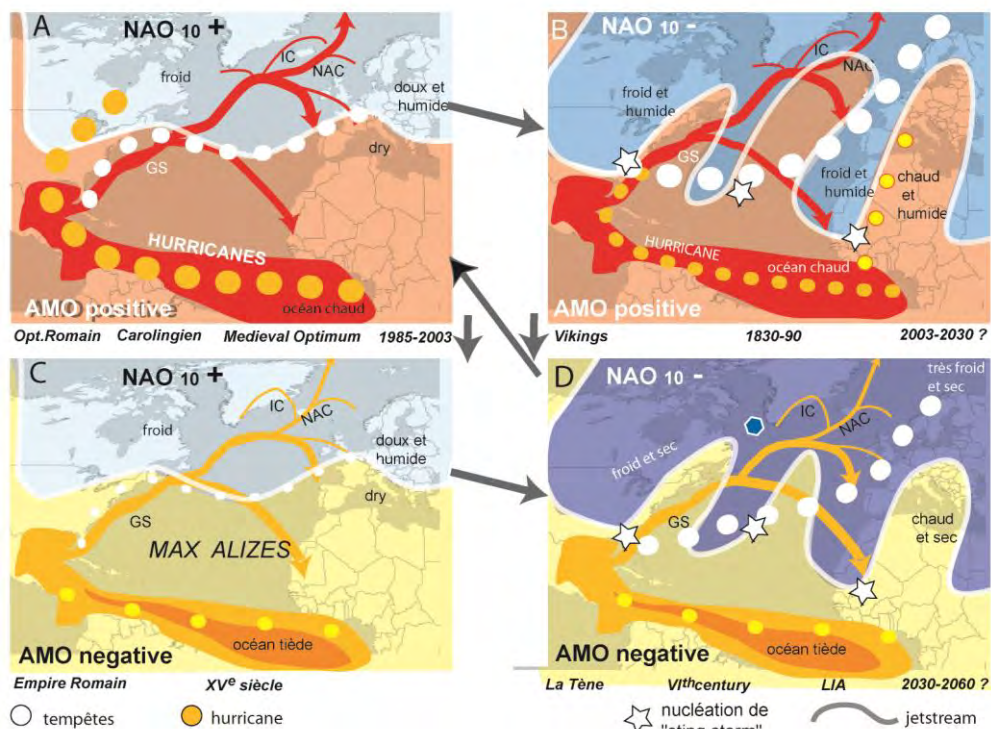


Figure 3 : types de configuration météorologique amenant la formation de grosses tempêtes ou de périodes tempétueuses (modifié de van Vliet-Lanoë et al., 2014b)

6. CONCLUSION

Nous sommes actuellement dans un contexte favorable à la construction de cordons littoraux mixtes dune / washover fans, dans un contexte de fortes tempêtes gérées par une NAO décennale négative et une AMO positive générée par un océan chaud. Les formations dunaires en Bretagne ne sont pas actuellement dans un contexte climatique favorable à leur formation : elles sont une conséquence directe de la restauration estivale des plages souvent lors d'événements négatifs NAO sec et venteux, après les tempêtes hivernales puissantes associées plutôt à une AMO négative,

comme au Petit Age glaciaire. Dans l'Ouest de la Bretagne, le contexte géomorphologique actuel est favorable à la construction de cordons littoraux mixtes, c'est-à-dire constitués par des accumulations éoliennes (dunes) et des accumulations inter- et supratidales résultant du démantèlement des formations existantes et s'accumulant en washover-fans. Ce contexte morphologique est généré par de fortes tempêtes, elles-mêmes gérées par une NAO décennale négative et une AMO positive générée par un océan chaud. Les formations dunaires en Bretagne ne sont pas actuellement dans un contexte favorable à leur formation : elles sont une conséquence directe de la restauration estivale des plages souvent lors d'événements négatifs NAO secs et venteux, après que les tempêtes hivernales puissantes associées plutôt à une AMO négative (comme au Petit Âge glaciaire, par exemple) aient fait reculer les édifices éoliens. L'efficacité maximale des tempêtes en termes de retrait du trait de côte a été atteinte pendant cette période froide, avec des séries d'événements étalés sur plusieurs jours ou semaines, en relation avec une exportation sédimentaire importante vers la zone infra-tidale ou le large et une exportation vers l'intérieur des terres. Le déficit en sable est sensible dans les formations littorales au moins depuis la période de l'An Mil (l'exploitation du sable, au large et en carrière depuis 1945, n'a fait qu'accélérer ce phénomène). L'hiver 2013-2014, très humide et, surtout, long et tempétueux a accentué ce déficit en sable, la restauration des dunes d'avant-côte ne se produisant qu'à peu d'endroits. Aujourd'hui le contexte montre de grandes similarités avec celui de l'an Mil (fig.3 B) et de très fortes tempêtes commencent à se produire. Après une période de forte activité solaire à la fin du XX^{ème} siècle, responsable de l'AMO très positive actuelle, un premier minimum solaire est attendu vers 2030. Au regard des périodes passées et des analyses qui en résultent, il est vraisemblable que vers 2030, nous retrouverons des hivers froids, secs et tempétueux comme à la fin du Petit Âge glaciaire. Avec le relèvement marin actuel, le déficit sédimentaire accentué par les interventions anthropiques et les tempêtes à venir, l'érosion des cordons littoraux protecteurs en Bretagne, voire dans certains cas leur démantèlement, se poursuivra, ce qui favorisera les submersions en zone littorale.

REMERCIEMENTS : ce travail a bénéficié d'une aide de l'Agence Nationale de la Recherche portant la référence 2010-CEPL-001-01, programme Cocorisco (Connaissance, Compréhension et gestion des Risques Côtiers).

BIBLIOGRAPHIE

- Barring, L., Fortuniak, K., (2009). Multi-indices analysis of southern Scandinavian storminess 1780–2005 and links to interdecadal variations in the NW Europe–North Sea region. *International Journal of Climatology*, 29, 373–384.
- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I. and Bonani G. (2001). Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 294, 2130–2136.
- Clarke M. L., Rendell H. M. (2009). The impact of North Atlantic storminess on western European coasts: A review. *Quaternary International.*, 195, 31–41.
- Goff, J.R., McFadgen, B.G., Chagué-Goff, C. (2004). Sedimentary differences between the 2002 Easter storm and the 15th Century Okoropunga tsunami, southeastern North Island, New Zealand. *Marine Geology* 204, 235–250.
- Goslin J. (2014). L'évolution du niveau marin relatif le long des côtes du Finistère (Bretagne, France) de 8000 B.P. à l'actuel: entre dynamiques régionales et réponses locales . Thèse de Doctorat Université de Brest, IUEM, 14/02/2014; 252 pp.

- Goslin J., Van Vliet-Lanoë B., Stephan P., Delacourt C., Fernane A., Gandouin E., Hénaff A., Penaud A., Suanez S. (2013). Holocene relative sea-level changes in western Brittany (France) between 7600 and 400 cal. BP.P: Reconstruction from basal-peat deposits, *Géomorphologie*, 4, 54-72.
- Guilcher, A., Hallégouët B., (1991). Coastal dunes in Brittany and their management. *Journal of Coastal Research*, 7, 517-533.
- Lamb, H.H., Frydendahl, K., (2005). *Historic Storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe*. Cambridge Univ. Press, (UK), 228 p.
- McKenna, J., Cooper, G. A. J., Jackson, D. W. T (2012). Storm swash terraces: a previously overlooked element of the cliff-shore platform system. *Journal of Sedimentary Research* 82, 260-269.
- Marusek, J. A. (2010). A Chronological Listing of Early Weather Events. 580p. . <http://www.breadandbutter-science.com/Weather.pdf>
- Morzadec-Kerfourn, M.T, (1974). - Variations de la ligne de rivage armoricaine au Quaternaire : analyses polliniques de dépôts organiques littoraux. *Mémoires Société Géologique et Minéralogique de Bretagne*, 17, 208 p.
- Miles, M. W., D. V. Divine, T. Furevik, E. Jansen, Moros M., Ogilvie A. E. J.. (2014). A signal of persistent Atlantic multidecadal variability in Arctic sea ice, *Geophysica. Research Letter*, 41, doi:10.1002/2013GL058084.
- Orford, J.D., Wilson, P., Wintle, Ag., Knight, J., Braley, S. (2000). Holocene coastal dune initiation in Northumberland and Norfolk, eastern UK: climate and sea-level changes as possible forcing agents for dune initiation. In Shennan, I.& Andrews, J. (eds) *Holocene Land-Ocean Interaction and Environmental Change around the North Sea*. Geological Society, London, Special Publications. 166, 197-217.
- Pirazzoli, P.A., (2000).- Surges, atmospheric pressure and wind change and flood probability on the Atlantic coast of France. *Oceanology Acta* 23, 643–661.
- Posamentier H. W., Jervey M. T. & Vail P. R. (1988). Eustatic control on clastic deposition I.-Conceptual framework, in Wilgus C. et al. (eds), Sea-level change, an integrated approach. *SEPM Special Publication* 42: 125-154.
- Retallack, G.J., Roering, J.J., (2012). Wave-cut or water-table platforms of rocky coasts and rivers? *GSA Today*, 22, 6, 4-10 doi: 10.1130/GSATG144A.1.
- Shennan, I., Horton, B. (2002). Holocene land- and sea-level changes in Great Britain. *Journal of Quaternary Change*. 17, 511-526.
- Stéphan P., Goslin J., Pailler Y., Manceau R., Van Vliet-Lanoë B., Suanez S., Delacourt C. (2014). Holocene salt-marsh sedimentary infilling and relative sea level changes in West Brittany (France) using foraminifera based transfer functions, *Boreas* (accepté).
- Stuiver, M., Braziunas, T. F., Becker, B., Kromer, B. (1991). Climatic, solar, oceanic, and geomagnetic influences on late-glacial and Holocene atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ change. *Quaternary Research*, 35, 1–24.
- Trouet, V., Esper, J., Graham, N.E., Baker, A., Scourse, J.D., Frank, D.C., (2009). Persistent Positive North Atlantic Oscillation Mode Dominated the Medieval Climate Anomaly. *Science*, 324, 78-80.
- Van Vliet Lanoë B., Goslin J., Hallegouët B., Henaff A., Delacourt C., Fernane A., Franzetti M.A., Le Cornec E., Le Roy P. (2014a). Middle to late Holocene storminess in Brittany (NW France). Part 1: Morphological impact and stratigraphical record. *The Holocene*, 24, 413-433.
- Van Vliet-Lanoë B., Penaud A., Henaff A., Delacourt C., Fernane A., Goslin J., Hallégouët B., Le Cornec E. (2014b). Middle to late Holocene storminess in Brittany (NW France). Part II: The Chronology of Events and Climate Forcing. *The Holocene* 24, 434-453.
- Van Vliet-Lanoë B., Goslin J., Hénaff A., Hallégouët B., Delacourt C., Le Cornec E., Meurisse-Fort M. (2014c). The formation and evolution of Holocene dune barrier, Brittany (France). *Comptes-Rendus Géosciences* (accepté)
- Wolf J. (2009). Coastal flooding: impacts of coupled wave-surge-tide models. *Natural Hazards*, 49, 241-260.

Évaluation de la submersion côtière grâce à une estimation *in situ* du wave runup sur les côtes basses du Bas-Saint-Laurent, Canada (Québec)

David Didier¹, Pascal Bernatchez¹, Guillaume Marie¹

1. Chaire de recherche en géoscience côtière, Centre d'études nordiques, UQAR
300 allée des Ursulines, G5L 3A1, Rimouski, Québec, Canada
David.Didier@uqar.ca

RESUME

Le 6 décembre 2010, une dépression engendrait la submersion du littoral de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. Il s'agissait de la conjonction d'une pleine mer supérieure de vive eau, d'une surcote, et du wave runup, soit l'amplitude entre la limite supérieure du jet de rive et le niveau de la mer sans agitation. Après la tempête, les limites de runup ont été identifiées au DGPS sur 17 km de côtes. La même approche a été appliquée sur huit plages en conditions normales à marée haute. L'effet de l'orientation, des pentes, et des largeurs d'estrans a été évalué statistiquement sur la variabilité du runup. Un modèle empirique de runup a été réalisé grâce à l'utilisation de la pente la mieux corrélée avec les niveaux atteints. Sur le territoire bas-laurentien, il s'avère que la géomorphologie affecte l'hydrodynamisme au déferlement et par conséquent les niveaux d'eau extrêmes. Le paramètre le plus explicatif de la variabilité spatiale du runup lors de la tempête est la pente de la zone intertidale. Un large estran rocheux ou meuble protège le trait de côte de la submersion puisqu'il atténue la pente ($r^2=0,91$). En conditions plus calmes, la pente du haut estran est plus représentative de la variabilité du runup. Le modèle empirique développé sur l'ensemble des données en milieu naturel ($r^2=0,7$) a été appliqué pour calculer le runup théorique sur un LiDAR et établir une cartographie de la submersion.

ABSTRACT

On December 6, 2010, an extratropical storm reached Atlantic Canada, causing coastal flooding due to high water levels (storm surge and wave runup) being pushed toward the shore. The extents of flooding have been identified in the field, using a DGPS. Assuming that maximum elevation of the flooded areas represents the wave-runup, which is the maximum elevation reached by the breaking waves on the beach, all limits have been identified. High tides limits were also identified in normal conditions on eight beaches. The role of geomorphological parameters (four types of beach slope, direction and width, state) were analyzed, using simple linear regressions. An empiric relationship has been made based on all data from natural beaches. Results show that the entire foreshore slope is best correlated with runup in storm conditions. The foreshore slope angle, decreases with an increase in width ($r^2=0,91$). In normal conditions, an increase in the upper foreshore slope angle is associated with an increase in runup levels. An empirical relationship of runup ($r^2=0,7$) was used to map the December 6 event over a DEM (LiDAR).

MOTS-CLÉS : submersion, wave runup, cartographie du risque, surcote, onde de tempête.

KEYWORDS: coastal flooding, wave runup, coastal flood map, storm surge.

1. Introduction

En milieu naturel, le phénomène de submersion se produit au moment où l'eau atteint une altitude supérieure à celle de la crête des accumulations littorales (Matias *et al.*, 2007; Stephan, 2011). En présence d'une défense artificielle, il se produit une submersion lorsque l'eau surpasse le sommet de l'infrastructure (Melby, 2012 ; Mase *et al.*, 2013). Lors des tempêtes côtières, les niveaux d'eau extrêmes (NEE) générés par la faible pression atmosphérique et les vents sont souvent plus élevés que les niveaux prédits (Benavente *et al.*, 2006). À ce phénomène de surcote s'ajoute une composante liée à l'arrivée des vagues à la côte suite au déferlement. Il s'agit du *wave runup*, la différence entre le niveau maximum atteint par le jet de rive et le niveau moyen de la mer observé sans agitation (Komar, 1998 ; Cariolet *et al.* 2012;). Sur les plages naturelles, le *wave runup* dépend de la pente de la plage et des caractéristiques des vagues au large (Battjes, 1974; Stockdon *et al.* 2009; Cariolet, 2011). Ce paramètre peut être estimé *in situ* à partir de laisses de marée haute et de tempête (Cariolet, 2008). Il se calcule selon la formule de Battjes (1974), $R_{max} = CH\xi$, où C est une constante, H la hauteur des vagues au large, et ξ le nombre d'Iribaren. Le nombre d'Iribaren (ξ), ou paramètre de *surf similarity*, est donné par $\xi = \tan \beta / (H/L_0)^{1/2}$, où $\tan \beta$ est la pente de la plage et L_0 la longueur d'onde au large, équivalant à $1,561\text{m/s}^2 \cdot T^2$, T étant la période des vagues (en secondes, s). Au Québec, malgré les connaissances montrant l'effet de la géomorphologie littorale sur les aléas côtiers (Bernatchez *et al.*, 2011), le *runup* n'est pas toujours utilisé dans la cartographie de la submersion côtière (Marchand *et al.*, 2013). Cette étude évalue le rôle de la géomorphologie côtière sur le phénomène de *runup* et intègre ce paramètre dans une cartographie. L'approche utilisée comporte quatre étapes : 1) l'acquisition des données hydrodynamiques et l'estimation *in situ* du *runup* en conditions normales et de tempête¹; 2) l'évaluation des paramètres géomorphologiques qui influencent le *runup*; et 3) la modélisation empirique ; 4) la cartographie d'un épisode de submersion connu grâce au modèle réalisé.

2. Secteur d'étude

Le secteur étudié (≈17 km de côte) a été touché par une tempête extratropicale ayant causé la submersion de plusieurs secteurs du Bas-Saint-Laurent (Québec) le 6 décembre 2010 (figure 1.). Il s'agit d'une côte fortement artificialisée, sédimentaire et rocheuse. À l'exception des baies à estran meuble, une plate-forme se prolonge sur l'ensemble de la zone intertidale (Dionne, 2002).

¹ L'expression « conditions normales » fait référence aux épisodes de *swash* se limitant au haut estran. La tempête désigne l'évènement du 6 décembre 2010, avec des niveaux d'eau ayant dépassé le haut estran.

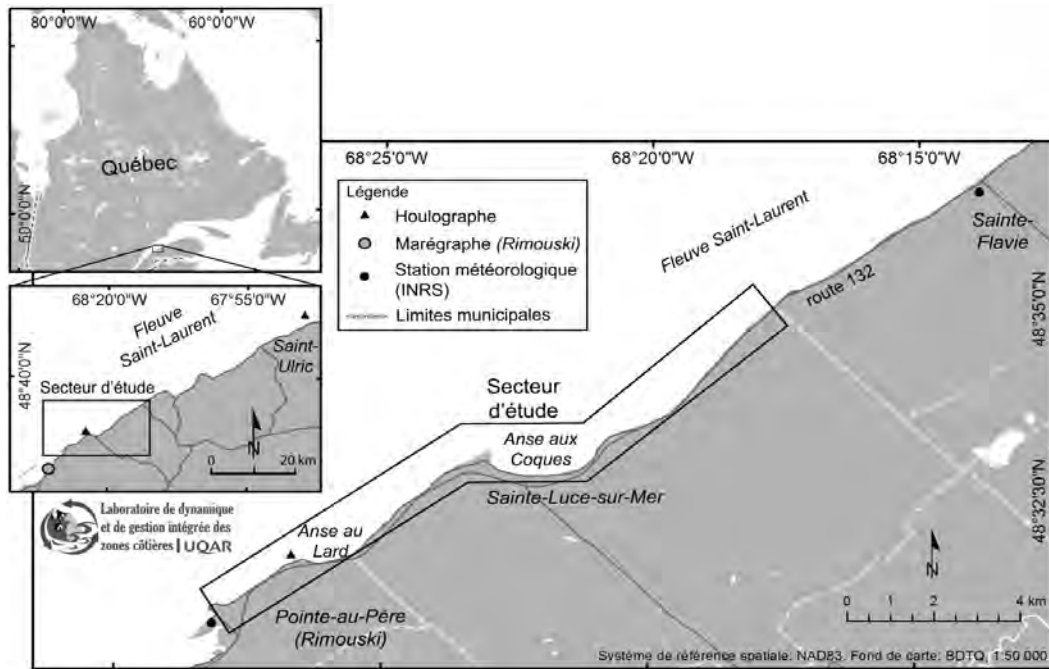


Figure 1. Localisation du secteur d'étude et de l'instrumentation.

3. L'implication du *runup* dans les niveaux d'eau atteints

3.1 Acquisition des données *in situ*

3.1.1 Données hydrodynamiques

Le marégraphe de référence utilisé pour le calcul de la surcote est celui de Rimouski, opéré par le Service hydrographique du Canada (SHC). La différence entre le zéro marégraphique et le zéro géodésique (NAD83) y est de 2,28 m. Les valeurs géodésiques sont utilisées dans ce travail afin de permettre les superpositions avec les modèles topographiques LiDAR. L'estimation des valeurs de *runup* est possible grâce à la connaissance des paramètres de vagues. Au cours de la tempête, ces paramètres (hauteur significative H_{m0} , période moyenne T_{02}) ont été acquis par un ADCP de type AWAC situé à 55 km à l'est du site. La longueur d'onde de la houle en eau profonde ($d > L_0/2$, où d est la profondeur de l'eau) est donnée par $L_0 = gT^2/2\pi$ (CEM, 2008). Les données de vagues en conditions normales ont été acquises par un capteur de pression (RBR Virtuoso) installé sur la partie distale de la plate-forme rocheuse. La hauteur de la colonne d'eau y a été obtenue en soustrayant à la pression totale enregistrée au capteur la pression atmosphérique (station météorologique de Pointe-au-Père (INRS)) selon $H = (P_{\text{capteur}} - P_{\text{atmosphère}})/\rho \cdot g$, où H est la hauteur de la colonne d'eau au-dessus du capteur (m), P_{capteur} la pression mesurée par le capteur (Pa), $P_{\text{atmosphère}}$ la pression atmosphérique (Pa), ρ la masse volumique de l'eau de mer dans l'Estuaire du Saint-Laurent (1025 kg/m^3) et g l'accélération de la pesanteur = $9,80665 \text{ m.s}^{-2}$. Comme l'instrument est situé en eau peu profonde ($d < L/2$), la formule d'Eckart (1952) est utilisée pour la longueur d'onde (CEM, 2008), $L \approx gT^2/2\pi \sqrt{\tanh(4\pi^2 d/T^2 g)}$, $\tanh$ étant la tangente hyperbolique.

3.1.2 Mesures de proxy sur le terrain et levés topo-morphologiques

Considérant que les NEE sont la combinaison du niveau prédit au marégraphe, de la surcote et du *runup*, des limites de submersion atteintes lors de la tempête ont été identifiées au DGPS à l'été

2011 en utilisant les débris de tempêtes comme proxy. L'échantillonnage était systématique aux 100 mètres pour un total de 154 levés le long de 17 km de côtes meubles et rocheuses. Des inventaires de laisses de marées hautes ont été réalisés en 2011 et 2012 en conditions normales sur huit plages de la zone d'étude, pour un total de 38 mesures. Pour les deux échantillonnages, le principe prend la forme de $R_{max} = \text{Altitude}_{\text{laïsse de mer}} - \text{Altitude}_{\text{marée haute observée}}$ (Cariolet, 2011). Pour chaque point d'identification des limites, des profils topographiques de plage ont été effectués, à raison de un point par mètre. Une segmentation précise des éléments morphologiques a également été réalisée (laisses de mer, ruptures de pentes, substrat, succession végétale).

Il est mentionné en littérature que la pente de la portion mobile de l'estran (Cariolet, 2011), correspondant au haut estran (Bernatchez *et al.*, 2012), peut être celle qui influence le plus le *runup* maximal atteint. Des profils de plage ont été effectués à chaque levé de proxy afin de vérifier la variabilité des pentes du haut estran au cours d'une année. Au total, 48 levés topomorphologiques ont été effectués entre le 5 juin 2011 et le 12 septembre 2012.

3.2 Évaluation des paramètres géomorphologiques

À partir des données topographiques et de la segmentation effectuée sur le territoire submergé le 6 décembre 2010, une base de données ($\approx 36\,000$ points DGPS) a été créée dans ArcGIS. Une vue en coupe des profils a permis de positionner, de la terre vers la mer, la première ligne de défense côtière naturelle ou artificielle (D_{max}), la délimitation de la végétation dense (ligne de rivage), le changement de pente entre le haut et le bas estran (flexure morphologique), et la fin de la zone intertidale associée au début d'un substrat limoneux succédant à la plate-forme rocheuse². Huit variables géomorphologiques ont été évaluées sur cet échantillon : quatre types de pentes, la largeur des haut et bas estran, l'état de la côte et l'orientation de la plage (figure 2.).

Des régressions linéaires ont été appliquées afin d'étudier la relation entre chaque variable et les niveaux extrêmes atteints le 6 décembre 2010, plus spécifiquement le phénomène physique qu'est le *runup* maximal. Les coefficients de détermination (r^2) ont été utilisés pour attester de la qualité de l'ajustement linéaire entre les valeurs de *runup* mesurées et les différents régresseurs. Cette analyse statistique permet de vérifier les facteurs morphologiques qui influencent le *runup* lors d'un même évènement et de choisir la bonne pente à intégrer dans le modèle empirique de *runup* basé sur la formule de Battjes (1974). Les diverses pentes sont également évaluées en conditions normales afin de voir si le *runup* est influencé par les mêmes paramètres lors de conditions hydrodynamiques différentes.

Une fois cette étape réalisée, il a été possible d'élaborer un modèle empirique basé sur le type de pente le plus significativement corrélé avec l'amplitude du jet de rive.

² La fin du profil en présence d'un bas estran meuble est identifiée dans ce travail comme étant le point où la profondeur de l'eau est au moins égale à $1,5H_{m0}$ (FEMA, 2007).

Variable	Schématisation de la variable
Type de pente ($\tan \beta$) Pente du littoral (D.max-Fin du profil) Pente de la section comprise entre la première ligne de défense et la partie distale de la plateforme ou M.enr. - $1,5H_{m0}$ en milieu sédimentaire. Pente de l'estran (LR-Fin du profil) Pente de la section comprise entre la ligne de rivage et la partie distale de la plateforme ou M.enr. - $1,5H_{m0}$ en milieu sédimentaire. Pente du haut estran Pente de la section comprise entre la ligne de rivage et la flexure meuble ou rocheuse. Pente du bas estran Pente de la section comprise entre la flexure meuble ou rocheuse et la partie distale de la plateforme ou M.enr. - $1,5H_{m0}$ en milieu sédimentaire.	
Largeur du littoral (m) (D.max-Fin du profil)	
Largeur du haut estran (m)	
État de la côte (artificielle ou naturelle)	
Orientation du profil (°)	Orientation préférentielle du profil de manière perpendiculaire à la ligne de rivage.

Figure 2. Définition et représentation schématique des variables géomorphologiques mises en relation avec le R_{max} atteint.

3.3 Modélisation du runup

3.3.1 L'influence de la morphologie sur le runup

Le 6 décembre 2010, une surcote de 1,05 m surpassait la prédiction de 2,12 m au marégraphe de Rimouski qui enregistrait un niveau d'eau maximal de 3,17 m à marée haute. Au même moment, les vagues atteignaient 2,75 m au large avec une longueur d'onde de 64,3 m, engendrées par des vents du nord-est de 28 km/h avec des rafales à 61 km/h au cours de la journée. L'identification des limites de submersion sur 17 km de côte montre une moyenne des niveaux d'eau extrêmes (NEE) atteignant 6,142 m (moyenne : 4,81 m ; σ : 0,53 m). Le *runup* moyen est ainsi estimé à 1,64 m, avec un maximum à 2,975 m.

Indépendamment des caractéristiques de vagues qui prennent lors de cet évènement ponctuel la forme d'une constante ($H_{m0} = 2,75$ m), le *runup* lors de la tempête est affecté par la géomorphologie côtière. Dès que les profils artificiels sont exclus de l'échantillon, les relations sont plus fortes. La variabilité du R_{max} est très peu expliquée par les pentes lorsqu'une infrastructure est présente. En milieu naturel seulement, l'augmentation du *runup* s'explique en partie par une augmentation des pentes : 49% de la variabilité du *runup* est attribué à celle de la pente du littoral ($p\text{-value} < 0,001$). La pente de l'estran est moins corrélée ($r^2 = 0,45$). La pente de la zone littorale diminue avec

l'augmentation de sa largeur ($r^2 = 0,91$), ce qui atténue le *runup*. L'orientation du profil, ainsi que la pente et la largeur du haut estran, ne sont pas corrélés avec le *runup* lors de la tempête.

Sous des conditions plus calmes et variées (H_{m0} entre 0,08 m et 1,61 m ; L_0 entre 25,64 m et 38,41 m), le *runup* est corrélé positivement avec la variable $H_{m0}\xi$ ($r^2 = 0,70$ pour la pente du haut estran, $r^2 = 0,57$ pour la pente de l'estran, $p\text{-value} < 0,001$). Le haut estran exerce en conditions normales une influence légèrement plus importante que celle de l'estran complet.

3.3.2 Le modèle de *runup* adapté au secteur d'étude

L'analyse statistique a permis l'élaboration d'un modèle général adapté au secteur d'étude sous diverses conditions hydrodynamiques en milieu naturel (figure 3). La pente utilisée est celle de la zone intertidale. Les données ($n=97$) ont été intégrées dans un modèle linéaire. Le modèle est représenté par $R_{max} = 2,39H\xi + 0,74$, où R_{max} est le niveau maximal atteint par le jet de rive sous diverses conditions, 2,39 le coefficient sans dimension C proposé par Battjes (1971) et ici obtenu expérimentalement, H la hauteur des vagues, ξ le nombre d'Iribaren obtenu via la pente générale de la zone intertidale (ξ entre 0,066 et 1,055 ; pentes entre 0,014 et 0,08), et 0,74 l'ordonnée à l'origine du modèle linéaire. Le modèle est significatif ($p\text{-value} < 0,001$) et la relation est forte. La variable $H_{m0}\xi$ explique 69% de la variabilité du *runup* avec une erreur quadratique moyenne de 39,9 cm.

La comparaison du modèle adapté avec ceux de la littérature (figure 3.) montre que l'élaboration d'un modèle à partir de mesures sur le terrain minimise l'écart moyen de la prédiction par rapport aux valeurs réelles. Les formules de Mase (1989) ($r^2 = 0,74$), Komar (1998) ($r^2 = 0,69$) et Stockdon *et al.* (2006) ($r^2 = 0,71$) sont bien corrélées avec les valeurs réelles. Tous les modèles sous-estiment cependant les valeurs de *runup*, ce qui se perçoit à l'étude des écarts moyens constamment négatifs (de -0,17 m à -0,91 m). Celui de Mase (1989) est le plus précis. Les modèles testés ont une erreur quadratique moyenne relativement semblable, située entre 36,74 cm et 39,9 cm.

3.4 Application du modèle pour cartographier le risque de submersion

3.4.1 Procédé cartographique

Le modèle créé permet d'estimer le *runup*. Une cartographie de la submersion du 6 décembre 2010 a été réalisée en superposant les niveaux d'eau extrêmes (calculés) sur une surface matricielle altitudinale à haute résolution. Dans ArcGIS, le sommet de défense et la fin de la zone intertidale ont été numérisés manuellement sur un modèle LiDAR aéroporté de 2009. Pour les sections du LiDAR situées sous le niveau de l'eau, des points DGPS ont été utilisés. Grâce à une itération systématique du modèle aux cinq mètres le long de la côte, les pentes de la zone littorale et le *runup* ont été calculés pour un total de 3 177 points de mesure. L'équation mesure une largeur d'estran et calcul une pente générale en se basant sur les valeurs d'altitude de la crête de la défense et de la fin de la zone intertidale. La pente pour l'ensemble des points atteint un maximum de 0,101 et un minimum de 0,012. Aux valeurs de *runup* calculées s'ajoute le niveau d'eau enregistré au marégraphe lors de l'évènement (3,167 m), lequel inclut la surcote. La somme de ces valeurs d'élévation constitue les NEE ayant provoqué une submersion. Ce qui génère un point altimétrique perpendiculaire au trait de côte vers les terres et se fixant à la première jonction altitudinale correspondant au niveau de submersion sur le modèle numérique d'élévation LiDAR. Une fois reliés, ces points forment une ligne représentant la limite atteinte par les NEE ($\pm 1RMSE$).

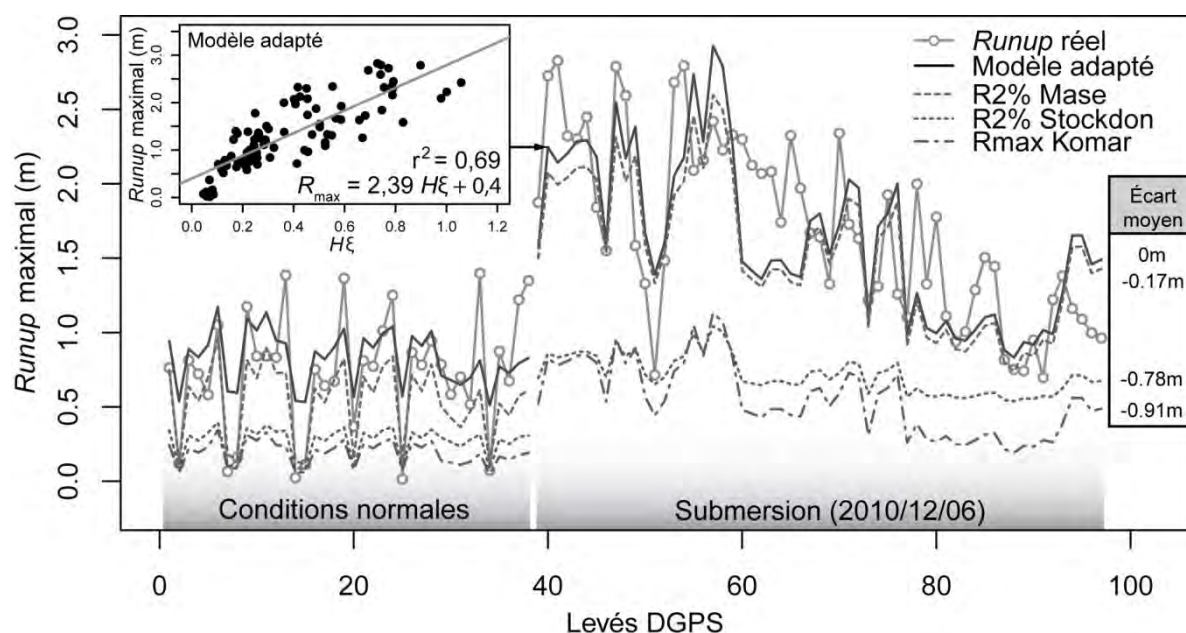


Figure 3. Modèle de runup adapté au secteur d'étude et comparaison avec ceux issus de la littérature.

3.4.2 Résultats de la cartographie

L'application du modèle à des fins cartographiques a permis de quantifier la variabilité de la submersion le long de 17 km de côte. La moyenne des niveaux d'eau modélisés est de 4,76 m comparativement à celle des niveaux d'eau réels obtenus via les proxys qui atteint 4,81 m (min : 3,938; max : 6,806 m). En intégrant l'erreur ($\pm 39,9$ cm), un total de 2921 points font partie de la zone submergée par le modèle, alors que seulement 256 points sont exclus. Seuls 33 points de modélisation ont été submergés par le niveau de marée enregistré de 3,176 m, ce qui correspond à relativement 1% du territoire. Les résultats de la cartographie basée sur le modèle montrent que la majeure partie de la côte a été submergée le 6 décembre 2010 comme le confirme les levés de terrain, et que l'utilisation seulement du niveau d'eau mesuré au marégraphe n'aurait pas permis de prédire l'ampleur de la submersion lors de la tempête du 6 décembre 2010.

4. Conclusion

Le modèle de *wave runup* combiné à des données topo-morphologiques de l'estran permet de bien reproduire les niveaux d'atteinte du jet de rive lors des tempêtes. Conjointement à des scénarios de vagues de tempête, il devient un outil pour déterminer les zones à risque de submersion. On constate cependant que certains facteurs peuvent limiter l'exactitude des niveaux d'atteinte, notamment les conditions d'utilisation et les limites minimales et maximales des paramètres qui ont conçu le modèle. Par conséquent un échantillon plus grand de données *in situ* fournirait un éventail de conditions météo-marines plus large, ce qui augmenterait la capacité de prédiction du modèle. La comparaison du modèle avec ceux de la littérature justifie l'établissement d'une base de données aux conditions météo-marines et géomorphologiques variées afin d'améliorer la précision de la prédiction. En milieu naturel, la présence d'une plate-forme rocheuse ou d'une zone intertidale large favorise en ce sens un déferlement vers loin du rivage, et par conséquent suggère que la pente de ce segment de littoral doit être utilisée pour prédire le *runup*. En revanche, en conditions normales, c'est plutôt la pente du haut estran qui détermine le niveau atteint par le *runup*, résultant d'un déferlement plus près de la rive. Les prochaines étapes pour cartographier des risques de submersion au Québec seront d'évaluer l'influence des caractéristiques géomorphologiques des

estran sur les niveaux d'atteinte du jet de rive et d'intégrer au modèle des scénarios de hausse du niveau marin relatif et de conditions de tempêtes à l'échelle régionale.

Remerciements

Les auteurs remercient les membres de la Chaire de recherche en géoscience côtière pour leurs contributions aux acquisitions sur le terrain, les citoyens du Bas-Saint-Laurent pour leur témoignage des observations, le ministère de la Sécurité publique du Québec, le ministère des Transports du Québec et l'Institut des Sciences de la mer de Rimouski, et le gouvernement du Québec pour le financement de ce projet de recherche.

Références

- Marchand, J.-P., Didier, D., Buffin-Bélanger, T. et Bernatchez, P. (2014). *Cartographie des zones inondables et des zones de submersion à l'aide d'une méthode hydrogéomorphologique pour le secteur de la rivière Bonaventure*. Laboratoire de dynamique et gestion intégrée des zones côtières, Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale, UQAR, Rapport technique, soumis au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 82 p.
- Battjes, J. A. (1971). Run-Up Distributions of Waves Breaking on Slopes. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, vol. 97, p. 91-114.
- Battjes, J. A. (1974). *Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves, Report 74-2*. Ph.D. thesis at the Technische hogeschool, Delft University.
- Benavente, J., Del Río, L., Gracia, F. J., et Martínez-del-Pozo, J. A. (2006). Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay Natural Park, SW Spain). *Continental Shelf Research*, vol. 26, n°9, p. 1061-1076.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Lefavre, D., et Dugas, S. (2011). Integrating anthropogenic factors, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards. *Ocean & Coastal Management*, vol. 54, 621-632.
- Bernatchez, P. et Fraser, C. (2012). Evolution of Coastal Defence Structures and Consequences for Beach Width Trends, Québec, Canada. *Journal of coastal research*, vol. 28, n°6, p. 1550-1566.
- Cariolet, J.-M., Suanez, S. (2008). Approche méthodologique pour une cartographie du risque de submersion des côtes basses. Congrès SHF « Nouvelles approches sur les risques côtiers », Paris.
- Cariolet, J.-M. (2011). Quantification du runup sur une plage macrotidale à partir des conditions morphologiques et hydrodynamiques. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, vol. 1, 95-108.
- Cariolet, J.-M., Suanez, S., Annaïg, C. M.-Férec, et Postec, A. (2012). Cartographie de l'aléa de submersion marine et PPR: éléments de réflexion à partir de l'analyse de la commune de Guissény (Finistère, France). *Cybergeog: European Journal of Geography*, vol. 586, 1-21.
- Dionne, J.-C. (2002). État des connaissances sur la ligne de rivage Micmac de J. W. Goldthwait (estuaire du Saint-Laurent). *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 56, n° 1, p. 97-121.
- Eckart, C. (1952). *The propagation of gravity waves from deep to shallow water*. National Bureau of Standards (Circular No. 521), Washington D.C., p. 165-173.
- FEMA (2007). *Atlantic Ocean and Gulf of Mexico coastal guidelines update*. Final Draft, Washington D.C, 360 p.
- Komar, P. D. (1998). *Beach processes and sedimentation*. New Jersey, Prentice Hall, Inglewood Cliffs. 543 p.
- Mase, H. (1989). Random wave runup height on gentle slope. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, vol. 115, p. 649-661.
- Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T., et Reis, M. (2013). Wave Runup and Overtopping at Seawalls Built on Land and in Very Shallow Water. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, vol. 139, n°5, p. 346-357.
- Matias, A., Ferreira, O., Vila-Concejo, A., Garcia, T., et Dias, J.M.A. (2007). Classification of washover dynamics in barrier islands. *Geomorphology*, vol. 97, p. 655-674.
- Melby, J.A. (2012). *Wave runup prediction for flood hazard assessment*. Federal Emergency Management Agency. Great Lakes Coastal Flood Study, 2012 Federal Inter-Agency Initiative. Coastal and Hydraulics Laboratory. 113 p.
- Stéphan, P. (2011). Les flèches de galets de Bretagne : évolutions passées, présentes et futures. L'Harmattan. Collection Milieux naturels et Sociétés, Approches géographiques. 263 p.

- Stockdon, H., Holman, R., Howd, P., et Sallenger, A. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, vol. 53, p. 573 - 588.
- U.S. Army Corps of Engineers (2008). *Coastal Engineering Manual (CEM)*, EM 1110-2-1100, Washington, D.C.

Comprendre les submersions marines et leurs conséquences

L'apport du retour d'expérience Xynthia pour la définition des données à collecter suite à une submersion

Céline Perherin¹, Nathalie Berenger¹, Ludovic Bocquier², Nicolas Flouest¹, Sylvain Moreira¹

1. Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CEREMA/DTecEMF/DI/IE/IAR - Technopôle brest iroise - 155, rue Pierre Bouguer - BP 5 - 29280
PLOUZANE - Celine.Perherin@cerema.fr

CEREMA/DTerOuest/DLRCA/Environnement Risques Géotechnique - Département Laboratoire et CECP
d'Angers - 23, Avenue de l'Amiral Chauvin - B.P. 69 - 49136 LES PONTS DE CE -
Nathalie.Berenger@cerema.fr

CEREMA/DTerSO/DLB/GAIA/RGT - 24 rue Carton - CS 41635 - 33073 BORDEAUX Cedex -
Nicolas.Flouest@cerema.fr

CEREMA/DTerOuest/DIMER/Environnement - Rue René Viviani - BP 46223 - 44262 NANTES -
Sylvain.Moreira@cerema.fr

2. Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Pays de Loire (DREAL
Pays Loire/SRNT/DRNHSS)

5 rue Françoise Giroud - CS 16326 - 44263 NANTES cedex 2

Ludovic.Bocquier@developpement-durable.gouv.fr

RESUME.

Suite à la tempête Xynthia, plusieurs modes de collectes ont été utilisés pour mieux comprendre les submersions marines et leurs conséquences : imagerie satellitaire, prises de vues aériennes, reconnaissances de terrain, enquêtes locales. Les données collectées et leurs exploitations ont permis d'identifier les plus pertinentes et la nécessité d'élaborer des protocoles de collecte.

ABSTRACT.

Further to the storm Xynthia, several methods of data collection had been used in order to better understand coastal flooding and their consequences: satellites imagery, aerial imagery, terrestrial recognition, local enquiry. The use of the collecting data has helped to identify the most relevant and has shown the necessity to first establish procedures.

MOTS-CLES : Retour d'expérience / submersion marine / Xynthia / relevé des conséquences de l'inondation

KEYWORDS: Learnings / coastal flooding / Xynthia / reading of the flooding consequences

1. Introduction

Dans la nuit du 27 au 28 février 2010, la tempête Xynthia a entraîné d'importantes submersions marines (70 000 hectares pour les seuls départements de Vendée, Gironde et Charente-Maritime). Étant donné l'ampleur du phénomène, de nombreuses collectes de données ont été lancées après l'événement par différents maîtres d'ouvrage pour capitaliser au mieux toute information sur les conséquences physiques des inondations et sur leur déroulement. Différents modes de collectes d'informations ont été mis en œuvre : imagerie satellitaire, prises de vues aériennes, reconnaissances de terrain, enquêtes locales. Grâce à un retour d'expérience sur les différentes collectes menées suite à Xynthia et de leurs exploitations *a posteriori*, cet article illustre la complémentarité de ces modes de collectes pour recenser et comprendre les événements de submersion marine et propose des pistes d'amélioration.

2. Les données collectées suite à Xynthia et leur exploitation

La tempête Xynthia a fait l'objet d'une multitude de données collectées afin de comprendre et de garder trace de cet événement de grande ampleur. Cet article présente principalement les collectes menées par les services de l'État et par le réseau scientifique et technique du Ministère de l'Écologie et n'est donc pas exhaustif sur les nombreuses initiatives locales.

2.1. Les images satellites

Le Centre opérationnel de gestion interministérielle des crises (Cogic) a déclenché par anticipation le samedi 27 février 2010 à 20h30 le processus Safer (*Services and applications for emergency response*) qui vise à produire et diffuser rapidement de l'information géographique sur les événements catastrophiques. Les premières images satellitaires (prises le 1^{er} et le 2 mars) ont été analysées sous 24 h par le Service régional de traitement d'image et de télédétection (Sertit) (Sertit, 2010). Des images complémentaires plus tardives ont été également interprétées par le Sertit : 16 produits ont été ainsi livrés aux services chargés de la gestion de la crise entre le 2 et le 16 mars. Ces produits ont permis principalement une estimation rapide de l'extension des zones inondées ainsi que du délai de retour à la normale (évacuation de l'eau).

Le bilan de l'opération s'est révélé globalement positif, notamment quant à l'anticipation du déclenchement et la mise à disposition des produits. Quelques difficultés ont été néanmoins rencontrées, en lien avec une estimation initiale incomplète des zones affectées par la tempête, qui a conduit à prioriser l'estuaire de la Gironde et à retarder l'acquisition des images sur les autres zones de Vendée et de Charente-Maritime.

2.2. Les survols aériens par hélicoptère

En région Aquitaine, un premier vol d'identification des zones inondées a été réalisé le 28 février, du nord du département de la Gironde à l'île de Ré, par le Groupement d'intérêt public « Aménagement du territoire et gestion des risques » (GIP ATGeRi).

Des vols par hélicoptère ont ensuite été réalisés sous maîtrise d'ouvrage de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer (DDTM) de Gironde sur l'estuaire de la Gironde (linéaire de 370 km), le 6 et le 17 mars, afin d'identifier les zones inondées, le recul du trait de côte et les principaux dégâts, de réaliser un examen des digues et de définir les zones à inspecter par voie terrestre pour approfondir l'expertise.

En région Poitou-Charentes, des vols par hélicoptère ont été réalisés sous maîtrise d'ouvrage de la DDTM de Charente-Maritime les 8 et 16 mars (linéaire 225 km), avec les mêmes objectifs que précédemment.

Dans ces deux derniers cas, une assistance technique a été apportée par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), direction territoriale Sud-Ouest (DTER SO, ex-CETE du Sud-Ouest).

En région Pays de la Loire, où existe depuis 2009 un protocole pour la collecte de données de connaissance des inondations, les DDTM concernées et la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal) Pays de la Loire ont décidé de tester ce protocole, axé initialement sur les inondations par débordement de cours d'eau. Dans ce cadre, des vols d'hélicoptères ont été réalisés les 3 et 4 mars sur l'ensemble du littoral de la région (excepté l'île d'Yeu et le nord du département de Loire-Atlantique) sous maîtrise d'ouvrage de la Dreal. Leur premier objectif était d'identifier les zones inondées et les principaux dégâts, notamment ceux subis par les ouvrages de protection.

En-dehors du protocole régional, un vol a été réalisé sur l'estuaire de la Loire par le GIP Loire Estuaire, un autre a été mis en œuvre par la commune de La Barre-de-Monts (85).

Les photographies aériennes obliques prises lors des survols par hélicoptère ont permis d'identifier rapidement les secteurs prioritaires pour les reconnaissances de terrain ultérieures, les enjeux majeurs touchés, les zones soumises à la submersion et au recul du trait de côte ainsi que les ruptures de digues.

Malgré les conditions de vol parfois difficiles (turbulences) et une autonomie limitée à 1h30 environ, les survols par hélicoptères du linéaire côtier à haute et basse altitude ou en station au-dessus de points particuliers, ont permis un recensement et une analyse rapides, qualitatifs et visuels des dégâts, malgré quelques difficultés pour localiser les observations. Ces survols ont été exploités par la suite dans le cadre des reconnaissances de terrain ou des études, notamment pour mieux cerner l'extension des zones inondées.

2.3. Les survols aériens par avion

Dans le cadre du protocole régional des Pays de la Loire, la production de photographies aériennes verticales était prévue. La Dreal a souhaité mettre en œuvre rapidement cette investigation. Cependant, l'absence de marché pré-existant et la couverture nuageuse importante les jours suivants l'événement n'ont pas permis le lancement de la campagne.

Des discussions entre l'Institut géographique national (IGN), le ministère du Développement durable, direction générale de la prévention des risques (DGPR) et la DTER Méditerranée du Cerema ont permis toutefois le lancement d'une campagne aérienne spécifique. Elle a démarré 3 semaines après l'événement (clichés pris entre le 17 mars et le 10 avril). Le cahier des charges demandait l'acquisition d'images numériques, de haute résolution spatiale (20 cm), dans les longueurs d'onde du visible (couleur canaux RVB) et de l'infrarouge proche, avec une échelle de restitution à 1/10000 et un recouvrement des clichés permettant une analyse stéréoscopique. Environ 9 000 clichés ont été pris (MEDDTL, 2011), sur un territoire allant de la baie de Bourgneuf (44) à l'estuaire de la Gironde (33). La recette des clichés a été réalisée par la DTER Normandie-Centre du Cerema, sous maîtrise d'ouvrage de la DGPR. Certaines zones inondées lors de Xynthia n'ont pas été survolées (marais de Guérande, estuaire de la Loire et bassin d'Arcachon notamment).

2.4. Les survols aériens par drone

Des survols ponctuels par drones ont été organisés à des fins principalement expérimentales, dans le but d'évaluer leur pertinence et leur efficacité en contexte post-crise. Le pilotage de cette opération a été assuré par la Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Conseil général du développement durable (CGDD) ; les vols ont été mis en œuvre en Charente-Maritime par l'École nationale de l'aviation civile (Enac) le 19 mars et en Loire-Atlantique par l'Institut français des

sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar) le 29 mars. Les objectifs des survols étaient multiples : observations des dégâts sur les ouvrages, vérification du comportement des ouvrages de protection à marée haute, évaluation du recul de cordons dunaires, restitution de modèles numériques de terrain (MNT), tests d'analyse stéréoscopique, etc.

Ces expérimentations ont permis de définir les produits et exploitations possibles (notamment la possibilité d'analyse stéréoscopique) mais également de mettre en évidence les limites d'utilisation des drones en contexte post-crise, vis-à-vis notamment des conditions météorologiques et de la qualité des images verticales. Les prises de vue n'ont pas été exploitées de manière opérationnelle par la suite.

2.5. Les reconnaissances de terrain

Plusieurs campagnes de levés de laisses d'inondation ont été menées.

Sur plusieurs secteurs du littoral, entre l'estuaire de la Loire et le bassin d'Arcachon, le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et l'Office national des forêts (ONF) ont mené du 8 au 12 mars une mission de terrain. Ont été relevés ponctuellement des évolutions morphologiques, des niveaux et limites d'inondation ainsi que des dégâts.

En région Pays de la Loire, des laisses d'inondation ont été relevées par les DDTM 85 et 44, avec un appui du Cerema DTer Ouest en Vendée, dans le cadre de la mise en œuvre du protocole régional. Il s'agissait en Vendée de cotes de plus hautes eaux (PHE) qui ont été collectées dans un délai maximum de 8 jours après l'inondation, sur 3 secteurs de la pointe de l'Aiguillon fortement impactés par la submersion.

La communauté de communes de Noirmoutier a également recueilli des informations sur les niveaux d'eau atteints dans l'île, sur les surfaces inondées et les points d'entrée de l'eau.

En Gironde et en Charente-Maritime, des relevés ponctuels de PHE ont été réalisés respectivement par les DDTM 33 et 17.

2.6. Les enquêtes locales

Ces enquêtes, menées auprès de collectivités et de riverains rencontrés lors des reconnaissances de terrain, avaient pour objectifs de préciser, les caractéristiques hydrauliques de l'événement Xynthia, notamment l'ampleur et la dynamique de la submersion : niveaux d'eau atteints, points d'entrée de la submersion, etc. Elles ont été réalisées en Pays de la Loire et en Charente-Maritime (respectivement sous maîtrise d'ouvrage Dreal et DDTM) au cours de l'année 2010 plusieurs mois après l'événement.

3. L'analyse des submersions marines provoquées par Xynthia

Suite à ces collectes, plusieurs études ont été menées en parallèle afin de répondre à certains objectifs spécifiques (extension des submersions, défaillances des systèmes de protection, etc.). Les principales analyses des submersions ont été réalisées lors de la photo-interprétation des images aériennes verticales et des retours d'expériences régionaux.

3.1. L'analyse des photographies aériennes verticales

Après l'étude de faisabilité technique et financière, conduite en 2012 par le Cerema (DTer Ouest, Sud-Ouest, Méditerranée, Centre-Est, Normandie-Centre sous pilotage de la direction technique eau, mer et fleuves), il a été décidé de réaliser une analyse stéréoscopique numérique des clichés verticaux et de produire une orthophotographie, destinée à servir, d'une part, de support pour le

report des informations issues de l'analyse stéréoscopique numérique et, d'autre part, de fond de plan récent pour d'autres études. L'étude de faisabilité a permis également de définir les différents indices à rechercher sur les clichés : évolutions morphologiques, traces d'érosion, identification de zones toujours en eaux, de zones ressuyées, dégâts sur les ouvrages, etc.

Bien que les clichés aient été pris 3 semaines après l'événement, les tests ont montré que ces indices pouvaient être repérés, y compris pour l'extension des submersions. En effet, même si la zone soumise à l'inondation ne peut être précisément définie à partir de cette seule source, les nombreuses traces du passage de l'eau permettent d'en donner un contour approché. Ces tests ont également permis de définir la méthode d'analyse et ont montré la longueur de l'exercice sur des zones aussi vastes que celles touchées par Xynthia. Il a donc été décidé d'analyser uniquement certains secteurs (côtes charentaises, marais du Blayais, baie de l'Aiguillon notamment). Ces études spécifiques visent plusieurs objectifs : analyse des systèmes de protection (Cerema, 2014), analyse de la dynamique de submersion dans les marais rétro-littoraux (CETE du SudOuest, 2013), estimation du recul du trait de côte.

3.2. Les retours d'expérience régionaux : une synthèse des connaissances

Des retours d'expérience régionaux ont été réalisés en Pays de la Loire (CETE de l'Ouest, 2012), en Poitou-Charentes (Sogreah, 2011) et en Aquitaine (CETE du Sud-Ouest, 2010). Leurs objectifs étaient doubles : faire le bilan, d'une part, des conséquences hydrauliques de la tempête et, d'autre part, des dégâts matériels. Les résultats se présentent majoritairement sous forme de cartographies, de courtes monographies et d'analyses.

Différents types de collecte ont été exploités. Les données recueillies par reconnaissance de terrain (photographies, levés de PHE) ont été largement exploitées, notamment pour définir l'étendue des submersions. Des informations relatives à la dynamique de l'inondation ont été déduites des diagnostics des ouvrages réalisés par la DTer Ouest du Cerema en Vendée et ponctuellement en Loire-Atlantique : les désordres constatés ont parfois permis de définir le sens du passage de l'eau et de caractériser la force d'écoulement. Les images aériennes obliques ont contribué notamment à la définition de l'étendue des submersions. Les enquêtes ont permis, outre la validation des analyses des images aériennes, d'analyser la perception de l'événement, précisant ainsi ponctuellement le déroulement et la dynamique de la submersion. Ces retours d'expérience régionaux n'intègrent toutefois pas les résultats des photo-interprétations d'images verticales, du fait du retard pris au lancement de ces études, et n'ont pas exploité les produits d'imagerie satellitaire, en raison de leur échelle générale inadaptée à une caractérisation fine de l'événement.

4. Les collectes d'information suite aux submersions marines

Sur la base de ces enseignements, les données les plus pertinentes à collecter afin de décrire *a posteriori* de manière satisfaisante les submersions marines peuvent être définies.

4.1. Les images satellites

La télédétection sur des images satellitaires permet, de manière rapide et automatisée, de déterminer le contour des zones inondées à un instant donné. Ces images sont notamment utiles pour les événements de grande ampleur, les satellites couvrant une surface importante du globe terrestre. Repassant pour certains plusieurs fois à l'aplomb du même point de la surface terrestre, les satellites peuvent permettre une analyse diachronique des images, et ainsi le suivi temporel de l'évolution des submersions et du retrait des eaux.

La principale limite à l'utilisation des données satellitaires réside dans la couverture de la zone considérée. Il est rare en effet que les satellites se trouvent à l'aplomb exact de la zone affectée au

moment de l'ampleur maximale de l'événement (même si il est possible d'agir sur la trajectoire de certains satellites) et que les conditions météorologiques soient optimales. Il est à noter enfin que l'utilisation des images satellitaires pour des études de détail est encore aujourd'hui limitée par leur échelle inadaptée ; les progrès en cours et à venir sur les capteurs embarqués conduiront probablement à modifier cet état de fait.

4.2. Les photographies aériennes verticales

Les photographies aériennes verticales permettent une vision précise de l'ensemble de l'événement à un instant donné. Elles peuvent être utilisées dans les longueurs d'onde du visible en vision simple et stéréoscopique pour étudier : l'emprise des surfaces inondées, la dynamique de la submersion, le mode de défaillance des ouvrages et faire un bilan non exhaustif des dégâts. L'étude de clichés pris dans les longueurs d'onde de l'infrarouge proche permet de détecter les terrains qui ont été inondés dès lors que les clichés sont pris peu de temps après l'événement. La photo-interprétation par analyse stéréoscopique peut cependant être longue du fait des multiples objectifs possibles et de la résolution spatiale très fine des clichés. Elle doit donc être privilégiée dans le cas d'étude de certains secteurs prioritaires, des défaillances des systèmes de protection et de la dynamique de submersion ou pour apporter des données sur les secteurs manquant d'autres sources d'informations.

Le principal intérêt de ces données réside dans le caractère factuel fixant l'information à un instant donné. La définition des secteurs survolés doit être concertée afin de couvrir l'ensemble des secteurs inondés. En outre, un survol juste après le retrait des eaux est à privilégier afin que l'ensemble des informations potentiellement repérables soient visibles. Compte-tenu de ces conditions, une campagne de prises de vues aériennes verticales doit faire l'objet d'un pilotage dédié et d'un protocole permettant la mise en œuvre au moment adéquat du survol aérien. La principale limite de ces clichés réside dans la nécessité de faire réaliser l'interprétation par un photo-interprète connaissant les phénomènes considérés. Ces campagnes étant onéreuses, il convient de les réserver aux événements extrêmes.

4.3. Les autres prises de vues aériennes

Les survols à faible altitude par hélicoptère ou tout autre moyen aérien adapté (ULM, petit avion, etc.) permettent, d'une part, de réaliser une analyse rapide en cours de vol de l'événement et, d'autre part, de prendre des photographies obliques d'ensemble et de détail. Dans ce cadre, l'utilisation de drones pourrait se développer à l'avenir, notamment pour couvrir rapidement des secteurs isolés et inaccessibles.

Les photographies aériennes obliques sont utiles pour identifier l'extension des inondations et les principaux dégâts aux ouvrages de protection. La possibilité d'avoir des vues à différentes échelles, la rapidité de réalisation, le faible coût, sont leurs principaux atouts. En revanche, ce type de mission est difficile à mettre en œuvre en urgence et nécessite également un pilotage dédié et la définition, en amont, d'un protocole.

4.4. Les reconnaissances de terrain

Les reconnaissances de terrain sont indispensables pour constater et relever précisément les cotes des plus hautes eaux observées. Elles permettent également de relever les traces d'évolution morphologique et d'autres laisses d'inondation qui pourront renseigner sur l'extension de l'inondation et la dynamique des écoulements. Ces reconnaissances de terrain sont à réaliser de manière systématique quelle que soit l'ampleur de l'événement et le plus rapidement possible dès le retrait des eaux. La mise en place d'un protocole de collecte au préalable (Cerema, 2014) permet un

gain de temps, une optimisation des moyens disponibles et une amélioration de la fiabilité des laisses collectées.

4.5. Les enquêtes locales

La recherche de témoignages humains est un type de collecte qui peut paraître superflu si on dispose déjà de nombreuses données par ailleurs. Néanmoins, et en tenant compte des limites inhérentes à tout témoignage humain, notamment quand celui-ci rend compte d'éléments vécus en situation de crise, ces enquêtes peuvent permettre de valider et compléter les informations, en particulier celles concernant la dynamique de la submersion.

5. Conclusion

Le retour d'expérience de la tempête Xynthia montre la nécessité de disposer de données nombreuses et de bonne qualité pour l'analyse de l'événement afin d'en tirer des enseignements pertinents et utiles aux différents volets de la prévention des risques, notamment la préparation à de futures crises. Chaque type de collecte peut être utilisé, d'une part, en fonction de ses avantages et de ses inconvénients et, d'autre part, en fonction de l'ampleur de l'événement. Si les images satellites et les photographies aériennes sont principalement utiles sur les événements de grande ampleur, les collectes par reconnaissance de terrain et les enquêtes locales doivent, dans la mesure du possible, être menées pour tous les événements de submersion marine.

Afin d'obtenir les informations indispensables à l'analyse, les collectes doivent être organisées et préparées. Chaque type de collecte doit faire l'objet d'une coordination des différents levés afin d'optimiser les moyens mis à disposition, le temps (au moment de la prise de décision et lors de la réalisation des collectes) et les informations recueillies. Ce retour d'expérience montre donc l'importance d'un processus décisionnel d'intervention préalablement défini et partagé, d'une définition précise des livrables attendus et de réflexions préalables sur les méthodes et l'organisation des collectes. L'élaboration de protocoles de collectes de données, tels que celui présentant les reconnaissances de terrain après une inondation (Cerema, 2014), trouvent dans ce cadre toute leur justification.

Bibliographie

- Cerema. (2014). *Protocole de collecte d'informations par reconnaissances de terrain suite à une inondation – Guide méthodologique*, rapport CEREMA, à paraître au second semestre 2014.
- Cerema. (2014). *Étude des systèmes de protection contre les submersions marines – Méthodologie et études de cas issues du retour d'expérience Xynthia – Étude du site de Loix (Charente-Maritime)*, DGPR, rapport Cerema à paraître au second semestre 2014.
- CETE du Sud-Ouest (2013). *Retour d'expérience de la tempête Xynthia – Analyse par photo-interprétation des clichés aériens de l'IGN – Application au marais du Blayais*, DGPR, février 2013.
- CETE de l'Ouest. (2012). *La tempête Xynthia du 28 février 2010 – Retour d'expérience en Loire-Atlantique et en Vendée – Volets hydraulique et ouvrages de protection*, DREAL Pays de la Loire, octobre 2012.
- CETE du Sud-Ouest. (2010). *Monographie de la tempête Xynthia - 28 février 2010 - Estuaire de la Gironde, Garonne et Dordogne*, DDTM de la Gironde, 53 pages.
- MEDDTL. (2011). *Photographies aériennes post-Xynthia*. <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/photos-aeriennes-post-xynthia-r186.html>. Consulté le 24/03/14.
- Sertit. (2010). *Bilan de l'action SAFER n°29*. http://sertit.u-strasbg.fr/SITE_RMS/2010/04_rms_france_tempete_2010/04_rms_france_tempete_2010.html consulté le 20/03/14

Sogreah. (2011). *Éléments de mémoire sur la tempête Xynthia du 27 et 28 février 2010 en Charente-Maritime*, DDTM de Charente-Maritime, mars 2011.

Conditions météo-marines et facteurs de prédisposition à l'origine de phénomènes de submersion marine : analyse comparative entre Manche orientale et Mer du Nord méridionale.

Aurélié Maspataud^{1,2}, Pauline Letortu³, Stéphane Costa³, Olivier Cantat³, Arnaud Héquette¹, Marie-Hélène Ruz¹

1 UMR 8187 LOG, Université du Littoral Côte d'Opale
32 Avenue Foch, Wimereux 62930, France
a.maspataud@gmail.com

2 Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) (adresse actuelle)
13 rue du Châtelier, CS 92803, 29228 Brest cedex 2, France

3 LETG Caen, GEOPHEN, UMR 6554 CNRS, Université de Caen Basse-Normandie
Esplanade de la paix, BP5186, 14032 Caen cedex, France
pauline.letortu@unicaen.fr

RESUME.

Comme en témoignent plusieurs évènements de ces dernières années ou décennies, tels que le passage de la tempête Xaver en décembre 2013, Xynthia en février 2010, les rivages français ne sont pas épargnés par ces phénomènes météo-marins paroxysmaux. Cette étude s'intéresse aux phénomènes de submersion marine lors de tempêtes en Manche orientale et en Mer du Nord méridionale. Ce risque naturel côtier menace des zones sensibles à l'interface terre/mer, et ce dans un contexte de changements globaux. Sur le littoral normand-picard (Manche orientale) et sur la Côte d'Opale (Mer du Nord méridionale), les zones sensibles étudiées correspondent à des côtes basses urbanisées qui cumulent de nombreux facteurs de prédisposition face au risque d'inondation par la mer. L'objectif du travail est multiple : déterminer l'intensité des épisodes majeurs de submersion, voire érosifs, en Manche orientale et Mer du Nord méridionale (à partir d'un recensement sur la période 1949-2010), et identifier les caractéristiques météo-marines responsables des submersions (hauts niveaux d'eau, vents d'afflux...). La conjonction dans le temps et dans l'espace de ces facteurs météo-marins a été examinée, ainsi que leur concomitance lors d'un événement traversant et impactant les façades littorales de la Manche et de la Mer du Nord. L'existence de facteurs aggravants tels que le passage d'un front froid, ou les paramètres morphologiques des plages (abaissement du profil de plage, érosion de dune) ont également été observés, soulignant l'importance de conditions morphogènes et/ou préparatoires sur l'apparition et l'ampleur des submersions marines et, d'autre part, d'effets de site.

MOTS-CLES : Aléas, Tempête, Submersion marine, Erosion côtière, Manche orientale, Mer du Nord, Géomorphologie littorale

ABSTRACT.

As evidenced by several events in the recent years or last decades, such as Xaver storm in December 2013 and Xynthia storm in February 2010, the French coastlines are not spared by these meteorological and marine paroxysmal phenomena. This study focuses on coastal natural hazards and more specifically the coastal flooding phenomena during storm. This risk threatens highly vulnerable areas, and in a context of global change. Along the eastern English Channel (Normandy and Picardy coasts) and the southern North Sea (extreme northern coast of France), the studied sensitive sites consist in the low-lying and densely urbanized coastal areas which combine many predisposing factors concerning the coastal flooding risk. The first objective of this work is to determine the intensity of the major coastal flooding or erosional events (inventory over the period 1949-2010). The second objective is to define the meteorological and marine characteristics that could induce coastal

floods (high water levels, high onshore winds...). The conjunction both in time and space of meteorological, marine factors was examined, and also the concomitancy of such well-known conditions during an event that could reach and affect the eastern English Channel and also the North Sea coasts, and could also be reinforced by the passage of an atmospheric cold front during high tide. The existence of other aggravating factors involved in the process of coastal flooding or erosion highlighted the importance of pre-conditioning factors, such as morphological parameters (low altimetry of valleys, predate beach and dune erosion), on the occurrence and extent of coastal flooding, and possible site effects.

KEYWORDS: *Alea, Storm, Coastal flooding, Coastal erosion, Eastern English Channel, North Sea, Coastal geomorphology*

1. Introduction

A la fin de l'automne-hiver 2013-2014, le littoral Atlantique-Manche-Mer du Nord dressait un nouveau bilan face à des dégâts localement considérables, après avoir été balayé par une série de tempêtes assez remarquables par leur fréquence (Christian, Godehart, Xaver, Dirk, Petra et Qumaira). Ces événements rappellent ceux plus anciens, tel le passage de la tempête Xynthia en février 2010, dont la gravité des inondations par la mer sur le littoral Atlantique et en Manche a été exceptionnelle, donnant au phénomène de submersion marine une résonance particulièrement dramatique. Face à ces aléas parfois grandissants en intensité et en fréquence, ces derniers s'imposent désormais systématiquement aux gestionnaires des territoires concernés souhaitant mettre en place une stratégie efficace de gestion du risque. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude, née des travaux de deux équipes de recherche en Manche orientale et en Mer du Nord méridionale (LETG-Caen Géophen et LOG). Il s'agit d'étudier le risque « submersion marine » et ce, dans un contexte de changements globaux (réchauffement climatique et élévation du niveau moyen de la mer). Les zones les plus sensibles à ces phénomènes sont généralement celles dites basses, et marquées par l'urbanisation. Sur le littoral normand-picard, elles correspondent à des vallées et des valleuses (côtes basses dont l'altitude est souvent inférieure aux pleines mers de vive-eau) qui sont des lieux privilégiés de l'implantation humaine (seul lien entre la mer et l'intérieur des terres). Sur le littoral dunkerquois, ces espaces sensibles sont topographiquement des polders fortement urbanisés situés également sous le niveau de la mer, et protégés de la mer par des cordons dunaires. L'urbanisation importante de ces côtes basses accentue aussi leur vulnérabilité, expliquant l'attention particulière et croissante portée sur ces territoires ces dernières années de la Normandie à la Picardie (Caspar *et al.*, 2007, 2010 ; Costa, 1997, 2005 ; Costa *et al.*, 2002, 2004 ; Elineau, 2013 ; Letortu *et al.*, 2012 ; Letortu, 2013) et dans le Nord-Pas de Calais (Chaverot *et al.*, 2008 ; Rufin-Soler *et al.*, 2008 ; Héquette, 2010 ; Maspataud, 2011 ; Maspataud *et al.*, 2013). Ces territoires côtiers revêtent un intérêt tout particulier pour l'analyse du risque d'inondation par la mer en cumulant de nombreux facteurs de prédisposition : érosion, variabilité de la morphologie et crise sédimentaire des plages de galets ou de sable ; ouverture aux flux atmosphériques perturbés de quadrant ouest et nord et faible altimétrie des vallées et des plaines maritimes. Bien que ces secteurs appartiennent à deux types de côtes bien différents, d'un point de vue géomorphologique comme dans la diversité des impacts observés et des dégâts occasionnés à la côte, il existe des similitudes entre eux, notamment en ce qui concerne les facteurs aggravants face aux franchissements par la mer.

2. Présentation géographique et caractéristiques météo-climatique du secteur d'étude

Le linéaire côtier étudié s'étend sur deux façades maritimes. Le premier, le secteur normano-picard, s'étend du Havre (Haute-Normandie) à Cayeux-sur-Mer (Picardie) et est bordé par la Manche. Il est caractérisé par des côtes à falaises, localement entrecoupées par des vallées basses urbanisées dont le plancher est parfois inférieur d'un mètre aux pleines mers de vive-eau. Au débouché de ces vallées se trouve généralement un cordon de galets adossé à un perré (Figure 1). Les plages de galets du secteur d'étude sont dites « composites », car constituées d'un cordon pentu d'aspect

réfléchissant et composé d'un mélange de galets, de graviers et de sables. Au pied de cette forme d'accumulation de haut estran (altitude de 3 m à 13,1 m CM à Dieppe) se développe un platier rocheux à faible pente et, par conséquent, fortement dissipatif. Cette plate-forme d'érosion marine est localement recouverte par quelques placages sableux. L'important volume de galets au droit de certaines côtes basses urbanisées s'explique par la présence d'ouvrages transversaux (épis, jetées). Cependant, ces cordons sont parfois franchis par la mer lors de forts coups de vent d'afflux agissant au moment d'une pleine mer de vive-eau. La seconde section côtière étudiée se situe en Mer du Nord méridionale sur la façade nord de la Côte d'Opale. Elle correspond à la plaine maritime flamande et est constituée de polders, particulièrement exposés aux aléas côtiers (épisodes et structuraux) en raison de leur faible altitude. A ce titre, la commune des Moères (altitude - 4 à +2 m) est la plus basse de France. Ces espaces déprimés sont bordés par des ouvrages de protection côtière (digues, perrés) ou par des défenses côtières naturelles, telles que des plages sableuses dissipatives et des cordons dunaires, qui représentent un véritable rempart naturel contre les intrusions marines (Figure 1).

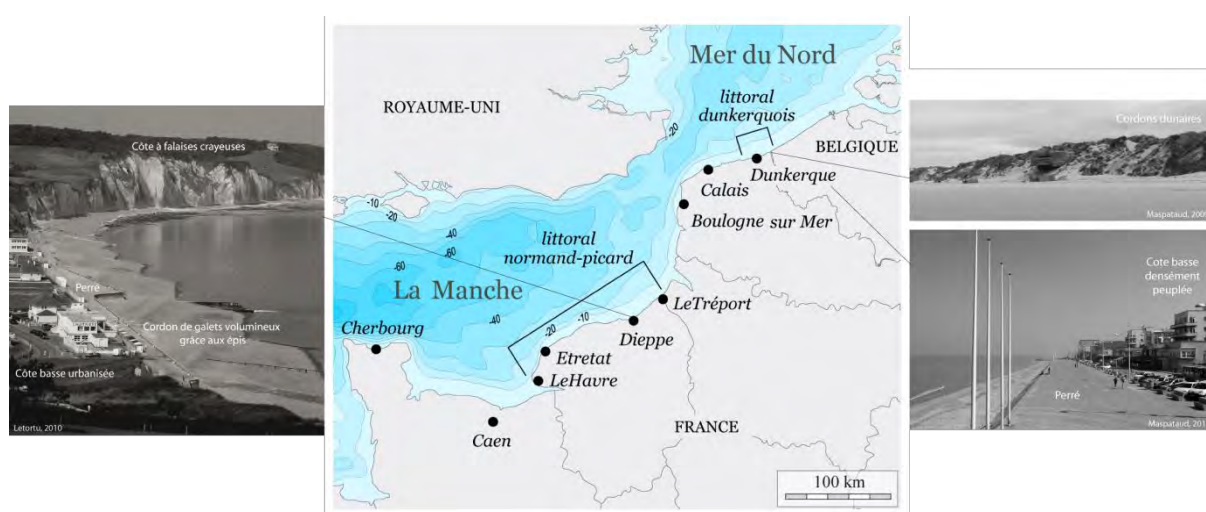


Figure 1 : Localisation des secteurs d'étude en Manche orientale et Mer du Nord méridionale.

Ces deux secteurs côtiers sont soumis à un régime de type macro- à méga-tidal. En période de vive-eau, le marnage atteint 10 m sur les côtes françaises de la Manche orientale (8 m à Dieppe) mais diminue dans la partie méridionale de la Mer du Nord (5,4 m lors de vives-eaux moyennes et 3,5 m en marée de mortes-eaux moyennes à Dunkerque). Bien que l'orientation du rivage soit relativement proche sur les secteurs normano-picard (sud-ouest à nord-est) et dunkerquois (ouest-sud-ouest à est-nord-est), cette légère différence ainsi que leur situation géographique entraîne une diversité d'exposition aux conditions météo-climatiques.

Le littoral français de la Manche orientale appartient à l'aire du climat tempéré de façade ouest et est caractérisé par son ouverture aux flux d'ouest perturbés, qui se traduit par une grande fréquence des vents forts à très forts d'une dominante d'ouest. Pour la station de Dieppe, en considérant la canalisation des flux par la vallée de l'Arques et l'orientation de la côte, la période à vent fort d'afflux est comprise entre novembre et février et est largement dominée par les flux provenant du quadrant ouest (Météo France). A Dunkerque, comme pour le littoral normand-picard, et en réponse aux dépressions nord-atlantiques qui remontent vers la Manche en relation avec la circulation dominante d'ouest, les vents d'afflux de secteur sud-ouest à nord-ouest sont les plus fréquents et les plus forts. Cependant, une fenêtre secondaire est représentée par le secteur nord à nord-est. Ces vents, issus du passage des masses d'air provenant de la Mer du Nord sont moins fréquents, mais sont non négligeables dans la classe des vents forts.

S'agissant de la houle, la géométrie de la Manche génère des fetchs réduits pour quasiment toutes les directions de vent n'induisant alors qu'une agitation de type « mer du vent ». Cependant, les hauteurs de vagues peuvent atteindre 4,3 m à Dieppe (période de retour annuelle du H1/3 ; Allen et Delannoy, 1990). Bien que la côte dunkerquoise soit également exposée à un fetch limité à l'ouest et à des vagues de relativement faible énergie (hauteurs significatives généralement inférieures à 1 m et périodes de 5 à 6 s), ce territoire est particulièrement sensible aux houles en provenance du secteur nord à nord-est, bénéficiant de ce fait d'un fetch plus étendu en Mer du Nord. De plus, dans ces mers épicontinentales, et lors de situation atmosphérique perturbée, il n'est pas rare d'enregistrer des surélévations importantes du niveau d'eau d'un à deux mètres. Associée aux agitations marines et à une pleine mer de vive eau, cette combinaison de facteurs provoque une érosion de la plage et des dunes, ainsi que des problèmes d'évacuation des eaux excédentaires des polders (Maspataud *et al.*, 2013).

Le secteur d'étude retenu dans ce travail est donc sensible aux inondations par la mer en raison non seulement de ses caractéristiques morphologiques et altimétriques mais également de son exposition aux facteurs météo-marins. Sur le secteur d'étude, la grande majorité des submersions marines s'effectue par franchissement de paquets de mer liés aux vagues, affectant les ouvrages de protection et les cordons de galets du littoral normand-picard, et les perrés du front de mer du littoral dunkerquois. Historiquement, la présence locale de brèches dans le cordon dunaire et la rupture d'une digue ont également déjà provoqué l'inondation de zones basses (pannes humides) en arrière du cordon bordier et le déversement des eaux de la Mer du Nord vers la ville (1er-2 mars 1949 et 31 janvier-1er février 1953 ; Maspataud, 2013). A l'heure actuelle, les dunes littorales constituent un rempart naturel suffisant et protégeant les zones de polders de la plaine côtière des attaques de la mer, mais leur érosion (épisode ou répétée) ne fait qu'augmenter les risques de submersion marine pendant les tempêtes.

3. Episodes marquants et caractéristiques de submersions marines en Manche orientale et/ou en Mer du Nord méridionale

Un travail historique de recensement des inondations par la mer et des hauts niveaux d'eau a été effectué, respectivement sur les littoraux normand-picard (Letortu, 2013) et dunkerquois (Maspataud, 2011), sur 62 années consécutives (1949-2010) à partir de sources diverses (photographies, récits, témoignages, journaux locaux, travaux scientifiques antérieurs, archives). Parmi les épisodes identifiés, si certains ont affecté les deux secteurs étudiés en Manche orientale et Mer du Nord méridionale, en revanche d'autres n'ont eu un impact notable que sur l'une ou l'autre de ces deux façades maritimes.

3.1. 1er cas : la tempête Johanna de mars 2008

Le 10 mars 2008, avec un centre dépressionnaire situé sur l'Irlande, plusieurs submersions locales se sont produites sur les côtes Sud puis Nord de la Bretagne (Caspar *et al.*, 2010). Les vents ont progressivement pris un caractère de vent d'afflux, passant progressivement de sud-ouest à ouest sur les côtes de Haute-Normandie et celles de Picardie. Le 11 mars, lorsque la dépression a atteint la Mer du Nord, avec un fort gradient de pression barométrique localisé sur la Manche, des submersions se sont alors produites sur la côte d'Albâtre et à Dieppe en particulier. Les vents supérieurs ou égaux à 8 m/s ont soufflé pendant 4 jours consécutifs d'un large quart sud-ouest à la station météorologique d'Ouessant (max. 26 m/s) (Cariolet *et al.*, 2010) et pendant 2 à 3 jours du sud à sud-ouest en Finistère Nord (max. 22 m/s) (Suanez et Cariolet, 2010). A Dunkerque, avec des vents de sud-ouest à ouest toujours persistants et supérieurs à 8 m/s pendant plus de 72 heures, aucun phénomène de submersion n'a pourtant été observé et l'érosion s'est limitée à un fort abaissement du haut de plage (Maspataud, 2011). La côte d'Opale, située au nord-est par rapport aux zones les plus affectées par le phénomène de submersion marine, a bénéficié lors de cette tempête de

conditions certes dites de traine mais encore très énergétiques. Pourtant, malgré des conditions de marée suffisamment importantes (coefficients 96-89), et donc de potentiels hauts niveaux d'eau, les vents du secteur sud-ouest à ouest n'ont pas représenté de vents d'afflux en mesure de pousser les masses d'eau vers la côte ni de causer de franchissement de perré à pleine mer.

3.2. 2ème cas : les épisodes caractéristiques de tempêtes de Mer du Nord

Sur le littoral dunkerquois, les épisodes des 1er-2 mars 1949 et 31 janvier-1er février 1953 marquent encore la mémoire collective avec des franchissements du perré de Dunkerque à plusieurs reprises sous l'effet des vagues, des ruptures de digues et des inondations de la ville (Maspataud, 2011 ; Maspataud *et al.*, 2013). Cette catastrophique tempête de 1953 résulte d'un coup de vent très brutal qui a balayé tout le nord-ouest de l'Europe, avec une très forte houle en Mer du Nord. La situation atmosphérique fut la première cause du phénomène, avec le déplacement rapide d'une petite dépression secondaire du sud de l'Islande vers la Mer du Nord. Le flux de nord-ouest s'est progressivement déplacé, avec comme particularité d'être perpendiculaire au trait de côte des Flandres et des Pays-Bas. Des franchissements de digue par paquets de mer ont encore été localement observés sur le front de mer de Dunkerque en novembre 2007. Cet épisode de tempête a connu son paroxysme le 9 novembre, avec une intensité due à des conditions atmosphériques particulières : une zone de hautes pressions (1035-1040 hPa) localisée au sud-ouest des îles britanniques à l'origine d'un fort flux de nord-ouest avec un rail de perturbations de l'Irlande au sud de la Baltique. L'une de ces perturbations s'est développée en une forte dépression, baptisée Tilo, et le fort gradient de pression a mené à de sévères rafales de vent. C'est cette combinaison de forts vents du secteur nord à nord-ouest, soufflant avec un fetch étendu au nord, et de basses pressions atmosphériques, qui a causé cet événement de tempête des 8-9 novembre 2007, sans précédent en Mer du Nord depuis l'épisode de 1953. Le point commun entre ces deux épisodes reste le fait que leurs impacts se soient limités aux côtes bordant la Mer du Nord et, pour la France, au littoral du Nord-Pas de Calais. A titre de comparaison, la violente tempête du 15 octobre 1987, qualifiée alors d'ouragan, n'a eu aucun impact notable sur la façade Nord de la Côte d'Opale malgré son caractère cyclonique et le passage de son centre dépressionnaire relativement proche à l'échelle du bassin Manche-Mer du Nord, tandis que son impact s'est concentré sur les façades françaises et britanniques de la Manche.

3.3. 3ème cas : les événements du 26 février au 1er mars 1990

Historiquement, de décembre 1989 à début mars 1990, l'Europe de l'ouest fut marquée par près de 10 tempêtes successives exceptionnelles par leur fréquence et, dans une moindre mesure, par leur intensité (Caspar, 1990 ; Costa, 1997 ; Caspar *et al.*, 2007). Les épisodes entre le 26 février et le 1er mars 1990 furent quant à eux particulièrement violents et constituent des aléas de référence à la fois sur le littoral normand-picard et sur le dunkerquois. En effet, le 26/02/1990, c'est une tempête de grande importance (Vivian) qui a frappé l'Europe de l'Ouest, avec quatre jours consécutifs de vents soutenus, coïncidant avec de fortes marées (coefficients de 102 et de 105 le 26 ; de 107 le 27 ; et de 107 et de 106 le 28). Les dégâts furent considérables sur l'ensemble du littoral et notamment dans la station balnéaire d'Etretat où le centre-ville fut inondé et cause de nombreux dégâts. A Dunkerque, sous l'action de vents forts et persistants, et d'une violente houle frontale, d'importants dégâts sont recensés sur le perré du front de mer. Ils se sont accompagnés d'un fort démaigrissement de la partie supérieure de l'estran à l'aplomb des aménagements. L'"activité" d'une brèche de mer présente alors à l'est de la ville a également été soulignée, indiquant qu'une (ou plusieurs) incursions marines se sont encore produites lors de cet événement (Maspataud, 2011).

4. Similitudes menant aux franchissements par la mer entre Manche orientale et Mer du Nord méridionale

Un point commun à l'ensemble du secteur d'étude est son caractère macro- à méga-tidal qui résulte en une atténuation des effets des tempêtes et des surcotes, car le battement de la marée limite le temps pendant lequel les phénomènes d'érosion et de submersion marines peuvent se produire. La hauteur d'eau critique à partir de laquelle les vagues pourront causer des submersions marines, ainsi que le laps de temps pendant lequel ces phénomènes pourront se produire, dépendent donc fortement de la conjonction de forts vents d'afflux, voire d'une surcote, avec la marée haute.

L'analyse des épisodes ayant mené au franchissement sur l'ensemble du secteur d'étude a permis de définir localement les conditions minimales de vent et de hauteur d'eau à partir desquelles ce phénomène peut avoir lieu. Les sémaphores de Dieppe et de Dunkerque sont les deux stations choisies comme référence dans cette étude, chacune étant représentative de la majorité des zones basses locales les environnant. Les niveaux de marée sont issus respectivement du port de Dieppe et du grand port maritime de Dunkerque mis à disposition sur le site des Réseaux de référence des observatoires marégraphiques (refmar.shom.fr).

Sur le littoral haut normand, à proximité de Dieppe, les conditions météo-marines favorables aux franchissements correspondent à des vents soutenus de secteurs ouest à nord-ouest de l'ordre de 6 m/s (vent moyen trihoraire) et d'une hauteur de marée prédite de 8,5 m (cote marine – CM) (Letortu *et al.*, 2012). Sur le littoral dunkerquois, une analyse a permis de mettre en évidence les conditions météorologiques les plus morphogènes, telles que des vents forts et persistants, soufflant de secteur nord à nord-ouest à plus de 8 m/s pendant plus de 48, voire 72 heures (Maspataud, 2011). Plusieurs fenêtres de tempêtes et d'épisodes à caractère submersif ont ainsi été définies : 1) des épisodes frontaux de secteur nord à nord-ouest (à nord-est) caractéristiques de tempêtes de Mer du Nord, avec généralement des vents moyens à forts (≥ 8 m/s) persistants jusqu'à 24 heures (10 février 2009) ou 48 heures (11-12 janvier 1978, 8-9 novembre 2007) ; 2) des épisodes (sub-)parallèles à la côte (secteur ouest – ouest-sud-ouest, à sud – sud-ouest), plus fréquents, et d'une durée de 24 à 72 heures (10-13 mars 2008) des épisodes balayant une large fenêtre ouest à nord (parfois est-nord-est), avec des vents du quart nord-ouest, modérés à forts, parfois persistants jusqu'à près de 3 jours, ou plus courts (< 48 h) comme ce fut le cas le 3 janvier 1976. Parmi ces événements, l'étude des niveaux d'eau extrêmes observés au marégraphe de Dunkerque souligne l'occurrence de telles tempêtes à franchissement de perré (et érosion côtière) les 12 janvier 1978 (7,30 m CM ; coeff. 107), 9 novembre 2007 (6,83 m CM ; coeff. 76), 10 février 2009 (6,84 m CM ; coeff. 107), avec des niveaux d'eau atteints supérieurs à 6,80 m, et donc nettement plus élevés que le niveau de plus hautes mers astronomiques (PHMA de 6,48 m).

Plusieurs études récentes ont également démontré l'importance que pouvaient avoir les zones de discontinuité atmosphérique dans l'état d'agitation du plan d'eau et par voie de conséquence sur le risque de submersion (Costa *et al.*, 2004 ; Caspar *et al.*, 2007 ; Cantat *et al.*, 2012). On observe ainsi lors du passage d'un front froid, et durant deux à trois heures, une accentuation momentanée de la hauteur des vagues et le changement brutal de la direction du vent qui est favorable à la formation d'une houle croisée, chaotique et très cambrée, particulièrement efficace pour le démaigrissement des plages et la projection d'eau au-delà des ouvrages (Costa, 2005 ; Caspar *et al.*, 2010). En Haute-Normandie, près de 70 % des cas de submersions se sont réalisés au moment ou peu après le passage d'un front froid (Costa *et al.* 2004 ; Pirazzoli *et al.*, 2006 ; Caspar *et al.*, 2007 ; Letortu, 2013). Ceci est le cas des épisodes des 11-12 février 1990 et 17 décembre 2004 à Dieppe, ou bien lors du passage de la tempête Johanna en mars 2008 des côtes bretonnes jusqu'au nord de la France. Bien que les côtes basses de Haute-Normandie aient subi à plusieurs reprises des dommages, Costa *et al.* (2013) soulignent que la combinaison parfaite (et catastrophique) de tous les facteurs (niveaux d'eau extrêmes, vents forts lors de pleine mer de marée d'équinoxe et passage d'un front froid) n'a pas été

observée depuis 1960 (Pirazzoli *et al.*, 2006, 2007), cette combinaison restant statistiquement possible. Si le 12 février 1990 la ville d'Etretat fut sévèrement inondée sous l'influence de forts vents d'afflux au passage d'un front froid (Caspar *et al.*, 2010), à Dunkerque en revanche aucune submersion de ce type n'a été constatée. En effet, les vents de secteur sud-sud-ouest à ouest-sud-ouest, obliques par rapport à l'orientation de la côte, ne constituaient pas des vents d'afflux pour le littoral dunkerquois, bien qu'ils aient été relativement forts (8 à 19 m/s) et persistants (60 heures). En mars 2008, la concomitance observée en Manche entre le passage du front froid et pleine mer ne s'est pas poursuivie lors de la progression de la dépression vers le nord, ce qui explique les conditions de traine rencontrées au sud de la Mer du Nord.

Les épisodes de nord à nord-est ne créent généralement pas de surcote notable sur les rivages normano-picards mais, lorsqu'ils atteignent une vitesse de plus de 75 km/h (9 Beaufort) et soufflent avec persistance, ils sont susceptibles de générer une mer dite "entièrement formée" capable de produire des submersions en période de grandes marées, comme ce fut par exemple le cas le 12 janvier 1978 (Caspar *et al.*, 2007). Lors de cet épisode, l'influence du front froid a conduit à une augmentation considérable de la surcote dans différents ports des côtes de la Manche (Costa *et al.*, 2004) mais avec, cette fois ci, une forte surcote également à Dunkerque (1,15 m à PM le 12 janvier) qui a mené à une submersion sévère de la digue de front de mer, des inondations et dégâts importants aux commerces et rues voisines. Les vents de secteur ouest à sud-ouest virant rapidement au nord peu avant la pleine mer ont provoqué une accumulation des eaux océaniques de surface vers le Pas-de-Calais (par effet d'entonnoir), responsable d'un afflux d'eau notable dans les ports de Calais et Dunkerque. Le 10 février 2009, la côte d'Opale a de nouveau été marquée par un très bref mais fort coup de vent au passage de la dépression Quinten, peu creusée en son centre et accompagnée d'un front froid pluvieux très marqué en provenance de l'ouest, mais poussée par un fort anticyclone. Avec une rapide chute de pression enregistrée à Dunkerque, les vents ont considérablement forcé le 10 février au matin, virant brusquement du sud au secteur nord à nord-ouest. De courte durée (environ 10 heures), les vents frontaux et supérieurs à 8 m/s ont atteint un pic à 18 m/s en fin de matinée, soit 2 à 3 heures avant la pleine mer. Combiné à une marée de vive-eau (coeff. 105), cet événement a engendré un franchissement du perré sous l'action des vagues.

Lorsque nous combinons tous les précédents éléments, certains très hauts niveaux d'eau et épisodes de submersion ne s'expliquent ni par le passage d'un front froid ni par des conditions météo-marines exceptionnelles. D'autres facteurs explicatifs doivent donc être pris en considération, tels que les facteurs de prédisposition et le temps de préparation des plages. Sur la partie orientale du secteur d'étude normand-picard, un phénomène d'adaptation morpho-sédimentaire des plages de galets haut-normandes et picardes a été mis en évidence. En effet, d'anciens levés de profils de plages de galets (Costa *et al.*, 2008) ont montré l'existence d'importantes variations altimétriques lors de forts coups de vent, pouvant atteindre 3 mètres à leur sommet lors d'un seul cycle tidal (Costa, 1997 ; Costa, 2005 ; Caspar *et al.*, 2010). Une analyse croisée des conditions anémométriques et de l'état des stocks de sédiments sur les plages peu avant l'inondation par la mer fait ressortir un seuil de vent d'afflux de l'ordre de 8 m/s pour générer une agitation marine susceptible d'induire un abaissement de profil de plage significatif. Lors de conditions météo-marines extrêmes, la survenue d'une submersion marine importante peut alors révéler la vulnérabilité accrue d'une plage, état de fragilité hérité d'une agitation marine s'étant produite quelques jours à quelques semaines plus tôt (Letortu *et al.*, 2012). Par exemple, le passage de la tempête du 3 février 1990, en marée de morte-eau, n'avait pas provoqué de submersion à Etretat mais néanmoins contribué au déséquilibre du profil de plage et fragilisé le site vis-à-vis de futures tempêtes. Quelques jours plus tard, le 11-12 février et du 26 février au 1er mars 1990, les nouveaux épisodes qui se sont produits ont, cette fois-ci, provoqué des submersions sévères. Ces résultats corroborent ceux observés en milieu sableux en Bretagne (Suanez et Cariolet, 2010), ainsi que sur la côte d'Opale (Maspataud, 2011).

Sur le littoral dunkerquois, l'analyse des profils de plage réalisés depuis 2007 a permis de souligner le fait que pour des conditions météo-marines quasi identiques la réponse du système

dune-plage n'est pas nécessairement la même. Ainsi qu'en Haute-Normandie, les effets de tempêtes hivernales successives (ou d'épisodes énergétiques) ont également été étudiés, comme ce fut par exemple le cas en mars 2008 suite au passage de Johanna (Maspataud, 2011). A Dunkerque, le niveau d'eau maximal atteint à pleine mer le 12 mars (6,52 m CM) n'a pas été suffisant pour provoquer ni une érosion dunaire ni de franchissement de perré même sous l'action des vagues à la côte. L'érosion alors observée est limitée à un fort abaissement du haut de plage (jusqu'à 40 cm) et un aplanissement total des systèmes de barres-bâches intertidales. Quelques jours après, les 21-23 mars 2008, dans des conditions a priori moins efficaces (marnage plus réduit, coup de vent plus modéré), la faible altitude de la plage a permis aux vagues d'atteindre le pied de dune provoquant, cette fois ci, une forte érosion et un net recul du front dunaire (> 1 m) (Maspataud *et al.*, 2009).

5. Conclusions

Les littoraux français de la Manche orientale et de la Mer du Nord méridionale, pourtant de type très différent en termes de morphologie (côtes à falaises entrecoupées par des vallées et valleuses versus polders protégés de la mer par des cordons dunaires), sont tous deux caractéristiques de zones basses, urbanisées et aménagées, en bordure de mer épicontinentale. Ce secteur d'étude est localement sensible aux submersions marines en raison non seulement de ses caractéristiques altimétriques mais également de son exposition aux facteurs météo-climatiques. Bien que l'orientation des côtes normano-picarde (sud-ouest à nord-est) et dunkerquoise (ouest-sud-ouest à est-nord-est) soit relativement proche, ces deux sites sont sensibles à des forçages différents (secteurs de vent, passages dépressionnaires), le premier étant généralement plus impacté par les flux d'ouest perturbés tandis que le second est plus sensible aux perturbations en provenance du quart nord. L'étude d'événements de submersion, bien documentés et marquants sur ces deux façades littorales, a montré que le type de franchissement par la mer est le même mais qu'au cours d'un même épisode ces deux secteurs de côte ne sont pas nécessairement affectés à part égale. Selon l'orientation des vents, l'heure de la pleine mer, le cheminement de la dépression, l'un ou l'autre de ses secteurs peut être frappé par la mer, voire exceptionnellement les deux.

Ces secteurs présentent néanmoins des similitudes dans les conditions météo-marines menant au franchissement et, en particulier, dans leurs facteurs aggravants, dont la conjonction vient amplifier le risque de submersion et d'inondation déjà présent. En Manche orientale comme dans le sud de la Mer du Nord, le passage d'un front froid conjugué à une pleine mer accroît considérablement les effets des vagues et du haut niveau d'eau atteint lors de la marée haute et se révèle particulièrement efficace non seulement pour la projection de paquets de mer sur les ouvrages côtiers mais aussi pour le démaigrissement des plages. Le phénomène d'adaptation morpho-sédimentaire et du temps dit de préparation des plages (de galet ou de sable) avant débordement est un autre facteur aggravant face aux franchissements. En effet, des variations altimétriques du profil de plage, induites par la force et la direction du vent (vents morphogènes de 8 m/s), durant les jours ou les semaines précédant l'épisode, peuvent provoquer une évolution rapide de leur vulnérabilité et des défenses (naturelles ou anthropiques) qui la bordent.

Dans le contexte actuel, une augmentation de la fréquence des hauts niveaux d'eau et des forts vents d'afflux risque d'aggraver les impacts de tels phénomènes submersifs, si l'on considère leur variabilité future dans le contexte du changement climatique. La prise en considération de l'ampleur et la genèse des phénomènes passés, actuels ou potentiels, ne peut donc que contribuer à anticiper les modes de gestion à mettre en place ou à améliorer sur la bande littorale.

Remerciements

Les travaux, réalisés de 2007 à 2011 dans le cadre d'une thèse au laboratoire LOG bénéficiant d'une Allocation de recherche du Ministère de l'Enseignement et de la Recherche, ont été en partie financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au travers du projet VULSACO (n° ANR VMC06-009). Les travaux,

réalisés de 2009 à 2013 dans le cadre d'une thèse au laboratoire LETG-Caen Géophen (allocation de recherche CNRS), ont été possibles grâce aux données fournies par Météo-France et le SHOM.

Bibliographie

- Allen H., Delannoy B. (1990). *Mesure de houle en différents sites du littoral français*. Rapport EDF-LNH HE-45/88.03.532, 288 p.
- Cantat O., Costa S., Letortu P., Savouret E. (2012). Le rôle des facteurs atmosphériques et marins dans la genèse des submersions côtières. Exemples en Manche orientale, de Barfleur au Tréport. *Actes des Journées de climatologie du CNFG, Liège, mars 2012*, p. 31-48.
- Caspar R., Costa S., Jacob E. (2007). Fronts froids et submersions de tempête dans le nord-ouest de la France : le cas des inondations par la mer entre l'estuaire de la Seine et de la Somme. *La Météorologie*, 57, p. 37-47.
- Caspar R., Costa S., Lebreton P., Letortu P. (2010). Les submersions de tempête de la nuit du 10 au 11 mars 2008 sur la côte d'Albâtre (Haute-Normandie, France) : détermination météo-marine. *Noroi*, 215, p. 115-132.
- Chaverot S., Héquette A., Cohen O. (2008). Changes in storminess and shoreline evolution along the northern coast of France during the second half of the 20th century. *Zeitschrift für Geomorphologie Suppl.* 52 (3), p. 1-20.
- Costa S. (1997). *Dynamique littorale et risques naturels : l'impact des aménagements, des variations du niveau marin et des modifications climatiques entre la Baie de Seine et la Baie de Somme*. Thèse de Géographie, Université de Paris I, 376 p.
- Costa S. (2005). *Falaises à recul rapide et plages de galets : de la quantification des dynamiques d'un système complexe à la caractérisation des risques induits*. Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Bretagne Occidentale, 310 p.
- Costa S., Cantat O., Pirazzoli P.A., Lemaitre M., Delahaye D. (2004). Vents forts et submersions de tempête en Manche orientale : analyse météo-marine sur la période historique récente. *Actes du Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Climat, mémoire du temps. Les relations climat-espace-société »*, p. 277-280.
- Costa S., Henaff A., Lageat Y., Plessis E. (2002). Le recul des falaises crayeuses du Pays de Caux : détermination des processus d'érosion et quantification des rythmes d'évolution. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 8, p. 107-118.
- Costa S., Levoy F., Monfort O., Curoy J., De Saint Leger E., Delahaye D. (2008). Impact of sand content and cross-shore transport on the morphodynamics of macrotidal gravel beaches (Haute-Normandie, English Channel). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 3, p. 41-62.
- Elineau S. (2013). *Le risque naturel côtier sur la communauté d'agglomération du Havre (Haute-Normandie): Une évaluation des aléas*. Thèse de doctorat de l'Université du Havre, 278p.
- Héquette A. (2010). Les risques naturels littoraux dans le Nord-Pas-de-Calais, France. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Hors-série 8, octobre 2010, URL : <http://vertigo.revues.org/10173>.
- Héquette A., Ruz M-H., Maspataud A., Sipka V. (2009). Effects of nearshore sand bank and associated channel on beach hydrodynamics: implications for beach and shoreline evolution. *Journal of Coastal Research*, SI 56, p. 59-63.
- Letortu P. (2013). *Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits*. Thèse de doctorat de l'Université de Caen Basse-Normandie, 408 p.
- Letortu P., Costa S., Cantat O. (2012). Les submersions marines en Manche orientale : approche inductive et naturaliste pour la caractérisation des facteurs responsables des inondations par la mer. *Climatologie*, volume 9, p. 31-57.
- Maspataud A. (2011). *Impacts des tempêtes sur la morphodynamique du profil côtier en milieu macrotidal*. Thèse de Géosciences, Géologie, Paléontologie, Océanographie, Université du Littoral Côte d'Opale, 470 p.
- Maspataud A., Ruz M-H., Héquette A. (2009). Spatial variability in post-storm beach recovery along a macrotidal barred beach, southern North Sea. *Journal of Coastal Research*, SI 56, p. 88-92.
- Maspataud A., Ruz M-H., Vanhée S. (2013). Potential impacts of extreme storm surges on a low-lying densely populated coastline: The case of Dunkirk area, Northern France. *Natural Hazards*, Volume 66, Issue 3, p. 1327-1343.
- Pirazzoli P.A., Costa S., Dornbush U. (2007). Flood threat anomaly for the low coastal areas of the English Channel based on analysis of recent characteristic flood occurrences. *Ocean Dynamics*, 57, p. 501-510.
- Pirazzoli P.A., Costa S., Dornbush U., Tomasin A. (2006). Recent evolution of surge-related events and assessment of coastal-flooding risk on the eastern coasts of the English Channel. *Ocean Dynamics*, 56, p. 498-512.

Rufin-Soler C., Héquette A., Gardel A. (2008). Assessing the vulnerability of coastal lowlands to marine flooding using LiDAR data, Sangatte coastal dunes, northern France. *Zeitschrift für Geomorphologie Suppl.* 52 (3), p. 195-211.

SIRACEDPC (2008). *Plan ORSEC*. Préfecture de Seine-Maritime. Document interne.

Suarez S., Cariolet J.-M. (2010). L'action des tempêtes sur l'érosion des dunes, les enseignements de la tempête du 10 mars 2008. *Noréis*, 215, p. 77-99.

Apport de l'imagerie satellitaire pour le suivi du trait de côte

Prototypes sur Saint-Pierre-et-Miquelon

Christelle Bosc¹, Laure Chandelier¹, Renaud Lagnous¹, Pierre Laine¹, Amélie Roche²

1. Pôle de compétences et d'innovation Applications satellitaires et télécommunications (PCI AST), Direction territoriale Sud-Ouest, Cerema

1, avenue Colonel Roche, 31400 TOULOUSE.

Christelle.Bosc@cerema.fr ; Laure.Chandelier@cerema.fr ; Renaud.Lagnous@wanadoo.fr ;

Pierre.Laine@cerema.fr

2. Direction technique Eau mer et fleuves, Cerema

Technopôle Brest Iroise, 155, rue Pierre Bouguer, BP 5, 29280 Plouzané CEDEX, France.

Amelie.Roche@cerema.fr

RESUME

Un état de l'art réalisé par le CEREMA en 2012 a montré que les pratiques en matière d'identification et de suivi du trait de côte à partir d'images satellites sont nombreuses mais présentent des niveaux variables d'automatisme, de complexité et de précision. Un prototype a été développé afin de tester et de quantifier les apports de l'imagerie satellitaire pour un suivi opérationnel du trait de côte. Exploitant des images Pléiades, il a été appliqué sur l'isthme de Miquelon-Langlade (Saint-Pierre-et-Miquelon, France) qui présente différentes géomorphologies : cordons dunaires, cordons de galets et secteurs anthropisés. Les résultats ont été comparés à des mesures de terrain acquises à la même période. Les techniques de télédétection apportent des résultats satisfaisants, de précision métrique (erreur moyenne de 2m) sur les secteurs sableux, avec un indice lié à la limite de végétation. En utilisant un indicateur de position du trait de côte plus complexe lié à la géomorphologie littorale (pied de dune, limite de plage...) l'erreur reste inférieure à 5 m. La méthode développée, testée sur un site (faciès rocheux) de l'île de Saint-Pierre, et sur 2 dates permettra de suivre l'évolution du trait de côte.

ABSTRACT.

The state of the art established by Cerema in 2012 pointed that many techniques of remote sensing have been applied to shoreline detection. Those techniques have variable levels of automatism, complexity and precision. Cerema produced a prototype to assess and quantify potential benefits of remote sensing for an operational shoreline monitoring. Based on Pleiades satellite data, this prototype has been applied on Miquelon-Langlade isthmus (Saint-Pierre-et-Miquelon, France) with a panel of different coastal geomorphologies: sand dunes, gravel beaches and anthropogenic features. 3 different methods exploiting optical data (RGB and NIR) were tested. Results have been compared to simultaneous field data. They confirm that remote sensing brings interesting information with error lower than 2m on sandy sectors and a shoreline indicator linked to vegetation. Error rises with other shoreline indicators and coastal geomorphologies but the averaged error remains lower than 5m. This method applied on Saint-Pierre rocky sites, at different times will enable coastline monitoring.

MOTS-CLES : TRAIT DE COTE, IMAGES SATELLITES, SUIVI, TRAITEMENT AUTOMATIQUE, PLEIADES

KEYWORDS: COASTLINE, SATELLITE, REMOTE SENSING, MONITORING, AUTOMATIC DATA PROCESSING, PLEIADES

1. Contexte et besoins

L'évolution du littoral se traduit souvent par une analyse de mesures sur le terrain du « trait de côte » basées sur l'évolution de certains indicateurs du milieu liés à l'altimétrie, à l'hydrodynamique, à la géomorphologie ou à la botanique. Toutefois, ces mesures locales sont hétérogènes de par la diversité des méthodes et des outils de levé, la multiplicité des opérateurs, la variété des périodes de levé et parfois même la multiplicité des définitions du « trait de côte ». Ainsi, elles ne permettent pas d'avoir une vision intégrée et nationale, ce que préconise la « Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte » (MEDDTL, 2012). En parallèle, l'imagerie spatiale déploie de plus en plus de satellites performants, tels que Pléiades, Spot 6 et 7 et bientôt Sentinel, offrant une résolution spatiale et/ou une revisite temporelle très élevées. Le développement d'outils libres, comportant des algorithmes d'extraction de l'information des images, et le contexte politique actuel, facilitant l'accès à la donnée avec la mise en place de plates-formes de mutualisation des données, rendent l'imagerie satellitaire de plus en plus accessible en termes de coût et de technicité pour des utilisations en lien avec les besoins sociétaux. S'inscrivant dans le cadre de ces politiques nationales, le Cerema (ex-CETMEF et ex-CETE SO) a conduit une étude sur l'apport potentiel de l'imagerie satellitaire pour la cartographie de traits de côte. Cet article présente d'abord l'état de l'art des pratiques en matière d'identification et de suivi de traits de côte à partir d'images satellites ; il aborde ensuite les résultats obtenus par un prototype réalisé sur Saint-Pierre-et-Miquelon (France) afin de tester et de quantifier les apports potentiels de l'imagerie satellitaire pour un suivi opérationnel du trait de côte.

2. Synthèse de l'état de l'art de l'exploitation des données satellitaires pour le suivi du trait de côte

L'étude bibliographique (Bosc *et al.*, 2013) a montré que la photo-interprétation d'images satellites était relativement simple à mettre en œuvre pour cartographier le trait de côte moyennant des images à très haute résolution (Le Berre *et al.*, 2005). Toutefois, elle est peu pertinente sur de larges territoires et pour des mises à jour fréquentes en raison du temps humain nécessaire à sa réalisation. Des méthodes de traitement semi-automatiques ont fait leurs preuves pour extraire le trait de côte défini comme la « limite d'immersion ». Elles s'appliquent à la fois à des images optiques (Guérin, 2011) ou radar (Baghdadi *et al.*, 2004). D'autres méthodes plus complexes, utilisant des classifications supervisées, permettent de cartographier les faciès littoraux (eau, végétation, sol nu, bâti, sable...) (Emran et Hakdaoui, 2003). Ces méthodes exploitent des indices (combinaison des canaux radiométriques de l'image ; par exemple le NDVI -Normalized Difference Vegetation Index- ou le GEMI -Global Environmental Monitoring Index-) ou des textures (information sur la variation locale de niveaux de gris des pixels de l'image qui traduit l'organisation particulière d'objets dans un paysage). Sur des côtes sableuses (Mallet *et al.*, 2007 ; Lafon *et al.*, 2010), le trait de côte défini comme le pied de dune est ainsi extrait avec une précision de l'ordre de 5 à 10 m suivant les images utilisées. Sur les côtes rocheuses (Lafon et Aubié, 2008), le trait de côte, défini comme le pied de falaise ou pied d'ouvrage, est parfois dissimulé par la présence d'ombres générées par les conditions d'acquisition de l'image, ce qui rend sa mesure plus délicate.

Les technologies satellitaires présentent l'avantage de pouvoir couvrir des zones inaccessibles à l'opérateur et leur capacité de programmation présente un intérêt indéniable pour un suivi régulier ou post-événement. Les traitements automatiques offerts par la télédétection nécessitent un premier calage par rapport aux données de terrain et une évaluation de leur précision ; ils peuvent par la suite être utilisés en complément des suivis terrestres du trait de côte.

3. Prototypage de cartographie du trait de côte sur Saint-Pierre-et-Miquelon

3.1. Données et méthode

Une scène d'images Pléiades a été acquise le 1er mai 2012 sur l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon. Les données mises à disposition via le programme GEOSUD sont des orthoimages 16 bits et 4 canaux (Rouge, Vert, Bleu et proche Infrarouge-IR-) d'une résolution de 50 cm. Une zone de 1,5 par 5 km sur l'isthme de Miquelon-Langlade a été retenue comme zone-test, pour un linéaire d'environ 10 km de côte. L'isthme est en effet régulièrement suivi par les services de la Direction des Territoires, de l'Alimentation et de la Mer (DTAM) en raison de phénomènes d'érosion pouvant provoquer la rupture de la seule route d'accès à Langlade. Le site est essentiellement sableux et dunaire, présentant également des cordons de galets et des secteurs anthropisés (Figure 1).



Figure 1. Zone d'étude avec différents types de géomorphologie et principaux indicateurs de

Les traits de côte issus de différentes analyses de l'imagerie satellitaire ont ainsi pu être comparés aux résultats de terrain de la DTAM, réalisés en mai 2012. S'il n'est pas possible d'évaluer la précision des levés de la DTAM, supposée décimétrique, la précision géométrique de l'orthoimage Pléiades livrée par IGN Espace a pu être vérifiée par comparaison avec la BD Ortho® IGN sur 22 points de contrôle. L'exactitude planimétrique relative obtenue est de 1,3 m, ce qui est en accord avec les précisions respectives annoncées sur la zone (1 m pour la BD Ortho® IGN et 0,8 m pour Pléiades).

La méthodologie (Lagnous, 2013) procède en deux étapes : une classification de l'image afin d'obtenir une cartographie de faciès littoraux puis l'extraction automatique du trait de côte à l'interface entre deux types de faciès (côté terre/côté mer). Pour la classification, trois méthodes utilisant l'algorithme SVM -séparateur à vaste marge- (Boser *et al.*, 1992) ont été testées (Roche *et al.*, 2014). Dans la suite, sont seulement présentés les résultats qui relèvent d'une méthode développée au (Cerema) Pôle Applications satellitaires du MEDDE (Bouffier et Hébrard, 2014) : une classification non supervisée sur 8 classes définies « grossièrement » afin de créer des échantillons d'entraînement plus fins et plus nombreux sur lesquels l'algorithme SVM est alors appliqué. Le résultat est ensuite fusionné selon les 8 classes initiales correspondant à des analyses paysagères généralistes (voir la nomenclature en Tableau 1). Des post-traitements sont effectués pour nettoyer

la classification des pixels isolés. La dernière étape consiste à calculer la ligne séparant les classes de part et d'autre du trait de côte (extraction de contour sur une image binaire). Les traitements sont réalisés avec des logiciels libres : OrfeoToolBox (traitement des images satellites), QGIS et GRASS (traitement vecteur).

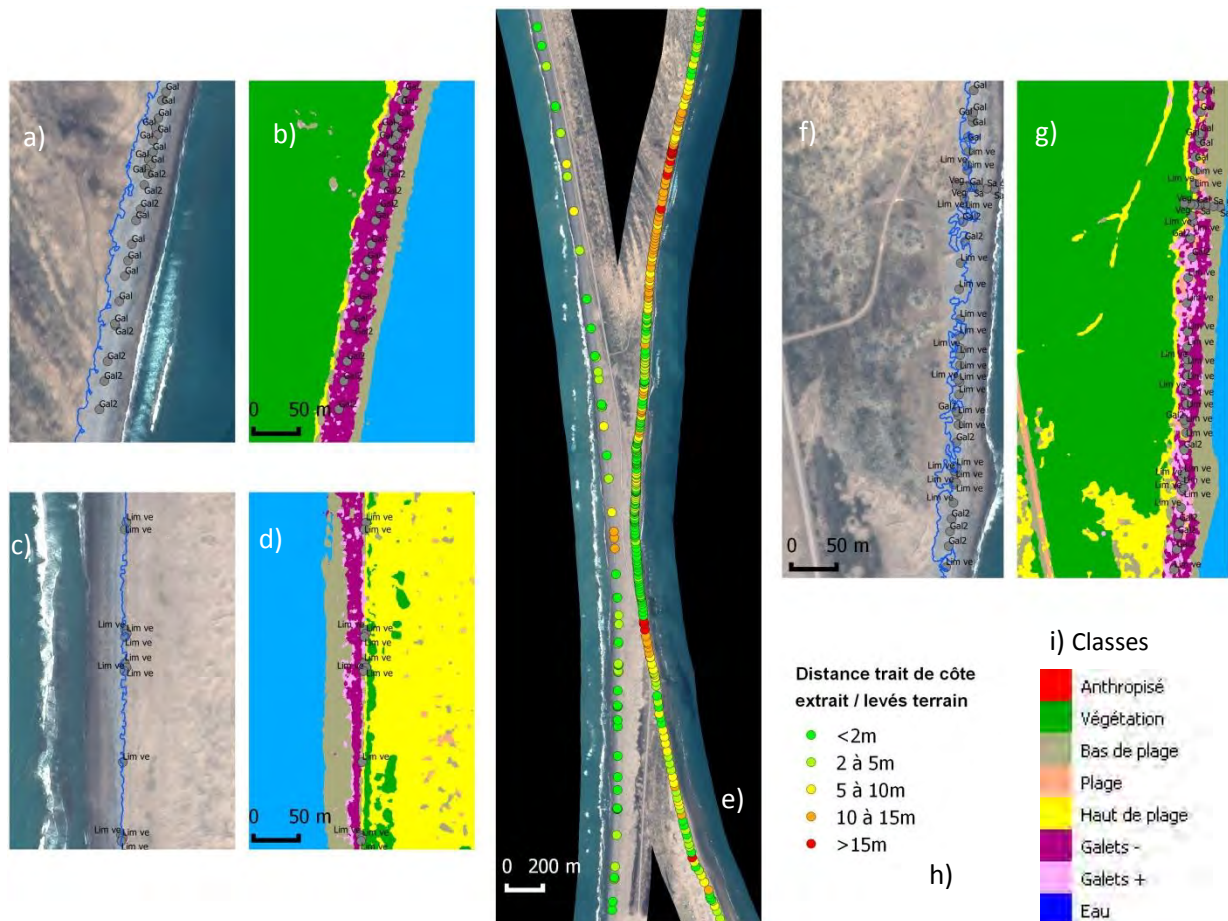
3.2 Validation

La validation des classifications obtenues a été réalisée à partir d'échantillons de contrôle, avec des indicateurs de qualité classiques en télédétection (Caloz et Collet, 2001) (cf. Tableau 1). Cette étude numérique a été combinée à une évaluation visuelle qui avait pour objectif de mieux cerner les zones ou faciès bien cartographiés.

<i>Classe</i>	<i>F-score</i>	<i>Classe</i>	<i>Anthropisé</i>	<i>Végétation</i>	<i>Bas plage</i>	<i>Plage</i>	<i>Haut plage</i>	<i>Galets bas</i>	<i>Galets haut</i>	<i>Eau</i>
<i>Anthropisé</i>	0,00	<i>Anthropisé</i>	0	22,1	0	0	77,9	0	0	0
<i>Végétation</i>	1,00	<i>Végétation</i>	0	100	0	0	0	0	0	0
<i>Bas de plage</i>	0,85	<i>Bas plage</i>	0	0	84,4	0,4	7,6	4,5	2,8	0,3
<i>Plage</i>	0,59	<i>Plage</i>	0	0	0	88	11,9	0	0,1	0
<i>Haut de plage</i>	0,91	<i>Haut plage</i>	0	0	3,7	9,2	87,1	0	0	0
<i>Galets bas</i>	0,77	<i>Galets bas</i>	0	0	0,2	2,3	0,4	78,3	18,8	0
<i>Galets haut</i>	0,67	<i>Galets haut</i>	0	0	3,5	0,5	0,1	29,2	66,7	0
<i>Eau</i>	1,00	<i>Eau</i>	0	0	0	0	0	0	0	100

Tableau 1. Contrôle et validation des classifications à partir des valeurs de F-Score (à gauche) et de la matrice de confusion (à droite)

La qualité de la position du trait de côte extrait a été estimée en calculant sa distance à chaque point du levé terrain réalisé au DGPS. Des cartographies de la précision du trait obtenu ont ainsi pu être produites et ont été complétées par une évaluation visuelle (cf. Figure 2).



²Figure 2. Résultats de la classification (b,d,g) en 8 classes (i) sur trois zones avec le trait de côte extrait (ligne bleue a,c,f) et une vue d'ensemble avec la distance trait de côte / levés terrain (e,h)

La valeur de kappa obtenue est de 0,92 ce qui reflète un accord quasi-parfait sur les échantillons de contrôle. L'étude des F-Score et de la matrice de confusion (Tableau 1) indique que les résultats de classification sont excellents pour les zones de végétation et pour l'eau. On observe de plus grandes difficultés dans les classes de plage et de galets pour lesquelles des confusions se produisent entre classes d'un même faciès mais de part et d'autre du trait de côte. Cette analyse numérique est confirmée par l'étude visuelle des résultats de classification (Figure 2). Les secteurs anthropisés ne sont pas détectés : il s'agit d'éléments très isolés (quelques rares bâtiments), mal pris en compte. Concernant l'évaluation du trait de côte, en étudiant les écarts numériques avec les données terrain, on constate que le résultat diffère d'un indicateur à l'autre :

- les limites galets / galets conduisent à des résultats très variables : au nord-est, l'algorithme ne différencie pas les deux types de galets alors qu'au nord-ouest, sur des faciès équivalents, les résultats sont plus encourageants ;
- les limites sable / galet, à l'est, sont détectées de façon irrégulière ;
- les gabions sont très mal pris en compte ;
- les limites de végétation sont très bien retrouvées (sauf sur une zone au centre ouest).

L'écart moyen calculé sur l'ensemble de la zone est de 5,3 m. Si on exclut les gabions et les crêtes de berme, cette valeur descend à 2,2 m, ce qui, dans une zone où l'érosion peut être de 3 m par an (Robin, 2007), permet d'envisager une utilisation opérationnelle pour le suivi.

5. Conclusion et perspectives

Le prototype réalisé sur l'isthme de Miquelon-Langlade fournit des résultats encourageants sur les secteurs sableux pour le suivi de la limite de végétation où la précision est métrique. L'erreur augmente en utilisant un indicateur différent ou en travaillant sur d'autres géomorphologies (par exemple un cordon de galets, celui-ci étant par ailleurs difficilement visible en photointerprétation). La performance de la méthode sera maintenant à éprouver sur d'autres types de côte et surtout dans le cadre d'un suivi temporel. En effet, la reproductibilité est un facteur essentiel pour que des comparaisons annuelles ou pluriannuelles soient possibles. En ce qui concerne la méthodologie même, des pistes d'amélioration existent : amélioration de la fonction de passage de la carte des faciès au trait de côte, utilisation d'un modèle numérique de terrain, nouveaux indicateurs et comparaison des mouvements des faciès plutôt que du trait de côte seul (la cartographie disponible est plus riche que le seul trait).

De nouveaux tests sont en cours sur l'île voisine de Saint-Pierre avec des images Pléiades 1A acquises en 2012 et 1B en 2013 afin de valider les résultats en absolu, d'éprouver la robustesse de la méthode sur un nouveau type de côte (rocheux pour Saint-Pierre) et de vérifier leur utilisation en relatif dans le cadre d'un suivi annuel à grand rendement.

Les premières observations réalisées sur la partie sud-ouest de l'île montrent le potentiel des images Pléiades pour une comparaison diachronique :

- les orthoimages sont géométriquement compatibles : des mesures effectuées sur 40 points de contrôle choisis au voisinage de la côte conduisent à un écart moyen entre les deux dates de 1,1 m (avec un écart-type de 0,6 m). Cette précision relative est en adéquation avec les spécifications des produits et implique que des évolutions métriques doivent pouvoir être observées ;
- les orthoimages sont radiométriquement compatibles : les deux dates (01/05/12 et 22/04/13) sont assez proches dans l'année et les conditions d'acquisition équivalentes, ce qui conduit à des aspects comparables. Il faut tout de même noter quelques écarts qui seront éventuellement à prendre en compte lors des traitements (voir Figure 3) : l'état de la mer est assez différent (calme en 2012 et agité en 2013), l'analyse du canal infrarouge montre que la végétation semble un peu moins avancée en 2012 et enfin, le terrain a légèrement évolué, comme le montre l'état de la piste sur la partie gauche de la Figure 3.

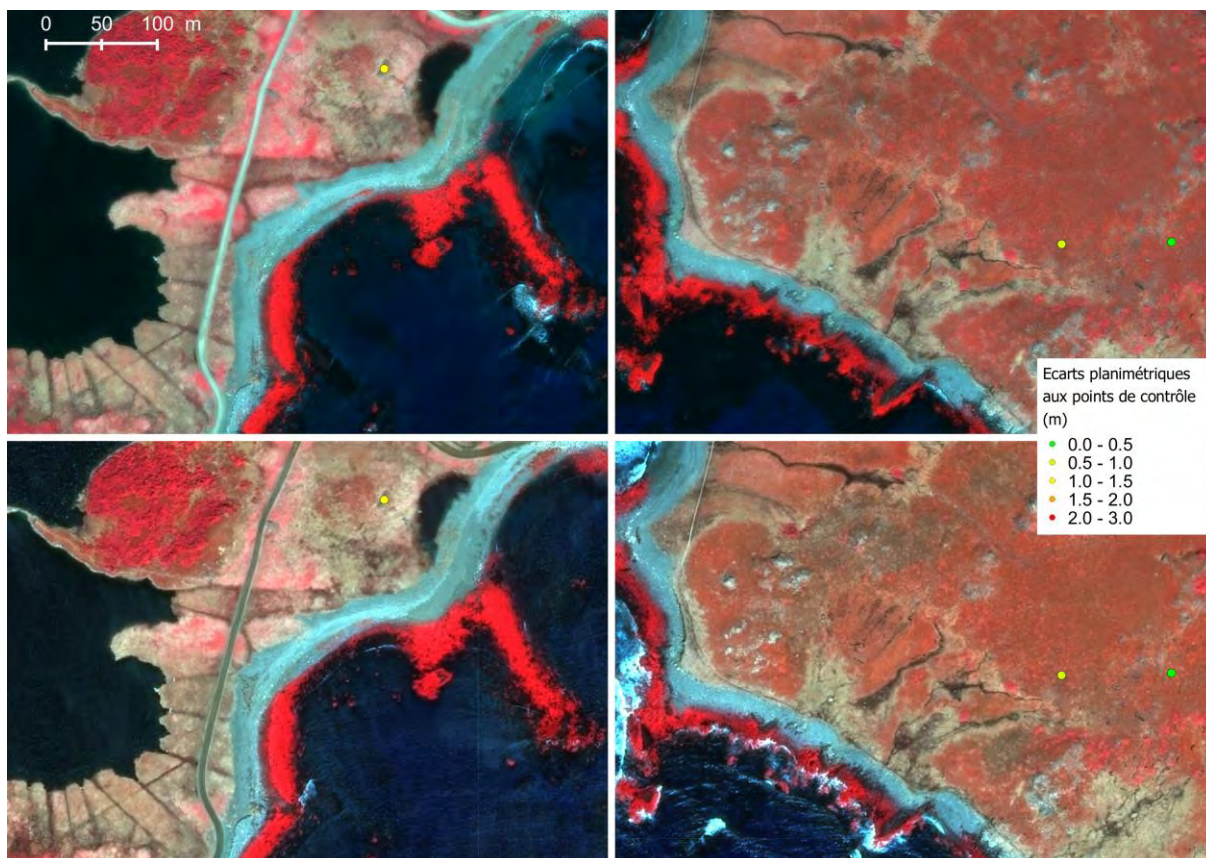


Figure 3. Orthoimage Pléiades 2012 (haut) et 2013 (bas) avec représentation des écarts planimétriques aux points de contrôle

La réalisation d'une cartographie des faciès aux deux dates par classification est en cours. Cette expérimentation permettra d'évaluer pleinement la méthode.

Remerciements : Le projet EQUIPEX GEOSUD, sélectionné parmi les « Équipements d'Excellence » du Programme Investissements d'Avenir (2011), vise à développer une infrastructure nationale de données satellitaires accessible gratuitement par la communauté scientifique et les acteurs publics. Il a permis l'acquisition des images Pléiades sur Saint-Pierre-et-Miquelon. La DTAM a gracieusement mis à disposition ses données de terrain pour le calage du prototype et la validation des résultats. De nombreux scientifiques ont contribué à l'état de l'art.

Références bibliographiques

- Baghdadi N., Gratiot N., Lefebvre J.P., Oliveros C., Bourguignon A. (2004). *Coastline and mudbank monitoring in French Guiana: contributions of radar and optical satellite imagery*. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 30, N° 2, p. 109–122.
- Bosc C., Raviola M., Lainé P. (2013). *Apport des technologies satellitaires pour la gestion du littoral : trait de côte et bathymétrie*. Rapport CETMEF.
- Boser B., Guyon I., Vapnik V. (1992). *A Training Algorithm for Optimal Margin Classifiers*. 5th Annual Workshop on Computational Learning Theory, p. 144-152, Pittsburgh, ACM.
- Bouffier J., Hébrard D. (2014, à paraître). *L'extraction d'informations à partir d'images satellites*. Rapport MEDDE.
- Caloz R., Collet C. (2001). *Précis de télédétection - Volume 3 : Traitements numériques d'images de télédétection*. Presses de l'Université du Québec, Sainte Foy, Canada, 386 p. ISBN 978-2-7605-1145-3.

- Emran A., Hakdaoui M. (2003). *Suivi par télédétection de l'évolution spatio-temporelle de la frange littorale au nord-est de Tétouan*. 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco, December 2-5, 2003.
- Guérin (2011). *Reconstruction bathymétrique de l'embouchure du bassin d'Arcachon à partir de l'analyse d'images satellites*. Rapport de stage de Master 2 Recherche ENVOLH, Université de Bordeaux 1.
- Lafon V., Aubié S. (2008). *Cartographie des faciès géomorphologiques du littoral de la Côte Basque française à partir des données Formosat 2*. BRGM/RP-56917-FR.
- Lafon V., Hoareau A., Mallet C., Desprats J.F. (2010). *Suivi du trait de côte en Aquitaine par imagerie Formosat-2*. XI^{èmes} journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Les Sables d'Olonne, p. 497-504.
- Lagnous R. (2013). *Évaluation de l'apport de l'imagerie satellitaire pour le suivi du trait de côte*. Rapport de Master 2 « Surveillance et gestion de l'environnement », Université Paul Sabatier, Toulouse 3.
- Le Berre I., Hénaff A., Devogèle T., Mascaret A., Wenzel F. (2005). *Spot 5 : un outil pertinent pour le suivi du trait de côte ?* Norois. <http://norois.revues.org/378>
- Mallet C., Lafon V., Desprats J.F. (2007). *Cartographie des faciès géomorphologiques du littoral aquitain à partir de l'imagerie spatiale Formosat-2*. BRGM/RP-56101-FR
- MEDDTL (2012). *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte : vers la relocalisation des activités et des biens*. MEDDTL. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-de-gestion.html>.
- Robin N. (2007). *Morphodynamique des systèmes de flèches sableuses – Étude comparative entre les embouchures tidales de l'Archipel de Saint Pierre et Miquelon et de la côte Ouest du Cotentin (Manche)*. Rapport de synthèse. Université de Caen, « Morphodynamique Continentale et Côtière » CNRS-UMR 6143. http://www.dune-miquelon-langlade.net/files/file/Etude_sedimentaire.pdf.
- Roche A., Bosc C., Chandelier L., Lagnous R. (2014). *Apport de l'imagerie satellitaire pour le suivi du trait de côte*. XIII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil de Dunkerque 2014.

L'imagerie satellite au service de la caractérisation des aléas et risques littoraux

Détection d'indicateurs géomorphologiques

Aurélie Dehouck¹, Virginie Lafon¹, Arthur Robinet¹, Cécile Curti¹, Nicolas Durou¹, Vincent Marieu², François Sabatier³, Bénédicte Guerinél⁴, Cyril Vanroye⁵

1. GEO-Transfert, EPOC, Université de Bordeaux

allée Geoffroy Saint Hilaire, CS 50023, F-33600 Pessac, France

a.dehouck@epoc.u-bordeaux1.fr ; v.lafon@epoc.u-bordeaux1.fr

2. EPOC, Université de Bordeaux

allée Geoffroy Saint Hilaire, CS 50023, F-33600 Pessac, France

3. CEREGE, Université d'Aix-Marseille

Europôle Méditerranéen de l'Arbois, avenue Louis Philibert, F-13545 Aix en Provence, France

4. DREAL Languedoc-Roussillon

520 allée Henri II de Montmorency, F-34000 Montpellier, France

5. DDTM13

16 rue Antoine Zattara, F-13332 Marseille, France

RESUME.

Cet article présente les produits issus de l'imagerie satellite utiles pour l'élaboration d'une approche intégrée de gestion des risques littoraux. De nouveaux développements méthodologiques ont été réalisés sur la base de données à Très Haute Résolution (THR) spatiale : Pléiades et TerraSAR-X. Ces développements portent sur la bathymétrie des petits fonds avec une approche duale et complémentaire permettant une restitution des profondeurs dans des environnements variés. Une méthode de détection automatique du trait de côte a également été développée à partir des données Pléiades qui, couplée à une validation à dire d'expert, permet la production rapide et efficace de diagnostics de mobilité du trait de côte, ainsi que sa réactualisation régulière à moindre coût. Enfin, la cartographie des dunes en terme d'habitat a également été améliorée par une classification multi-temporelle saisonnière qui permet une bonne discrimination des grands ensembles dunaires ce qui est d'intérêt dans le cadre d'actions de suivi et de conservation.

ABSTRACT.

This article introduces satellite-based products useful for the elaboration of an integrated strategy for coastal hazard management. New methodological developments have been carried out using Very High Resolution (VHR) space data. They concern nearshore bathymetry retrieval exploiting a dual and complementary strategy that accounts with a wider range of coastal environments. An automated shoreline detection method has also been developed which coupled with an expert validation produces short-delivery diagnostic of shoreline change and opportunity for cost-effective shoreline updating. The mapping of coastal dune habitats has been improved using a multi-temporal (seasonal) classification that gives a better discrimination of the main dune vegetation communities. It could be exploited in the frame of monitoring actions for dune conservation.

MOTS-CLES : BATHYMETRIE, TRAIT DE COTE, CORDONS DUNAIRES, CARTOGRAPHIE, IMAGES SATELLITE

KEYWORDS: NEARSHORE BATHYMETRY, SHORELINE, COASTAL DUNES, MAPPING, SATELLITE IMAGES

1. Introduction

Dans le contexte du changement global et dans la perspective du développement durable des littoraux, un besoin croissant de cartographies est exprimé en appui aux gestionnaires et aux politiques publiques. Or, la télédétection spatiale montre toutes les qualités pour établir la cartographie d'indicateurs géomorphologiques du littoral permettant d'évaluer sa position et son évolution dans le temps (parmi d'autres : Lafon *et al.*, 2010, Kumar *et al.*, 2010, Dehouck *et al.*, 2012a, Froidefond et Lafon, 2012) et, ainsi, d'analyser son état de conservation et sa vulnérabilité face à l'érosion et à la submersion. La multiplication de capteurs satellitaires à très haute résolution spatiale (THR), actifs ou passifs et dans différents domaines spectraux (ex. Pléiades, TerraSAR-X), offrent de nouvelles possibilités d'observation des littoraux. La très faible taille des pixels permet maintenant de discriminer des objets distants de moins d'un mètre et de fiabiliser les méthodes de détection, les pixels intégrant une variabilité radiométrique moindre.

Dans le cadre du projet APSAT³, différentes approches de cartographie du littoral ont été inventoriées, améliorées, adaptées aux données THR, optimisées pour en faire une exploitation multi-sites et enfin validées. L'article est organisé autour de quatre produits thématiques : la bathymétrie des petits fonds abordée par inversion optique et par inversion des crêtes de houle, le trait de côte et les faciès dunaires.

2. Données et méthodes

Le lecteur peut se référer à la communication de Lafon *et al.* (2014) pour une revue complète des méthodes mises en œuvre.

2.1. Bathymétrie littorale

2.1.1. Inversion radiométrique de la couleur de l'eau

Lorsque le fond est visible, l'élaboration de cartes bathymétriques par télédétection s'appuie sur les propriétés optiques des eaux littorales où la réflectance de surface s'exprime comme la somme des contributions du fond (albedo) et de la colonne d'eau (Lyzenga, 1978). L'approche exploitée ici est dérivée des travaux de Lafon *et al.* (2002) et Dehouck *et al.* (2009). Elle s'appuie sur quelques données de sondages in situ qui servent à calibrer les propriétés de la colonne d'eau au moment de la prise de vue et ainsi à produire des données bathymétriques précises sur l'ensemble de la zone imagée. Cette méthode a été déployée sur plusieurs sites des façades atlantiques et méditerranéennes à partir de données spatiales variées. La Figure 1 présente la bathymétrie réalisée à partir d'une scène SPOT-5 du 16/08/2009 sur un littoral de 40 km compris entre Leucate et Canet en Roussillon.

2.1.2. Inversion par extraction des crêtes de houle

Dans des zones plus turbides et agitées, l'inversion des crêtes de houle est une méthode alternative qui apporte des résultats encourageants pour restituer la profondeur (Pleskashevsky *et al.*, 2011 ; Rabaute *et al.*, 2013). Cette méthode s'appuie sur l'extraction des propriétés spatiales des vagues (longueur d'onde et direction) à partir des crêtes de houle visibles sur l'image satellite. Elle est applicable aussi bien à des données optiques que radar ce qui est un avantage considérable et permet de s'affranchir des contraintes d'acquisition liées à la couverture nuageuse. Les longueurs d'ondes sont obtenues soit par une transformée de Fourier bidimensionnelle (FFT 2D), soit par une corrélation 2D (Robinet, 2013). La profondeur est calculée par inversion de l'équation de dispersion

³ Action Publique technologies SATellites et Développement Durable, programme INTERREG SUDOE IVb

linéaire des vagues qui relie la hauteur d'eau (profondeur) à la longueur d'onde (extraite de l'image) et à la période des vagues (issue de modèles de vagues type Wave Watch 3 ou de houlographes).

Cette stratégie a notamment été appliquée à une image TerraSAR-X du 21/06/2010 (mode Strimap, 2,75 m de résolution) acquise sur le Bassin d'Arcachon. La houle visible sur l'image est d'une hauteur $H_s=1,16$ m et de période $T_p=12,20$ s. Les données de sondage datant d'avril – juin 2010 fournies par la DDTM33 et le SIBA sont utilisées pour la validation des résultats.

2.2. Trait de côte

Grâce à la très haute résolution, le pied de dune est souvent bien marqué sur les images Pléiades par des effets d'ombre. La méthode de détection développée repose sur une approche de classification très simplifiée qui exclut l'eau et la forêt, couplée à un algorithme itératif qui repère successivement des discontinuités significatives de différents indicateurs de texture (Haralick *et al.*, 1973). Ces discontinuités correspondent à la ligne de rivage, à la limite du jet de rive (sable humide/sable sec) et au pied de dune. Les détections erronées sont recalées par photo-interprétation à partir de l'image panchromatique à 70 cm de résolution puis une polyligne « trait de côte » est créée. Cette procédure a été appliquée à des données Pléiades sur plusieurs sites littoraux d'Aquitaine et de Méditerranée. La Figure 2 illustre les traits de côte extraits des données satellite de 2010 et 2012 sur le littoral de Biscarrosse et leur post-traitement avec le logiciel DSAS pour produire un diagnostic de la mobilité du trait de côte.

2.3. Faciès dunaires

La dune blanche, la dune grise et la forêt sont parmi les indicateurs géomorphologiques les plus pertinents pour le suivi et la conservation des cordons dunaires. Il est cependant délicat de les distinguer avec précision par classification d'une scène unique, qui plus est, de résolution décamétrique (Lafon *et al.*, 2010). Pour pallier cette difficulté, une approche multi-temporelle simple (Dehouck *et al.*, 2012b) a été adaptée pour augmenter le nombre de classes et de faciès dérivés des données spatiales. Différentes combinaisons d'images et de descripteurs (indices de végétation, images issues de la matrice de co-occurrence) ont été testées. Les descripteurs les plus utiles ont été rassemblés dans un arbre de décision, et la carte produite validée à l'aide de données de terrain et/ou de données photo-interprétées. La Figure 4 présente la cartographie des faciès dunaires réalisée sur le site de La Salie au sud de la Gironde à partir d'images Pléiades d'août 2012 et d'avril 2013.

3. Résultats

3.1. Bathymétrie littorale

3.1.1. Inversion radiométrique de la couleur de l'eau

La Figure 1 présente la bathymétrie obtenue à partir de l'image multispectrale SPOT-5 d'août 2009. La qualité excellente de l'image (eaux claires, effets de surbrillance à la surface de l'eau négligeables) permet une restitution des profondeurs jusqu'à une quinzaine de mètres de profondeur. Les résultats sont très bons dans la tranche d'eau de 0 à 10 m, puis se dégradent sévèrement au-delà de 10 m. La validation réalisée avec les données LIDAR indique une erreur moyenne absolue de 0,27 m entre 0 et -5 m de profondeur et de 0,45 m entre 0 et -10 m de profondeur. Ces résultats sont comparables avec ceux obtenus à l'embouchure du bassin d'Arcachon et les plages aquitaines, où l'erreur moyenne est de l'ordre de 30 à 40 cm dans les 6 premiers mètres de la colonne d'eau (Lafon *et al.*, 2002 ; Dehouck *et al.*, 2009).

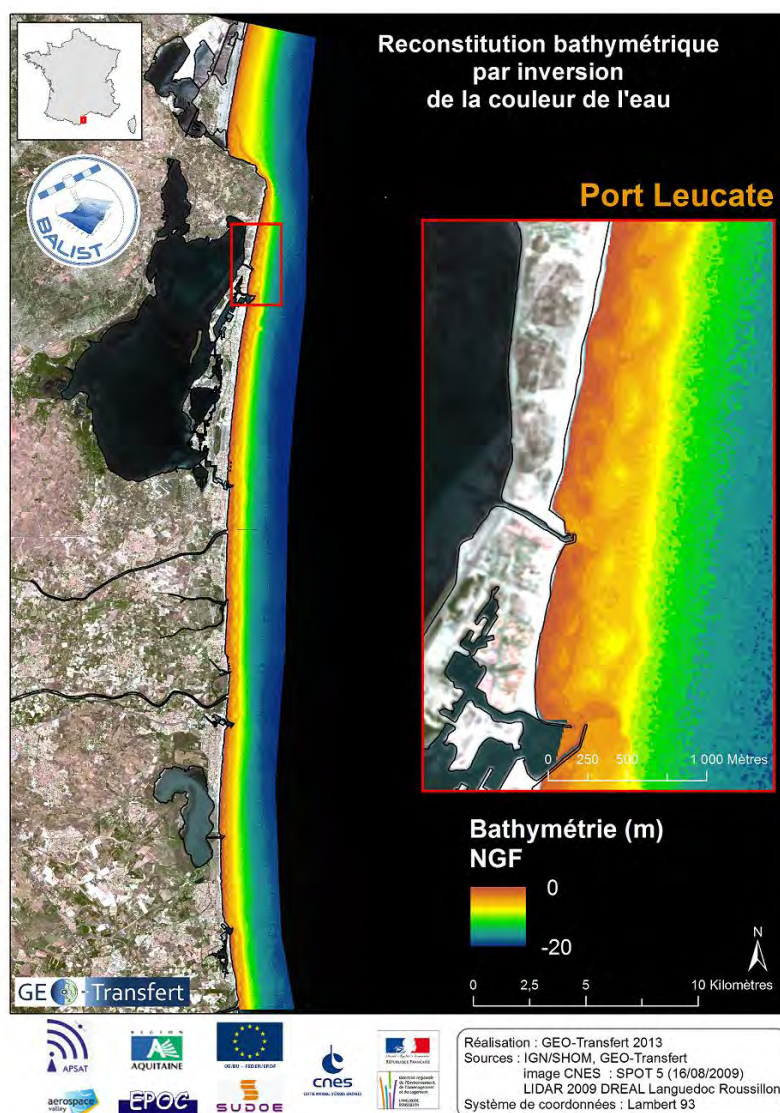


Figure 1. Bathymétrie du littoral du Roussillon produite à partir d'une image multispectrale SPOT-5 (Août 2009, 10 m)

3.1.2. Inversion par extraction des crêtes de houle

Le traitement de l'image TerraSAR-X par la méthode d'inversion des propriétés des vagues produit de l'information bathymétrique (Figure non présentée) dans des profondeurs allant de 0 à 35 m. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Plus les vagues sont longues (grande période, grande longueur d'onde), plus le domaine d'applicabilité de la méthode est grand. L'erreur moyenne augmente avec la profondeur, elle est sub-métrique dans des hauteurs d'eau de 0 à 10 m (0,78 m entre 0 et - 5 m, 1,42 m entre 0 et - 15 m, erreur relative de l'ordre de 25%). Des tests réalisés sur d'autres images satellite (SPOT-5, Pléiades) concluent à des résultats satisfaisants dans une tranche d'eau de 0 à 15 m avec une erreur moyenne relative inférieure à 10 %. Les sources d'erreur sont liées à la détermination imparfaite de la période des vagues associée à la prise de vue (on peut s'interroger sur la pertinence de l'utilisation de la période pic issue du modèle Wave Watch 3, terme porté au carré qui impacte fortement la qualité de l'inversion) et par l'hétérogénéité du champ de houle qui grandit en s'éloignant de la côte. Bien que les erreurs moyennes absolues soient relativement importantes, l'inversion des crêtes de houle est une méthode complémentaire et prometteuse car elle fonctionne dans des eaux turbides, sur des littoraux exposés aux vagues, aussi

bien avec des données optiques que radar, pour une gamme de profondeur plus exhaustive qu'avec la méthode d'inversion optique, et sans données bathymétriques de calage.

3.2. Trait de côte

La procédure d'extraction automatique produit un trait de côte brut dont la précision sur la position a été estimée à partir de 302 points de contrôle DGPS. 74% des points sont situés à moins de 10 m du levé de terrain, valeur qui correspond à l'erreur moyenne obtenue par traitement semi-automatique des données Formosat-2 sur le littoral aquitain (Lafon *et al.*, 2010). A ce stade, l'erreur moyenne de la détection est de 14,3 m avec un biais de 3 m vers l'est. Après recalage manuel du trait de côte dans les secteurs où l'extraction automatique échoue, 93% des points sont dorénavant situés à moins de 10 m de la vérité terrain, l'erreur moyenne étant de 4,5 m pour un biais absolu de 0,5 m vers l'est. L'effort de recalage concerne environ 40% des points générés par le traitement automatique. A l'issue de la procédure, la précision du trait de côte fourni est garantie à 5 m.

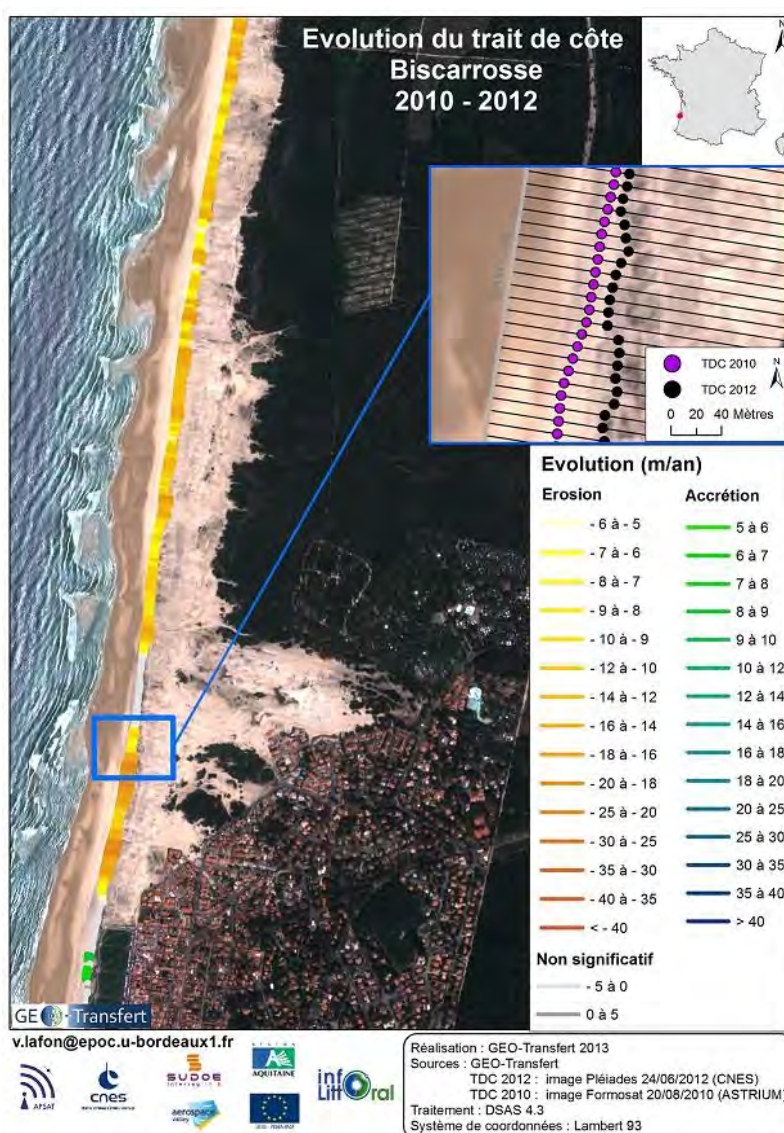


Figure 2. Mobilité du trait de côte (pied de dune) sur le littoral de Biscarrosse (Landes) entre 2010 et 2012 extrait à partir d'images satellite Formosat-2 (Août 2010, 2m) et Pléiades (Juin 2012, 0.7m).

3.3. Faciès dunaires

L'indice NDVI permet de classer systématiquement l'océan ($NDVI < 0$) et la forêt ($NDVI > 0,3$). Entre les deux apparaissent sans discrimination les autres faciès. L'analyse de la stabilité temporelle du NDVI sur la dune grise, réalisée à partir d'un jeu d'images satellite datant de la fin de l'hiver au printemps (février à mai), indique que l'indice de végétation est presque toujours compris entre 0,1 et 0,3 sur la dune grise tandis que, à cette période, celui de la dune blanche est très faible. Entre juin et novembre, le NDVI de la dune blanche augmente et se confond partiellement avec celui de la dune grise. Les caractéristiques phénologiques de la dune blanche et de la dune grise sont exploitées dans l'arbre de décision par une approche multi-temporelle intégrant une image de printemps et une image d'été/hiver.

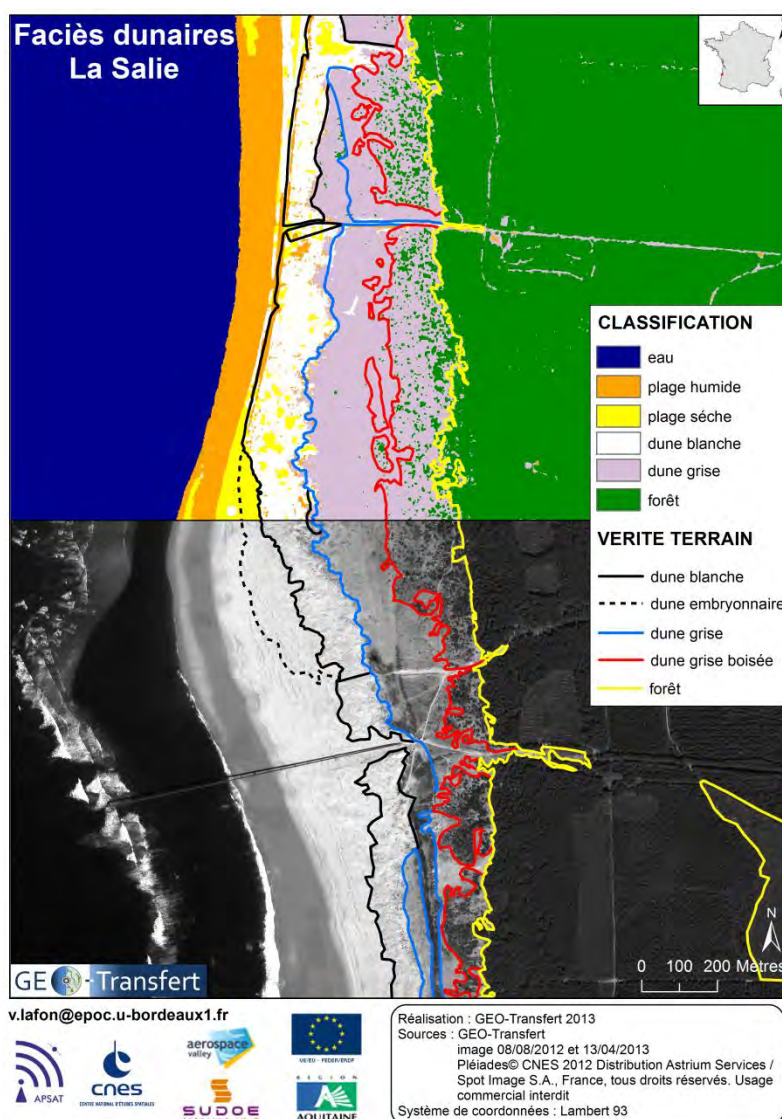


Figure 3. Cartographie des faciès dunaires à La Salie (Gironde) à partir de données Pléiades d'Août 2012 et Avril 2013

Pour différencier la plage et la dune blanche (mosaïque de pixels de sable nu et plus ou moins couvert de végétation), on utilise un descripteur lié à la texture. En effet, dans la matrice de cooccurrence, la variance radiométrique de la plage est beaucoup plus faible que celle de la dune

blanche. Le descripteur sélectionné est l'image de variance de la bande verte de la matrice de cooccurrence.

La combinaison de deux scènes Pléiades de résolution native de 2 m (ici, août 2012 et avril 2013 ; Figure 3) donne des résultats de classification bien meilleurs que ceux obtenus à partir d'une seule image Formosat-2, qui plus est, fusionnée à 2 m (Lafon *et al.*, 2010). L'apport de la THR par des descripteurs de texture et la prise en compte de la phénologie de la végétation dunaire par une approche multi-temporelle induisent des améliorations indéniables. La précision globale de la carte passe en effet de 73% à près de 92%. En outre, l'objectif de discrimination dune blanche/dune grise est atteint avec une précision de près de 70 et 80% pour chacun de ces deux habitats. Ces résultats indiquent que les images satellite THR sont un bon outil pour cartographier le système plage - dune et appréhender un certain nombre d'indicateurs de conservation des habitats, comme le rapport de la superficie de la dune blanche par rapport à celle de la dune grise (indicateur Natura 2000).

Conclusion

Les images Pléiades et TerraSAR-X acquises sur différents littoraux métropolitains ont permis de réaliser d'importants progrès méthodologiques concrétisés par des résultats très encourageants dans trois domaines : la bathymétrie des petits fonds sableux, la détection du trait de côte et la cartographie du couvert végétal des cordons dunaires.

Cet article démontre que les données satellites à très haute résolution spatiale sont adaptées à la surveillance du littoral, et dans certains cas, permettent même une caractérisation géophysique de celui-ci bien meilleure qu'avec les précédents capteurs spatiaux. Ces résultats sont d'autant plus pertinents pour l'aide à la décision que les méthodes développées sont reproductibles. Ainsi les produits issus du spatial offrent des solutions pour le suivi des littoraux et participent à l'élaboration de stratégies de gestion du trait de côte de l'échelle nationale aux échelles territoriales.

Remerciements

Nous remercions le programme INTERREG SUDOE IVB qui a financé le projet APSAT et le CNES (programmes RTU, ISIS et Kalideos). Les données de validation proviennent de la DREAL Languedoc Roussillon, de la DDTM 33 / SIBA, du laboratoire EPOC et de l'Observatoire de la Côte Aquitaine.

Bibliographie

- Dehouck A., Martiny N., Froidefond J.-M., Sénéchal N., Bujan S. (2009). New outcomes from spatial remote sensing during the ECORS experiment: towards validation of ocean color products and large-scale bathymetry mapping in a coastal zone. *Journal of Coastal Research*, vol. SI 56, p 1756-1760.
- Dehouck A., Sénéchal N., Lafon V., Froidefond J.-M., Almar R., Castelle B., Martiny N. (2012a). Evolution morphodynamique interannuelle à decennale du littoral sud de la Gironde. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n°197, p. 31-42.
- Dehouck A., Lafon V., Baghdadi N., Marieu V. (2012b). Use of optical and radar data in synergy for mapping intertidal flats and coastal salt-marshes (Arcachon lagoon, France). *Actes de la conférence IGARSS 2012*, München, Germany, p. 2853-2856.
- Froidefond J.-M., Lafon V. (2012). Surveillance de la morphologie sous-marine par télédétection spatiale : application aux passes d'entrée du bassin d'Arcachon. *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n°197, p. 43-51.
- Haralick R.M., Shanmugan K., Dinstein I. (1973). Texture features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. vol. SMC-3, n°6, p. 610-621. <http://dx.doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>
- Holland T. K. (2001). Application of the Linear Dispersion Relation with Respect to Depth Inversion and Remotely Sensed Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, n°9, September 2001, p. 2060-2072. <http://dx.doi.org/10.1109/36.951097>

- Kumar A., Narayana A.C., Jayappa K.S. (2010). Shoreline changes and morphology of spits along southern Karnataka, west coast of India: a remote sensing and statistics-based approach. *Geomorphology*, vol. 120, n°3-4, p. 133-152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.023>
- Lafon V., Froidefond J.-M., Lahet F., Castaing P. (2002). SPOT shallow water bathymetry of a moderately turbid tidal inlet based on field measurements, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 81, pp 136-148. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00340-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00340-6)
- Lafon V., Hoareau A., Mallet C., Desprats J.-F. (2010). Suivi du trait de côte en Aquitaine par imagerie Formosat-2. *Actes des 10ièmes JNGCGC, Sables D'Olonne*, vol. 2, p. 497-504.
- Lafon V., Dehouck A., Robinet A., Marieu V., Curti C., Durou N. (2014). Détection d'indicateurs géomorphologiques littoraux par télédétection à très haute résolution spatiale. *Actes des 13èmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil*, Dunkerque.
- Lee Z., Carder K. L., Mobley C. D., Steward R. G., Patch J. R. (1998). Hyperspectral remote sensing for shallow waters: I. A semi-analytical model. *Applied Optics*, vol. 37.27, p. 6329-6338.
- Pleskachevsky A., Lehner S., Heege T., Mott C. (2011). Synergy and fusion of optical and synthetic aperture radar satellite data for underwater topography estimation in coastal areas. *Ocean Dynamics*, vol. 61, n°12, p 2099-2120. <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-011-0460-1>
- Rabaute T., Lafon V. Dehouck A., Robinet A., Marieu V. (2013). Exploiting TerraSAR-x data in the frame of the kalideos programme: methodological approach and examples. *Actes du 5th TerraSAR-X Science Team Meeting*, Oberpfaffenhofen, Germany.
- Robinet A. (2013). *Reconstitution bathymétrique par inversion des crêtes de houle à partir d'images satellites optiques et radar*. Rapport de Master 2, Université de Bordeaux.

Exposition des îles Wallis et Futuna au risque littoral ; cyclones et tsunamis

Thierry Hoibian¹, Didier Labrousse², Michel Allenbach¹, Enelio Liufau³, Carole Manry³, Atoloto Malau³

1. PPME EA 3325 - Université de la Nouvelle-Calédonie BP R4 98851 NOUMEA CEDEX, NOUVELLE-CALEDONIE

thierry.hoibian@univ-nc.nc

2. Service Territorial de l'Environnement, Leava, Futuna.

3 Service Territorial de l'Environnement , BP E 359 Mata'Utu Wallis et Futuna

RESUME: Les îles Wallis et Futuna, situées dans le nord-ouest du Pacifique sud, sont exposées périodiquement au passage de cyclones et de tsunamis. La comparaison de l'impact de deux épisodes récents, le cyclone Tomas, en mars 2010, à proximité de Futuna, et le cyclone Ewan, en décembre 2012 sur les îles Wallis, permettent de mettre en exergue l'importance des édifices récifaux du type barrière dans la protection des zones littorales. Si sur Wallis, les dommages littoraux sont restés modérés, alors que le cyclone est passé sur le centre de l'île, les dévastations de la houle observées sur Futuna ont été très impressionnantes, alors que le centre cyclonique était distant de plus de 130 km. Cette exposition de Futuna au risque littoral est due à l'absence de récif barrière. Outre le fait que la vie des habitants a été sérieusement mise en danger, les cultures de bord de mer ont été dévastées et de nombreuses habitations détruites. La perception du risque littoral a été renforcée par un tsunami lié à un séisme d'origine locale qui a surélevé le platier de plus d'un mètre, en 1993. Plus récemment, en septembre 2009, un tsunami venant des îles Samoa a balayé la côte de Futuna et Alofi, en dehors de toute alerte. Tout ceci a renforcé la perception du risque littoral chez les habitants et les autorités administratives et les conduit progressivement à abandonner les zones les plus exposées du littoral pour développer les activités et de l'agriculture sur le plateau central.

ABSTRACT: Wallis and Futuna Islands, located in the northwest of the South Pacific, are periodically exposed to hurricanes and tsunamis. Comparison of the impact of two recent episodes; hurricane Tomas in March 2010 near Futuna and hurricane Ewan in December 2012 around Wallis, allow to highlight the importance of reef barrier in the protection of coastal areas. If on Wallis, coastal damage remained moderate even if the cyclone passed over the island, devastations caused by the swell observed on the south-east coast of Futuna, during hurricane Tomas, were very impressive in many ways, while the center of the cyclone was distant of more than 130 km. The high level of exposure of Futuna, to coastal risk, is due to the lack of a barrier reef. People's lives have been seriously endangered, alongshore food crops were devastated and many houses have been destroyed. Perception of coastal hazards is enhanced by the passage of tsunamis that have flooded the narrow coastal plain, mainly in 1993, following a local earthquake that raised part of the fringing reef of more than one meter. More recently, in September 2009 another tsunami coming from Samoa islands swept the coast of Futuna and Alofi, without any warning. These events have reinforced the perception of risks by residents of the shore and lead them to gradually leave the most exposed coastal zone to develop new activities and agriculture on the central plateau.

MOTS CLES : Pacifique sud-ouest, îles Wallis et Futuna, risque littoral, cyclones, tsunamis, perception.

KEYWORDS: South-west Pacific, Wallis et Futuna islands, perception, coastal hazards, hurricanes, tsunamis.

1. Introduction

Les îles Wallis et Futuna, situées dans le Pacifique sud-ouest, sont exposées périodiquement au passage de cyclones, à une fréquence moyenne d'un épisode tous les 3 ans et une lacune dépassant 9 ans. Les îles sont, par ailleurs, placées dans une zone sismique active et sont, de ce fait, soumises à l'aléa tsunami associé aux séismes régionaux sans compter ceux, transocéaniques, générés sur le pourtour de la ceinture de feu du Pacifique, qui peuvent les atteindre.

Dans une première partie de la communication, la comparaison de l'impact de deux épisodes récents, le passage du cyclone Tomas, en mars 2010, à proximité de Futuna et le passage du cyclone Ewan, en décembre 2012 sur les îles Wallis, permet de mettre en exergue l'importance des édifices récifaux du type barrière dans la protection des zones littorales.

Dans une seconde partie davantage centrée sur l'aléa tsunami, la perception du risque littoral qui d'abord été associé à un tsunami lié à un séisme d'origine locale, ayant surélevé le platier de plus d'un mètre, en 1993, sera présentée. Cette perception s'est trouvée renforcée plus récemment, en septembre 2009, par un tsunami venant des îles Samoa qui a balayé la côte de Futuna et Alofi, en dehors de toute alerte.

Avec ce dernier épisode la notion de risque littoral est aujourd'hui prégnante sur ce territoire et incite les autorités administratives et les habitants à abandonner progressivement les zones les plus exposées du littoral pour développer des activités et de l'agriculture sur le plateau central.

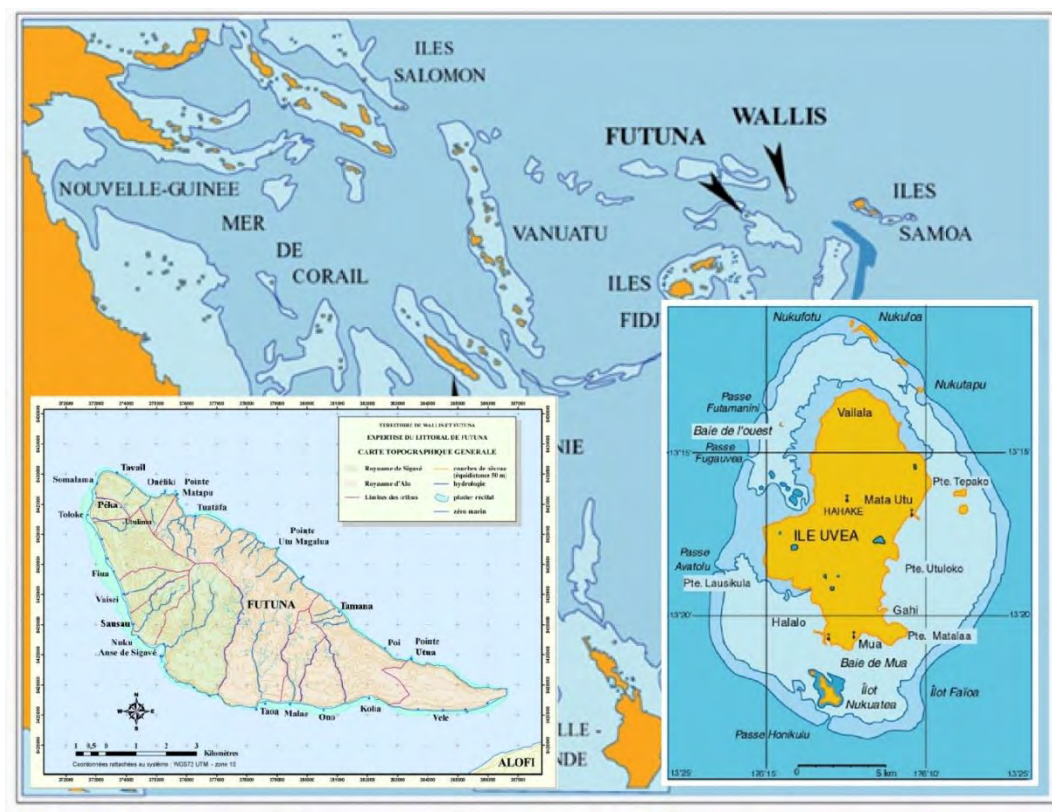


Figure 1 : Situation des îles Wallis et Futuna dans le Pacifique sud-ouest.

2. Le cyclone Tomas à Futuna

2.1. Historique de l'évènement

À partir du 11/03/2010, on observe le développement d'une dépression tropicale forte dénommée Tomas, qui adopte un déplacement vers l'ouest-nord-ouest qui s'infléchit par la suite vers l'ouest puis vers le sud-ouest. Au fil des jours cette dépression contourne assez largement Wallis par l'ouest puis infléchit sa trajectoire vers le sud, en se rapprochant de Futuna. La situation de plus grande proximité de l'œil du cyclone (130 km) de l'île de Futuna est atteinte le 14/03/2010 dans l'après-midi (17 h). La pression minimale enregistrée sur place a été de 986 hPa, ce qui a entraîné une surcote de 0,30 m. La vitesse de vents maximum donnée par le serveur lowaga (<http://wwwz.ifremer.fr/iowaga>) a été de 97 km/h. Jusqu'à la journée du 11/03, des houles modérées sont en provenance du sud, mais à partir du 12/03 il se produit une rotation brutale les vagues qui arrivent de l'est puis du nord-est, ce qui est la direction perpendiculaire à la cote impactée. Les amplitudes croissent jusqu'au paroxysme. Cette rotation se poursuit les jours suivants avec un passage au nord le 14/03 et une rotation lente vers l'ouest les jours suivants. Corrélativement les amplitudes décroissent.

L'amplitude maximale été de 8,9 m pour le Hsig (hauteur significative) et de 15,2 m pour le Hmax (hauteur maximale) estimé. Pendant la période paroxysmale les périodes sont restées comprises entre 10 secondes et 13 secondes à l'exception des épisodes de houles croisées où la période est descendue entre 5 et 6 secondes.

2.2. L'impact du cyclone Tomas sur le littoral

Sur l'île de Futuna, l'effet le plus sensible s'est produit sur la partie nord-est de l'île dans la région comprise entre Poï et la pointe des Pyramides (zone entourée en rouge sur le plan de position, figure 2). Le principal effet morphologique s'est traduit par une érosion généralisée du haut de plage, sur une épaisseur variable de quelques centimètres à plusieurs mètres, avec destruction totale de la végétation bordant la plage (cocoteraie). Du matériel grossier a été remonté de l'avant récif comme par exemple des coraux solitaires et en boules qui sont devenus des éléments grossiers de l'avant plage, de la taille d'un gros galet.

Autour de la pointe des Pyramides, il s'est produit une concentration de l'énergie destructrice de la houle, du fait de la réfraction convergente des trains de houle autour du cap. Ce phénomène a conduit à une attaque sévère de la falaise de part et d'autre de la pointe, avec une destruction de la route de chaque côté. Les vagues sont remontées à une hauteur de 6 à 8 mètres et ont développé une importante macro falaise érosive.

2.3. Analyse de l'impact

Les principaux facteurs défavorables à la stabilité du trait de côte ont été :

- la taille du platier,
- l'incidence des vagues par rapport à la côte,
- l'effet de réfraction des houles et concentration de l'énergie autour des caps.

Les impacts notés sur les infrastructures littorales ont été considérables. On a relevé la destruction des infrastructures ; habitations, écoles, routes, lignes électriques et téléphoniques, conduites d'adduction d'eau. La route de bord de mer pourtant réalisée en dalle de béton de plusieurs tonnes a été entièrement détruite sur plus de 6 km. Par endroit les eaux sont montées jusqu'au pied de la falaise et des laisses de mer ont été relevées à près de 10 m d'altitude. Une section de route réalisée en dalles bétonnées de plusieurs tonnes a été démantelée au niveau du cap.

Les dégâts aux cultures vivrières recensés par les services du Territoire, font état de la perte de terres arables portant des cocoteraies coutumières, sur 7 Ha environ ainsi que le salage des sols par les embruns ayant entraîné la perte des récoltes, ce qui a entraîné une pénurie alimentaire.

Sur les autres secteurs situés plus au nord et sur la côte sud-ouest, l'incidence des houles a été plus tangentielle et les effets ont été moins importants, du fait aussi de la plus grande largeur du platier récifal bordant ces régions, ce qui a contribué à réduire l'effet destructeur des vagues.

2.4. Risques encourus

2.4.1. Les leçons de cet exemple

Cet exemple montre les risques encourus par ce territoire français du Pacifique. Dans le cas du cyclone Tomas, le centre cyclonique est passé à 130 km de Futuna et les vitesses vents sur la zone sont restées modérées (< 100 km/h). La hauteur des vagues à proximité a été moyenne avec un Hsig maximum de 9 m et un Hmax maximum de 15 m. *(à titre de comparaison le passage des cyclones sur les côtes aux Antilles donne couramment des vagues de Hmax = 22 m soit un Hsig de 13 m environ).*

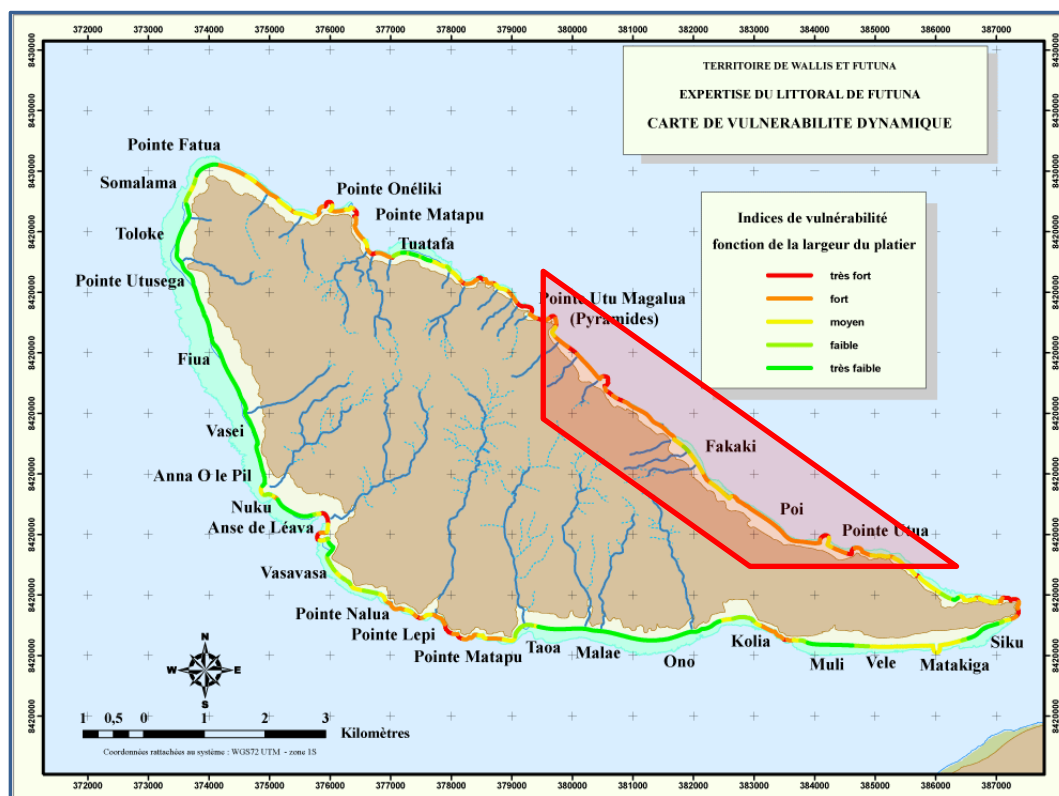


Figure 2 : Carte de vulnérabilité dynamique du littoral de Futuna. En rouge la côte la plus impactée.

On imagine sans peine les pertes considérables qui pourraient intervenir sur la périphérie de l'île dans le cas d'un cyclone longeant la côte de Futuna par le sud ou par l'ouest (cyclone Raja en 1986). Dans une telle configuration les vents des vagues extrêmement fortes pourraient balayer toute la côte sud-ouest, la plus habitée et entraîner la destruction de toutes les infrastructures et habitations de la plaine côtière jusqu'au pied de la falaise. Cette plaine côtière d'une largeur réduite, ne dépassant pas quelques centaines de mètres, serait facilement balayée par tout épisode un peu énergétique. Si l'île d'Alofi (au sud) joue un rôle protecteur dans les conditions habituelles d'alizé de sud-est, elle pourrait aussi accroître la destruction par l'effet de goulet que produit le défilé entre les deux côtes. Mentionné à propos des tsunamis, le détroit entre Futuna et Alofi jouerait le rôle d'amplificateur, en renforçant les ondes marines, du fait de sa forme en entonnoir.

2.4.2. Réaction des populations

Confiantes en leur bonne étoile, les populations locales se sont attachées à restaurer tout ce qui avait été détruit, et à reconstruire les bâtiments religieux principalement, sans tirer de leçon de l'expérience. Des sommes considérables, récoltées par souscriptions auprès des communautés futuriennes et wallisiennes, ont été investies pour la restauration des sites.

La reconstruction des remblais de protection du site de la cathédrale de Poï, seul site coutumier de cette zone, a été réalisée sans qu'il n'ait été tenu compte des standards de génie civil côtier. Les gravats des destructions précédentes (séisme, cyclone) ont été rejetés à la pente pèle mèle, avec les

détritus d'origine diverse. Une piste en graviers provisoire a été reconstruite, mais la partie la plus touchée autour du cap des Pyramide est restée en l'état. Probablement en raison des coûts importants de restructuration du site et compte tenu des risques de réitération du processus.

Déjà cité dans l'expertise de 2004, le secteur a toujours été considéré comme sensible au plan de la qualité des ouvrages édifiés, en regard de l'hydrodynamisme ambiant très fort. Compte tenu du faible trafic dans ce secteur de route, qui n'est guère utilisé que par quelques habitants pour accéder à leurs champs, on peut penser que ce tronçon ne sera pas reconstruit à court terme. Il n'y a aucune priorité en termes de sécurité, les secteurs habités étant accessibles par les routes existantes de part et d'autre de la coupure.

2.4.3. Les préconisations

Les directives, au vu de ce constat, sont de déplacer les activités sur le plateau et d'y transférer les infrastructures importantes, à l'instar de l'hôpital-dispensaire, qui anciennement construit au bord de mer a été rebâtie sur une zone plus haute au-dessus du village de Taa.

Une telle démarche n'est pas aisée car à l'instar de ce qui se passe sur de nombreuses îles océaniques, la population a choisi de vivre, pour différentes raisons, sur le littoral qui est souvent réduit à une étroite bande côtière, de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de large, comme à Futuna. Ce qui ressort des enquêtes sociologiques (Bantos, 2011) et anthropologiques (Worliczek, 2011) est que les populations adoptent une attitude fataliste, s'en remettant à la « volonté divine ». De plus, les infrastructures d'accès sur le plateau sont encore insuffisantes, ce qui constitue un frein au déplacement des activités

Malgré tout, certains agriculteurs qui ont vu leurs cultures ravagées une fois de plus, ont décidé de mettre en culture des terres situées hors d'atteinte de la mer et des éléments.

3. Le cyclone EWAN à Wallis

Par comparaison, l'impact, du cyclone Ewan sur le littoral de Wallis, décrit dans la note d'expertise (Allenbach et al. 2013), dont les observations sont présentées ci-après, a été négligeable.

3.1. Historique de l'évènement

Vers la mi-décembre 2012 une dépression se déplace rapidement des environs de Wallis et remonte vers les îles Samoa dont elle fait le tour, puis redescend suivant une trajectoire parallèle en direction de Wallis. L'œil du cyclone passe sur l'île de Wallis dans la soirée du 15 décembre 2012 entre 21 h et 23 h. Puis il s'évacue rapidement vers les îles Fidji, qui sont atteintes le 18 décembre.

La pression au centre lors du passage sur Hihifo mesurée à la station météorologique de Wallis a été de 970 hPa ce qui est la limite des cyclones. Les vents s'établissaient autour de 150 km/h, soufflant d'abord du sud, puis du nord après le passage de l'œil du cyclone sur l'île, au niveau de l'aéroport d'Hihifo.

La surcote océanique due à la dépression est restée modérée, de l'ordre de 0,43 m correspondant au minimum de pression enregistré sur le site. Cette surcote est venue s'ajouter à la montée du niveau de la mer liée à la marée haute (2,20 m) qui a eu lieu peu avant 19h soit plus de 3 heures avant

le paroxysme de 21 heures. L'effet de surcote a été réduit du fait de la dépression modérée et du non synchronisme avec la marée haute.

En ce qui concerne les données de houles au large ; divers bulletins météorologiques font état de houles au large de Hmax dépassant 9,7 m quelques jours avant. Les abaques donnent un Hsig de 8 m, soit un Hmax de 10 m environ.

3.2. Impact à la côte

Malgré des paramètres océanologiques assez sévères, l'impact à la côte sur le littoral de Wallis est resté très minime, comparativement à ce qui s'est passé sur Futuna. La raison en est la présence d'un important récif barrière entourant l'île, sur la totalité de sa périphérie. Cette barrière quasi infranchissable, a cassé l'énergie des vagues limitant les intrusions marines à terre. Le fetch limité du lagon, d'une largeur de 3 à 5 km, a empêché qu'une houle secondaire ne se forme dans le lagon. De ce fait, les vagues lagonaires ne semblent pas avoir dépassé 1,5 à 2,0 m, et n'ont que très peu impacté le littoral. En effet, de par de l'orientation des vents, ces vagues étaient dirigées vers la partie interne de la barrière et des îlots. Elles ont créé sur les îlots des micros falaises érosives en haut de plage, d'une hauteur de 0,5 à 1 m environ, et charrié du matériel sédimentaire, pour former des dunes hydrauliques sableuses dans le lagon.

Quelques ouvrages de protection du littoral, comme des murs verticaux construits sans aucune référence au génie civil côtier ont été abattus. L'intrusion marine n'a jamais dépassé quelques dizaines de mètres vers l'intérieur des terres.

4. Le risque tsunami

Des études conjointes conduites par la NIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research, New Zealand), l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), et l'UNSW (The University of New South Wales, Australia), ont modélisé la formation de tsunamis et simulé les impacts possibles de phénomènes de différentes provenances, en fonction de l'activité sismique ou volcanologique, à l'aide du logiciel Gerris, (Lamarche et al, 2013). Quatre sources éventuelles de tsunamis reconnus sont, les séismes, les glissements sédimentaires, les éruptions volcaniques et les météorites.

De cette étude il ressort que la source de tsunamis les plus probable pour la région est associée à la fosse de Tonga-Kermadec, région la plus susceptible de fournir des événements significatifs. Un exemple récent de séisme de ce type a causé le tsunami de 2009 qui a fait de nombreuses victimes aux îles Samoa mais est resté sans conséquence à Wallis et Futuna.

Les observations de 2009 ont montré des distances de pénétration à l'intérieur de terres assez importantes, de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. Le run up (hauteur de la vague au-dessus du sol) est resté modéré, de l'ordre de 4 m sur l'île d'Alofi.

Ceci dit l'île existe depuis des siècles et la mémoire collective a enregistré l'existence de ces phénomènes extrêmes. Des traces de laminations et de matériel sédimentaire charrié, retrouvées dans l'intérieur des terres, montrent que ces phénomènes se sont produits à plusieurs reprises. Ces vestiges ont été attribués à des tsunamis s'étant produits autour de 1544 pour le premier et postérieur à 1860 pour le second, vraisemblablement originaires des Tonga.

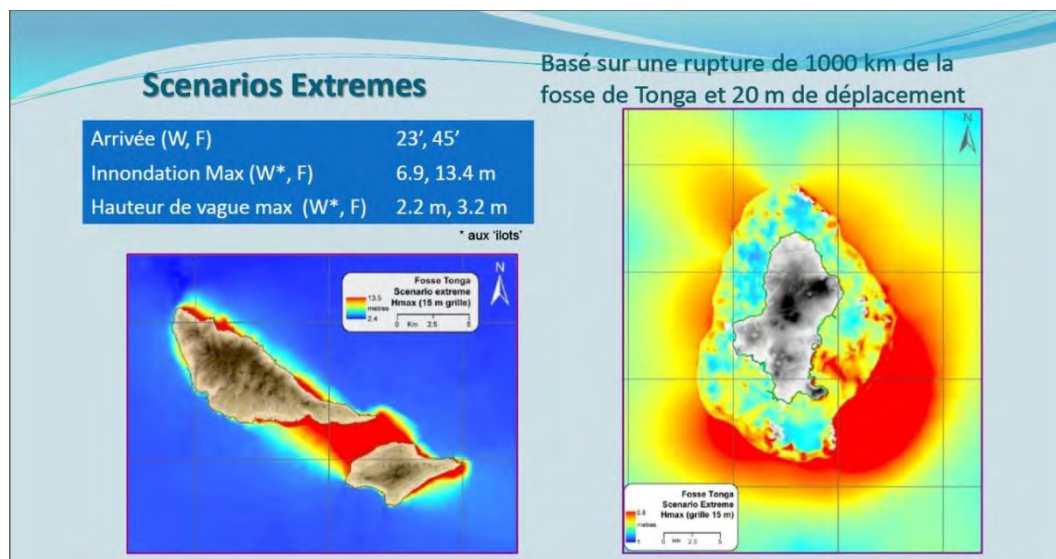


Figure 3 : Modélisation de l'impact des tsunamis à la côte sur Wallis et Futuna (source NIWA - IRD).

5. Conclusions

Les événements récents, cyclones et tsunamis, qui ont affecté les îles Wallis et Futuna, ont quelque peu renforcé la perception du risque littoral par les autorités et certains habitants, et les incitent à délaisser progressivement la zone côtière pour établir les infrastructures et activités sur le plateau central. Parmi les infrastructures déplacées, l'hôpital dispensaire de Léava à Futuna, anciennement situé en bord de mer, a été reconstruit sur le plateau, au-dessus de Taao.

Selon les directives des instances coutumières et administratives, une organisation a été mise en place pour prémunir les populations du risque tsunami. Parmi les réalisations, on peut citer l'intégration de Wallis et Futuna dans un réseau d'alerte tsunamis du Pacifique sud, avec le support du SHOM - REFMAR (<http://refmar.shom.fr>) et de l'IRD – SEISME (<http://www.seisme.nc>), la mise en place sirènes d'avertissement, l'aménagement de cheminements balisés pour faciliter l'évacuation des populations vers les hauteurs et autres conseils relayés par les médias.

En ce qui concerne les cyclones, les centres de veille de Fidji et de Météo France Nouvelle-Calédonie, permettent d'anticiper les risques. Toutefois, l'exemple récent du cyclone Tomas a montré que les mesures préventives étaient insuffisantes, car la destruction des cultures vivrières et du réseau d'alimentation en eau, a entraîné une pénurie alimentaire sévère. Heureusement de l'aide a pu être apportée par la Nouvelle-Calédonie car les possibilités d'accès à l'île, installations portuaires et aéroport, n'avaient pas été touchées.

On peut légitimement se poser la question des dégâts matériels et humains qui pourraient être engendrés par le passage de cyclones ou de tsunamis sur la côte sud-ouest de l'île et des difficultés qui pourraient en résulter, si les infrastructures permettant de ravitailler l'île venaient à être plus gravement touchées. Les risques sont réels et demandent à être évalués pour trouver des parades.

Néanmoins, de nombreuses habitations et faléfonos coutumiers, continuent d'être construits en bord de mer, en avancée sur le trait de côte, sans considération des règles de génie civil côtier, indiquant une faible perception des risques encourus par une partie de la population.

Par ailleurs, ces exemples d'impact des cyclones Tomas à Futuna et Ewan à Wallis mettent en évidence l'importance des édifices récifaux dans la protection des îles du Pacifique contre le risque littoral. Ceci amènerait à promouvoir des mesures draconiennes pour limiter le réchauffement climatique, qui représente une menace sérieuse pour ce type de formation.

Remerciements

Nous remercions chaleureusement, le MOM (ministère l'outre-mer), et l'IFRECOR, (Initiative Française Pour les Récifs Coralliens) pour leur financement des études de l'environnement océanique des îles Wallis et Futuna ainsi que le Service Territorial de l'Environnement de Wallis et Futuna pour son aide logistique efficace dans la surveillance du littoral de Futuna et des informations apportés sur l'impact des cyclones Tomas et Ewan.

Références bibliographiques

Allenbach M., Hoibian T., (2004) - *Évaluation de l'aléa érosion et cartographie de la vulnérabilité du linéaire côtier des îles Futuna et Alofi. Note d'expertise. 57 pp 46 fig.* Université de la Nouvelle-Calédonie – LGPMC - EA3325 - – Territoire des îles Wallis et Futuna, Service de l'Environnement.

Allenbach M., Hoibian T., (2013). *Rapport d'urgence sur le passage du cyclone EWAN à Wallis. Impact sur le linéaire côtier en terme de morphologie littorale et d'infrastructure côtière, (63 pp, 21 figures, 3 annexes),* Université de la Nouvelle-Calédonie, PPME – EA3325 – Territoire des îles Wallis et Futuna, Service de l'Environnement.

Bantos S., (2011). *Impact du changement climatique sur les sociétés insulaires et l'espace littoral.* Thèse Paris IV. Géographie du littoral, 546 p.

Grzesczyk A., Monzier M., Lefèvre C., Butterlin J., Dupont J., Eisen J-P, Glaçons G., Maillet P., Muller , C., (1988). *Géologie des îles Futuna et Alofi (T.O.M. des îles Wallis et Futuna. Pacifique sud-ouest) : Données préliminaires.* Géologie de la France, n° 2 – 3, 1988.

Lamarche G., Pelletier, B., Goff, J., Liufau, E., (2013). *L'aléa tsunami à Wallis et Futuna. Modélisation et inventaire des tsunamis.* National Institute of Water and Atmospheric (NIWA), Research Wellington, Nouvelle-Zélande.

Maurizot P., (2007). *Carte géologique de la France au 1/50 000e – Feuille de Wallis et Futuna, Territoire d'Outre-Mer, Pacifique sud-ouest.* Bureau des Recherche Géologiques et Minières.

Worliczek, E. et Allenbach, M., (2011). *Customary land tenure and the management of climate change and internal migration – the example of Wallis Island* - Land Tenure Journal. No 2

Le projet HOMONIM

Une contribution à l'amélioration de la prévision des submersions marines pour la Vigilance Vagues-Submersion

Didier Jourdan ¹, Denis Paradis ², Audrey Pasquet ¹, Héloïse Michaud ¹, Flavien Gouillon ¹, Rémy Baraille ¹, Laurie Biscara ¹, Guillaume Voineson ¹, Patrick Ohl ²

1. SHOM

SHOM - 13 rue du Chatellier, 29200 Brest

SHOM - Météopole - 42 av. G. Coriolis, 31057 Toulouse

didier.jourdan@shom.fr

2. Météo-France

Météopole - 42 av. G. Coriolis, 31057 Toulouse

RESUME.

Le projet HOMONIM - Historique, Observation, MOdélisation des Niveaux Marins - est un projet commun du SHOM et de Météo-France, initié en 2012 pour 3 ans, sous maîtrise d'ouvrage de la Direction Générale pour la Prévention des Risques (DGPR), et qui s'inscrit dans le cadre du Plan interministériel Submersions Rapides (PSR).

Son objectif principal est d'améliorer la pertinence du dispositif de Vigilance face au risque de Vagues et Submersions marines (VVS).

Après une présentation introductive du projet, les sections suivantes détaillent les travaux réalisés et les résultats dans chacun des axes structurants du projet : la composante observation, les modèles numériques de terrain bathymétriques, et les systèmes de modélisation des surcotes et des états de mer.

ABSTRACT.

HOMONIM (Historique, Observation, MOdélisation des Niveaux Marins) is a project, led by both the french hydrographic and oceanographic office (SHOM) and the french meteorological office (Météo-France), that started in 2012 for a 3-year period. It is partly funded by the risks management state agency in the framework of the national plan against rapid flooding.

Its main objective is to improve the capabilities of the warning system operated by Météo-France to detect, monitor, and warn community of possible coastal threats due to high waves and storm surges.

After a short introductory presentation of the project, the following sections detail the results obtained in each of the main tasks of the project dedicated respectively to the observation system, the bathymetry and the forecast systems for storm surges and sea state.

MOTS-CLES : submersions marines, surcotes, vagues, prévision, vigilance, opérationnalité

KEYWORDS: marine flooding, storm surges, waves, forecast, watchfulness, operational systems

1. Introduction

Le projet HOMONIM – Historique, Observation, MOdélisation des Niveaux Marins – est un projet commun du SHOM et de Météo-France, sous maîtrise d’ouvrage de la Direction Générale pour la Prévention des Risques (DGPR), qui s’inscrit dans le cadre du plan interministériel Submersions Rapides (PSR).

Son objectif principal est d’améliorer la pertinence du dispositif de Vigilance météorologique face au risque de Vagues et Submersions marines (VVS) par la mise en place de nouveaux outils de prévision des hauteurs d’eau, des surcotes et des états de mer à la côte.

Le projet est structuré en différentes macro-tâches qui s’attachent à compléter ou faire évoluer diverses composantes essentielles du système opérationnel de prévision :

- renforcer les capacités d’observation ;
- disposer des modèles numériques de terrain (MNT) bathymétriques d’emprise et de qualité indispensables pour construire les nouvelles configurations des modèles ;
- développer et mettre en exploitation une nouvelle chaîne de modélisation des surcotes sur les façades métropolitaines ;
- développer et mettre en exploitation une nouvelle chaîne de modélisation des états de mer jusqu’à la côte.

Les sections suivantes présentent les résultats sur chacun de ces axes avec un focus sur les résultats des tâches de modélisation.

2. Renforcer les capacités d’observation

Le dispositif VVS utilise les observations acquises par le réseau marégraphique d’observations du niveau marin du SHOM (RONIM) (Poffa et al. 2012). Ces observations, collectées et mises à disposition en temps réel, servent aux prévisionnistes pour qualifier les prévisions de surcote, aux premières échéances.

Ces observations sont aussi précieuses pour qualifier les modèles de prévisions au travers du jeu de tempêtes de référence (Pineau-Guillou, 2011 ; Daubord, 2014).

Dans le cadre du projet l’implantation de trois nouveaux observatoires marégraphiques et l’équipement de 10 stations, existantes, en capacité de transmission des données par satellites, sont en cours de réalisation.

Le choix d’implantation des nouveaux marégraphes a été fait en conciliant les critères :

- d’un site non découvrant, pour la conformité aux exigences d’un observatoire RONIM, qui puisse contribuer à la prédiction des marées ;
- d’un site co-localisé ou proche d’un point de référence et de calibration du dispositif VVS ;
- de mise en place des infrastructures d’accueil du capteur (support, abri, proximité des réseaux électriques et téléphoniques, ...) ;

- de la non-existence, à proximité, d'un autre observatoire marégraphique partenaire ou futur partenaire de REFMAR⁴.

Les sites finalement retenus sont : Diélette (Manche, 50), l'Herbaudière (île de Noirmoutier, Vendée, 85) et Mimizan (Landes, 40). Les marégraphes sont en cours d'installation et les données seront mises à disposition sur le portail Internet des réseaux de référence des observations marégraphiques REFMAR (Pouvreau et al, 2014) début 2015.

3. Réaliser les modèles numériques de terrain (MNT) adaptés au besoin de la modélisation

Il est essentiel pour un système de modélisation de disposer de MNT bathymétriques à une résolution cohérente avec celle de la grille de calcul, elle-même fixée par les échelles typiques des processus océaniques que l'on cherche à reproduire. Plus on s'approche de la côte, plus les échelles spatiales et temporelles des processus diminuent, imposant des grilles de plus en plus fines, sur lesquelles il convient de « plaquer » une représentation tout aussi fine de la bathymétrie.

Pour atteindre les résolutions adéquates, les chaînes de modélisation utilisent des techniques d'emboîtements successifs de modèles du large à la côte, l'implémentation de grilles de type non-structurées ou curvilinéaires avec une résolution croissante vers la côte.

Dans cette tâche, une gamme de MNT bathymétriques de l'emprise régionale moyenne résolution à l'emprise locale côtière très haute résolution a donc été réalisée.

3.1 MNT bathymétriques régionaux

Les deux modèles régionaux calculés dans le cadre du projet couvrent, pour le premier, les approches continentales européennes de la mer du Nord aux îles Canaries et, pour le second, l'ensemble de la Méditerranée. Leur résolution est de 500 m. Ces deux MNT ont été calculés par juxtaposition et ré-interpolation de MNT existants (SHOM, GEBCO, Emodnet), préalablement recalés pour certains, à une référence altimétrique commune, afin de limiter les artefacts au niveau des zones de raccordement.

3.2 MNT bathymétriques de façade

Pour les besoins du projet, les modèles de haute résolution couvrent la façade métropolitaine de la Mer du Nord au Golfe de Gascogne et la façade méditerranéenne avec la Corse. Leur résolution est de 100 m.

Ces MNT sont réalisés à partir des données de la Base de Données Bathymétriques du SHOM (BDBS). La méthodologie (Biscara *et al.*, 2014) consiste d'abord à assembler et traiter les sondes extraites de la BDBS (décimation puis moyenne par bloc à la résolution visée). Une interpolation par voisin naturel est calculée permettant d'évaluer la couverture des données numériques en base et de relever les incohérences potentielles entre les levés.

Les manques de données dans la bande d'immersion 0-200m sont en priorité comblés, par soucis d'homogénéité de traitement et de références, en utilisant les sondes issues des cartes de

⁴ <http://refmar.shom.fr/partenaires>

navigations électroniques (ENC) du SHOM. Les manques qui subsistent sur le plateau et plus au large sont enfin renseignés par les valeurs du MNT de plus basse résolution (500 m) ou Emodnet, suivant les zones.

Une fois la sélection des différentes sources effectuée, le champ obtenu est interpolé sur la grille régulière à 100m, par ajustement d'une surface avec tension, pour construire le MNT final.

Le MNT ainsi obtenu couvre une gamme de profondeur allant du domaine côtier jusqu'à environ 4500 m de profondeur et présente une bonne cohérence globale. En domaine côtier, dans les secteurs à forte dynamique sédimentaire, se pose néanmoins la question de la cohérence temporelle des données bathymétriques utilisées.

On observe par exemple la signature de deux chenaux au niveau du pertuis de Maumusson alors que l'ENC dans ce secteur n'en représente qu'un seul. Les levés acquis dans cette zone ont cartographié en fait différentes positions du chenal au cours du temps. Cette observation est confirmée par les travaux de Bertin et al. (2004) montrant le basculement du chenal vers le Sud entre 1824 et 2001.

3.3 MNT bathymétriques côtiers

Le dernier niveau des MNT est le modèle local très haute résolution. Son emprise est typiquement de quelques dizaines de km de côté et les résolutions visées sont le plus souvent comprises entre 10 et 50 m.

La méthodologie reprend celle des modèles de façade en utilisant exclusivement les levés extraits de la BDBS, parmi lesquels on sélectionne les plus récents afin de cartographier la morphologie du fond au plus proche de la situation actuelle.

Ces modèles peuvent aussi bénéficier, lorsqu'elles sont disponibles, de données LIDAR (Litto3D®) qui permettent d'étendre le MNT jusqu'à une altitude de 10 m et au moins 2 km à l'intérieur des terres et de disposer d'une cartographie continue terre-mer du littoral.

Un modèle côtier de ce type est en cours de réalisation dans le cadre du projet sur la zone des pertuis Charentais, identifiés comme un territoire à risque important d'inondation (TRI) par la DGPR.

4. Modèles et configurations pour la prévision des surcotes

Les configurations de calcul des surcotes et hauteurs d'eau, sont construit sur le noyau du modèle HYCOM (Bleck, 2002) dans sa version SHOM (Baraille & Filatoff, 1995) en mode barotrope. Deux domaines de calcul ont été définis : un domaine Atlantique (« ATL ») d'emprise 43°N à 62°N et 9°W à 10°E, et un domaine Méditerranée (« MED ») d'emprise 30°N à 46°N et 9°W à 37°E.

4.1 Description des configurations

La première tâche importante a été d'adapter le code à des grilles curvilinéaires (figure 1a) afin d'optimiser le rapport résolution/performance du modèle pour les besoins opérationnels.

Les travaux pour définir les configurations de référence se sont traduits par une série de tests paramétriques.

4.1.1 Etude de la marée

Une première étude a porté sur la performance du modèle à reproduire la hauteur d'eau de marée par rapport aux prédictions officielles de marée du SHOM⁵. Une bonne représentation de la marée est en effet critique dans les zones de forts courants et de faible profondeur comme la Manche, pour lesquelles il existe une interaction non négligeable entre marée et surcote via la friction de fond (Idier *et al.*, 2012).

Les tests ont porté sur les conditions aux frontières ouvertes du domaine (forçages de marée, types de conditions aux limites), sur son emprise et sur la résolution du maillage, ainsi que sur la friction de fond. Ils ont permis de conclure sur plusieurs points et d'arrêter deux configurations optimales :

- les configurations « ATL » et « MED » utilisent la bathymétrie du LEGOS et sont forcées en élévation de surface par les 17 composantes de l'atlas de marée NEA Optimal 2011. L'utilisation des bathymétries plus résolues (cf. § 3) est un axe d'amélioration du système de prévision et fera l'objet de tests d'ici fin 2014 ;
- les tests paramétriques à la valeur du coefficient de friction de fond (C_b), ont montré une sensibilité de la marée à la friction, significative en Manche et réduite sur les façades Atlantique (Golfe de Gascogne) et Méditerranéenne. Sur le domaine ATL, le coefficient de friction de fond a été calculé selon une formulation logarithmique de la vitesse verticale qui tient compte de la longueur de rugosité. Il a ensuite été ajusté en Manche par une recherche de C_b optimal, qui minimise les erreurs sur les phases et amplitudes de la marée à des points de référence marégraphique. La friction de fond ainsi obtenue est spatialement variable et adaptée à la configuration puisqu'elle prend en compte la contribution liée aux caractéristiques physiques de la couche limite de fond et les erreurs sur le schéma numérique du modèle. Sur le domaine MED, un coefficient constant à 0,002 a été conservé.

4.1.1 Etude de sensibilité à la paramétrisation de la tension de vent

Le coefficient de traînée (C_d) pour l'expression de la tension de vent a été calculé selon la paramétrisation de Charnock (1955),

$$C_d = \left(\frac{u_*}{u_z}\right)^2 = k^2 \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right]^{-2}, \quad z = 10 \text{ m}, \quad z_0 = \alpha \frac{u_*^2}{g}$$

où $k = 0.4$ est la constante de Von Karman, z_0 est la longueur de rugosité, u_* est la vitesse de friction et α paramètre de Charnock –pouvant prendre une valeur comprise entre 0.01 et 0.025 (Makin, 2005)– dépend de l'âge des vagues, mais est pris constant dans cette version du modèle.

L'étude de sensibilité a montré qu'une valeur élevée de α , égale à 0.025, permet de réduire l'erreur sur le pic de surcote sans dégrader la représentation de la hauteur d'eau à plus ou moins un jour du pic. Un coefficient de Charnock supérieur à 0,025 améliore l'erreur sur le pic mais surestime l'amplitude de la variabilité du niveau d'eau modélisé en réponse aux forçages de vent, ce qui se traduit par un écart type moyen dégradé.

⁵ <http://diffusion.shom.fr/produits/maree-et-courant.html>

4.2 Performances des configurations HYCOM

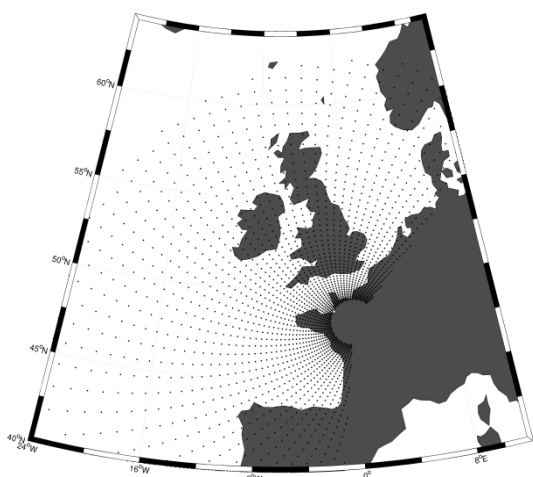


Figure 1a : Grille de calcul curviligne en Atlantique

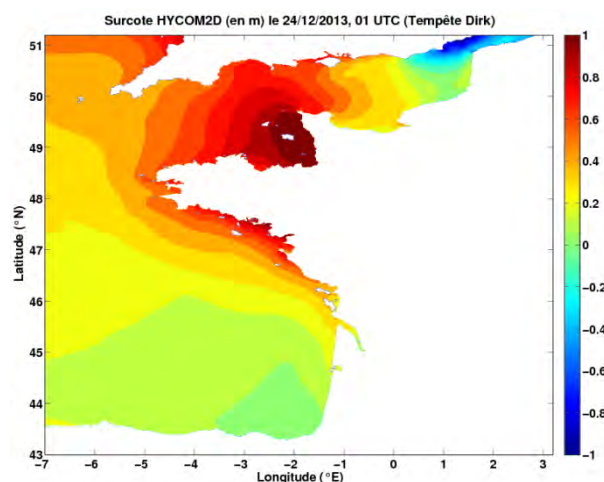


Figure 1b : Prédiction à 7 heures des surcotes pour le 24/12/2013 à 1h UTC (tempête Dirk)

Pour chaque façade, les configurations HYCOM ont été évaluées à partir de rejeux réalisés sur 22 tempêtes de référence sélectionnées par Météo-France entre 1998 et 2010 (figure 1b) et sur un run long d'un an (entre mi-2011 et mi-2012).

Les résultats des simulations longues montrent une amélioration des scores moyens de marée en ATL (pas de signal de marée significatif en Méditerranée) de 50% et 60% (~10-20 cm) sur les biais de basses et pleines mers, et de 35% (~10 minutes) sur le déphasage (Paradis *et al.*, 2013) par rapport au modèle existant à Météo-France.

Pour les surcotes, les performances du modèle HYCOM sur le domaine ATL ont été évaluées en calculant les écarts aux mesures du réseau marégraphique RONIM (cf. §2) sur la simulation longue et pour les sites où la surcote a été significative lors des événements de référence (Paradis *et al.*, 2013).

Les simulations longues donnent une estimation du comportement général du modèle, avec un biais moyen négatif de -2 cm. Le biais négatif plus marqué à -5 cm sur les populations des plus fortes surcotes indiquent une tendance moyenne à sous-estimer légèrement les surcotes sur les cas de tempêtes.

Sur les 22 événements (et les deux configurations ATL et MED), les statistiques confirment effectivement une sous-estimation moyenne de l'ordre de 10 cm sur le pic de surcote (8 cm sur la hauteur totale maximale) et un déphasage sur la hauteur totale de 34 minutes.

Ces scores sur le pic de surcote ont cependant été réduits de 5 cm par rapport à ceux du modèle existant qui utilise une paramétrisation de Wu (1982).

Il est également à noter que les rejeux des derniers événements de tempêtes de l'hiver 2013-2014, qui ne figurent pas dans le protocole de validation, ont montré une tendance du modèle à légèrement surestimer le pic de surcote.

Ces écarts, qui subsistent entre modèle et observations, peuvent résulter de mécanismes 3D non résolus dans le modèle, des forçages atmosphériques, d'une friction de fond localement mal adaptée, ou encore du manque de prise en compte des états de mer dans le modèle (Bertin *et al.*, 2012). Ce dernier axe d'amélioration est en cours de tests.

5. Modèles et configurations pour la prévision des états de mer à la côte

Le modèle de génération et propagation des vagues, actuellement utilisé pour le dispositif VVS, est le modèle WAM dans sa version Météo-France (Lefèvre *et al.*, 2009) sur une grille régulière de 0,1° de résolution.

Dans cette tâche, l'objet est d'affiner la modélisation des états de mer à la côte en ajoutant une configuration côtière, couplée aux frontières ouvertes avec MFWAM et basée sur le modèle WW3.

Les récents développements du modèle WW3 (version 4.18), portant sur l'ajout de paramétrisations en eaux peu profondes sur le déferlement ou la friction sur le fond (Ardhuin *et al.*, 2010), permettent d'étendre la validité aux zones côtières et littorales.

5.1 Description des configurations WW3 de façade

Deux maillages non structurés, allant de 10 km de résolution au large jusqu'à 200 m à la côte, ont été réalisés pour couvrir les façades françaises méditerranéenne et atlantique.

Pour l'Atlantique, le maillage a été construit à partir du maillage Norgas-UG décrit dans Boudiere *et al.* (2013) et utilisé pour le projet *Previmer*. Ce maillage a été modifié afin de limiter son extension à l'emprise du modèle atmosphérique AROME de Météo-France.

Le maillage non structuré en Méditerranée (Figure 2a) a été calculé à l'aide de l'outil *Polymesh* (A.Roland / T.U. Darmstadt). Des critères de raffinement différents ont été prescrits autour de la Corse, du littoral français et italien, et les contraintes bathymétriques ont été appliquées en utilisant les MNT de façade du projet (cf. § 3).

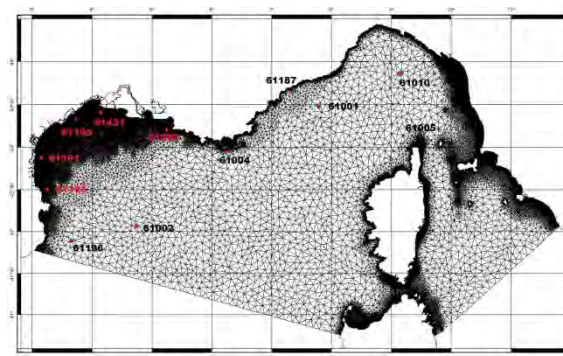


Figure 2a : Grille de calcul non structurée en Méditerranée

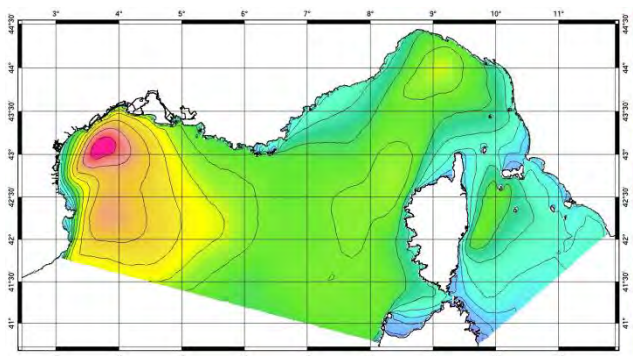


Figure 2b : Hauteur des vagues sur le domaine Méditerranée (05/02/2009 à 0h UTC)

Plusieurs séries de tests paramétriques ont été réalisées, portant sur le nombre de points de forçage aux frontières, la sensibilité aux forçages météorologiques en surface, à la friction de fond et aux paramétrisations physiques. Ils ont permis de conclure sur plusieurs points et d'arrêter deux configurations optimales :

- les configurations « ATL » et MED » utilisent les bathymétries de façade du projet. Pour les deux configurations, le spectre des vagues est discrétisé sur 24 directions (communes avec MFWAM) et sur 30 fréquences entre 0.0345Hz et 0.547 Hz ;
- un nombre minimal de 20 spectres MFWAM (espacement d'environ 50 km) est nécessaire pour le forçage aux frontières ouvertes des domaines. En deçà, les résultats se dégradent fortement ;
- les tests de sensibilité aux forçages météorologiques (vent analysé à 10m des modèles *ECMWF*, *ARPEGE*, *AROME*), montrent que les résultats sont peu sensibles aux forçages utilisés par le modèle englobant MFWAM, mais très sensibles à ceux utilisés dans le modèle WW3. Plusieurs prévisions devront être réalisées dans la chaîne opérationnelle (approche multi-forçages) ;
- les tests de différentes paramétrisations physiques ont confirmé le bon comportement des jeux de paramètres, y compris avec les forçages haute résolution *AROME*. Les résultats de simulations longues (run de 1 an) montrent un coefficient de corrélation de 97% aux observations de bouées et altimétriques ;
- les tests de sensibilité au paramètre $\beta_{\max}$ (coefficient de couplage entre le vent et les vagues) ont montré que l'ajustement de la valeur à 1,4, pour les forçages atmosphériques *ARPEGE* et *AROME*, réduisait le biais entre simulation et observation.

Suite aux tests de sensibilité, les paramétrisations correspondant au TEST 451 en Atlantique et au TEST 405 en Méditerranée (Ardhuin *et al.*, 2010) ont finalement été retenues comme configurations optimales, avec une modification du paramètre $\beta_{\max}$ pour l'utilisation des forçages atmosphériques issus des modèles de Météo-France.

5.2 Performances des configurations WW3

Pour chaque façade, les configurations WW3 ont été évaluées à partir de rejeux réalisés sur 11 des 22 tempêtes de référence (figure 2b) et sur un run long d'un an (entre mi-2011 et mi-2012).

Les performances des configurations WW3 ont été évaluées par comparaison aux mesures de bouées houlographes du Cermef et de Météo-France.

L'ensemble des résultats est disponible dans Michaud *et al.* (2014). Pour la simulation longue réalisée avec le modèle atmosphérique *AROME* haute résolution sur la zone Atlantique, les coefficients de corrélation aux mesures bouées sont compris entre 84 et 98%, et correspondent à une erreur RMS sur la hauteur significative des vagues de 15 cm.

6. Conclusion

Le projet HOMONIM est prévu pour s'achever en 2015.

Les résultats obtenus contribuent déjà au dispositif de VVS opéré par Météo-France, depuis la mise en exploitation opérationnelle de la chaîne de modélisation des surcotes, développée dans le cadre du projet, a été en janvier 2014. Cette chaîne fera l'objet d'une montée de version, utilisant les MNT bathymétriques du projet et les résultats des travaux en cours, pour optimiser la friction de fond à l'échelle de tout le domaine atlantique et prendre en compte une paramétrisation du coefficient de trainée en surface fonction de l'état de mer MFWAM.

De même, les chaînes de prévision de vagues WW3 entreront en exploitation opérationnelle début 2015. Elles viendront compléter le dispositif actuel en apportant des informations plus fines aux prévisionnistes en charge de la vigilance vagues-submersion.

Au-delà, les travaux ont débuté sur le couplage entre les modèles HYCOM et WW3, via la prise en compte des états de mer dans HYCOM et celle des niveaux d'eau et des courants dans WW3. Ces travaux seront réalisés sur une zone de démonstration (pertuis charentais), pour laquelle une configuration HYCOM 2D très haute résolution (30 m) sera mise en place par emboîtement successif.

Remerciements

Cette étude s'inscrit dans le projet HOMONIM financé, pour partie, par la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie. Nous souhaitons remercier les équipes du Cetmef, de l'Ifremer, du LEGOS et du SCHAPI pour leur aide dans la mise à disposition de données et pour les échanges scientifiques et techniques.

Bibliographie

- Ardhuin F. et al. (2010). Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves, part I : Definition, calibration and validation. J. Phys. Oceanogr, vol. 40, p. 1917-1941.
- Baraille R., Filatoff N. (1995). Modèle shallow-water multicouches isopycnal de Miami. Rapport Technique SHOM/CMO n°003/95.
- Bertin X., Chaumillon E., Weber N., Tesson M., (2004). Morphological evolution and time-varying bedrock control of main channel at a mixed energy tidal inlet: Maumusson Inlet, France. Marine Geology, vol. 204, p. 187-202
- Bertin X., Bruneau N., Breilh J.-F., Fortunato A. B., Karpytchev M. (2012). Importance of wave age and resonance in storm surges : The case of Xynthia, bay of biscay. Ocean Modelling, vol. 42, p. 16–30.
- Biscara L., Schmitt T., Corréard S., Creach R. (2014). Modèles numériques de bathymétrie pour la prévision Hydrodynamique du dispositif vigilance vagues-submersions. Actes des XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, 2-4 juillet 2014, Dunkerque (Poster).
- Bleck R. (2002). An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. Ocean Modelling, Vol. 4 (1), p. 55–88.
- Boudière E., et al. (2013). A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters. International Journal of Marine Energy, Vol. 3-4, p. e40–e52.
- Charnock H. (1955). Wind Stress on a Water Surface. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., vol. 81, p. 639–640.
- Daubord C. (2014). Caractérisation de 7 événements de tempête de l'automne-hiver 2013-2014 à partir des données disponibles au SHOM. Rapport d'étude SHOM n°001/2014
- Idier D., et al. (2012). Système de prévision de surcotes en Manche/Atlantique et Méditerranée : Amélioration du système existant sur la façade Manche/Gascogne. Rapport Technique BRGM/RP-61019-FR, BRGM/IFREMER.
- Lefèvre J.-M., Aouf L., Bataille C., Ardhuin F., Queffelec, P. (2009). Apport d'un nouveau modèle de vagues de 3^e génération à Météo France. Actes des Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, 27-29 janvier 2009, Toulouse, France.

- Michaud H., et al. (2014). Modélisation des états de mer en zone côtière sur les façades françaises dans le cadre du projet Homonim. Rapport Technique SHOM, mars 2014.
- Makin V. (2005). Note on the drag of the sea surface at hurricane winds. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 115, p. 169-176.
- Paradis D., et al. (2013). Inter-comparaison de 3 modèles de surcotes dans le cadre du projet Homonim. Rapport Technique Météo-France/Dprévi, septembre 2013.
- Pineau-Guillou L., Lathuiliere C., Magne R., Louazel S., D. Corman D., Perherin C. (2011). Caractérisation des niveaux marins et modélisation des surcotes pendant la tempête Xynthia. *Annales hydrographiques*, vol. 777, p. 11/1-11/8.
- Poffa N., Enet S., Kerinec J.-C. et l'équipe RONIM (2012). Évolution instrumentale des marégraphes du réseau RONIM. Actes des XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, 12-14 juin 2012 Cherbourg, p. 611-618 - DOI:10.5150/jngcgc.2012.066-P.
- Pouvreau N. et l'équipe REFMAR (2014). REFMAR : une coordination pour l'observation du niveau de la mer. *La Houille Blanche*. In press.
- Wu J. (1982). Wind-stress coefficients over sea-surface from breeze to hurricane. *Journal of Geophysical Research*, vol. 87, p. 9704–9706.

Recul du trait de côte et migration dunaire dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Littoraux

Disponibilité et qualité des données. Deux cas d'étude : Calvados et Loire-Atlantique

Marine Colin¹, Annelies Bolle¹, Philippe de Schoesitter¹

1. International Marine and Dredging Consultants (IMDC nv)

Covelierstraat 15, 2600 Berchem- Antwerpen, Belgique

marine.colin@imdc.be

RESUME.

L'étude de cartographie des aléas littoraux dans le cadre de l'élaboration des futurs Plans de Prévention des Risques Littoraux a pour objectif d'analyser les phénomènes naturels, de caractériser les aléas et de réaliser la carte des aléas. La cartographie des aléas littoraux porte sur la submersion marine, le recul du trait de côte des côtes basses meubles et les migrations dunaires. Ceci passe d'abord par l'analyse du fonctionnement littoral. Cet article présentera les nombreuses données nécessaires à la compréhension et l'analyse du fonctionnement littoral afin de caractériser deux des trois aléas susmentionnés : le recul du trait de côte et les migrations dunaires. De façon plus précise, cet article discutera de l'importance des éléments pour la détermination des aléas, de la disponibilité et de la qualité des données requises pour y parvenir à travers deux cas d'études : Dives-Orne et Bessin dans le Calvados et le département de la Loire-Atlantique.

ABSTRACT.

The study of the mapping of coastal hazards for the future Coastal Risk Prevention Plans has as objective the analysis of the natural phenomena, and the characterization and mapping of these hazards. The considered coastal hazards are marine inundation, the coastline retreat and the dune migration. This starts with the analysis of the coastal system. This paper presents the necessary data to understand and analyse the coastal system and to characterize two of the three hazards mentioned above: the coastline retreat and the dune migration. More specifically, this paper discusses the importance of the elements to determine the hazards, the availability and the quality of the necessary data to achieve this with the example of two case studies: Dives-Orne and Bessin in the department of Calvados and the department of Loire-Atlantique.

MOTS-CLES : PHENOMENES NATURELS, ALEAS LITTORAUX, TRAIT DE COTE, MIGRATION DUNAIRE, GEOMORPHOLOGIE, HYDRODYNAMIQUE.

KEYWORDS: NATURAL PHENOMENA, COASTAL HAZARDS, COASTLINE, DUNE MIGRATION, GEOMORPHOLOGY, HYDRODYNAMICS.

1. Introduction

Réalisé conformément à l'article L.562-1 du code de l'environnement, le PPRL (Plan de Prévention de Risques Littoraux) a pour objet de i) délimiter les zones exposées aux risques, ii) délimiter les zones qui ne sont pas directement exposées aux risques mais où des constructions, ouvrages, aménagements ou exploitations pourraient aggraver des risques ou en provoquer de nouveaux, iii) définir les mesures relatives au mode de réalisation, à l'utilisation et l'exploitation de tout type de constructions et iv) définir les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde.

En France, plusieurs PPRL ont vu le jour, parmi lesquels les PPRL de la Loire-Atlantique et celui du Calvados.

Le PPRL de Loire-Atlantique couvre 20 communes, regroupées en 4 secteurs géographiques :

- Secteur 1 : Baie de Pont-Mahé – Traict de Pen-Bé : 4 communes
- Secteur 2 : Presqu'île Guérandaise-Saint-Nazaire : 8 communes
- Secteur 3 : Côte de Jade : 4 communes.
- Secteur 4 : Baie de Bourgneuf: 4 communes

Le PPRL de Calvados couvre 17 communes, regroupées en 2 secteurs géographiques :

- Secteur 1 : de Tracy-sur-mer à Bernières-sur-mer : 9 communes
- Secteur 2 : d'Hermanville-sur-mer à Dives-sur-mer : 8 communes

L'analyse du fonctionnement littoral, nécessaire à la cartographie des aléas littoraux, passe par l'étude de nombreux éléments dont la disponibilité et la qualité peut varier selon les zones étudiées et les sources consultées. A travers les deux cas d'études susmentionnés, nous verrons quelles sont les données souvent manquantes ou incomplètes et proposerons des recommandations pour obtenir davantage de données.

2. Forçages météorologiques, climatiques et hydrodynamiques

L'étude des aléas d'érosion et migration dunaire nécessite l'analyse de plusieurs paramètres hydrodynamiques, qui peuvent avoir un effet direct ou indirect sur ces aléas respectifs. Les processus au large (houles, courants...) peuvent avoir un effet sur la dynamique des côtes, et leur transformation en bordure littorale à l'aide de divers modèles numériques fait souvent partie de l'étude PPRL. Il est alors important d'obtenir de bonnes bases de données brutes, pour calibrer ces modèles numériques.

2.1. Le vent

Le vent en bordure littorale est responsable des échanges dunes-plages. Plusieurs stations météorologiques de Météo France sont présentes sur le littoral du Calvados et de Loire-Atlantique. Par ailleurs, certaines mesures issues d'études peuvent également être trouvées mais sont rares.

Au large, le vent est responsable des effets sur la houle. Là encore, plusieurs sources de données existent (NOAA, CEPMMT...). Pour les modèles hydrodynamiques et de houles il est intéressant d'obtenir des suites temporelles contenant les tempêtes étudiées pour la concomitance houle-

surcote extrême. Ces données pourront ainsi servir comme paramètres d'entrée de modèle hydrodynamique et de houle pour le calcul des conditions extrêmes.

2.2. Les niveaux marins

Le niveau marin est le résultat de la marée astronomique (théorique) et de surcotes ou décotes (aléatoires). Ces dernières dépendent de divers phénomènes (dont la plupart météorologiques), tels que les vents et la pression atmosphérique. Les surcotes et décotes peuvent être calculées en soustrayant la marée théorique de la marée mesurée. C'est par leur nature aléatoire, qu'entre l'aspect statistique de l'analyse des niveaux marins, et plus spécifiquement des niveaux extrêmes.

2.2.1. Marée théorique et courants engendrés par la marée

La marée théorique est facilement descriptible sur la base de l'annuaire des marées du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine). En ce qui concerne les courants, plusieurs études ont été réalisées en Loire-Atlantique et Calvados; les courants de marée en bordure littorale peuvent être plus ou moins importants selon la morphologie des côtes, notamment dans les baies et estuaires. Il est aussi possible de modéliser les courants de marée à l'aide des logiciels MARS-3D, TELEMAC, Delft-3D...

2.2.2. Niveaux extrêmes

Les niveaux extrêmes peuvent être calculés à partir de l'ensemble des données marégraphiques disponibles au SHOM et de mesures marégraphiques que l'on peut obtenir dans les ports. Toutefois, certaines mesures peuvent ne pas avoir été enregistrées ou notées surtout lorsqu'il s'agit de dates anciennes. Les modèles de courants susmentionnés permettent d'étudier également les niveaux atteints le long de côtes.

2.2.3. Changement climatique

La prise en compte du changement climatique est également importante pour les projets de type PPRL puisque celui-ci aura une influence sur les niveaux extrêmes.

La période retenue pour la prise en compte de l'impact du changement climatique pour l'élaboration des PPRL est de 100 ans. L'ONERC a produit un document de synthèse en février 2010, traitant de l'élévation du niveau marin du fait du changement climatique. Ce document propose de retenir en France les valeurs suivantes (à partir du niveau moyen de la mer mesuré en 2000 comme référence) :

- Hypothèse optimiste : +40cm
- Hypothèse pessimiste : +60cm
- Hypothèse extrême : +100cm

Le scénario retenu est le « scénario pessimiste » de l'ONERC, soit une élévation de 0,60 m du niveau moyen de la mer à l'horizon 2100.

Toutefois, cette valeur n'est pas précise et peut varier selon les sources. Des études plus détaillées par territoire étudié permettent de détailler ces scénarios, mais sont malheureusement rares.

2.3. La houle

2.3.1. ANEMOC

Les états de mer au large peuvent être étudiés à partir des résultats de la base de données issue de la simulation ANEMOC (2013) sur une période de 23 ans et 8 mois allant du 01/01/1979 au 31/08/2002.

2.3.2. CANDHIS

Trois bases de données de mesures de houles dans la baie de la Seine permettent de comparer l'analyse de sorties du modèle ANEMOC avec des mesures réelles au large. En Loire-Atlantique 4 bouées houlographiques étaient disponibles au large de la zone d'étude (cf CANDHIS, 2013).

Toutefois, les bouées sont généralement localisées au large des zones étudiées, ce qui implique l'utilisation de modèle numérique pour connaître les valeurs au niveau du littoral. L'utilité des mesures dépend souvent de la période mesurée (tempêtes incluses ou non dans les suites temporelles) et la qualité des mesures (lacunes, erreurs...).

2.4. Disponibilité conjointe des données marégraphiques et houlographiques

La stratégie de définition de l'évènement de référence, servant pour les calculs de tests de dunes et de digues, pourrait consister à identifier les périodes de niveaux marins importants d'une part et les périodes d'états de mer sévères d'autre part, et d'ensuite étudier la fréquence de la conjoncture de ces deux phénomènes. Cette méthode demande la disponibilité simultanée de données marégraphiques et houlographiques (Tableau 1).

Tableau 1. Période couverte par les données de houles et de marées pour le PPRL Loire-Atlantique

Période couverte	Houle	Marée
1979-1981	ANEMOC	Saint-Nazaire
1983-1988	ANEMOC	Saint-Nazaire
2001	ANEMOC	Saint-Nazaire
Étés 1996-2002	ANEMOC	Le Crouesty
2010-2011	CANDHIS- Le Four	Saint-Nazaire et Le Crouesty
2005-2011	CANDHIS- Yeu Nord	Saint-Nazaire et Le Crouesty

3. Aspects altimétriques et morphologiques

L'aspect morphologique est un élément important pour mettre en œuvre les outils de calcul d'érosion. Ces données couvrent « l'état des lieux » (présence de sédiments, altimétrie, systèmes de protection...) et sont des données d'entrées directes pour les outils de calcul et l'analyse du recul du trait de côte.

3.1. Bathymétrie

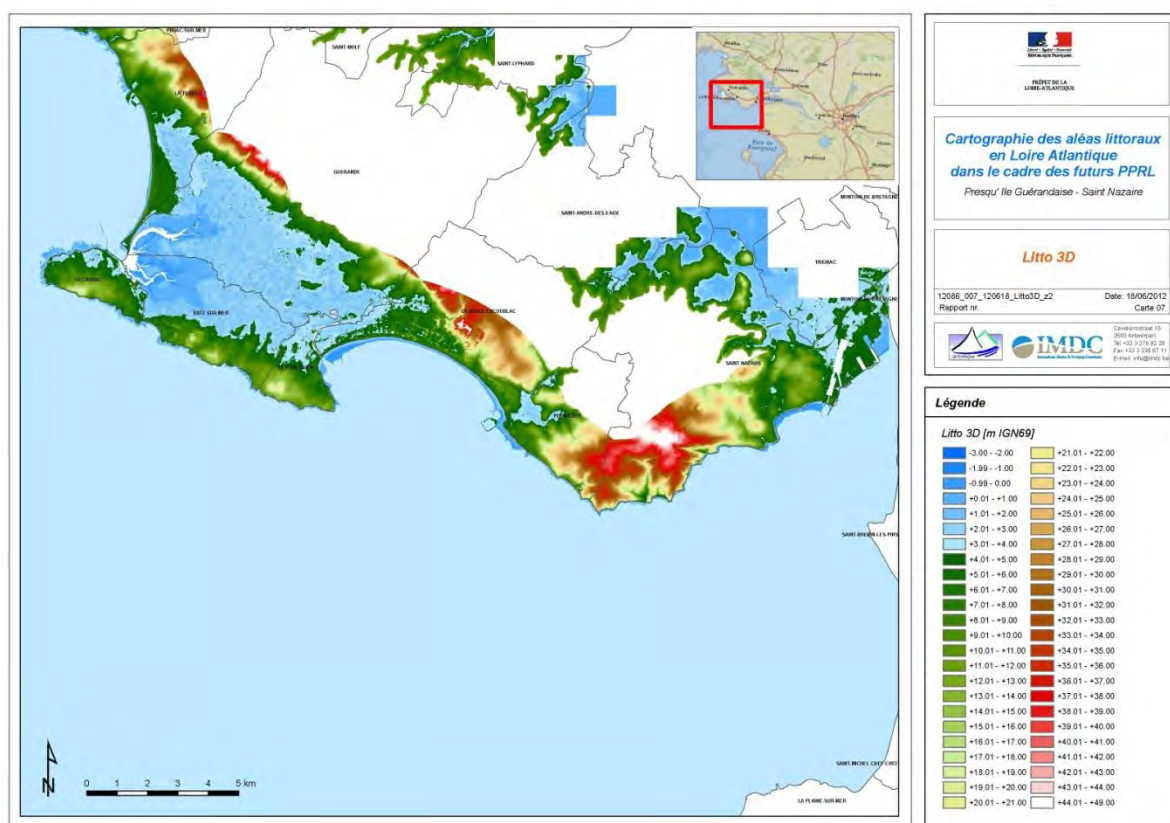
La bathymétrie est un aspect important puisque les forçages hydrodynamiques cités précédemment vont en dépendre très fortement.

Les données bathymétriques proviennent de plusieurs sources, la plus connue en France est celle du SHOM. Bien que, de façon générale, la précision planimétrique absolue des dalles du SHOM varie de 1 à 20m et de 30 à 60cm pour la précision verticale, ces chiffres varient selon la zone. Dans les zones portuaires ou proches, la qualité des données est bonne et précise, mais dans les baies, la qualité est souvent moins bonne (cf SHOM, 2009).

3.2. Topographie

Tout comme la bathymétrie, la topographie a une influence importante sur les aléas; les forçages n'auront en effet pas le même effet sur des zones dont la topographie est différente.

Les données Litto3D, ont une résolution décamétrique (5m), de précision métrique en XY (1.5m de précision, tolérance égale à 2.8m) et de précision métrique globale en Z (30cm de précision, tolérance égale à 40cm). Sur les seules parties terrestres, la résolution et la précision des mesures sont généralement bien meilleures (15cm de précision, tolérance égale à 40cm), (cf SHOM, 2011). La carte Litto3D de la presqu'île de Guérande et Saint Nazaire est présentée Figure 1.



3.3. Altimétrie des ouvrages côtiers

Le système de défense et les ouvrages de protection jouent eux aussi un rôle important et notamment l'altimétrie de ces ouvrages. En effet, ils peuvent être pris en compte ou non lors de la modélisation des aléas.

Afin de collecter des données, les sources bibliographiques sont exploitées et complétées par des questionnaires adressés aux communes.

Dans le cadre du projet PPRL en Loire-Atlantique, des études réalisées par Sogreah (2012) et CETE (2011) ont permis d'obtenir de nombreuses informations quant aux ouvrages de même que les questionnaires aux communes qui eux, sont parfois incomplets. Des données complémentaires peuvent également être trouvées auprès des gestionnaires d'ouvrages, dans les suivis et diagnostics et les Études de dangers locales.

3.4. Granulométrie

L'analyse granulométrique des plages et des dunes est primordiale. Pour les 2 cas d'étude faisant l'objet de cet article, on constate que la disponibilité des sources peut fortement varier en ce qui concerne les caractéristiques sédimentaires.

Pour le Calvados, des fiches d'analyses granulométriques faites par le CREC au niveau de Luc-sur-Mer, l'estuaire de l'Orne et Villers-sur-Mer ont pu être trouvées sur le site web du CREC (2013).

En Loire-Atlantique, Sogreah avait effectué en 2002 des échantillons au niveau de la pointe de Pen-Bron, ce qui ne représente qu'une petite zone du PPRL. Par ailleurs, les données sont assez anciennes (>10ans) et peuvent ne plus être d'actualité.

De plus, les visites de terrain permettent, à partir d'estimations visuelles, de différencier les types de sables, mais cela n'est pas d'une grande précision comparé aux courbes granulométriques.

3.5. Profils de plage

L'altimétrie et la morphologie des plages sont des paramètres qui influencent les aléas.

Il existe parfois des études concernant le trait de côte et le transport sédimentaire.

Dans le Calvados, le suivi littoral mené par le CREC (2013) a permis d'obtenir des informations sur le transport sédimentaire lié au vent. D'autres études (cf Actimar, 2010 ; Blanpain, 2009) ont apporté des informations sur le transport sédimentaire lié aux houles et aux courants.

En Loire-Atlantique, une étude menée par Sogreah (2012) a permis de connaître l'évolution du trait de côte et de comprendre le transport sédimentaire en comparant les données à celles issues de visites de terrain. Par ailleurs, une soixantaine de profils de plages sont mesurés annuellement sur toute la région d'étude. Ces profils peuvent confirmer ou contester les estimations de l'évolution de la côte. Un exemple est présenté Figure 2.

Des profils de plage peuvent aussi être extraits des données Lidar qui sont précises.

Pour calibrer les modèles Durosta et Duros+ utilisés pour les tests de dunes et plages, il est intéressant d'avoir d'une part, un aspect diachronique des profils (profils annuels et saisonniers été-

hiver), ainsi que des profils de plages réalisés avant et après une tempête. Malheureusement, ces données sont bien souvent inexistantes.

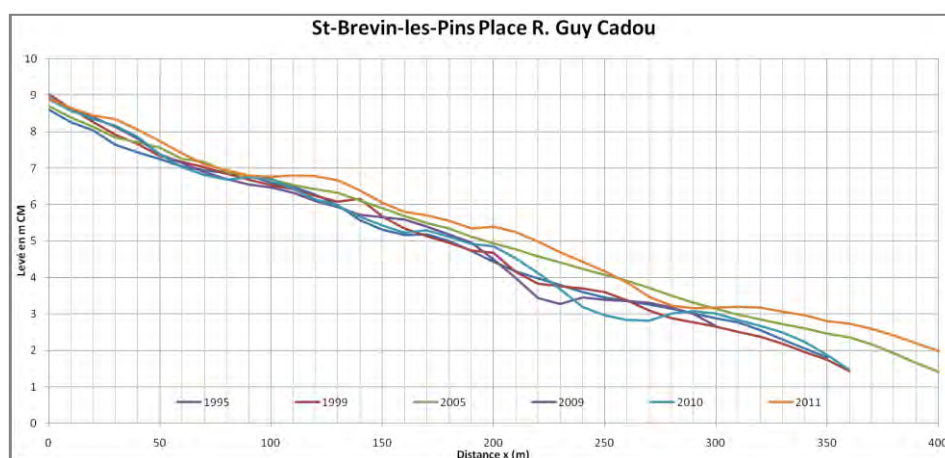


Figure 2. Profils mesurés en 1995, 1999, 2005, 2009, 2010 et 2011 à la place R.G.Cadou (Saint-Brévin-les-Pins), (DDTM, 2011)

3.5.1. Travaux de dragage et rechargement des plages en sable

Les travaux de dragage et de rechargement des plages sont également importants puisqu'ils modifient largement le transport sédimentaire et donc le trait de côte.

3.6. Étude diachronique des traits de côtes

La caractérisation des aléas littoraux passe par une étude historique en vue d'extrapoler les valeurs à 100 ans, à adapter ces données en cas de travaux, d'aménagement côtier, et enfin à modéliser les phénomènes de recul du trait de côte et de migration dunaire. De manière plus précise, l'étude diachronique des profils de plage et des traits de côte est importante pour calibrer les modèles d'érosion.

L'étude diachronique de la dynamique côtière consiste en la comparaison à différentes dates de la position des formes littorales les mieux à même de caractériser les évolutions du milieu et de déterminer des vitesses et rythmes d'évolution. Pour cela, il est avant tout nécessaire de s'assurer que ce qui est observé correspond bien à une tendance sur du long terme, et non pas à l'influence conjoncturelle d'un événement particulier de grande ampleur.

La réalisation d'une étude diachronique et l'évaluation de la dynamique côtière nécessitent l'analyse de documents anciens. Plusieurs sources peuvent être utilisées.

Dans le cas d'une étude diachronique, il est nécessaire de disposer de plusieurs prises de vues espacées de plusieurs décennies afin de pouvoir interpréter les tendances de recul ou d'avancée du trait de côte dans le passé pour en prévoir l'évolution à long terme.

3.7. Étude historique

L'inventaire des phénomènes naturels dans le cadre de l'étude historique du PPRL a pour objectif de compiler une documentation la plus complète possible afin de caractériser l'ensemble des événements tempétueux ayant affecté la zone d'étude et de ce fait, contribue à définir les conditions extrêmes, les phénomènes d'érosion et de migration dunaire observés dans le passé.

L'élaboration d'un historique des événements tempétueux est une opération longue et méticuleuse, qui s'appuie sur les indices collectés auprès de différents organismes. L'analyse de ces données s'oriente vers un recoupement des informations collectées afin de pouvoir dresser un historique le plus précis et complet possible.

Dans le cadre des projets PPRL Calvados et Loire-Atlantique, des recherches approfondies ont été menées auprès de trois organismes : les sources fournies par les services de l'Etat au début de l'étude (Sources DDTM14 et DDTM44), les sources collectées auprès des collectivités (Sources CO14) et les sources des Archives Départementales du Calvados et de Loire-Atlantique (Sources ADC14 et ADAL44).

Malgré le recoupement des sources, certaines données peuvent toutefois manquer comme par exemple les couplages entre les paramètres hydrodynamiques (niveaux d'eau, houles...) et les tempêtes recensées ou encore des données quantitatives en terme d'érosion.

4. Conclusion

Cet article présente les données nécessaires au projet PPRL en ce qui concerne les aléas érosion et migration dunaire. Les points forts et lacunes des données d'entrée sont mis en avant de même que la disponibilité des données. Ainsi, les courants et vents ont un rôle sur les forçages hydrodynamiques que sont la houle et les niveaux extrêmes, primordiaux pour la mise en place de modèles numériques. Par ailleurs, les données altimétriques des ouvrages, les données granulométriques et les profils de plages sont d'importants outils pour ce type de projet. Les travaux de dragage et/ou de rechargement de plages ainsi que les études diachroniques et historiques sont elles aussi souvent incomplètes ou inexistantes. Cet article présentera des méthodes et propositions pour améliorer la disponibilité et la qualité des données pour les projets de types PPRL afin de caractériser l'aléa érosion et migration dunaire.

Remerciements

Je remercie tout d'abord la DDTM de Loire-Atlantique ainsi que celle de Calvados pour m'avoir permis de faire cet article. Je remercie aussi Annelies et Philippe pour leurs conseils et leur aide qui m'ont été très utiles à l'élaboration de ce travail.

Bibliographie et références

- ACTIMAR. (2010). Etude d'impact hydrodynamique et sédimentaire pour un projet d'aménagement portuaire, Projet MOC 0134.
- ANEMOC. (2013). Atlas Numérique d'Etats de Mer Océaniques et Côtiers, base de données des conditions d'états de mer obtenues le long des côtes françaises Atlantique - Manche - Mer du Nord, <http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>.

- BLANPAIN O. (2009). Dynamique sédimentaire multiclassée : de l'étude des processus à la modélisation en manche. Rapport de thèse IRSN, Ifremer, Université de Rouen. 337 pages.
- CANDHIS (2013). Centre d'Archivage National des Données de Houle In Situ, <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>.
- CETE. (2011). Fiche de recensement des digues en Loire-Atlantique.
- CREC. (2013). www.crec.unicean.fr
- DDTM. (2011). Profils de plages à Saint Brévin les Pins. Profils envoyés par la DDTM de Loire-Atlantique dans le cadre de l'étude des aléas.
- DDTM. (2013). Carte des PPRL envisagés. [http://lettre.basse-normandie.pref.gouv.fr/article/0/286/Les plans de prevention des risques littoraux PPRL dans le departement d u Calvados.html](http://lettre.basse-normandie.pref.gouv.fr/article/0/286/Les_plans_de_prevention_des_risques_littoraux_PPRL_dans_le_departement_du_Calvados.html)
- IMDC. (2012). Carte Litto3D de la presqu'île de Guérande à Saint-Nazaire.
- ONERC. (2010). Synthèse - Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles. 6p. http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/synth_niveau_mer.pdf
- SHOM. (2009). Dalles bathymétriques. <http://www.shom.fr/les-produits/bases-de-donnees-numeriques/bathymetrie/dalles-bathymetriques/>
- SHOM. (2011). Normes des levés Litto3D. <http://www.shom.fr/fileadmin/data-www/MIP/DIT/HYDRO/Litto3D.pdf>
- SOGREAH. (2002). Centre marin de Pen Bron – Etude hydraulique et sédimentologique pour le confortement du perré de protection du centre. Rapport N° 71 6231, décembre 2002.
- SOGREAH. (2012). Étude relative à la gestion durable du trait de côte de la région de la Loire-Atlantique, fascicule B : Fiches d'Inspection du Littoral, N° 1711836R2, commandé par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement des Pays de la Loire.

Projet VIMERS

Pré-voir les tempêtes majeures à venir pour mieux s'y préparer

Amélie Roche¹, Gwénaële Jan², Ronan Sanquer¹, Julie Durand¹, Hervé Le Cam³, Thumette Madec³, Franck Baraer³, David Goutx³, Yann Deniaud¹

1. Cerema – Direction technique Eau, Mer et Fleuves

Technopôle Brest Iroise, 155 rue Pierre Bouguer, BP 5, 29280 Plouzané, France

Amelie.Roche@cerema.fr, Ronan.Sanquer@cerema.fr, julie.durand@cerema.fr,
Yann.Deniaud@cerema.fr

2. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

13 Rue de Châtelier, 29200 Brest, France

gjan@shom.fr

3. Météo-France Direction Interrégionale Ouest

BP 49139, 35091 Rennes Cedex 9, France

herve.lecam@meteo.fr, thumette.madec@meteo.fr, franck.baraer@meteo.fr, david.goutx@meteo.fr

RESUME.

Parmi les tempêtes, les « vimers », concomitances d'un passage dépressionnaire et d'une marée haute, constituent des conditions probables, propices aux submersions marines. La Direction interrégionale Ouest de Météo-France, le Cerema (ex-Cetmef) et le Shom ont uni leurs efforts pour étudier les tempêtes menaçant le littoral breton et tenter de déterminer des événements extrêmes, dont on pourrait ensuite déduire les paramètres hydrodynamiques pour l'étude des risques de submersion marine liés à des vimers. Une documentation approfondie des tempêtes historiques a été produite à partir de données d'archives numériques ou manuscrites et de réanalyses numériques à partir de 4 points de vue : météorologique, hydrodynamique (niveaux marins et états de mer) et des dégâts causés à la côte. Cette description fine des tempêtes passées doit permettre de constituer des scénarii fictifs mais probables de tempêtes à venir et d'analyser leur degré de similitude dans la recherche de « clones » de tempêtes historiques.

ABSTRACT.

Among storm events, « vimers » relate to simultaneous occurrences of a passing low-pressure system and a high tide. Those conditions are not only likely to occur but also very damaging for the coast as generating coastal floods. Météo-France (West district Direction), Cerema (ex-Cetmef) and SHOM investigate in this article storms threatening britanny coasts. The aim is to try to identify extreme events and determine hydrodynamic parameters for coastal risks analyses. Each registred historical storm has been described from numerical or hand-written archive data and from existing numerical reanalyses of meteorology, coastal hydrodynamics (sea levels and sea states) and coastal damages. Results will enable stakeholders to consider probable fictive scenarii of storms to come and to integrate into coastal risks management plans. Partners are now trying to determine factors of similarity between historical storms and identify historical « storm clones ».

MOTS-CLES: Tempêtes historiques, Tempêtes fictives, Submersion marine

KEYWORDS: Historical storms, fictive storm event, coastal flooding

1. Introduction

La plupart des études d'aléa de submersion marine s'attachent à définir des valeurs extrêmes pour les niveaux marins et les houles et à combiner ces valeurs afin de déterminer les caractéristiques d'un événement de référence à la côte. Pourtant, ces phénomènes résultent d'un même événement météorologique générateur : les tempêtes. La Direction Interrégionale Ouest de Météo-France, le Cerema (ex-Cetmef) et le Shom ont uni leurs efforts pour étudier les tempêtes menaçant le littoral breton et tenter de déterminer des événements extrêmes de référence, dont on pourrait ensuite déduire les paramètres hydrodynamiques correspondants pour l'étude des risques de submersion marine. La méthode employée mêle analyse de données d'archives numériques ou manuscrites relatives aux tempêtes historiques et réanalyses numériques (champs de vents et pressions ERA-Intérim, atlas d'états de mer ANEMOC), afin de documenter au maximum chaque tempête comme on le ferait d'un cyclone, en caractérisant notamment la trajectoire de son centre dépressionnaire, les surcotes et états de mer engendrés et les dégâts causés à la côte. Cet inventaire se veut le plus exhaustif possible sur la période récente, c'est-à-dire depuis la fin du XIX^e siècle, et pour des dommages à la côte localisés entre le nord Cotentin et le sud Vendée. Il doit servir à l'identification des conditions météorologiques et océaniques ayant donné lieu à des dégâts côtiers mais aussi à l'élaboration de scénarii de tempêtes fictives mais probables auxquelles on a heureusement échappé. Pour définir ces scénarii et les rendre crédibles au vu de l'Histoire, des méthodes de comparaison et de recherche d'analogues historiques semi-automatiques sont en cours de développement pour identifier des « clones historiques de tempêtes », qui seraient rejoués grâce aux outils de modélisation actuels à disposition des trois partenaires.

2. Inventaire des tempêtes historiques ayant touché le littoral nord-ouest français

2.1. D'un point de vue purement météorologique

Il n'existe pas une définition claire et unique de cet être météorologique qu'on appelle « tempête ». Le Littré en donne la définition suivante : « vents violents qui, après avoir soufflé un certain temps de la même direction, en changent quelquefois plus ou moins brusquement ». En météorologie, la notion de vent est directement liée à la pression atmosphérique. Cette dernière se visualise sur des cartes par des lignes d'égales valeurs de pression, les isobares. La vitesse de vent dépend du gradient de pression et donc, de l'écartement de ces isobares : plus elles sont resserrées, plus le vent est fort. Le vent et la pression atmosphérique sont deux paramètres moteur de la génération des états de mer (combinaison de la houle et de la mer du vent) et des surcotes (différence entre le niveau marin observé et prédit en un point). Les tempêtes qui intéressent les côtes bretonnes sont la conséquence d'un passage, à plus ou moins grande distance de la région, d'une dépression qui suit sa propre vie (creusement, comblement, modification de la vitesse de déplacement, changement de direction...).

Pour rechercher de manière automatique des dates de « tempête » d'un point de vue uniquement météorologique, Météo-France a interrogé ses bases de données, en particulier la BD-Clim, où sont archivées les observations de vent et de pression de sémaphores depuis 1950, et a fixé des seuils de vitesse de vent et de pression dépendant de l'exposition de la côte bretonne (Roche *et al.*, 2014 à paraître). Cette méthode a permis d'identifier 297 dates entre janvier 1950 et avril 2012 (NB : 7 dates ont été ajoutées entre avril 2012 et mars 2014). La connaissance de tempêtes

renseignées dans la base de données des événements marquants (BDEM) et des centres météorologiques locaux a permis de compléter cet inventaire avec 17 tempêtes supplémentaires entre le 9 mars 1891 et le 7 août 1948, portant ainsi à 314 le nombre de tempêtes « purement météorologiques » (Tableau 1).

Pour déterminer les trajectoires des dépressions, les analyses Era-intérim du Centre Européen de prévisions, disponibles depuis 1979, ont été utilisées. Les 142 événements tempétueux postérieurs à cette date ont ainsi pu être étudiés dans le détail. Cinq événements particuliers antérieurs suffisamment documentés ont pu être ajoutés : le 12 mars 1967, le 06 juillet 1969, le 13 février 1972, les 11 et 12 janvier 1978 et les 28 et 29 janvier 1978. Chacune de ces 147 tempêtes a fait l'objet d'une fiche tempête et l'ensemble a été synthétisé dans un tableau précisant : date et heure, latitude et longitude ainsi que valeur du centre de la dépression, direction et force Beaufort du vent sur la côte sud d'une part et sur la côte nord d'autre part, et enfin pression minimale mesurée sur la Bretagne. Ces informations ont permis de dresser une typologie des tempêtes bretonnes (Goutx *et al.*, 2014 ; Roche *et al.*, 2014 à paraître). Parallèlement Météo-France explore la documentation existante pour des dates de tempêtes antérieures à 1950. Les informations disponibles sont plus rares, hétérogènes et souvent sur des supports papier plus ou moins exploitables.

2.2. Du point de vue de l'hydrodynamique côtière

2.2.1. Inventaire des niveaux marins hauts et des surcotes historiques

Pour renseigner les dates de tempêtes ayant généré des niveaux marins hauts, le SHOM s'est livré à une analyse de ses bases de données comprenant des données issues de marégraphes haute fréquence mais également des données d'archive qui peuvent parfois offrir des informations sur le niveau marin sur une cadence horaire mais dont les échantillonnages et les formats sont hétérogènes. Le traitement de ces données anciennes nécessite d'abord de les caler :

- en altitude, à partir d'une référence altimétrique commune à tous les marégraphes analysés,
- en temps, avec une référence temporelle identique (datation en temps UT0).

Lorsque les données le permettent, les mesures échantillonnées à 10 minutes et à 1 heure sont utilisées pour caractériser les niveaux marins enregistrés. Pour détecter de forts niveaux marins, les hauteurs d'eau maximales relevées sont comparées aux niveaux de plus haute mer astronomique (PHMA) et/ou aux statistiques de niveaux marins extrêmes de référence (SHOM-Cetmef, 2012) estimant le niveau marin de période de retour supérieure à 5, 10, 20, 50 ou 100 ans. Le niveau atteint est considéré comme remarquable à partir d'une période de retour de 10 ans. Les surcotes instantanées maximales sont analysées et complétées par la courbe de marée prédite. Les hauteurs d'eau maximales, les surcotes maximales de pleine-mer (PM) et de basse-mer (BM) sont aussi calculées et analysées.

Ainsi, grâce aux 9 marégraphes répartis sur le secteur d'étude entre Cherbourg et Saint-Nazaire, ce sont 137 dates qui ont pu être renseignées avec des informations sur les niveaux marins sur la période 1954-2012 dont 88 identifiées grâce à des niveaux marins remarquablement hauts (voir Tableau 1). Parmi eux, 7 événements ont occasionné des niveaux marins supérieurs aux PHMA. Les critères de caractérisation de ces dates et niveaux marins hauts finalement retenus sont : (1) la comparaison de maximum de hauteur observée au port à la PHMA, (2) sa période de retour d'après SHOM-Cetmef (2012), (3) l'instant de la surcote instantanée maximale et (4) son occurrence par

rapport à une BM ou PM. Sont également renseignées pour chaque date ressortant de l'analyse les hauteurs d'eau maximales atteintes, les surcotes de PM et de BM maximales, ainsi que les surcotes instantanées maximales.

2.2.2. Inventaire des états de mer historiques

Le Cerema (ex-Cetmef) gère CANDHIS, le Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ, qui désigne à la fois le réseau national côtier de mesures *in situ* de houle, le site Internet et la base de données archivant les mesures. Le pas de mesure des paramètres d'états de mer est variable selon l'ancienneté de la mesure, de 3 h avec passage à 1 h ou 30 mn sur déclenchement sur seuil en cas de tempête pour les mesures les plus anciennes, 1 h ou 30 mn pour les mesures les plus récentes. Des traitements statistiques sont opérés sur les données validées et permettent le calcul des paramètres d'états de mer pour l'analyse vague par vague et pour l'analyse spectrale et directionnelle. Par ailleurs, le Cerema gère conjointement avec EDF-R&D la base de données ANEMOC (Atlas Numérique d'États de mer Océanique et Côtier) qui constitue un recueil de données de houle modélisées rétrospectivement (hindcast) à partir de champs de vent et de pression passés (<http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>) ; sur la partie Atlantique-Manche-Mer du Nord, ces données couvrent la période du 1^{er} janvier 1979 au 31 août 2002. Dans le cadre du projet Vimiers, ces deux sources de données ont permis de renseigner les dates de tempête ayant engendré des états de mer remarquables. Cependant d'autres sources de données de houle existent et n'ont pas pu être intégrées à ce stade de l'étude : le renseignement d'estimations visuelles de hauteurs de houle en valeur ou dans l'échelle Beaufort, réalisées par les gardiens de phare ou les navires en mer (mesures anciennes), et les mesures de houle par satellites (disponibles depuis 1985).

Un certain nombre d'événements marquants est analysé pour chaque point de mesure CANDHIS, puis restitué dans les « fiches synthétiques de mesure d'états de mer » (Kergadallan *et al.*, 2012). L'analyse permet d'identifier les tempêtes les plus importantes à chaque point de mesure ; leur nombre équivaut au nombre d'années de mesure disponibles par campagne. Ainsi, sur les 13 points de mesure *in situ* CANDHIS disponibles dans la zone d'étude, 11 points ont déjà fait l'objet d'une analyse dans les fiches synthétiques, identifiant ainsi 46 dates de données d'états de mer remarquables depuis mars 1986 (NB : les 2 autres points ont une période de mesure trop courte). Il est à noter que certaines dates peuvent concerner plusieurs points de mesure ou que plusieurs dates peuvent être reliées au même événement météorologique initiateur. Seule la base de données CANDHIS a permis de rechercher de nouvelles dates de tempêtes. Par ailleurs, 68 dates identifiées par des critères météorologiques ont pu être précisées du point de vue des états de mer à partir des données CANDHIS (48 dates) et ANEMOC (28 dates) sur la période 1984-2012 (Tableau 1). Les paramètres d'états de mer suivants ont ainsi été fournis pour chaque date de tempête identifiée :

- pour les mesures de houle *in situ* (CANDHIS) : date de début et fin de tempête, évolution des paramètres $H_{1/3}$ et H_{max} en fonction du temps, si disponible, l'évolution du spectre de variance en fonction du temps, et le détail des paramètres obtenus au pic de tempête ($H_{1/3}$, H_{max} , $T_{H1/3}$, T_{Hmax} , H_{m0} , T_e et si disponible Dir, Etal et spectre de variance directionnel) ;

- pour les données de houle modélisées (ANEMOC) : localisation du pic de houle (maximum sur la grille et la période considérée), date et heure de l'événement, date ANEMOC (référentiel différent), hauteur significative H_{m0} , direction moyenne, étalement directionnel, périodes moyennes T_{moy} et T_{M02} et période de pic T_{PR5} .

Pour les fiches-tempêtes, une carte représentant le pic de houle et les lignes d'iso-hauteurs de houle est également fournie, ainsi que trois graphes représentant H_{m0} , Dir et T_{moy} autour de la période et au point pic d'ANEMOC.

2.3. Du point de vue des dégâts constatés à la côte

Des inventaires de tempêtes ayant occasionné des dégâts à la côte ont récemment été produits sur la zone d'étude, notamment dans le cadre de l'élaboration de plans de prévention des risques côtiers ou pour l'application de la Directive européenne Inondations pour l'évaluation préliminaire des risques d'inondation. Ces documents de synthèse (par exemple Bessemoulin, 2002 ; MEDDTL, 2011a et b) ont permis d'identifier 493 dates de tempête depuis 1700 et 18 dates antérieures, soit 511 dates (Tableau 1). Parmi ces dates de tempêtes, 32 ressortent particulièrement comme ayant causé de nombreux dégâts et touché de larges territoires ; elles seront, dans la mesure du possible, renseignées et cartographiées au mieux dans les fiches-tempêtes.

Ces informations ne sont pas structurées dans une base de données unique et l'analyse de l'importance des dégâts causés par les tempêtes, non triviale, doit passer par une gradation de ces impacts, comme cela peut être fait pour les cyclones tropicaux (cf. échelle de Saffir-Simpson dans Simpson et Reihl, 1981). Ainsi, les critères identifiés pour constituer cette base de données sur les dégâts ont été établis à partir des informations disponibles dans les documents de synthèse étudiés et pouvant couvrir diverses époques. La base de données, un des livrables du projet, sera conçue pour chaque événement tempétueux et chaque source d'information ; les paramètres intégrés seront relatifs à la vulnérabilité humaine, en mer ou à terre, aux dégâts matériels sur le bâti, les réseaux (transport, énergie, télécommunications, eau potable...) et l'agriculture, la végétation, les ouvrages de protection côtiers, les aménagements portuaires, en évaluant également les coûts et les aléas induits.

Tableau 1. Nombre de tempêtes recensées par critère examiné, selon l'approche météorologique, hydrodynamique (niveaux marins, états de mer) et des dégâts à la côte

Paramètres d'analyse	Nombre de tempêtes recensées par période			
	De 500 à 2012	500-1849	1850-1949	1950-2012
<i>Vents, pressions</i>	314	-	17	307
<i>Niveaux marins, surcotes</i>	88	-	-	88
<i>États de mer</i>	46	-	-	46
<i>Dégâts à la côte</i>	511	84	238	189
<i>Au moins 1 paramètre</i>	754	84	240	430
<i>Au moins 2 paramètres</i>	189	-	15	174
<i>Au moins 3 paramètres</i>	35	-	-	35
<i>Tous paramètres renseignés</i>	1	-	-	1 (16/12/1989)

3. De la difficulté d'identifier des analogues historiques de tempêtes

L'un des axes de développement en cours concerne la tentative de mise au point d'une méthode permettant de proposer, pour une tempête donnée, un « analogue ». Toute la difficulté réside, d'une part, dans la définition de ce qu'est un analogue et, d'autre part, dans le choix du degré d'analogie recherché. Cette tâche est rendue encore plus complexe par le fait que, comme signalé précédemment, l'objet « tempête » lui-même n'est pas parfaitement déterminé.

En effet, l'analogie peut prendre plusieurs aspects. Elle peut être considérée du seul point de vue météorologique (comparaison de paramètres relatifs à la pression atmosphérique et/ou aux vents sur les côtes bretonnes, par exemple) ou d'un point de vue plus géométrique (analyse uniquement des trajectoires et/ou des vitesses de déplacement, dans un périmètre d'étude bien précis). D'autres critères de similitude, sortant du cadre purement météorologique, peuvent aussi être considérés : des critères hydrodynamiques, en termes de surcotes et/ou de vagues par exemple, ou des critères environnementaux prenant en compte les conséquences du phénomène sur le littoral... L'idéal serait de pouvoir trouver l'analogue « jumeau parfait » quelle que soit la perspective envisagée. Mais, est-ce possible ? Les conséquences à la côte ne peuvent être exploitées du fait de la non-stationnarité des enjeux implantés sur le littoral ; seuls les paramètres physiques peuvent permettre d'identifier ces analogues. Cependant, les seuls points de comparaison précités ne se recoupent généralement pas ; ainsi, malgré une trajectoire quasi-similaire, deux tempêtes pourront présenter des niveaux de pression tout à fait différents (ou, sur un autre plan, avoir des impacts sur la côte non comparables). À titre d'exemple, les centres dépressionnaires associés aux deux tempêtes du 08 décembre 2006 et du 28 février 2010 ont des parcours très proches dans un domaine réduit centré sur la région (Fig. 1). Cependant, les pressions relevées le 28 février (~970 hPa) sont plus basses que celles observées le 8 décembre (~975 hPa). En termes de pression (valeurs, tendances et gradient), la tempête du 13 février 1972 serait plus ressemblante à la tempête du 28 février 2010.

Trajectoires des tempêtes

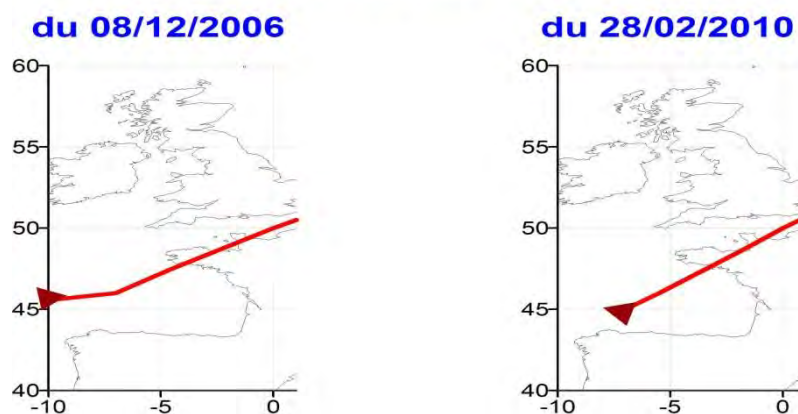


Figure 1. Trajectoires quasi-similaires sur la région des tempêtes du 8 décembre 2006 et du 28 février 2010 (Xynthia) sans que pour autant ces tempêtes soient des « analogues » (Météo-France)

Un autre axe de travail serait de corrélérer des événements météorologiques du point de vue de leur impact hydrodynamique. Les événements tempétueux de l'hiver 2013 ont eu des impacts

sévères à la côte, notamment sur le trait de côte. Sommes nous capables d'identifier des événements passés similaires du point de vue des niveaux et surcotes ? Un résultat préliminaire a identifié la tempête du 01 au 03 février 2014. Les critères de recherche de ressemblance d'une tempête marine ont été définis selon (i) son existence dans la typologie des tempêtes météorologiques du projet, (ii) l'extension spatiale de la zone touchée et (iii) les conditions de marée entre vive-eau et morte eau. Les résultats indiquent qu'en termes d'extension spatiale de la zone touchée, cette tempête se rapproche de celle des 10 et 11 mars 2008 (tempête Johanna), qui s'est produite en condition de vive-eau équinoxiale moyenne (coefficient 106 à 96, respectivement de 114 à 106 pour le 01-03/02/2014). Cependant, ces deux tempêtes diffèrent du point de vue des hauteurs d'eau atteintes qui étaient bien supérieures à des périodes de retour de 20 ans en Bretagne et Manche occidentale lors de l'événement du 10 mars 2008 en raison de pics de surcotes d'amplitude plus élevée. Par ailleurs, en termes de conditions de marée, la tempête du 30 mars 2006, également survenue en conditions de vives-eaux équinoxiales, s'apparente à la tempête du 1^{er} février 2014 : les hauteurs d'eau sont supérieures à la PHMA sur la quasi-totalité du littoral mais les surcotes observées sont, elles, faibles. De plus, pour la tempête du 1^{er} février 2014, le maximum de surcote n'a par été concomitant avec la pleine mer.

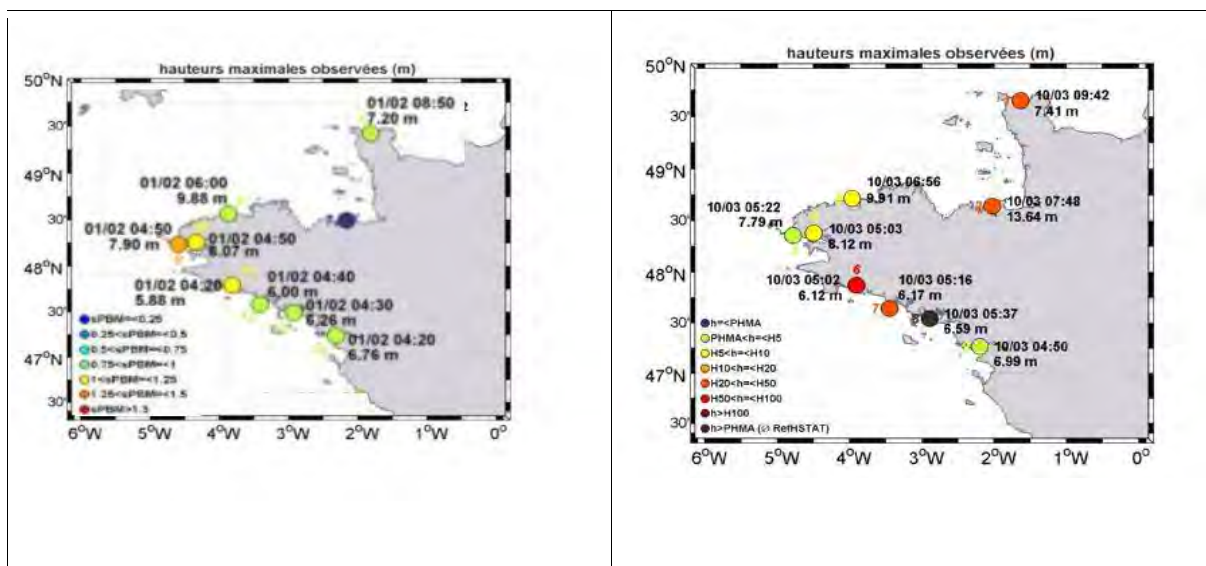


Figure 2. Hauteurs maximales atteintes et périodes de retour pour la tempête du 1^{er} février 2014 (à gauche) et du 10 mars 2008 (à droite) (Source : SHOM – projets VIMERS et NIVEXT)

4. Conclusion

L'exercice mené jusqu'à présent par les trois partenaires s'est contenté de juxtaposer les approches permettant d'inventorier et de caractériser le plus précisément possible les tempêtes du littoral breton, du seul point de vue météorologique, des niveaux marins engendrés ou des états de mer. Il montre que l'impact d'une tempête à la côte ne peut pas être expliqué par une approche unique et que la complexité des phénomènes nécessite que l'ensemble des paramètres soit étudié en même temps pour essayer d'approcher la définition d'un seuil de dangerosité. Les perspectives du projet permettront d'intégrer l'ensemble des paramètres produits dans une seule et même base de

données et d'essayer d'en tirer des enseignements. Aux paramètres déjà cités dans cet article, de nouveaux paramètres pourront être introduits pour tenir compte de l'interaction des phénomènes, par exemple le déferlement de la houle à la côte sur la surélévation du niveau marin, le nombre d'événements tempétueux enregistrés dans la saison, l'extension de la zone impactée, etc. Cette meilleure connaissance des phénomènes permettra de définir des scénarii fictifs extrêmes mais réalistes. Ils seront alors simulés grâce aux chaînes de calcul à disposition des trois partenaires et donneront de nouvelles conditions hydrodynamiques en proche côtier qui pourront être exploitées pour évaluer la vulnérabilité des territoires côtiers bretons dans une prochaine phase du projet à débiter en 2015.

Remerciements : L'équipe-projet remercie la DREAL et la Région Bretagne qui soutiennent financièrement le projet et sont fortement impliquées dans son pilotage. EDF R&D et l'IRSN permettent d'assurer la qualité du projet ; ils seront plus amplement associés dans les suites envisagées en phase 2. Le projet NIVEXT (SHOM-DGPR) a permis d'identifier des niveaux historiques remarquablement hauts exploités dans VIMERS.

Références bibliographiques :

- Bessemoulin P. (2002). Les tempêtes en France. *Annales des Mines*, p. 9-14.
- Goutx D., Baraer F., Roche A., Jan G. (2014). Ces tempêtes extrêmes que l'histoire ne nous a pas encore dévoilées. *Revue La Houille Blanche*, n°2 [DOI 10.1051/lhb/2014013].
- Kergadallan X., Sanquer R., Le Berre A., Amis G. (2012). *Fiches synthétiques de mesure des états de mer*. Cetmef, février 2012.
- MEDDTL (2011a). *Évaluation préliminaire des risques d'inondation du bassin Loire-Bretagne*. DREAL Centre – Bassin Loire-Bretagne.
- MEDDTL (2011b). *Évaluation préliminaire des risques d'inondation 2011. Bassin Seine-Normandie*. DRIEE Ile-de-France – Bassin Seine-Normandie.
- Roche A., Baraer F., Le Cam H., Madec T., Gautier S., Jan G., Goutx D. (2014, à paraître). Projet VIMERS : une typologie des tempêtes bretonnes pour prévoir l'impact des tempêtes à venir et mieux s'y préparer. *Actes du colloque XIII^{èmes} Journées nationales Génie Côtier – Génie Civil 2014*, Dunkerque, France.
- SHOM-Cetmef (2012). *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)*. SHOM.
- Simpson R.H., Riehl, H. (1981). *The hurricane and its impact*. Louisiana State Univ. Press, Baton Rouge, 398 p.

Réseau Tempête Languedoc-Roussillon

Une démarche régionale pour mieux appréhender les tempêtes marines et leurs impacts sur le littoral

Ywenn De la Torre¹, Yann Balouin¹, Hugues Heurtefeux², Provence Lanzellotti², Bénédicte Guérinel³, Philippe Dufresne³, Catherine Garcia³

1. BRGM – Direction Régionale Languedoc-Roussillon

1039, rue de Pinville - 34000 Montpellier, France

y.delatorre@brgm.fr ; y.balouin@brgm.fr

2. EID-Méditerranée - Direction Technique littorale

165, av. Paul Rimbaud - 34184 Montpellier Cedex 4, France

hheurtefeux@eid-med.org ; planzellotti@eid-med.org

3. Direction Régionale de l'Environnement, l'Aménagement et du Logement

Division Risques Naturels et Littoral

520, allée Henri II de Montmorency - 34064 Montpellier, France

Benedicte.Guerinel@developpement-durable.gouv.fr ; Philippe.dufresne@developpement-durable.gouv.fr ; Catherine.garcia@developpement-durable.gouv.fr

RESUME.

Dans un contexte de forte vulnérabilité du littoral face aux tempêtes, les données historiques constituent une information cruciale pour la prévention des risques et des dommages. Le Réseau Tempête a pour objectif de mutualiser et homogénéiser les données d'observation issues des démarches de suivi existantes à l'échelle régionale. Il s'appuie pour cela sur un réseau partenarial permettant de faire remonter des observations sur 42 sites spécifiques de la région. Un protocole d'intervention progressif a été défini en fonction de seuils de hauteur significative des vagues. De manière à anticiper un évènement, un message automatique basé sur un modèle prévisionnel de la houle est envoyé 3 jours à l'avance aux partenaires. Les observations collectées sont partagées sur une base de données en ligne. Le dispositif a démarré en 2011 et a permis de caractériser précisément les impacts des tempêtes et leur variabilité spatiale.

ABSTRACT. In a context of strong coastal vulnerability against storms, historical data is crucial information for the prevention of risks and damages. The Storm Network aims to pool and standardize monitoring data from existing regional initiatives. It relies on a network of partners monitoring 42 specific sites in the region. A protocol of progressive mobilization was defined according to thresholds of significant wave height. In order to anticipate an event an automatic message based on a swell forecast model is sent 3 days in advance to partners. The collected observations are shared on an online database. The program was launched in 2011 and has accurately characterized the impacts of storms and their spatial variability.

MOTS-CLES : tempêtes, risques côtiers, érosion, submersion, impacts, dommages, données historiques, observations, base de données

KEYWORDS: storms, coastal risks, erosion, marine inundation, impact, damages, historical data set, monitoring, data base.

1. Introduction

Le littoral du golfe du Lion consiste en une plaine côtière composée essentiellement d'une succession de lagunes, marais maritimes, de plages et de dunes. Afin de promouvoir le tourisme et les activités littorales, le gouvernement français a fortement développé l'urbanisation dans les années 1960. Il en résulte aujourd'hui un accroissement de la vulnérabilité du littoral face aux événements météo-marins extrêmes. Les tempêtes marines majeures (1982, 1997 et 2003) ont illustré ce phénomène avec d'importants dégâts sur les infrastructures portuaires, touristiques et urbaines.

Dans ce contexte, l'information historique sur les événements de tempêtes est une donnée de référence cruciale pour la caractérisation des risques côtiers et la prévision de leurs impacts. En effet, la connaissance des tempêtes et de leurs impacts morphologiques et/ou socio-économiques constitue la donnée de base indispensable pour des applications telles que l'amélioration de la connaissance sur les évolutions actuelles et futures du littoral, la caractérisation fine des aléas érosion et submersion marine pour la prévention des risques côtiers, ou encore l'évaluation de l'efficacité et de la durée de vie des aménagements de protection mis en place.

Or, le constat est fait aujourd'hui que cette donnée historique reste difficilement accessible et utilisable en raison de sources très diverses, de dispositifs de suivi peu comparables, voire de portions littorales non couvertes. Il s'avère donc nécessaire de mutualiser et d'homogénéiser les démarches existantes en matière de suivi des tempêtes et de leurs impacts et de les généraliser sur l'ensemble du littoral de la région Languedoc-Roussillon en s'appuyant sur la mise en réseau des organismes et services administratifs concernés.

Afin de répondre à cet objectif, le BRGM coordonne la mise en œuvre opérationnelle d'un « Réseau Tempête » de surveillance des tempêtes et de leurs impacts dans le cadre des « Etudes stratégiques et prospectives sur l'évolution des risques littoraux » du volet « Gérer durablement le Littoral » du Contrat de Projet Etat-Région (CPER 2007-2013).

2. Mise en œuvre opérationnelle

2.1. Le réseau partenarial

La région Languedoc-Roussillon bénéficie de multiples projets ou institutions engagés sur la gestion du littoral, en particulier sur la problématique de l'érosion côtière liée aux tempêtes. Des observations sont ainsi réalisées à chaque événement mais il reste difficile d'accéder aux données résultantes car, quand elle existe, l'information est disséminée et peu ou pas comparable.

Plutôt que de refaire un travail déjà réalisé, l'objectif du projet est de s'appuyer sur les initiatives existantes dans les divers organismes et d'assurer la mutualisation et l'homogénéisation des démarches et des données. Pour ce faire, le projet a été initié en envoyant un questionnaire aux institutions de la région afin de savoir quel type d'observation était réalisé et s'ils seraient intéressés pour participer à une démarche régionale.

Sur cette base un premier groupe de partenaires a été identifié. Il a été délibérément limité afin de simplifier le processus au démarrage. Ainsi, les services déconcentrés de l'Etat et les « grosses »

collectivités (Intercommunalités, Départements, Région) ont été privilégiés. A ce stade, le Réseau Tempête est composé :

- d'organismes scientifiques et techniques (BRGM et EID-Méditerranée)⁶ ;
- de services déconcentrés de l'Etat (DREAL LR, DDTM 30/34/11/66)⁷ ;
- de collectivités (CG34 ; CABM, CAHM, PMCA, Thau Agglo)⁸.

Ce partenariat a été formalisé par une convention d'objectif partagé qui ne porte pas d'obligation de moyens humains ou financiers mais qui formalise la volonté de ces organisations de collaborer et précise les modalités de mise en œuvre et le rôle de chacun, dont l'animation par le BRGM.

2.2. Zone d'étude et protocole de suivi

La zone d'application du Réseau Tempête concerne l'ensemble du littoral du Languedoc-Roussillon. Cette zone côtière est caractérisée par sa forte vulnérabilité aux tempêtes comme décrit par Balouin *et al.* (2009) et Jimenez *et al.* (2009). De nombreux impacts ont été observés sur les dernières décennies : franchissement et bréchification des lidos (plages barrières), érosion des plages et des dunes, dégâts sur les infrastructures côtières.

Le contexte hydrodynamique est modéré avec la plus haute marée astronomique observée de 0.40m et une hauteur significative des vagues (Hs) de 0.70m en moyenne. En période de tempête, la Hs dépasse les 3 m et peut atteindre 7m (à 30 m de profondeur). La période de retour annuel de Hs est de l'ordre de 4.3m. Le climat de vague est dominé par un régime de Sud-Est. Les vagues associées à une tempête représentent 3.5% des occurrences et arrivent à 77% de secteur ESE, alors que les tempêtes de Sud sont moins fréquentes (16%). Les tempêtes les plus importantes sont générées par des conditions météorologiques associées à de profondes dépressions barométriques en provenance de l'Atlantique (Balouin *et al.*, 2011). Les tempêtes sont pour la plupart associées à un vent de mer qui génère des surcotes marines pouvant atteindre +0.85m (Ullmann, 2007).

Une analyse historique des tempêtes et de leurs impacts associés a été réalisée par Gervais *et al.* (2012) dans le cadre du projet FP7 MICORE⁹ afin d'estimer les seuils liés à des impacts sur les morphologies côtières. La comparaison des évolutions morphologiques littorales et des indicateurs d'impact (brèche, franchissement, mobilité dans le profil des barres d'avant-côte, érosion dunaire, submersion, destruction de route, etc.) avec des caractéristiques de tempête (pression, vent, Hs, énergie totale des vagues, niveau de la mer, surcote marine, run-up¹⁰) montre que, dans cet environnement à faible marée, le paramètre Hs est l'indicateur le plus directement corrélé aux impacts. Sur la base de cette analyse, une estimation des seuils morphologiques a été réalisée, en prenant ne compte la variabilité de l'exposition aux vagues de tempêtes dominantes :

⁶ Bureau des Recherches Géologiques et Minières ; Entente Interdépartementale de Démoustication.

⁷ Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement du Languedoc-Roussillon ; Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Gard, de l'Hérault, de l'Aude et des Pyrénées Orientales.

⁸ Conseil Général de l'Hérault ; Communauté d'Agglomération de Béziers Méditerranée ; Communauté d'Agglomération Hérault Méditerranée ; Perpignan Méditerranée Communauté d'Agglomération ; Communauté d'Agglomération du Bassin de Thau.

⁹ Morphological Impacts and Coastal Risks induced by Extreme storm events

¹⁰ Niveau maximal atteint par la mer sous l'effet du jet de rive.

- $3\text{ m} < H_s < 4\text{ m}$: mobilité de morphologies et inondation partielle de la plage ;
- $4\text{ m} < H_s < 5\text{ m}$ (soit une tempête d'occurrence annuelle) : inondation de la plage et érosion du front dunaire ;
- $> 5\text{ m}$: franchissement dans les zones basses faisant face à la houle.

Un protocole d'observation a été défini sur la base de ces seuils afin de regrouper les informations physiques pendant ou après l'évènement. Les 3 niveaux d'interventions sont les suivants (Figure 1) :

- Niveau 1 : « suivi léger » avec collecte des enregistrements de réseaux de mesures (stations météorologiques, houlographes, marégraphe, stations vidéo) ;
- Niveau 2 : « suivi amélioré » avec en sus des indicateurs de seuil 1, une collecte rapide d'observations de terrain (formulaire de terrain, photos dites de « points fixes » et points GPS « à main ») ;
- Niveau 3 : « suivi complet » avec en sus des indicateurs de seuil 2 une collecte de sorties de modèle de surcote et de houle (run-up) et des levés de terrain complémentaires (photographies aériennes obliques géoréférencées et levés topo-bathymétriques).

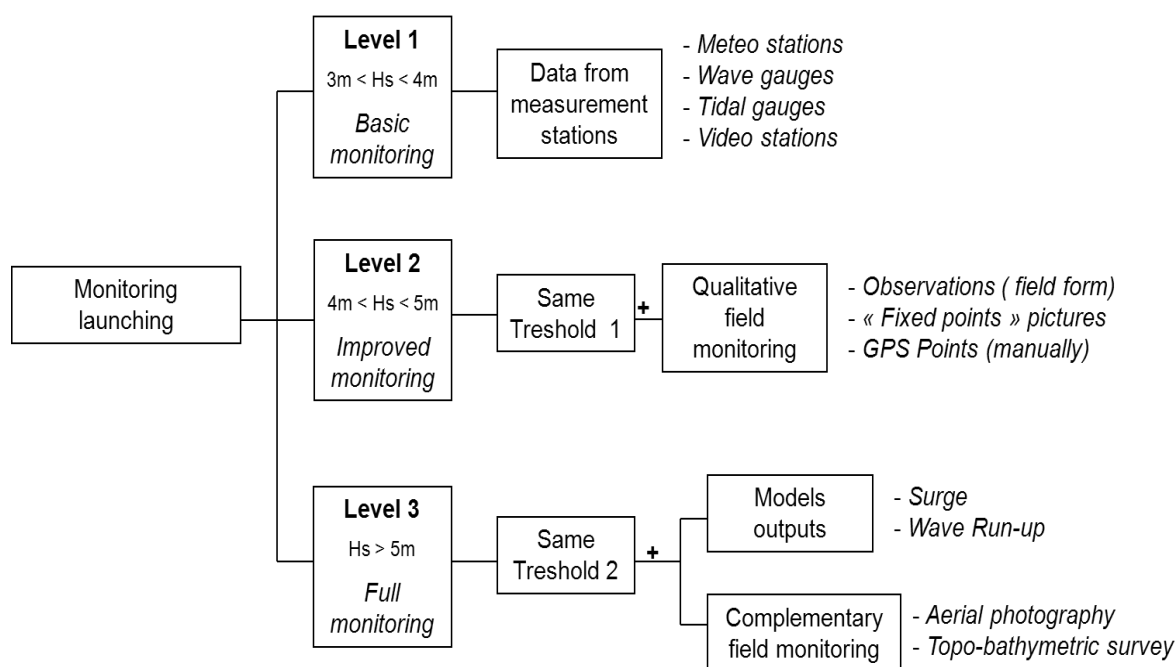


Figure 1. Protocole d'observation basé sur trois niveaux d'intervention en relation avec la hauteur significative des vagues pendant une tempête

Les suivis sont réalisés sur des points d'observations spécifiques (appelés « Points fixes ») qui doivent être visités pendant (si possible) ou après la tempête. En tout ce sont 42 Points fixes qui couvrent l'ensemble du littoral régional et sont répartis par organismes (Figure 2). Ces Points fixes ont été sélectionnés en fonction de leur exposition connue aux aléas marins ou en raison d'un projet

d'aménagement (implantation d'ouvrages de protection, programme de rechargement, etc.). Ils concernent des côtes naturelles (lidos en particulier) mais aussi des fronts de mer urbains et des secteurs portuaires.

Afin d'obtenir une information homogène, les opérateurs du réseau utilisent un formulaire de terrain. Ils y retranscrivent leurs observations des indicateurs d'évolution morphologiques et d'impacts (laisse de mer, brèche, franchissement, dommages dans les ports ou sur les fronts de mer, etc.). Ces indicateurs sont volontairement simples afin de pouvoir être réalisés par un opérateur non-spécialiste qui peut être aisément remplacé. En plus du formulaire, des photographies panoramiques sont prises toujours selon les mêmes directions et sur les mêmes emprises afin de comparer les évolutions de paysage d'une date à l'autre. Des impacts précis peuvent être géolocalisés au moyen d'un GPS à main.

Pour anticiper un évènement et préparer l'intervention des opérateurs, un modèle opérationnel de prévision des vagues est utilisé (WW3¹¹). Lorsque les seuils définis sont atteints, un email automatique est envoyé trois jours à l'avance à la cinquantaine de correspondants du réseau. La prévision est suivie sur quatre positions le long du golfe du Lion afin de distinguer la portion du littoral régional la plus exposée. Ces quatre positions correspondent à la localisation des houlographes gérés par la DREAL (Espiguette, Sète, Leucate, Banyuls) afin d'évaluer la qualité des prévisions par rapport à la mesure réelle. Le message envoyé ne constitue pas une alerte météorologique, dont Météo-France a la charge.

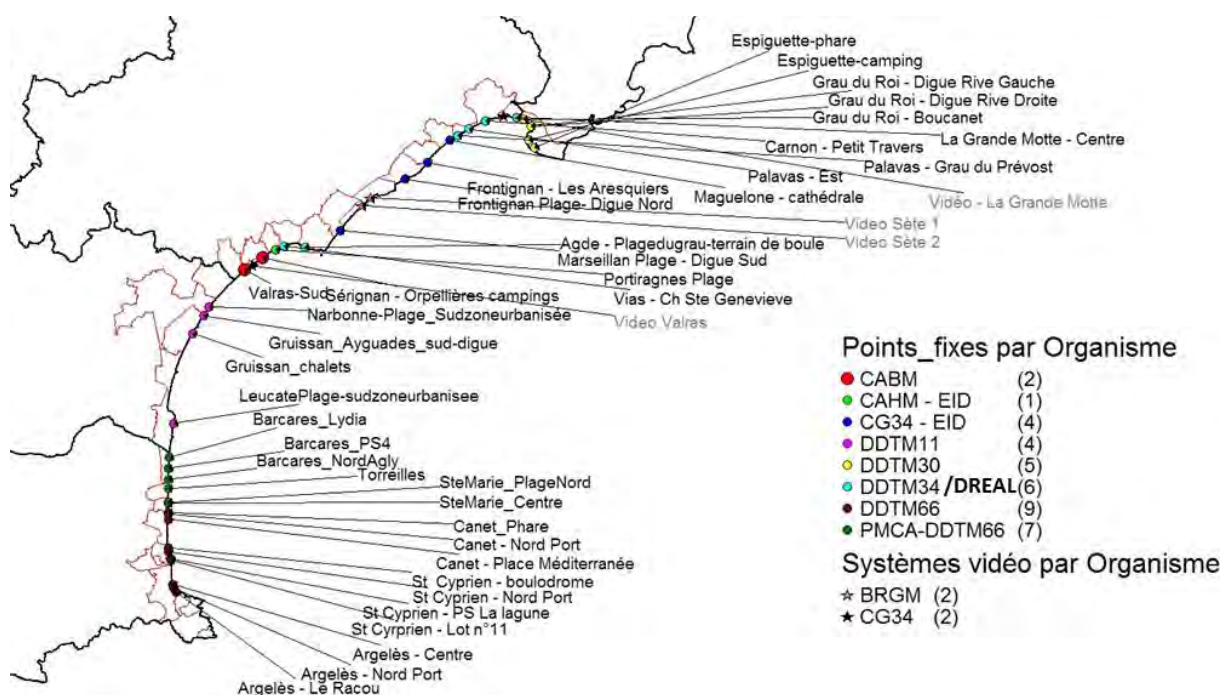


Figure 2. Localisation des « Points fixes » et des stations vidéo suivis par le Réseau Tempête.

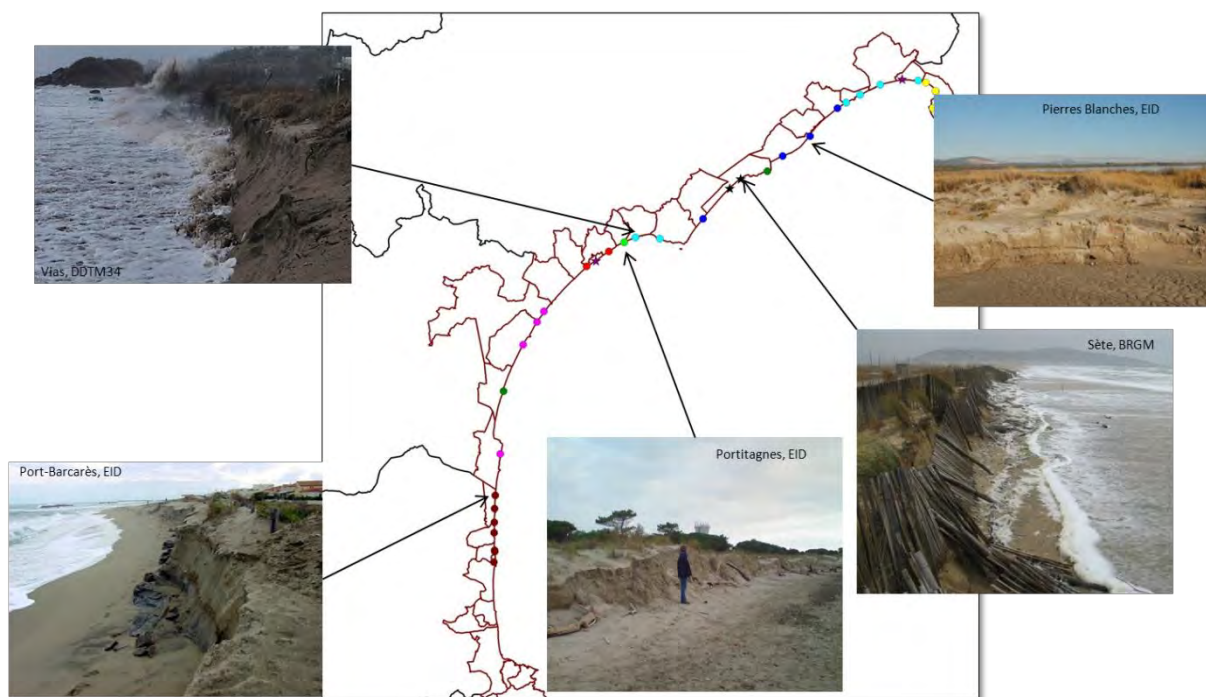
¹¹ Wave Watch 3 (sorties des Puertos del Estado - <http://www.puertos.es>).

Les observations sont mutualisées via une base de données en ligne accessibles sur le site internet du CPER Littoral¹². Un formulaire en ligne permet aux opérateurs désignés (mot de passe) de saisir les informations et de télécharger les photographies. Des fiches récapitulatives sont ensuite automatiquement générées et classées par date. Des données historiques de 1942 à 2008 issues du projet MICORE ont également été migrées vers cette base de données afin de l'enrichir.

3. Résultats

Le Réseau Tempête a démarré en octobre 2011 et a couvert trois « périodes tempétueuses » s'étalant approximativement d'octobre à avril (2011-2012 ; 2012-2013 et 2013-2014). Sur ces trois périodes suivies, il y a eu pour chaque période entre 3 et 5 tempêtes de niveau 1 et 1 tempête de niveau 2 (occurrence annuelle) mobilisant les agents sur le terrain (De la Torre *et al.*, 2012 ; De la Torre *et al.*, 2013).

La période 2012-2013 a été la plus active avec six activations du réseau dont cinq fois pour une tempête de niveau 1 et une fois, le 05 mars 2013, pour une tempête de niveau 2 annoncé (mais niveau 3 mesuré). Cette tempête a été la plus importante connue depuis octobre 2011. De secteur Est, elle a concerné l'ensemble de la région avec une Hs allant de 4 à 6 m pendant 3 jours et des vents avoisinant les 35 nœuds. Les niveaux d'eaux ont atteint la cote 1m NGF à Sète, incluant une surcote de 50 cm. De la même manière que pour la tempête du 05 mars 2013, les



¹² <http://littoral.languedocroussillon.fr/suivi-des-tempetes-et-de-leurs-impacts.html>

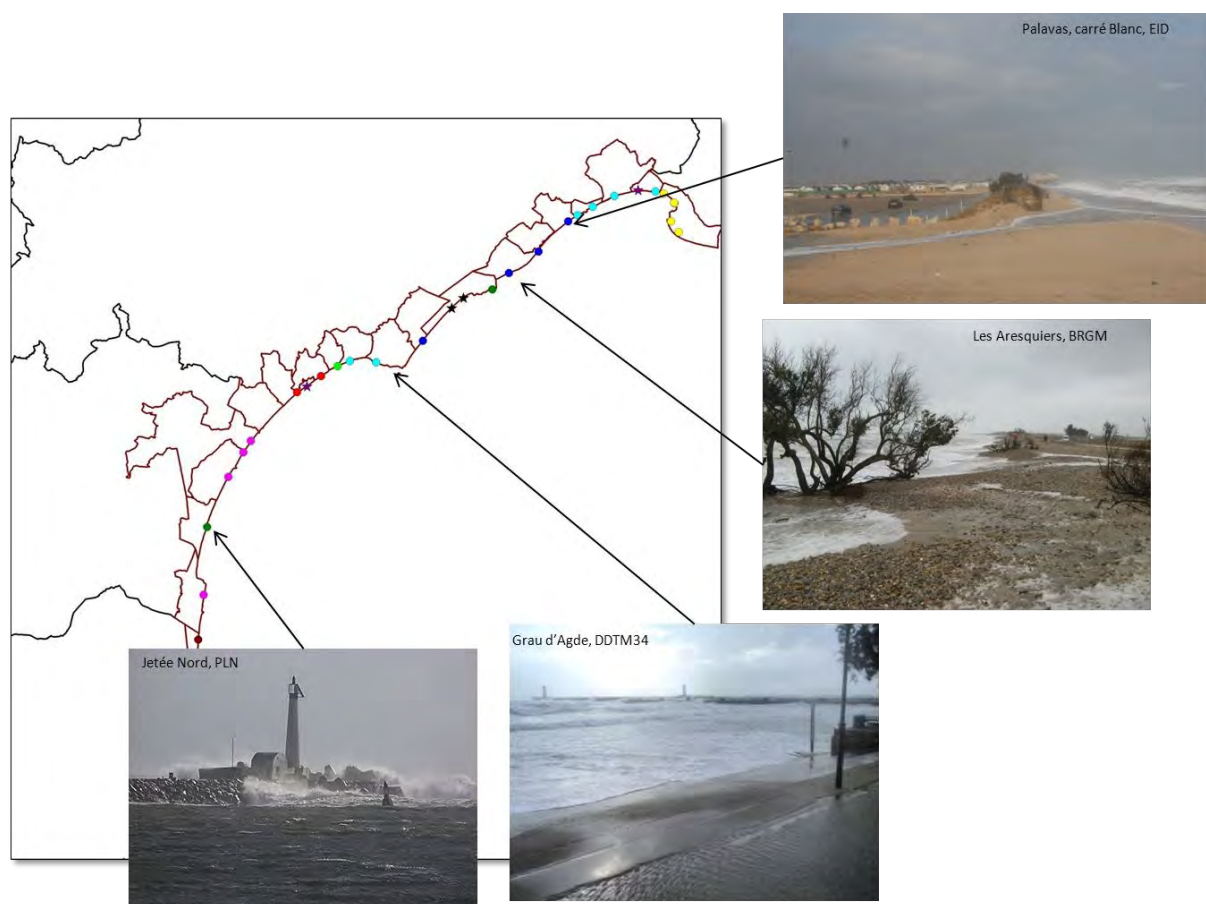


Figure 3. Exemples de localisation des impacts de la tempête d'octobre 2011 sur le littoral du Languedoc-Roussillon : érosion de plage et de dune (haut) et submersion par franchissement et débordement (bas)

caractéristiques des différentes tempêtes ont été renseignées afin de pouvoir les comparer dans l'espace et dans le temps.

Les impacts sur les morphologies côtières et sur les aménagements ont également été documentés pendant ces 3 périodes. Ils se manifestent le plus souvent par une érosion importante des formations sableuses (plages et dunes), des submersions par débordement et franchissement des lidos et promenades de front de mer ainsi que des dégradations des aménagements légers (ganivelles), du mobilier urbain, voire la déstabilisation ponctuelle d'ouvrages de protection (brise-lame, jetée portuaire). 3 victimes ont été à déplorer et des déplacements de population importants (estimés à 1 millier de personnes) ont dû être entrepris en mars 2013 suite une concomitance avec une crue dans le bassin de l'Agly (Pyrénées Orientales). Les informations collectées permettent de dresser des bilans détaillés (mais non nécessairement exhaustifs) à l'échelle d'une ou plusieurs tempêtes et de localiser les dommages (Figure 3).

En termes de retours d'expérience sur la mise en œuvre du réseau, la mobilisation des partenaires a été très bonne sur l'ensemble des tempêtes de niveau 2, chacun ayant pu se déplacer

ou se faire remplacer sur le terrain. Par contre, dans certains cas, la remontée d'information est parfois assez tardive ou incomplète (seulement le formulaire ou les photographies). Pour les tempêtes suivies, les prévisions semblent globalement sous-estimer les tempêtes avec une incidence importante. Outre la Hs, la durée de l'évènement et la succession d'évènements de moindre ampleur sont également à prendre en compte car des impacts non négligeables y sont associés.

4. Bilan et perspectives

Un fait notable du projet consiste dans sa démarche « participative » en s'appuyant sur des initiatives existantes et en ne finançant que le développement des outils spécifiques (message automatique, base de données en ligne) et l'animation du réseau. Ce coût limité compte-tenu de l'importance du dispositif devrait garantir la pérennité du projet dans le cadre du CPER 2014-2020. A l'avenir, le réseau pourrait s'étoffer et accueillir de nouveaux sites et de nouveaux partenaires. Par ailleurs, des traitements complémentaires de la base de données sont envisagés afin de restituer automatiquement des indicateurs statistiques et géographiques et mieux valoriser la richesse de son contenu.

Ainsi, cette base de données constitue un outil très utile afin d'appréhender l'occurrence et la variabilité spatiale des tempêtes et des impacts. Cette information, en particulier à l'échelle régionale, est actuellement la principale limite pour mettre en œuvre une modélisation morphologique pendant les tempêtes (Von Dongeren *et al.*, 2009). Grâce à cette connaissance des impacts en termes d'érosion, de submersions et de dommages pour une tempête spécifique, il sera plus aisé de valider les modèles et de développer des systèmes d'alerte.

Remerciements

Le Réseau Tempête fait partie du volet Littoral du Contrat de Plan Etat-Région 2007-2014 du Languedoc-Roussillon. Les auteurs sont reconnaissants à l'ensemble des participants et contributeurs du projet.

Bibliographie citée

- Balouin Y., Belon R., Le Cozannet G. and Gervais M. (2009). *Historical storminess along the french mediterranean coastline*. In: *Review of climate change impacts on storm occurrence*. Ferreira, O., Voudoukas, M. and Ciavola, P., Eds. MICORE Report D1.4.
- Balouin Y., De La Torre Y. And Tirard E. (2011). *Les tempêtes marines sur le littoral du Languedoc-Roussillon – Caractérisation et faisabilité d'un réseau de surveillance des tempêtes et de leurs impacts* – BRGM Report RP-59516-FR, 75 p (in french).
- Ciavola P., Ferreira O., Haerens, P., Van Koningsveld M. And Armaroli C. (2011). Storm impacts along European coastlines. Part 2: lessons learned from the MICORE project – *Environmental Science and Policy*, 14(7):924-933.
- De la Torre Y., Balouin Y. (2012). *Mise en œuvre opérationnel du « Réseau Tempête » sur le littoral du Languedoc-Roussillon*. BRGM Report RP-60694-FR ; 97 p (in french).
- De la Torre Y., Balouin Y., Morel O. (2013). *« Réseau Tempête » Languedoc-Roussillon : activité 2012-2013 et développement d'outils en ligne*. Rapport BRGM/RP-62731-FR.
- Gervais M., Balouin Y., and Belon R. (2012). Morphological response and coastal dynamics associated with major storm events along the Gulf of Lions coastline, France. *Geomorphology* 143-144:69-80.

- Jiménez J.A., Ciavola P., Balouin Y., Armaroli C., Bosom E. and Gervais M. (2009). Geomorphic coastal vulnerability to storms in microtidal fetch-limited environments: application to NW Mediterranean & N Adriatic Seas. *Journal of Coastal Research*, SI 56 (Proceedings of the 10th International Coastal Symposium, Lisbon, Portugal), 1641-1645.
- Van Dongeren A., Bolle A., Voudoukas M.I., Plomaritis T., Eftimova P., Williams J., Armaroli C., Idier D., Van Geer P., Van Thiel de Vries J., Haerens Piet, Taborda Rui, Benavente J., Trifonova E., Ciavola P., Balouin Y., Roelvink D. (2009). Micore : Dune erosion and overwash model validation with data from nine european field sites. *Coastal Dynamics 2009* proceedings, paper 182.
- Ullmann A., Moron V. (2007). Weather regimes and sea level variation over Gulf of Lions (French Mediterranean Coast) during the 20th century. *Int. J. Climatol.* (DOI: 10.1002/joc.1527).

L'aléa submersion marine sur la rive interne du Bassin d'Arcachon : exposition actuelle, cartographie prévisionnelle et capacité d'atténuation par la restauration des marais salés

Frédéric Bertrand¹, Lydie Goeldner-Gianella², Brice Anselme², Paul Durand², Yves-François Thomas³, Aldo Sottolichio⁴, Nadia Sénéchal⁴

1. Géographie, UMR 8586 PRODIG, Université Panthéon-Sorbonne (Paris 4). 191 rue Saint-Jacques 75005 PARIS frederic.bertrand@paris-sorbonne.fr

2. Géographie, UMR 8586 PRODIG, Université Paris1-Panthéon-Sorbonne. 191 rue Saint-Jacques 75005 PARIS Lydie.Goeldner@univ-paris1.fr, Brice.Anselme@univ-paris1.fr, Paul.Durand@univ-paris1.fr

3. Géographie, UMR CNRS 8591 LGP, 1 place Aristide Briand 92195 MEUDON CEDEX- France thomas.yves-francois@wanadoo.fr

4. Océanographie, UMR CNRS 5805 EPOC, Université Bordeaux I. Avenue des Facultés - 33405 TALENCE CEDEX – France a.sottolichio@epoc.u-bordeaux1.fr, n.senechal@epoc.u-bordeaux1.fr

ABSTRACT.

The BARCASUB research programme dealt with coastal flooding risk in the Arcachon Basin (France) and with the possible management of this risk through a soft defense preventive measure: "de-polderisation". The article doesn't describe the whole aspects of the programme. It only presents the assessment method used the following steps that we have followed: (1) characterization of water levels during Klaus and Xynthia storm events, (2) evaluation of extremely high water levels in front of seewall based on different storm and sea level rise scenarios, (3) modelling extreme sea level ashore, (4) analysis of sediment accretion and vegetation dynamics in "depolderized" areas.

RESUME.

Le programme BARCASUB a porté sur le risque de submersion marine à l'intérieur du bassin d'Arcachon (France) et sur la gestion potentielle de ce risque par une mesure souple de défense : la "dépoldérisation". La communication détaille les méthodes suivies et les résultats obtenus aux différentes étapes de la méthode d'évaluation de la submersibilité: (1) détermination de la hauteur du plan d'eau lors des épisodes tempétueux Klaus et Xynthia, (2) évaluation des niveaux d'eau extrêmes au front des digues de mer en fonction de plusieurs scénarios de tempête et d'élévation du niveau marin, (3) modélisation des niveaux extrêmes « à terre », (4) suivi de l'accrétion sédimentaire et de la dynamique végétale dans les zones dépoldérisées.

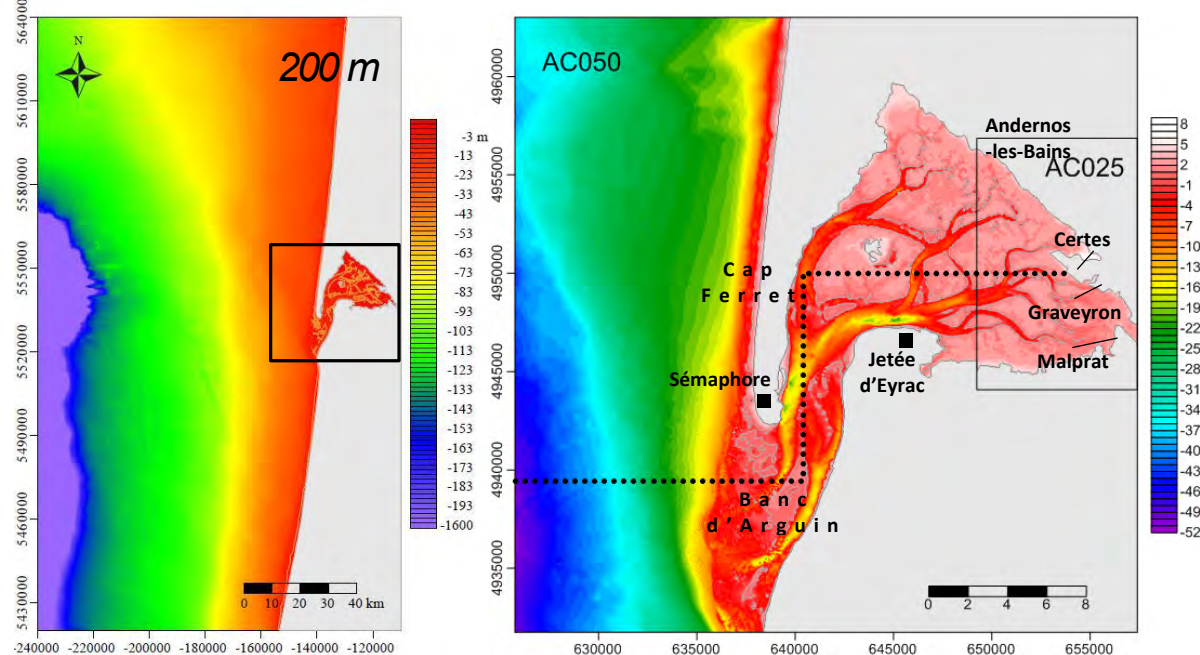
KEYWORDS : coastal flooding, de-polderisation

Mots-clés : submersion, aléa, modélisation, accrétion sédimentaire, végétation, atténuation.

forçages océaniques au large. Avant d'entamer toute réalisation relative à la *tempête horribilis*, il convient de tester le modèle par la simulation rétrospective des tempêtes Klaus et Xynthia. Si la méthode est validée, nous pourrions modéliser la forte tempête que l'on aura conçue.

Le fond du Bassin d'Arcachon désigne la partie interne de cette lagune méso-tidale correspondant *grosso modo* à l'aire d'extension du delta de la Leyre liée au comblement lagunaire régressif de la vallée de la Leyre depuis 2 500 BP. (Bertrand, 2013). Le programme de recherches BARCASUB (2010-13) a porté sur le risque de submersion marine des rives endiguées de ce secteur et sur la gestion potentielle de ce risque par la technique de la "dépoldérisation" (Bertrand & Goeldner-Gianella, 2013). Le projet a associé cinq équipes - les UMR PRODIG, LGP, EPOC, le BRGM et l'EA PRISM - et quatre gestionnaires locaux du Conservatoire du littoral. Le programme de recherches BARCASUB a été mené en deux volets : le premier volet portait sur la submersibilité et sur la capacité d'adaptation des marais aux changements hydromorphologiques.

Le second volet du diagnostic a consisté à caractériser le phénomène générateur de danger d'une part au support, c'est-à-dire en terrain de la lagune jusqu'au défilage de la submersion au fond du bassin en tentant de préciser la contribution des différents facteurs aux surcotes extrêmes (pression, vent, vagues, jet de rive). Etant entendu que la houle ne rentre pas dans le bassin mais qu'il y a une zone de hauteurs d'eau à la côte. A partir de là, SWAN est capable de déterminer la transformation de la houle lors de sa propagation jusqu'au rivage et de configurer les bathymétries et morphologies de la lagune. Pour tenter de répondre à cette question, plusieurs simulations d'échelle rétrospectives pour les tempêtes Klaus (24/1/2009) et Xynthia (27-28/2/2010) puis prospectives, ont été effectuées en étudiant les variations du plan d'eau et les caractéristiques des vagues (Fig.2), le long d'un profil transversal dont l'extrémité distale est située devant la digue frontale du domaine de Certes (Fig.1).



Illustr. 46. Cartographie du Bassin d'Arcachon et de ses parages. Fig. 1 : Emprises des MNT emboîtés élaborés pour la modélisation des surcotes au fond du Bassin d'Arcachon. En pointillé, tracé du profil de variation de la surcote le long du rivage jusqu'au pied de la digue frontale du domaine de Certes.

¹⁹ URL : <http://www.swan.tudelft.nl/>

Le second volet du diagnostic de vulnérabilité visait à évaluer le potentiel de préservation des marais maritimes face à l'évolution du niveau moyen de la mer afin d'étudier le rôle des facteurs morpho-sédimentaires dans l'occurrence des submersions. Les besoins de connaissances sur la dynamique des marais ont conduit à développer deux approches complémentaires : des suivis stationnels de l'accrétion sédimentaire et de la biodiversité et une cartographie sectorielle détaillée des habitats, de façon à évaluer dans quelle proportion et selon quelles modalités la perte de marais salés en front de domaine endigué - consécutive à un renforcement de l'érosion - pouvait être compensée par la reconquête du schorre dans les marais dépoldérisés et régulièrement submergés.

2. Simulation rétrospective des niveaux d'eaux extrêmes au droit des domaines endigués

2.1. Les données utilisées

Un gros travail d'harmonisation des données existantes et d'amélioration de la précision des modèles bathymétriques existants grâce à l'intégration de données récentes LIDAR haute résolution (2005) a permis l'élaboration de 3 modèles bathymétriques emboîtés les uns dans les autres. Le premier MNT, de résolution 200 m, couvre le golfe de Gascogne jusqu'à environ 80 km au large (Fig.1). Le second, de résolution 50 m, englobe le bassin d'Arcachon. Le troisième, de résolution 25 m, recouvre la zone expérimentale du fond de la lagune. Ces MNT ont permis de procéder à une modélisation emboîtée de la propagation des houles depuis la première grille de résolution grossière jusqu'à la dernière de résolution la plus fine.

Pour les deux événements simulés, le modèle a été forcé avec les conditions de houle – hauteur significative, période et direction – issues du modèle Wavewatch III (WW-3) de la NOAA. Le vent appliqué sur l'ensemble des grilles est celui des modèles CFRS pour Klaus et GFS pour Xynthia, qui produisent des données selon un pas de temps de 3 heures et une résolution spatiale de 0,5°. Par rapport à un traitement statistique qui ne tiendrait compte que du vent maximal quotidien, le traitement d'une longue série (168.300 mesures allant du 1/1/1949 au 28/2/2010) tri-horaire de vent (direction et force) et de pression atmosphérique apporte une précision importante sur la fréquence et la durée des phénomènes combinés susceptibles de provoquer des submersions.

2.2. Modélisation des niveaux d'eau liés aux forçages océaniques lors des tempêtes passées

Le forçage océanique des niveaux d'eau a été calculé par l'utilisation du modèle SWAN et ses résultats discutés à la lumière d'une analyse des surcotes enregistrées par le marémètre d'Eyrac. Les résultats (Fig.2) montrent que la surélévation due aux vagues océaniques à l'entrée du bassin a été deux fois supérieure pour la tempête Klaus (0,58 m) que pour Xynthia (0,17 m), ce qui est logique compte tenu de la hauteur des houles modélisée (12 m vs 6 m) et en cohérence avec les hauteurs enregistrées au large du Cap Ferret, dans la zone couverte par la modélisation (H1/3 maximales de 11,3 m pour Klaus et de 5,05 m pour Xynthia). L'analyse des données marégraphiques montre que des surcotes allant jusqu'à 50 cm ne sont pas rares et reviennent tous les ans. Les surcotes d'au moins 80 cm sont moins fréquentes sans être exceptionnelles : une surcote de cet ordre survient en moyenne une année sur deux. On compte une surcote de plus d'1 m en 2008 et une autre en 2009. La corrélation très forte entre les pics de surcote horaire observés (1,79 m le 24/1/2009 à 08h00 et 0,86 m lors de Xynthia) et les valeurs de set-up simulées à Eyrac montre l'importance de ce

paramètre dans la détermination des niveaux extrêmes à l'entrée du bassin ainsi qu'au fond du bassin où les valeurs de *wave set-up* océanique simulées à Eyrac, respectivement 0,58 et 0,17 m ont été extrapolées¹³.

Pour déterminer les niveaux maxima atteints au fond du bassin nous avons additionné aux niveaux modélisés à l'entrée de la lagune, la différence entre les niveaux d'eau simulés par le code MARS entre Eyrac et Andernos, plus au nord du secteur étudié, soit 0.38 m (Mugica *et al.*, *op.cit.*). Cette valeur qui correspond à la surélévation due à la propagation de la marée météorologique (set-up barométrique + set-up du vent) a permis de déterminer, au droit des domaines de Certes et Graveyron, des niveaux d'eau extrêmes de 3,47 m et de 3,22 m NGF liés à des dépassements anormaux de niveaux d'eau de 1,72 m et 0,72 m lors des tempêtes Klaus et Xynthia. Ces niveaux d'eaux simulés apparaissent sensiblement plus bas que les niveaux d'eaux observés à proximité du domaine de Certes au cours des deux événements, l'altitude des laisses de mer (3.70 m NGF) déposées lors de Xynthia sur la digue de ceinture de Certes (Bertrand *et al.*, 2013) et de l'arase du muret (comprise 4.3 m et 3.94 m NGF) qui protège le quartier du Mauret à Andernos-les-Bains et n'a pas empêché sa submersion lors de Klaus (Mallet *et al.*, 2009). La surcote liée aux vagues océaniques ne suffit donc pas à rendre compte des dépassements anormaux de niveau d'eau et des risques de submersion associés dans le fond du bassin.

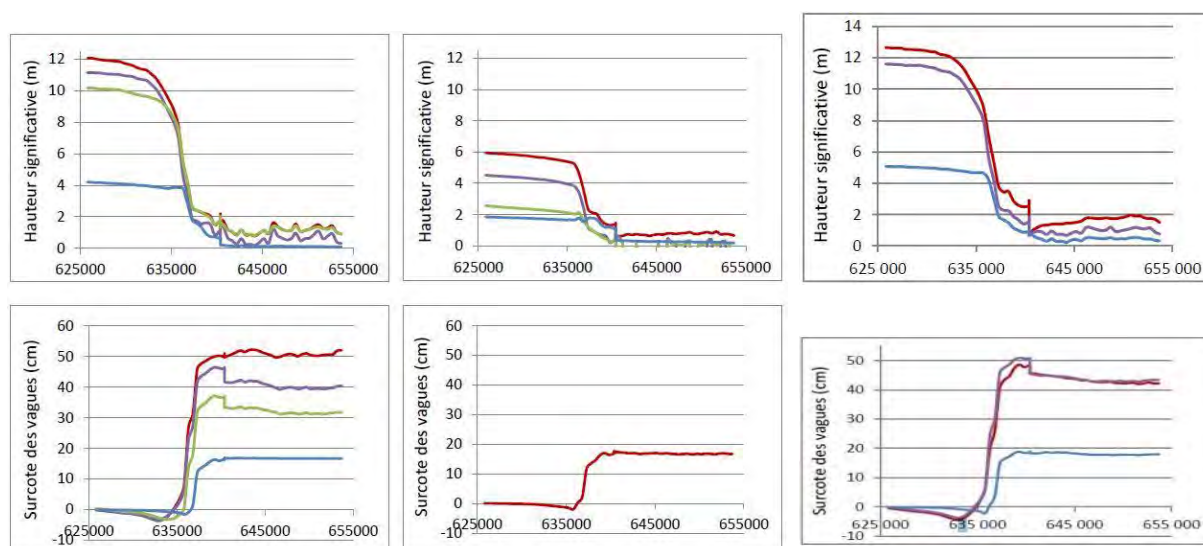


Fig. 2 : Variations des caractéristiques des vagues et de la surcote associée le long du profil transversal de la lagune (cf. Fig.1) lors des tempêtes Klaus (à gauche), Xynthia (au centre) et Horribilis pour une ENM de 25 cm (à droite). Les courbes rouges correspondent au pic des tempêtes, les violettes 3 heures avant le pic, les vertes 6 heures avant le pic et les bleues 9 heures avant le pic.

Afin de s'affranchir de l'influence des forçages océaniques, les conditions d'agitation du plan d'eau lors des tempêtes Klaus et Xynthia ont été reproduites en fermant artificiellement la lagune et

¹³ Le modèle SWAN n'étant pas conçu pour calculer le set-up des vagues en milieu semi-fermé, il a été considéré que le set-up modélisé à l'entrée du bassin restait le même dans toute la lagune, même si sa valeur devrait logiquement diminuer en raison de l'augmentation du rayon hydraulique liée à l'élargissement du bassin.

en n'utilisant qu'une seule grille, de résolution moyenne (50 mètres), limitée à l'Ouest par la flèche du cap Ferret et couvrant le bassin d'Arcachon. Le modèle a été forcé en entrée avec les mesures issues du sémaphore du Cap enregistrées aux pics des tempêtes, les hauteurs d'eau entrées étant celles enregistrées au marémètre d'Eyrac. Le modèle implanté a été validé par comparaison des données simulées aux mesures de vagues réalisées *in situ*, en décembre 2006 (Parisot *et al.*, 2008). La simulation du clapot lors des deux événements Klaus et Xynthia fait ressortir logiquement l'influence du niveau de marée sur le fetch et donc sur la formation des vagues. Pour autant, la morphologie de la lagune semble encore imposer sa marque sur la formation et la propagation du clapot à marée haute car l'analyse fait apparaître un axe préférentiel de formation de clapot orienté ouest-est, présent aussi bien au moment de la pleine mer de la tempête Klaus que deux heures avant celle de la tempête Xynthia, contraint dans les deux cas par la bathymétrie.

3. Modélisation prospective des niveaux d'eau extrêmes en fonction de scénarios catastrophes

3.1. Paramètres retenus pour la simulation des tempêtes horribilis

L'analyse statistique des données tri-horaires de vent n'ayant montré aucune tendance de variation significative depuis 1949, conformément aux analyses antérieures sur la façade atlantique de la France (Feuillet *et al.*, 2012), les paramètres de vents retenus (vitesse et direction) pour la simulation de la tempête horribilis (forçage océanique et clapot) sont ceux de la tempête Klaus au sémaphore du Cap-Ferret. Les paramètres retenus ont été les conditions météo-marines de la tempête Klaus au pic de tempête combinées avec les conditions de vive-eau similaires à celles survenues lors de la tempête Xynthia (coefficient de 102) ou légèrement inférieures (coefficient de 95) mais, en tout état de cause, propices à des niveaux de marée plus élevés que lors de la tempête Klaus (coefficient 58).

L'analyse des données marégraphiques sur la période 1967-2011 a montré une tendance à l'accroissement des niveaux maximaux annuels ($+1,26 \pm 0,26$ cm/an) ainsi que du niveau moyen de la mer ($+0,35 \pm 0,21$ cm/an). Toutefois, ces résultats n'étant pas significatifs en raison du caractère très lacunaire des enregistrements marégraphiques, ils n'ont pas été utilisés pour l'élaboration des scénarii de tempête horribilis pour lesquels ont été reprises in fine les valeurs recommandées de l'ONERC pour la prise en compte du changement climatique suivant les hypothèses pessimistes mais non extrêmes aux échéances de 2030 et 2050, soit respectivement $+ 0,14$ m et $+ 0,25$ m.

3.2. Analyse des forçages océaniques simulés lors d'une tempête horribilis à l'horizon 2050

Le profil utilisé est le même que celui ayant servi à décrire les tempêtes Klaus et Xynthia. Les courbes de variations de hauteur significative le long de ce profil présentent une évolution semblable aux tempêtes précédentes avec une augmentation jusqu'au pic de tempête (Fig.2). En revanche, contrairement au déroulement de Klaus, la surcote des vagues n'augmente pas progressivement, et survient entre une et trois heures avant le pic. Il ressort que l'élévation due à la houle est maximale au niveau des passes où les trains déferlent sur les bancs en avant du goulet, entraînant une surcote

de 0,45-0,50 m immédiatement en arrière des bancs, avant de se propager dans tout le bassin en diminuant légèrement de hauteur jusqu'au fond de la lagune où la surcote avoisine les 40 cm¹⁴.

A l'extrémité du profil, au niveau de la digue ouest du domaine de Certes, l'élévation due aux vagues, dans ce scénario catastrophe représente 20% de la surcote totale. Selon les scénarios envisagés, les niveaux extrêmes culmineraient entre 4,66m (Horribilis coef.95 + 0,14 m) et 4,87 m (Horribilis coef.102 + 0,25 m) au droit des polders. La hauteur des digues entourant les polders de la zone expérimentale ne dépassant pas 4,44 m NGF, les niveaux atteints au pic de la tempête horribilis, pour un scénario pessimiste mais non extrême d'élévation de la mer de 25 cm d'ici 2050, seraient suffisamment hauts pour inonder les polders par simple débordement des digues. Dans le prolongement de la course des vagues, les parties surélevées des domaines endigués (bosses, digues dormantes) seraient exposées au clapot et à son jet de rive, pourrait provoquer des submersions par franchissement et/ou ouverture de brèche. Ce phénomène s'est déjà produit le long des digues-arrières des pointes de Graveyron et de Malprat comme le montre de nombreuses encoches d'érosion récentes.

Finalement, les valeurs de niveaux d'eau retenues pour modéliser la propagation des submersion « terre », c'est-à-dire au-delà des digues frontales, sont celles qui parmi les scénarios modélisés se rapprochent le plus des conditions de submersion spécifiques au fond du bassin (hauteur maximale des digues frontales 4,44m) tout en présentant une probabilité d'occurrence relativement élevée (marée de coefficient 102), soit les valeurs 4,44 m et 4,69 m NGF.

3.3. Analyse du clapot associé à une tempête horribilis simulée

Les conditions d'agitation du plan d'eau ont été reproduites, comme pour les tempêtes Klaus et Xynthia, en fermant artificiellement la lagune et en n'utilisant qu'une seule grille, de résolution moyenne (50m). L'image résultante montre un renforcement et une homogénéisation du clapot avec des valeurs comprises entre 1,50 et 2,00 m quand bien même la direction des agitations n'est pas encore totalement uniforme. Celle-ci l'est beaucoup plus dans la simulation par modèles emboîtés (bassin ouvert) intégrant le forçage océanique où les vagues adoptent très nettement l'orientation de son vent générateur, qui souffle alors du NW. La confrontation des deux simulations – en situation de fermeture ou d'ouverture du bassin - suggère que l'élévation du niveau marin aura pour effet de libérer le clapot des contraintes de la bathymétrie lors de la conjonction de fortes tempêtes et de marées de vives eaux et donc de faciliter sa propagation en direction du fond du bassin.

3.4. Modélisation des niveaux extrêmes à terre

Ceux-ci ont dans un premier temps été estimés en faisant l'hypothèse d'un volume d'eau infini, ce qui revient à calculer le volume total sous le niveau de submersion modélisé, par simple soustraction au MNT. Les volumes obtenus ont ensuite été calés sur les enquêtes et relevés terrain effectués par le BRGM, juste après la tempête Xynthia. Pour les deux scénarios modélisés 4,44 m et 4,69 m, les volumes sont donc respectivement 11,25 millions de m³ et 13 millions de m³.

¹⁴ Dans l'étude précédemment menée sur le bassin d'Arcachon par le BRGM (Mugica *et al.*, op.cit.), la modélisation d'un même événement extrême combinant la houle et le vent de Klaus avec la marée de Xynthia ont simulé une surcote liée aux vague augmentant de 40 cm de l'entrée au fond du bassin.

Afin de propager l'eau à terre, le laboratoire PRODIG a développé un algorithme de propagation qui repose sur le principe des automates cellulaires, chaque cellule correspondant aux points Lidar. L'initialisation du programme est effectuée en spécifiant la hauteur d'eau issue des simulations du Labo. de géographie physique de Meudon que l'on souhaite propager à terre. Tant que le volume d'eau global calculé précédemment n'est pas nul, l'eau va se propager de proche en proche depuis la ligne de rivage, en fonction d'une règle qui prend en compte les différences de hauteur (altimétrie et hauteur d'eau) entre cellules voisines. La cartographie établie à partir de cet algorithme (Fig.3) présente une extension de la submersion marine à terre sur 935 ha dans le cas du scénario actuel et sur 1017 ha pour le scénario prospectif.

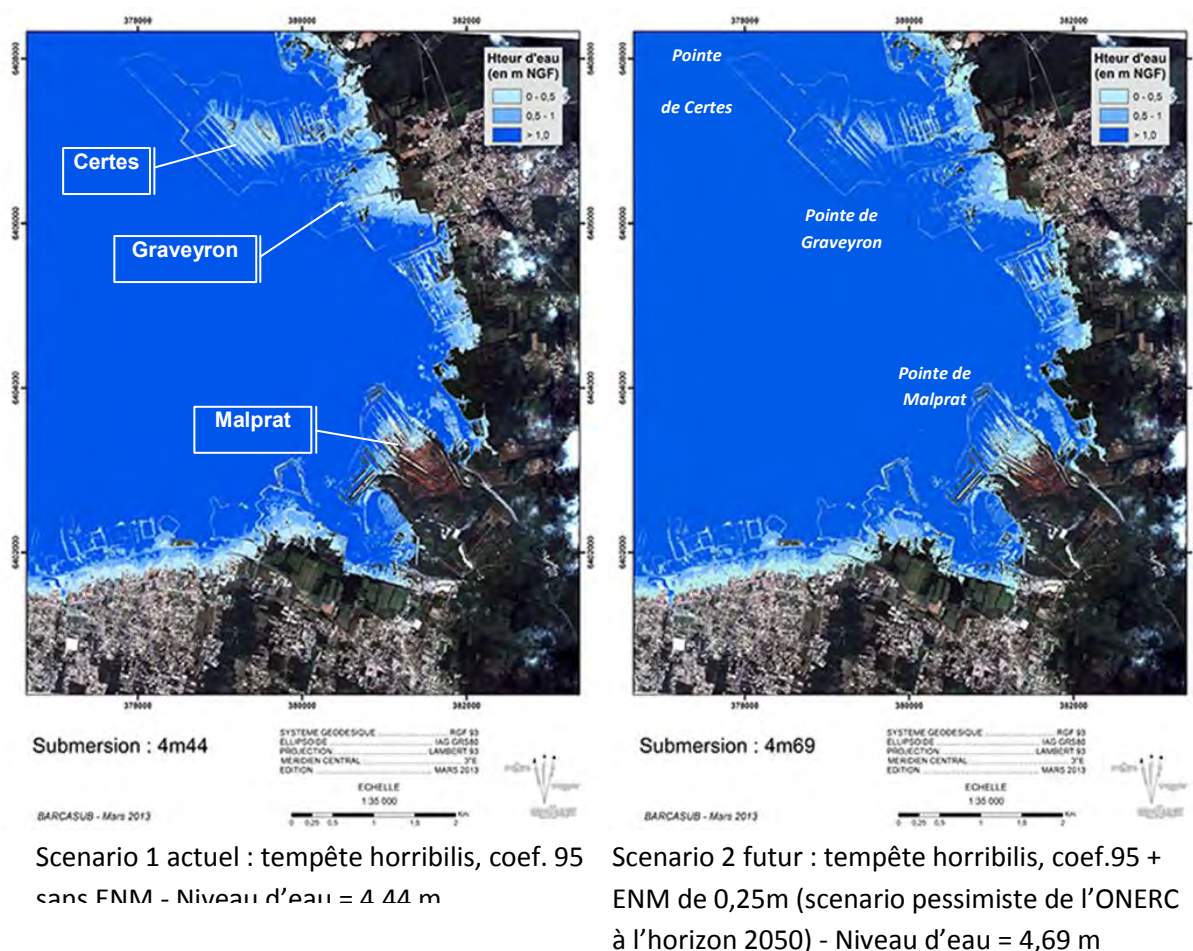


Fig. 3 : Cartes de submersion des rives fond du bassin obtenues par l'algorithme de propagation. Localisation des domaines endigués et de leurs pointes associées

Les résultats obtenus pour les deux scénarios actuel et prospectif par l'algorithme de propagation permet également d'observer une amplitude plus grande des hauteurs d'eau entre la périphérie et le centre des domaines de Certes et Graveyron notamment (Fig.3). L'explication tient au fait que l'eau se propage progressivement depuis la ligne de rivage vers l'intérieur des terres, en fonction

d'héritages morphologiques conservés au centre des domaines endigués et dont témoignent les cartes anciennes. A l'échelle de la zone d'étude, l'élévation du niveau de la mer renforce la vulnérabilité de zones déjà exposées davantage qu'elle ne l'étend vers l'intérieur des terres.

4. Evaluation de la capacité d'adaptation des marais aux changements de régime de submersion

4.1. Suivis stationnels de l'accrétion sédimentaire et de la dynamique végétale des schorres

L'approche stationnelle a consisté à suivre avec une répétitivité pluri-mensuelle, une sélection d'habitats pertinents du point de vue des fonctions bio-écologiques de base (support et entretien de la fonctionnalité) et des fonctions de régulation (atténuation de l'énergie des vagues) de l'écosystème marais salé. Les données ont été acquises sur un total de 24 stations, réparties en 10 transects perpendiculaires ou légèrement obliques par rapport au trait de côte, selon un protocole de mesure adapté (système des plaques enfouies). Le traitement des données a permis de mesurer le rythme moyen annuel d'exhaussement ou d'abaissement de la surface des marais soumis à un changement de régime de submersion depuis l'ouverture accidentelle des digues des pointes de Graveyron (1996) et de Malprat (1999). A Graveyron, ces données complètent une série de mesures altimétriques effectuées lors d'une première étude en 2003 (Anselme *et al.*, 2008) en permettant de déterminer l'évolution à moyen terme du marais.

L'accrétion sédimentaire mesurée aux différents niveaux des schorres externes de Graveyron et de Malprat montre une même évolution contrastée entre, d'une part, les parties inférieures du schorre soumises à un abaissement rapide de la surface et, d'autre part, les parties internes enregistrant un rehaussement vertical accompagné d'une remontée des *Spartines* et d'espèces caractéristiques d'associations végétales du bas et moyen schorre (*Triglochin maritima* et *Aster tripolium*). Si l'évolution est plus irrégulière à Malprat qu'à Graveyron, en liaison avec des contraintes hydrodynamiques plus fortes, elle participe dans les deux cas à un phénomène de rétrogradation des marais frangeants limitant leur régression sous l'effet érosif du clapot.

Les taux d'accrétion sédimentaires mesurées à Malprat dans l'espace rendu disponible à la sédimentation, montre une sédimentation vaseuse beaucoup plus rapide et généralisée, accompagnée de transformations profondes du couvert végétal. Les valeurs atteignent en plusieurs stations 3,5 cm/an, dépassant ainsi, la remontée régionale du niveau moyen de la mer ($3,5 \pm 2,1$ mm/an) tandis que les Roselières à *Phragmites australis* se développent très rapidement, en direction des parties plus basses soumises, pour leur part, à un processus de colonisation primaire. La progradation rapide du schorre interne, amorcée à partir du déstockage des vasières et marais externes et de la submersion désormais régulière du secteur, favorise davantage qu'à Graveyron, l'atténuation du clapot se propageant à l'intérieur de la zone dépoldérisée lors des tempêtes.

4.2. Analyse diachronique de l'évolution des schorres par télédétection

La donnée image utilisée comme référentiel pour la cartographie des habitats côtiers est l'orthophotographie numérique issue de la mission réalisée en septembre 2009 dont la très haute résolution (0,2 x 0,2 m) offre à une échelle de visualisation allant jusqu'au 1 : 500 une excellente appréciation de la couverture du sol. La très haute résolution des données images a conduit à adopter une approche de classification orientée-objet, employant pour unité de base non plus le

pixel, mais la « région » représentant un ensemble particulier de pixels spatialement contigus, défini par son contour et une combinaison d'attributs spectraux et morphologiques choisie par l'opérateur.

L'ensemble des procédures d'extraction des groupements végétaux ont été effectuées sous le logiciel de Système d'Information Géographique GEOMEDIA d'Intergraph et son extension d'extraction « Analyste d'entité 4.1 » puis validées sur le terrain sur la base du référentiel typologique de la végétation des prés salés défini pour la côte sud du bassin d'Arcachon, à partir de la typologie européenne des habitats élémentaires (Le Nindre *et al.*, 2006). La restitution d'un MNT à partir des données LIDAR de 2005, à une échelle adaptée à la cartographie détaillée des unités biomorphosédimentaires (haute slikke, bas-moyen schorre, haut-schorre, zone adlittorale) a permis de préciser l'étagement réel de la végétation du fond bassin par rapport à l'étagement théorique défini pour l'ensemble du bassin.

L'analyse rétrospective de l'évolution des schorres de Graveyron à partir de la comparaison des orthophotographies de 2009 et de 2000 (Fig.4) montre que les espaces correspondant à la haute slikke en 2000 ont largement évolué vers un schorre à l'intérieur de la zone dépoldérisée et que, le long de la frange externe, les surfaces du schorre perdues par érosion frontale ont été compensées en partie par celles gagnées sur la végétation terrestre de la zone adlittorale. Au total, l'ensemble du secteur de la Pointe, intérieur et extérieur confondus, a gagné 2,82 ha de schorre, perdu 0,25 ha de végétation adlittorale et 0,17 ha de végétations de haute slikke, totalisant un gain net de 2,4 de surface végétalisée entre 2000 et 2009.



Fig. 4 : Changements dans la répartition des grandes unités bionomiques de la Pointe de Graveyron entre 2000 et 2009

L'analyse statistique de l'évolution altimétrique de 9 profils d'estran levés au DGPS en 2003 puis 2008 montre que les deux modes d'évolution du marais – par progradation dans la partie interne et par rétrogradation dans la partie externe – s'inscrivent, dans une même tendance générale à l'abaissement des surfaces du marais (0,25 m entre 2003 et 2011, soit -3,12 cm/an, à l'intérieur du secteur, 0,22 m entre 2010 et 2011 à l'extérieur). Ainsi et contrairement à Malprat, les processus d'extension horizontale de la végétation sur la slikke nue et de rehaussement de l'ensemble du marais ne semblent pas s'être encore relayés, entraînant un retard dans la restauration des services de régulation du clapot offerts par le marais. L'absence prolongée d'une végétation conquérante susceptible de s'interposer efficacement à la propagation des ondes de tempêtes devrait conduire à valoriser les infrastructures anthropiques existantes (digues dormantes, anciennes bosses) ainsi que les végétations arborescentes (*Tamaris*) encore présentes à l'étage adlittoral quand même certaines d'entre elles (*Baccharis*) peuvent paraître indésirables en raison de leur statut d'espèce invasive.

5. Conclusion

Les approches modélisatrices et expérimentales du fonctionnement du système littoral développées par le programme BARCASUB apportent des éclairages complémentaires dans l'analyse des composantes du risque de submersion marine. La question de l'exposition à l'aléa des rives du fond du bassin est loin d'être résolue compte tenu des incertitudes sur les hauteurs d'eaux « à terre », calculées à partir de données de houles issues elles-mêmes de simulations, et du chaînage de trois modèles hydrodynamiques rendu nécessaire par la complexité hydrologique d'un environnement lagunaire semi-fermé anthropisé. On retiendra toutefois que si la surcote liées aux vagues océaniques (*wave setup*) est un paramètre important à prendre en compte pour la prévision des surcotes au fond du bassin, elle ne joue pas toujours le rôle principal dans la formation de la surcote totale et le déclenchement des submersions au droit des polders. En effet, les résultats de la modélisation du clapot confirment qu'en fonction de l'étendue du plan d'eau lagunaire à marée haute, les vagues de vent sont en mesure de déclencher des submersions par franchissement ou intrusion des jets de rive (*wave uprush*) lors de marées de coefficients relativement faibles. Un phénomène d'amortissement du clapot n'est pas à exclure à l'heure actuelle en raison de l'extension des faibles profondeurs loin en avant des domaines poldérisés. Ceci conduit à souligner qu'une part non négligeable de la surcote totale au fond du bassin relève des effets liés à la contrainte exercée par le vent à la surface du plan d'eau (*wind set up*). Néanmoins, les simulations montrent que l'élévation du niveau marin aura vite fait de libérer le clapot des contraintes de la bathymétrie et donc de faciliter sa propagation en direction du fond du bassin.

Dans ces conditions, les possibilités d'atténuation des ondes de tempête par la restauration des marais salé paraissent étroitement subordonnée au maintien de l'équilibre bio-sédimentaire des estrans sablo-vaseux du fond du bassin. L'étude BARASUB a confirmé le potentiel de restauration des marais au moyen d'une reconnexion des polders à la mer et validé l'hypothèse d'une atténuation des effets érosifs du clapot si la vitesse d'élévation de la surface des marais l'emporte sur celle du niveau moyen de la mer (Malprat). Le mode d'exposition à l'hydrodynamisme joue un rôle important dans la migration vers les terres du système bio-sédimentaire, les marais frangeants faisant office de « fournisseurs » de sédiments pour les zones dépoldérisées, à partir d'un stock sédimentaire jusqu'alors fixé par la végétation. Toutefois, à Graveyron comme à Malprat, l'exhaussement des marais est loin d'avoir atteint le niveau le plus élevé de la mer de telle sorte que si la restauration des fonctions écologiques essentielles du marais (fonctionnement, auto-entretien) et d'une large gamme

d'habitats naturels semble assurée, la réhabilitation des fonctions de régulation des submersions de tempête n'est pas aussi avancée et demande à être assistée par la conservation de la végétation arbustive existante au pied des digues dormantes remaritimisées.

Remerciements

L'équipe BARCASUB remercie les partenaires qui l'ont soutenue financièrement - MEDDE (Liteau), Conseil Général de Gironde, Conseil Régional d'Aquitaine -, de même que le Conservatoire du littoral.

Bibliographie

- Anselme B., Durand P., Goeldner-Gianella L., Bertrand F., 2008. « Impacts de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un marais maritime endigué : le domaine de Graveyron, bassin d'Arcachon (France) », *Vertigo - La revue en sciences de l'environnement*, vol. 8, n°1, 9 p.
- Bertrand F. (2013). The Arcachon Bay estuary: a "collage" of landscapes. In M. Fort and M.-F. André (eds.), *Landscapes and Landforms of France, World Geomorphological Landscapes*, p. 71-80.
- Bertrand F., Goeldner-Gianella L. (2013). BARCASUB : « La SUBmersion marine et ses impacts environnementaux et sociaux dans le Bassin d'ARCAchon (France) : est-il possible, acceptable et avantageux de gérer ce risque par la dépoldérisation ? », rapport final. Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE), 178 p. + annexes.
- Feuillet T., Chauveau E., Pourinet L. (2012). Xynthia est-elle exceptionnelle ? Réflexions sur l'évolution et les temps de retour des tempêtes, des marées de tempête et des risques de surcote associés sur la façade atlantique française. *Noréis*, n°222, p.27-44.
- Le Nindre Y.-M., Bodéré G., Izac J.-L., Putot E., Levasseur J. (2006). Etude pour le maintien de l'équilibre biosédimentaire des estrans de la côte sud du Bassin d'Arcachon. Rapport BRGM/RP 54814-FR., 129p., 24 tab., 93 fig., 4 annexes.
- Mallet C., Idier D., Thiébot J., Le Nindre Y.M., Mugica J., Roche A. (2009). Submersions marines à Andernos-les-Bains (Gironde) et aménagement de protection. BRGM/RP-57462. Rapport final, 52p.
- Mugica J., Delvallée E., Pedreros R. (2010). Application de modèles numériques pour l'estimation de l'altitude du plan d'eau à Andernos-les-Bains. Rapport BRGM/RP-58723-FR. 92 p.
- Parisot J.-P., Diet-Davancens J., Sottolichio A., Crosland E., Drillon C. Verney, R. (2008) Modélisation des agitations dans le Bassin d'Arcachon, Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis, p.435-444.
- Sénéchal N., Sottolichio A., Bertrand F., Goeldner-Gianella L., Garlan T. (2013). Observations of waves' impact on currents in a mixed-energy tidal inlet: Arcachon on the southern French Atlantic coast. In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T. J. (eds.), *Proceedings 12th Int. Coastal Symp. ICS (Plymouth, England), Journal of Coastal Research*, Sp. Issue 65, p. 2053-2058.

Présentation de l'International Levee Handbook (ILH)

Traduction de la partie introductive

Marc Igigabel¹, Michael Sharp², Yann Deniaud¹, Patrick Chassé¹, Rémy Tourment³, Edouard Durand¹, Guillaume Veylon³

1. Cerema, Technopôle Brest Iroise 155, rue Pierre Bouguer BP5, 29 280 PLOUZANE CEDEX, France
marc.igigabel@cerema.fr (adresse électronique similaire pour Yann Deniaud, Patrick Chassé, Edouard Durand)

2. USACE, Engineer Research & development Center, 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MS, 39180 USA
Michael.K.Sharp@erdc.dren.mil

3. Irstea, Centre d'Aix-en-Provence, 3275 Route Cézanne, CS 40 061, 13182 AIX EN PROVENCE Cedex 5 France
remy.tourment@cerema.fr (adresse électronique similaire pour Guillaume Veylon)

RESUME

Cet article correspond à la traduction en français du chapitre introductif du manuel international sur les levées, l'International Levee Handbook (2013). Ce manuel est le fruit de la collaboration entre les États-Unis, la France, le Royaume-Uni, l'Irlande, les Pays-Bas et l'Allemagne et représente l'aboutissement de cinq années d'échanges et d'harmonisation au sein d'un collège d'experts, validé par une relecture détaillée au niveau international.

Les levées, autrement connues sous le terme de « digues en terre », demeurent à notre époque un élément vital de la gestion du risque inondation, tant sur les côtes qu'en bordure des fleuves. Le nouveau manuel propose une synthèse des principes et méthodes applicables aux digues en terre tout au long de leur cycle de vie, en soulignant les problématiques spécifiques rencontrées et en les illustrant par des exemples. Au final, ce document apporte une vision intégrée des sciences de l'hydraulique et de la géotechnique au service de la conception, la construction et la gestion des digues, avec le souci constant de l'évaluation du risque.

ABSTRACT

This article is the translation in French of the introductory chapter of the International Levee Handbook (2013). It is the result of the collaboration of six countries (the United States of America, France, United Kingdom, Ireland, the Netherlands and Germany). This guide represents five years of exchanges and harmonization within a college of experts, validated by a detailed review at the international level.

Levees, otherwise known as flood embankments or dikes, are a vital part of flood risk management for many fluvial, coastal and estuarine sites. The new handbook offers a synthesis of principles and methods that apply to levees throughout their life cycle, underlining specific issues and illustrating them with examples. Finally this document provides an integrated view of hydraulic and geotechnical sciences to serve the conception, the construction and the management of levees, with the constant concern of risk evaluation.

MOTS-CLÉS : DIGUE, TERRE, RISQUE, INONDATION, SUBMERSION, GEOTECHNIQUE, HYDRAULIQUE

KEYWORDS: DIKE, EARTH, RISK, FLOOD, SUBMERSION, GEOTECHNICS, HYDRAULICS

1. Introduction

Les levées (aussi appelées digues) sont des structures en surélévation, principalement en terre, qui ne sont pas mises en charge en temps normal par l'action des vagues et des courants et dont l'objectif premier est de fournir une protection contre les événements provoquant des inondations le long des côtes, des rivières et des voies de navigation artificielles (Figure 1).

Les levées constituent une partie des systèmes de défense qui peuvent aussi inclure des murs de protection, des stations de pompage, des structures de fermeture, des formations naturelles et d'autres structures associées. Dans de nombreux cas, les levées ont été érigées par phases successives sur des décennies et parfois sur des siècles. Peu d'entre elles étaient originellement conçues ou réalisées suivant les standards actuels et les dossiers d'archive de leur construction et l'enregistrement de leur performance historique peuvent ne pas exister.

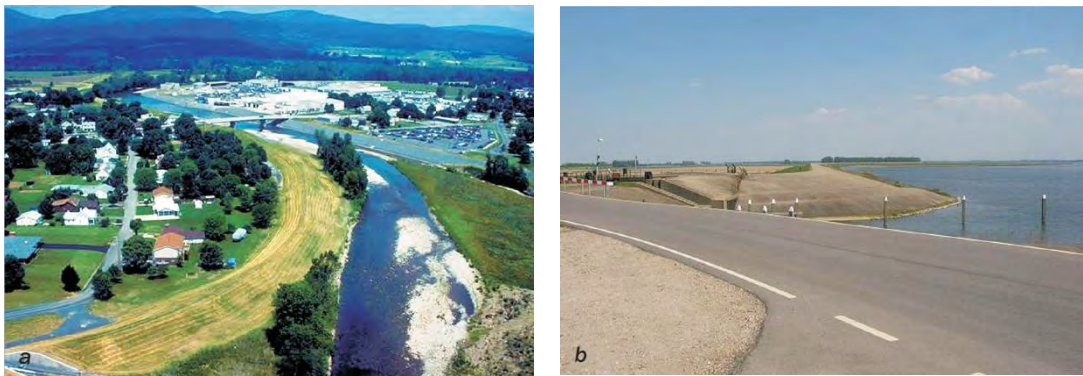


Figure 1. *Levée fluviale typique (a) (Source : USACE) et levée côtière typique (b) (Source : STOWA)*

Malgré leur apparente simplicité, les levées peuvent être des structures étonnamment complexes. Elles ont généralement été construites en plaçant sur des plaines alluviales des matériaux de remblais empruntés localement (ce qui implique donc une variabilité naturelle). Contrairement aux structures de conception classique, les levées peuvent être irrégulières vis-à-vis des standards et de la nature de leur construction et peuvent se détériorer sensiblement avec le temps si elles ne sont pas bien entretenues. De plus ces structures couvrent ordinairement de grands linéaires et ne sont qu'une partie de l'ensemble du système d'endiguement. Lorsqu'ils ne disposent pas d'une seconde ligne de défense, de tels systèmes s'apparentent à une chaîne dont la résistance n'est égale qu'à celle du maillon le plus faible.

Une évaluation factuelle de l'existant, une bonne conception et une adaptation régulière, une bonne inspection et une maintenance régulière sont vitales pour que les levées (en particulier celles représentant les parties les plus faibles des systèmes d'endiguement) aient un comportement satisfaisant quand mises en charge lors de tempêtes ou de crues. Il doit être noté que des levées peuvent rester une grande partie de leur vie sans connaître d'événements correspondant à ceux pour lesquels elles ont été dimensionnées. Ceci peut produire une fausse impression de sécurité du niveau de protection qu'elles apporteront.

2. Contexte

Les inondations ou submersions, d'origines fluviales ou maritimes, continuent de produire des conséquences désastreuses dans le monde entier, tant sur le plan humain que sur le plan économique. De par la croissance économique, l'urbanisation et les concentrations de populations et de biens, dans de nombreux pays, les gens s'installent toujours en plus grand nombre dans les zones soumises au risque d'inondation. Aux endroits mêmes où les défenses destinées à protéger contre les inondations ont été améliorées, elles n'ont pas été complètement mises à l'épreuve ou n'ont pas connu d'événements peu fréquents et les résidents deviennent moins vigilants et moins conscients de la menace des inondations. Dans de tels cas, ils ne sont guère préparés aux inondations et n'ont aucune certitude quant aux actions qui doivent être menées, souffrant par conséquent de plus graves dommages lorsqu'une inondation survient.

Les épisodes de crues et de tempêtes continuent dans le monde entier à provoquer de graves défaillances des défenses contre les inondations, résultant tragiquement en pertes de vies humaines et en vastes zones dévastées. Les levées ont aussi été sévèrement mises à l'épreuve par des précipitations exceptionnelles. Cependant, malgré leur importance critique dans l'atténuation du risque inondation, l'intérêt et les investissements ont tendance à être moindres pour les levées que pour les autres infrastructures critiques de retenue d'eau, tels que les barrages. En particulier, dans de nombreux pays, les levées ne disposaient pas d'un cadre technique et légal propre à promouvoir un niveau approprié de performance.

En septembre 2008, des organismes de six pays (la France, L'Allemagne, l'Irlande, les Pays-Bas, le Royaume-Uni et les États-Unis d'Amérique) ont exprimé le souhait de participer à un projet international pour apprendre des expériences des autres et pour partager l'effort de produire un manuel de bonnes pratiques – l'International Levee Handbook (ILH). Il en est résulté plusieurs rencontres et ateliers internationaux, le développement d'un rapport de cadrage et, comme aboutissement, la production de ce manuel.

Le principal objectif de ce manuel est de servir de référence sur un ensemble complet de pratiques couvrant l'évaluation, la conception, la mise en œuvre des travaux, la maintenance et la gestion des levées. Ce manuel est une référence non-prescriptive et doit être utilisé en conjonction avec les recommandations et codes nationaux et internationaux appropriés. Il n'a pas vocation à être un code de pratique prescriptif mais doit être considéré comme un support de décision important et comme référence dans l'application des recommandations et codes internationaux.

Ce manuel a été rédigé par un noyau d'experts et de praticiens de l'ensemble des disciplines concernées et issus des pays partenaires. La création du manuel a suivi une succession de tâches planifiées gérées par l'équipe technique éditoriale avec l'appui d'un comité de pilotage dont les membres provenaient des groupes de soutien nationaux des pays partenaires. L'administration du projet fut assurée par CIRIA (UK) ainsi que l'édition finale du document pour sa publication. Ce document a été diffusé à une plus large équipe internationale pour relecture et commentaire lors du processus de création.

3. Objectifs du guide

Le manuel adopte une approche basée sur le risque, la performance et les systèmes. Toute levée aura une fonction première de protection contre les crues ou de défense de la côte, fonction à

laquelle s'appliquera des objectifs de performance. Toutes les levées pourront aussi avoir diverses fonctions secondaires, par exemple relatives à l'environnement, à l'agrément, à la santé et à la sécurité, à l'accessibilité, ce qui peut imposer des exigences de performance significatives. Le manuel suit une approche polyvalente sur tous les aspects de la gestion et de la maintenance d'une levée ou du système d'endiguement, de telle sorte que les concepts soient applicables aux levées en milieu urbain ou rural.

En rédigeant ce manuel, les auteurs ont considéré les diverses interventions de gestion qui sont nécessaires pour atteindre les performances requises pour une levée ou pour un système d'endiguement sur le cycle de vie complet. Ainsi le manuel traite des levées existantes protégeant les sites côtiers, fluviaux et estuariens (potentiellement pour des performances requises nouvelles ou ayant changé), de leur adaptation ou remplacement, de leur exploitation et maintenance, tout comme de la conception ou de la suppression de systèmes existants. Une attention est aussi portée au fait que les interventions varient entre les projets majeurs de construction, menés par des constructeurs externes, et la maintenance régulière mobilisant simplement les moyens dont dispose le gestionnaire concerné.

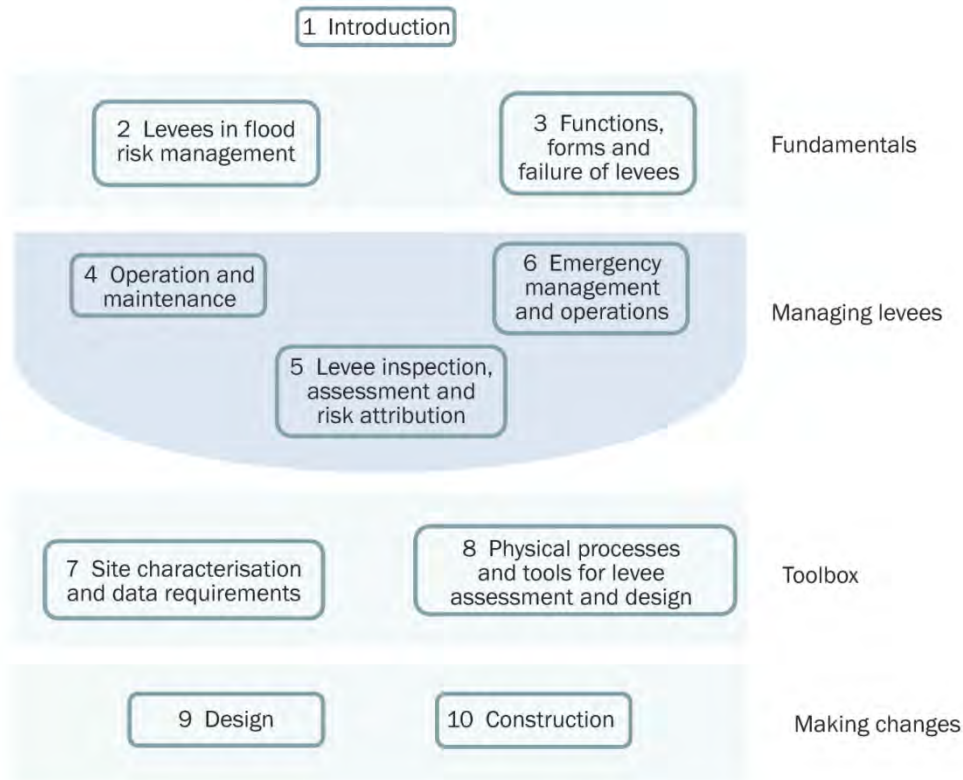
Le manuel ne traite pas des levées construites dans des buts autres que celui de la protection contre les inondations. Ainsi il ne traite pas de la conception des autres structures de rétention d'eau. Les structures associées sont traitées dans la mesure où elles influencent la performance de la structure d'une levée ou son exploitation. Ce manuel reconnaît aussi l'importance des structures qui stabilisent les levées par leur action sur la morphologie fluviale ou côtière, telles que les plages, les dunes et les épis. Lorsque cela est nécessaire, il est fait référence à d'autres guides de gestion pour ces structures.

4. Structure du manuel et contenu des chapitres

4.1. *Structure du manuel*

Le manuel contient des informations qui sont utiles à la fois pour les levées existantes et celles en projet. La structure du manuel est cependant telle que les levées existantes sont traitées en premier, et la conception en second, les levées existantes représentant une part prédominante de la problématique associée à ces ouvrages. Des détails sur chacun des chapitres sont présentés dans le reste de cette section. La figure 2 présente une vue globale du manuel montrant comment les informations sont distribuées dans quatre grandes parties, suivant qu'elles relèvent des « fondamentaux », de la « gestion des levées », des « outils » scientifiques et techniques ou suivant qu'elles visent à « faire évoluer » une situation.

Figure 2 Structure de l'International Levee Handbook



4.2. Contenu des chapitres

4.2.1. Chapitre 1 : introduction

Ce chapitre correspond au présent article

4.2.2. Chapitre 2 : les levées dans la gestion du risque inondation

Le chapitre 2 expose le contexte de la gestion du risque inondation, contexte dans lequel les levées et leur gestion doivent être considérées. L'influence des changements environnementaux est notamment abordée. Ce chapitre explique les rôles et responsabilités liés au risque inondation et pourquoi il est important de gérer les levées tout au long de leur cycle de vie.

4.2.3. Chapitre 3 : fonctions, formes et défaillance des levées

Le Chapitre 3 apporte une vue d'ensemble des fonctions des levées dans le système de gestion du risque inondation et présente le caractère multi-fonctionnel des levées. Il décrit et illustre les principaux types de formes des levées et les principales structures associées aux levées. Le chapitre s'achève par une discussion sur les mécanismes de défaillance et la façon dont ceux-ci sont liés aux formes et fonctions des levées.

4.2.4. Chapitre 4 : exploitation et maintenance

Le chapitre 4 traite de l'exploitation et de la maintenance des digues existantes, incluant l'organisation et la gestion des structures incluses et de la végétation. Les conditions de maintenance sont décrites et rapportées à l'identification et la résolution de défauts résultant de divers mécanismes de détérioration ou d'endommagement.

4.2.5. Chapitre 5 : inspection des levées, évaluation et attribution du risque

Le chapitre 5 présente les activités en lien avec l'évaluation, et l'intégration de ces activités dans la gestion. Pour l'évaluation des systèmes de protection, le chapitre prône une approche graduelle (proportionnée aux enjeux ou aux résultats escomptés) incluant l'analyse et l'évaluation du risque. Les méthodes de recueil de données et les problématiques correspondantes sont décrites, en particulier les inspections, les investigations et le suivi continu. Les systèmes de gestion des données destinés à supporter la gestion des levées sont aussi évoqués, étant donné l'importance de la disponibilité des données et de leur traitement pour les activités d'évaluation.

4.2.6. Chapitre 6 : gestion de crise et interventions d'urgence

Le chapitre 6 expose les principes de la gestion de crise en précisant ce que recouvrent les phases de préparation et d'action et la façon dont la gestion des levées s'inscrit dans ce dispositif global. Les diverses techniques d'intervention d'urgence sont décrites en précisant les équipements et les activités pour minimiser les franchissements et les dommages sur les levées et, à des stades plus avancés, pour effectuer des réparations ou pour fermer des brèches.

4.2.7. Chapitre 7 : caractérisation de site et données requises

Le chapitre 7 décrit en préliminaire les principes fondamentaux de la caractérisation des sites pour les levées et leur environnement. La majeure partie du chapitre est consacrée aux techniques d'investigation et d'analyse visant à déterminer les conditions aux limites (hydrauliques et géotechniques) des levées ainsi que l'état des levées existantes. Les équations et les techniques pour évaluer les conditions hydrauliques et morphologiques sont présentées. Ce chapitre présente également les procédures d'études, les techniques intrusives et non-intrusives pour l'échantillonnage et les investigations de terrain pour déterminer les caractéristiques géotechniques. En complément sont détaillées les techniques d'essai en laboratoire et les méthodes d'interprétation des données adaptées aux levées et au sol sur lequel elles reposent. Le chapitre explique enfin les méthodes et les procédures pour déterminer les paramètres nécessaires à la conception.

4.2.8. Chapitre 8 : processus physiques et outils pour l'évaluation et la conception des levées

Le chapitre 8 fournit les outils techniques et scientifiques permettant l'analyse et la conception des levées existantes et nouvelles, en s'appuyant conjointement sur deux disciplines, l'ingénierie géotechnique et l'ingénierie hydraulique. Il détaille les actions sur les levées (actions hydrauliques, internes et externes, actions géotechniques et sismiques), explique les processus physiques qui déterminent la performance des levées, celle de leurs systèmes de protection ou encore des murs-digues. Il décrit les méthodes analytiques et les techniques d'ingénierie (de la simple équation à la modélisation numérique) qui représentent au mieux les mécanismes en jeu. Le chapitre s'achève avec la description des méthodes d'analyse des brèches et des inondations qu'elles engendrent.

4.2.9. Chapitre 9 : conception

Le chapitre 9 expose les principes de conception des levées, les rôles et responsabilités des personnes impliquées dans la conception, tout en précisant la documentation et les rapports requis. Le chapitre explique alors comment déterminer l'implantation (alignement), fixer le niveau de crête et la géométrie de la levée. Puis des informations sont données sur les calculs liés au dimensionnement, en exposant en détail les méthodes d'analyse des modes de rupture suivant différents codes de pratique. Sont développés les aspects particuliers de la conception en lien avec les phénomènes de percolation et d'érosion interne, les mesures de protection de surface et la maîtrise des évolutions affectant la sûreté de fonctionnement. Le chapitre se conclut avec des conseils sur la sélection et le compactage des matériaux terreux, la conception des déversoirs et des remblais autour des structures incorporées ou associées, en particulier les murs de couronnement et les conduites.

4.2.10. Chapitre 10 : construction

Le chapitre 10 décrit la préparation des travaux sur les levées en termes d'organisation, de programmation et de gestion des risques liés à ces interventions. L'attention est portée sur les spécificités des terrassements incluant la convenance des sols, leur traitement et leur manipulation. Les phases de travaux relatifs aux ouvrages en terre sont décrits pour les constructions nouvelles, pour leur adaptation, leur réparation ou leur déclassement. L'incorporation d'autres structures dans les remblais est également abordée.

5. Public visé

Les utilisateurs potentiels du manuel sont les personnes en charge de l'aménagement, les maîtres d'ouvrages, les gestionnaires, les ingénieurs en charge de la réglementation, les analystes dans le domaine du risque, les concepteurs et constructeurs, les planificateurs des mesures d'urgence et les intervenants, les organisations de protection de l'environnement, les établissements d'enseignement et le public.

Le manuel a été écrit pour aider des professionnels techniquement compétents ayant une connaissance large des domaines d'application (mais pas nécessairement d'expertise) à définir la meilleure approche possible pour une levée donnée ou pour un système d'endiguement donné. En considération de quoi, ce manuel vise à apporter l'information nécessaire pour supporter la décision plutôt que de la diriger. Le manuel cherche aussi à fournir à un lecteur intelligent (c'est-à-dire un lecteur disposant de bases techniques mais sans connaissance particulière de spécialiste) suffisamment d'informations pour comprendre les problématiques essentielles et les procédures générales qui seront probablement suivies par un professionnel expérimenté.

Remerciements

Les principaux partenaires étrangers ayant contribué à la production de ILH sont :

- *au Royaume-Uni et en Irlande : CIRIA, HR Wallingford, CH2M Hill, Royal Haskoning DHV*
- *aux États-Unis : US Army Corps of Engineers (USACE), US Department of Homeland Security (DHS), National Committee on Levee Safety (NCLS)*
- *en Allemagne : Technische Universität Dresden*

- aux Pays-Bas : STOWA

La contribution française a été apportée par un groupe d'experts représenté par le Cerema et incluant notamment IRSTEA, IFSTTAR, des services déconcentrés du Ministère de l'Écologie, des gestionnaires de digues et des bureaux d'études privés.

Le projet a reçu, en France, le soutien financier de la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie.

Bibliographie

CIRIA (UK), French Ministry of Ecology (France) and USACE (USA) (2013). *International Levee Handbook*, <http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/international-levee-handbook-un-a1147.html>

Méthode d'évaluation de l'aléa de rupture d'ouvrages soumis aux sollicitations marines

Application à la protection en enrochements du front de mer de Lacanau

Nicolas Pépin¹, Emilio Tena-Davila², Arnaud De Bonviller³, Jérémy Dugor⁴

1. ISL Ingénierie, Agence sud-ouest

15 rue du Maréchal Harispe, 64500 Saint-Jean-de-Luz, France

pepin@isl.fr

2. ISL Ingénierie, Agence sud-ouest

15 rue du Maréchal Harispe, 64500 Saint-Jean-de-Luz, France

tena@isl.fr

3. ISL Ingénierie, Agence d'Angers

25-27 rue Lenepveu, 49100 Angers, France

debonviller@isl.fr

4. CASAGEC Ingénierie

4 route des Pitoys, 64600 Anglet, France

dugor@casagec.fr

RESUME.

L'article qui suit décrit la méthodologie de calcul mise au point par ISL Ingénierie pour déterminer l'aléa de rupture d'ouvrages soumis à des sollicitations maritimes. La méthode permet de réaliser un diagnostic fin de l'état actuel des ouvrages en considérant chacun des modes de rupture susceptible de les affecter. Elle peut ensuite être utilisée pour le dimensionnement du confortement de ces ouvrages.

La méthode a été mise en œuvre avec succès sur deux sites du littoral aquitain : le front de mer de Lacanau-Océan (33, Gironde) et le courant de Mimizan (40, Landes). L'article décrit plus précisément le cas de Lacanau. La méthode peut encore être améliorée de manière à s'adapter à d'autre typologie d'ouvrage et à considérer un éventail plus large de sollicitations.

ABSTRACT.

This paper describes a new method imagined by ISL to assess failure hazard of coastal defense structures. This method enables engineers to carry out a subtle diagnosis of the present condition of coastal structures by analyzing each failure mode that can affect them. It can also be used to design reinforcements of the structures.

ISL used successfully this method for two cases both located in the Atlantic coast of France: Lacanau-Ocean sea front (described in this article) and Mimizan current. The method can be improved in two main directions: adapt it to other structure typologies and implement in it much more hydrodynamics stress conditions.

MOTS-CLES : aléa, rupture, ouvrage, maritime, soulèvement, érosion, affouillement, sollicitation, houle, marée,

KEYWORDS: hazard, failure, structure, maritime, lifting, erosion, scour, stress, swell, tide

1. Introduction

Sous l'action du vent et de la houle, le littoral aquitain est soumis à une érosion progressive et au recul du trait de côte. Les constructions situées le long du littoral ont déséquilibré le transit sédimentaire et des ouvrages de protection ont dû être construits afin de maintenir la position des fronts de mer et de protéger les enjeux situés en arrière. Cependant, l'érosion marine se poursuit et met en péril la stabilité des ouvrages existants qui doivent alors être confortés.

Dans les cadres des études qu'ISL Ingénierie entreprend en partenariat avec CASAGEC Ingénierie sur les sites de Lacanau (33) et Mimizan (40), une méthode d'évaluation de l'aléa de rupture d'ouvrages soumis aux sollicitations marines a été mise en œuvre et fait l'objet de cette présentation. La méthode permet :

- d'effectuer un diagnostic précis de l'état actuel des ouvrages et des risques de rupture qu'ils présentent vis-à-vis des événements exceptionnels,
- d'apporter une aide au dimensionnement des confortements à prévoir à long terme.

2. Définition de l'aléa de rupture d'un ouvrage

2.1. Généralités

L'aléa de rupture d'un ouvrage se définit comme la possibilité qu'un ouvrage cède par un ou divers mécanismes de rupture sous l'action d'un événement exceptionnel donné. L'aléa prend en compte la typologie et la géométrie des structures, leur état de dégradation et le niveau des sollicitations qui leur est appliqué (on parle ici d'« aléa naturel »).

Les ouvrages maritimes de protection du littoral subissent, d'une part, les sollicitations maritimes et, d'autre part, l'érosion de l'estran. Les ouvrages fluvio-maritimes sont, de plus, soumis aux sollicitations hydrauliques du courant de la rivière.

2.2. Définitions

Cette partie vise à lister et définir l'ensemble des paramètres dont il sera question dans l'estimation de l'aléa de rupture des ouvrages maritimes.

Du point de vue de la sollicitation marine, la houle au large est définie par sa longueur d'onde L (distance entre deux crêtes ou deux creux successifs), sa période T , sa hauteur H . La houle se superpose à un niveau statique de référence NS qui prend en compte la marée (Plus Haute Marée Astronomique) et les surcotes (surcote barométrique, effet du vent, ...).

Au niveau de la plage, le set-up η ou surcote due aux vagues correspond à l'augmentation du niveau moyen de la mer liée au déferlement des vagues. Il s'ajoute au niveau statique de référence. Le paramètre qui intervient également dans la sollicitation est lié au niveau de plage N_p en pied de protection. Ce niveau est fluctuant en fonction des saisons et des événements. La pente du talus ainsi que la pente de la plage interviennent dans l'estimation du run-up R_u (ou jet de rive).

Lorsque c'est le cas, du point de vue de la sollicitation fluviale, c'est principalement la vitesse du courant qui entraîne une contrainte sur les ouvrages.

Du point de vue de la capacité des ouvrages à contenir les sollicitations marines et fluviales, les paramètres suivants sont essentiels : la pente des talus, la cote de crête de ouvrages, le diamètre médian des blocs lorsqu'il s'agit d'enrochements, l'épaisseur de béton (le cas échéant), les caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs des ouvrages, etc.

3. Méthode d'évaluation de l'aléa de rupture

3.1. Principe

La méthode d'évaluation de l'aléa de rupture de la protection en enrochements utilisée par ISL suit la logique présentée sur la figure ci-après :

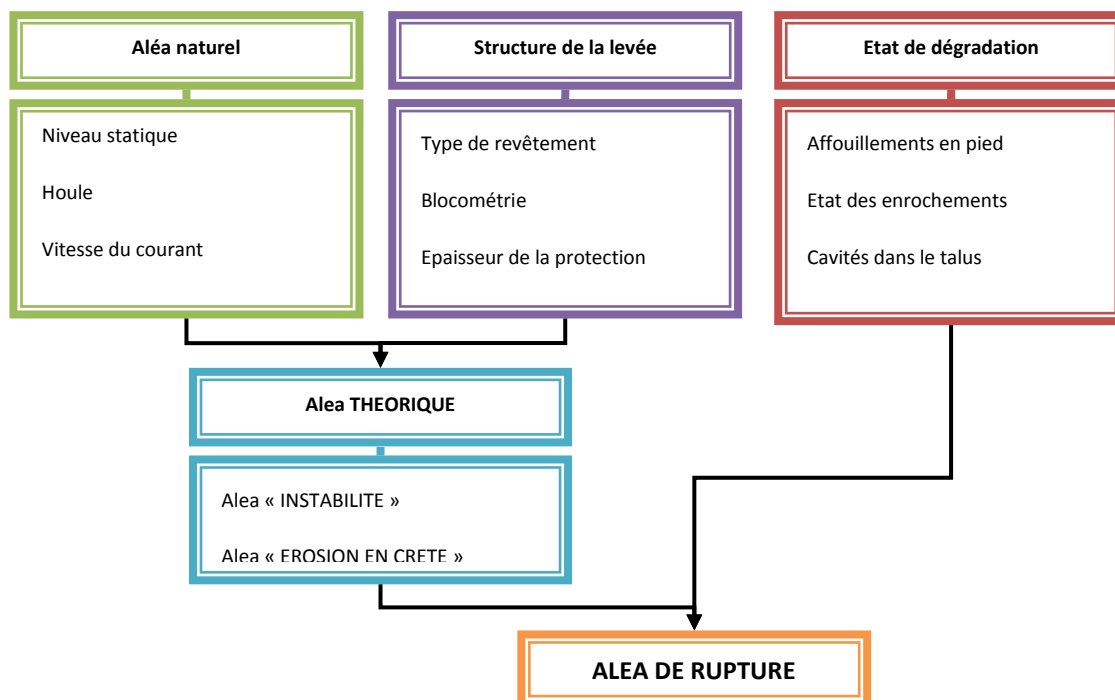


Figure 1. Méthode d'évaluation de l'aléa de rupture d'ouvrages maritimes

La méthode détermine dans un premier temps les processus auxquels sont soumis les ouvrages. Il s'agit ici de définir les sollicitations hydrauliques pour différentes périodes de retour. Concernant les ouvrages maritimes, les sollicitations s'expriment principalement en termes de houle en pied d'ouvrage et de jet-de-rive sur le talus. La méthodologie utilisée par ISL pour le cas de Lacanau sera détaillée au paragraphe 4 du présent article.

Dans un second temps, l'objectif est de caractériser les différents modes de rupture des ouvrages. ISL a identifié les principaux processus qui pouvaient conduire à la rupture d'ouvrage soumis à des sollicitations maritimes et fluvio-maritimes :

- des instabilités globales des talus avec apparition de cercles de glissement plus ou moins profonds ainsi que des instabilités plus locales avec soulèvements de blocs de protection en

enrochements sous l'action des sollicitations hydrodynamiques (déchaussements, basculements, glissements),

- l'attaque du talus par l'arrière lors du franchissement de la protection par la houle déferlante et donnant naissance à une érosion en arrière de la crête des ouvrages.

- l'érosion en pied d'ouvrage (affouillement) qui peut avoir pour conséquence la déstabilisation et le basculement des ouvrages.

Trois modes de rupture théoriques seront donc considérés : l'aléa instabilité, l'aléa érosion en crête et l'aléa affouillement. Le détail de la méthodologie, appliquée au cas de Lacanau, est présenté au paragraphe 4 de l'article. Pour chaque mode de rupture, des classes d'aléa sont définies en fonction du niveau de risque calculé. Quatre classes d'aléa sont définies : faible, modéré, fort et très fort. A chacune d'entre elle correspond une note comprise entre 0 et 3. L'aléa théorique est défini comme la note moyenne des différents modes de rupture. En première approximation, aucun coefficient de pondération n'est appliqué.

L'état de dégradation des ouvrages est évalué à dire d'expert sur la base d'une inspection visuelle détaillée des ouvrages. Chaque tronçon d'ouvrage se voit attribuer une note en fonction du type et de l'importance des désordres qui l'affectent. La note est comprise entre 0 et 3.

L'aléa de rupture global des ouvrages se traduit comme le croisement entre l'aléa théorique et l'état de dégradation des ouvrages. En pratique, la méthode ISL effectue la somme entre la note d'aléa théorique et la note d'état de dégradation. Ceci revient à dire qu'il est autant probable que la rupture affecte un ouvrage neuf soumis à de très fortes sollicitations qu'un ouvrage très dégradé soumis à de faibles sollicitations. Des classes d'aléa, allant de faible à très fort, sont alors définies en fonction de la note finale.

3.2. Détails concernant les paramètres entrant en jeu

Les trois aléas identifiés sont attachés à différents processus liés aux variations dynamiques du niveau d'eau : l'érosion de pied, la pression interne, la submersion et l'érosion en crête, l'impact direct des vagues, la rupture des talus.

3.2.1. L'érosion de pied

L'affouillement en pied d'ouvrage a pour conséquence le départ des matériaux support par le fond et le glissement du revêtement des ouvrages de protection. La propension à affouiller dépend généralement de la nature de la fondation, de la géométrie du pied, de la variation dynamique du niveau d'eau, de la vitesse du courant au droit de l'ouvrage, du niveau moyen de sable en pied d'ouvrage.

Pour ce qui concerne l'affouillement dû à la sollicitation marine, les résultats d'essais réalisés ont montré que les seuils d'instabilité décroissaient avec le niveau d'eau en pied de talus, aussi, plus le niveau d'eau devant l'ouvrage est faible, plus l'énergie dissipée en pied est forte (Tabet *et al.*, 2004). En première approximation, on peut considérer que la profondeur d'érosion peut atteindre la valeur de la hauteur de houle réfléchi par les ouvrages.

Pour ce qui concerne l'affouillement dû à la sollicitation fluviale, en période de crue, les alluvions de fond du lit sont charriées sous l'action de l'écoulement. La formule d'Izard et Bradley permet d'évaluer les affouillements locaux maximaux en pied des culées de ponts. Selon Ramette, elle est

tout aussi adaptée pour estimer les affouillements locaux dus aux obstacles ou aux fortes courbures du lit naturel (méandres prononcés). Pour les lits naturels, sans obstacles et sensiblement rectilignes, il propose de prendre la moitié de la valeur maximale de hauteur d'écoulement (Ramette, 1981).

3.2.2. La pression interne

La pression interne peut avoir trois conséquences : le soulèvement des parements, le glissement des parements, la migration et/ou la déformation du matériau support. Les paramètres qui entrent en jeu dépendent principalement de la perméabilité de la protection.

Dans le cas d'une protection perméable, comme c'est souvent le cas pour les ouvrages de protection côtiers, les sous-pressions résultent de la différence de niveau entre les eaux infiltrées lors de la montée de la vague et du niveau à l'extérieur à la cote minimale correspondant au retour de vague. La force qui en résulte dépend des caractéristiques de la houle et du run-up ainsi que du fruit du talus. Elle est susceptible de soulever le parement de la protection.

3.2.3. Erosion en arrière de la crête

La submersion des ouvrages de protection dépend de leur cote de crête, du niveau statique maritime et du run-up sur le parement. Le guide EurOtop (2007) propose des formulations pour estimer le run-up sur des digues ou des parements inclinés.

Le run-up dépend de la hauteur de la houle déferlante en pied de protection. Cette hauteur dépend de la hauteur d'eau pour le niveau statique de référence. Ce niveau est difficile à estimer car il est fluctuant en fonction de la saison.

3.2.4. L'impact direct des vagues

L'impact de la vague est dépendant de la pente du talus et de la hauteur de creux de la houle déferlante. En réalité, l'impact est moins problématique que le soulèvement mais l'érosion peut se produire dans les zones de rupture géométrique, en particulier en pied, par dissipation privilégiée de l'énergie. Par ailleurs, en cas de cavité associée ou non à une usure de parement, l'instabilité peut contribuer à la dégradation.

La hauteur des vagues devant les ouvrages est directement dépendante de la hauteur d'eau et de la pente de la plage, c'est-à-dire de l'aléa érosion. De fait, moins il y a de sable devant les ouvrages, plus l'ouvrage est exposé à la houle.

3.2.5. La rupture des talus par glissement

En terrain meuble, les glissements s'effectuent suivant des surfaces plus ou moins circulaires sous l'action des pressions interstitielles générées par les variations du niveau d'eau devant les ouvrages. La rupture se produit le long d'une surface de glissement potentiel lorsque la force déstabilisatrice due aux pressions interstitielles, aux forces volumiques, aux surcharges, etc. devient supérieure à la force stabilisatrice due au cisaillement maximal du sol le long de cette surface.

Les paramètres qui interviennent dans le calcul du glissement sont le poids volumique, la cohésion et l'angle de frottement du sol, la durée et l'intensité de la sollicitation hydraulique ainsi que la géométrie du talus (pente en particulier).

4. Application au cas de Lacanau

4.1. Présentation du cadre de l'étude

Dans le cadre de la problématique du recul du trait de côte au niveau de la commune de Lacanau-Océan, l'étude de stratégie locale de la gestion du trait de côte menée par Sogreah en 2011 a défini divers scénarios de modes de gestion, allant de l'inaction la plus totale au repli stratégique des enjeux de première ligne. L'objet de l'étude pour laquelle est missionné le groupement ISL-CASAGEC concerne l'application du Scénario n°3b, dit de « lutte active au droit du front de mer ». Il s'agit d'effectuer un diagnostic de l'état actuel du front de mer et de définir des actions à entreprendre afin de garantir son maintien à l'horizon 2040 voire 2100, le temps de préparer et de mettre en œuvre le repli stratégique des enjeux situés en première ligne.

4.2. Estimation de l'aléa hydraulique

4.2.1. Climat de houle au large

Le climat de houle au large est décrit grâce à la base de données ANEMOC. Cette base de données a été construite par le CETMEF (2010) à partir de simulations rétrospectives sur une période de 23 ans et 8 mois pour la façade Atlantique effectuées avec le logiciel de modélisation des états de mer TOMAWAC.

Deux points sont exploitables à proximité de Lacanau, l'un à une distance de 50 km en face du site (profondeur : 100 m), l'autre à une distance de 6 km mais situé plus au Sud du site (profondeur : 29 m). On notera que, près des côtes, la majorité des houles proviennent du secteur Ouest à Nord-Ouest. Les houles les plus fréquentes sont d'une hauteur significative comprise entre 0 et 5 m et des périodes de 6 s à 13 s. Les houles ayant une hauteur significative supérieure à 7 m ont une période supérieure à 10 s.

4.2.2. Caractéristiques de la marée astronomique

Dans le Golfe de Gascogne, la marée astronomique est de type semi-diurne avec une période de 12h25 mn. L'onde de marée, y progressant comme dans l'Atlantique du Sud vers le Nord, aborde la côte aquitaine perpendiculairement dans sa plus grande partie.

Les hauteurs caractéristiques de la marée à Lacanau sont données par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). Les Plus Hautes Marées Astronomiques (PHMA) sont évaluées à 2,92 m NGF.

4.2.3. Les surcotes météorologiques

Aux niveaux astronomiques viennent s'ajouter les effets météorologiques liés principalement au vent et aux variations de pression atmosphérique. Les surcotes météorologiques peuvent être dues à :

- Une diminution de la pression atmosphérique accompagnée d'une hausse du niveau de la mer.
- Une surélévation des niveaux de la mer sous l'action d'un vent de mer du fait de frottements en surface et de la présence de la côte.

– Un accroissement des niveaux de la mer lié au déferlement des vagues (setup induit par les vagues) qui peut atteindre 3 à 8 % environ des hauteurs de vagues.

Une étude a été réalisée par le SHOM en 2012 sur les périodes de retour de ces phénomènes de surcote sur les côtes françaises. Elle donne, en particulier, les niveaux d'eau extrêmes de période de retour décennal et centennal sur la côte Aquitaine. Ce résultat ne prend pas en compte le setup induit par les vagues. Sur le littoral canalais, le niveau d'eau extrême est estimé entre 3,3 m et 3,5 m NGF avec une période de retour décennale et entre 3,5 m et 3,7 m NGF avec une période de retour centennale.

4.2.4. Elévation du niveau de la mer lié au réchauffement climatique

A cause de la fonte des glaciers, de la perte progressive des glaces du Groenland et de l'Antarctique, et surtout de la dilatation thermique de l'eau, il est prévu que le niveau moyen des océans s'élève au cours des siècles à venir. Le niveau moyen de la mer s'est par ailleurs élevé de 15 à 20 cm au cours du siècle dernier (1,5 à 2 mm/an). Cette élévation n'est pas uniforme tant à l'échelle de la planète qu'à celle de l'Océan Atlantique.

L'ampleur de cette augmentation est difficile à déterminer et a une forte probabilité d'être comprise entre 20 cm et 1 m d'ici à 2100. Le rapport de l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) de 2011 préconise la prise en compte d'une surélévation du niveau marin d'environ 60 cm à l'horizon 2100 et de 100 cm pour une hypothèse extrême. Pour notre étude, il a été décidé d'utiliser une surélévation due au changement climatique plus pessimiste de 0,4 m pour l'aléa à échéance 2040 et de 1,0 m à l'échéance 2100.

4.2.5. Propagation des états de mer et niveaux d'eau au pied des ouvrages

Afin de calculer le niveau d'eau et l'agitation devant les ouvrages, un travail en deux temps a été réalisé par le bureau d'étude CASAGEC afin de propager les états de mer à la côte :

– Une propagation des états de mer du large (cf. section 4.2.1) jusqu'à la cote -6 m NGF grâce à des formulations paramétriques (Goda, 2000) prenant en compte les différents processus de transformation de la houle lorsqu'elle se propage (réfraction, diffraction, shoaling, déferlement) : les calculs ont été réalisés pour différentes marées, pour une pente moyenne des fonds de 0,01 %, un angle d'incidence frontal le plus pessimiste (direction perpendiculaire à la cote), plusieurs hauteurs significatives de houle au large et plusieurs périodes de pic au large.

– Une propagation de la cote de -6 m NGF jusqu'aux ouvrages grâce à un modèle de type « 1D cross shore (Battjes et Janssen (1978)) » : ce modèle calcule la dissipation d'énergie de la houle le long d'un profil cross-shore, et le set-up induit par le déferlement.

Ces modélisations ont permis de déterminer le setup induit par les vagues, la hauteur significative devant les ouvrages ainsi que le run-up sur les ouvrages (formules de l'EurOtop). Les résultats obtenus ont ensuite servi de base au calcul de l'aléa théorique des ouvrages du front de mer.

4.3. Estimation de l'aléa théorique

4.3.1. Aléa érosion en crête

L'ensemble du linéaire de protection en enrochements du front de mer de Lacanau est soumis à l'aléa « érosion en crête ». On rappelle que l'aléa repose principalement sur le calcul du run-up, ce dernier étant réalisé par le bureau d'étude partenaire CASAGEC.

ISL a choisi de définir l'aléa « érosion en crête » comme le rapport entre la cote maximale atteinte par la vague (niveau statique + run-up R_u) et la cote maximale de l'ouvrage (cote de la crête de la protection en enrochements Z_c). En fonction de la valeur de ce rapport et des dommages attendus en crête, quatre classes d'aléa sont définies : faible, modéré, fort, très fort.

Du fait de la faible hauteur de la crête de la protection en enrochement par rapport au niveau statique de référence (revanche comprise entre 60 et 190 cm en fonction des profils), l'ensemble du linéaire des ouvrages de protection du front de mer de Lacanau est concerné par un aléa « érosion en crête » FORT à TRES FORT pour l'évènement de référence. Le calcul montre que la cote de crête du talus en enrochements est trop basse et ne permet pas d'assurer une bonne protection contre les franchissements et l'érosion de la dune en arrière de l'ouvrage.

4.3.2. Aléa affouillement

L'ensemble du linéaire de protection du front de mer est soumis à l'aléa « affouillement ». On rappelle que la profondeur d'affouillement peut être définie comme la profondeur maximale d'affouillement par rapport au niveau initial du fond. Cette profondeur dépend des caractéristiques de la houle incidente, de la hauteur d'eau locale, de la géométrie de l'ouvrage et de son coefficient de réflexion C_r donné par la formule suivante (Guide enrochements, 2007) :

$$C_r = \frac{0,635\sqrt{R}}{41,2+\sqrt{R}} \quad \text{avec } R = \frac{h.L_0.\tan \alpha}{H_i.D_{50}}$$

Dans le cas de la protection en enrochements, il est fait l'hypothèse que l'affouillement en pied d'ouvrage D est de l'ordre de grandeur de la hauteur de houle réfléchi en pied d'ouvrage, soit $D = H_r = C_r.H_i$. Si la profondeur d'affouillement atteint ou dépasse la cote des fondations de l'ouvrage, il y aura rupture. En posant N_p la cote du pied de l'ouvrage et Z_f la cote de fondation des ouvrages, quatre seuils d'aléa sont définis en fonction du rapport $D/(N_p-Z_f)$: faible, modéré, fort, très fort.

A défaut de reconnaissances géotechniques, la cote de fondation des enrochements a été prise égale à la cote indiquée sur les coupes-types des documents archives disponibles. Le niveau de plage moyen mesuré en pied d'enrochements est de l'ordre de +3,7 m NGF.

Pour l'évènement de référence, la majorité du linéaire de protection du front de mer de Lacanau est concernée par un aléa « affouillement » FORT. L'aléa est MODERE sur les zones où le niveau de plage est plus élevé, de l'ordre de +4,3 m NGF. A l'inverse, il est TRES FORT dans les zones où le niveau de plages est inférieur, de l'ordre de +3,0 m NGF.

Le calcul de l'aléa « affouillement » montre que la profondeur d'ancrage ne garantit pas une protection suffisante contre les affouillements de pied, le talus étant susceptible d'être désorganisé par glissement des enrochements.

On notera que les hypothèses sur le niveau de plage et la cote de fondation des ouvrages jouent un rôle prépondérant dans le calcul de l'aléa « affouillement ». A titre d'exemple, on montrera qu'une diminution de 20 cm du niveau de plage au devant des enrochements entraîne une augmentation d'une classe de l'aléa « affouillement » pour l'ensemble des profils, une diminution de 50 cm de la cote de sable fait, quant à elle, passer la majorité des profils en catégorie d'aléa TRES FORT.

4.3.3. Aléa soulèvement / instabilité des blocs

Le calcul de cet aléa repose sur l'évaluation de l'aptitude au soulèvement des enrochements de protection du pied de dune. On se base sur les recommandations du Guide enrochement pour la vérification de la stabilité des ouvrages côtiers. La formule de Hudson (Guide enrochement, 2007) définit le diamètre nominal médian des blocs à disposer afin d'assurer un niveau de dommage compris entre 0 et 5 % pour une hauteur de vague donnée H_{s_0} :

$$\frac{H_{s_0}}{\Delta \cdot D_{50}} = (K_d \cdot \cot \alpha)^{1/3}$$

Avec : H_{s_0} hauteur de vague en pied d'ouvrage, D_{50} diamètre nominal médian des blocs, α angle du talus par rapport à l'horizontale, Δ densité relative déjaugée des blocs, et K_d coefficient de stabilité (égal à 2 dans le cas d'une houle déferlante).

Inversement, pour chaque tronçon de la protection du front de mer, en fonction du diamètre nominal des enrochements, on peut calculer la hauteur de la houle correspondant à un dommage de 0 à 5 % et la comparer à la hauteur de houle H_s observée en pied d'ouvrage. On définit alors quatre classes d'aléa en fonction du rapport H_s / H_{s_0} : faible, modéré, fort, très fort.

Pour l'évènement de référence, les tronçons du linéaire de protection du front de mer de Lacanau concernés par un aléa « soulèvement » FORT à TRES FORT correspondent à une typologie de talus raide (fruit inférieur à 2H/1V) couplé à une taille de blocs insuffisante (D_{50} inférieur à 60 cm). Certains profils sont soumis à un aléa MODERE du fait du talus plus doux (2,3H/1V) et de la meilleure blocométrie ($D_{50} = 70$ cm) qui les caractérisent. Le calcul montre, qu'en règle générale, le talus est globalement trop raide et les blocs trop hétérogènes (présence de blocs de dimension insuffisante).

4.4. Aléa de rupture global

L'aléa de rupture global des ouvrages est défini comme le croisement entre l'aléa théorique, combinaison des trois aléas décrits précédemment et l'état de dégradation des ouvrages observé visuellement. On rappelle que :

- à chaque aléa de rupture, on attribue une note de 0 à 3 en fonction de la classe d'aléa des tronçons. Les notes sont additionnées pour obtenir l'aléa de rupture théorique globale de l'ouvrage. En première approximation, aucun coefficient de pondération n'est appliqué : les différents modes de rupture sont traités sur un pied d'égalité (on considère que chaque mode a la même probabilité de conduire à la ruine complète de l'ouvrage).

- pour chaque tronçon d'ouvrage, on donne une note de 0 à 3 permettant de caractériser l'état de dégradation de la protection en enrochements. Cette note est donnée à dire d'expert à partir des observations réalisées lors de l'inspection visuelle. La majorité du linéaire est en mauvais voire en très mauvais état (notes de dégradation comprises entre 2 et 3).

Le calcul de l'aléa de rupture global des ouvrages est réalisé pour l'évènement de référence. Un seul profil présente un aléa de rupture global MODERE qui résulte de la combinaison entre un état de dégradation correct (1 / 3) et un aléa théorique modéré (1,7 / 3). Les profils 6 (Sud) et 7 présentent un aléa de rupture FORT qui résulte de la combinaison entre un état de dégradation marqué (2 / 3) et un aléa théorique modéré à fort (entre 1,7 / 3 et 2,3 / 3). Tous les autres profils présentent un aléa de rupture TRES FORT. Ils cumulent à la fois un état de dégradation très marqué (3 / 3) et un aléa de rupture fort à très fort (entre 2,3 / 3 et 2,7 / 3).

La figure ci-dessous présente le rendu cartographique de l'étude et les niveaux de préoccupation qui en découlent (plus l'aléa est fort, plus il est urgent d'entreprendre des confortements).



Figure 2. Cartographie des niveaux de préoccupation

5. Conclusion et retour d'expérience sur la méthode

La méthode de calcul d'aléa de rupture mise au point par ISL permet de mettre en évidence les différents modes de rupture susceptibles d'affecter les ouvrages de protection côtières et leur sensibilité à chacun de ces aléas (érosion en crête, affouillements en pied, soulèvement des parements). L'aléa de rupture global permet quant à lui de détecter les tronçons les plus préoccupants et offre la possibilité au gestionnaire de définir un programme d'intervention adapté.

On notera que le début d'année 2014 (de janvier à mars) a été marqué par le passage de nombreuses tempêtes qui ont attaqué et fragilisé le front de mer de Lacanau. Sous l'impact de ces tempêtes, un recul dunaire estimé à près de 25 m au Nord et 15 m au Sud a été constaté, la protection en enrochements a, quant à elle, été en partie submergée et désordonnée : l'érosion dunaire en arrière de la crête a été profondément marquée. Les zones identifiées comme critique par ISL sont celles qui ont le plus souffert, ce qui tend à valider, en partie, la méthode proposée.

La méthode fournit par ailleurs une aide au dimensionnement en donnant la possibilité de tester rapidement différentes solutions de confortement et de déterminer leur impact sur le niveau d'aléa de la protection. ISL a montré que le confortement qu'il propose pour le front de mer de Lacanau (adoucissement des talus, épaissement de la protection, surélévation de la crête, ajout d'une butée de pied anti-affouillements, etc.) permet de passer d'un aléa global actuel TRES FORT sur la

majorité du linéaire à un aléa FAIBLE pour l'évènement de référence à l'horizon 2040 et MODERE pour l'avènement de référence à l'horizon 2100.

La méthode reste toutefois expérimentale et mériterait d'être testée sur d'autres types d'ouvrages et d'autres sites d'études : les calculs effectués par ISL sur le site de Mimizan montrent que cela est parfaitement réalisable en adaptant les modes de rupture considérés à la typologie des ouvrages étudiés. La manière de combiner les différents modes de rupture pourrait aussi être affinée en intégrant, par exemple, des coefficients de pondération permettant de hiérarchiser les modes de rupture intervenant dans la ruine des ouvrages.

Bibliographie non numérotée et références

- Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M., (1978). *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*, Proceedings Coastal Engineering. ASCE, pp. 569-587.
- CETMEF (2009). *Guide Enrochement*, L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques, Version française du Rock Manual (2^{ème} édition), Compiègne, 2009.
- EurOtop (2007). *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures : Assessment Manual*, Archive for Research and Technology on the North Sea and Baltic Coast, 2007.
- Goda Y. (2000). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Advanced Series on Ocean Engineering 15 (2 ed.). Singapore: World Scientific. ISBN 978-981-02-3256-6.
- ONERC (2010). *Report to the Prime Minister and Parliament : Cities and adapting to climate change*, National Observatory for the Impacts of Global Warming, Novembre 2010.
- Ramette M. (1981). *Guide d'hydraulique fluviale*, Rapport HE/40/81/04 du Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou.
- SHOM, CETMEF (2012). *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France*, Edition 2012.
- SOGREAH (2011). *Stratégie de gestion du trait de côte en Aquitaine, Façade océanique, Site test : Lacanau*, Rapport, Septembre 2011.
- Tabet et al. (2004). *Effet de la butée de pied posée à faible profondeur sur la stabilité de talus de protection*, VIII^{èmes} Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, 7-9 septembre 2004, Compiègne.

Enjeux et défis de la vigilance face aux risques côtiers dans des contextes de développement rapide

Présentation du plan régional de prévention des risques côtiers en Afrique de l'Ouest et de la Mission d'Observation du Littoral ouest africain

Jean-Jacques Goussard¹

1. Coordonnateur du Groupe Expert Côtier de la Commission de Gestion des Ecosystèmes – Union Internationale pour la Conservation de la Nature – Directeur EAM-GEOME – Chargé de mission EOS.D2C.

1, rue Falret – 92170 – Vanves - France

jj.goussard@eco-evaluation.org

RESUME

La mise en place en 2011, du plan régional de prévention des risques côtiers en Afrique de l'Ouest (schéma directeur littoral de l'Afrique de l'Ouest - SDLAO) à l'initiative de l'Union Economique et Monétaire ouest africaine, et réalisé par l'UICN (programme marin et côtier pour l'Afrique centrale et occidentale et groupe expert côtier de la Commission Mondiale de Gestion des Ecosystèmes), s'est traduite par le lancement de la Mission d'Observation du Littoral Ouest Africain basée au Centre de Suivi Ecologique de Dakar. Ce dispositif régional, créé sur décision des ministres de l'environnement des 11 pays concernés de la Mauritanie au Bénin, répond aux tendances lourdes du développement côtier et de l'intensification des risques associés qui avaient été anticipées au travers de la dimension prospective du SDLAO. Ce dispositif régional, qui contribue à l'opérationnalisation de l'article 10 de la Convention d'Abidjan, vise à informer et sensibiliser les décideurs nationaux quant aux changements et évolutions intervenant sur l'ensemble des 11 000 km de côte ouest africaine et à actualiser l'information rendue disponible aux décideurs sur l'évolution des risques côtiers (enjeux et aléas) par rapport à la situation de référence définie par le SDLAO. L'expérience de la première année de fonctionnement de cette mission pilote en Afrique, et l'évolution constatée depuis le SDLAO quant à l'occupation des littoraux dans des contextes de développement rapide mettent en évidence l'importance croissante des enjeux côtiers. Cette première année a aussi permis d'identifier de nouveaux défis à relever, notamment en matière de gouvernance du risque côtier, d'interdépendances et de solidarités inter-Etats quant aux systèmes de vigilance à développer à l'échelle régionale, et de gestion des diverses échelles territoriales pour appréhender les déterminants et conséquences de la mobilité du trait de côte, particulièrement prononcée en Afrique de l'Ouest.

ABSTRACT

The achievement in 2011, of the regional masterplan for coastal risk reduction in West Africa (SDLAO – West African Coastal Management Scheme) at the initiative of the Economic and Monetary Union of West Africa, and implemented by IUCN (marine and coastal program for Central and West Africa and coastal expert group of the IUCN Ecosystem Management Commission), has resulted in the launch of the West Africa Coastal Observation mission based managed by the Dakar Ecological Monitoring Centre. This regional network, established by decision of the Ministers of the Environment of 11 countries from Mauritania to Benin, have been set up as a response to increased risks and coastal development trends that were anticipated through the prospective approach developed in the SDLAO. This regional system, which contributes to the operationalization of the Abidjan Convention article 10, aims to inform national policy and decision makers on the changes and developments taking place on all 11 000 km west African coast. Updated information on the development of coastal risks (stakes and hazards), compared to the 2011 baseline established by the SDLAO, will be made available to decision makers. The experience of the first year of operation of this pilot monitoring mission in Africa, and the developments which have been observed since the SDLAO on coastal occupation highlight the

growing importance of coastal risks. This first year also allowed to identify new challenges, particularly in terms of coastal risk governance, interstate interdependence and solidarity regarding the implementation of monitoring and vigilance systems. Another challenge is the management of various territorial scales to understand the determinants and consequences of shoreline dynamic, particularly pronounced in West Africa.

MOTS-CLES : trait de côte, aménagement des territoires côtiers, Afrique de l'Ouest, érosion, services écosystémiques, approche éco systémique, observatoire, prospective, risques côtiers.

KEYWORDS : shoreline, coastal land use planning, west africa, erosion, ecosystemic services, ecosystem approach, observatory, prospective, coastal risks.

1. Introduction

L'érosion côtière, la mobilité du trait de côte et plus largement l'évolution naturelle des littoraux, ont des conséquences sociales et économiques importantes, qui sont observées en Afrique de l'Ouest depuis plusieurs décennies. Ces impacts, déjà relevés lors de plusieurs conférences ministérielles panafricaines, sont aujourd'hui croissants, et d'autant plus marqués que la concentration des populations et des infrastructures dans la frange côtière s'accroît rapidement.

Le recul du trait de côte généralement observé en Afrique de l'Ouest découle de facteurs divers, naturels, liés au changement climatique, mais aussi et surtout d'origine humaine. L'artificialisation des façades littorales, la dégradation des écosystèmes naturels côtiers (infrastructures vertes), l'extraction de matériaux ou encore la multiplication des barrages et retenues d'eau qui limitent les apports sédimentaires sur ces littoraux fragiles contribuent au développement des dynamiques observées. S'y s'ajoute l'absence de coordination des actions d'aménagement, particulièrement de défense des côtes, tant au niveau local que national et inter Etats. Ces différents éléments concourent à aggraver les situations de risque observées et les menaces pesant sur les biens et la sécurité des populations.

Face à l'intensification des risques côtiers, l'UEMOA (Union Economique et Monétaire Ouest Africaine) a confié à l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) la responsabilité de conduire une étude visant à établir un plan de prévention des risques côtiers en Afrique de l'Ouest au travers d'un schéma directeur d'aménagement des littoraux de l'Afrique de l'Ouest (SDLAO - UEMOA-IUCN. 2011). La validation le 6 mai 2011 de ce plan régional concernant 11 pays ouest africains a débouché sur la mise en place d'une mission régionale d'observation du littoral ouest africain.

2. Une initiative coordonnée concernant onze pays d'Afrique de l'Ouest de la Mauritanie au Bénin et couvrant les façades maritimes du Courant des Canaries et du Courant de Guinée

L'étude a impliqué plus de 130 experts et chercheurs, scientifiques et techniciens issus de onze des pays de la région et de différents laboratoires universitaires, ainsi que des expertises internationales spécialisées. L'approche méthodologique multiscalaire retenue a contribué à fédérer ces différentes compétences et à établir un réseau scientifique et technique à la fois régional et international. La valorisation de ces ressources mises en réseau contribue à enrichir les perspectives opérationnelles du Programme Régional de Lutte contre l'Erosion Côtière (PRLEC) de l'UEMOA, et les

capacités de réponse des Etats côtiers face à une intensification attendue des risques sur ces littoraux.

Compte tenu de la diversité des échelles à aborder et du large champ géographique de cette initiative, ce travail revêtait un caractère exploratoire, notamment au plan méthodologique. Il s'agissait également, au plan opérationnel, de fixer des priorités géographiques et thématiques pour la réduction des risques côtiers et l'observation du littoral au travers de la mise en place d'un dispositif de veille, vigilance et d'anticipation de l'évolution des risques identifiés. Les quelques antécédents conduits dans d'autres régions du monde, comme le programme européen Eurosion, débouchaient sur des éléments difficilement applicables dans le contexte ouest africain du fait du déficit, de la disparité et de l'hétérogénéité des données disponibles sur les systèmes côtiers dans les différents pays concernés.

3. Quelques éléments du diagnostic

Le schéma directeur s'appuie sur un diagnostic détaillé effectué à l'échelle régionale, et au travers de diagnostics nationaux. Ceux-ci ont été complétés par un ensemble d'études de cas menées localement par des équipes universitaires de la région sur les secteurs les plus menacés pour lesquels on disposait de séries de données historiques.

3.1. Littoral ouest africain : les causes de la fragilité

Le trait de côte en Afrique de l'Ouest apparaît globalement fragile et dynamique, généralement composé de formations sédimentaires meubles et érodables. Les caps rocheux constituent moins de 3 % du linéaire côtier, et sont constitués de formations fracturées et altérées, également sujettes à l'érosion et au recul. Les littoraux meubles sont particulièrement sensibles aux différents facteurs issus du milieu marin et atmosphérique (vagues, courants, vents, marées) qui influencent leur évolution. Le rôle des eaux continentales lors des épisodes de pluies intenses et de crues fluviales doit également être pris en compte.

Les apports sédimentaires sont relativement limités et partiellement piégés par les retenues des grands barrages au nombre d'environ 150 en Afrique de l'Ouest.

Ces apports sédimentaires sont redistribués sur les façades ouest atlantique et du Golfe de Guinée par l'action des courants côtiers et des houles (dérive littorale approximativement parallèle au rivage), dont l'interruption ou la perturbation par des aménagements tels que les ports se traduit inévitablement par des phénomènes d'érosion ou d'accrétion affectant la stabilité du trait de côte.

3.2. Les écosystèmes naturels au service de la protection des littoraux

Tout au long d'une dizaine de milliers de kilomètres, le littoral ouest africain est caractérisé par différents écosystèmes naturels – parfois dégradés - parmi lesquels les mangroves (qui couvrent environ 14 000 km²), le chapelet des petits estuaires de la Sierra Leone au Bénin, le système des lagunes et marais côtiers de la Côte d'Ivoire au Ghana et différentes formes d'accumulation sédimentaire (bancs, cordons dunaires), qui constituent autant de réserves stratégiques de sédiments contribuant, lors de leur remobilisation, à équilibrer le bilan sédimentaire côtier

Les écosystèmes naturels procurent d'importants services écologiques aux sociétés côtières, contribuant notamment à limiter l'érosion et ses impacts (Temmerman S. *et al.*, 2013 ; Gewin V., 2013). Leur conservation, déjà largement justifiée au travers des engagements des Etats pour le maintien de la diversité biologique, contribue directement à la réduction des risques liés à la mobilité du trait de côte et aux stratégies d'adaptation au changement climatique. Le concept d'infrastructures naturelles déjà évoqué lors de la 10ème Conférence des Parties de la Convention sur la Diversité Biologique, mais aussi lors de la récente plateforme mondiale pour la réduction des risques, conduit à renouveler les approches de l'aménagement du territoire, en particulier sur le littoral. Il reste que ces services écologiques sont encore peu connus et reconnus des décideurs, voire des populations locales dans certains cas (Munji C. A., 2013).

3.3. Accroissement rapide des enjeux dans la zone côtière

Face à l'accroissement rapide des enjeux sociaux et économiques dans la zone côtière, les partis et les choix en matière d'aménagement des territoires côtiers revêtent aujourd'hui une importance stratégique. Le diagnostic réalisé incluait un chantier de prospective aux horizons 2020 et 2050, conduit selon une méthodologie déjà éprouvée dans le cadre de l'image à long terme (2020) de l'Afrique réalisée en 1998 (CSAO-OCDE, 1998). Les données démographiques ont été fournies par le programme Africapolis (Africapolis, 2008). Quelques conclusions issues de cet essai de prospective sont résumées comme suit :

- La zone côtière (ici considérée sur une frange de 25 km en profondeur) rassemble 31 % de la population totale et 51 % de la population urbaine des Etats côtiers.
- La population urbaine totale de la zone littorale dans les 11 pays pourrait doubler de 18 à 36 millions d'habitants entre 2000 et 2020, pendant que la population rurale devrait s'accroître de moitié.
- De 2020 à 2050, la population urbaine du littoral croîtrait de 36 à plus de 80 millions selon un scénario tendanciel et 74 millions dans un scénario modéré de «maîtrise des disparités».
- Quasiment toutes les capitales administratives et/ou économiques sont localisées sur la côte.
- Le niveau d'urbanisation y est plus de deux fois plus élevé que dans l'hinterland.
- La densité moyenne actuelle est de 260 habitants par km², avec des maxima de 1 000 habitants par km² au Togo et au Bénin et des zones à moins de 10 habitants par km² au Liberia ou en Guinée-Bissau. Certaines zones restent inoccupées. Dans le futur, ces densités pourraient dépasser largement 1 000 habitants par km² dans certains pays du Golfe de Guinée comme le Bénin.
- La frange littorale concentrerait aujourd'hui environ 56 % du PIB dans les Etats côtiers.
- L'étalement horizontal des espaces urbains est une tendance lourde, d'autant que la surface bâtie par habitant dans les villes ouest africaines est de 150 m² contre 125 dans la moyenne des PVD. La surface urbanisée dépasse 200 m² par habitant.

Cette réflexion prospective intègre également une accélération probable de la croissance économique en Afrique de l'Ouest avec des taux supérieurs à 5 % sur une longue période. Cette croissance soutiendra le rythme d'urbanisation de toute la région, qui verrait se renforcer le

processus de concentration de l'activité économique dans la zone littorale, avec la mise en place d'installations industrielles lourdes et le développement des productions agro-industrielles. Les tensions mondiales sur le marché des matières premières se traduisent déjà par différents projets de ports minéraliers liés au regain d'activité du secteur. Dans ce contexte de croissance économique favorable au sein de la sous-région, la plupart des ports africains sont déjà, et seront amenés à engager des travaux d'extension de leur capacité d'accueil. La pénétration croissante du secteur privé dans la gestion des ports, voire dans leur construction (pour les ports minéraliers), devrait inciter à la vigilance des Etats en vue de la prise en compte des impacts environnementaux et côtiers, voire sociaux, de ces nouvelles infrastructures.

Les aménagements de défense des côtes se multiplient actuellement dans toutes les grandes métropoles d'Afrique de l'Ouest, dans une coordination inter-Etats effective. Si certaines opérations ont fait l'objet d'études approfondies (Banjul en Gambie, Sud de Dakar, Cotonou au Bénin, Keta au Ghana (Boateng I., 2009), d'autres sont menées sans une prise en compte réaliste de l'efficacité et des impacts sur le long terme de ces réalisations.

L'empreinte de l'occupation humaine sur les littoraux ouest africains est et restera dominée par la concentration des populations et des enjeux économiques, qui s'expriment au travers du développement urbain et de ses précurseurs (désenclavement, électrification, évolution récente des stratégies et de la distribution de la pêche artisanale, etc.). Au travers du développement rapide du tourisme et des espaces résidentiels, généralement périurbains. Ces développements s'accompagnent de prélèvements de matériaux de construction sur le littoral qui accélèrent les phénomènes érosifs observés et du développement d'aménagements établis sur des zones basses remblayées et coupant les chemins de l'eau, accroissant les risques d'inondations d'origine fluviale ou pluviale. Ces tendances lourdes affectent directement les marais côtiers. Les phénomènes d'eutrophisation des eaux côtières et des lagunes sont également remarquables, avec des conséquences, économiques importantes, sanitaires ou sur les pêcheries artisanales (Smetacek V. et. Zingone A., 2013).

3.4. Face aux futurs : incertitudes liées aux effets du changement climatique

Si la prospective démographique et économique permet d'ébaucher une image des risques futurs, la prospective climatique reste très incertaine en Afrique de l'Ouest. Une élévation du niveau de la mer de 3 mm/an (Jones N., 2013) va également se traduire par des surcotes exceptionnelles qu'il importe aujourd'hui de pouvoir évaluer sur la base de scénarios (Obeysekera J. et Park J., 2012). L'intervalle considéré à l'horizon 2100 est compris entre 0,5 et 2 m (Williams S.J. 2013). Les différents phénomènes de subsidence d'origines diverses, mal connus et repérés en Afrique de l'Ouest jouent également un rôle important. Les conséquences sur la hauteur des vagues sont également importantes mais mal connues (Weisse R. et Von Storch H., 2010).

Dans plusieurs zones de cet espace côtier régional, les conséquences pourraient être dramatiques, comme pour la ville de Nouakchott, qui comprend de larges espaces construits au-dessous du niveau de la mer. D'autres grandes agglomérations urbaines sont aussi fortement menacées, d'autant plus que cette hausse du niveau marin s'accompagnera d'une augmentation de la fréquence des surcotes de tempêtes et d'épisodes de submersion, notamment dans les deltas et autres connexions fluvio-marines. Cette situation menace également les systèmes rizicoles en mangrove déjà lourdement affectés. Les intrusions d'eau salée seront plus fréquentes, altérant les

ressources en eau pour la consommation et l'agriculture (progression du biseau salé et surtout altération des lentilles d'eau douce littorales). Une diminution globale attendue de la pluviométrie totale au cours du XXI^e siècle se traduira par une diminution du débit des grands fleuves tel que le Sénégal et la Volta, qui s'accompagnera d'un déficit sédimentaire et d'une accélération de l'érosion côtière.

Le couplage d'un suivi permanent du trait de côte avec un suivi de l'évolution des conditions climatiques devra permettre de produire des scénarios à actualiser régulièrement, afin de réduire la forte incertitude qui entache aujourd'hui toute projection en matière climatique en Afrique de l'Ouest. Un suivi rapproché de la distribution des formations végétales côtières dans les aires marines protégées, nombreuses en Afrique de l'Ouest, pourraient également contribuer à mieux comprendre les modalités d'évolution du trait de côte.

4. Recommandations de la Conférence de Dakar (2011) : mise en place de la Mission d'Observation du Littoral Ouest africain (MOLOA)

Les recommandations formulées par l'étude sont conformes au principe de subsidiarité et ont vocation à être internalisées par les Etats au sein de leurs politiques sectorielles, et intégrées au sein des projets d'aménagement touchant les territoires côtiers. Ces recommandations sont autant de dispositions concrètes en vue de la réduction des risques côtiers et de l'application de l'article 10 de la Convention d'Abidjan. Elles s'inscrivent, de fait, dans une démarche d'adaptation au changement climatique pour les zones côtières, construite sur le long terme et sur une échelle régionale (Hortsman E.M. et al., 2009). Quatre axes, conformes aux principes du Cadre d'Action de Hyogo pour la réduction des risques de catastrophes naturelles, sous-tendent ces recommandations :

- **agir à toutes échelles du local au régional**, en considérant l'ensemble des acteurs et des niveaux de gouvernance ;
- **placer l'anticipation au cœur de la décision** : en étayant toute décision d'aménagement et de gestion sur une analyse prospective de la situation des segments de côte concernés, tant en termes d'évolution des aléas et de la sensibilité que d'évolution des enjeux ;
- **reconnaître la spécificité et l'identité des territoires littoraux**, en adoptant notamment des dispositions législatives et réglementaires ou des modalités de gouvernance adaptées à la spécificité et la multifonctionnalité des territoires côtiers ;
- **intégrer les infrastructures naturelles**, pour les services écologiques qu'elles offrent, comme des éléments à part entière à prendre en compte dans la conception de l'aménagement du territoire et l'organisation spatiale du développement en zone côtière.

Le schéma directeur, outre des recommandations générales sur l'aménagement des territoires côtiers, identifie également des enjeux émergents importants comme la privatisation des espaces publics littoraux (un littoral pour tous), ou la nécessité stratégique de développer des démarches d'aménagement spatial maritime à concevoir en cohérence avec l'aménagement des espaces terrestres du littoral. Ce schéma directeur propose un ensemble de recommandations priorisées pour l'aménagement et le suivi de chacun des 179 secteurs discriminés présentant des profils de risque (sensibilité aux aléas et enjeux) plus ou moins homogènes. Ce dispositif, qui a été reconfirmé récemment par des spécialistes issus des 11 pays, constitue le référentiel spatial utilisé par la MOLOA.

Les recommandations ci-dessus sont déclinées au travers de 4 programmes opérationnels, dont le premier est le programme de veille et vigilance, prévoyant la mise en place de la MOLOA. Il s'agit de doter la région et les Etats partenaires d'un instrument mutualisé et partagé de suivi et d'anticipation des risques côtiers, dans un contexte régional où la préparation des Etats à la gestion des risques naturels reste très hétérogène et généralement limitée (Tall. A. & al. 2013).

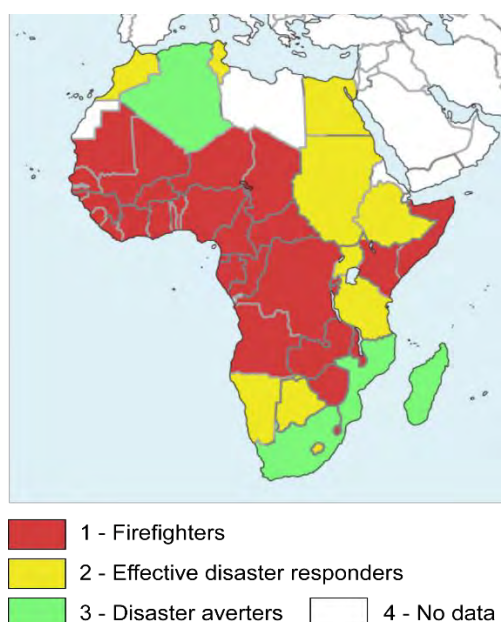


Figure 1. Mosaïque du niveau de préparation en matière de politiques nationales de réduction des risques de catastrophes naturelles en Afrique. D'après : Tall A. et al., 2013.

Cet instrument doit contribuer à la diffusion, vers tous les niveaux de décision, d'une information de qualité adaptée aux besoins de la planification spatiale, de l'aménagement du territoire, de la protection des côtes, de la réduction des risques et de l'adaptation au changement climatique. La MOLOA a également vocation à jouer un rôle dans le renforcement des capacités techniques et scientifiques des Etats de la région, en apportant un appui aux laboratoires de recherche et à la mise en relation de ceux-ci avec les réseaux scientifiques et techniques internationaux pertinents.

La mise en place de la MOLOA s'inscrit dans la continuité de l'étude SDLAO. Elle permet de valoriser ses acquis, données, protocoles, cartographie et surtout réseau humain de chercheurs et techniciens aujourd'hui établi à l'échelle de la sous-région et disposant de relais au plan international. Les principales missions de la MOLOA sont résumées comme suit :

- Collecter et analyser les données issues du dispositif régional d'observation et de suivi du trait de côte.
- Assurer une fonction de veille sur l'évolution des techniques en matière de suivi du trait de côte et de protection du trait de côte.

- De mettre en relation et en réseau (i) des spécialistes ouest africains disposant de compétences sur l'érosion côtière ; (ii) des spécialistes et laboratoires hors de la région pouvant permettre des transferts de technologie et de savoir faire utiles aux Etats côtiers. Cette fonction de mise en réseau pourra toutefois être déléguée et/ou relayée dans le futur par un Centre de Ressources intégré à l'Observatoire.

4.2. L'observatoire du littoral ouest africain : contraintes et opportunités

La MOLOA a été mise en place il y a un an. Elle est placée sous la responsabilité du Centre de Suivi Ecologique de Dakar et appuyée aux plans scientifique et technique par l'UICN. Son dispositif intègre une coordination régionale basée au Centre de Suivi Ecologique de Dakar et des antennes nationales dans chacun des pays.

Cette première année de fonctionnement a permis de mettre en évidence différentes contraintes de gouvernance, dont la principale est d'ordre structurel et institutionnel. Les acteurs a priori directement concernés par l'observation du littoral et le suivi du trait de côte, en général chercheurs, relèvent du monde universitaire, alors que la mission d'observation est placée sous la tutelle des ministères de l'environnement des pays concernés. La composition des différentes antennes nationales reste pourtant généralement riche et diversifiée, incluant de nombreux interlocuteurs institutionnels intéressés à la gestion côtière (pêche, tourisme, institutions de recherches, ports autonomes, etc...). Le manque de maturité souvent constaté de la décentralisation dans ces pays d'Afrique de l'Ouest se traduit néanmoins par une faible représentation des territoires et des élus locaux, pourtant concernés en premier lieu par l'évolution des risques côtiers.

Un second défi est d'ordre didactique, s'agissant de produire une information et des messages accessibles et exploitables par les décideurs, alors que la valorisation économique des impacts de la mobilité du trait de côte ou des réponses en matière d'aménagements ou simplement de mise en défens des infrastructures côtières naturelles restent difficiles (Jonkman S.N. *et al.*, 2013). Le constat effectué par le SDLAO quant au rôle crucial des politiques d'aménagement du territoire en matière de gestion des risques côtiers doit en effet conduire aujourd'hui à impliquer plus directement les instances en charge de la planification du développement et de l'aménagement des espaces côtiers. Les faibles ressources consacrées par les Etats pour l'établissement et l'actualisation d'une vision prospective de l'évolution rapide de l'occupation des espaces côtiers, ne contribue pas à la gestion d'une multifonctionnalité des littoraux toujours plus évidente. Pour l'Afrique de l'Ouest, compte tenu des spécificités et de la fragilité des systèmes côtiers, des modèles de développement innovants, par exemple dans le domaine du tourisme, restent à développer. Ces réflexions approfondies sont à conduire en liaison avec les opérateurs privés.

Un troisième point, commun à toute initiative régionale, concerne l'intégration spatiale et temporelle des différentes échelles de suivi du trait de côte, depuis l'observation localisée, par exemple au travers de webcams (Guastella L.A. et Smith A. M., 2014) jusqu'au suivi des politiques régionales d'intégration et d'aménagement de réseaux structurants de grandes infrastructures (transport, électricité, etc..), qui constituent des précurseurs de l'occupation du littoral. La SDLAO et les conférences régionales qui l'ont accompagné ont contribué à l'émergence d'une vision commune des risques côtiers qui doit être encore accompagnée, notamment par une clarification de ce qui relève des échelles nationale et régionale. La perception de problématiques partagées par les Etats

côtiers sur la façade maritime ouest africaine est ici plus difficile que dans des ensembles insulaires (Sud-Ouest de l'Océan Indien, archipel mélanésien) où les solidarités et réciprocités inter-Etats sont plus évidentes face aux risques partagés (déversements d'hydrocarbures, tsunami par exemple).

Une actualisation du bilan effectué en 2011 par le SDLAO est programmée pour 2015. Les premiers éléments recueillis montrent que les tendances lourdes mises en évidence par l'étude prospective du SDLAO en 2011 sont non seulement confirmées, mais également que les évolutions pressenties se développent à un rythme accéléré par rapport à ce qui était attendu.

REFERENCES

- Africapolis (2008) *Dynamique de l'urbanisation 1950–2020: approche géostatistique de l'Afrique de l'Ouest*. 38 p.
- Boateng I. (2009) *Development of integrated shoreline management planning: a case study of Keta*. unpublished. 19 p.
- CSAO (2009) *Climate change in West Africa. SWAC Briefing Note*. N 83, 8p.
- CSAO-OCDE (1998) *Pour préparer l'avenir de l'Afrique de l'Ouest: une vision à l'horizon 2020: étude des perspectives à long terme en Afrique de l'Ouest*. 160 p
- Guastella L.A., Smith A. M. (2014) Coastal dynamics on a soft coastline from serendipitous webcams: KwaZulu-Natal, South Africa. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. p. 1-10.
- Hortsman E.M., Wijnberg K.M., Smale A.J. et Hulscher S.J.M.H. (2009) On the consequences of a long-term perspective for coastal management. *Ocean & Coastal Management*. 52 (12), p. 593. &.
- Jones. N. (2013)- Climate science: Rising tide. *Nature*. 501, p. 301–302.
- Jonkman. S.N., Hillen M.M., Nicholls R.J., Kanning W. et Van Leeden M. (2013) Costs of Adapting Coastal Defences to Sea-Level Rise—New Estimates and Their Implications. *Journal of Coastal Research*. 29 (5), p. 1212-1226.
- Kintisch E. (2013) Can Coastal Marshes Rise Above It All ?. *Science*, 341, p. 480-481.
- Kirwan M.M.L., Megonigal J.-P. (2013) Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise. *Nature*. 504: p. 53-60.
- Munji C.A. (2013) Floods and mangrove forests, friends or foes? Perceptions of relationships and risks in Cameroon coastal mangroves. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 140, p. 67-75.
- Obeysekera. J., Park J. (2012) Scenario-Based Projection of Extreme Sea Levels. *Journal of Coastal Research*., 29 (1), p. 1-7.
- Tall A., Patt A.G., Fritz S. (2013) Reducing vulnerability to hydro-meteorological extremes in Africa. A qualitative assessment of national climate disaster management policies: Accounting for heterogeneity. *Weather and Climate Extremes*, 1, p. 4–16.
- Smetacek V. Zingone A. (2013) Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, 504, p. 84-88.
- Temmerman S., Meire P., Bouma T.J., Herman P.M.J., Ysebaert T. et DeVriend H. (2013) Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*, **504**, p. 79-83.
- UEMOA–IUCN (2011) *Schéma Directeur du Littoral d'Afrique de l'Ouest. SDLAO*. 654p. + cartographies au 1/500 000, 27 feuilles.
- Weisse R., Von Storch H. (2010) *Marine climate change: ocean waves, storms and surges in the perspective of climate change*. Springer, Berlin. 219 p.
- Williams S.J. (2013) Sea-Level Rise Implications for Coastal Regions. *Journal of Coastal Research*. 63 (sp.1), p.184-196.

THEMATIQUE ENJEUX

ISSUES THEMATIC

Cyclonic storm-surge risk: a hedonic case study of residential property in Exmouth, Western Australia

Rebecca Roberts¹, Lynnath E. Beckley¹ and Malcolm Tull²

1. School of Veterinary and Life Sciences, Murdoch University,
90 South Street, Murdoch, WA 6150, Australia

L.Beckley@murdoch.edu.au

2. School of Management & Governance, Murdoch University,
90 South Street, Murdoch, WA 6150, Australia

ABSTRACT.

Australia is particularly vulnerable to coastal hazards as 85% of the population lives along the coast and there is growing demand for coastal development. The town of Exmouth in north-western Australia was used as a case study to investigate economic strategies for coastal disaster risk reduction as it typifies expanding coastal development in areas prone to extreme weather events, such as cyclones. The extent to which perceptions of risk of cyclonic storm-surge inundation and flooding influenced the price buyers paid for residential property from 1988-2013 were examined using a Hedonic Price model. This incorporated dwelling variables, proximity to the coast, Cyclone Vance storm-surge levels (4m) and 1-in-100 year flood levels. The analysis indicated that prices did not reflect the real societal cost of risk and the influence of greater coastal amenity over-rode any sensitivity to potential risk by buyers. This study is highly relevant in view of the expansion of residential settlement and industry along the coast of northern Australia and the predicted effects of extreme weather events under climate change scenarios.

KEYWORDS: Property prices, economic instruments, environmental management

MOTS-CLES: Prix des propriétés, instruments économiques, gestion environnementale

1. Introduction

Recent major natural disasters in Australia have highlighted how some of the economic costs of living in risk-prone areas are borne by the rest of society. Australia is particularly vulnerable to coastal hazards as 85% of the population lives along the coast and there is a growing demand to construct residential buildings, amenities, transport networks and industrial developments. This study aimed to determine if coastal property buyers factored potential risk of cyclonic storm-surge inundation and flood risk into their property purchase decisions. The town of Exmouth, located in north-western Australia near the World Heritage Site of Ningaloo Reef, was used as a case study as it typifies expanding coastal and industrial development in areas prone to extreme weather events. Cyclones are regularly experienced in Exmouth and these cause strong winds, heavy rain and storm-surge, leading to inundation of the low-lying coastline. Further, flooding during cyclonic events associated with run-off from a low mountain range located east of the town is of particular concern. In 1999, the town was affected by the category five Cyclone Vance which severely damaged buildings and other public and private infrastructure in the town.

Previously, town planning limited development to the north-eastern part of Exmouth, in areas of higher elevation, away from the coastline and creeks. More recently, however, there has been residential development in low-lying areas including a marina constructed to provide real estate that is high in coastal amenity value. Properties in the marina are only about 1-2 m above the mean sea level. Construction of the marina has also resulted in the loss of disaster-mitigating natural capital functions in the area and there has been a loss of the fore dunes and secondary dunes as well as compaction of land immediately north of the marina behind the coastal dune system. Originally, this area functioned as a natural flood detention area, capturing excess water during heavy storms and cyclone events, and gradually allowing it to percolate into the ocean (Western Australian Government Dept. of Water & SKM, 2007). Channels and other protective engineering structures have been built to compensate for the loss of these functions, but these might be insufficient to withstand large flooding or cyclonic storm-surge inundation events (WA Government Dept. of Water & SKM, 2007). Erosion, as a result of storm-surge, will exacerbate the situation, and there is additional concern in the context of an almost 1 m predicted sea level rise along the coast of WA by the end of the century (WA Government Planning Commission, 2013).

2. Methods

The Hedonic Price model (HPM) theoretically specified by Rosen (1974) was used to disaggregate the impact of risk factors (location in the flood zone or areas prone to cyclonic storm-surge) on residential property prices from other attributes of residential property in Exmouth. This method has been extensively used to determine the effect of various property characteristics, such as the structure (e.g., lot size, number of bedrooms), the neighbourhood (e.g., distance to schools, average commute time), and the environment (e.g., proximity to recreational areas, degree of air pollution). The HPM has been increasingly applied to natural disaster risk, ranging from floods, earthquakes, hurricanes, fire, and volcanic eruptions to wind and erosion (Nakagawa *et al.*, 2009; Keskin, 2008; Stetler *et al.*, 2010; Rambaldi *et al.*, 2011). The underlying theory of this is that, just like positive environmental features, such as a scenic view can create an increase in property prices, greater exposure to a natural hazard can be reflected through diminished prices. Location of a property in a cyclone-prone area, flood-hazard zone, or along an earthquake fault line, can influence an

individual's perception of possible threat to life and property, and this may be reflected in the price he or she is willing to pay at the time of purchase.

Property sales data from 1988-2013 for Exmouth were used in a HPM to assess the perception of risk through location in areas prone to cyclonic storm-surge inundation, 100-year Average Return Interval (ARI) flooding and areas that were damaged by Cyclone Vance in 1999. Table 1 presents a summary of the data used in the analysis; most of the variables, with the exception of those depicting distance from urban amenities and lot size, were converted to dichotomous variables.

Table 1 Summary of the variables used in the HPM analyses carried out for Exmouth properties (1988-2013)

Variables	Data source	Data type in original data set	Converted form used in the HPM
Dwelling-specific variables			
Number of bedrooms, bathrooms, family rooms, dining rooms, games rooms, lounges, studies, kitchens, pools, carports or garages	Western Australian Valuer General (Landgate)	Numeric	Dichotomous
Lot size		Numeric (m ²)	No change
Year the dwelling was built		Date (Year)	Dichotomous
Wall and roof material		Alpha-numeric	Dichotomous
Property classification		Alpha-numeric	Dichotomous
Property classes		Alpha-numeric	Dichotomous
Land-use type		Alpha-numeric	Dichotomous
Distance from urban amenities		Numeric (m)	No change
	Straight-line distance of each of the properties from the nearest grocery store, coffee shop, restaurant, pub, book shop, and entertainment venue (Walk Score 2013)		
Risk variables			

Variables	Data source	Data type in original data set	Converted form used in the HPM
Located in 100-year ARI flood plain	Derived from spatial analysis (Roberts 2012)	Dichotomous	No change
Post-cyclone Vance		Dichotomous	No change
Six months		Dichotomous	No change
One year		Dichotomous	No change
Two years		Dichotomous	No change
Inundated by a 4 m storm-surge		Dichotomous	No change

2.1. Risk variables

Proxies used in the HPM equation were those representing risk exposure, based on location of property, and those representing risk awareness (Table 2). Variables that denoted the degree of exposure to risk were based on previous studies that used dichotomous variables for risk, where the value of one denotes that a property is located in a risk-prone area and zero if it is not (Bin *et al.*, 2008; Dei Tutu & Bin, 2002; MacDonald *et al.*, 1987; MacDonald *et al.*, 1990; Shilling *et al.*, 1989; Shabman & Stephenson, 1996).

Information from a scenario analysis carried out for Exmouth (Roberts, 2012), where the centroids of the transacted properties were overlaid with the storm-surge risk areas, was used to derive variables denoting areas at risk of storm-surge heights of 4 m. The coefficients of this variable measured the price difference between properties in the cyclonic storm-surge-prone area and other areas. The working hypothesis was that if a property was located in an area of risk of cyclonic storm-surge inundation, it would have a lower price than those located outside the risk zone, *ceteris paribus*. The price differential would therefore provide the discount value on the price of risk in this area.

Table 2 The variables used to denote risk exposure and risk awareness in the Hedonic Pricing study and the number of transacted properties for Exmouth (1988-2013)

Variables	Number of transactions
Inundated by a 4 m storm-surge	44
Located in the 100-year ARI flood plain	180

Post-cyclone Vance	
Six months	52
One year	93
Two years	150
Interaction variables	
100-year ARI * sold six months after Cyclone Vance	4
100-year ARI * sold one year after Cyclone Vance	6
100-year ARI * sold two years after Cyclone Vance	11

2.2. Correction for auto-correlation

As temporal auto-correlation results from property sales over multiple years, especially when annual sales in a market are sparse, the additional effect of time must be captured as part of the equation. The HPM study for Exmouth used dichotomous variables for each year over the study period in order to correct for temporal auto-correlation as specified by Taylor (2003) and used by Morgan (2007) and Bin *et al.* (2008). The data were also tested for possible effects of month and quarter of sale, but these were found to be insignificant. Bivariate correlation between sales prices and each of the variables in the dataset was carried out to determine those most suitable to be included in the final HPM. Those found to be significantly correlated ($p < 0.01$ and < 0.05) were selected.

3. Results

Applying the HPM specification of Rosen (1974) and the results of the bivariate correlation to property sales prices, the following equation was specified:

$$\text{Property Sale Price} = \alpha_0 + \beta_I S_I + \beta_J N_J + \beta_K R_K + \epsilon$$

where structural characteristics (S_I) = lot size (m^2), age of house (years), presence of a family room, property classification (flat, villa, house, single unit, duplex unit), wall material (iron, steel frame, brick, fibro, asbestos); neighbourhood characteristics (N_J) = distance to the nearest grocery shop (km); risk characteristics (R_K) = 4 m cyclonic storm-surge inundation risk, 100-year ARI flooding, sale of property within six months, one year and two years after cyclone Vance, and interaction effects between location in the 100-year ARI areas and sale after cyclone Vance; ϵ = residual error; α_0 = intercept; and β_I , β_J , β_K = coefficients of the structural characteristics, neighbourhood and risk characteristics, respectively.

3.1. Risk variables

Eight risk variables representing cyclonic storm-surge inundation and flooding in the Exmouth town site were tested (Table 3). Although it was expected that these variables would have a negative impact on property prices, this was not the case. Prices were, in fact, much higher in areas prone to cyclonic storm-surge (4 m) and 100-year ARI flood risk. The devastation caused by the category 5 Cyclone Vance, which severely damaged buildings and major public infrastructure in the town, had no effect on price. Even the prices of properties located in 100-year ARI areas that experienced flooding because of Cyclone Vance were not discounted for risk.

The first HPM analysis used the variables specified for the structural characteristics (S_i) and neighbourhood characteristics (N_j) as described in the above equation. The risk characteristic (R_k) tested was a 4 m cyclonic storm-surge and there were 44 property sales transactions within this risk area during the study period. The summary statistics are presented in Table 3 and linear, semi-log and log-log functional forms were significant ($p < 0.1$). The coefficient values, and their level of significance for the HPM, showed that the variable representing the risk of a 4 m cyclonic storm-surge (Table 3) was positive and significant ($p < 0.01$). The finding of this model indicated that buyers paid higher prices for properties located in risk-prone locations when compared to other areas, and buyers did not discount for risk as expected. An examination of the data showed that of the 44 properties sold in the 4 m storm-surge zone, 98% of these transactions were within the past 10 years (i.e. after 2000). Of these, 52% and 36% were located in the marina and recreational open space zones, respectively, and these were located at a distance of 130 – 700 m from the original shoreline of Exmouth Gulf.

Table 3 Summary of the coefficients and significance values for the risk variables under the Hedonic Pricing analyses carried out for Exmouth (1988-2013)

Variables	Number of transactions	Coefficients values and level of significance		
		Linear	Semi-log	Log-log
Inundation by a 4 m storm-surge	44	83,241**	0.42**	0.35**
Located in a 100-year ARI flood plain	180	40,305**	-0.05	-0.04
Post-cyclone Vance				
Six months	52	13,887	0.06	0.06
One year	93	15,181	0.08	0.08
Two years	150	8,103	0.08	0.05
Interaction variables				
100-year ARI * sold 6 months after Vance	4	78,660	0.51**	0.45**

100-year ARI * sold 1 year after Vance	6	61,900	0.36**	0.34**
100-year ARI * sold 2 years after Vance	11	48,454	0.22*	0.22*

**Correlation is significant at 0.01 level (two-tailed); *Correlation is significant at 0.05 level (two-tailed).

To determine the effect of Cyclone Vance, three separate regressions were run to test if there were any effects on property prices within 6-months, one-year and two-years after the event (R_k). Cumulatively, there were 52 sales transactions 6-months after cyclone Vance, 93 within a year after, and 150 sales in the two years following the event. The log-log model showed the highest R^2 value, where the variables used accounted for 83% of the variation in house prices. Given that the Durbin-Watson statistic (that tests for the presence of auto-correlation) was within the required range, this was considered the most appropriate functional form. The HPM carried out to determine if there was any effect on properties sold within six months, one year and two years after Cyclone Vance were not significant, indicating that there was no effect on sales prices if a property was sold within these time frames.

The location of a property within the 100-year ARI flood zone was the second risk characteristic (R_k) tested in a HPM model. There were 180 property sales transactions in the 100-year ARI area during the study period. Summary statistics indicated that the log-log was the best functional form ($R^2 = 0.84$). Although the coefficient for 100-year ARI risk was negative, it was not significant indicating that this also did not have an effect on sales price.

Finally, HPM analyses were undertaken to determine the possibility of interaction of Cyclone Vance with the 100-year ARI risk. Three separate regressions were carried out to represent the three risk characteristics (R_k), which comprised of the interaction effect between location in a 100-year ARI zone and the property being sold within 6 months, a year or two years following cyclone Vance. There were 4, 6 and 11 transactions that were located in the 100-year ARI risk zone and sold within 6 months, one year and two years of Vance, respectively. The positive significance of the coefficient in the semi-log and log-log HPMs implied that, even for properties located in the 100-year floodplain, the experience of Cyclone Vance did not result in any discount on property prices.

3.2. Other variables

Variables depicting properties with iron roofs or, if the property was a duplex unit, villa, house, flat or single unit, had a positive coefficient ($p < 0.01$), indicating preference for such houses. The variable for asbestos walls, resulted in lower property prices, and the significance of this coefficient ($p < 0.01$) indicated that buyers took this into serious consideration. Surprisingly, lot size and property age appeared to have no effect on price in the semi-log function, although the findings showed an increase in price if there was a family room in the house. The coefficients of these in the linear and log-log forms show a decrease in price for age of dwelling. Contrary to the findings of the bivariate model, the further away a property was from the shopping area, as represented by the variable indicating distance to a grocery store, the lower the price, which indicated that property owners had greater preference for properties with more access to urban amenities. This result was considered to be the most accurate finding, as multivariate regression models are considered to provide the better results than bivariate methods (Gujarati, 2006).

4. Discussion

This study found that properties located in the 4 m storm-surge prone areas at Exmouth had higher property values than others. Further investigation indicated that the positive effect created by greater access to coastal amenity influenced decisions to purchase property outweighing any concerns about cyclonic storm-surge inundation and flood risk. Similarly, a HPM analysis carried out by the Sydney Coastal Councils (2011), found that properties located on the beachfront along the Collaroy-Narrabeen area in New South Wales were 40% more valuable with buyers paying, on average, >\$1 million for such properties. Properties near Noosa Heads in Queensland with access to the ocean and with a view of the beach were also found to be more valuable (Pearson *et al.*, 2002). The Heinz Centre (2000) found that coastal properties in the USA were 4-8% more valuable than comparable inland property. Since all of the properties at risk of a 4 m storm-surge in Exmouth are located in the marina village, there are other associated benefits that could have been confounding the analysis. The houses are more modern, and the surrounding area is landscaped to provide an aesthetically pleasing environment, whereas other areas in the town are comparably less attractive.

The results of the HPM for 100-year ARI floods indicated that buyers do not factor the threat of cyclonic storm-surge and associated flooding due to rainfall into their property prices. A USA study which also used HPMs to investigate the major event versus 100-year floodplain interaction effect, found different results to those at Exmouth (Bin & Polasky, 2004; Morgan, 2007). This was attributed to the requirement, by law, for these properties to obtain insurance. However, there is no compulsory insurance requirement for home owners in Exmouth, or other parts of north-western Australia. The absence of a monetary signal via insurance to create awareness of risk in Exmouth could therefore be another reason buyers failed to factor risk into the prices they paid for coastal property. It also suggests that knowledge and awareness of risk may be insufficient to change economic behaviour.

A survey of local risk perceptions in the USA found that the presence of shoreline armouring, seawalls, and other structural devices created a sense of safety from coastal risk, to the extent that it suppressed the need to purchase flood insurance (Kriesel & Landry, 2004). This is another element which may also explain the findings of this study. At Exmouth, the flood drainage channels established in the marina village were built to direct excess flooding into the ocean. However, since their establishment, there has not been an opportunity to test the ability of these channels to mitigate flooding in the town site. The presence of these may be instrumental in creating a perception of safety among those purchasing property in this area.

4.1. Effect of Cyclone Vance

HPM analyses carried out to assess prices following Cyclone Vance, and the increased awareness and concern about potential danger, revealed no effect. This finding is different to that of Hallstrom & Smith (2005), who found a decrease in property prices in Florida, following Hurricane Andrew in 1992, even in areas that were not affected. This may be because those property owners living in risk-prone areas in the USA are compelled to pay higher insurance premiums following such major events. This is not, however, the case in Exmouth and can imply lower sensitivity to potential risk among buyers. On the other hand and, more importantly, it indicates the importance of the absence of a monetary signal of risk, and its translation into economic behaviour.

Analyses carried out to assess the interaction effect of properties sold after Cyclone Vance, located in 100-year ARI flood areas, found an increase, rather than a decrease in sales price. This is similar to findings of Skantz & Strickland (1987), for Houston, Texas, who found that major events did not affect prices even for properties located in flood prone areas. They attributed this to the availability of subsidized insurance, where owners did not have to factor in the full cost of risk into their purchase decisions. This was corroborated by their finding that a sharp increase in insurance premiums a year later resulted in a drop in property prices.

Another reason why buyers have not discounted for risk-prone property in Exmouth could be the expectation of compensation from the government, a classic example of moral hazard. As was demonstrated with the relief provided through a nation-wide levy to property-owners affected by the Queensland flooding and cyclone in 2011 (Australian Government Treasury, 2011), the problem lies in an imbalance between social and private costs. While property owners enjoy the amenity gained from living close to the coast, they do not bear the full cost of their decisions, either through insurance, or by for paying for damages following a major event. This creates an inequitable situation, where the rest of society, who do not partake of these benefits, is forced to fund emergency, response and long-term rehabilitation costs.

A HPM analysis of the interaction between risk of 4 m storm-surge and the Cyclone Vance effect was not carried out because, at the time of cyclone, the construction of the marina had not yet commenced. But, given that buyers did not discount for property prices, even directly following a severe cyclone, it was not expected that there would be any effect for at-risk properties in the marina area which came on the market two years later.

4.2. Policy implications

The lack of the impact of risk of disaster on property sales requires policy that will serve to internalise the social costs of disasters into the private calculations of property owners and developers. This can be done in various ways where, for example, the local government can implement land-use control measures. Implementing and enforcing this may require various economic instruments to encourage developers and local communities to behave more in accordance with federal and state controls. Determination of areas subject to cyclonic storm-surge inundation and zoning by degree of risk are essential parts of the implementation of land-use controls. Monetary obligations to incorporate the threat of flood-risk may be the only way that more judicious land-use controls are enforced.

This, in turn, leads to various other policy implications. It is >15 years since Cyclone Vance and, over time, memories of such catastrophic events fade and other priorities take precedence. Several of the marina properties have come on the market in recent years and buyers may not be aware of the extent of risk to which they are exposed. Marina property sales are targeted at employees of major oil and gas companies and the nature of such industries attract people from other southern capital cities of Australia who are probably not aware of the extent of cyclonic and other coastal risk in towns such as Exmouth.

Another management pathway associated with cyclonic storm-surge inundation and flooding risk is the designation of high-risk areas through mapping, and making this information publicly available to future property buyers in the area. The basis of this management action is that, if people are aware of risk, they will translate this knowledge into action, by paying lower prices for properties

located in high-risk zones. The rationale is that the lower price reflects the potential costs of damage they may bear in the future. Alternatively, they may undertake risk mitigation measures to minimize potential damages.

From the perspective of property buyers, awareness of risk alone may not, however, always translate into action. For instance, an investigation into flood insurance purchase for coastal properties in the USA, found that only 49% of households maintained flood insurance, despite mandatory purchase requirements for federally-backed mortgages (Kriesel & Landry, 2004). This implies that regulatory measures alone are not sufficient to change economic decisions to buy risk-prone property. Given that Australia has no mandatory insurance programme such as the National Flood Insurance Program in the USA, this begs the question of whether such legal requirements would change the way the Australian property buyers perceive and make decisions regarding coastal risk. Monetary signals through higher insurance premiums or other forms of economic incentives may be more effective in influencing property purchase behaviour; in the USA, studies have shown that buyers who pay high insurance premiums for flood risk-prone properties pay lower prices at the time of sale (Troy & Romm, 2004).

Natural disaster insurance is the most commonly explored economic strategy applied to risk. It serves to correct market failures arising from the externalities created by developers and property buyers, and failure on the part of the state and local governments. Following the 2011 Queensland floods, in eastern Australia, a national disaster insurance review recommended flood insurance for riverine events. This approach could be extended to include cyclonic storm-surge inundation, whereby a compulsory private insurance scheme, possibly subsidised in the short-term through a federal government fund, could be used for high-risk areas. Conditions should be built in to alleviate any perverse incentives that might arise from such a programme. Natural disaster insurance, however, cannot internalise the risks created to other parts of the community through development in high-risk areas. It also fails to internalise the social cost of disasters created by property developers. The use of subsidised insurance in the long-term for high-risk properties could also create distortions in the market, resulting in reduced participation and under-insurance, thereby subverting the original goals.

5. Conclusion

The aim of this investigation was to determine, by using a HPM on property sales data from Exmouth, if the purchase price of real estate factored in coastal disaster risk. Results indicated that neither location in risk-prone areas, nor the experience of the 1999 Cyclone Vance, had any effect on residential property prices. This study has highlighted the need to assess the economics of planning and coastal property development in disaster-prone areas where un-bridled development, growing coastal populations and injudicious land-use planning amplifies the predicted disaster risk due to climate change and extreme weather events.

Bibliography and references

Australian Government Treasury (2011). Rebuilding after the floods, <http://www.pm.gov.au/press-office/rebuilding-after-floods>.

- Bin O., Polasky S. (2004). Effects of flood hazards on property values: Evidence before and after hurricane Floyd. *Land Economics*, vol. 80, n° 4, pp. 490-500.
- Bin O., Kruse J.B., Landry C.E. (2008). Flood hazards, insurance rates and amenities: Evidence from the coastal housing market. *Journal of Risk & Insurance*, vol.75, n° 1, pp.63-82.
- Dei-Tutu V.A., Bin O. (2002). *Flood hazards, insurance, and house prices: A hedonic property price analysis*. Research Paper, East Carolina University, North Carolina.
- Gujarati D.N. (2006). *Essentials of econometrics*, US Military Academy, West Point.
- Hallstrom D.G., Smith V.K. (2005). Market responses to hurricanes. *Journal of Environmental Economics & Management*, vol. 50, n° 3, pp.541-561.
- Heinz Center (2000). *Evaluation of erosion hazards*. Report for the Federal Emergency Management Agency, Washington DC, USA.
- Keskin B. (2008). Hedonic analysis of price in the Istanbul housing market. *International Journal of Strategic Property Management*, vol.12, n° 2, pp. 125-138.
- Kriesel W., Landry C. (2004). Participation in the National Flood Insurance Program: An empirical analysis for coastal properties. *Journal of Risk & Insurance*, vol. 71, n° 3, pp.405-420.
- MacDonald D.N., Murdoch J.C., White H.L. (1987). Uncertain hazards, insurance and consumer choice: Evidence from housing markets. *Land Economics*, vol.63, n° 4, pp.361-371.
- MacDonald D., White H., Taube P., Huth W.L. (1990). Flood hazard pricing and insurance premium differentials: Evidence from the housing market. *Journal of Risk & Insurance*, vol. 57, n° 4, pp. 654-663.
- Morgan A. (2007). The impact of hurricane Ivan on expected flood losses, perceived flood risk and property values. *Journal of Housing Research*, vol.16, n° 1, pp. 47–60.
- Nakagawa M., Saito M., Yamaga H. (2009). Earthquake risks and land prices: Evidence from the Tokyo metropolitan area. *Japanese Economic Review*, vol.60, n° 2, pp.208–222.
- Pearson L., Tisdell C., Lisle A. (2002). The impact of Noosa National Park on surrounding property values: An application of the hedonic price method. *Economic Analysis & Policy*, vol. 32, n° 2, pp.155–171.
- Rambaldi A.N., Fletcher C.S., Collins K., McAllister R.J. (2011). Housing shadow prices in an inundation prone suburb. *School of Economics Discussion Paper*, n° 429, The University of Queensland, Australia.
- Roberts R.S. (2012). Economic strategies for coastal disaster risk-reduction: A case study of Exmouth, Western Australia. PhD thesis, Murdoch University, Perth, Western Australia.
- Rosen S. (1974). Hedonic prices and implicit markets: product differentiation in pure competition. *Journal of Political Economy*, vol. 82, n° 1, pp.34-55.
- Skantz T.R., Strickland T.H. (1987). House prices and a flood event: An empirical investigation of market efficiency. *Journal of Real Estate Research*, vol. 2, n° 2, pp.75-83.
- Shabman L., Stephenson K., Scodari P. (1998). Wetland credit sales as a strategy for achieving no-net loss: the limitations of regulatory conditions. *Wetlands*, vol. 18, n° 3, pp. 471– 481.
- Stetler K.M., Venn T.J., Calkin D.E. (2010). The effects of wildfire and environmental amenities on property values in north-west Montana, USA. *Ecological Economics*, vol. 69, n° 11, pp. 2233-2243.
- Shilling J.D., Sirmans C., Benjamin J.D. (1989). Flood insurance, wealth redistribution and urban property values. *Journal of Urban Economics*, vol. 26, n° 1, pp.43-53.

- Sydney Coastal Councils Group (2011). Quantifying the value of Sydney's beaches. [http://www.sydneycoastalcouncils.com.au/Project/Quantifying Value of Sydney Beaches](http://www.sydneycoastalcouncils.com.au/Project/Quantifying%20Value%20of%20Sydney%20Beaches).
- Taylor L.O. (2003). The hedonic method. *A primer on nonmarket valuation*. Kluwer, Dordrecht, Kluwer, p.331-393.
- Troy A., Romm J. (2003). Assessing the price effects of flood hazard disclosure under the California natural hazard disclosure law. *Journal of Environmental Planning & Management*, vol. 47, n° 1, pp.137-162.
- Walk Score (2013). *Walk score*, <http://www.walkscore.com>.
- Western Australian Government Department of Water, Sinclair Knight Merz (SKM) (2007). Flood plain management study. <http://www.ga.gov.au/flood-study-search/floodstudyDetail.do?floodid=3008>
- Western Australian Government Planning Commission (2013). *State Coastal Planning Policy Guidelines*, [http://www.planning.wa.gov.au/dop_publications/State Planning Policy No 2 6 State Coastal Planning Policy Guidelines.pdf](http://www.planning.wa.gov.au/dop_publications/State%20Planning%20Policy%20No%2026%20State%20Coastal%20Planning%20Policy%20Guidelines.pdf).

Développement d'un modèle d'estimation des dommages économiques engendrés par les phénomènes de submersions marines en France métropolitaine

Jean-Philippe Naulin¹, David Moncoulon¹, Antoine Quantin¹

1. Caisse Centrale de Réassurance
31, rue de Courcelles, 75008 Paris, France
dmoncoulon@ccr.fr

RESUME.

Un modèle d'estimation des dommages assurantiels, spécifique à la submersion marine et appliqué sur le littoral français a été développé par CCR. Ce modèle comporte un volet déterministe, ayant pour objectif d'estimer les zones touchées ainsi que le montant potentiel des dommages sur les biens assurés peu de temps après la survenance d'un événement. Cette estimation a pour vocation d'informer l'Etat français et les assureurs de l'ampleur du phénomène. Le volet déterministe est basé sur la combinaison entre un modèle d'aléa, un modèle de vulnérabilité et un modèle de dommage. Le premier repose sur l'association entre le modèle Telemac-2D, utilisé pour simuler les niveaux d'eau en mer et un modèle d'inondation de type LISFLOOD-FP pour propager l'eau dans les terres. Le modèle de vulnérabilité est quant à lui constitué par une base de données des polices d'assurances regroupant de nombreuses informations telles que le type de risque et d'usage ou la valeur assurée. Les sorties des modèles d'aléa et de vulnérabilités sont combinées au sein du modèle de dommage afin de déterminer le coût d'un événement. L'ensemble de cette chaîne de modélisation, mise au point à partir d'un objectif opérationnel, présente également l'intérêt de constituer une approche de modélisation de l'aléa submersion marine à grande échelle dont les résultats peuvent être évalués au regard des polices d'assurances sinistrées. Un second volet, qualifié de probabiliste, visant à estimer les coûts des événements extrêmes sur la base de scénarios associés à des périodes de retour, est actuellement en cours de développement et devrait permettre de mieux cerner l'exposition du littoral français ainsi que des clients de la CCR au risque de submersion marine.

ABSTRACT.

A model has been developed by CCR in order to estimate the insurance-related losses caused by sea surge in France. This model is composed by a deterministic module, aiming to estimate the sectors affected by an event and the insurance-related cost a few days after its occurrence. This deterministic module is a combination of three models: a hazard model, a vulnerability model and a damage model. The first one uses Telemac-2D to estimate the water level along the coast. The flooding model, based on Lisflood-FP equations calculates the flood zone over the territory. The vulnerability model, for its part, is built around an insurance database combining many information like risk type, line of business or insured values. The results of the vulnerability and hazard models are then combined into the damage model to estimate the event damage losses. This system, elaborated with an operational perspective, constitutes also an original method to validate a large scale sea surge hazard modeling with insurance claim data. A second module is currently under study to estimate the damages from a probabilistic point of view. This probabilistic model should permit to better identify the exposure of the French coast to the sea surge risk.

MOTS-CLES : Submersion marine, assurance, vulnérabilité, aléa, dommages

KEYWORDS: Sea surge, insurance, vulnerability, hazard, damages

1. Introduction

La tempête Xynthia, survenue le 28 février 2010, a ravivé la prise de conscience de l'exposition du littoral français au risque de submersion marine (Garnier *et al.* 2011, Feuillet *et al.* 2012). Ce péril, résultant de la combinaison d'une forte marée et d'un phénomène météorologique extrême, est susceptible d'engendrer des dommages importants, aussi bien en nombre de victimes qu'en termes de coûts économiques. Ainsi, pour la tempête Xynthia, le montant total des dommages a été estimé entre 1.2 et 3 milliards d'euros dont environ 830 millions pris en charge par le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles (ci-après régime Cat Nat).

La caisse centrale de réassurance, acteur central du régime Cat Nat, a développé des modèles visant à estimer les dommages assurantiels résultants des catastrophes naturelles (inondation, sécheresse, cyclone). Le péril de submersion marine fait également partie des préoccupations de la CCR qui a développé un premier prototype suite à la tempête Xynthia pour estimer le coût de l'événement. Depuis, des travaux ont été réalisés pour améliorer le modèle de submersion et l'appliquer sur l'ensemble du littoral français.

Le modèle développé par la CCR est composé de deux volets, associés à des objectifs différents. Le premier, qualifié de déterministe, a pour objectif d'estimer les zones touchées ainsi que le montant potentiel des dommages sur les biens assurés peu de temps après la survenance d'un événement. Cette estimation a vocation à informer l'Etat français, et les assureurs de l'ampleur du phénomène. Le second volet du modèle, qualifié de probabiliste, vise quant à lui à estimer les coûts des événements extrêmes sur la base de scénarios associés à des périodes de retour. Il a pour objectif de mieux cerner l'exposition de la CCR, de l'Etat et des entreprises d'assurance au péril submersion marine sur le littoral français.

De par sa position de réassureur, la CCR a pu constituer une base de données des polices d'assurance géoréférencées et caractérisées en termes de nature et de valeur. Les sinistres indemnisés au titre du régime Cat Nat pour un événement donné ainsi que le montant des dommages y sont également renseignés. Cette information sur la localisation d'un sinistre ainsi que son coût constitue ainsi une source précieuse, bien qu'imparfaite, de renseignements sur l'exposition du territoire au risque de submersion et peut également être utilisée pour valider les sorties de modèles hydrodynamiques adaptés à la submersion marine.

Le développement de ce modèle doit répondre à la problématique particulière de l'association entre la modélisation hydrodynamique du phénomène et l'exposition des polices d'assurances implantées sur le littoral français. Cette problématique nécessite ainsi une modélisation suffisamment fine des processus permettant de caractériser la hauteur d'eau affectant chaque police d'assurance tout en étant appliqué sur une grande étendue spatiale. De plus, compte tenu de son caractère opérationnel, le modèle doit présenter un temps de calcul raisonnable permettant une estimation du montant des dommages dans les trois jours suivant un événement.

Pour répondre à cette problématique, le modèle déterministe développé par la CCR combine trois modèles distincts : un modèle de vulnérabilité, décrivant l'exposition des polices d'assurance au risque de submersion, un modèle d'aléa, utilisé pour simuler les hauteurs d'eau ayant potentiellement affecté les polices et un modèle de dommages, combinant les sorties des deux modèles précédents pour estimer les pertes assurantielles dues à un événement. Cette approche est similaire à celle de nombreux modèles utilisés pour estimer les dommages résultants des

phénomènes d'inondation (Pistricka et Jonkman, 2010, Jongman *et al.*, 2012) et notamment à l'approche développée en interne par la CCR pour le péril inondation (Moncoulon et Quantin, 2013).

2. Modèle d'estimation des dommages engendrés par les submersions marines

2.1. Chaîne de modélisation de l'aléa

La modélisation de l'aléa est effectuée en combinant deux modèles représentatifs des différents processus qui vont aboutir à la submersion d'un territoire : un modèle d'estimation des surcotes en mer résultant du phénomène météorologique et un modèle d'inondation. Les vagues peuvent jouer un rôle important dans les phénomènes de submersion à travers les phénomènes de wave setup (élévation du niveau d'eau causée par le déferlement des vagues) et de jet de rive (Bertin *et al.*, 2012). Cependant, leur prise en compte de manière fine peut être délicate à effectuer à grande échelle. Aussi, si des tests sont effectués à l'heure actuelle dans le modèle, la modélisation des vagues n'est pas implémentée de manière définitive et n'a pas été prise en compte pour la suite de l'article. Ce modèle d'aléa permet uniquement de représenter les processus de submersion par débordement. Les dommages causés par le franchissement d'ouvrages par paquets de mer ou le dysfonctionnement d'ouvrages de protection ne sont donc pas encore pris en compte.

Dans un premier temps, les niveaux d'eau en mer sont estimés à l'aide du modèle Telemac-2D (Hervouet et Van Haren, 1996, Bates et Anderson, 1993), qui résout les équations de Saint-Venant sur des éléments finis. Afin de mettre en œuvre le modèle Telemac-2D, l'ensemble du littoral, bordant l'océan Atlantique et la Manche, a été découpé en neuf secteurs où les calculs sont effectués indépendamment. La dimension des éléments finis, de forme triangulaire, a été fixée en fonction de la bathymétrie afin d'avoir des éléments de 5 km de côté au large et de 250 m près des côtes. Cette bathymétrie, utilisée également pour caractériser les éléments finis, a été fournie par le Shom et présente une résolution de 1 km. Le modèle est alimenté par des données de vitesses de vent et de pression atmosphériques issues du modèle GFS (Global Forecast System) et disponibles à l'échelle du globe avec une résolution d'environ 30 km.

Les sorties du modèle Telemac-2D ont été validées au niveau des marégraphes sur la base d'un critère de Nash Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970) et ont montré dans l'ensemble des résultats satisfaisants. Cependant, compte tenu de la simplicité de mise en œuvre du modèle Telemac-2D à l'heure actuelle, les marégrammes observés sont utilisées dans certains cas pour corriger les hauteurs d'eau maximales simulées par le modèle afin de reproduire au mieux l'événement.

Un modèle d'inondation propage, dans un deuxième temps, les hauteurs d'eau résultant du modèle Telemac-2D sur un modèle numérique de terrain (MNT). Ce modèle, développé en interne et basé sur les différences finies, repose sur l'application de la formule de Manning Strikler telle qu'elle est proposée dans le modèle LISFLOOD-FP (Horritt et Bates, 2001). Le MNT utilisé est le MNT INTERMAP, présentant une résolution de 25 mètres. Compte tenu de cette résolution, le pas de temps de calcul doit être suffisamment fin pour que les vitesses d'écoulement soient respectées et a ainsi été fixé à 10 secondes. Afin de mettre en œuvre le modèle d'inondation, le littoral a été découpé en 39 zones sur lesquelles le modèle est appliqué indépendamment. Au final, la chaîne de modélisation de l'aléa permet d'obtenir, pour chaque pixel du MNT, une estimation de la hauteur d'eau atteinte pendant l'événement étudié.

2.2. Modèle de Vulnérabilité

Le modèle de vulnérabilité développé à la CCR présente la particularité d'être construit autour d'une base de données de polices d'assurances, constituée dans le cadre de ses relations contractuelles et bilatérales avec les entreprises d'assurance et rendue possible par les engagements de confidentialité pris par la CCR. Cette caractéristique permet au modèle d'offrir une vision particulièrement complète de l'exposition des particuliers au risque de submersion puisque la CCR couvre une large proportion des polices d'assurance des particuliers à l'échelle nationale.

La base de données des polices répertorie les caractéristiques de celles-ci telles que la nature du bien (maison, immeuble, appartement), le type de risque (particulier, professionnel) ainsi que son usage (propriétaire, locataire, copropriété). Les polices sont également géolocalisées même si la position n'est pas déterminée avec exactitude puisque qu'elle a été estimée à partir de l'adresse transmise par la cédante (entreprise cliente de la CCR). Les latitudes et longitudes correspondent donc à la position approximative du bien sur la rue. Sa position réelle peut donc varier de quelques mètres à plusieurs centaines dans certains cas. Enfin, la base de données contient également une estimation de la valeur du bien. Pour apporter des éléments supplémentaires sur l'exposition des biens, leurs distances à la côte ainsi que leurs altitudes ont été déterminées à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT).

Chaque année, dans le cadre du traité de réassurance, les entreprises d'assurance s'engagent à fournir le détail des sinistres survenus dans le passé, ce qui permet à la CCR de rattacher chaque sinistre à un événement et de déduire le coût global assuré de chaque événement relevant du régime Cat Nat. On dispose donc potentiellement de l'historique des sinistres pour les différentes polices, cependant cet historique est encore restreint pour la submersion marine et repose essentiellement sur deux événements (Xynthia et Johanna). Ces données de sinistralité ont été utilisées pour calibrer le modèle de dommage et valider le modèle.

2.3. Modèle de dommages

A l'image du modèle de vulnérabilité, le modèle de dommages est basé sur le croisement de l'aléa avec les polices d'assurance. Il consiste en l'estimation du coût d'un événement $C_{estim,i}$ pour chaque police i comme étant le produit de la probabilité de sinistre $P_{Sin,i}$ par le taux de destruction $T_{Destr,i}$ et la valeur assurée $V_{assur,i}$.

$$C_{estim,i} = P_{Sin,i} \cdot T_{Destr,i} \cdot V_{assur,i}$$

La probabilité de sinistre est une variable primordiale puisqu'elle traduit la proportion de polices sinistrées dans la zone d'aléa. Elle a été calibrée à partir d'une régression logistique entre trois variables explicatives : hauteur d'eau, altitude et distance à la côte. Le taux de destruction sert quant à lui à déterminer le montant des dommages au regard de l'aléa simulé et de la vulnérabilité. La fonction qui relie le taux de destruction aux variables explicatives constitue la fonction d'endommagement. Un travail de calibration de la fonction d'endommagement a été réalisé par la CCR pour faire de lien entre les variables explicatives et le taux de destruction expérimental, déterminé comme étant le rapport entre le coût des sinistres et la valeur assurée. Il peut être comparé aux travaux de André *et al.* (2013) visant à calibrer des fonctions d'endommagement à partir de données assurantielles.

Afin d'ajuster les fonctions de probabilités de sinistre et d'endommagement, les données ont été partagées en deux populations d'effectifs identiques, le calage ayant été effectué sur la première et la validation sur la seconde. Un processus itératif a également été utilisé afin de mesurer l'erreur autour du calage de ces deux fonctions. Le coût estimé est accompagné d'un intervalle de confiance déterminé à partir de la distribution des erreurs autour de l'estimation de l'aléa. Cette distribution des erreurs a été réalisée à partir d'une enquête réalisée pour Xynthia pour laquelle les hauteurs d'eau réelles ayant affectées les biens sinistrés ont été relevées. La comparaison entre aléa réel et aléa estimée a ainsi pu permettre d'obtenir la distribution des erreurs sur l'aléa qui a été prise en compte dans le modèle de dommage.

3. Résultats et Discussion

Le système d'évaluation des dommages résultant des submersions marines a été évalué à deux niveaux : les performances du modèle d'aléa et les performances du modèle de dommages.

3.1. Evaluation du modèle d'aléa

3.1.1. Comparaison des superficies inondées

Suite à la tempête Xynthia, un travail d'inventaire des zones inondées a été effectué pour les départements de la Loire Atlantique et de la Vendée sous le pilotage de la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère en charge de l'environnement. Ce travail¹⁵ a été réutilisé dans notre étude afin de comparer les emprises simulées comme inondées par le modèle CCR (que l'on qualifiera de zones d'aléa) aux secteurs ayant réellement été submergés selon le retour d'expérience.

Les résultats de cette comparaison, présentés dans la figure 1, montrent que, malgré les efforts de modélisation, des écarts significatifs demeurent puisque le modèle CCR tend à surestimer l'emprise des zones inondées avec une superficie totale de 352 km² contre 237 km² recensés lors du retour d'expérience. Cette surestimation est principalement visible dans le secteur de l'île de Noirmoutier où les niveaux d'eau simulés en mer par le modèle Telemac-2D sont probablement trop élevés. De plus, le MNT reproduit mal les digues, ce qui peut générer l'inondation des secteurs de faibles altitudes.

¹⁵ L'emprise des zones inondées est notamment mise à la disposition du public sur le site <http://carto.sigloire.fr/cgi-bin/mapservwfs>

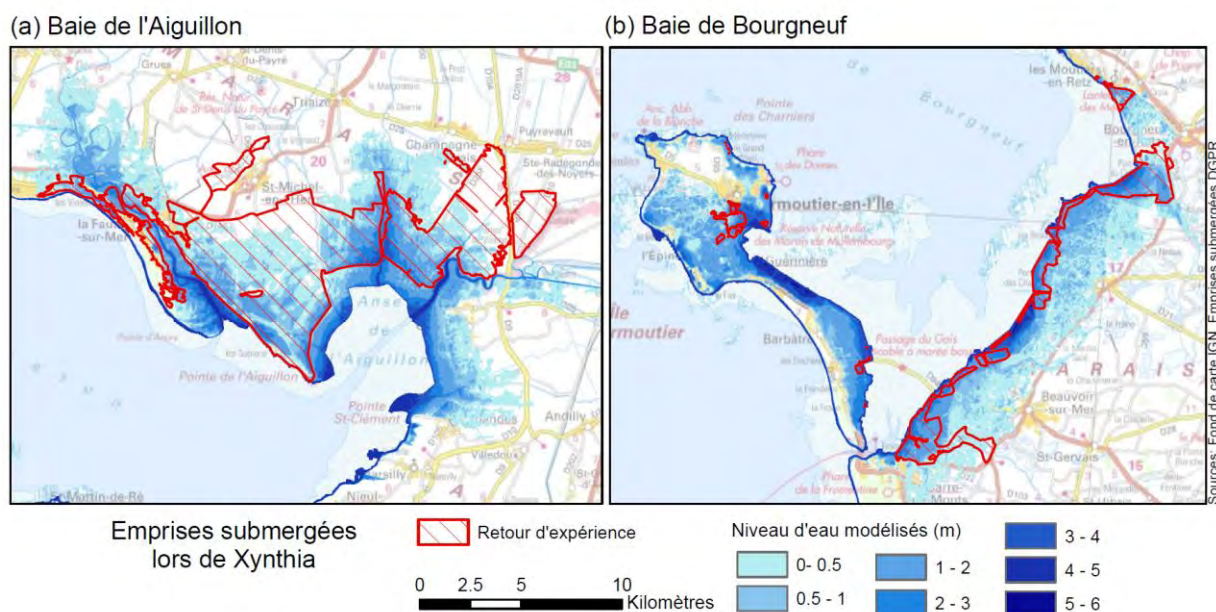


Figure 1 Comparaison entre les emprises réelles de zones inondées et simulées dans la baie de Bourgneuf et dans la baie de l'Aiguillon. Pour la Baie de l'aiguillon, le retour d'expérience ne couvre pas le département de Charente Maritime même si des submersions y ont eu lieu.

Au contraire, le modèle d'inondation sous-estime également l'aléa dans certains secteurs et notamment dans le secteur de la Baie de l'Aiguillon. Cette sous-estimation peut résulter de plusieurs facteurs. Le premier est la non-reproduction de l'endommagement et de la rupture d'ouvrages de protection, qui est souvent une source majeure de submersion. Le second élément d'explication est celui de la non-représentation des phénomènes de submersion résultant de l'action des vagues (wave setup, wave runup, franchissement d'ouvrages). Enfin, la qualité du MNT semble également un facteur crucial puisque, pour l'Aiguillon et la Faute sur mer, l'altitude des secteurs touchés est parfois surestimée puisque comprise entre 4,5 et 6 m ce qui explique que le modèle d'inondation ne parvienne pas à les détecter. On peut enfin noter que les résultats les plus pertinents du modèle d'inondation semblent être obtenus dans l'estuaire de la Loire où les emprises des zones inondées et simulées sont très proches.

Malgré ses imperfections, les résultats du modèle d'inondation restent cependant plus pertinents que la simple extrapolation des niveaux d'eau simulés en mer sur un MNT. En effet, les tests réalisés dans ce sens montrent qu'un tel modèle conduirait à multiplier par huit l'étendue des zones inondées.

3.1.2. Indices basés sur les polices sinistrées

Les performances du modèle d'aléa ont également été évaluées au regard de sa capacité à retrouver les polices sinistrées tout en évitant de sélectionner dans le même temps des polices non sinistrées (fausses alarmes). Deux indicateurs ont été utilisés :

- la probabilité de détection (POD) qui est le rapport entre les polices sinistrées et localisées en zone d'aléa et l'ensemble des polices sinistrées. Les POD illustrent ainsi les capacités du modèle à détecter les sinistres, l'idéal étant une POD de 1 ;
- la probabilité de fausses détections (POFD) qui correspond au rapport entre les polices non sinistrées situées en zone d'aléa et l'ensemble des polices non sinistrées. Les POFD renseignent sur la proportion de fausses alarmes mais cette fois-ci au regard du nombre important de polices d'assurance étudiées. L'idéal est une POFD de 0.

A l'échelle globale, les résultats du modèle montrent que le modèle d'inondation parvient uniquement à détecter une partie des polices sinistrées (POD=60,1%) tout en sélectionnant une proportion significative de polices non sinistrées (POFD=6,9%). Ces résultats doivent également être mis en perspective avec les scores obtenus à partir de l'emprise réelle des zones inondables (retour d'expérience DGPR). Ainsi il apparaît que même des inventaires exhaustifs peuvent mettre de côté un quart des polices (POD=72%) tout en sélectionnant un nombre important de polices non sinistrées mais dans des proportions moindres que le modèle (POFD=1,2%).

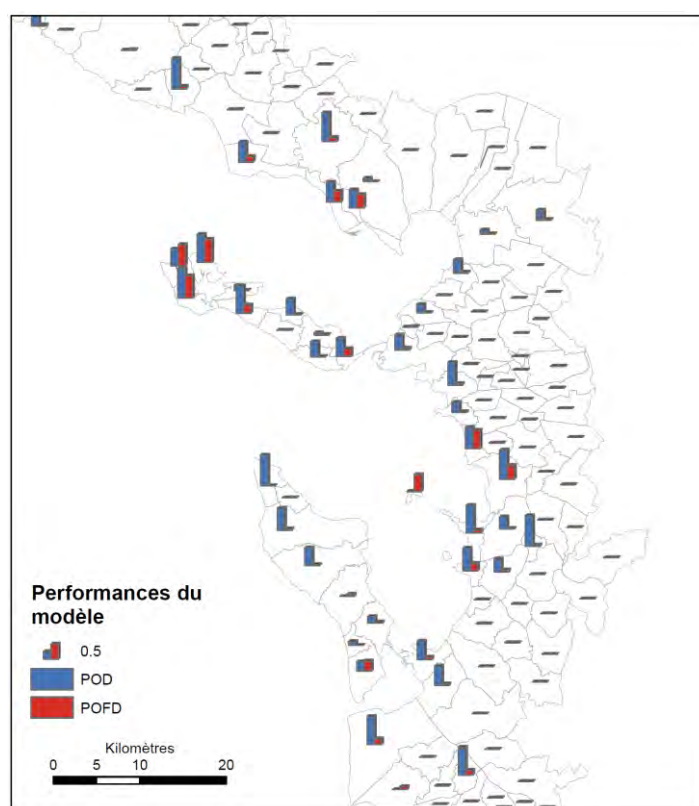


Figure 2. Performances du modèle d'inondation en Charente Maritime

Cette proportion élevée de fausses détections, même en prenant les zones d'aléa réelles, peut être expliquée par plusieurs facteurs. En premier lieu, la localisation des polices dans la base de données est approximative puisqu'elle résulte d'un travail de géocodage et correspond en réalité à une approximation de l'emplacement du bien le long de la rue. Le second facteur expliquant cette forte proportion de fausses alarmes vient du fait que dans la zone d'aléa, certains biens sont

davantage protégés que d'autres du fait d'une position surélevée ou de l'absence de caves par exemple. Il arrive également que le propriétaire du bien ne fasse pas de déclaration de sinistre compte tenu de la faible ampleur des dommages et du montant éventuel de la franchise. La probabilité de sinistre, utilisée dans le modèle de dommage, permet de considérer ces polices détectées à tort comme inondées par le modèle. En ce qui concerne les bonnes détections, on observe également des différences entre aléa modélisé et aléa réel. Ainsi, certaines polices localisées dans la zone d'aléa réel ne sont pas retrouvées par le modèle d'inondation car le MNT indique une altitude supérieure aux niveaux d'eau simulés en mer (jusqu'à 19 m). Cela montre que les limites du modèle d'aléa ne viennent pas uniquement de la simplification des processus physiques ou de l'estimation des niveaux d'eau mais également de la qualité du modèle numérique de terrain utilisé.

Il est également intéressant de regarder les scores secteur par secteur comme le montre la figure 2 où les scores ont été agrégés à l'échelle communale. Dans l'ensemble, les résultats des scores correspondent bien à la qualité de la simulation de l'aléa. Ainsi, lorsque les POD sont élevées et les POFD faibles, comme à Fouras ou La Tremblade, on peut considérer que l'aléa est bien représenté. De même, dans les cas où les POD sont faibles, l'aléa est généralement sous-estimé. C'est la situation par exemple de la commune de la Flotte sur l'île de Ré ou de Charron qui figure pourtant parmi les communes les plus sinistrées. Enfin, dans d'autre cas, quand les POFD sont élevées, cela signifie que l'aléa est surestimé (partie ouest de l'île de Ré). On peut également noter que le modèle présente des scores moyens pour les communes de la Faute sur Mer et de l'Aiguillon qui ont pourtant été très sinistrées, mais pour lesquels les digues sont mal représentées par le MNT. Ces résultats montrent que les données de sinistres apportent un complément d'information par rapport aux estimations des emprises inondées et peuvent être utilisées pour valider un modèle hydrodynamique.

3.2. Estimation du coût des événements

L'estimation du montant des dommages a été effectuée sur quatre événements : les tempêtes Johanna (2008) et Xynthia (2010) et deux événements qui se sont déroulés au début de l'année 2014, fin janvier et début mars (tempête Christine). Les résultats de cette estimation, présentés dans la figure 3 apportent plusieurs enseignements.

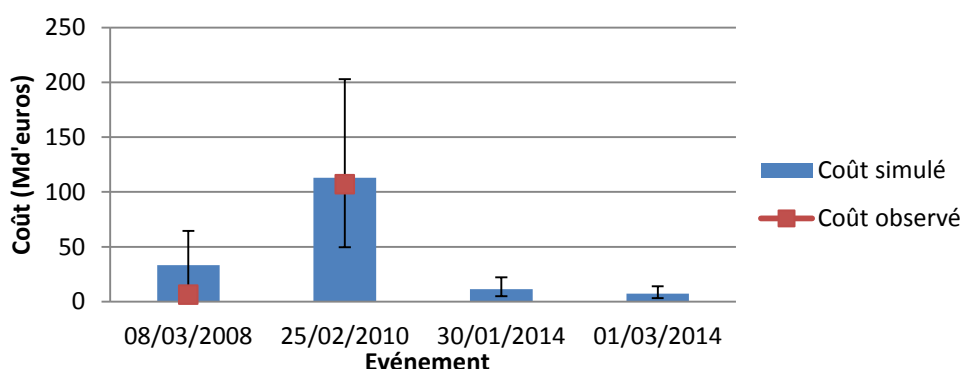


Figure 3. Comparaison des coûts estimés et simulés sur l'échantillon de polices d'assurance étudié. Le coût observé pour les événements de 2014 ne sont pas disponibles à ce jour mais devraient être faibles.

Tout d'abord, pour l'événement Xynthia sur lequel le calibrage a été effectué, le coût observé est bien retrouvé par le modèle. Cependant, l'intervalle de confiance, établi à partir des erreurs autour de l'aléa, est très élevé. Pour la tempête Johanna, il apparaît que le coût estimé est trop important par rapport au coût observé. Il faut noter néanmoins que la simulation a été faite sur les polices assurées en 2010 et non celles assurées en 2008, ce qui peut en partie expliquer cette surestimation. Il reste que le modèle de dommage tend sans doute à surestimer le coût car il a été calibré pour l'événement Xynthia où les non-détections de sinistres ont été compensées dans la fonction de probabilité de sinistre pour reconstituer le coût global. L'amélioration du modèle de dommages nécessite ainsi, dans un premier temps, l'amélioration du modèle d'aléa.

Pour les événements de début 2014, le coût réel n'est pas disponible mais devrait néanmoins être faible au regard des premières remontées du terrain. Le coût simulé est également faible par rapport à Xynthia et Johanna, ce qui tend à montrer que le modèle de dommages, malgré ses imperfections, permet tout de même de donner dès à présent un ordre de grandeur du coût global des sinistres.

4. Conclusion

Les travaux réalisés par la CCR sur la submersion marine ont permis de mettre au point un modèle déterministe d'estimation des dommages assurantiels causés par la submersion marine. Cette chaîne de modélisation, bien qu'incomplète et imparfaite en l'état actuel des travaux, présente néanmoins l'avantage d'être appliquée sur l'ensemble du littoral de la métropole française où elle peut être utilisée pour estimer l'ordre de grandeur du coût d'événements dans un délai de trois jours après leur survenance.

Cet exercice de modélisation opérationnelle est néanmoins difficile. En effet, les submersions liées au dysfonctionnement ou au recouvrement d'ouvrages de protection restent difficiles à prendre en compte à grande échelle et nécessite encore des travaux. De même, la chaîne de modélisation de l'aléa peut être sensiblement améliorée par la prise en compte des phénomènes de wave setup et de wave runup, d'une topographie plus fine (bathymétrie et altimétrie) ainsi que par un forçage météorologique présentant une meilleure résolution. Il est également nécessaire de poursuivre l'amélioration des modèles de vulnérabilité et de dommages pour mieux prendre en compte les limites inhérentes à la modélisation du phénomène même si le nombre restreint d'événement de calibrage et de validation reste limitant.

Au final, cette étude permet d'illustrer l'utilité de modèles hydrodynamiques pour une modélisation de la submersion marine à vocation opérationnelle. Ce modèle déterministe constitue le socle du modèle probabiliste de submersion marine développé à la CCR. Ce dernier, ayant pour objectif d'évaluer l'exposition du littoral français au risque de submersion, est basé sur la combinaison entre l'analyse fréquentielle des données marégraphiques et la génération de carte de scénarios par le modèle d'aléa. Il devrait permettre de produire prochainement de premiers résultats sur l'exposition financière de la CCR, de l'Etat et des assureurs.

Bibliographie

André C., Monfort D., Bouzit M., Vinchon C., (2013). Contribution of insurance data to cost assessment of coastal flood damage to residential buildings: insights gained from Johanna (2008) and Xynthia (2010) storm events. *Natural Hazards and Earth System Science* 13, p. 2003–2012.

- Bates PD., Anderson MG., (1993). A Two-Dimensional finite element model for river flow inundation. *Royal Society of London, Series A*, vol 440, p. 481 - 491.
- Bertin X., Li K., Roland A., Breilh J.-F., Chaumillon E., (2012). *Contributions des vagues dans la surcote associée à la tempête Xynthia, février 2010*. Editions Paralia, p. 909–916.
- Garnier, E., Boucard, J., Surville, F., (2010). La crise Xynthia à l’aune de l’histoire, enseignements et enjeux contemporains d’une histoire des submersions (Contribution aux missions d’enquête parlementaire et sénatoriale sur Xynthia par le groupe de recherche SUBMERSIONS). 112p.
- Hervouet J.-M., Van Haren L., Electricité de France (1996). *TELEMAC2D Version 3.0 principe note*. Rapport EDF HE-4394052B, Chatou, p.1-98
- Horritt M.S., Bates P.D., (2001). Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrological Processes* 15, p. 825–842.
- Jongman B., Kreibich H., Apel H., Barredo J.I., Bates P.D., Feyen L., Gericke A., Neal J., Aerts J.C.J.H., Ward P.J., (2012). Comparative flood damage model assessment: towards a European approach. *Natural Hazards and Earth System Science* 12, p. 3733–3752.
- Moncoulon, D., Quantin, A., (2013). Modélisation des événements extrêmes d’inondation en France métropolitaine. *La Houille Blanche* 22–26. doi:10.1051/lhb/2013004
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970), River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282–290
- Pistrika A.K., Jonkman S.N., (2009). Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after hurricane Katrina. *Natural Hazards* 54, p. 413–434.

Évaluation économique des dommages aux habitations liés à la submersion marine

Mise en place de modèles de prédiction des coûts à partir de données d'assurance

Camille André¹, Catherine Meur-Férec²

1. LAMETA, Faculté d'Économie de Montpellier

Avenue Raymond Dugrand, CS 79606, 34960 MONTPELLIER CEDEX 2, France

camille.andre@lameta.univ-montp1.fr ; camilleq.andre@gmail.com

2. LETG-Brest Géomer, Université de Bretagne Occidentale

Institut Universitaire Européen de la Mer, Place Nicolas Copernic, 29280 PLOUZANÉ, France

catherine.meurferec@univ-brest.fr

RESUME.

Dans le but de pouvoir évaluer le coût des catastrophes naturelles, il est nécessaire de disposer de modèles d'évaluation économique des dommages appelés « fonctions d'endommagement » dans la littérature sur les risques naturels, et plus particulièrement sur les inondations. Cette communication présente une partie des résultats des travaux de thèse (André, 2013) dont l'objectif a été la mise en place de tels modèles spécifiques aux dommages des submersions marines aux habitations, à partir de données d'assurance. Après une analyse détaillée des données d'indemnisations et d'expertise recueillies, la faisabilité de la construction de modèles univariés et multivariés de prédiction des coûts a été étudiée. Nous présentons ici la démarche de construction de ces modèles, ainsi que leurs limites, inhérentes aux données utilisées, et des recommandations et perspectives pour l'amélioration de ce type d'outil à l'avenir.

ABSTRACT.

In order to assess the costs of natural disasters, there is a need of cost-assessment models, known as damage functions in natural hazards, and particularly in flood risk literature. This paper presents some of the results of a PhD work (André, 2013). The aim of this study was the development of specific damage functions for coastal flooding costs on residential buildings, from insurance data. After a detailed analysis of insurance indemnities and loss adjustment data collected, the feasibility of building univariate and multivariate cost-assessment models had been considered. We present here the models implementation process, their limits regarding the data used, and recommendations and research perspectives for improving such tools in the future.

MOTS-CLÉS : risques côtiers, submersion marine, tempêtes, dommages, données d'assurance, évaluation économique, fonctions d'endommagement, modélisation multivariée, Johanna, Xynthia.

KEYWORDS: coastal risks, coastal flooding, winter storms, damages, insurance data, cost assessment, damage functions, multivariate modelling, Johanna, Xynthia.

1. Introduction

Comme l'ont rappelé les nombreuses tempêtes qui ont frappé les côtes bretonnes et celles de l'atlantique cet hiver 2013-2014, les risques côtiers d'érosion et de submersion marine sont un sujet au cœur de l'actualité. Depuis la tempête Xynthia de février 2010, responsable de 64 victimes en Europe, dont 41 par le phénomène de submersion marine en Vendée et en Charente-Maritime, et d'un milliard et demi de dommages assurés (FFSA et GEMA, 2011), les risques côtiers ont reçu de plus en plus d'attention, notamment sur la question de l'évaluation économique des dommages qu'ils peuvent engendrer.

Les évaluations économiques des dommages sont réalisées aussi bien par les assureurs et réassureurs, que par les gestionnaires des risques. Pour les premiers, il s'agit de calculer l'exposition d'un portefeuille d'assurance (ensemble des biens assurés par une compagnie) à un ou plusieurs risques, afin de prendre des mesures pour anticiper et gérer cette exposition. Pour les seconds, l'objectif est d'être en mesure d'évaluer l'impact des politiques publiques de gestion et d'aménagement, par le biais d'Analyses Coûts-Bénéfices (ACB), afin de mettre en place les actions de prévention les plus pertinentes.

L'outil le plus couramment utilisé pour cette évaluation est la fonction d'endommagement. Il s'agit d'une courbe, ou fonction mathématique, qui permet de relier l'endommagement des enjeux d'un type considéré à l'intensité d'un ou de plusieurs paramètres de l'aléa. Ces fonctions sont élaborées à « dire d'expert », ou sur la base de données d'observations empiriques collectées lors de catastrophes passées. Alors que l'inconvénient de la première méthode est d'être parfois trop théorique, celui de la seconde méthode est la rareté et la difficulté d'accessibilité des données nécessaires à la démarche. Il n'existe aujourd'hui que peu d'études ayant porté sur la réalisation de fonctions d'endommagement en France, en particulier pour le risque de submersion marine, pour lequel le faible nombre d'événements récents a limité la connaissance de la sinistralité.

L'objectif de cette thèse de doctorat (André, 2013) a été de recueillir et de décrire des données d'assurance sur deux événements de submersion marine, afin d'évaluer la faisabilité de la mise en place de modèles de prédiction du coût des dommages d'événements futurs. L'objet de cette communication, après une rapide présentation des données collectées et des résultats des analyses menées sur celles-ci, est d'illustrer les méthodes de modélisation statistique mises en place afin d'élaborer des fonctions d'endommagement. L'article se conclut par une discussion des apports et des limites des données d'assurance pour la construction de tels modèles, et propose des recommandations et des perspectives pour améliorer à l'avenir les capacités de prédiction des modèles mis en place.

2. Présentation des données d'assurance utilisées

Les données d'assurance qui ont été disponibles pour ce travail sont les données de trois assureurs (AXA, MAAF et MAIF), concernant les enjeux de type habitation (contrats d'assurance Multirisque Habitation « MRH ») sinistrés lors des tempêtes Johanna (mars 2008) et Xynthia (février 2010). L'étude ne s'intéressant qu'aux sinistres indemnisés dans le cadre du régime d'assurance « Catastrophe Naturelle », seuls les dommages liés à la submersion marine ont été recueillis, les dommages liés au vent étant indemnisés sous le régime « Tempête ».

À partir de tableaux de synthèse de l'ensemble des sinistres indemnisés pour chaque évènement par les trois assureurs, qui contiennent les montants indemnisés pour chaque sinistre, ainsi que leur localisation, mais relativement peu d'information sur les circonstances de la submersion, il a été décidé de consulter une sélection de rapports d'expertise des sinistres, plus détaillés. Ces documents sont réalisés par les experts d'assurance dépêchés sur le terrain après une catastrophe afin de déterminer la cause des dommages et de chiffrer le coût des travaux de réparation, pour définir les montants d'indemnisation des sinistrés. Ils contiennent notamment une description des dommages subis, le détail des coûts immobiliers et mobiliers, des informations sur les caractéristiques de l'aléa ayant entraîné les dommages (hauteur d'eau, durée de submersion, etc.) et sur les caractéristiques du bien affecté par la submersion (nombre d'étages et de pièces principales, surface habitable, présence de sous-sol, etc.).

Ces données n'étant disponibles chez la plupart des assureurs que sous un format papier, non standardisé entre les différents assureurs et les différents cabinets d'expertise, le niveau de détail des informations disponibles est assez hétérogène, et la collecte demande une saisie manuelle de toutes les informations. Néanmoins, le recueil des données de 274 dossiers de sinistres de la tempête Xynthia a permis de pousser l'analyse des dommages beaucoup plus loin qu'avec les seules informations recueillies au sein des tableaux de synthèse d'indemnisations des assureurs.

3. Résultats de l'analyse des rapports d'expertise

Le premier constat tiré de l'analyse de ces données d'expertise est que les coûts des dommages liés aux submersions marines de la tempête Xynthia sont bien plus élevés que ceux observés généralement lors d'inondations fluviales. En effet, pour les maisons individuelles inondées par des hauteurs d'eau de l'ordre d'un mètre et plus, le montant moyen des coûts de réparation atteint en moyenne 90 000 €, dont deux tiers concernent l'immobilier, et un tiers le remplacement du mobilier endommagé.

Le second enseignement est que, bien que ces coûts soient très élevés, ils ne se rapportent dans la plupart des cas qu'au remplacement des éléments de second œuvre de l'immobilier, tels que les cloisons, les menuiseries intérieures et extérieures (portes et fenêtres) les réseaux d'électricité et de plomberie et les embellissements (revêtements de sol, peintures, papiers-peints, etc.). En effet, l'ensemble de ces éléments représentent 80 % des coûts observés, tandis que les dommages structurels (maçonnerie, charpente, couverture, etc.) sont relativement rares, et se limitent à 2 % du total des coûts observés. Cette répartition des coûts s'explique par le fait que, contrairement aux idées reçues, le nombre de bâtiments concerné par des phénomènes de chocs mécaniques de vagues a été très faible pour l'évènement Xynthia. Si les chocs des vagues, pouvant localement provoquer des phénomènes d'affouillement de fondations, ont causé des dégradations sur de nombreux terrains et sur des clôtures, murs de soutènement ou bâtiments annexes situés sur le front de mer (ce qui représente en moyenne 10 % des coûts observés pour les dossiers sélectionnés), ils ne sont pas responsables des coûts particulièrement élevés observés sur les habitations lors de Xynthia.

La raison principale expliquant l'importance des coûts est la salinité de l'eau de mer, responsable de la corrosion des éléments métalliques, qui composent notamment les armatures des cloisons de placoplatre, les réseaux de plomberie, et que l'on trouve dans la plupart des menuiseries. Le phénomène de corrosion a entraîné la préconisation du remplacement de nombreux éléments de

second œuvre qui auraient été simplement nettoyés et asséchés, ou qui n'auraient été remplacés que partiellement en cas d'inondation d'eau douce.

Ce paramètre justifie la mise en place de modèles d'endommagement spécifiques à l'évaluation des dommages liés à la submersion marine. Il faut cependant rappeler que les coûts élevés observés de l'évènement Xynthia sont également dus aux spécificités des enjeux affectés par les submersions : dans les régions littorales de Vendée et de Charente-Maritime, les habitations, pour la plupart de plain-pied, avaient l'ensemble de leur surface habitable exposée à l'inondation, et beaucoup d'entre-elles étaient construites avec des matériaux récents, donc coûteux, et en l'occurrence, particulièrement vulnérables à la submersion. De plus, la médiatisation de cet évènement dramatique, du fait du nombre important de décès, ainsi que l'urgence dans laquelle se sont déroulées les expertises et les indemnisations d'assurance, devant le nombre très élevé de sinistres à régler dans un temps très court, sont des phénomènes qui ont pu jouer dans le sens d'une surévaluation des indemnisations, en comparaison avec des évènements de moindre importance (Thourot, 2012). Enfin, le manque de préparation de la population à une submersion marine, l'absence d'alerte efficace contre ce risque, ainsi que de mesures de préparation à l'inondation, du fait de l'inexpérience des habitants liée à la rareté de ce phénomène, sont des éléments qui peuvent également avoir joué un rôle. Tout cela devra être gardé à l'esprit lors de la construction et l'utilisation de modèles de prédiction des coûts des dommages liés à la submersion marine à l'aide des données de la tempête Xynthia.

4. Modélisation du coût des dommages

4.1. Modélisation univariée : mise en place de fonctions d'endommagement

La première approche de modélisation du coût des dommages a consisté à construire, à partir des données d'expertise d'assurance, des fonctions d'endommagement reliant simplement la hauteur d'eau aux coûts observés pour les submersions de la tempête Xynthia. Pour rendre l'échantillon le plus homogène possible, seuls les dossiers concernant la submersion de maisons individuelles ont été conservés, et les dommages aux éléments extérieurs aux bâtiments d'habitation (murs, clôtures, piscines, etc.) et aux bâtiments annexes (garages indépendants, abris de jardin, etc.) ont été écartés pour cette analyse. Enfin, la modélisation n'a concerné que les coûts immobiliers, les dommages mobiliers ayant été estimés en moyenne à 50 % de la valeur de ces derniers.

Les deux types de modèles mis en place sont un modèle de régression simple et un modèle d'estimation des coûts par classes de hauteur d'eau (Figure 1).

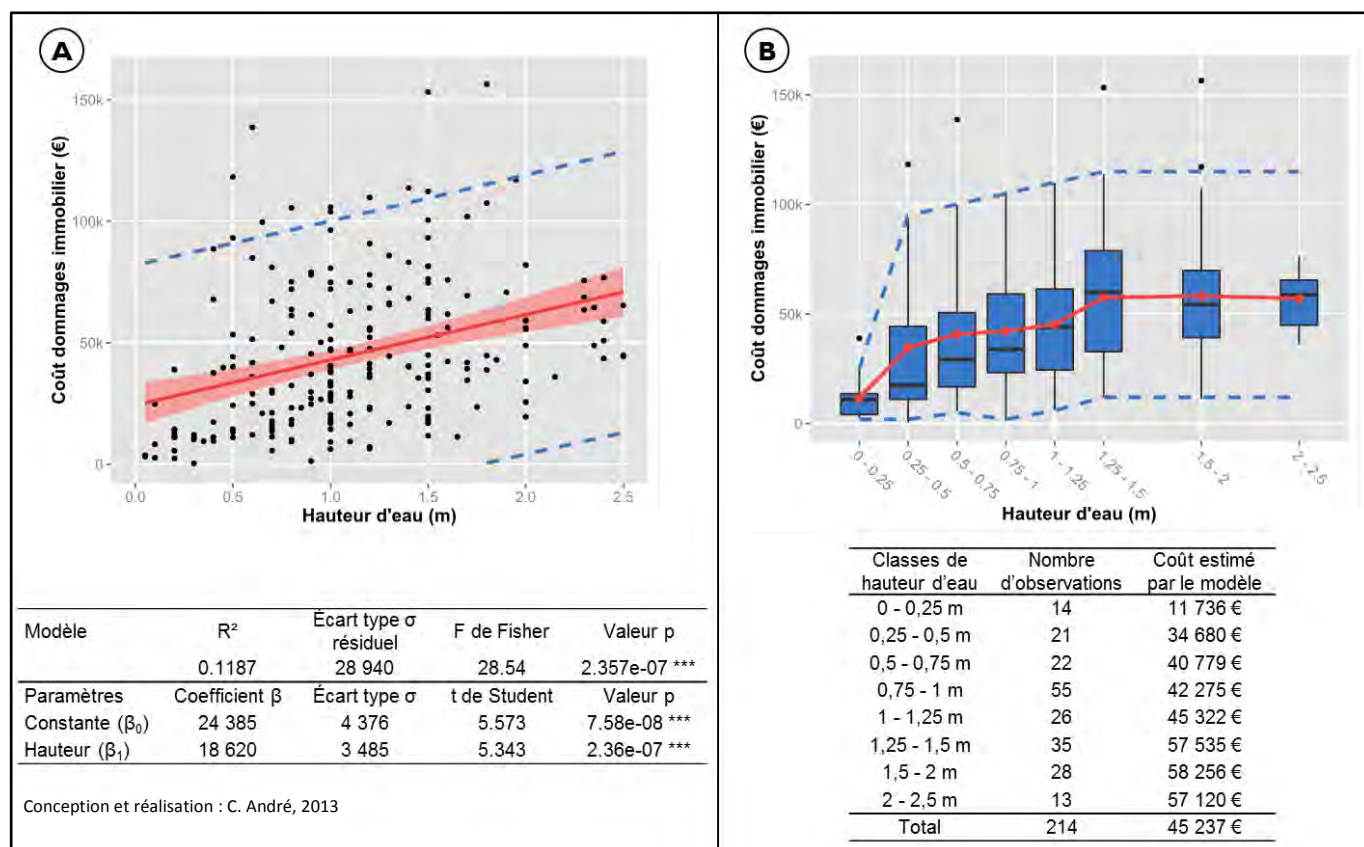


Figure 1. Modèles univariés d'évaluation du coût des dommages, A : modèle de régression simple, B : modèle par classes de hauteur d'eau (coûts exprimés en € HT 2010, avec une vétusté du bâti de 20 %)

Le premier modèle est représenté sur la Figure 1.A. On constate que le nuage de points des dommages observés servant à caler la droite de régression (en rouge) est extrêmement dispersé ; la relation entre la hauteur d'eau et le coût des dommages observés est donc loin d'être nette. Le modèle indique une relation significative entre la hauteur d'eau et le coût des dommages, mais la faible valeur du coefficient d'ajustement ($R^2 = 11\%$) et les intervalles de prédiction (pointillés bleus) très élevés, indiquent les limites liées à la prédiction des coûts à l'aide de ce modèle.

Le second modèle, toujours univarié, estime le coût des dommages par la moyenne des coûts observés au sein de classes de hauteur d'eau de 25 et de 50 cm (Figure 1.B). Si l'incertitude (intervalles de prédiction) est toujours aussi importante pour les prédictions réalisées à l'aide de ce modèle, la forme de ce dernier est plus en accord avec les modèles issus de la littérature sur les coûts des dommages des inondations fluviales (par ex. Penning-Rowse *et al.*, 2005). Ce modèle explique davantage la progression rapide des coûts pour les faibles hauteurs d'eau, et le fait que les coûts augmentent moins vite après avoir atteint certains paliers de dommages. Il reflète notamment le fait que, dès une hauteur d'eau de quelques dizaines de centimètres, le passage de l'eau salée derrière les plinthes implique le remplacement de nombreux types de cloisons, ainsi que les réseaux électriques qu'elles contiennent. À l'opposé, au-delà d'un mètre cinquante, la totalité des éléments

du second œuvre sont remplacés, et les coûts n'augmentent presque plus, sauf à atteindre un éventuel second étage de l'habitation, ce qui n'a pas été observé lors de la tempête Xynthia.

4.2. Analyse des autres paramètres explicatifs des dommages

Au vu du faible pouvoir explicatif des modèles univariés mis en place, lié à la dispersion des points représentés sur le graphique coût / hauteur d'eau (Figure 1.A), il est évident que la hauteur d'eau n'est pas le seul paramètre à prendre en compte dans l'explication des coûts observés lors de Xynthia. La plupart des modèles de fonctions d'endommagement existants permettent de prendre en compte différents paramètres caractérisant l'aléa ou les enjeux pour affiner les estimations, en proposant non pas une fonction d'endommagement, mais un jeu de fonctions parmi lesquelles on choisit la plus adaptée, selon les types d'aléas et d'enjeux considérés (Torterotot, 1993 ; Penning-Rowsell *et al.*, 2005 ; MEDDE/CGDD, 2014).

Il a donc été entrepris d'analyser l'impact sur les coûts observés de plusieurs paramètres, concernant soit les caractéristiques de l'aléa autres que la seule hauteur d'eau (durée de submersion, vitesse du courant), soit les caractéristiques de vulnérabilité et de valeur des enjeux affectés. En dehors des données disponibles dans les rapports d'expertise d'assurance, certaines informations ont été acquises à l'aide de mesures et de témoignages recueillis sur le terrain après l'évènement (hauteurs d'eau, durée de submersion, typologie du bâti impacté), de modélisations hydrauliques (hauteurs d'eau et vitesse du courant) et de bases de données de l'IGN et de l'INSEE (surface et nombre de pièces des bâtiments, etc.). Une synthèse des résultats de ces analyses est présentée dans le Tableau 1.

Au final, les paramètres caractérisant l'aléa ne permettent pas d'améliorer réellement l'explication des coûts observés, du fait que le choc des vagues et la vitesse du courant n'ont joué de rôle que très localement dans l'endommagement. La durée de submersion est un paramètre important pour caractériser les dommages des inondations fluviales, mais en submersion marine, elle joue un rôle moins important, du fait que la corrosion par l'eau salée intervient pour des durées très courtes de submersion.

Au contraire, les paramètres disponibles caractérisant les enjeux se sont révélés apporter une discrimination importante des coûts. La présence d'étage(s) ou de sous-sol, ainsi que le nombre de pièces et la surface habitable, définissent la superficie de l'habitation exposée à la submersion, et donc le potentiel d'endommagement de cette dernière. Une tentative d'explication du coût des dommages par l'âge et les caractéristiques architecturales du bâti n'a pas apporté de résultats probants, ces deux paramètres n'étant pas directement liés à la composition des éléments intérieurs du bâtiment (second œuvre), qui constituent la majeure partie des coûts de réparation. En revanche, le « standing » de l'équipement intérieur des habitations est présumé jouer un rôle primordial pour l'explication des coûts observés. En effet, c'est la valeur initiale des éléments de second œuvre qui définit en grande partie la valeur des indemnisations, il n'a cependant pas été possible d'avoir accès à des données caractérisant cette valeur pour cette étude. En l'absence d'informations plus détaillées, l'occupation de l'habitation en tant que résidence principale ou secondaire s'est révélée être un premier indicateur de la valeur des éléments de second œuvre, intéressant à prendre en compte pour la prédiction du coût des dommages, les résidences secondaires possédant en moyenne un équipement intérieur (chauffage, isolation, etc.) de moindre valeur que les résidences principales.

Variables	Source <i>ex post</i>	Explication du coût des dommages au bâti	Disponibilité
Caractérisant l'aléa			
Hauteur d'eau	Rapports d'expertise, terrain et modélisation	Forte	Modélisation hydraulique
Processus	Rapports d'expertise	Faible car intensité limitée sur le bâti pour Xynthia	Jugement d'expert
Durée de submersion	Témoignages terrain	Présumée faible en submersion marine	Jugement d'expert
Vitesse du courant	Modélisation hydraulique	Faible car intensité limitée sur le bâti pour Xynthia	Modélisation hydraulique
Caractérisant les enjeux			
Matériaux de construction	Rapports d'expertise	Présumée forte si concerne le second œuvre	Fichiers fonciers
Valeur assurée du mobilier	Données d'assurance	Faible car limitée au mobilier	Données d'assurance
Valeur assurée de l'immobilier	Données d'assurance	Présumée forte, mais non disponible	Données d'assurance
Surface du	Rapports d'expertise et BD PARCELLAIRE [*]	Forte	BD PARCELLAIRE [*]
Nombre de pièces du rez-de-chaussée	Rapports d'expertise	Forte	INSEE ou fichiers fonciers [*]
Présence d'étage	Rapports d'expertise	Forte	INSEE, BD TOPO [*]
Présence de	Rapports d'expertise	Forte	INSEE ou
Typologie de quartier	Photo-interprétation SIG	Faible car sinistres aux lotissements dominants pour Xynthia	Photo-interprétation SIG
Typologie de bâti (âge)	Terrain	Faible car sinistres aux pavillons modernes dominants pour Xynthia	Fichiers fonciers
Coût de construction	Modélisation du bâti	Faible car évalué sans variations de standing	Fichiers fonciers
Type d'occupation	Rapports d'expertise	Forte	INSEE ou
Revenu des habitants	INSEE ou	Présumée forte si	Fichiers fonciers

Conception et réalisation : C. André, 2013

Tableau 1. Liste et importance des variables testées caractérisant l'aléa et les enjeux dans l'explication du coût des dommages immobiliers des sinistres de Xynthia, et source des données

4.3. Modélisation multivariée : prise en compte de la plurifactorialité des dommages

Une seconde approche de modélisation a donc consisté à mettre en place un modèle multivarié pour la prédiction des coûts des dommages, non pas en fonction de la seule hauteur d'eau, mais de plusieurs autres variables jugées comme pertinentes lors de la phase d'analyse précédente. Ce modèle (Figure 2) repose sur la méthode de régression multiple, qui a été utilisée dans plusieurs études récentes sur la prédiction des dommages des inondations fluviales (Zhai *et al.*, 2005 ; Prettenthaler *et al.*, 2010) ou des ouragans (Kim *et al.*, 2013).

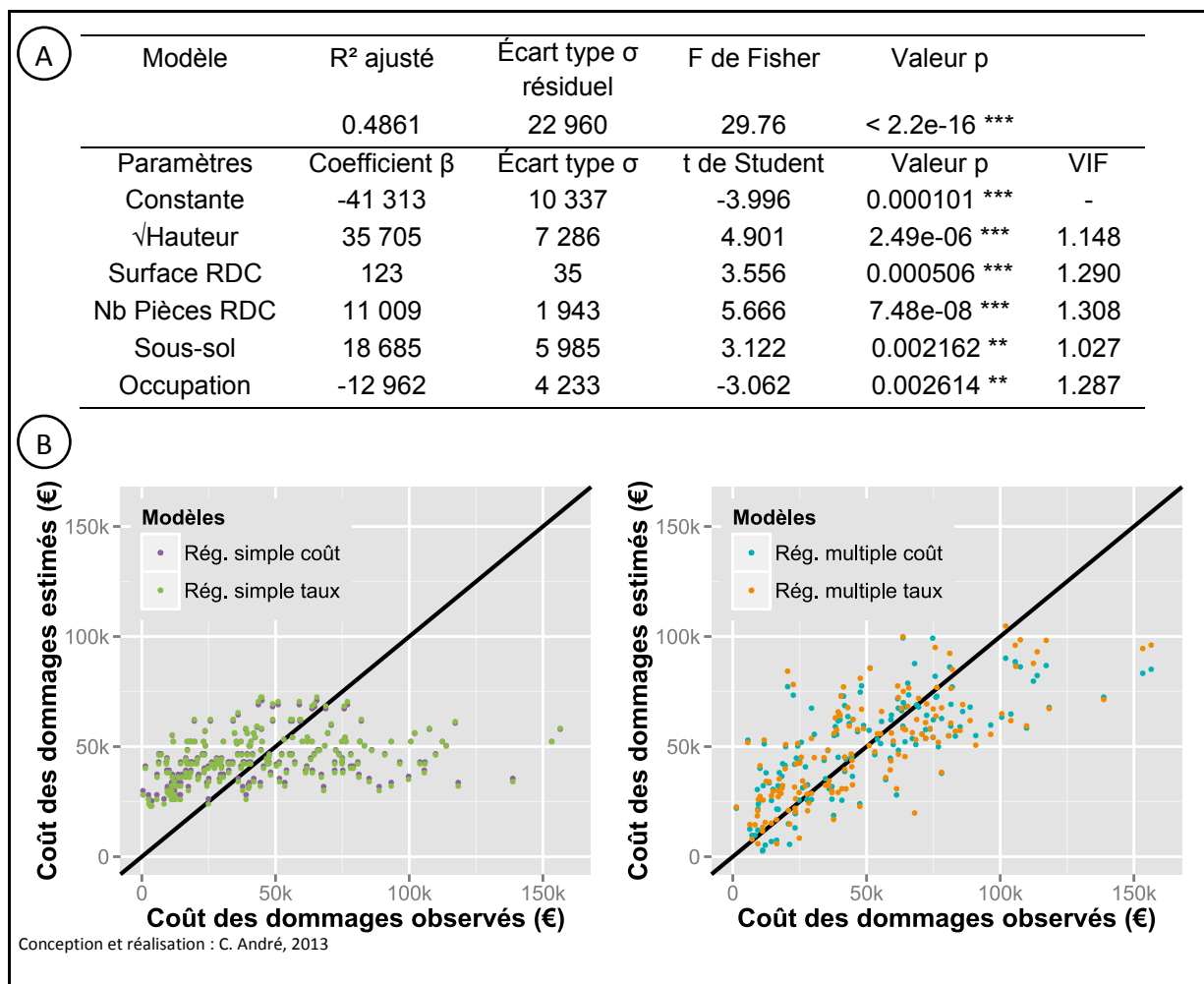


Figure 2. Modèle de régression multiple du coût des dommages (A) et comparaison des coûts des dommages estimés par les deux modèles de régression en fonction des coûts observés (B), coûts exprimés en € 2010 HT, avec une vétusté du bâti de 20 %

À l'issue de la validation du modèle de régression multiple (cf. André, 2013), les variables retenues comme significatives dans l'explication des coûts observés sont la hauteur d'eau, la surface et le nombre de pièces du rez-de-chaussée de l'habitation, la présence de sous-sol et le type d'occupation du logement, en tant que résidence principale ou secondaire (Figure 2.A). Le modèle obtenu possède un coefficient d'ajustement R^2 beaucoup plus élevé que les modèles univariés, proche de 50 %, ce qui est du même ordre de grandeur que les résultats de la littérature.

La Figure 2.B représente la comparaison des coûts des dommages estimés avec les dommages réels observés pour les deux modèles de régression simple et multiple (ainsi que l'effet de la transformation de la variable « coût des dommages » en une variable « taux d'endommagement », cf. André, 2013). On constate que là où le modèle simple a tendance à surestimer les faibles valeurs de coût et à sous-estimer les plus fortes valeurs, le modèle de régression multiple parvient davantage à reproduire les coûts observés, excepté pour les valeurs extrêmes les plus importantes, qui sont

dues à des situations particulières et exceptionnelles. L'ajout de variables concernant des caractéristiques de vulnérabilité et de valeur initiale des enjeux affectés permet donc d'améliorer sensiblement la capacité de prédiction du modèle, même si la variabilité des coûts n'est toujours pas totalement expliquée par ces paramètres.

5. Discussion et conclusion

Ces travaux de thèse sur l'analyse de données d'assurance sur les dommages des submersions marines ont permis de mieux comprendre les mécanismes d'endommagement de la submersion sur les habitations et d'expliquer les caractéristiques des coûts observés lors des tempêtes Johanna et Xynthia. L'étude de la faisabilité de la mise en place de modèles de prédiction des coûts des dommages, réalisée à partir des données de Xynthia, montre l'intérêt des données d'assurance pour cet exercice, en particulier celui des données d'expertise, qui sont les plus détaillées. Il faut néanmoins être conscient de l'incertitude importante inhérente à toute évaluation des coûts d'un événement de submersion à l'aide de ce type de modèle, les informations sur tous les paramètres nécessaires à l'explication n'étant pas toujours disponibles, même au sein des données d'assurance.

L'étude se conclut donc par un certain nombre de recommandations pour une standardisation et un archivage numérique des données d'expertise d'assurance, qui permettront une utilisation systématique d'un maximum d'informations, dans le but de mettre en place des modèles de prédiction des coûts de plus en plus performants à l'avenir. Les modèles devront notamment intégrer davantage de paramètres socio-économiques, afin de caractériser le « standing », c'est-à-dire la valeur initiale des habitations, qui constitue le potentiel d'endommagement des enjeux.

Enfin, au vu des particularités énoncées de la tempête Xynthia concernant l'aléa, les spécificités des enjeux et l'ampleur de l'événement, l'obtention de modèles opérationnels de prédiction des coûts, représentatifs pour tout événement de submersion, sera soumise à l'utilisation de jeux de données concernant le plus grand nombre possible d'événements distincts, d'ampleur différente et ayant touché des régions et façades maritimes différentes.

Remerciements:

Cette thèse de doctorat a été réalisée dans le cadre du projet JOHANNA, au sein du laboratoire LETG-Géomer de l'UBO et de la direction risques et prévention du BRGM, et a été financée par la Fondation MAIF pour la recherche. Nous remercions vivement les assureurs AXA, MAAF et MAIF pour l'accès aux données sur lesquelles a reposé cette étude.

Bibliographie

- André C. (2013). *Analyse des dommages liés aux submersions marines et évaluation des coûts induits aux habitations à partir de données d'assurance - Perspectives apportées par les tempêtes Johanna (2008) et Xynthia (2010)*. Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, 300p, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00961315>.
- FFSA et GEMA (2011). *La tempête Xynthia du 28 février 2010 - bilan chiffré au 31 décembre 2010*. 19p, <http://www.ffsa.fr/sites/upload/docs/application/pdf/2011-06/bilanxynthia28022011.pdf>.
- Kim J. M., Woods P. K., Park Y. J. et Son K. (2013). Predicting the Texas windstorm insurance association claim payout of commercial buildings from hurricane Ike. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1, 3813-3855, 2013.
- MEDDE/CGDD (2014). *Analyse multicritères : application aux mesures de prévention des inondations - Guide méthodologique*. Rapport à paraître au premier semestre.

- Penning-Rowsell E., Johnson C., Tunstall S., Tapsell S., Morris J., Chatterton J. et Green C. (2005). *The benefits of flood and coastal risk management: a manual of assessment techniques (The Multi-Coloured Manual)*. Middlesex University Press, Londres, 238p.
- Prettenthaler F., Amrusch P. et Habsburg-Lothringen C. (2010). Estimation of an absolute flood damage curve based on an Austrian case study under a dam breach scenario. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 881-894.
- Thourot P. (2012). Dans la tempête médiatique. *Risques, Les cahiers de l'assurance*, 91, 2, http://www.ffsa.fr/webffsa/risques.nsf/html/Risques_91_0008.htm.
- Torterotot J.-P. (1993). *Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes*. Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 284p, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00421862>.
- Zhai G., Fukuzono T. et Ikeda S. (2005). Modeling flood damage: case of Tokai flood 2000. *Journal of the American Water Resources Association*, 41, 1, 77-92.

Analyses coûts-bénéfices (ACB) littorales

Des aléas aux enjeux... de nouvelles recommandations pour évaluer l'opportunité des projets littoraux

Céline Perherin¹, Natacha Christin², Camille André³

1. Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA/DTecEMF/DI/IE/IAR) - Technopôle brest iroise, 155 rue Pierre Bouguer, BP 5, 29280 PLOUZANE, France - Celine.Perherin@cerema.fr

2. Commissariat Général au Développement Durable (CGDD/SEI/ERNR2) - Tour Voltaire, 1 place des degrés, La Défense 7, 92055 LA DEFENSE CEDEX, France - Natacha.Christin@developpement-durable.gouv.fr

3. LAMETA, Faculté d'économie de Montpellier - Avenue Raymond Dugrand, CS 79606, 34960 MONTPELLIER CEDEX 2, France - Camille.Andre@lameta.univ-montp1.fr

RESUME.

Les analyses coûts-bénéfices (ACB) ont été développées initialement pour des projets de prévention d'inondations fluviales. La réalisation d'ACB littorales sont de ce fait confrontées à des difficultés auxquelles répond le guide « Analyse Multi-Critères » (MEDDE, 2014). Les méthodes de détermination des aléas submersion marine et recul du trait de côte, non abordés jusqu'alors, sont précisées. Pour que l'ACB puisse jouer son rôle, l'impact des ouvrages sur les aléas doit être finement défini. Pour la submersion marine, le choix des événements à étudier pour construire la courbe dommages-fréquence est abordé en lien avec le comportement des ouvrages de protection (niveau de protection et niveau de sûreté) et les niveaux de dommages aux enjeux. La prise en compte du changement climatique nécessite l'élaboration d'au moins deux courbes dommages-fréquence. Des courbes de dommages spécifiques ont été développées afin de tenir compte du caractère salin des eaux.

ABSTRACT.

Cost-benefit analyses were initially developed for fluvial flooding and cause methodological difficulties for coastal projects. New recommendations had been developed (MEDDE, 2014). Today coastal hazard mapping methodologies (erosion and coastal flooding) are clarified. The impact of the protection projects must be finely described in order to evaluate them well in the cost-benefit analysis. The relation between the cost of damages and the frequency of storm events must be studied. It is linked to the performance of protection devices (level of protection, level of safety) and to the assets. Two relations must be defined to study climate change impact. Damage assessment must take into account the effect of the salt sea water.

MOTS-CLES : Analyse coûts-bénéfices, aléas littoraux, aménagements, rentabilité économique.

KEYWORDS : Cost-benefit analysis, coastal hazard, levees, cost-effectiveness.

1. Introduction

Les analyses coûts-bénéfices (ACB) sont des outils d'aide à la décision étudiant l'opportunité de stratégies de prévention des risques. Elles ont été rendues partiellement obligatoires dans le cadre de deux démarches parallèles : les Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) (MEDDTL, 2011) et le Plan Submersions Rapides (PSR) (MEDDTL, MIOCT, MINEFI, MBCFPRE, 2011). La labellisation d'un PAPI, qui permet au porteur du projet de bénéficier de fonds publics, exige l'élaboration d'une analyse coûts-bénéfices des mesures de protection lorsque la somme des montants de ces mesures est supérieure à 2 millions d'euros ou représente 25 % du montant total du PAPI. Dans le cadre de la labellisation PSR, l'ACB est obligatoire pour les ouvrages dont le niveau de protection est augmenté. Les projets littoraux se placent également dans un contexte lié à la mise en place de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (MEDDTL, 2012). Les ACB d'un projet d'aménagement et de ses variantes permettent d'apprécier la pertinence économique des projets et sont ainsi des outils d'aide à la décision.

2. Méthode d'élaboration des ACB

2.1. Cadrage général

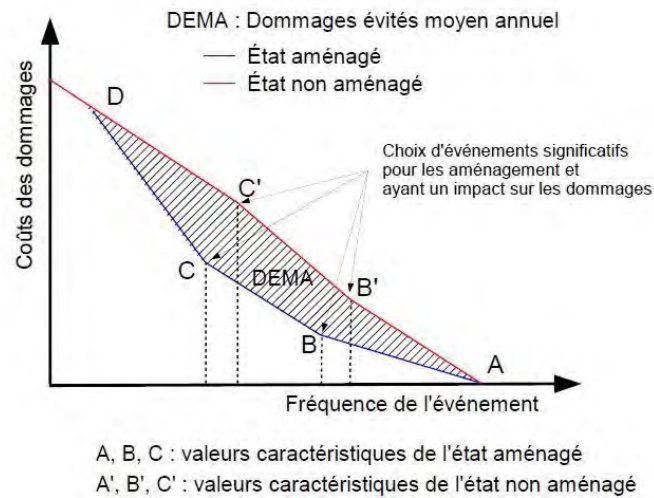
La méthode ACB, telle qu'exigée par le Ministère, est définie dans le cahier des charges PAPI (MEDDTL, 2011). Un guide méthodologique, conforme au cahier des charges PAPI, les Annexes techniques (MEDDTL, 2010), fait une synthèse des outils jugés les plus adaptés pour la réalisation d'une ACB. Un guide général s'adressant spécifiquement aux porteurs de projet permet de faciliter l'appropriation des démarches d'ACB, leur compréhension et l'exploitation de cet outil favorisant la structuration de stratégies pertinentes de gestion du risque d'inondation (CEPRI, 2011). Ces trois documents développent des outils adaptés pour l'étude des stratégies de gestion de l'aléa inondation uniquement.

Face à un territoire exposé à des inondations, l'une de ces stratégies consiste à protéger le territoire, grâce à la mise en œuvre de mesures structurelles (digues...). Ces mesures sont à l'origine de bénéfices potentiels pour le territoire sous la forme de dommages évités aux logements, aux activités, aux équipements publics et aux réseaux. Inversement, ces mesures représentent aussi des coûts correspondant aux études préalables, aux travaux, à leur maintenance et à leur exploitation.

L'objectif de l'ACB est de comparer, dans un cadre précis, ces bénéfices et ces coûts afin de tester la pertinence économique du projet, la mesure étant jugée pertinente si la somme des bénéfices excède les coûts. L'ACB nécessite donc d'évaluer, avec un niveau de précision suffisant, les dommages potentiellement évités grâce au projet, en estimant les dommages pour la situation de référence (état initial) et les dommages pour les situations aménagées. Pour cela, les dommages directs tangibles sont comptabilisés à l'aide de courbes de dommages de référence.

Les inondations sont des phénomènes temporaires définis par une intensité et une probabilité d'occurrence. De ce fait, l'analyse des dommages est annualisée à partir des connaissances des impacts de chaque type d'événement sur un territoire. Les ACB de mesures de protection contre les inondations reposent ainsi sur l'élaboration de courbes dommages-fréquences (figure 1). Un Dommage Moyen Annuel (DMA) est calculé à partir des dommages engendrés par tous les événements pondérés par leur probabilité d'occurrence. Sur le même principe, un Dommage Évité

Moyen Annuel (DEMA) est calculé par soustraction du DMA en situation « projet » au DMA en



situation de référence (figure 1).

Figure 1. Définition des dommages évités moyens annuels (DEMA) (CEREMA, 2014).

La comparaison des bénéfices (DEMA) et des coûts (C_i) doit aussi se faire sur un horizon temporel fixé (n), de 50 ans maximum : une actualisation de ces valeurs, qui s'échelonnent dans le temps, est donc nécessaire (avec r le taux d'actualisation). Le résultat de l'ACB se présente sous la forme d'une Valeur Actualisée Nette (VAN), dont l'équation (1) est :

$$VAN = -C_0 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{(1+r)^i} \right) (DEMA - C_i) \quad (1)$$

où : C_0 est le coût initial de la mesure (ici au temps $i=0$), DEMA les dommages évités moyens annuels, C_i les coûts de fonctionnement du projet (à l'année i), n l'horizon temporel de la mesure, r le taux d'actualisation.

Pour être pertinent économiquement, le projet doit présenter une VAN positive. Cependant, les données d'entrée et les hypothèses prises lors de ces analyses peuvent très fortement impacter les résultats. Il est ainsi recommandé de réaliser des analyses de sensibilité pour tester la robustesse de l'étude (MEDDTL, 2010).

2.2. Difficultés d'application au littoral

Les ACB littorales sont confrontées à des difficultés méthodologiques spécifiques, concernant la détermination de l'aléa et l'évaluation des dommages potentiels. L'espace littoral est mobile d'un point de vue hydro-sédimentaire et les aléas de submersion marine et de recul du trait de côte, qui peuvent fortement interagir, doivent être étudiés simultanément. L'impact de l'élévation du niveau marin moyen sur les aléas littoraux est important.

Le caractère salin de l'eau peut aussi impliquer la survenue de dommages différents, accentuant le montant des sinistres par rapport aux dommages des inondations fluviales.

La prise en compte de ces spécificités a nécessité de proposer des méthodologies adaptées. Les recommandations pour les ACB littorales (MEDDE, 2014 ; CEREMA, 2014) ont été élaborées dans le cadre d'un groupe de travail faisant suite à une analyse et une comparaison d'études ACB littorales menées dans le cadre de projets PAPI ou PSR en absence de recommandations spécifiques (Perherin *et al.*, 2013).

3. Principes d'analyses des aléas littoraux dans le cadre des ACB

Les ACB reposent sur une analyse des dommages évités par les mesures de protection. Afin d'identifier ces dommages, les caractéristiques des aléas (inondation ou recul du trait de côte) touchant chaque catégorie d'enjeux doivent être parfaitement connues, et cela pour chacune des situations étudiées (situation de référence ou situations de projet). Une étude d'aléa complète doit ainsi être menée afin d'obtenir la précision nécessaire à l'étude de l'impact d'un ouvrage de protection.

3.1. Échelle et horizon d'étude

L'échelle d'étude comprend l'ensemble des secteurs susceptibles d'être impactés par le projet, c'est-à-dire l'ensemble de la cellule sédimentaire concernée et l'ensemble des zones inondables affectées par le système de protection étudié, lorsqu'il s'agit d'un projet de gestion des submersions marines.

L'ACB est à réaliser sur un horizon temporel cohérent avec le projet d'aménagement étudié, dans la limite de 50 ans. L'impact du changement climatique, notamment l'élévation du niveau moyen de la mer, est non négligeable sur l'horizon d'étude et doit être pris en compte lors de l'étude de mesure de réduction de l'aléa submersion marine. Les ACB étant classiquement réalisées à aléa constant, doivent dans ce cas prendre en compte l'évolution de l'aléa, soit dans le cadre de l'analyse de sensibilité, si l'ACB est réalisé à aléa constant, soit en prenant en compte un aléa variable (évolution du niveau de la mer par paliers).

3.2. Plusieurs niveaux d'analyse en fonction de l'avancement du projet

L'ACB permet d'évaluer la pertinence économique d'un projet mais aussi de comparer deux ou plusieurs projets, entre eux, et à une situation de référence. Il est ainsi possible de réaliser l'ACB à plusieurs stades d'avancement du projet.

La première phase de réflexion sur le projet porte sur la stratégie (étude de faisabilité). Elle permet de comparer plusieurs stratégies d'aménagement, parmi l'ensemble des alternatives retenues, à la situation de référence. L'objectif de l'ACB est alors d'orienter le choix entre ces différentes stratégies d'aménagement. C'est le cas notamment au niveau des stratégies locales de gestion du trait de côte ou des stratégies locales de gestion des inondations.

Une seconde analyse, plus détaillée, s'appuie sur les dimensionnements de l'ouvrage envisagé (études d'avant-projet et projet) et est utile pour affiner le choix entre deux projets proches et confirmer la pertinence du projet par rapport à la situation existante. L'analyse est ainsi de plus en

plus affinée et précise au fur et à mesure de l'avancement de la démarche de définition des aménagements du fait de l'intégration des résultats d'autres études préalables (étude de dimensionnement, étude de danger).

3.3. Situations étudiées et coûts associés

L'ACB permet de comparer plusieurs situations. Au démarrage de la démarche de définition de la stratégie d'aménagement, les projets envisagés doivent être comparés à une situation de référence, permettant d'estimer l'intérêt de chaque projet. La situation de référence est celle du maintien de la situation actuelle en continuité des actions présentes. Une situation en absence d'ouvrage sur le secteur étudié doit aussi être étudiée afin de fournir un second point de comparaison.

Pour chaque situation et chaque projet envisagé, il est considéré que le rôle de l'ouvrage est assuré sur l'horizon temporel, les coûts associés sont donc les coûts d'étude et les coûts d'investissement mais aussi les coûts d'entretien, de réparation et de reconstruction éventuelle, établis en prenant en compte la mobilité intrinsèque du trait de côte.

4. Analyse de la submersion marine

Dans le cadre de l'ACB de projet de gestion des submersions marines, comme pour les autres types d'inondations, une courbe dommages-fréquences est réalisée pour chaque situation étudiée, mais aussi pour chaque échéance temporelle étudiée (du fait d'un aléa non constant). Elle est construite en étudiant plusieurs scénarios d'aléa, correspondant chacun à un événement hydraulique de fréquence donnée et à une hypothèse de prise en compte du comportement de l'ouvrage, permettant chacun de définir un point de la courbe dommages-fréquences. Plus le nombre de scénarios d'aléa étudiés est élevé, plus la courbe est précise. Les scénarios à étudier de façon privilégiée sont ceux marquant un seuil, ou point d'inflexion, dans la courbe dommages-fréquences. Les points d'inflexion de la courbe sont liés aux seuils dans le comportement des ouvrages ou dans la distribution des enjeux.

Au stade de définition d'une stratégie de protection, l'ACB permet de comparer différents projets et peut reposer principalement sur l'étude d'un seuil majeur lié au comportement de l'ouvrage ou du système de protection, le niveau de protection, marquant des entrées d'eau sur le territoire et généralement confondu avec le niveau au-delà duquel la tenue de l'ouvrage n'est plus assurée (figure 2 (a)).

Au stade d'avant-projet, une analyse affinée permet de confirmer l'intérêt d'un projet. Elle se base sur l'étude des scénarios d'aléas correspondant aux points d'inflexion de la courbe dommages-fréquences, que ceux-ci soient liés au comportement de l'ouvrage (figure 2 (b)) ou à la distribution des enjeux dans la zone protégée.

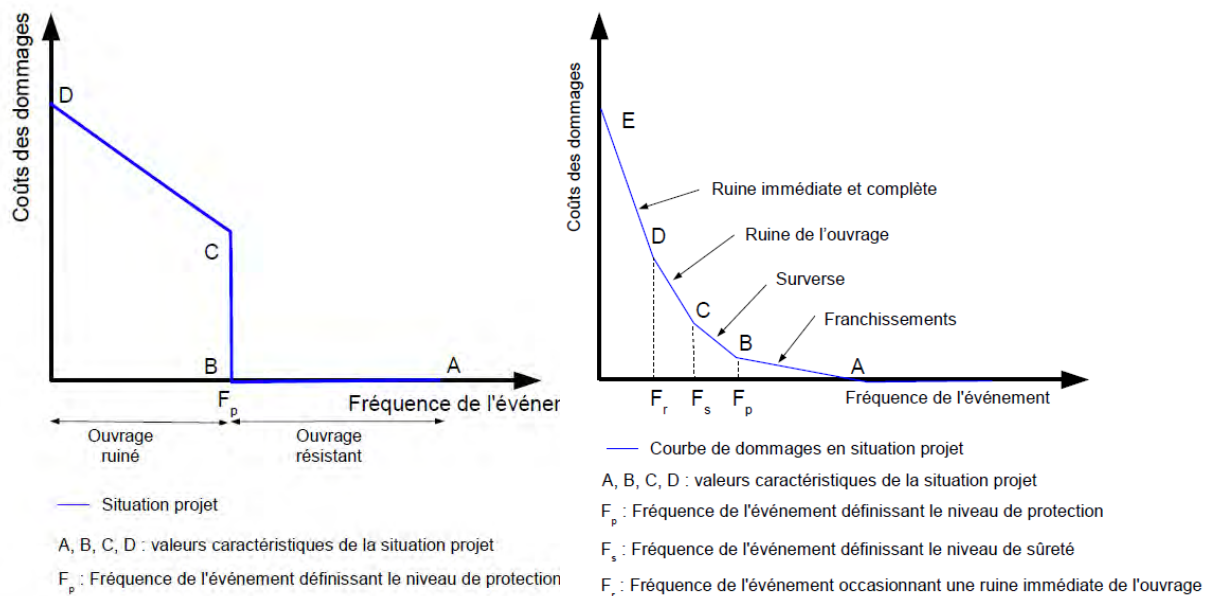


Figure 2. Courbes dommages-fréquences dans le cas d'une analyse simplifiée (a) et affinée (b) (CEREMA, 2014).

5. Estimation des dommages liés aux submersions marines

L'évaluation des dommages causés par les inondations repose sur l'utilisation de courbes (ou fonctions) de dommages : celles-ci associent à différentes caractéristiques de l'aléa (hauteur d'eau, durée de submersion, vitesse du courant, etc.) un coût des dommages potentiels pour un type d'enjeu donné (logement, entreprise, etc.).

L'élaboration des courbes de dommages est un exercice complexe qui implique d'analyser d'une part l'endommagement potentiel des différents enjeux exposés aux inondations et d'autre part les coûts de remplacement ou de réparation associés aux dégradations prévisibles de ces enjeux. L'endommagement est lié d'une part aux caractéristiques de l'aléa et d'autre part à la sensibilité des enjeux (matériaux utilisés, techniques de construction, etc.), de sorte que l'on a l'équation suivante :

$$\text{Dommage} = \text{endommagement (effet aléa ; effet enjeu)} * \text{coût (effet prix)}.$$

Des courbes de dommages « de référence » sont disponibles dans la littérature. Elles sont néanmoins construites sur la base de retours d'expériences d'inondations fluviales (Torterotot, 1993). Pour tester l'impact du caractère salin de l'eau sur l'aggravation des dommages (phénomènes de corrosion, extraction du sel des murs, etc.), une comparaison entre le coût des dommages potentiels modélisés pour les logements (courbes de dommages du CEPRI) avec le montant des sinistres de la tempête Xynthia (André, 2013) a été réalisée. Elle montre que les dommages causés par Xynthia au bâti des logements sont supérieurs à ceux modélisés grâce aux courbes du CEPRI construites sur des retours d'inondations fluviales (eau douce). Les spécificités des logements vendéens et charentais (par exemple un niveau de standing élevé générant un « effet prix » sur les courbes, ou l'utilisation de matériaux vulnérables générant un « effet enjeu ») ne peuvent justifier totalement l'écart observé. La spécificité des endommagements causés par la submersion marine (« effet aléa ») du fait de la salinité et/ou de l'impact lié aux chocs des vagues sur le bâti a également

été testée. Les dommages aux logements causés par Xynthia ne sont pas caractérisés significativement par l'effet mécanique du choc des vagues.

En revanche, il s'avère que le caractère salin d'une submersion marine implique des pratiques spécifiques des assureurs qui accentuent sensiblement les montants de sinistre par rapport à des dommages en eau douce. En effet, le remplacement systématique des éléments du second œuvre et des équipements fixes est généralement préconisé par les experts mandatés pour constater les dommages, du fait notamment du risque de corrosion. Ainsi, l'effet aléa lié à la salinité semble prépondérant pour expliquer l'écart observé.

L'emploi des courbes de dommages du CEPRI simulant un remplacement systématique des éléments du second œuvre et des équipements fixes a ainsi été recommandé pour les dommages causés aux logements par la submersion marine du fait du caractère salin de l'eau. La figure 3 ci-dessous montre la courbe de dommages au logement « individuel sans étage et sans sous-sol » dans le cas d'inondations fluviales et marines (CEPRI, 2014).

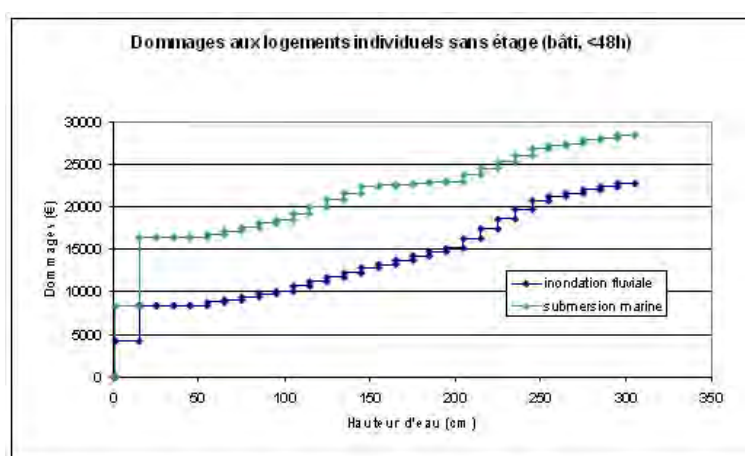


Figure 3. Exemple de courbes de dommages aux logements dans le cas d'une inondation fluviale et d'une submersion marine, pour une durée de submersion inf. à 48h (CGDD, d'après CEPRI, à venir)

6. Une évolution vers les Analyses Multi-Critères (AMC)

Si les ACB ont été dans un premier temps le principal outil d'évaluation des mesures de prévention, les analyses multicritères (AMC), dont la méthodologie a été élaborée entre 2012 et 2014, pourraient devenir un élément obligatoire du dossier de labellisation d'un projet car elles permettent une analyse plus complète d'un projet.

L'AMC repose sur la confrontation d'indicateurs, qui permettent d'une part de caractériser l'impact du projet sur la réduction des conséquences des inondations sur la santé humaine, l'économie, le patrimoine culturel et l'environnement, et d'autre part de mesurer l'efficacité, le rapport coût-efficacité et l'efficacité du projet. Les travaux précités contribuent à faciliter la construction de ces indicateurs. La méthodologie AMC a vocation à s'appliquer aux risques littoraux.

Des travaux complémentaires sont en cours afin d'adapter cette méthodologie aux spécificités littorales.

7. Conclusions

La réalisation d'ACB et d'AMC littorales, menées jusqu'alors dans un cadre méthodologique peu adapté, bénéficie aujourd'hui de recommandations spécifiques par le biais du guide Analyse multicritères (MEDDE, 2014) et du guide Analyses coûts-bénéfices littorales (CEREMA, 2014).

Remerciements :

Remerciements aux membres du groupe de travail notamment : DGPR, DGALN, CGDD, Cerema, DREAL Poitou-Charente, DREAL Bretagne, DREAL Centre, CEPRI, DREAL Languedoc-Roussillon, ARTELIA, IRSN, EGIS, ISTE, GIP Littoral Aquitain, UBO.

Bibliographie non numérotée et références

- André C., (2013). *Analyse des dommages liés aux submersions marines et évaluation des coûts induits aux habitations à partir de données d'assurance. Perspectives apportées par les tempêtes Johanna (2008) et Xynthia (2010)*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 300p.
- CEPRI (2011). *L'ACB (analyse coût/bénéfice) : une aide à la décision au service de la gestion des inondations. Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et de leurs partenaires*, édition CEPRI, novembre 2011, 44 p.
- CEPRI, (2014). *Évaluation des dommages aux logements liés aux submersions marines*. 28 p. A venir.
- CEREMA (2014). *Analyses coûts-bénéfices littorales Recommandations sur l'étude des aléas littoraux préalable à l'élaboration d'une ACB*, rapport CEREMA, à paraître, 54 p.
- MEDDE (2014). *Analyse multicritères : application aux mesures de prévention des inondations - Guide méthodologique*, rapport CGDD, à paraître au premier semestre.
- MEDDTL (2010). *Analyse coût bénéfice. Annexes techniques au cahier des charges PAPI*, rapport de décembre 2010, 78 p.
- MEDDTL, MIOCT, MINEFI, MBCFPRE. (2011). *Plan submersions rapides. Submersions marines, crues soudaines et ruptures de digues*, rapport DGPR, 78 p.
- MEDDTL (2011). *Programmes d'action de prévention des inondations (PAPI) De la stratégie aux programmes d'action*. Cahier des charges PAPI, rapport DGPR., 28 p.
- MEDDTL (2012). *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte - Vers la relocalisation des activités et des biens*. Rapport MEDDTL/DGALN, 2012, 19 p.
- Perherin C., Crespin N., Bocquier L., Barbeau M.C. (2013). Retour d'expérience de premières analyses coûts-bénéfices littorales. *Actes du colloque Digues Maritimes et Fluviales*, Aix-En-Provence, pp 624-631.
- Torterotot J.-P. (1993). *Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes*, Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 284p, <http://tel.archivesouvertes.fr/tel-00421862>.

Analyse économique des enjeux exposés aux risques côtiers : application au bâti résidentiel de Bretagne

Iwan Le Berre¹, Denis Bailly², Manuelle Philippe², Yuji Kato¹

1. Laboratoire LETG-Brest Géomer, UMR 6554 CNRS, IUEM-UBO, rue Dumont d'Urville, Technopole Brest-Iroise, 29280 Plouzané

Iwan.leberre@univ-brest.fr

2. Laboratoire Amure UMR M101 IUEM-UBO, rue Dumont d'Urville, Technopole Brest-Iroise, 29280 Plouzané

RESUME.

Dans les politiques publiques mises en place en France pour prévenir et gérer les risques côtiers, la prise en compte de l'aléa apparaît très prégnante, reflétant une conception « d'ingénierie » du risque. Pourtant, les enjeux représentent la « valeur humaine, économique ou environnementale des éléments exposés à l'aléa » soit, plus prosaïquement « ce que l'on risque de perdre ». Sans enjeux, il n'y a donc pas de risque : il s'agit par conséquent d'un élément central de la vulnérabilité des territoires à considérer dans la mise en œuvre dans la prévention et la gestion des risques. Dans ce contexte, cette contribution a pour objectif de présenter une méthode d'évaluation des biens immobiliers. Elle s'attache à définir les enjeux à considérer, à identifier les sources de données permettant de les caractériser, afin d'en évaluer la valeur économique et de les cartographier.

ABSTRACT. In the French public policies implemented to prevent and manage coastal hazards, the description of hazards is dominant, reflecting mainly a technical or engineering understanding of the risk. Yet the concept of risk includes "human value, economic or environmental elements exposed to the hazard" that is to say "what may be lost". Without issues, there is no risk: it is therefore a central element of the vulnerability of territories to be considered in risk prevention and management. In this context, this contribution aims to present a method for the economic appraisal of properties values. It is focused on defining the issues to consider, identify the data sources that describe them, in order to assess their economic value, and map them.

MOTS-CLES : Risques côtiers, submersion marine, enjeux, vulnérabilité, évaluation économique, cartographie

KEYWORDS: natural hazards, sea-flood, issues, vulnerability, economic appraisal, mapping

1. Les enjeux, cœur du problème mais en marge des méthodologies officielles

Si l'on considère les enjeux comme *ce que l'on risque de perdre* (D'Ercole and Metzger, 2011), on comprend qu'en l'absence de personnes ou de biens exposés à un aléa, il n'y a pas de risque. Dans une perspective de prévention et de gestion des risques, les enjeux constituent par conséquent, au même titre que les aléas, un élément central de la vulnérabilité des territoires : il est donc essentiel de les définir, de les identifier voire, lorsque cela est possible, de les hiérarchiser.

Construction sociale par essence, l'identification et la hiérarchisation des enjeux repose sur l'analyse de leur vulnérabilité, au sein de laquelle on peut distinguer d'une part la vulnérabilité humaine, c'est-à-dire la mise en danger de la population exposée à un aléa, et d'autre part une vulnérabilité plus matérielle qui comporte des enjeux financiers et/ou patrimoniaux, et peut éventuellement faire l'objet d'une évaluation monétaire (Cutter *et al.*, 2009). Selon Reguezza-Zitt (2012), la première n'est « pas négociable » : elle repose sur le principe de responsabilité collective, notamment celle de l'Etat et celle du maire « premier responsable de la sécurité des personnes » (MEDDTL, 2011). La seconde consiste à rechercher un « compromis, entre les avantages et les inconvénients des projets collectifs ou individuels de développement économique, urbain ou encore social qui impliquent une prise de risque » (Reghezza-Zitt M., 2012). Si, en pratique, les deux formes de vulnérabilité sont souvent associées, ce sont des différenciations de ce type qui fondent la hiérarchisation des enjeux en appui à la définition de plans d'action.

Pour autant, dans les politiques publiques, la prise en compte de l'aléa apparaît encore très prégnante - souvent selon une vision issue des sciences de la terre et de l'ingénieur - tandis que celle des enjeux, bien qu'évoquée, n'est pas réellement abordée et que la question des représentations est encore très largement éludée. Ainsi que ce soit dans les guides ou cahiers des charges (indicateurs du MEDDTL, MIAT), dans les documents à vocation opérationnelle (PCS, EPRI) ou bien dans les documents à vocation d'évaluation (ACB), on trouve des indications sur les types d'enjeux à considérer, mais plus rarement des précisions sur les données permettant de les décrire, ou sur les méthodes à employer pour en analyser la vulnérabilité (Hénaff *et al.*, 2014). D'après ces documents toutefois, différents types d'enjeux peuvent être distingués qui peuvent être rassemblés en trois grandes catégories :

- **des enjeux humains**, liés à l'exposition des individus, dont découle une situation de mise en danger qui, parce qu'elle est considérée comme inadmissible, doit faire l'objet d'un traitement prioritaire. Elle repose sur la vulnérabilité particulière de certaines catégories de population, en fonction de leur âge et/ou de leur mobilité par exemple. Mais elle dépend également des situations, aménagements et équipements qui potentiellement par leurs caractéristiques sont susceptibles d'accroître la vulnérabilité des personnes à un aléa. On y intègre par exemple les bâtiments de plain-pied évoqués dans le guide PPR (MEDDE, 2014), l'absence de possibilité d'évacuation par le toit ou la distance par rapport aux lieux de refuge (Mercier et Chadenas, 2012).

- **Les enjeux opérationnels**, liés à la gestion de la crise, en situation (voies d'évacuation, sites refuges, infrastructures de secours et de commandement, activités ou établissements engendrant un risque supplémentaire) ou *a posteriori* (ressources en eau, accès à l'énergie, santé et salubrité, etc.).

- Enfin, **les enjeux matériels**, pour lesquels on peut différencier des risques de pertes tangibles, directement mesurables par une valeur monétaire de l'objet endommagé ou le coût de sa remise en état, et les pertes intangibles, qui recouvrent tout ce qui n'a pas de valeur économique d'échange tel un écosystème, un espace récréatif ou un bien culturel. A ces derniers peuvent être associés des

services écosystémiques, une valeur affective ou une valeur patrimoniale. Au-delà de leur mesure en termes physiques, les pertes intangibles peuvent parfois être évaluées de manière indirecte par des variations de flux financiers associés à leur disparition. D'autres ne verront leur importance reconnue que dans le cadre du processus de concertation. Les pertes tangibles quant à elles, peuvent faire l'objet d'une hiérarchisation, en particulier par l'évaluation économique qui pourra intervenir dans le choix des politiques préventives et dans l'évaluation des dommages en vue de l'indemnisation.

2. Principes de l'évaluation économique des enjeux

L'évaluation des enjeux par leur valeur économique est préconisée dans les documents officiels (directive inondation de 2007 et divers instruments d'aide à la réalisation de projets de réduction de l'aléa ou de la vulnérabilité des enjeux) en tant qu'outils d'aide à la décision pour la définition des stratégies de prévention des risques, en particulier dans le cadre des PAPI et des PSR. Ces valeurs sont généralement utilisées pour comparer différents scénarios de prévention des risques. Il s'agit de mettre en regard le montant des pertes susceptibles d'être occasionnées par la survenue de l'aléa et les coûts des interventions de prévention. Les pertes, ou dommages, évités sont considérés comme des bénéfices associés à la prévention, c'est pourquoi on parle d'analyse coût-bénéfice (ACB). Les préconisations les plus récentes suggèrent le recours à la méthodologie de l'analyse multicritères (AMC) qui se fonde sur une démarche de diagnostic combinant tous les éléments d'évaluation évoqués ici (CGDD-SOS-SEEIDD, 2012).

L'évaluation des coûts des mesures structurelles est la composante la moins sujette aux incertitudes sous réserve que leurs spécifications soient précises. Les référentiels de l'ingénierie des ouvrages ou de l'économie de la construction permettent d'établir avec des marges d'incertitude raisonnables le coût de construction et d'entretien des ouvrages de défense ou d'aménagement des bâtiments. Le coût des programmes de prévention des risques, tels que la sensibilisation ou les exercices de sécurité civile, peut lui aussi être évalué partagée.

L'évaluation des bénéfices, à savoir les dommages évités par les interventions projetées, reste la partie la plus difficile et la plus sujette à controverses. La première difficulté porte sur valorisation des dommages engendrés par différent niveaux d'aléa (fonction d'endommagement) d'une part, et l'estimation de la réduction du niveau d'aléa ou de vulnérabilité des enjeux résultant du projet d'autre part (André, 2013). La deuxième difficulté porte sur la nécessité, du fait de la méthode ACB, de monétariser des dommages qui n'ont pas de traduction monétaire directe. Il s'agit des pertes d'avantages intangibles évoquées ci-dessus. Quel est l'équivalent monétaire mesurant la perte de bénéfices ou de valeur résultant de la destruction totale ou partielle, temporaire ou permanente, des services dérivés des fonctions écologiques d'une zone humide ou d'un patrimoine culturel ?

L'objet de cette présentation est l'évaluation de la valeur des biens immobiliers qui constituent, après la vulnérabilité des personnes, le second élément de vulnérabilité des espaces côtiers exposés aux risques d'érosion et d'inondation (MEDDE, 2014).

3. Matériel et méthode : SIG, RGE, cadastre et terrain

Quelle que soit la méthode mise en œuvre, la démarche à entreprendre repose sur trois étapes incontournables visant à identifier, à décrire puis à évaluer les enjeux, comme résumé dans l'organigramme de la figure 1.

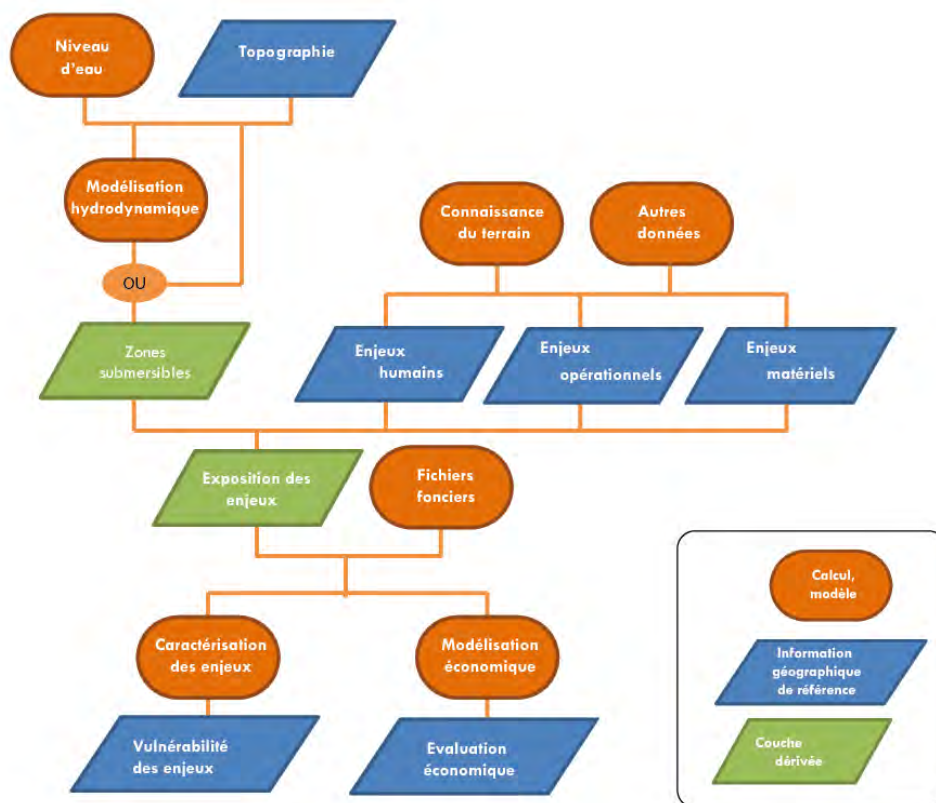


Figure 1. Organigramme méthodologique général

3.1. Identification des enjeux exposés à l'aléa

La délimitation des zones submersibles est basée sur la *Cartographie des zones basses littorales exposées au risque de submersion marine* réalisée à la suite de la circulaire interministérielle du 7 avril 2010 afin de porter à connaissance des élus du littoral les études détenues par l'État sur l'exposition de leur commune au risque de submersion. Elle repose sur l'utilisation des données terrestres de Litto3D® et des « *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France* » publiées par le Shom et le Cetmef. Ces données ont permis de produire des cartes des zones basses littorales qui traduisent le risque de submersion marine sur les communes exposées¹⁶. La cartographie correspondante peut être consultée à partir de l'application de cartographie en ligne

¹⁶ Voir le détail sur <http://www.finistere.gouv.fr/Politiques-publiques/Environnement-risques-naturels-et-technologiques/Zones-basses-littorales-Version-2013>

Cartélie¹⁷, les données pouvant être obtenues auprès des services de l'Etat (la DDTM29 en ce qui nous concerne).

3.2. Quelles données employer pour décrire les enjeux ?

Il n'y a pas si longtemps, la cartographie des enjeux reposait sur l'utilisation de la carte topographique IGN à 1/25 000 éventuellement agrandie à 1/10 000. Ce sont les préconisations du guide méthodologique des PPR de 1997, employé encore récemment puisque la nouvelle version du guide date de 2014. Ce support posait classiquement des problèmes liés à la fréquence d'édition décennale de certaines feuilles, à son échelle peu adaptée à l'emprise locale des zones à risque, en particulier sur le littoral. De fait, même si la carte topographique a une vocation d'exhaustivité, les bâtiments et les principales infrastructures ne peuvent pas tous y être individuellement représentés et décrits. De plus, par sa finalité cartographique, papier ou numérique (Scan 25®), cette donnée ne pouvait être employée qu'en fond de plan, ce qui ne permettait pas d'accéder aux descripteurs des objets représentés, ni d'envisager la mise en œuvre des méthodes d'analyse spatiale.

La transcription dans le droit français des textes de référence de l'Union européenne¹⁸ sur la diffusion de l'information publique relative à l'environnement, a initié un véritable mouvement de « libéralisation » des référentiels d'information géographique. Elle se manifeste notamment par la récente mise à disposition du public de divers référentiels numériques qui modifie considérablement les approches envisageables pour l'analyse des enjeux exposés aux risques côtiers :

- Le **Référentiel grande échelle (RGE)**, produit et entretenu par l'IGN¹⁹, est composé de bases de données au format raster (BD ORTHO®) et surtout vectoriel (BD TOPO® et BD PARCELLAIRE®) très pertinentes pour l'identification des enjeux ;

- Les **fichiers fonciers de la DGFIP**, documents cadastraux gérés par l'application Majic, contiennent des informations sur les propriétés bâties. Chaque local est décrit par un type, la nature de son occupation, ainsi que divers caractéristiques telles que la surface totale habitable, celle du terrain, le nombre de pièces, l'âge, etc. Par l'identifiant unique rattaché à chaque parcelle foncière, ces informations peuvent être associées à la BD PARCELLAIRE® ;

- Les **bases de données gérées par la société Perval**²⁰, notamment renseignées par les notaires, offrent des informations détaillées sur un très grand nombre de transactions immobilières. Elles constituent par conséquent une source unique d'information pour construire un modèle de référence des valeurs immobilières.

¹⁷ [http://cartelie.application.developpement-](http://cartelie.application.developpement-durable.gouv.fr/cartelie/voir.do?carte=vulnerabilite_aux_risques_littoraux&service=DDTM_29)

[durable.gouv.fr/cartelie/voir.do?carte=vulnerabilite_aux_risques_littoraux&service=DDTM_29](http://cartelie.application.developpement-durable.gouv.fr/cartelie/voir.do?carte=vulnerabilite_aux_risques_littoraux&service=DDTM_29)

¹⁸ Convention d'Aarhus (<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/pp/documents/cep43f.pdf>) et Directive Inspire (<http://inspire.ign.fr/>)

¹⁹ <http://professionnels.ign.fr/rge>

²⁰ Pour plus d'information sur PERVAL voir : www.geomatique-aln.fr/IMG/pdf/4.Documentation_Perval_cle7b7d17-1.pdf et www.geomatique-aln.fr/IMG/pdf/4.presentation_perval_cle711171-1.pdf

3.3. L'évaluation monétaire des biens immobiliers

L'évaluation des biens matériels, mobiliers et immobiliers, s'aborde naturellement à partir soit de leur valeur marchande, prix de ces biens à la vente, soit par le coût de leur remise en état, réparation ou reconstruction dans une perspective d'évaluation des dommages. Ceci concerne essentiellement le bâti, à vocation d'habitation, d'usage professionnel ou patrimonial, la notion de valeur de cession n'ayant pas de sens pour une partie de cette dernière catégorie. La valeur des terrains, autre composante de l'immobilier, n'intervient comme enjeu effectif que dans les cas de perte définitive d'usage. Il s'agit soit de leur disparition (érosion) soit de l'interdiction de l'usage du fait de l'exposition au risque (érosion ou inondation).

La valeur marchande du bâti et du foncier constitue une information utile pour l'évaluation des enjeux même si, en elle-même, elle ne suffit pas à la mesure des pertes induites par la réalisation du risque ou les bénéfices générés par un programme de prévention. Hormis le cas d'endommagement conduisant à la reconstruction intégrale du bâti ou la perte définitive d'usage de terrains, le montant des dommages ne constitue qu'une fraction de cette valeur fonction de l'intensité de l'aléa. Il n'en reste pas moins qu'une cartographie de ces enjeux par leur valeur marchande constitue un élément d'appréciation de la nature du risque et en particulier du niveau de vulnérabilité de la zone exposée.

4. La démarche d'évaluation

Un certain nombre d'éléments immobiliers présentent une faible variabilité, et il est courant d'utiliser des référentiels tels qu'un coût de réfection de 100 euros/m² de surface au sol pour un bâtiment de bureaux à usage administratif (privé ou public) ou bien un prix de la terre agricole en zone non constructible en bord de mer de 1 euro/m².

Concernant un bâtiment à usage professionnel, agricole, industriel ou commercial, le coût de remise en état du bâtiment proprement dit sera souvent moins important que les pertes en matériels ou en biens stockés dans ces bâtiments, sauf cas de destruction totale. La perte peut aussi être, pour des activités commerciales, un manque à gagner du fait d'un arrêt temporaire d'activité le temps de remise en état, de rachat des matériels ou de reconstitution des stocks. L'ensemble de ces éléments, très spécifique à chaque exploitation ou entreprise, ne peut s'étudier que par enquête. La valeur des enjeux liés à la présence d'un hypermarché situé en zone inondable n'est pas comparable à celle de la valeur des biens stockés dans un hangar agricole, même si le risque économique que représente une inondation peut être plus important pour l'activité du second que du premier.

Le bâti individuel et collectif à vocation d'habitation est une composante essentielle des enjeux que l'on trouve en proximité du rivage et donc dans les zones exposées aux risques d'érosion et d'inondation. L'hétérogénéité des biens, mais aussi les différentiels d'attractivité des espaces, font qu'il y a des écarts de valeur important. Une première approche consiste à réaliser une estimation de la valeur des biens à partir de leur identification et de la connaissance des prix moyens observés lors des transactions sur une zone donnée. Elle repose sur les étapes suivantes.

4.1. Constituer une base de données sur les caractéristiques et les prix de biens ayant fait l'objet de transaction dans la période récente dans la zone d'étude.

La qualité de l'estimation finale dépend en grande partie de la représentativité de la base de données et donc à la fois du nombre de transactions renseignées et de la proximité géographique

avec la zone d'étude. Il est en effet illusoire de trouver dans la zone à risque, souvent restreinte, suffisamment d'information pour obtenir des estimations fiables. Il y a donc un arbitrage à faire entre la zone de référence pour le recueil d'informations et le nombre de transactions répertoriés. Dans les travaux réalisés pour le programme Cocorisco, l'analyse statistique réalisée sur près de 2.200 transactions provenant de la base Perval a montré que la variabilité des prix des biens, à caractéristique équivalente, était fortement réduite dès lors que l'on retient les transactions pour des biens situés à moins de 100 m du littoral en traitant séparément les communes du Finistère et des Côtes d'Armor d'une part, et les communes du Morbihan et de l'Île et Vilaine d'autres part. Les valeurs moyennes au m² des biens ne sont pas significativement différentes à l'intérieur de ces paires de département, mais le sont entre-elles.

Tableau 2. Prix moyen par m² des ventes de maisons dans les départements breton (Balde & Bailly, 2013)

Variable d'analyse : Prix moyen par m ² par département					
Département	Nombre d'observation	Moyenne des ventes	Ecart-type de ventes	Variation	Maximum
Côtes d'Armor	428	1 825 €	657 €	36 %	3 191 €
Finistère	763	1 715 €	655 €	38 %	3 264 €
Morbihan	616	2 393 €	1 003 €	42 %	4 583 €
Ille et Vilaine	134	2 451 €	827 €	33 %	4 333 €

3.4.2. Réaliser une modélisation du prix au m² des biens en fonction de leurs caractéristiques.

Les techniques courantes de l'analyse de corrélation multivariée sont appliquées pour établir une formule de calcul d'un prix théorique (estimation) du m² d'un bien en fonction de ses caractéristiques. Là aussi un arbitrage doit être fait entre la précision de l'estimation et la quantité d'information mobilisée. Pour des raisons techniques, ces estimations s'effectuent en général à partir d'un faible nombre de caractéristiques clés telles que la surface habitable, la surface de terrain, le nombre de pièce, le nombre de salle de bains, la proximité de la mer, la vue sur mer, la localisation (bourg ou rurale). Outre les aspects techniques, la disponibilité des données est critique. Les meilleurs résultats d'estimation obtenus sur la base des transactions effectuées en zone littorale bretonne en 2012 sont donnés dans le tableau 3. Ils mettent en évidence l'impact significatif non seulement des surfaces (bâti et terrain) mais aussi d'éléments tels que le nombre de salles de bain, la présence d'un grenier, parking ou d'annexes, de l'état général du bâti.

Tableau 3. Modèle linéaire d'estimation du prix des biens en Bretagne (échantillon de 1460 transactions effectuées en 2012 zone littorale, Bretagne - Balde & Bailly, 2013)

Variable	Estimation coefficient	Ecart-type	t de Student	Description des variables
Constante	-15467	5675	-2,73	

nombre salle de bain	24534	3589	6,83	1 si une, 2 si plus
surface terrain	4	1,45	2,81	m ²
surface habitable	1246	45,7	27,27	m ²
code âge	10173	1121	9,07	5 modalités selon année de construction
code état	34002	3820	8,9	0 si mauvais, 1 si bon
distance mer	-13,6	2,7	-5,04	m

$R^2=0,57$ $F= 2790$ $n=1460$

3.4.3. Appliquer le modèle d'estimation aux biens identifiés et caractérisés dans la zone à risque

La principale difficulté réside dans la nécessité de collecter de manière exhaustive sur la zone les données nécessaires pour appliquer le modèle. La plupart des variables retenues dans ce modèle d'estimation, peuvent être renseignées à partir des données cadastrales : nombre de salle de bain, surface terrain, surface habitable, code âge et code état. La variable de distance à la mer est aisée à calculer à l'aide d'un SIG, à partir du géoréférencement des propriétés fourni par le RGE. Le modèle peut donc faire l'objet d'une application aux zones basses du littoral.

3.4.4. Cartographier la valeur des biens immobiliers

Cette cartographie peut s'effectuer soit sous forme de valeur (estimation ponctuelle) ou d'intervalle de confiance (fourchette haute et basse d'estimation du prix). Du fait de l'incertitude qui caractérise ces estimations, on préférera une approche zonale à une approche individuelle dans la restitution de ces estimations de prix. Les valeurs obtenues ne sont que des moyennes, et chaque bien pris individuellement peut avoir des caractéristiques qui éloignent fortement sa valeur de la moyenne. De plus, une information individuelle est susceptible de devenir un enjeu soit de controverse inutile soit de manipulation stratégique par certains acteurs. On peut retenir par exemple, la valeur de l'immobilier contenu dans des mailles carrées de 100 x 100 m ou de 200 x 200 m. L'agrégation sur la zone étudiée permet d'avoir une évaluation monétaire globale de la valeur de cet enjeu. Le niveau de résolution permet de mettre en évidence une répartition inégale de l'enjeu dans l'espace, comme le l'exemple d'application à la commune de Guisseny dans le nord Finistère (fig. 2).

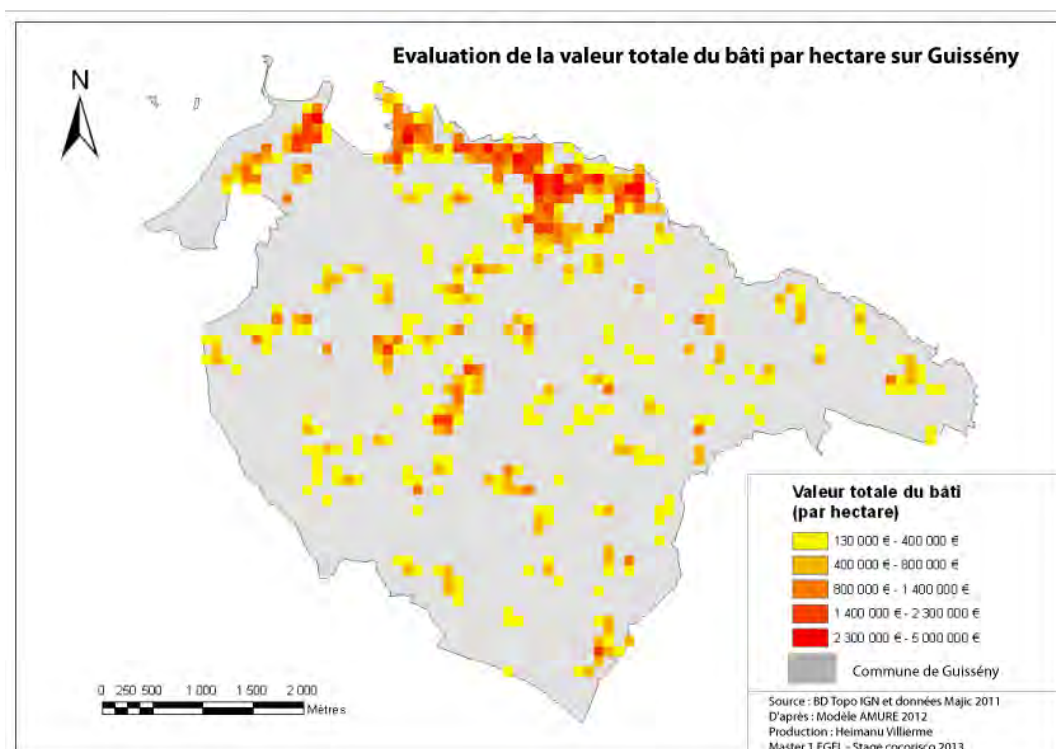


Figure 2. Evaluation de la valeur du bâti par hectare (exemple de Guissény - source : Villierme, 2013)

4. Conclusion

L'estimation de la valeur monétaire de certains enjeux matériels peut servir pour l'analyse des bénéfices associés à un plan de gestion du risque ou pour l'évaluation des dommages *ex-post*. L'exemple de l'évaluation de la valeur des biens immobiliers montre que la disponibilité de données, de plus en plus grande, permet de mettre en œuvre des approches de modélisation qui requièrent un minimum de complément sous forme d'observations de terrains pour augmenter la pertinence de l'évaluation.

En effet, les données de référence désormais disponibles (RGE, cadastre) fournissent un cadre approprié pour l'identification, la cartographie et la caractérisation des différentes catégories d'enjeux. Cependant, pour leur conférer un caractère opérationnel dans le cadre de la gestion des risques côtiers, le caractère générique de ces référentiels, de même que leur échelle ou leur fréquence de mise à jour, impose d'en compléter la description sur le terrain et auprès des organismes compétents.

D'un point de vue méthodologique, les incertitudes liées à l'exposition des enjeux aux aléas restent cependant importantes : qualité de la mesure, qualité des jeux de données employés, altération liée aux traitements. Ainsi comme dans toute modélisation, celle de la vulnérabilité des territoires résulte d'un double compromis méthodologique et social : compromis entre la précision de la description des enjeux, les référentiels choisis pour décrire les aléas et les incertitudes qui pèsent sur leur probabilité d'occurrence ; compromis entre ce que l'on connaît du risque en tant que

croisement entre ces aléas et des enjeux difficiles à décrire exhaustivement, le niveau d'exposition consenti face aux risques côtiers et les moyens dont on dispose ou que l'on se donne pour y faire face.

Il nous semble donc prudent de privilégier la simplicité des protocoles, sur la base de données de qualité éprouvée et d'accès aisé, afin de conserver intact le potentiel de transparence, de reproductibilité et de mise à jour des diagnostics. A cet égard, l'implication des usagers et des acteurs doit absolument être recherchée pour éclairer les analyses conduites sur les territoires considérés et prendre en compte les perceptions et les pratiques de gestion des crises afin d'éclairer les gestionnaires dans leur action.

Remerciements : ces travaux ont été entrepris dans le cadre de l'ANR Cocorisco. Pour les mener à bien, nous avons pu bénéficier des données cadastrales (Plan cadastral informatisé et fichiers fonciers de la BD Majic) aimablement communiquées par la DDTM29 et des données Lidar topographique du littoral Finistère gracieusement fournies par le Conseil général du Finistère. Nous souhaitons également remercier Mamadou Balde ainsi que nos stagiaires du master Sciences de la mer et du littoral, Olivier Bodéré et Heimanu Villierme (mention Egel) et Ousmane Sow (mention Prame).

Références

- André C., 2013. Analyse des dommages liés aux submersions marines et évaluation des coûts induits aux habitations à partir de données d'assurance, thèse de doctorat en géographie, Université de Bretagne Occidentale, 299 p. URL : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00961315>
- Balde M., Bailly D., 2013. Modélisation de la formation du prix des biens immobiliers en zone littorale en Bretagne. Rapport pour programme ANR COCORISCO, 63 p.
- CGDD-SOE-SEEIDD, 2012. Analyse multicritères : application aux mesures de prévention des inondations, cahier des charges, document de travail n°6.B, 170 p., URL : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Documents_de_travail/2012/guide-finale.pdf
- Cutter S.L., Emrich C.T., Webb J.J., Morath D., 2009. Social Vulnerability to Climate Variability Hazards: A Review of the Literature. Hazards and Vulnerability Research Institute, Department of Geography, University of South Carolina, 44p., URL : http://adapt.oxfamamerica.org/resources/Literature_Review.pdf
- D'Ercole R., Metzger P., 2011. Les risques en milieu urbain : éléments de réflexion, EchoGéo, n° 18, mis en ligne le 5 décembre 2011. URL : <http://echogeo.revues.org/12640>
- Hénaff A., Philippe M., Guidicelli N., 2014 – Gestion des risques d'érosion et de submersion marines : guide méthodologique, LETG-Brest Géomer, UBO, Brest, sous presse.
- MEDDE, 2014. Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux. Direction Générale de la Prévention des Risques, Service des Risques Naturels et Hydrauliques, 169 p., URL : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Guide-methodologique-Plan-de.html>
- MEDDTL, 2011. Plan submersions rapides (submersions rapides, crues soudaines et ruptures de digues), 79 p., URL : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Le_plan_submersion_rapide.pdf
- Mercier D., Chadenas C., 2012. La tempête Xynthia et la cartographie des "zones noires" sur le littoral français : analyse critique à partir de l'exemple de la Faute-sur-Mer (Vendée). Norois 222, 45–60., URL : <http://norois.revues.org/3895>
- Reghezza-Zitt M., 2012. Paris coule-t-il ? Fayard, Paris. 318 p.

Identification et cartographie des zones à risque potentiellement mortel face à la submersion marine : l'indice de V.I.E. appliqué à La Faute-sur-Mer (Vendée, France)

Axel Creach^{1,2}, Denis Mercier¹, Sophie Pardo²

1. Laboratoire LETG-Nantes Géolittomer, UMR 6554, CNRS,
Institut de Géographie Régionale de l'Université de Nantes
Campus Tertre, BP 81227 - 44312, Nantes cedex 3, France
Axel.Creach@univ-nantes.fr ; Denis.Mercier@univ-nantes.fr

2. Laboratoire d'Economie et de Management de Nantes-Atlantique
IEMN-IAE, Bâtiment Erdre
Campus Tertre, BP 52231 - 44322, Nantes cedex 3, France
Sophie.Pardo@univ-nantes.fr

Résumé. La tempête Xynthia a frappé les côtes atlantiques françaises dans la nuit du 28 février 2010 entraînant la submersion par la mer de zones littorales basses et le décès de 41 personnes par noyade. Au-delà du phénomène météo-marin responsable de la submersion marine, c'est l'occupation humaine du littoral qui a posé question. Manque d'entretien des digues à la mer, urbanisation de zones potentiellement inondables, absence de prescriptions urbanistiques sur ces constructions : tout a concouru à augmenter la vulnérabilité. Suite à cet événement, l'Etat a décidé de détruire les habitations qui présentaient un niveau de danger trop élevé pour leurs occupants. Dans cette évaluation de l'exposition à risque potentiellement mortel, nous proposons un indice de Vulnérabilité Intrinsèque Extrême (VIE) permettant de caractériser la vulnérabilité des constructions face au risque de submersion marine. Cet indice repose sur quatre critères : (i) la hauteur d'eau potentielle par maison ; (ii) la distance aux ouvrages de protection ; (iii) la typologie architecturale des constructions et (iv) la proximité à une zone refuge. Cet indice est testé sur La Faute-sur-Mer en Vendée, commune la plus fortement impactée par la tempête Xynthia avec 29 décès et près de 1 000 maisons inondées.

ABSTRACT. Storm Xynthia hit French Atlantic coast at the end of February 2010 and was responsible for the flooding of coastal low lying areas and 41 deaths by drowning. Amongst the storm characteristics, the land-use of coastal areas is the main problem which can explain this disaster with the increase of vulnerability and exposure to coastal risks. After this event, French government decides to bought and destruct houses where the danger level was considered as too high for people. Keeping with this politics, we proposed to go ahead in the evaluation of high exposure to sea-flood risks with a tool for decision makers to evaluate the level of vulnerability of residential houses. It is based on four criteria: (i) potential water level per houses, (ii) distance between dike and houses, (iii) architectural typology and (iv) proximity to safety places. This index is applied for the first time on La Faute-sur-Mer municipality where Xynthia storm killed 29 people and flooded 1000 houses.

MOTS-CLES : TEMPETE XYNTHIA, RISQUES LITTORAUX, SUBMERSION MARINE, VULNERABILITE, EXPOSITION, MORTALITE, BATI RESIDENTIEL, INDICE

KEYWORDS: STORM XYNTHIA, NATURAL HAZARDS, SEA-FLOOD, VULNERABILITY, EXPOSURE, MORTALITY, RESIDENTIAL HOUSES, INDEX

1. Introduction

La tempête Xynthia a touché les côtes atlantiques françaises dans la nuit du 28 février 2010. Elle est à l'origine du décès de 47 personnes, dont 41 par noyade, et de dommages estimés à plus de 2,5 milliards d'euros par la Cours des Comptes (2012). Le passage simultané de l'onde de tempête avec une marée haute de coefficient 102 a provoqué la submersion par la mer de zones littorales basses.

La pression foncière liée au développement du tourisme et de la villégiature depuis les années 1950 en France a entraîné une progressive urbanisation de ces zones. L'arrivée tardive (1995 pour les Plans de Prévention des Risques Littoraux – PPR-L) de documents réglementaires visant à contrôler les constructions dans les zones à risques n'a pas permis d'endiguer ce phénomène (Chadenas *et al.*, 2013). De plus, le manque d'entretiens des digues et l'inadaptation du bâti n'ont fait qu'accroître la vulnérabilité de ces zones au point d'engager la sécurité des personnes.

Le bilan dramatique de la tempête Xynthia a mis en lumière ces failles et ces manquements. Partant de ce constat, l'objet de cette communication est de proposer un outil simple et transposable visant à identifier les constructions résidentielles qui présentent un risque potentiellement mortel face au risque de submersion marine.

Nous nous attacherons, dans un premier temps, à définir ce qui fait d'un bâtiment une construction potentiellement mortelle en se basant sur le retour d'expérience de la tempête Xynthia. Dans un deuxième temps, nous présenterons l'indice de Vulnérabilité Intrinsèque Extrême (VIE), dans un troisième temps, les premiers résultats seront présentés à partir de l'exemple de la commune de La Faute-sur-Mer en Vendée, enfin, les perspectives de ce travail seront discutées.

2. Xynthia et l'exposition des constructions résidentielles au risque de submersion marine

La conjonction rare d'une marée haute de vive-eau (coefficient 102) avec le passage de la dépression Xynthia (977 ha), associée à des vents orientés sud-ouest (130 km/h en moyenne) ont entraîné une forte surcote dans les pertuis charentais (Bertin *et al.*, 2012, Feuillet *et al.*, 2012). Ces niveaux d'eau ont localement conduit à l'inondation par la mer de terres basses, principalement dans les zones poldérisées du marais poitevin, de l'estuaire de la Charente et sur les îles de Ré et d'Oléron. Près de 50 000 hectares ont été submergés en Vendée et Charente-Maritime (Magnan et Duvat, 2014 ; Chauveau *et al.*, 2011 ; Verger, 2011).

Ces deux départements ont connu un fort développement, depuis les années 1950, avec l'avènement du tourisme, la Vendée se classant au deuxième rang des départements touristiques pour sa capacité d'hébergement (Chauveau *et al.*, 2011). L'attrait de la mer et le développement de la villégiature ont induit une forte pression foncière dans les communes littorales de ces deux départements. La densité de population des communes littorales de la façade atlantique a augmenté de 40 % depuis 1962 et le nombre de constructions y est trois fois supérieur à la moyenne nationale entre 1990 et 2010. Cela a conduit à une urbanisation progressive de zones littorales basses, protégées de la mer par un réseau de digues (Perret et Sauzeau, 2014 ; Verger, 2011). Cette urbanisation est partiellement imputable à l'absence de documents réglementaires contraignant l'urbanisation des zones à risques, ce qui s'est notamment traduit par une inadaptation des constructions aux risques d'inondation par la mer (Vinet *et al.*, 2012a).

Cette inadaptation manifeste de l'aménagement au risque de submersion marine a ouvert la réflexion sur la dangerosité de certaines constructions en cas d'inondations par la mer. Quinze jours après les événements de la tempête Xynthia, l'Etat français a ordonné le rachat et la destruction des habitations qui présentaient un risque pour la vie humaine. Plus connue sous l'appellation « zones noires », cette mesure se basait sur un certain nombre de critères permettant de définir la dangerosité de la construction. Elle s'est appliquée uniquement aux zones touchées par la tempête Xynthia et a fait l'objet de nombreuses critiques (Mercier et Chadenas, 2012 ; Magnan et Duvat, 2014).

Ainsi, la localisation des constructions ou leurs caractéristiques intrinsèques peuvent être sources de dangers pour leurs occupants. La montée rapide de l'eau et l'effet de surprise qu'il entraîne est un facteur important pouvant entraîner des décès. L'effet des digues est à ce titre prépondérant et est illustré par le fait que 90 % des décès liés à la tempête Xynthia sur la commune de La Faute-sur-Mer ont eu lieu à moins de 400 mètres des digues (Vinet *et al.*, 2012a). Les hauteurs d'eau sont également un facteur de danger pour la population. Au-delà d'un mètre d'eau, il est admis qu'un « adulte sportif stressé » éprouve de grandes difficultés à se déplacer (Mercier et Chadenas, 2012). En certains endroits, les hauteurs d'eau ont atteint des niveaux supérieurs à 2,5 mètres, limitant les possibilités de se réfugier. L'architecture des constructions peut donc être un facteur de risque supplémentaire en cas d'inadaptation (Jousseume *et al.*, 2004 ; Leone *et al.*, 2011 ; Vinet *et al.*, 2012). 75% des décès par noyade lors de Xynthia sont intervenus dans des maisons de plain-pied qui ont été un véritable piège pour leurs occupants (Lumbroso et Vinet, 2011 ; Vinet *et al.*, 2012b). L'absence de fenêtre de toit et la présence généralisée de volets électriques ont été des facteurs aggravant pour la sécurité des personnes.

Notons que de nombreux autres facteurs expliquent le bilan de la tempête Xynthia, mais ceux-ci ne sont pas directement reliés aux caractéristiques des constructions. Nous pensons ici à la saisonnalité des événements, à l'occupation ou non des résidences secondaires au moment du passage de la tempête, à la mobilité des personnes.

3. Un indice pour évaluer l'exposition à un risque potentiellement mortel

En se basant sur le constat de la première partie, et à la suite des travaux menés par l'Etat dans le cadre des expropriations post-Xynthia, nous proposons de caractériser le niveau de dangerosité des constructions résidentielles face au risque de submersion marine. Alors que l'Etat s'est concentré sur les zones impactées par la tempête, nous proposons de faire un outil simple et transposable à d'autres territoires afin de mener un travail prospectif de caractérisation de la vulnérabilité. Cet outil, l'indice de Vulnérabilité Intrinsèque Extrême (V.I.E.), repose sur quatre critères (figure 1).

3.1. Les critères de l'indice de V.I.E.

- Les deux premiers paramètres appréhendent l'environnement des bâtiments au risque de submersion marine :

- (i) La hauteur d'eau potentielle : c'est le critère déterminant pour caractériser l'exposition d'un bâtiment résidentiel au risque de submersion marine. Elle est calculée à partir de l'altitude du terrain

naturel (issue des données Litto-3D) de chaque bâtiment et de la cote du niveau marin de référence (issu des PPR-L).

- (ii) La distance aux ouvrages de protection contre la submersion marine : ce critère se base sur des bandes forfaitaires de 100 mètres en arrière des ouvrages de protection pour tenir compte de l'effet de surprise que peut engendrer une défaillance. L'état de « fonctionnalité » de l'ouvrage est pris en compte ainsi que la topographie située en arrière de l'ouvrage (pour déterminer l'effet cuvette).

- Les deux autres paramètres de l'indice sont relatifs aux caractéristiques intrinsèques aux bâtiments :

- (iii) La typologie architecturale des constructions : c'est un paramètre très important pour caractériser la vulnérabilité des occupants au risque de submersion marine. La typologie utilisée s'inspire de travaux antérieurs sur la question (Jousseau *et al.*, 2004 ; Jousseau et Mercier, 2009 ; Leone *et al.*, 2011 ; Vinet *et al.*, 2012a).

- (iv) La proximité à une zone refuge. Est définie comme zone refuge, toutes zones dont la cote du terrain naturel est supérieure à la cote de l'aléa de référence. La proximité d'une zone refuge est un gage de sécurité en cas de submersion marine puisqu'il peut permettre aux résidents de se déplacer temporairement dans une zone non dangereuse, ce qui peut, de surcroît, faciliter l'intervention des secours.

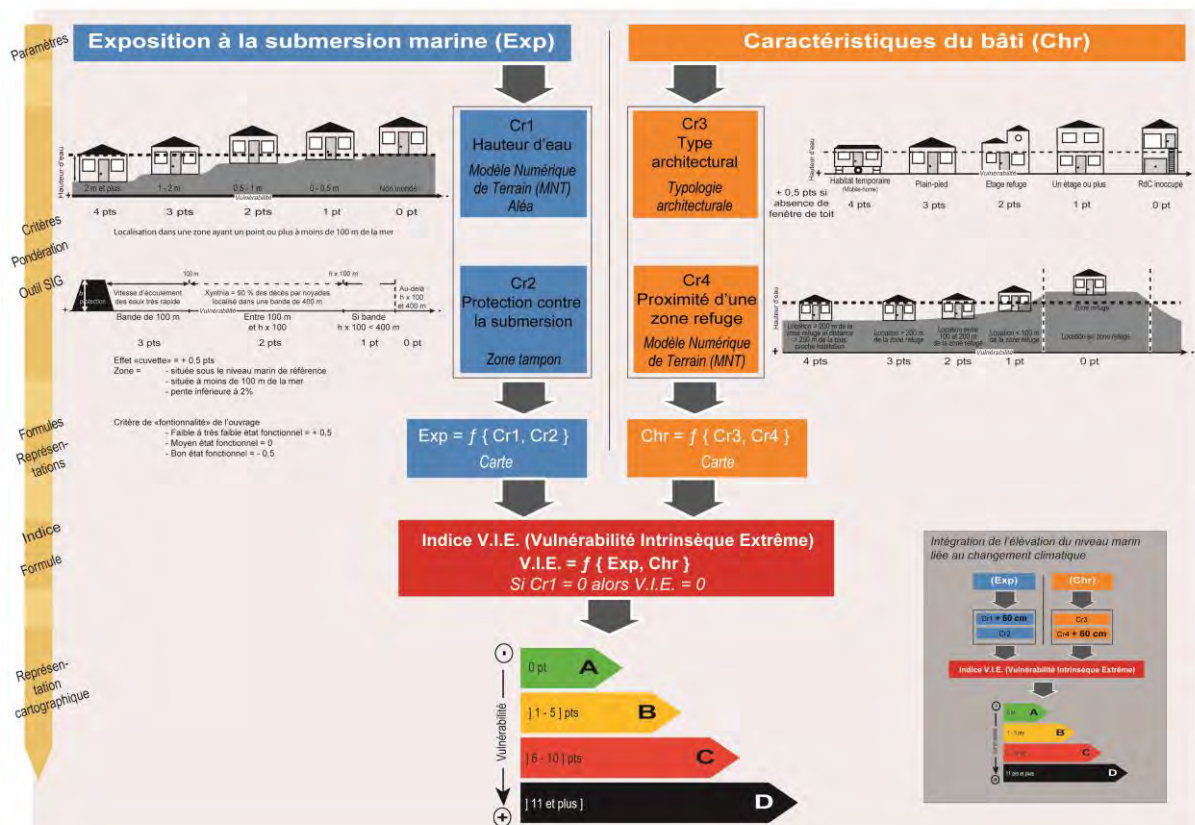


Figure 1 : Indice de Vulnérabilité Intrinsèque Extrême (V.I.E.) : critères et architecture

3.2. L'architecture de l'indice

Les quatre critères, regroupés en deux paramètres, sont classés de 0 à 4. Pour calculer l'indice, les quatre critères sont additionnés et la somme donne le niveau de vulnérabilité des bâtiments. Une échelle de couleur détermine le classement des constructions en quatre niveaux :

- Classe A : elle concerne les constructions qui ne sont pas situées en zone inondable et dont l'indice V.I.E. est égal à 0. Il convient de noter que si le critère 1 (hauteur d'eau potentielle) est égal à 0 (non inondable) alors l'indice de V.I.E. est automatiquement égal à 0.
- Classe B : elle concerne les constructions qui présentent une vulnérabilité certaine face au risque de submersion marine, notamment par une inadaptation du bâti, mais où les hauteurs d'eau potentielles sont relativement faibles et donc limitent les risques.
- Classe C : elles concernent les constructions qui présentent un niveau d'eau potentiellement important (> 1 m) en cas de submersion marine, mais qui, de par la configuration du bâti (présence d'étages), ne présente pas un risque potentiellement mortel.
- Classe D : c'est le classement maximum de l'indice V.I.E. Il caractérise les constructions où un risque de décès n'est pas à exclure en cas de submersion marine.

Pour tenir compte des effets de l'élévation du niveau marin liée au changement climatique, il est proposé d'appliquer l'indice pour deux scénarios d'aléa. Le premier, dit scénario actuel, est basé sur le niveau marin du « scénario de référence » pris en compte dans le cadre des PPR-L. Le second correspond au « scénario à l'échéance 2100 » qui intègre une élévation de 60 cm au niveau marin de référence (MEDDE, 2013).

4. Résultats préliminaires pour la commune de La Faute-sur-Mer

La commune de La Faute-sur-Mer, est une station balnéaire du sud Vendée. En 2006, elle comptait 1 008 habitants permanents, 80 % de résidences secondaires, et près de 8 000 emplacements de campings (Vinet et al. 2012a). Devenue indépendante de La Tranche-sur-Mer en 1953, La Faute-sur-Mer s'est fortement développée depuis puisque sa population a triplé et le nombre de constructions a été multiplié par sept !

Comme l'ont bien montré Vinet et ses collègues (2012a), « La Faute-sur-Mer représente un véritable cas d'école dans ce processus de production du risque ». Elle s'est développée sur la flèche sableuse d'Arçay et est isolée de l'estuaire du Lay par un ensemble de digues. C'est donc artificiellement qu'elle est isolée de la mer. Alors que le hameau original de La Faute-sur-Mer se situe sur un point relativement haut de la commune, l'extension de l'urbanisation a concouru à aménager les zones marécageuses du sud de la pointe d'Arçay. L'absence de documents de planification a permis l'urbanisation des zones les plus basses, sans prescriptions architecturales particulières (Pigeon, 2012). La « cuvette de la mort » où l'on a enregistré 28 décès par noyade lors de Xynthia a été construite après les années 1980. Les dernières constructions ont reçu plus de 2 mètres d'eau.

La Faute-sur-Mer, par ses caractéristiques, est donc une commune particulièrement exposée au risque de submersion marine. L'application de l'indice donne des résultats sans appels (figure 2). Pour l'aléa de référence actuel, à 4,70 m NGF (niveau Xynthia), seules 8% des constructions ne sont pas concernées par une éventuelle submersion marine. Celles-ci sont localisées sur le revers de la dune. A l'inverse, près de 90% des constructions présentent un degré d'exposition fort à très fort (et donc potentiellement mortel) pour leurs occupants.

Ainsi, pour la commune de La Faute-sur-Mer, 80 % des décès ont eu lieu dans des constructions que l'on retrouve en classe D (noire) en appliquant l'indice V.I.E. Si on s'intéresse aux périmètres délimités dans le cadre des zones noires, les résultats sont également bons. Le premier périmètre défini en avril 2010 compte 75 % de constructions identifiées en classe D et 25 % en classe C (rouge). Ce premier zonage avait été fortement critiqué, certaines maisons n'ayant pas été inondées lors de la tempête étaient sous le coup d'une procédure de rachat par l'Etat. Logiquement, le résultat s'affine avec le second périmètre (octobre 2010). La proportion de maisons identifiées en classe D atteint 86 % des constructions de la zone.

Deux secteurs classés en D (noire) se distinguent. Le premier, au sud, correspond à la zone la plus impactée lors de Xynthia et où ont été recensés 28 décès. La seconde, au nord, correspond également à des développements récents. Elle a été peu submergée en février 2010. Néanmoins, la mission d'expertise des zones de solidarités (Pitié et Puech, 2010) avait noté la configuration particulièrement vulnérable de ce quartier, s'interrogeant sur les conséquences de l'élévation du niveau marin liée au changement climatique et aux effets d'une crue du Lay sur une submersion potentielle du quartier. En effet, certaines constructions se trouvent à une altitude de 2,50 m NGF.

Le fait que 80% des constructions soient des résidences secondaires laisse supposer que lors du passage de Xynthia (fin février 2010) la plupart d'entre-elles étaient inoccupées. Il va sans dire que dans le cas contraire, le bilan humain aurait pu être bien plus lourd.

Indice de Vulnérabilité Intrinsèque Extrême (V.I.E.) **Commune de La Faute-sur-Mer (Aléa " actuel " à 4,70 m NGF)**

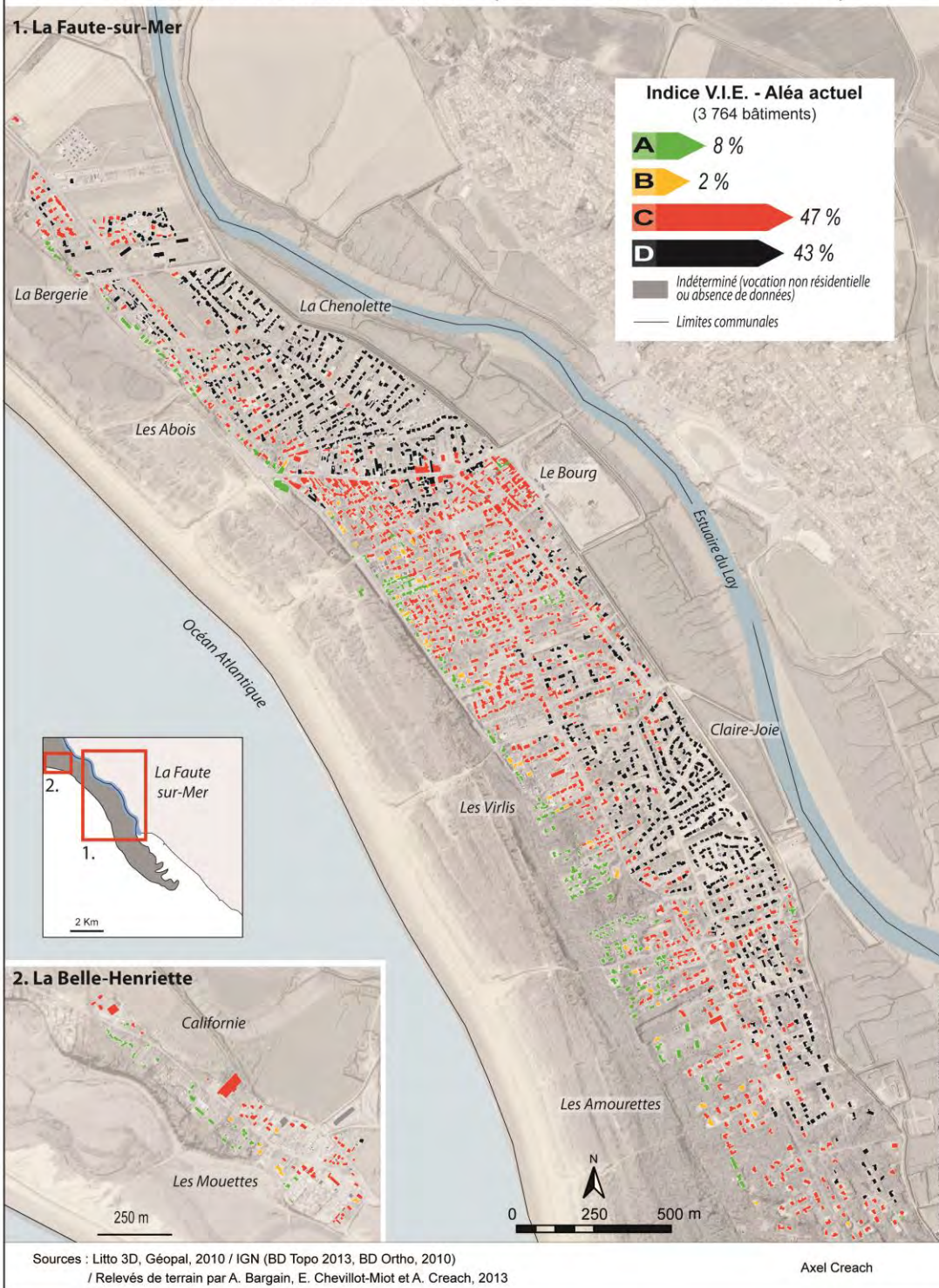


Figure 2 : application de l'indice de Vulnérabilité Intrinsèque Extrême (V.I.E.) sur la commune de La Faute-sur-Mer (Vendée)

5. Perspectives et améliorations

Dans le cadre de ce travail, la méthode utilisée pour estimer les hauteurs d'eau est une méthode « statique » de superposition d'un niveau marin de référence à la topographie. Cette méthode à l'avantage d'être simple dans sa mise en œuvre. Néanmoins, elle a tendance à surestimer les hauteurs d'eau dans le cas de marais étendus, ne tenant pas compte de la cinétique de l'inondation (Breilh *et al.*, 2013). Pour affiner le calcul des hauteurs d'eau, il serait intéressant d'appliquer la méthode alternative proposée par Breilh et son équipe (2013), notamment dans le cas du marais poitevin.

Nous avons décidé de nous concentrer sur les caractéristiques du bâti pour évaluer le degré de dangerosité des constructions pour ses occupants en cas de submersion par la mer. Dans un souci d'exhaustivité, il conviendrait de coupler ce travail avec des données fines d'occupation des ménages (notamment à partir de données issues des recensements de la population). Ces données sont néanmoins difficiles à obtenir à l'échelle fine du bâti à laquelle est mené ce travail.

L'objectif de ce travail est d'offrir un outil d'évaluation de l'exposition mortelle des constructions résidentielles au risque de submersion marine en allant plus loin que la première analyse offerte par les services de l'Etat suite à la tempête Xynthia. Les premiers résultats obtenus offrent des perspectives de travail intéressantes. Néanmoins, pour affiner le retour d'expérience sur la tempête Xynthia, des données supplémentaires ont été collectées sur deux autres communes impactées par la tempête : L'Aiguillon-sur-Mer et Charron (Creach, travaux en cours).

Il conviendra ensuite d'appliquer l'indice sur des territoires non impactés par Xynthia afin d'identifier les constructions qui présentent un haut degré d'exposition face au risque de submersion marine. Un travail est en cours pour faire une application prospective sur l'île de Noirmoutier (Vendée). L'île possède des caractéristiques similaires à l'île de Ré, mais contrairement à cette dernière, elle n'a pas été impactée par la tempête Xynthia. Néanmoins, elle a été très fortement touchée par une tempête en 1937. Garnier et ses collègues (2012) ont estimé les coûts actuels de cette tempête à un montant quatre fois supérieur à celui de Xynthia. Il sera donc particulièrement pertinent de réfléchir à des mesures de réduction de la vulnérabilité sur les constructions identifiées comme présentant une forte exposition au risque de submersion marine.

6. Conclusion

La tempête Xynthia est venue nous rappeler que l'urbanisation irraisonnée du littoral pouvait être source de vulnérabilité pour la population y résidant, pouvant même conduire à un risque potentiellement mortel dans les cas les plus extrêmes. L'Etat y a apporté une première réponse en déconstruisant des biens soumis à un extrême danger dans les secteurs impactés par la tempête de 2010.

Un indice de Vulnérabilité intrinsèque Extrême (V.I.E.) est proposé et testé sur la commune de La Faute-sur-Mer et donne des résultats conformes aux retours d'expérience de la tempête Xynthia. Cet

outil proposé ici se veut simple et transposable afin de permettre un diagnostic fin, à l'échelle de la construction, des biens exposés à des risques comparables

L'élévation du niveau marin liée au changement climatique ne devrait que renforcer l'acuité de cette question, à l'heure où, l'Etat comptant ses deniers, il ne sera pas possible de tout protéger. Quelles stratégies de gestion de ces zones doivent être envisagées ? A quels coûts ? Et qui doit supporter ces dépenses ?

Les auteurs remercient le programme Géopal, la DREAL Poitou-Charentes, les SDIS 85 et 17, Freddy Vinet, Elie Chevillot-Miot et Annaëlle Bargain pour la collecte de l'ensemble des données. Enfin, nos remerciements vont au programme de recherche COSELMAR pour le soutien accordé pour ce travail.

Bibliographie

- Bertin X., Bruneau N., Breilh J-F., Fortunato A. B. et Karpytchev M. (2012). Importance of Wave Age and Resonance in Storm Surges: The Case Xynthia, Bay of Biscay, *Ocean Modelling*, n° 42, p. 16–30.
- Breilh J-F., Chaumillon E., Bertin X. et Gravelle M. (2013). Assessment of Static Flood Modeling Techniques: Application to Contrasting Marshes Flooded during Xynthia (western France), *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 13, n° 6, p. 1595–1612.
- Chadenas C., Creach A., Mercier D. (2013). The impact of storm Xynthia in 2010 on coastal flood prevention policy in France. *Journal of Coastal Conservation*. vol. 17, n°4, p. 1-10.
- Chauveau, E., Chadenas, C., Comentale, B., Pottier, P., Blanlœuil, A., Feuillet, T., Mercier D., Pourinet L., Rollo N., Tillier, I. et Trouillet B. (2011). Xynthia: leçons d'une catastrophe. *CyberGeo: European Journal of Geography*. URL : <http://cybergeog.revues.org/23763>
- Cours des Comptes (2012). Les enseignements des inondations de 2010 sur le littoral atlantique (Xynthia) et dans le Var. Rapport public thématique. Cours des Comptes, Juillet 2012.
- Feuillet T., Chauveau E. et Pourinet L. (2012). Xynthia est-elle exceptionnelle ? Réflexions sur l'évolution et les temps de retour des tempêtes, des marées de tempête, et des risques de surcotes associés sur la façade atlantique française, *Noroi*. vol. 1, n° 222, p. 27–44.
- Garnier, E., Henry, N., et Desarthe, J. (2012). Visions croisées de l'historien et du courtier en réassurance sur les submersions : recrudescence de l'aléa ou vulnérabilisation croissante ? In *Gestion des risques naturels – Leçons de la tempête Xynthia*, Editions Quae, Versailles. p. 105-128.
- Jousseaume, V., Landrein, J. et Mercier, D. (2004). La vulnérabilité des hommes et des habitations face au risque d'inondation dans le Val nantais (1841-2003). *Noroi*. vol. 3, n° 192, p. 29–45.
- Jousseaume V. et Mercier D. (2009). Évaluer la vulnérabilité architecturale de l'habitat en zone inondable. In *Risques et environnement: recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, L'Harmattan, Paris. p. 199-214.
- Leone, F., Lavigne, F., Paris, R., Denain, J.-C. et Vinet, F. (2011). A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability. *Applied Geography*, vol. 31, n° 1, p. 363–375.
- Lumbroso, D. M., et Vinet, F. (2011). A comparison of the causes, effects and aftermaths of the coastal flooding of England in 1953 and France in 2010. *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 11, n°8, p. 2321–2333.
- Magnan, A. et Duvat, V. (2014). *Des catastrophes... « naturelles » ?* Editions Le Pommier, Paris.

- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie – MEDDE (2013). *Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux*, Guide méthodologique, Décembre 2013.
- Mercier, D. et Chadenas, C. (2012). La tempête Xynthia et la cartographie des « zones noires » sur le littoral français : analyse critique à partir de l'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée). *Norois*, vol. 1, n° 222, p. 45–60.
- Perret J. et Sauzeau T. (2014). *Xynthia ou la mémoire réveillée. Des villages charentais et vendéens face à l'océan (XVIIIe-XXIe siècles)*. Editions Geste, La Crèche.
- Pigeon, P. (2012). Apports de la résilience à la géographie des risques : l'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée, France). *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. 12, n°1. URL : <http://vertigo.revues.org/12031>
- Pitié, C. et Puech, P. (2010). *Expertise complémentaire des zones de solidarité délimitées en Vendée suite à la tempête Xynthia survenue dans la nuit du 27 au 28 février 2010* Rapport d'expertise, 16 septembre 2010.
- Verger, F. (2011). Dignes et polders littoraux : réflexions après la tempête Xynthia. *Physio-Géo. Géographie, physique, et environnement*, vol. 5, p. 95–105. URL : <http://physio-geo.revues.org/1740>
- Vinet, F., Defossez, S., Rey, T., & Boissier, L. (2012a). Le processus de production du risque « submersion marine » en zone littorale : l'exemple des territoires « Xynthia ». *Norois*, vol. 1, n° 222, p. 11–26.
- Vinet, F., Lumbroso, D., Defossez, S., et Boissier, L. (2012b). A comparative analysis of the loss of life during two recent floods in France: the sea surge caused by the storm Xynthia and the flash flood in Var. *Natural Hazards*, vol. 61, n° 3, p. 1179–1201.

From “Le trait de côte, sentier de transmission des risques côtiers” to the “Public perception of coastal flooding and erosion risk”.

A short history from the Theseus project

Juan Baztan^{1,2}, Jean-Paul Vanderlinden^{1,2}, Nabil Touili¹, Idrissa O. Kane¹

1. CEARC, Observatoire de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, <http://www.cearc.fr>
11, boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt, France

2. Marine Sciences For Society, <http://www.marine-sciences-for-society.org/>
jbaztan@marine-sciences-for-society.org ; jean-paul.vanderlinden@uvsq.fr ; nabil.touili@uvsq.fr ;
idrissa-oumar.kane@uvsq.fr

ABSTRACT.

Recent damages and losses associated with coastal floods have generated many analyses dealing with overexposure to flood risk, its consequences, associated technological choices and governance principles, and what seems to be a poor understanding of the causes and consequences of floods and working of coastal defences at the local level. While many analyses demonstrate that risks are both physically and socially constructed, in this paper we go further by analysing risk mitigation options (engineering works) as being dual (physically and socially constructed) as well. When envisioning mitigation options through stakeholders' perception, one can observe a mix of intertwined statements associated with (i) the relevance of the specific risk, (ii) the sometimes incomplete knowledge associated with the mitigation option and its performance at reducing risk, and (iii) the value conflicts that may be present when envisioning a particular flood risk mitigation strategy. Our research question is “what are the drivers of stakeholder perceptions when envisioning engineering-based mitigation options.” Through qualitative empirical fieldwork conducted in three European coastal settings: Cesenatico, Santander and the Gironde Estuary, we demonstrate here that engineered mitigation solutions are socially constructed by referring to individual and collective heuristics associated with these options. These heuristics may lead to poor social acceptability of envisioned mitigation options, poor acceptability not directly linked to the performance in terms of risk reduction.

KEYWORDS: Risk perception , Risk mitigation , Flood.



Figure 1: low lying area in Santander.

1. Introduction

In this paper we identify the drivers of the stakeholders attitude toward a specific category of coastal risk mitigation: engineering-based risk mitigation options. Most risk perception analyses deal with the way individuals or groups relate to uncertain events and their associated outcomes. In this paper we enter the “risk perception” analysis through a different entry point: the risk mitigation options.

Recent damages and losses associated with coastal floods have generated many analyses dealing with overexposure to flood risk, its consequences, associated poor governance principles (Eisenman et al., 2007), and what seems to be a poor understanding of the causes and consequences of floods (Burby, 2006; Schneider, 2005). This “poor understanding” points toward a need to reinforce the science-policy interface. Yet this has been mostly approached by attempts at informing the public and policymakers in order to fill a perceived “knowledge gap”. This “knowledge gap hypothesis” is very much contested. There is ample evidence that knowledge is not the sole determinant of risk (mis)perception (e.g., Kahan et al., 2012).

More recently, integrative approaches to the analysis of risk perception have been proposed (Renn, 2008) stressing the fact that risk perceptions are determined by collective and personal manifestation of cultural backgrounds, socio-political institutions, cognitive affective factors and heuristics of information processing. This diversity of these potential sources of (mis-)perceptions indicates how ludicrous it may be to try to address one of these in order to modify attitudes.

When envisioning risk mitigation strategies and options the issue of perception is complexified by the mitigation option choice itself. Risk mitigation options raise perception issues as well. Furthermore, the concrete nature of a mitigation option implementation, its direct visibility to those affected, its existence, even if the risk does not concretize itself, may lead to a differential framing of the option chosen and of the risk under consideration. Finally, mitigation option may raise acceptability issues as some options may profoundly change the landscape, potential land use, real estate values and the likes.

While many analyses demonstrate that risks are both physically and socially constructed, in this paper we go further by analysing risk mitigation options (engineering works) as being dual (physically and socially constructed) as well.

This paper answer to some of the question identified above by exploring empirically the following research question: “What are the drivers of stakeholder perceptions when envisioning engineering-based mitigation options?.”

In Section 2 (this Introduction being Section 1) we present a synthesis of the theoretical frameworks that we are using, we define the type of mitigation option under scrutiny and present the associated working hypothesis. Section three briefly presents the method that has been used for the empirical part of our work. Section 4 presents and discusses the results that were obtained. Section 5 concludes this paper.



Figure 2: low lying area in Gdansk.

2. Central concepts and working hypothesis

2.1. Risk and perception, toward an integrative framework and its application to coastal risks.

Risk is a mental model (Renn, 2008, p.2). Part of this model is linked with reality as it may manifest itself (some will call it the hazard, others will associate a probability density function with the description of an event) and part is linked with the way individual and society frame this manifestation (some may call this the consequence). By “framing” we mean here: how individuals talk about, and then assess the risk, taking into account contextual elements that seems neither directly linked with the probabilistic nature of risk nor with its consequences. This framing leads to situation where risk assessment by experts and risk assessment by laypersons lead to dissonant conclusions that may lead to suboptimal behaviours, ill designed and/or not well accepted risk management options.

Therefore, what is understood as “risk”, “risk management”, “risk assessment” and the likes may cover diverse realities. While this is not a difficulty in itself, it raises several challenges when identifying a risk worth managing, when choosing the management option and when setting the risk governance mechanism. The analysis of this diversity has been the focus of the active and diverse literature on risk perceptions. Key elements of this literature are presented here as well as its potential interest to the analysis of engineering-based coastal risk mitigation options. Several theories constitute the main stream in risk perception since the 80s. We chose to focus on the followings: the psychometric approach to risk, the cultural theory of risk, the social amplification of risk, the governmentality approach to risk and the synthesis recently produced by Renn (2008).

Psychometrics deals with the quantification and prediction of risk and is probably the leading contender in the field (Sjöberg, 2000); according to Slovic (1992), the perceived risk is somehow quantifiable and predictable and one of the main questions is: “how much risk people say are they willing to accept?”. The three main factors are: 1) the degree to which a risk is understood, 2) the degree to which it evokes a feeling of dread and, 3) the number of people exposed to the risk. An approach for studying perceived risk is to develop taxonomies for hazards that can be used to predict

attitudes toward their risks. A taxonomic scheme might explain, for example, people's extreme aversion to some hazards, their indifference to others, and the discrepancies between these reactions and experts' opinions. The most common approach to this goal has employed the psychometric paradigm (Fischhoff et al., 1978; Slovic et al., 1984), which uses scaling and multivariate analysis techniques to produce quantitative representations of risk attitudes and perceptions. Within the psychometric paradigm, people make quantitative judgments about the current and desired riskiness of diverse hazards and the desired level of regulation of each (Slovic, 1992). These judgments are then related to judgments about other properties, such as (i) the hazard's status on characteristics that have been hypothesized to account for risk perceptions and attitudes (for example, voluntariness, dread, knowledge, controllability), (ii) the benefits that each hazard provides to society, (iii) the number of deaths caused by the hazard in an average year, (iv) the number of deaths caused by the hazard in a disastrous year, and (v) the seriousness of each death from a particular hazard relative to a death due to other causes (Slovic, 1992). While the psychometric approach has been widely used to quantify relative perception of risk, it seems of little use when envisioning options for risk mitigation. Acknowledging the need for action, does not necessarily define the attitudes toward modes of action.

In the seminal "Risk and Culture" (Douglas and Wildavsky, 1982), one can read: "can we know the risks we face, now or in the future? No, we cannot; but yes, we must act as if we do. Some dangers are unknown; others are known, but not by us because no one person can know everything. Most people cannot be aware of most dangers at most times. How, then, do people decide which risks to take and which to ignore? On what basis are certain dangers guarded against and others relegated to secondary status?" "Risk and Culture" attributed political conflict over environmental and technological risks to a struggle between adherents of competing ways of life associated with the two dimensions "group" and "grid". A "high group" way of life exhibits a high degree of collective control, whereas a "low group" one exhibits a much lower one and a resulting emphasis on individual self-sufficiency. A "high grid" way of life is characterized by conspicuous and durable forms of stratification in roles and authority, whereas a "low grid" one reflects a more egalitarian status. Therefore, egalitarian ("low grid") and collectivist ("high group") cultures gravitate toward fear of environmental disaster as a justification for restricting commercial behaviour productive of inequality; and individualistic ("low group") and hierarchical ("high grid") cultures resist claims of environmental risk in order to shield private orderings from interference, and to defend established commercial and governmental elites from subversive rebuke. This cultural theory is of interest when envisioning coastal risks because it indicates that risk, and risk mitigation options, and perceptions may very well be defined by factors that are not necessarily directly connected to knowledge. Risk assessment and mitigation may encounter difficulties associated with norms and tradition. The setting up of engineering-based mitigation options may lead to attitudes toward these options that are influenced by cultural factors as defined above rather than by the performance in terms of risk mitigation of the option that is envisioned.

The concept of "social amplification of risk" suggests that the actions of the media, government, and nongovernmental organizations, as well as disputes among scientists, can significantly increase or decrease public risk concerns (Kasperson et al., 1988). The social amplification of risk theory is of interest when analysing coastal risks because of the importance of climate change. Climate change is a field where controversies have been making the headline news. Furthermore conducting field level research on risk is an information gathering, mobilizing and knowledge creation activity, which in itself may contribute to social amplification dynamics.

“Governmentality” theory deals with new style of governance in modernity where the risk is mainly understood as entirely socially it makes no sense to ask for more or less risk or how real risks are (Foucault, 2004). Governmentality emphasises the diversity of forms that risk takes as a governmental technique, and stresses their very different implications for those who are governed. It focuses on governmental plans and programmes. Within this framework it is argued that the relevant hazards may be unilaterally and centrally defined by those holding the power. As such hazards and therefore risk can be instrumentalized by governments pursuing objectives (hidden agendas) not pertaining to risk per se. Within coastal context, climate change may thus be framed as an opportunity for governments to regain control of coastal areas.

Combining these various theoretical and empirical approaches, Renn and Rohrman (2000) and Renn (2008) have been proposing an integrative model of risk perception.

This model acknowledges the fact that risk perceptions are influenced both by collective influences and the personal manifestation of these influences. Furthermore this model acknowledges the fact that these influences belong to the cultural sphere, to the socio-political arenas, to cognitive affective factors and to heuristic and information processing (Renn, 2008).

These determinants lead through their integration to claim by risk stakeholder dealing with (1) what is good, tolerable, and/or acceptable, (2) what matters to society, what are the important phenomena that should receive our attention and, (3) causal linkages. Stakeholders' discourse is thus embedded in a “Claims triangle”. Accessing the relative importance of the claim categories, and qualifying the content of these claims, gives an access to the determinants of perceptions.

This integrative framework, combined with the elements given above on psychometrics, cultural theory, social amplification and governmentality will be used here after to develop an understanding of the way stakeholder perceive engineering-based coastal risk mitigation options.

2.2. Engineering-based mitigation options: an ad hoc THESEUS-centred and SPRC-based typology.

In order to establish what an “engineering-based coastal risk mitigation option” is, we have chosen to focus on the observations and developments made within the THESEUS project (Zanuttigh, 2011; Zanuttigh et al., 2014). We used the project's official deliverables (Burcharth, 2012; Nicholls, 2011; Vanderlinden, 2012) in order to identify and typify these options. We then identify their rationale for intervention within the Source Pathway Receptor Consequences (SPRC) framework as applied within the THESEUS project (Narayan et al., 2014). It must be stressed here that the SPRC framework corresponds to a simplified representation of the coastal system that is particularly powerful when envisioning the choice of an engineering-based risk mitigation option. Yet this simplification somehow erases the complex nature of the coastal system; this is not necessarily neutral (Kane et al., 2014).

2.3. The question at hand revisited and working hypothesis

In the light of Sections 2.1 and 2.2 above we can refine our general question: “what are the drivers of stakeholders' perceptions when envisioning coastal risk and engineering-based mitigation options

First, we need to ascertain whether the mitigation options raise value-laden issues, this in line with the “cultural theory” and with the normative claims of Renn's (2008) integrative framework. This leads to a first working hypothesis: “Engineering-based mitigation options generate normative

claims in stakeholders' discourses and these normative claims play a role in the definition of stakeholders' attitudes toward the risk mitigation options". Second, we need to ascertain whether the mitigation option raises pertinence issues (i.e. are the assets protected well chosen), this coherently with the psychometric framework and the integrative framework. This leads to a second working hypothesis: "Engineering-based coastal risk mitigation options generate pertinence claims in stakeholders' discourses and these pertinence claims play a role in the definition of stakeholders' attitudes toward the risk mitigation options". Third, associated with the governmentality theory, social amplification theory and with the integrative framework, we need to explore whether the causal chains that are mobilized in the design and choice of engineering-based risk mitigation options are congruent with the way stakeholders understand and describe, explicitly or implicitly the functioning of the coastal system. This leads to our third working hypothesis: "Engineering-based coastal risk mitigation options generate evidence claims in stakeholders' discourses and these evidence claims play a role in the definition of stakeholders' attitudes toward the risk mitigation options".

3. Material and methods

In order to conduct our analysis we used a corpus consisting of transcribed semi directed interviews with coastal risk stakeholders. This corpus consists of 32 transcribed semi directed interviews in three European locations with very different coastal risk settings: the Gironde estuary, France (9 interviews), Santander, Spain (12 interviews) and Cesenatico, Italy (11 interviews). The interview framework was built around an aerial photograph of the site, the identification of areas at risk of flooding or erosion, and the discussion of current or envisioned challenge for risk and risk mitigation. This corpus was chosen as a proxy to local stakeholders individual and collective representations. The average duration of interviews amounted to 50 min (minimum of 17 min, maximum of 73 min). Transcriptions averaged 1812 words (minimum of 882 words, maximum of 3089 words). The sample size has been defined by saturation: constant comparisons are made between the developing theory and the raw data until no new findings or views emerge regarding a concept or category. The sampling was designed in order to capture a high variety of differing experiences in relation with the coastal site under scrutiny. The key characteristics of the interviewees' sample may be found in Kane et al. (2014). The data analysis was conducted using iterative-grounded theory. Grounded theory is a systematic methodology in social science involving the discovery of theory through the analysis of (essentially) qualitative data (Strauss and Corbin, 1997; Charmaz, 2006; McCreaddie and Payne, 2010). Iterative-grounded theory consists of using a general conceptual framework to conduct a thematic analysis, this order to build a bottom theorization in close relation with an existing framework. The existing conceptual frameworks that were chosen are Renn's integrative framework for risk perceptions, mitigation option typology, and SPRC, all presented above.

The 32 interviews were thus first coded using:

- pre-set categories pertaining to Renn's conceptual model: "relevance claims" identifying quotes where the interviewee states what is a phenomenon worth attention; "evidence claims", identifying quotes where the interviewee establishes causal linkages related to coastal flooding and; "normative claims", identifying quotes where the interviewee states what is good, acceptable and tolerable regarding coastal flooding risk management options;
- pre-set categories pertaining to engineering-based risk mitigation options;

- pre-set categories pertaining to mitigation options within the SPRC framework: “source”, “pathway”, “receptor” and “consequences”.

The choice of these thematic categories had been guided: (a) by the need to acknowledge the evaluative dimension of our research question, evaluation captured within the stakeholders' discourse through the various claim categories; (b) by the need to see how clearly defined mitigation options (intervention types) were contextualized (SPRC). The choice of these initial coding themes allowed for the identification of emerging themes directly connected to our research question.

In the course of the coding it appeared that interviewee did put an emphasis on issues associated with governance and cross scale linkages. These concepts were very much present when engineering-based mitigation options were assessed through the various claim categories. As such they connected in the stakeholders discourse mitigation option and their assessment. The following thematic categories were thus considered as emerging categories in the course of the analysis: “governance”, identifying quotes where the interviewee states that governance plays a role in risk management and; “interlinkages” identifying quotes where the interviewee states the questions of cross scale linkages play a role in flood and erosion risk management. The association of the various themes was explored in site-specific corpus separately, and then across corpuses.

4. Results and discussions

In our corpuses stakeholders did express themselves about engineered solutions. Dykes, drainage systems, breakwater, warning systems, nourishment, floodgates and artificial dunes were all mentioned and contextualized. As mitigation options, within a SPRC worldview, these are not contested. Yet interviewees do express reservations in terms of their implementation, this in the light of their experience. We present these reservations along issues of norms, relevance and evidence.

On the normative front, we see one main issue emerging from the stakeholders discourse. The issue of the redistributive effect of dykes, breakwaters and nourishment is often stressed as an important weakness of these options. In the case of dykes along estuaries, most stakeholders express the fact that dykes, while protecting pre-identified assets, displace the flood elsewhere. They see dykes as a mean to sacrifice areas less close to the interest of politicians. Farmers are sacrificed in the favour of city dwellers. SMEs are sacrificed in favour of large industries. This leads to distrust of dykes and more generally toward mitigation options that displace the risk spatially. Dykes are thus framed as instruments of power and while their performance is somehow recognized, their legitimacy is strongly criticized. Breakwaters, and to a lesser extent nourishment, particularly in areas of high beach usage, is seen as having the potential to redistribute erosion by modifying sediment transfers. Some stakeholders see beach nourishment as a transfer of In terms of relevance, stakeholders raised the issue of costs and benefits. The issue raised was that of the difficulty of scaling correctly the cost and benefits. They saw dykes, breakwaters, and floodgates as major investments well beyond the value of what is directly protected. This leads to stakeholders expressing that areas protected by dykes are clearly “overprotected”, thus contesting the pertinence of the option. When explaining this perceived non-pertinence, stakeholders expressed that these choices were governed by nested multi scale economic and political interest leading to choices that seemed not attuned to reality.

Evidence claims were the richest part of the corpus when focusing on engineering-based coastal risk mitigation options. This emerged rather paradoxically as these corpuses, when analysed in more general terms, are clearly dominated by normative claims (see Kane et al.,2014). Evidence claims associated with engineering-based mitigation options dealt primarily with governance (or more

precisely lack thereof) leading to failures of the options implemented. From dykes left in disrepair, to poorly planned nourishments, or poorly stabilized artificial sand dunes, stakeholders expressed that what mattered was the ability to take care of the mitigation option, not the choice of the option itself. A second type of evidence claim was found in the corpus. These dealt with the importance of seeing the coastal system as a collection of nested, strongly interlinked, subsystems. Stakeholders expressed that dykes, breakwaters, nourished beaches, and artificial dunes faced the influence of distant factors and were influencing other systems. Yet stakeholders expressed that these mitigation options did not seem to take these influences into account in their design. Stakeholders attributed this to a lack of higher order coordination, as a misplaced implementation of subsidiarity. Again stakeholders pointed to a governance deficit. Finally, and this very much in the light of climate change, stakeholders felt that the calibration of engineering-based solutions, was questionable.

If we revisit our working hypotheses in the light of these results, we can safely argue that norms, pertinence, and evidence do influence stakeholders' attitudes toward engineering-based coastal risk mitigation option. Yet this attitude is closely associated with the issue of governance, as the ability to engage into coordinated action, and is thus more broadly defined. What appears is that mitigation, as a technique, cannot, for those affected, be disconnected from the route taken to conduct collective choices. This result seems to point to something more fundamental. Engineering-based mitigation options are clearly efficient when framed in a SPRC worldview, where causal chains are clearly established. Yet stakeholders, when questioning these mitigation options, are talking about boundary conditions – conditions at the boundary of the system or outside these boundaries – (such as externally defined efficient governance), about interconnectedness (distant influence, nested system) and values. It seems therefore that the interviewees displace the discourse within a complex system paradigm, a paradigm where causality is difficult, impossible often, to establish, a paradigm where the future is irreducibly uncertain.

Conclusion

In this paper we have analysed how the attitudes of stakeholders toward engineering-based mitigation options was defined. Through an empirical analysis, involving of corpuses generated through interviews in three different settings we showed that norms, pertinence and evidence influence stakeholders' perceptions of engineering-based coastal risk mitigation options. Furthermore we demonstrated that stakeholders, when envisioning coastal risk mitigation position themselves within a complex system paradigm. The central result points to the need for engineering-based coastal risk mitigation options to be developed with strong multiscale governance mechanisms in place. Without this condition, stakeholders point to weaknesses that cannot be corrected by envisioning the “technique” alone.

These results, while enlightening, call for further developments. First, coastal risk mitigation is a field rich with innovation. Yet our corpus deals only with well-known mitigation options. The real world development of innovative measures should ideally be accompanied with perception and governance analysis in order to guarantee a complete assessment of the option's value for those affected. Second, our framework could and should be refined by testing it, and the associated results in other settings.

-----For more details see-----

Kane, Idrissa Oumar, Jean-Paul Vanderlinden, Juan Baztan, Nabil Touili, and Simon Claus.
 “Communicating Risk through a DSS: A Coastal Risk Centred Empirical Analysis.” *Coasts@Risks: THESEUS, a New Wave in Coastal Protection* 87, no. 0 (May 2014): 240–48.
 doi:10.1016/j.coastaleng.2014.01.007.

Touili, Nabil, Juan Baztan, Jean-Paul Vanderlinden, Idrissa Oumar Kane, Pedro Diaz-Simal, and Luca Pietrantonio. “Public Perception of Engineering-Based Coastal Flooding and Erosion Risk Mitigation Options: Lessons from Three European Coastal Settings.” *Coasts@Risks: THESEUS, a New Wave in Coastal Protection* 87, no. 0 (May 2014): 205–9. doi:10.1016/j.coastaleng.2014.01.004.

References

- Burby, R.J., 2006. Hurricane Katrina and the paradoxes of government disaster policy: bringing about wise governmental decisions for hazardous areas. *Ann. Am. Acad. Polit. Soc. Sci.* 604 (1), 171–191.
- Burcharth, H. (Ed.), 2012. Integrated Report on Design of Innovative Coastal Structures and Best Practices for Coastal Defence. Results From Numerical, Experimental and Prototype Testing. THESEUS Project Official Deliverable OD 2.7.
- Charmaz, K., 2006. *Constructing Grounded Theory: A Practical Guide Through Qualitative Analysis*. Sage Publications, Thousand Oaks.
- Douglas, M., Wildavsky, A.B., 1982. *Risk and Culture: An Essay on the Selection of Technical and Environmental Dangers*. University of California Press, Berkeley (224 pp.).
- Eisenman, D.P., Cordasco, K.M., Asch, S., Golden, J.F., Glik, D., 2007. Disaster planning and risk communication with vulnerable communities: lessons from hurricane Katrina. *Am. J. Public Health* 97 (supplement_1), s109–s115.
- Fischhoff, B., Slovic, P., Lichtenstein, S., Read, S., Combs, B., 1978. How safe is safe enough? A psychometric study of attitudes towards technological risks and benefits. *Policy. Sci.* 9, 127–152.
- Foucault, M., 2004. *Sécurité, territoire, population: Cours au Collège de France (1977–1978)*. Seuil, Paris (435 pp.).
- Kahan, D.M., Peters, E., Wittlin, M., Slovic, P., Larrimore Ouellette, L., Braman, D., Mandel, G., 2012. The polarizing impact of science literacy and numeracy on perceived climate change risks. *Nat. Clim. Chang.* 2, 732–735.
- Kane, I.O., Vanderlinden, J.-P., Baztan, J., Touili, N., 2014. Communicating risk through DSS design: vulnerability, resilience and the design of DSS's cognitive pathways. *Coast. Eng.* (Accepted).
- Kasperson, R.E., Renn, O., Slovic, P., Brown, H.S., Emel, J., Goble, R., et al., 1988. The social amplification of risk: a conceptual framework. *Risk Anal.* 8, 177–187.
- McCreaddie, M., Payne, S., 2010. Evolving grounded theory methodology: towards a discursive approach. *Int. J. Nurs. Stud.* 47, 781–793.
- Narayan, S., Nicholls, R., Hanson, S., Clarke, D., Reeve, D., Simmonds, D., Hoggart, S., 2014. A modelling framework for rapid quantitative assessments of dynamic coastal floodplain systems. *Coast. Eng.* (Accepted).
- Nicholls, R. (Ed.), 2011. Integrated Report on Risk Assessment in the Study Sites. THESEUS Project Official Deliverable OD 1.15.
- Renn, O., 2008. *Risk Governance: Coping with Uncertainty in a Complex World*. Earthscan, London (455 pp.).
- Renn, O., Rohrman, B., 2000. *Cross-cultural Risk Perception: A Survey of Empirical Studies*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (245 pp.).
- Schneider, S.K., 2005. Administrative breakdowns in the governmental response to hurricane katrina. *Public Adm. Rev.* 65, 515–516.
- Sjoberg, L., 2000. Factors in risk perception. *Risk Anal.* 20, 1–11.

- Slovic, P., 1992. Perception of risk: reflections on the psychometric paradigm. In: Krimsky, S., Golding, D. (Eds.), *Social Theories of Risk* Praeger. Westport, CT, pp. 117–152.
- Slovic, P., Fischhoff, B., Lichtenstein, S., 1984. Behavioral decision theory perspectives on risk and safety. *Acta Psychol.* 56, 183–203.
- Strauss, A.L., Corbin, J., 1997. *Grounded Theory in Practice*. Sage Publications, Thousand Oaks (280 pp.).
- Vanderlinden, J.-P. (Ed.), 2012. *Structured Portfolio of Tested Operational Innovative Tools and Protocols for Policy and Management Purposes of Coastal Flooding Risks*. THESEUS Project Official Deliverable OD 2.8.
- Zanuttigh, B., 2011. Coastal flood protection: what perspective in a changing climate? The THESEUS approach. *Environ. Sci. Pol.* 14, 845–863.
- Zanuttigh, B., Zagonari, F., Bagli, S., Pescaroli, G., Bozzeda, F., Nicholls, R., Hoggart, S., Vanderlinden, J.-P., 2014. Theseus decision support system for coastal risk management. *Coast. Eng.* (Accepted).

De nouveaux outils d'observation et de gestion du patrimoine littoral de la Bretagne

Pau Olmos¹, Elias López-Romero², Marie-Yvane Daire³, Jean-Baptiste Barreau⁴

1. Chercheur postdoctoral projet ARVOR, UMR 6566 CReAAH Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu-Bat.24, 35042 Rennes Cedex

pau.olmos-benlloch@univ-rennes1.fr

2. Chercheur postdoctoral Marie Curie, Dept of Archaeology, Durham University South Road Durham DH1 3LE

elias.lopez-romero@durham.ac.uk

3. Directeur de recherche CNRS, UMR 6566 CReAAH Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu-Bat.24, 35042 Rennes Cedex

marie-yvane.daire@univ-rennes1.fr

4. Ingénieur d'étude CNRS, UMR 6566 CReAAH Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu-Bat.24, 35042 Rennes Cedex

jean-baptiste.barreau@univ-rennes1.fr

Résumé.

Les changements climatiques actuels et la pression anthropique affectent de plus en plus les zones côtières. Les côtes de la Manche et de l'Atlantique ne font pas exception et des centaines de sites archéologiques sont ainsi menacés de destruction, du fait de l'accélération de la montée du niveau marin, de l'érosion et de diverses modifications de l'environnement dues à des causes anthropogéniques. Cet article présente le projet ALeRT (Archéologie, Littoral et Réchauffement Terrestre), une approche interdisciplinaire originale visant à établir la vulnérabilité du patrimoine archéologique dans l'Ouest de la France. Une méthodologie originale et des outils dédiés ont été développés pour l'observation des risques et de leur impact sur les sites patrimoniaux. Ces outils ont récemment été intégrés dans une démarche de recherche collaborative en réseau.

Abstract.

Climate change and anthropogenic pressure increasingly affect the coastal zone. The Channel and Atlantic seaboard of France are no exception, with hundreds of archaeological sites currently threatened by destruction due to the accelerated relative sea-level rise, erosion, and various anthropogenic modifications to the environment. This paper aims at presenting the ALeRT (Archéologie, Littoral et Réchauffement Terrestre) project, consisting of an original and interdisciplinary approach for assessing the vulnerability of the archaeological heritage in Western France. Original methodologies and dedicated tools have been developed for the observation of risks and their impacts on cultural heritage. These tools have recently been integrated into a collaborative research approach.

MOTS-CLES : littoral, patrimoine, vulnérabilité, observation, Ouest de la France

KEYWORDS: Coasts, heritage, vulnerability, observation, western France.

1. Introduction

Les changements climatiques et certains de leurs effets que sont la remontée du niveau marin et l'érosion des côtes menacent de détruire une partie du patrimoine culturel et en particulier des sites archéologiques du littoral français de la Manche et de l'Atlantique, dans des délais allant de quelques mois à quelques années. Un site archéologique ainsi exposé peut définitivement disparaître en quelques mois (Erlandson, 2008). Dans le domaine littoral, la pression anthropique peut se révéler un facteur aggravant pour certains secteurs géographiques à vocation touristique ou industrielle.

Face à cette situation d'urgence, quelques initiatives européennes ont vu le jour, tout d'abord en Grande Bretagne (programme SCAPE = *Scottish Coastal Archaeology and the Problem of Erosion* en Ecosse, *Rapid Coastal Zone Assessment Surveys* en Angleterre...). En France, un groupe de chercheurs (institutionnels et collaborateurs), investis de longue date dans des recherches archéologiques en milieu littoral et insulaire dans l'Ouest de la France²¹, s'est fédéré dès 2006 au sein du projet «ALERT» (Archéologie, Littoral et Réchauffement Terrestre) dont les objectifs généraux sont la réalisation d'un état sanitaire du patrimoine archéologique littoral dans l'Ouest de la France, débouchant sur une réflexion globale concernant la vulnérabilité du patrimoine côtier et la gestion des sites menacés (Daire *et al.*, 2012 ; López *et al.*, 2013).

Ce projet porte sur l'Ouest de la France (Basse-Normandie, Bretagne et Pays-de-la-Loire, 8 départements français), soit 2974 km de côtes, un territoire où le potentiel du patrimoine archéologique de la bande littorale (100 m) est estimé à plus de 2500 sites.

La première étape de la démarche repose sur l'analyse des indicateurs de destruction des sites archéologiques côtiers (critères de vulnérabilité à diverses échelles locales et régionales) et la construction d'un outil d'évaluation de la vulnérabilité de ce patrimoine. La démarche est donc fondée sur une approche interdisciplinaire (archéologie, études environnementales, géographie, géomorphologie, géologie, sédimentologie, anthropologie).

Le second outil élaboré dans le cadre du projet est une base de données interactive, s'inscrivant dans une démarche de science participative, impliquant divers types d'acteurs (cf. infra).

Un objectif à plus long terme est l'élaboration de cartes des niveaux de vulnérabilité de ce patrimoine côtier. Ces cartes seront des outils de recherche à destination des scientifiques (paléoécologie, climatologie, géologie sédimentaire, anthropologie) mais pourront aussi constituer des aides à la gouvernance, en termes de gestion intégrée des zones côtières, selon des modèles transposables à d'autres secteurs géographiques, ainsi que nous avons pu l'expérimenter (López-Romero *et al.*, 2012).

2. Méthodologie

Les sites archéologiques côtiers ne sont pas tous soumis aux mêmes aléas et les facteurs de dégradation peuvent varier, voire se combiner selon les secteurs géographiques ou les saisons. Ces

²¹ Ce projet fédère notamment des chercheurs de l'UMR 6566 « CReAAH : *Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences, Histoire* » (CNRS, Ministère de la Culture, Universités de Rennes 1, Rennes 2 et Nantes), Axe de recherche « littoral », des membres de l'Association AMARAI (Association Manche Atlantique pour la Recherche Archéologique dans les îles) et génère des collaborations avec plusieurs autres laboratoires (notamment avec Géosciences Rennes et Costel, au sein de l'OSUR Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes).

variations sont liées à la nature des sites archéologiques (composition et taphonomie des vestiges, plus ou moins résistants), à leur environnement géomorphologique immédiat (nature et résistance du sédiment encaissant, structure de la cellule sédimentaire...), etc. Dans certains cas, des facteurs anthropiques défavorables accentuent ou accélèrent la dégradation des sites : des cheminements, des aménagements touristiques entraînant une hausse de la fréquentation, par exemple, ou encore certaines activités économiques. Parfois, des mesures de protection liées à la gestion de l'environnement (Réserves Naturelles) ont un effet positif sur la préservation des vestiges archéologiques, telles par exemple les stabilisations de dunes. Mais l'évolution du paysage côtier est un phénomène qui va généralement dans le sens d'une perte de données scientifiques, plus ou moins rapide, et parfois très brusque et irrémédiable, puisque le principe de résilience est quasi nul en matière d'archéologie.

2.1 Les outils du projet : la grille d'évaluation de la vulnérabilité

Visant une évaluation objective de l'état d'altération, de préservation et d'évolution du patrimoine archéologique littoral, la réflexion menée dans le cadre du projet nous a permis de conclure que les variables prises en compte dans l'appréhension de la vulnérabilité des sites archéologiques côtiers relevaient de quatre registres principaux : naturels, biologiques, anthropiques et juridiques. En conséquence, une grille d'observation et d'évaluation de la vulnérabilité (VEF = *Vulnerability Evaluation Form*) a été mise au point dans le cadre du projet (Daire *et al.*, 2012 ; López *et al.*, 2013) (Figure 1).

Ce document repose sur le principe de base que certaines variables reflètent les facteurs d'altération de l'intégrité des dépôts (menaces) tandis que d'autres variables reflètent une forme de résistance des dépôts face à ces dangers (la résistance). Le VEF est présenté comme un formulaire destiné à établir un indice de vulnérabilité de chaque entité archéologique, indice qui s'exprime dans la formule «A - B = C», où «A» est le facteur de risques cumulés, «B» la somme des facteurs de résistance, et «C» la vulnérabilité résultant de la combinaison des précédents.

Code		Variable Type	Variable evaluation					
			5 Very strong <10 m	4 Strong <50 m	3 M. Str. < 200	2 Weak < 500 m	1 A. Inacti >500 m	Nature
A	1	a Infrastructures	X					
		b Activities		X				
		c Traffic/Frequency of passage	X					
	2	a Distance to the cliff			X			
		b Biological erosion					X	
		c Weathering				X		
B	1	a Resistance of the remains	X					
		b Resistance of the local substrate	X					
	2	a Physical protection					X	
		b Legal protection					X	

Figure 1. Grille de vulnérabilité VEF.

Cette approche fait conceptuellement partie de la philosophie du *risk assessment* et des cartes de risques (López *et al.*, 2013). L'enregistrement systématique des paramètres de la menace, des caractéristiques du système exposé et de l'évaluation de la vulnérabilité permet ici d'obtenir - après un processus de recodage - une série de niveaux d'impact ou de risque. Au final, le VEF est constitué d'une liste de 10 variables (la proximité des infrastructures, la proximité des activités économiques, le trafic / la fréquentation, la distance à la falaise, le degré d'érosion biologique, le degré d'érosion climatique, la résistance du substrat, la résistance des vestiges archéologiques, la protection physique, la protection juridique) qui sont évaluées pour chaque site en distance par rapport au site (-10m, -50m, -100m, -500m, +500 m) ou en degré d'intensité (très actif, actif, modérément actif, faible, quasi inexistant). Nous ne reviendrons pas ici sur le processus d'élaboration de ce document, ni sur son caractère « objectif » ou encore les systèmes de codage adoptés, présentés par ailleurs (López *et al.*, 2013).

2.2 La démarche participative : les applications Alert Web et Alert Mobile

2.2.1. La base de données ALeRT et l'application Alert Web

Dans une logique d'évolution du projet, la grille d'observation (VEF) présentée *supra* a été intégrée à une fiche de site archéologique établie sur un modèle utilisé pour la gestion du patrimoine par le Ministère de la Culture. Ce document permet de caractériser sa nature (type de site) et sa chronologie, d'indiquer sa géolocalisation (coordonnées en projection Lambert II étendu, et référence cadastrale), ou encore d'ajouter des photos et des cartes du site.

La fiche intégrant ces données, enrichies de la VEF, devient le vecteur de communication entre observateurs de terrain, opérateurs du projet et gestionnaire du patrimoine, les fiches étant intégrées dans une base de données interactive. Dans un contexte où le travail de terrain est, par définition, décentralisé, cette démarche permet aux différents acteurs de terrain de signaler les sites archéologiques menacés (en renseignant en ligne la fiche dans la base de données) et de partager ces informations dans des délais très courts, compatibles avec la soudaineté et l'urgence générées par les événements climatiques extrêmes (tempêtes).

Les fiches, une fois enregistrées dans l'application, sont consultables par tous les utilisateurs et les administrateurs du site.

L'application prévoit également un module de recherche sous de deux formes : standard (mots-clés, critères, etc...) ou spatiale (zone géographique).

Cet outil constitue en outre une interface destinée à communiquer les informations au Ministère de la Culture en charge de la gestion et de la sauvegarde du patrimoine archéologique national et de la programmation des opérations (fouilles, sondages).

Ainsi, ont été développées depuis 2010 les applications 'Alert Web' et 'Alert Mobile', portails d'accès à la base de données interactive du projet²². Les observateurs de terrain alimentent la base de données et renseignent ainsi les informations concernant les sites menacés : localisation, description, évaluation de la vulnérabilité (VEF), observations et ajouts de documents (photos notamment).

²² Une inscription préalable sur l'application, comme utilisateur, est requise ; après validation par les administrateurs, chacun peut renseigner les champs d'informations de la fiche de site. L'application web est accessible depuis le lien: <http://ntarcho2.univ-rennes1.fr/Alert>.

2.2.2 L'application Alert Mobile

Depuis 2011, la démarche participative a été optimisée avec le développement d'une application pour Smartphone 'ALeRT Mobile' (technologie jQueryMobile) qui intègre la fiche de site et le VEF de la base de données (Barreau *et al.*, 2013). Cette application, destinée aux chercheurs et aux gestionnaires du littoral, permet la saisie des données directement sur le terrain.

Le progrès de cette seconde cette application est de faciliter la collecte immédiate des données sur le terrain et leur envoi, en supprimant l'intermédiaire de la fiche terrain et de sa saisie différée, et en accélérant leur traitement. L'application utilise le GPS intégré sur tous les téléphones et tablettes pour géolocaliser le site archéologique ; si le GPS n'est pas intégré dans le téléphone ou pas assez précis, les coordonnées sont directement saisies par le biais d'un formulaire dédié. De même, le système permet d'intégrer directement les photos prises sur le terrain avec le smartphone ou la tablette, ce qui représente un gain de temps considérable.

3. Etudes de cas

En dépit de l'universalité de la conception et de la mise en œuvre des outils, dont l'applicabilité dans différentes régions a été testée et validée dans le cadre du projet franco-espagnol *Bregantia* (López-Romero *et al.*, 2012), notre travail a montré que des conditions micro régionales peuvent jouer un rôle important dans l'évaluation du degré d'altération des sites. Rappelons que l'une des finalités du projet est l'analyse de la vulnérabilité du patrimoine côtier à différentes échelles spatiales, en vue de l'établissement de cartes de vigilance et de plans d'action dont on peut espérer qu'elles permettront d'anticiper la disparition de certains vestiges ou monuments. Ce point sera illustré par quelques études de cas.

3.1 La vulnérabilité des côtes morbihannaises

Le modèle de vulnérabilité a été appliqué sur une zone test du littoral breton : la presqu'île de Rhuy (Morbihan) (Figure 2). Les tests, ayant permis de valider sur le terrain les critères de la grille de vulnérabilité, visaient une évaluation de l'état sanitaire du patrimoine archéologique côtier et des risques naturels et anthropiques dans ces deux zones.

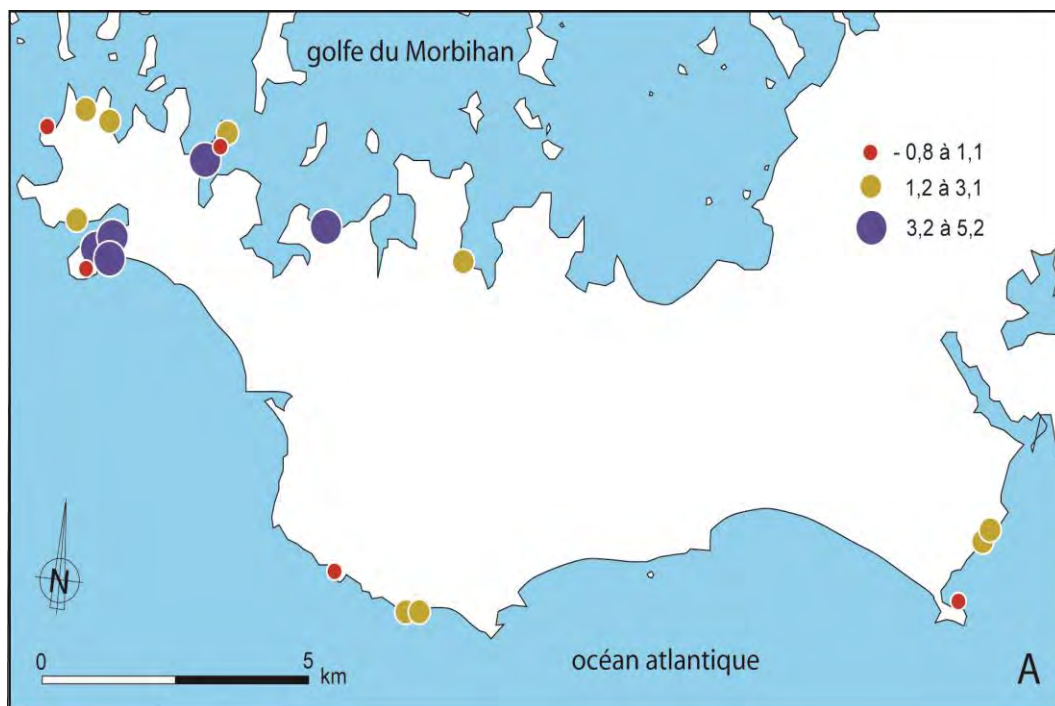


Figure 2. Carte de vulnérabilité de la presqu'île de Rhuys

La presqu'île de Rhuys a été choisie pour son potentiel archéologique, confronté à une pression anthropique importante, dans un contexte géographique présentant deux façades maritimes différentes, l'une de caractère océanique est exposée aux vents et à l'houle, et l'autre donnant sur le golfe du Morbihan, beaucoup plus abrité. La zone d'étude comprend les communes d'Arzon, Sarzeau et Saint-Gildas-de-Rhuys où ont été répertoriés 19 sites archéologiques (Schaeffer, 2009). L'enquête de terrain a permis de constater la disparition d'un certain nombre de sites naguère inventoriés. L'étude de la vulnérabilité montre une zone de risque autour du tumulus du Petit Mont où les sites les plus en danger sont les installations de l'âge du Fer (López-Romero *et al.* 2013, 131). La presqu'île est aussi riche en patrimoine mégalithique mais la résistance à l'érosion de ce type de site et le fait qu'ils ont souvent été fouillés, restaurés et classés au titre des monuments historiques induisent un facteur de vulnérabilité inférieur.

La comparaison entre les deux zones indique que la menace principale est l'intensification de l'urbanisme et du tourisme.

3.1 Le littoral trégorrois

Depuis 2013, les analyses se sont concentrées sur le patrimoine archéologique côtier du Trégor, en particulier sur la baie de Lannion (Finistère et Côtes d'Armor). Ici encore, nous avons constaté, sur le terrain, la disparition d'un certain nombre de sites à cause de facteurs à la fois naturels (p.e. érosion du site du Moulin de la Rive à Locquirec) et anthropiques (p. e. le nettoyage de la plage de Kerlavos à Trégastel à la suite de marées noires a entraîné la destruction d'un site du 1^{er} s. av. J.-C.).

Les critères du choix de cette zone reposent sur la diversité de son patrimoine archéologique (couvrant une large chronologie) et celle des faciès morphologiques côtiers.

En conséquence de l'érosion des côtes, plusieurs sites archéologiques ont été touchés et ont fait l'objet d'une intervention archéologique approfondie ; il s'agit notamment d'habitats et d'ateliers artisanaux de production de sel de l'âge du Fer (3^e-1^{er} s. av. J.-C.), Landrellec ou Enez Vihan (Daire, 2003). Plus récemment les travaux se sont concentrés sur les barrages à poisson de l'estuaire du Léguer.

Au niveau géographique, l'exposition de la baie ouverte au NO montre une certaine vulnérabilité face aux tempêtes hivernales. Déjà en 2008, la tempête Xynthia avait violemment attaqué le site archéologique Dossen Rouz à Locquémeau-Trédrez ainsi que le monumental cordon de galets voisin (Daire, 2011). Malgré ces violents épisodes, la présence d'écueils rocheux participe à mitiger l'érosion de la partie centrale de la baie (estuaire du Léguer) et les principaux dégâts se concentrent sur les extrémités de la baie (communes de Locquirec et Trégastel). La morphologie côtière de la baie de Lannion montre une succession de falaises et de plages sableuses (Augris et Simplet, 2011, 20), la localisation des sites archéologiques aura donc une incidence directe sur leur vulnérabilité.

Dans cette zone d'étude, la pression anthropique est aussi importante, car tout le littoral a fait l'objet d'une intense exploitation des carrières de granite, entre le 19^{ème} et le 20^{ème} siècle, ce qui a entraîné la destruction de plusieurs sites archéologiques.

Les sites les plus en danger correspondent à des habitats non fortifiés de l'âge du Fer, comme celui de l'île Molène (Trébeurden), l'île étant elle-même condamnée à disparaître d'ici quelques années. A la différence des autres zones d'étude, la morphologie du littoral de la baie de Lannion montre, pour la Préhistoire ancienne, une prépondérance de sites aujourd'hui localisés sur l'estran et accessibles à marée basse, notamment autour de l'île Grande (Pleumeur-Bodou). La facilité d'accès aux sites et le ramassage constant des outils en silex sur l'estran par tous les promeneurs risquent de faire disparaître les faibles traces de ces paléosols ; les gisements les mieux conservés sont situés sur les îles plus abritées et dont l'accès est plus difficile, comme le paléosol de l'île d'Aval (Pleumeur-Bodou).

4. Participation citoyenne et observation des sites : les tempêtes de l'hiver 2014

L'épisode de tempêtes de l'hiver 2014, l'un des plus violents depuis 2008, a permis de montrer la pertinence du projet ALERT dans la « préservation » des sites archéologiques côtiers en danger, selon le principe de « *preservation by record* », étant donné l'impossibilité de protéger physiquement tous les vestiges.

Pendant la nuit du 1^{er} au 2 février 2014, plusieurs zones ont été érodées, et des sites que l'on croyait stabilisés ont été sérieusement endommagés après le passage de la tempête Petra, combiné aux très fortes marées astronomiques (coefficients 113/114 le 1^{er}). Le passage de la tempête Petra a mobilisé un important réseau de bénévoles pour l'observation et le suivi des sites archéologiques en danger²³.

Les dégâts nous ont été immédiatement signalés, ce qui nous a conduits à vérifier rapidement sur le terrain l'état des sites. Ces sorties ponctuelles nous ont permis de rencontrer les différents acteurs du terrain et de faire connaître les outils disponibles.

²³ A la base de cette mobilisation, il faut signaler le réseau de l'AMARAI (Association Manche Atlantique pour la Recherche Archéologique dans les îles), et la collaboration avec d'autres associations régionale. Ont été particulièrement actifs dans ce secteur Jean-Claude Le Goff, Daniel Roué, François Le Gall, Pascal Méric, Martine Fabre, Gilles Chevalier et Patrick Hamon.

A Santec (Finistère), dans la partie nord de la falaise de Cougn ar Sac'h une tombe de l'âge du Bronze similaire à celles de Roc'h Kroum (Le Goff et Roué, 1999) a complètement disparu à cause des dernières tempêtes et du ruissellement de l'eau de pluie. La tombe, signalée en 1979 et stabilisée depuis 2010, était composée d'une structure en pierre sèche et d'une dalle de couverture ; la seule trace de l'emplacement de la tombe est la présence d'une fine couche blanchâtre de chaux et de sable qui s'étalait dans la partie inférieure de la tombe. Une autre tombe est apparue au même endroit « grâce » aux tempêtes de février 2014. L'expertise sur place a permis de constater que cette structure présente les mêmes caractéristiques que l'autre tombe, c'est-à-dire des structures latérales en pierre sèche, deux dalles de couverture et une couche de chaux et sable dans la partie inférieure. L'identification de ce site n'aurait jamais été possible sans la participation des bénévoles locaux, ce qui montre l'importance du travail collaboratif en matière de surveillance du littoral.

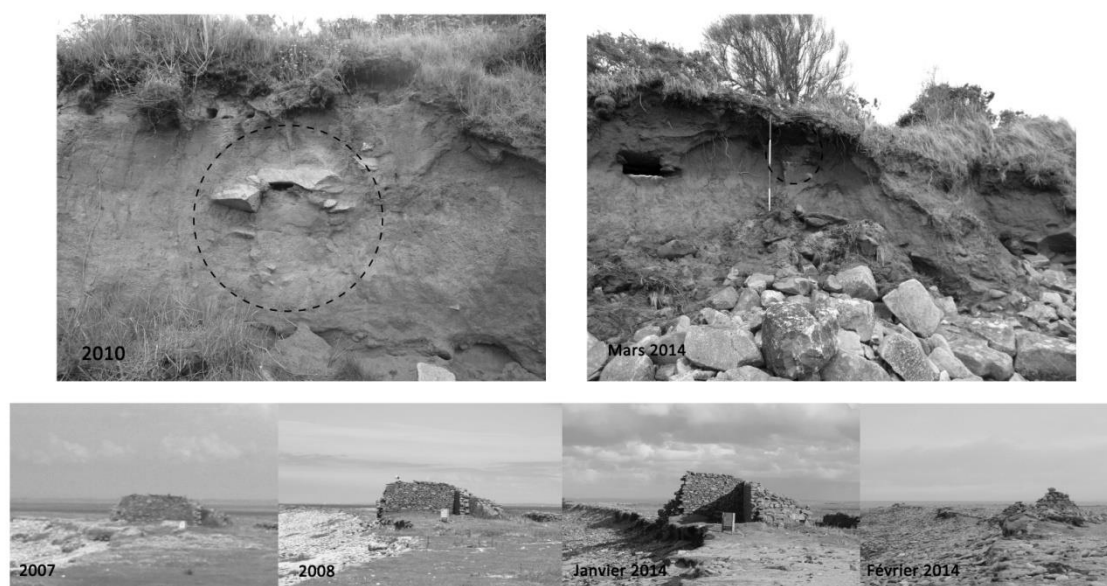


Figure 3. En haut falaise de Cougn ar Sac'h entre 2010 et 2014, la tombe disparu se trouvait à droite du jalon, la tombe apparue en février 2014 se situe à gauche du jalon sur la photo à droite. Photos J.C. Le Goff et M. Monros. En bas recul de la falaise de l'île de Triélen où se trouve le site archéologique entre 2007 et 2014. Photos M.Y. Daire, H. Gandois et H. Mahéo.

Un autre site soumis à l'érosion, fait l'objet d'un suivi archéologique depuis plus de 10 ans. Il s'agit d'un habitat de l'âge du Fer (3^{ème} s. av. J.-C.) localisé en bordure de la plage nord-est de l'île de Triélen (archipel de Molène, Finistère), sur un ensemble qui fait l'objet d'un suivi géomorphologique (Daire *et al.*, 2008 ; Fichaut et Suanez, 2007). Ne pouvant ni protéger le site de l'érosion, ni le fouiller compte tenu des mesures de protection au titre de la réserve naturelle, ce suivi archéologique a permis d'enregistrer les informations relatives aux vestiges anciens. Les moyens mis en œuvre sont des relevés (photos, relevés stratigraphiques...), après nettoyage et redressement des coupes, des prélèvements des matériaux effondrés et des petits sondages exploratoires limités aux portions de la coupe déjà dégagées de leur couverture végétale. Ce site, particulièrement exposé, montre une dégradation continue accélérée lors des épisodes de tempêtes. Loin d'être régulière, la dégradation

du site s'est notamment accentuée lors des épisodes de tempête de cet hiver 2014, comme le montre le suivi photographique (Figure 3).

Les effets négatifs des dernières tempêtes ont permis de sensibiliser la population à la menace qui pèse sur un patrimoine vulnérable. Le projet a donc atteint une nouvelle étape, avec le fait de sensibiliser une population qui est invitée à s'engager dans la protection de notre patrimoine ; cette action passe par une fédération des professionnels et des bénévoles et, à terme, la constitution d'un réseau couvrant l'ensemble du territoire, impliqué dans une démarche visant à enrichir les connaissances, et à valoriser et protéger un patrimoine culturel si fragile.

Le projet ALeRT a bénéficié jusqu'ici du soutien de la Fondation Langlois, de l'AMARAI (Association Manche Atlantique pour la Recherche Archéologique dans les Îles), du projet Bregantia (2010FR0003, CSIC-CNRS bilateral cooperation projects), et est soutenu par le CNRS. Des développements sont actuellement en cours dans le cadre du projet ARVOR (financé par la Région Bretagne, SAD v.2 – Stratégie d'Attractivité Durable, contrat post-doctoral 2012-2014 Université de Rennes 1).

Bibliographie

Augris C., Simplet L. (2011). *Atlas géologique de la baie de Lannion*, éditions Quae, Versailles.

Barreau J.-B., Sachet M., López-Romero E., Daire M.Y., Olmos Benlloch P. (2013). ALERT Mobile: managing coastal archaeological heritage in Western France, *Actes du colloque Digital Heritage International Congress*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Marseille, p. 611-614.

Cunliffe B., Galliou P. (2005). *Les fouilles du Yaudet, en Ploulec'h, Côtes-d'Armor. T. 2 - De la Préhistoire à la fin de l'empire romain*, Oxford University Press et CRBC ed., Oxford-Brest.

Daire M.Y. (2003). *Le sel des Gaulois*, Editions Errance, Paris.

Daire M.Y. (2011). *Sur les rivages de la Manche...Le site de l'Age du Fer de Dossen Rouz à Locquémeau-Trédrez (Côtes-d'Armor). Etude pluridisciplinaire*, Dossiers du Centre Régional d'Archéologie d'Alet, Rennes.

Daire M.Y., Baudry A., Dupont C., Leroux V.E., Dréano Y., Tresset A., Quesnel L. (2008). Suivi archéologique de l'île de Triélen. Un site gaulois au péril de l'érosion. *Bretagne Vivante 2008, Le réseau des Réserves*, p. 19.

Daire M.Y., López-Romero E., Proust J.N., Regnaud H., Pian S., Shi B. (2012). Coastal changes and cultural heritage: Towards an assessment of vulnerability through the Western France experience, *Journal of Island and Coastal archaeology*, vol. 7, p. 168-182.

Erlandson J.M. (2008). Racing the rising tide: global warming, rising seas and the erosion of Human History, *Journal of Island and Coastal Archaeology*, vol. 3, p. 167-169.

Fichaut B., Suanez S. (2007). Plage fuyante à Triélen, *Penn ar Bed*, vol. 199-200, p. 2-12.

Le Goff J.-C., Roué D. (1999). Inventaire archéologique du littoral de la commune de Santec, *Bulletin de l'Association Manche-Atlantique pour la Recherche Archéologique dans les Îles*, vol. 12, p. 5-28.

López-Romero E., Ballesteros-Arias P., Daire M.Y., Güimil-Fariña, A. (2012). Les Îles Atlantiques de Galice (NW Ibérique). Archéologie et Vulnérabilité. *Bulletin de l'Association Manche-Atlantique pour la Recherche Archéologique dans les Îles*, vol. 25, p. 5-17.

López-Romero E., Daire M.Y., Proust J.N., Regnauld H. (2013). Le projet ALERT : une analyse de la vulnérabilité du patrimoine culturel côtier dans l'Ouest de la France, *Actes du colloque HOMER 2011*, British Archaeological Reports, International Series, BAR S2570, p. 127-136.

Schaeffer E. (2009). *Inventaire diachronique et étude de vulnérabilité des sites archéologiques côtiers en presqu'île de Rhuys*. Mémoire de Master 1, Université Rennes 1.

"Anticipando la Crecida"

Tools for the contribution in risk and disaster management due to southeasterly winds and precipitation floods in "La Ribera" district, Buenos Aires province, Argentina

Diego Moreira^{1,2}, Elodie Briche², Magdalena Falco^{1,2}, Federico Ariel Robledo^{1,2}, Ana Murgida³, Ignacio Gatti⁴, Mariano Duville⁴, Hugo Partucci³, Mariano Re^{5,6}, Emilio Lecertura^{5,6}, Leandro Kazimierski⁵, Paula Etala⁷, Claudia Competella^{1,8}, Juan Ruiz^{1,2}, Carolina Vera^{1,2}, Celeste Saulo^{1,2}, Claudia Simionato^{1,2}, Martín Saraceno^{1,2}, Moira Luz Clara^{1,2}, Enrique D'Onofrio⁷, Walter Dragani⁷, Matías Bertolotti⁹, Marcos Saucedo^{1,2,9}, Ricardo Vidal⁹

¹ Department of Atmospheric and the Oceans Sciences (DCAO), faculty of Natural Sciences, University Of Buenos Aires (UBA). Int. Güiraldes n°2160, Pabellón II, Segundo Piso, CP: C1428EGA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. moreira@cima.fcen.uba.ar

² Research Center of the Sea and Atmosphere (CIMA) y UMI-IFAEI 3351, CNRS-CONICET-UBA, Int. Güiraldes n°2160, Pabellón II, Segundo Piso, CP: C1428EGA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. elodie.briche@cima.fcen.uba.ar

³ Programa de Investigación en Recursos Naturales (PIRNA),

⁴ National Geographic Institute (IGN)

⁵ National Water Institute (INA)

⁶ Faculty of Engineering (UBA)

⁷ Naval Hydrographic Service (SHN), Ministerio de Defensa

⁸ National Weather Service (SMN), Ministerio de Defensa

⁹ Grupo de Pronóstico, Department of Atmospheric and the Oceans Sciences (DCAO)

RESUME.

Le projet argentin interdisciplinaire "Anticipando la crecida" cible les inondations récurrentes dans le bassin de la Plata. L'objectif principal est l'amélioration de la gestion des risques amenant à des catastrophes, associés à des événements de pluie intense et de vents de sud-est « sudestadas », et conduisant aux inondations. La zone d'étude est connue comme "La Ribera", située à Quilmes, ville de la province de Buenos Aires en Argentine. Le projet repose sur une recherche interdisciplinaire et sur des activités participatives impliquant les acteurs locaux. Cette approche va permettre d'intégrer la connaissance environnementale et sociale des chercheurs et des populations locales de ce phénomène. Le but est de créer une méthodologie adaptée aux échelles spatiales et temporelles de ce risque côtier. Les enquêtes de terrain seront complétées par l'analyse territoriale géographique ainsi que par le diagnostic météorologique et océanographique afin d'optimiser les cartes des zones inondables et de risques ainsi que les outils de prévisions.

ABSTRACT.

The interdisciplinary Argentinean project "Anticipando la Crecida" deals with recurrent floods in the La Plata Basin. The main focus is the improvement of disaster risk management associated with intense rain events and southeasterly wind « sudestadas » driven floods. The study area is known as "La Ribera", located at Quilmes City of the Buenos Aires province in Argentina. The project is based on interdisciplinary research and participative activities also involving local stakeholders. The approach is expected to integrate environmental and social knowledge of scientists and local community. The aim is to create an adapted methodology to spatial and temporal scales of this coastal risk. Participative observations and open interviews will be complemented

with geographic territorial analysis and meteorological and oceanographically diagnosis in order to optimize risk and flood maps as well as prediction tools.

MOTS-CLES : bassin du Río de la Plata, inondation, gestion des risques

KEYWORDS: Río de la Plata basin, flooding, risk management

1. Introduction

Extreme weather events, exposure and vulnerability are influenced by a range of factors, including anthropogenic climate change, natural climate variability and economic development. Extreme natural phenomena can contribute to the occurrence of disasters, but the risks and potential disasters not only obey physical phenomena. Risks and/or disasters arise from the interaction between weather and climate extremes, and social vulnerability and its distribution in the territory. Therefore, the severity of the impacts related to extreme weather events have a multi-causal, resulting in hazardous situations or disasters when there is population affected, and severe alterations in the organization of the communities involved (IPCC, 2012). Between these extremes, there are the "sudestada", which is characterized by the occurrence of persistent winds, moderate to strong intensity, from the south-southeast direction, usually accompanied with persistent rain. Characteristically this phenomenon affects the estuary of the "Río de la Plata" (RdP) growing and causing major flooding in the Buenos Aires Metropolitan Area (AMBA) where more than 12 million inhabitants. It lasts for 1-3 days, but there have been cases of longer duration. The "sudestada" phenomenon affects margins and the alluvial valley of the RdP and the "Riachuelo" with a backwater effect, up above the bridge of "La Noria", and margins and the bottom of the basins. The rising river and streams due to "sudestadas" in metropolitan Buenos Aires affect much of the population living on the margin of the Río de la Plata and its tributaries (streams). When the "sudestada" is combined with rainfall, the flooded area is usually higher. The vulnerable populations are most affected by the flooding of the RdP, causing property damage and health problems for children and old people.

In March 2013, the Research Center of the Sea and Atmosphere (CIMA) - the UMI FAECI 3351 (CNRS) and Department of Atmospheric and the Oceans Sciences (DCAO), Faculty of Natural Sciences (UBA) began the project "Anticipando la crecida" whose overall objective is to contribute to before-disaster risk management associated with flooding by heavy rains and "sudestadas" event in the Metropolitan Area of Buenos Aires through dialogue with the different stakeholders. With the project "Anticipando la crecida", partnerships are made with the National Weather Service of Argentina, the National Water Institute, the Naval Hydrographic Service, the National Geographic Institute, the Faculty of Philosophy and Literature and the Faculty of Engineering of the University of Buenos Aires. In a first phase of the study, the area corresponds to the "La Ribera" district of Quilmes (Buenos Aires, Argentina). According to Social census conducted by the Municipality of Quilmes, about 15,000 people live in the study area. In 791 households, being registered in condition of high social vulnerability 3247 inhabitants, including 860 children under 9 years old and 142 people over 65 years.

To achieve the "Anticipando la crecida" project objective, which is to explore the social, physical and natural causes, in coordination with the adaptation to these events, highlighting the knowledge and technologies for predicting, it is necessary to enhance work fields in the study area. The challenge is the improvement of development of products derived from numerical modeling of the atmosphere and the validation of these poses.

2. Study area and interdisciplinary group, methodology

2.1. Study area: from the estuary to the floodplain

The "Ribera" (Figure 1A) area extends from the coast of the RdP to the break line called "barranca", where the maximum flood elevation produced by "sudestadas" event (Vera Gaspar *et al.*, 2006) is found. The region were delimited made by the Executive Unit of the "Ribera de Quilmes", The west limit is the "Buenos Aires - La Plata" highway, The north limit is the Alsina street up to the intersection with Italy Avenue that spans a narrow strip comprising the Yacht Club of Quilmes. The Cervantes Avenue who runs parallel to the RdP coast, delimit the boundary at the east, and extends up to Echeverría Street, which is the south limit of the Ribera to the intersection with the highway. Since its origin, the waterfront acted like a marsh adjacent to the Costa of the RdP, appearing as a low elevation floodplain, subject to recurrent flooding as a result of the rains and winds from the southeast. The homogeneity conferred by its natural functioning as retention area and regulation of surplus flood water was lost during the years as a result of human intervention and occupation of coastal space. Currently, this area is considered as with a high complexity and heterogeneity, given that the processes of appropriation and occupation of the lands have negative impacts not only on the ecological functions of the original but also bathed in modifying the drainage and natural course of streams that flow into the Costa del Río de la Plata.

The RdP (Figure 1B) has a northwest to southeast oriented funnel shape approximately 300 km long that narrows from 220 km at its mouth to 40 km at its upper end (Balay, 1961). The estuarine area is 35,000 km² and the fluvial drainage area is 3.1×10⁶ km² (Depetris and Griffin, 1968). This estuary has a complex geometry and bathymetry. It is divided into two regions by the "Barra del Indio" shoal, a shallow area (7-10 m) that crosses the estuary following a line between "Punta Piedras" and Montevideo. The upper region is mainly occupied by fresh water; except for a few coastal channels, depths in this area are less than 7 m. Seawards the shoal is the Maritime Channel, a wide depression with depth between 12 and 20 m." Samborombón" Bay is a very shallow and extensive area with depths ranging from 2 to 10 m extending south of "Punta Piedras". The estuary is a micro-tidal system. Tidal waves associated with the South Atlantic amphidromes reach the Continental Shelf while propagating northward (Simionato *et al.*, 2004). The tidal regime in the estuary is mixed, dominantly semidiurnal, with M₂ being the most significant constituent (M₂ has an amplitude of 0.27 m at Buenos Aires); however, there are significant diurnal inequalities, mostly caused by O₁, with an amplitude of 0.15 m at Buenos Aires (D'Onofrio *et al.*, 1999). The liquid discharge to the RDP is determined by the Paraná and Uruguay rivers in more than 97% (Bombardelli *et al.*, 1995; Framiñan *et al.*, 1999) and displays a weak seasonal cycle with a maximum in winter of around 30,000 m³s⁻¹ and a minimum in summer of approximately 20,000 m³s⁻¹ (Nagy *et al.*, 1997; Simionato *et al.*, 2001). The atmospheric general circulation in the RDP region is controlled by the influence of the quasi-permanent South Atlantic high-pressure system. Southwestward circulation, associated with this high, advects warm and moist air from subtropical regions over the estuary (Minetti and Vargas, 1990). On the other hand, cold systems coming from the south drive cold and dry air masses over the area with a dominant periodicity of around 4 days (Vera *et al.*, 2002). As a result, an alternation of winds from the northeast to the southwest in a scale of a few days is the dominant feature of wind variability in the area. Due to the highest frequency of storms in the cold season, northeasterlies are dominant in spring-summer, whereas south westerlies are more frequent in fall-winter (Simionato *et al.*, 2005).

Balay (1961) defined risk water levels average for the RdP in 2.50 m for alert, 2.80 m for emergency and 3.20 m for evacuation (Escobar *et al.*, 2004) for all AMBA (Metropolitan Buenos Aires

Area) coast. In 2013, the National Hydrographic Service adopted two type of levels one for warning and one for alert in the RdP -south and north of AMBA-. La Ribera neighborhood is situated in the south of AMBA where the warning level is 2.10 m and the alert level is 2.70 m. Strong southeast wind conditions can increase the risk of high level water in the coast of La Ribera.

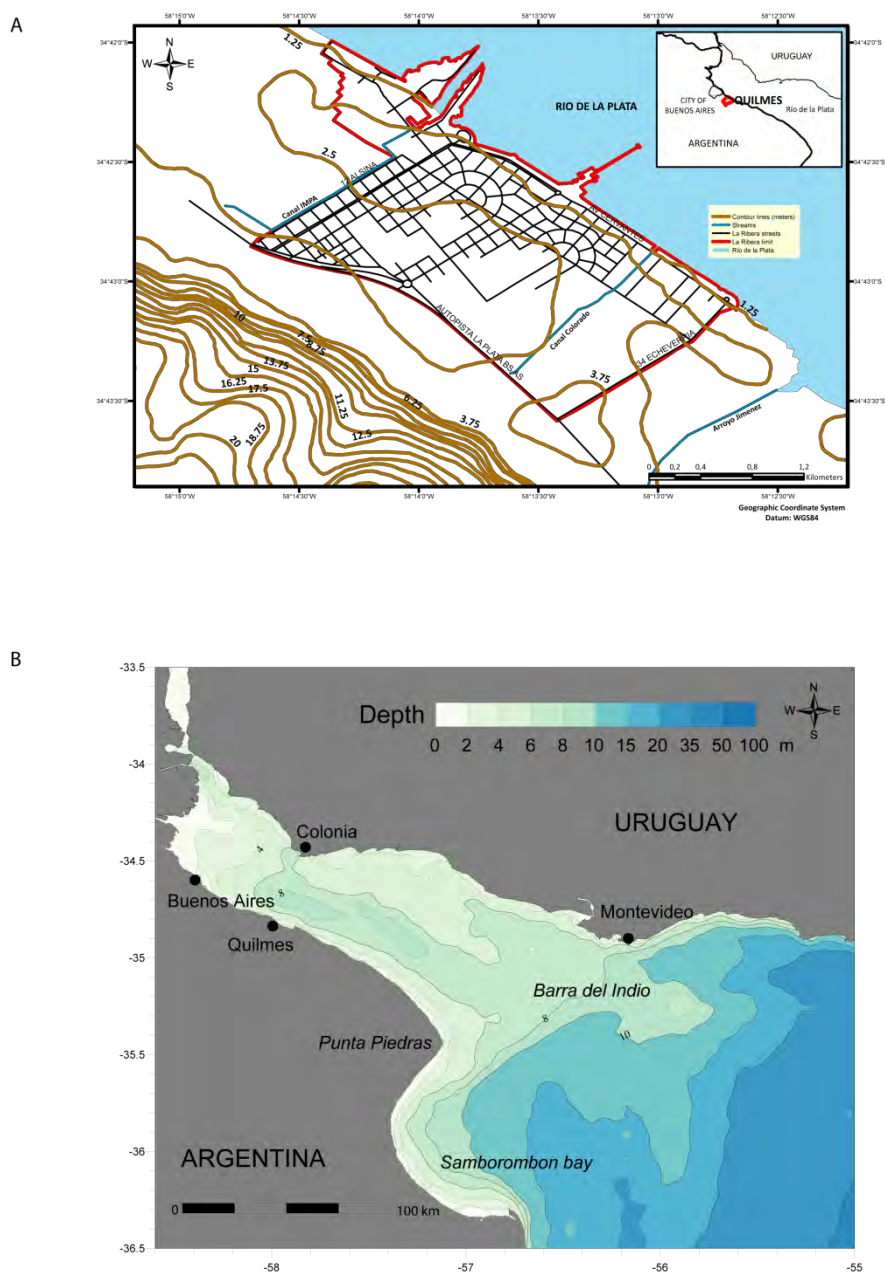


Figure 1: Study area: “La Ribera” of Quilmes, Buenos Aires Province (A) and bathymetry of Río de la Plata (B), Argentina.

2.2. The interdisciplinary group

The “Anticipando la Crecida” group was growing in participants and institutions, for this reason the ideas and tasks were performing as the group grew (Figure 2). We can differentiate two groups: one dedicated to meteorology and oceanography and the other related to geography and others human sciences. The group dedicated to the forecast improvement, the characterization of the “sudestada” event, the flood process, and the persistent rain is composed to the Department of Atmospheric and the Oceans Sciences, Research Center of the Sea and Atmosphere, National Weather Service and Naval Hydrographic Service. The group dedicated to the Social fields surveys, map design, regional characterization, determination of flood levels, and water runoff is integrated by the "Programa de Investigación en Recursos Naturales" (PIRNA), National Geographic Institute, National Water Institute and Faculty of Engineering.

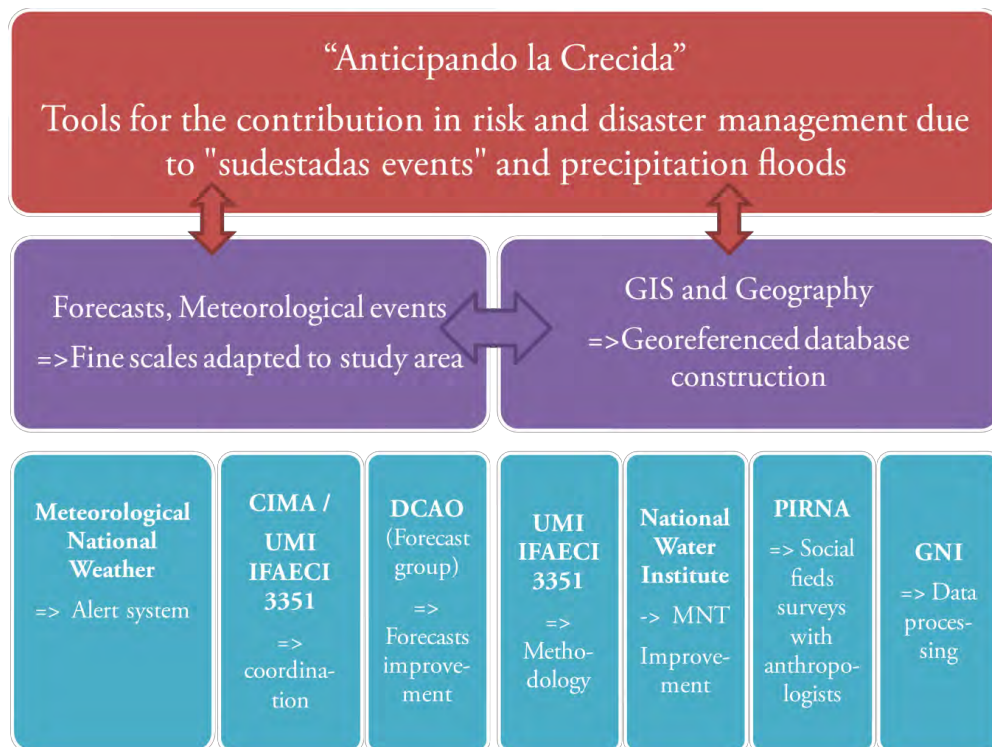


Figure 2: An interdisciplinary group between human sciences and climate sciences.

2.3 Methodology

Each group has different objectives and methodologies with a common objective that was described above. The first activity by the group dedicated to the forecast and atmospheric and oceanographic data, was to collect all the data available and to investigate past events, also the way to improve the analysis made with these information. Then they contacted the authorities and institutions involved in the alert system to know about the work they made and the alert system itself, and to think the way to provide better information, improving the alert system. Also the group is working in the improvement of the forecast and regional model (atmospheric and coastal). In the other hand, the group involved with the geographical and social activities, made different meetings with the institutions stakeholders with the aim to know and study the alert system. The interviews

were different according to the institution and the interviewed person, and they were recorded for later use. The interdisciplinary equip organized workshops with the people and local stakeholders, professors, researchers and students of meteorology, oceanography, social sciences, and engineers as well as professionals of different national institution, with the aim of improve the communication among scientists and local authorities, and helped to identify vulnerable regions where contingency plans have to be improving. Flooding level and watercourses maps were performed with the available data. All the information collected by both groups will integrate in a set of geo-referenced information and available on a website for public use.

3. A complex alert system with deficiencies

3.1. Preliminary view of this system

The National Weather Service and National Hydrographic Service dispatch the alerts or warnings (Figure 3), which are received by the National Civil Defense and they re-transmit the alert to the local Civil Defense (Figure 3). Since mid-2013 communication of warnings to local Civil Defense is through text messages on cell phones. This has allowed better communication. Currently the communication of alerts to society is through a siren mounted on a car, and mechanisms of communication between neighbors. The local Civil Defense notifies the local Firefighters and Secretary of Social Development, which is responsible for enabling the evacuation centers. Secretary of Social Development of local government carried out a survey of affected households and structured assistance for the victims. In post "sudestada" La Ribera neighborhood is still flooded in many cases, there's a local organization guided by Municipal Emergency Committee in which Quilmes Civil Defense, the Secretary of Social Development of Quilmes and Climate Emergencies and Contingencies Direction are the main institutions who organize the help to the population who has suffer the flood. In addition Voluntary Firefighters of Quilmes, CREM (Radio-Link Center for Medical Emergencies), Quilmes Red Cross, Boyscouts associations and others institutions or groups take actions to assistance local population. Moreover, there's a strong solidarity of neighborhoods offering a place to stay, donations of food, building material, etc.

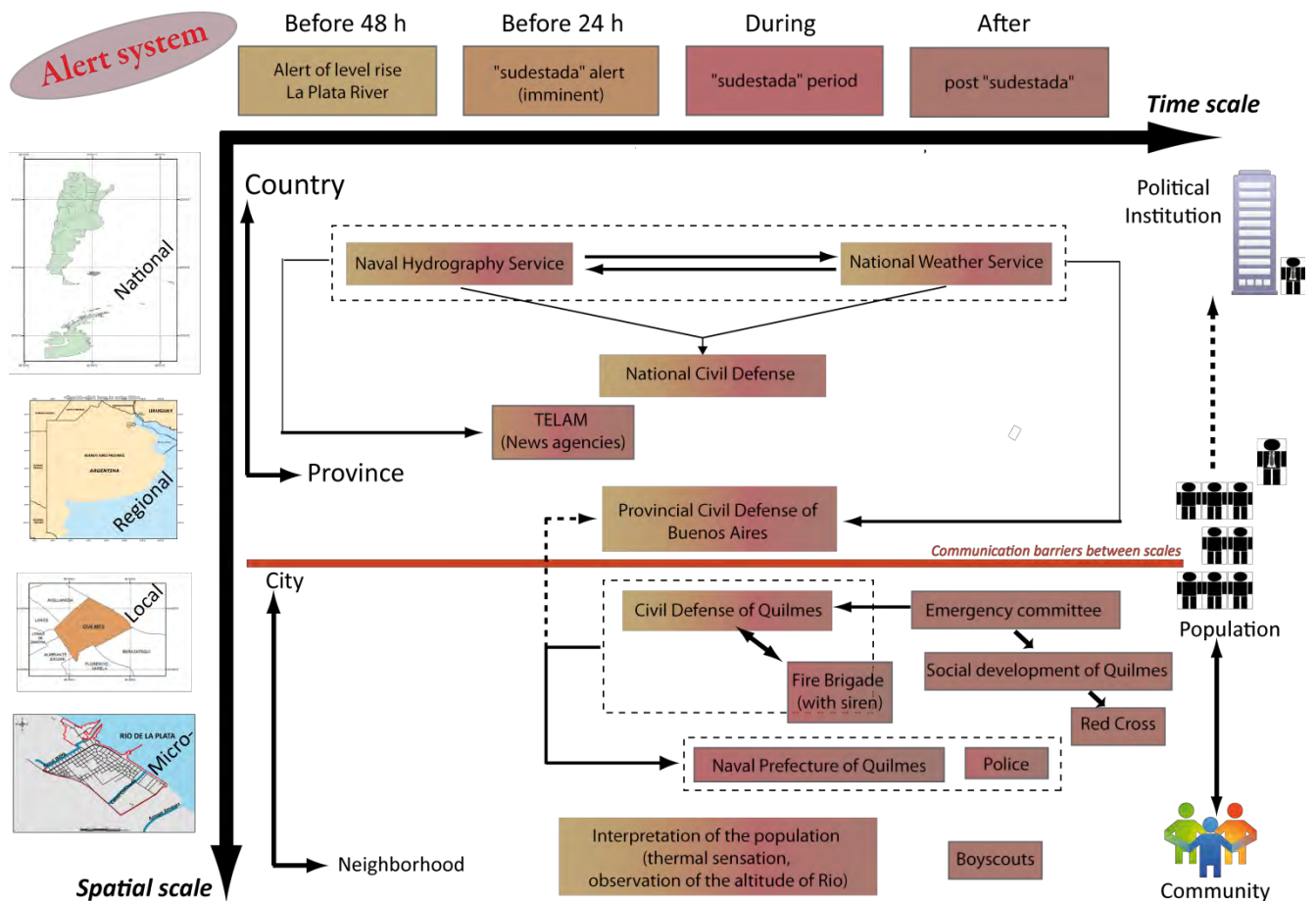


Figure 3: The actual alert system and its spatial and temporal scales.

3.2. How to improve the alert system?

The main problem registered in the alert system is related with the communications between the different institutions involved. In some cases, the information or the message doesn't arrive with the necessary time to take the appropriated actions. Also the local Civil Defense stays in alert and watches the synoptic situation and the RdP water level in other measure station at the south of La Ribera. An improved communication via text message was implemented in 2013 even if some delay was observed in communication since the issued alert until the local population registers the alert. The "Anticipando la crecida" project identified the need for social validation for alerts, ie, a systematic data collection mechanism to quantify affected households. The social validation will enable, not only to contribute to the improvement of flood forecasting models, but also the socialization of oceanographic and meteorological information between neighbors.

4. Conclusions and perspectives

"Anticipando la crecida" is an interdisciplinary and inter-sectorial project. It proposed co-produced knowledge through the interaction between the academic community, and the citizens and decision makers in La Ribera Quilmes. The co-production of knowledge can guide lines of

research to contribute to the resolution of specific problems. Through joint activities, participants of the project have identified different research to deepen : the understanding of floods and thus contribute to the improvement of tools to anticipate flooding in the study area (validation of wave models of the National Weather Service in Buenos Aires, improvement of information display system for monitoring, etc.)

Acknowledgements

“Anticipando la crecida” Project is financed by “Exactas con la Sociedad” Program supported by the Faculty of Natural Sciences (UBA) and also by the “UBANEX” Program of the Buenos Aires University.

Bibliography

- Balay M.A. (1961). *El Río de la Plata entre la atmósfera y el mar*. Publicación. H-621. Buenos Aires: Servicio de Hidrografía Naval. Armada Argentina. 153p.
- Bombardelli F., Menéndez A., Lapetina M. and Montalvo J. (1995). *Estudio del impacto hidráulico del puente Buenos Aires-Colonia: informe Nº 1*, Ezeiza, LHA, 1995, LHA-141-01-95, 25p.
- Depetris P.J. and Griffin J.J.(1968). Suspended load in the Río de la Plata drainage basin. *Sedimentology* 11, 53-60
- D’Onofrio E., Fiore M.M.E., Romero S. (1999). Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires. *Continental Shelf Research*. 19, 1681–1693.
- Escobar G., Vargas W., Bischoff S. (2004). Wind tides in the Río de la Plata estuary: meteorological conditions. *International Journal of Climatology*. Vol 24, 1159-1169.
- Framiñan M.B., Etala M.P., Acha M.E., Guerrero R.A., Lasta C.A. and Brown O.B. (1999). Physical characteristics and processes of the Río de la Plata Estuary. In: Perillo, G. M., Piccolo, M. C. and Pino Quivira M. (Eds.), *Estuaries of South America: Their Morphology and Dynamics*, Springer, New York, 161–194.
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp
- Minetti J.L. and Vargas W.M. (1990). Comportamiento del borde anticiclónico subtropical en Sudamérica. II Parte. *Rev. Geofísica* 33, 177- 190.
- Nagy J.G., Martinez C.M., Caffera R.M., Pedralozza G., Forbes E.A., Perdomo A.C. and Laborde J.L. (1997). *The hydrological and climatic setting of the Río de la Plata*. In *“The Río de la Plata, an Environmental Review”*, An Eco-Plata Project Background Report, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, 17-68.
- Simionato C.G., Nuñez M.N. and Engel M. (2001). The salinity front of the Río de la Plata - a numerical case study for winter and summer conditions. *Geophysical Research Letters* 28(13), 2641-2644.
- Simionato C.G., Dragani W.C., Nuñez M.N. and Engel M. (2004). A set of 3-D nested models for tidal propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Río de la Plata estuary: Part I, M2. *Journal of Coastal Research* 20(3), 893-912.
- Simionato C.G., Vera C.S. and Siegmund F. (2005): Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Río de la Plata area. *Journal of Coastal Research* 21, 770–783.
- Vera, A. G. (2006). *Quilmes; diagnóstico sobre las condiciones urbanas y ambientales*. Universidad Nacional de Quilmes, 111p. ISBN 978-987-558-071-8.
- Vera C.S., Vigliarolo P.K. and Berbery E.H. (2002). Cold season synoptic scale waves over subtropical South America. *Monthly Weather Review*. 130, 684-699.

Exposition des infrastructures routières de l'Est du Québec (Canada) à l'érosion et à la submersion

Susan Drejza¹, Stéphanie Friesinger¹, Pascal Bernatchez¹

1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Chaire de recherche en géoscience côtière et Centre d'études nordiques. Université du Québec à Rimouski
300 allée des Ursulines, G5L 3A1, Rimouski, Québec, Canada
susan_drejza@uqar.ca

RESUME.

Dans l'Est du Québec, un tiers de la population et près de 60 % des routes nationales sont situées à moins de 500 m des côtes. Cette étude menée pour le ministère des Transports du Québec (MTQ) a pour but de mieux connaître, comprendre et quantifier l'exposition à l'érosion et à la submersion de 2 258 km de routes et de fournir aux gestionnaires du MTQ un outil de planification des solutions d'adaptation aux aléas côtiers. Nous avons créé une base de données géoréférencée pour les 3478 km de côtes à l'étude. Elle inclut la numérisation de la ligne de rivage, la caractérisation de la dynamique hydrosédimentaire, des principaux types de côtes, de leur état et des structures de protection. Ensuite, l'exposition de la route à l'érosion, soit le nombre potentiel d'années avant qu'elle ne soit affectée, a été déterminée à partir de la sensibilité de la côte à l'érosion et de la distance entre l'infrastructure et la côte. Puis, l'exposition à la submersion, soit l'épaisseur d'eau potentielle sur la route, a été déterminée avec les niveaux d'eau atteints sur le terrain lors d'une tempête comparés à l'altitude de la route. Les résultats indiquent que plus de 33 km de route sont exposés de manière imminente à l'érosion (un seul évènement érosif peut les affecter), alors que 124 km supplémentaires seront exposés d'ici 2100. Actuellement, durant les tempêtes, 103 km sont potentiellement submersibles. Les bases de données et les cartes ont été remises au MTQ afin de contribuer à l'amélioration de la gestion des routes côtières.

ABSTRACT.

In eastern Quebec, one third of the population and almost 60 % of the national roads are located within 500 m of the shoreline. This study conducted on behalf of the Québec Department of Transport (MTQ) aims to better know, understand and quantify exposure to erosion and coastal flooding of their 2258 km of roads. We created a georeferenced database for the 3478 km of coastline in the study area. It includes digitalization of the shoreline, the identification of the hydrosedimentary dynamic features, the main types of coasts, their erosion status and the location of all defense structures. Then, the potential road exposure to erosion, or the potential number of years before it will be affected, was determined from the sensitivity of the coast to erosion and the distance between the infrastructure and the coast. Thirdly, exposure to flooding, or the potential water thickness on the road, was determined with water levels obtained on the field compared with the altitude of the road. The results indicate that more than 33 km of road are exposed to imminent erosion (one single erosion event can affect them) while an additional 124 km may become exposed by 2100. Currently, during storms, 103 km are potentially submersible. Databases and maps were given to the MTQ to help improve the management of coastal roads.

MOTS-CLES : Exposition, Vulnérabilité, Infrastructure routière, Érosion, Inondation, Submersion, Canada, Québec

KEYWORDS: Exposure, Vulnerability, Road Infrastructure, Erosion, Flooding, Submersion, Canada, Québec

1. Introduction

Les observations compilées durant les dernières décennies sur l'évolution du littoral et la littérature scientifique sur les changements climatiques permettent d'anticiper une recrudescence de certains aléas côtiers à court et moyen terme ainsi qu'une augmentation de leur intensité (GIEC, 2013; Lozano et al., 2004). La hausse accélérée du niveau moyen des mers et les nouvelles projections (Allison *et al.*, 2009; Church et White, 2011; Rahmstorf *et al.*, 2012) entraîneront des modifications dans le rythme d'érosion et la fréquence de submersion des côtes basses. Afin de renforcer les pratiques de gestion de risque en zone côtière, il devient essentiel d'intégrer l'érosion et la submersion dans une analyse globale du risque côtier (Dawson et al., 2009). Dans l'Est du Québec, 43 % du littoral serait potentiellement à risque de submersion et plus de 50 % des côtes sont sensibles à l'érosion. Or l'occupation humaine et les infrastructures de communications sont concentrées en zone côtière. De plus, près de 60 % des routes nationales de l'Est du Québec sont situées à moins de 500 m des côtes (Drejza *et al.*, 2014). C'est pourquoi cette étude a été menée en collaboration avec le ministère des Transports du Québec (MTQ) afin de mieux connaître, comprendre et quantifier l'exposition à l'érosion et à la submersion de 2258 km de routes de l'Est du Québec (Canada) et de fournir aux gestionnaires du MTQ un outil de planification des solutions d'adaptation aux aléas côtiers. Le territoire d'étude couvre les 3478 km de côtes des régions de la Côte-Nord, du Bas-Saint-Laurent, de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine (figure 1).

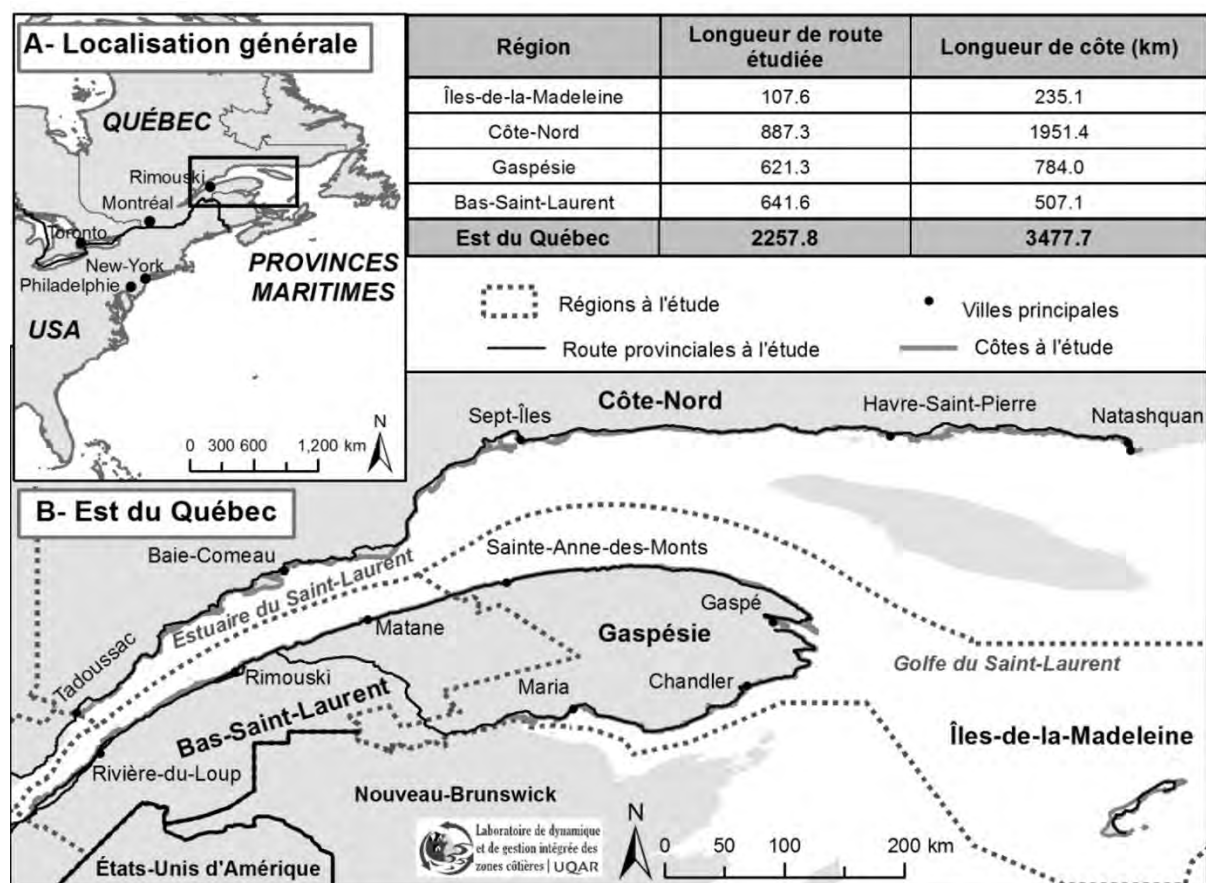


Figure 1. Localisation du territoire à l'étude

2. Base de données sur les côtes de l'Est du Québec

Une importante base de données sur les côtes de l'Est du Québec a d'abord dû être créée afin de dresser un portrait d'ensemble.

2.1. Numérisation de la ligne de rivage

Les 3 478 km de côtes ont été numérisés à l'échelle la plus précise possible (majoritairement au 1 :600, mais localement au 1 :1 500) sur les photographies aériennes haute résolution les plus récentes disponibles (entre 2001 et 2012 selon les régions). La ligne de rivage a été numérisée sur les côtes basses à la limite de la végétation dense. Pour les côtes à falaises, c'est le trait de côte qui a été numérisé au sommet de celles-ci. Pour les côtes artificialisées, cela correspond au sommet de l'ouvrage de protection.

2.2. Dynamique hydrosédimentaire et sources sédimentaires

Une caractérisation hydrosédimentaire de l'ensemble des côtes a été effectuée à l'aide des photographies aériennes récentes et anciennes, de photographies héliportées, de relevés sur le terrain et de données bathymétriques existantes. Pour l'ensemble des secteurs, plusieurs éléments importants ont été identifiés et cartographiés : les unités et cellules hydrosédimentaires, la dérive littorale principale et secondaire, les courants de marée, les courants estuariens, les courants de retour, et finalement les sources sédimentaires ponctuelles (cours d'eau, delta) et les réservoirs sédimentaires (cordons sableux, barres d'avant côtes, delta de marées...). Cela a permis l'identification de 183 unités et de 413 cellules hydrosédimentaires dans l'ensemble des côtes de l'Est du Québec.

2.3. Caractérisation de la côte

Les côtes ont été caractérisées à l'aide des photographies obliques héliportées de septembre 2010 réalisées par notre laboratoire et des données terrain lorsque disponibles. Ceci a ainsi permis d'obtenir le premier portrait détaillé des côtes de l'Est du Québec en terme de type de côte, d'état de la côte, d'artificialité de la côte (présence et état des structures). Ces informations, jumelées avec les taux de migration et la dynamique hydrosédimentaire ont permis une première analyse des cellules hydrosédimentaires.

3. Base de données sur le réseau routier

Chacune des voies routières (si terre-plein central), des bretelles d'accès et des haltes routières des routes sous la responsabilité du MTQ ont été analysées. Cela représente un total de 2 257,8 km de chaussées (figure 1). La bordure de l'infrastructure routière qui a été considérée est la ligne blanche latérale située du côté de la côte. Nous avons numérisé cette ligne sur les photographies aériennes les plus récentes et les plus précises disponibles (2007 à 2012 selon les secteurs). Toutes les analyses ont été réalisées à un pas de mesure de 100 m (22 578 points de mesure). Des mesures aux 20 m ont aussi été prises pour les sites côtiers faisant déjà l'objet d'un suivi par le MTQ en raison de leur exposition à l'érosion côtière et pour les routes situées en bordure de lagunes aux Îles-de-la-Madeleine (figure 2B). Cela représente 11 270 points de mesures aux 20 m.

L'altitude de la route provient principalement de l'altitude des données LiDAR. Lorsque celles-ci n'étaient pas disponibles, l'altitude provient d'un modèle numérique de terrain basé sur les courbes de niveau des cartes topographiques au 1:20 000 de la *Base de données topographique du Québec*

(BDTQ). La précision des différents levés LiDAR est en moyenne de 0,2 m selon les sources d'acquisition alors que les courbes de niveau de la BDTQ sont établies aux 10 m. L'altitude a été associée à chaque point avec l'outil « *Add surface information* » d'ArcGIS.

La distance entre la route et la ligne de rivage ou le trait de côte (selon les environnements côtiers) a été mesurée avec l'outil « *Near analysis* » d'ArcGIS. Les mesures ont été réalisées jusqu'à concurrence de 500 m de la côte et elles ont toutes été validées manuellement. Aux îles de la Madeleine, dans les secteurs où la route traverse des tombolos (figure 2B), les mesures ont été prises des deux côtés de la route afin de pouvoir analyser leur exposition du côté du golfe du Saint-Laurent et du côté de la lagune.



Figure 2. Routes nationales dans l'Est du Québec ; A – En Gaspésie, sur un remblai au pied d'une falaise rocheuse ; B – Sur un cordon littoral aux Îles-de-la-Madeleine ; C – Au Bas-Saint-Laurent sur une terrasse de plage

4. Exposition à l'érosion

4.1. Sensibilité de la côte à l'érosion

La sensibilité d'une côte à l'érosion est quantifiée à partir de sa vitesse annuelle de migration. Les taux les plus précis existants obtenus à partir des photographies aériennes historiques ont été utilisés (Bernatchez *et al.* 2008 ; Fraser *et al.* 2012 ; Dubois *et al.*, 2006 ; Bernatchez *et al.*, 2012 a, b, c, d, e, f). Dans le cas où il n'y en avait pas, mais qu'il existait des mesures récentes de la mobilité de la côte grâce aux 5 256 stations de suivi de la côte du réseau de suivi de l'érosion (mesurées annuellement

depuis 2000 à 2005 selon les régions et les stations) de notre laboratoire, ces données ont été utilisées. Lorsqu'aucune donnée locale n'était disponible, aucune extrapolation de la sensibilité de la côte n'a été effectuée, ce qui correspond à aussi peu que 22 % du réseau total étudié.

4.2. Calcul de l'exposition à l'érosion

Afin d'identifier les secteurs exposés de manière imminente à l'érosion, le recul maximum mesuré durant un seul événement (selon le type de côte et la région) a été soustrait à la distance entre l'infrastructure et la côte. Puis, pour obtenir l'exposition à l'érosion, soit le nombre potentiel d'années avant que la route ne soit affectée, le résultat a été divisé par le taux de migration annuel.

4.3. Exposition des routes à l'érosion

Les résultats indiquent que 33,1 km de routes (1,4 %) sont actuellement exposés de manière imminente à l'érosion (tableau 1), c'est-à-dire qu'un seul événement important pourrait les affecter. D'ici 2100, plus de 124 km supplémentaires seront exposés à l'érosion, soit un total de 157,4 km de routes (12,6 % des routes situées à moins de 500 m de la côte ou 6,8 % de toutes les routes). Il est important de noter que pour 496 km de routes, l'exposition à l'érosion n'a pas pu être calculée faute de données sur la sensibilité des côtes à l'érosion. D'autres études sont nécessaires dans ces secteurs pour déterminer l'exposition des infrastructures routières. Ceci est particulièrement le cas pour la Gaspésie et le Bas-Saint-Laurent (respectivement 40,7 et 26,9 % de routes pour lesquelles il manque des données d'érosion) (tableau 1).

Tableau 1. Exposition des routes nationales à l'érosion et à la submersion

		Région				TOTAL
		Bas-Saint-Laurent	Gaspésie	Îles-de-la-Madeleine	Côte-Nord	
Routes exposées à la submersion km (%)	oui	78,5 (12,2)	5,8 (0,9)	6,5 (6,0)	12,2 (1,4)	103,0 (4,6)
	par franchissement de l'ouvrage	1,8 (0,3)	24,6 (4,0)	0,1 (0,1)	0,3 (0,03)	26,8 (1,2)
	non	559,3 (87,2)	577 (92,9)	100,8 (93,7)	872,0 (98,3)	2109,1 (93,4)
	pont	2,0 (0,3)	3,0 (0,5)	0,2 (0,2)	2,5 (0,3)	7,7 (0,3)
Routes exposées à l'érosion km (%)	imminence	7,3 (1,1)	17,5 (2,8)	2,1 (2)	6,2 (0,7)	33,1 (1,4)
	exposé d'ici 2100	32,1 (5,0)	30,8 (5,0)	16,8 (15,7)	44,6 (5,1)	124,3 (5,4)
	non exposé	61,1 (9,5)	195,1 (31,4)	43,2 (40,1)	288,3 (32,5)	587,7 (26,0)
	non déterminé (manque de données)	172,7 (26,9)	252,8 (40,7)	0,4 (0,4)	70 (7,9)	459,7 (22,0)

	d'érosion)					
	non étudié (à plus de 500 m)	367,2 (57,2)	122,2 (19,7)	44,9 (41,7)	475,7 (53,6)	1010,0 (44,7)
	pont	1,2 (0,2)	2,9 (0,5)	0,2 (0,2)	2,5 (0,3)	6,8 (0,3)
TOTAL		641,6 (28,4)	621,3 (27,5)	107,6 (4,8)	887,3 (39,3)	2257,8 (100)

5. Exposition à la submersion

5.1. Sensibilité de la côte à la submersion

La méthode la plus couramment utilisée pour cartographier l'aléa submersion consiste à établir une cote de submersion basée sur le niveau d'eau extrême observé au marégraphe le plus proche. Cependant, les résultats obtenus dans l'Est du Québec à la suite de tempêtes importantes (Bernatchez *et al.*, 2011 ; Quintin *et al.*, 2013) indiquent clairement que cette approche traditionnelle est inadéquate. En effet, lors des tempêtes de décembre 2005 et décembre 2010, l'écart entre le niveau d'eau extrême observé au marégraphe le plus proche et les niveaux réellement atteints sur le terrain a été en moyenne de 1,5 m pour la région du Bas-Saint-Laurent, mais il a atteint des valeurs moyennes de 1,89 à 3,5 m dans certaines municipalités de l'Est du Québec (Quintin *et al.*, 2013 ; Bernatchez *et al.*, 2011). Des constats similaires ont été observés lors de tempêtes récentes aux États-Unis et en France (FEMA, 2007; MEDDE, 2013).

C'est pourquoi nous avons plutôt utilisé le niveau atteint par des événements de submersion sur le terrain afin de cartographier l'aléa de submersion de manière plus juste. Ce niveau moyen mesuré a été rapporté à la valeur de pleine mer supérieure de grande marée (PMSGM) de la station marégraphique la plus proche. Cela permet d'obtenir une valeur relative de dépassement du niveau théorique de la marée, valeur qui est adaptable aux secteurs pour lesquels il n'existe pas de mesures sur le terrain et pour lesquels les niveaux de marée peuvent être différents. Les niveaux utilisés varient entre 0,77 et 2,56 m au-dessus de la PMSGM.

5.2. Calcul de l'exposition à la submersion

L'exposition de la route à la submersion, soit l'épaisseur d'eau sur la route, découle de la soustraction de l'altitude géodésique de la route à la cote de submersion. Un résultat négatif veut dire qu'il n'y a pas de nappe d'eau présente sur la route et un résultat positif en donne l'épaisseur d'eau possible. Cependant, étant donné que la marge d'erreur moyenne des différents types de données LiDAR est de 0,2 m, tous les points qui se situent à moins de 0,2 m de la cote de submersion ont été identifiés comme potentiellement submersibles.

Les conditions locales telles que l'artificialisation de la côte, la largeur et la pente de la plage et de l'estran, l'altitude de la plage, l'orientation de la côte et la hauteur de vagues peuvent faire varier le niveau de submersion. Tous ces éléments ne peuvent pas être cartographiés sur un territoire aussi vaste et diversifié que l'Est du Québec. Cependant, l'élément principal semble être l'artificialisation des côtes. En effet, ces secteurs peuvent être submergés entre 0,5 et 0,96 m plus haut que les secteurs naturels (Quintin *et al.*, 2013 ; Bernatchez *et al.*, 2011). C'est pourquoi, dans les secteurs où la structure de protection était à moins de 10 m de la route et que son altitude ne dépassait pas de

plus de 1 m la cote de submersion, elle a été identifiée comme pouvant être submergée par le franchissement de l'ouvrage par les vagues de tempête.

5.3. Exposition des routes à la submersion

Concernant la submersion, 103 km sont actuellement potentiellement submersibles durant les tempêtes, soit 4,6 % des routes de l'Est du Québec (tableau 1). La submersion de la route survient surtout dans le Bas-Saint-Laurent où les routes se trouvent souvent bâties sur des côtes basses (figure 2C). Cependant, les $\frac{3}{4}$ des routes exposées à la submersion par franchissement de l'ouvrage se situent en Haute-Gaspésie (19,9 km soit 14,3 % des routes du secteur). Ceci est dû au fait que la route a été construite sur de longues sections de remblai au pied de falaises rocheuses (figure 2A).

6. Conclusion

Cette recherche a permis de documenter et de quantifier pour la première fois à l'échelle de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent le niveau d'exposition des infrastructures de transport nationales aux aléas d'érosion et de submersion. En plus d'apporter des données aux gestionnaires, cette vue d'ensemble est un premier pas nécessaire vers la quantification du niveau de vulnérabilité des infrastructures routières aux aléas côtiers. De plus, cette recherche fait aussi ressortir les secteurs où les données sont insuffisantes pour évaluer l'exposition à l'érosion ou encore où les données ne sont pas assez précises pour évaluer l'exposition à la submersion (absence de données Lidar pour certains secteurs). Enfin, des projections de la hausse du niveau marin relatif et du régime des tempêtes devront être réalisées à l'échelle régionale pour évaluer le niveau d'exposition à la submersion pour le futur.

En outre, cette étude présente le premier portrait des caractéristiques physiques de l'ensemble des côtes de l'Est du Québec à une haute résolution spatiale. Ce portrait présente les types de côte, leur état de stabilité, un inventaire des ouvrages de protection et leur état ainsi qu'une toute première délimitation des unités et des cellules hydrosédimentaires.

Les différentes données générées ont été transmises aux gestionnaires du MTQ. Cela va permettre de gérer la côte et les prochaines interventions selon une approche par cellule hydrosédimentaire, en évaluant mieux les impacts potentiels des interventions sur l'ensemble de la cellule. Cela devrait ainsi limiter les impacts négatifs sur le littoral que pourraient avoir des actions non planifiées en fonction de la dynamique hydrosédimentaire. Les résultats vont également permettre aux gestionnaires de cibler les secteurs de routes problématiques, de planifier les solutions d'adaptation et de prioriser les interventions selon différents horizons de temps allant jusqu'en 2100 (pour l'exposition à l'érosion).

Remerciements

Les auteurs remercient tous les membres du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières pour leurs contributions à la discussion et à la réflexion qui a accompagné cette étude. Nous tenons également à remercier le comité de suivi ainsi que les différents collaborateurs du MTQ. Nous remercions le MTQ pour le financement de ce projet de recherche dans le cadre du programme de recherche du MTQ en adaptation aux impacts des changements climatiques lié à la mise en œuvre de l'action 23 du Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012 (PACC 2016-2012) du gouvernement du Québec.

Références

- Allison, I. dir. (2009), *The Copenhagen Diagnosis, 2009: Updating the world on the Latest Climate Science*. The University of New South Wales Climate Change Research Centre, Sydney, Australie, 60 p.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Lefavre, D. et Dugas, S. (2011), Integrating anthropogenic factor, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards. *Oceans and Coastal Management*, 54: 621-632.
- Bernatchez, P., Friesinger, S., Denis, C. et Y. Jolivet (2012 a). Géorisques côtiers, vulnérabilité et adaptation de la communauté d'Ekuanitshit dans un contexte de changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Conseil tribal Mamuitun et au Ministère des affaires autochtones et Développement du Nord Canada, 219 pages
- Bernatchez, P., Friesinger, S., Denis, C. et Y. Jolivet (2012 b). Géorisques côtiers, vulnérabilité et adaptation de la communauté de Nutashkuan dans un contexte de changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Conseil tribal Mamuitun et au Ministère des AADNC, 221 pages
- Bernatchez, P., Friesinger, S., Denis, C. et Y. Jolivet (2012 c). Géorisques côtiers, vulnérabilité et adaptation de la communauté de Pessamit dans un contexte de changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Conseil tribal Mamuitun et au Ministère des Affaires autochtones et Développement du Nord Canada, 240 pages.
- Bernatchez, P., Friesinger, S., Denis, C. et Y. Jolivet (2012 d). Géorisques côtiers, vulnérabilité et adaptation de la communauté de Uashat mak Mani-Utenam dans un contexte de changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Conseil tribal Mamuitun et au Ministère des Affaires autochtones et Développement du Nord Canada, 240 pages.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Dugas, S. et S. Drejza, (2012 e). Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC d'Avignon. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, août 2012, 49 p. et annexes.
- Bernatchez, P., Drejza, S. et S. Dugas (2012 f). Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des îles de la Madeleine. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, juillet 2012, 71 p. et annexes
- Bourque, A. et Simonet, G. (2008), « Québec », chapitre 5, p 171-226, dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Lacroix et E. Bush (éditeurs), Gouvernement du Canada, Ottawa.
- Church, J.A. et White, N.J. 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surveys in Geophysics*, 32 : 585-602.
- Dawson, R.J., Dickson, M.E., Nicholls, R.J., Hall, J.W., Walkden, M.J.A., Stansby, P.K., Mokrech, M., Richards, J., Zhou, J., Miligan, J., Jordan, A., Pearson, S., Rees, J., Bates, P.D., Koukoulas, S. et Watkinson, A.R., (2009), Integrated analysis of risks of coastal flooding and cliff erosion under scenarios of long term change. *Climatic Change*, 95 : 249-288.
- Dubois, J.-M., Bernatchez, P., Bouchard, J.-D., Daigneault B., Cayer, D. et S. Dugas, (2006) Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du Saint-Laurent pour la période de 1996-2003. Conférence régionale des élus de la Côte-Nord, 291 pages, annexes.
- Drejza, S., Friesinger, S. et Bernatchez, P. (2014). Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec, Volume I, Projet X008.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Remis au ministère des Transports du Québec, mars 2014, 187 p. + annexes.
- FEMA (2007) *Atlantic Ocean and Gulf of Mexico coastal guidelines update*. Denton, 360 p.
- Fraser, C., Bernatchez, P., Dugas, S. et Drejza, S. (2012). Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC de Bonaventure. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, août 2012, 50 p. et annexes.

- GIEC (2013), « Climate Change 2013: The Physical Science Basis », Working Group I – Contribution to the IPCC 5th Assessment Report, 2216 p.
- Lozano, Devoy, May, Anderson, (2004), Storminess and vulnerability along the Atlantic coastlines of Europe : analysis of storm records and of a greenhouse gases induced climate scenario. *Marine Geology*, 210 : 205-225
- MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2013), Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux, 169 p.
- Quintin, C., Bernatchez, P., Jolivet, Y. (2013). Impacts de la tempête du 6 décembre 2010 sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de la baie des Chaleurs. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et Chaire de recherche en géoscience côtière, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, février 2013, Volume I : 48p. + Volume II : 170 p.
- Rahmstorf S, Foster G et Cazenave A. (2012). Comparing climate projections to observations up to 2011. *Environmental Research Letters*, 7: 044035.

ROSCOF : Outil d'aide au recensement des ouvrages et structures côtières de France

Amélie Roche¹, Xavier Bertrand², Hervé Poirier²

1. Cerema – Direction technique Eau, Mer et Fleuves

Technopôle Brest Iroise, 155 rue Pierre Bouguer, BP 5, 29280 Plouzané, France

Amelie.Roche@cerema.fr

2. Cerema – Direction territoriale Ouest

23 avenue de l'Amiral Chauvin, BP 69, 49136 Les Ponts-de-Cé, France

Xavier.Bertrand@cerema.fr, Herve.Poirier@cerema.fr

RESUME.

Donnée essentielle pour la gestion du trait de côte et des risques littoraux, les « ouvrages côtiers » font régulièrement l'objet de recensements locaux. Cependant, ces recensements ne sont ni homogènes au niveau national, ni systématiques du fait du temps important à consacrer à l'inventaire de terrain. Suite aux travaux d'un groupe de travail national ayant conduit à la publication de la notice méthodologique « Préconisations pour le recensement des ouvrages et structures de protection contre les aléas côtiers » par le CETMEF en 2011, un outil d'aide au recensement a été développé au sein du Centre d'Étude et de Conception des Prototypes d'Angers (Cerema-DTer Ouest). Cet outil prend aujourd'hui la forme d'une suite logicielle « ROSCOF – Recensement des Ouvrages et Structures Côtières de France ». Elle se compose d'un module « terrain » développé sur un terminal mobile PDA et d'un logiciel « bureau » dédié à la récupération et à la validation des informations de terrain qui facilite la capitalisation, la gestion et le partage des informations collectées.

ABSTRACT.

Essential datum for shoreline and coastal risks management, "coastal defence works" are regularly the object of local inventories. However, these inventories are neither homogeneous at a national scale, nor systematic because they require too much on-field time. Further to the conclusions of a national working group having led to the publication of the methodological note "Guidelines for works and defence structures against coastal hazards inventory" by CETMEF in 2011, a tool designed for the inventory was developed within the Center of Study and Conception of Prototypes of Angers (Cerema-DTer Ouest). This tool is a software called "ROSCOF - Inventory of the coastal works and defences of France". It consists of a "field module" developed on a mobile terminal PDA and an "office software" dedicated to the recovery and validation of the on-site data which facilitates the capitalization, management and sharing of collected information.

MOTS-CLES : OUVRAGES COTIERS, TYPOLOGIE, OUTIL, LOGICIEL, RECENSEMENT, GESTION

KEYWORDS: COASTAL WORKS, COASTAL DEFENCE, TYPOLOGY, TOOL, SOFTWARE, INVENTORY, MANAGEMENT

1. Introduction

En 2010, le CETMEF (Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales, aujourd'hui Direction Technique Eau mer et fleuves du Cerema) a piloté un groupe de travail national ayant pour but d'établir une méthodologie de recensement des ouvrages de protection contre les aléas côtiers, homogène au niveau national. Alimenté par des travaux préliminaires réalisés au sein du CETMEF en 2009 (Boullay et Villemagne), ce groupe de travail a permis l'élaboration et la diffusion d'une notice méthodologique de « préconisations pour le recensement des ouvrages et structures de défense contre les aléas côtiers » (Roche, 2011). Cette notice méthodologique est complétée par des outils de terrain (« fiche de site » et « fiche défense ») permettant d'aider et de guider les futurs recenseurs ainsi qu'un simple logiciel « masque » permettant de capitaliser sous format numérique les fiches terrain papier. L'ensemble de ces productions est disponible en téléchargement à partir du site Internet du CETMEF (publication de la collection les « Outils/côtier ») : <http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr>

Lors des travaux du groupe, l'intérêt de disposer au niveau national d'une base de données des « ouvrages côtiers » et d'une représentation cartographique associée a été soulevé à plusieurs reprises sans qu'une décision puisse aboutir quant à sa réalisation. Le parti a été pris de développer et de diffuser un outil qui permette d'aboutir un jour à cette vision nationale et homogène des ouvrages côtiers : l'outil « ROSCOF » présenté dans cet article. Le développement de cet outil a été confié au CETE Ouest (Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Ouest, aujourd'hui Direction Territoriale Ouest du Cerema) suite à une première étude de faisabilité réalisée par celui-ci, relative à l'opportunité d'utiliser un terminal mobile de type assistant numérique personnel (PDA) pour faciliter le recensement sur le terrain.

Cet outil s'adresse à l'ensemble des services, gestionnaires ou contrôleurs d'ouvrages côtiers, ou organismes producteurs de connaissance sur le littoral qui s'intéressent aux phénomènes et aléas côtiers (recul du trait de côte, submersion marine). Les services techniques, de l'État ou des collectivités territoriales, ou les associations qui souhaitent mettre en œuvre ce recensement sont désormais simplement invités à communiquer au Cerema leurs résultats afin de les agréger au niveau national et de les restituer sous la forme d'une analyse mise à disposition de tous sur Internet.

2. Synthèse de la notice méthodologique de recensement et présentation de l'outil ROSCOF

2.1. Synthèse des recommandations méthodologiques

La notice méthodologique (Roche, 2011) propose en premier lieu une typologie des structures côtières de protection contre les aléas côtiers distinguant les « ouvrages » ayant vocation principale la défense contre la mer (les murs et ouvrages de soutènement, les digues côtières, les perrés, les brise-lames et les épis), les « aménagements » ayant un impact hydrosédimentaire (les accès, les bâtiments, les aménagements hydrauliques, portuaires ou liés à la sécurité ou à la surveillance) et les « méthodes de protection » du littoral (by-pass, drainage de plage, rechargement, confortement dunaire ou de falaise). Par ailleurs, le document propose une méthode de recensement de ces structures sur le terrain, à l'aide de fiches de terrain relatives :

- « au site » recensé, donnant des informations sur les conditions de visite et une description de l'environnement géomorphologique et sédimentaire des structures ;
- « à la structure de défense » recensée, donnant des informations sur la défense même.

2.2. Objectifs de l'outil ROSCOF

L'outil ROSCOF permet de guider les opérateurs dans leur saisie sur le terrain, afin de garantir le respect des préconisations mentionnées dans la notice méthodologique (Roche, 2011) et l'homogénéité nationale de la signification et du format des données, permettant leur agrégation et analyse. De plus, il permet un gain de temps non négligeable à chaque étape de la démarche et aboutit à la fourniture de données validées et partagées.

Il se compose d'un outil terrain qui permet le recensement précis au moyen d'un terminal mobile numérique et d'un outil bureau qui permet l'édition et la validation des données recueillies (voir Figure 1).

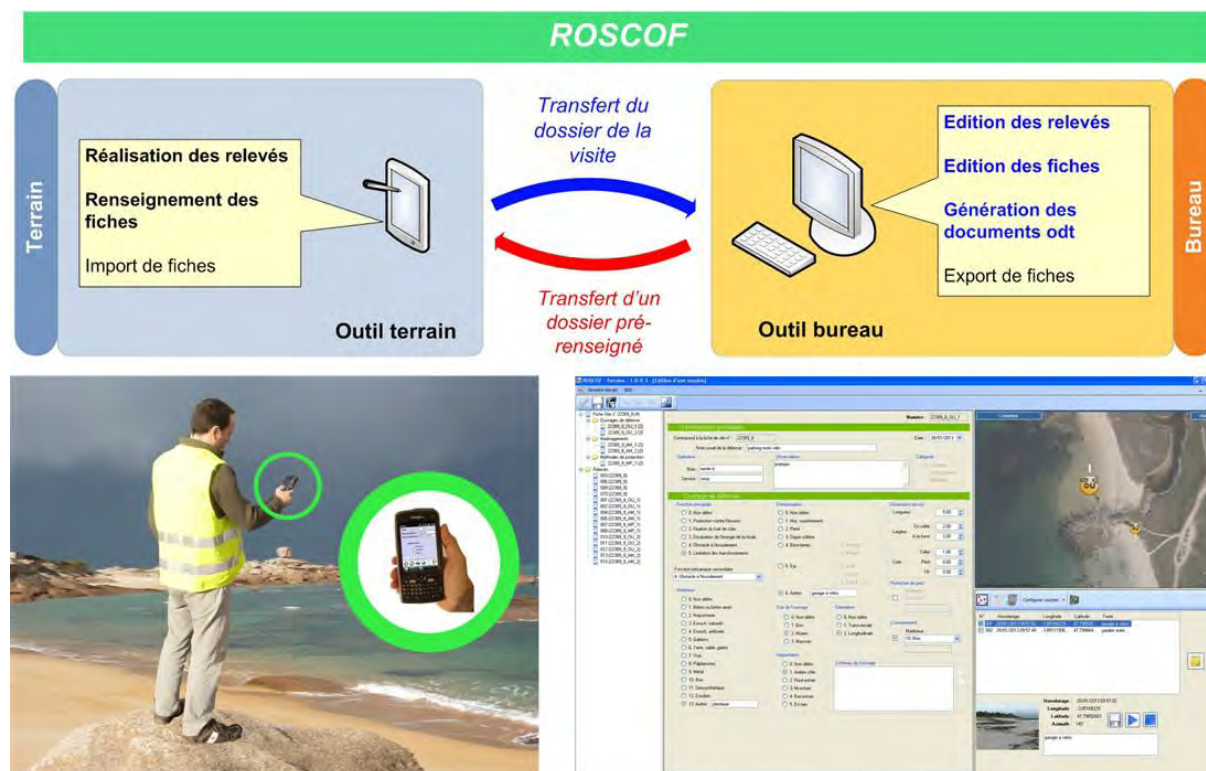


Figure 1. Composition de l'outil ROSCOF

Les deux outils terrain et bureau sont conçus pour être utilisés ensemble afin d'optimiser les bénéfices apportés aux utilisateurs. Cependant, l'outil bureau peut aussi être utilisé seul, en particulier dans le cas de figure où le matériel nécessaire à l'utilisation de l'outil terrain n'est pas disponible.

3. ROSCOF – module de terrain

3.1. Objectifs

L'outil de terrain permet à un opérateur d'identifier et de caractériser le site recensé en y intégrant les différents ouvrages, structures et méthodes de protection, conformément à la notice méthodologique (Roche, 2011). L'outil proposé permet par ailleurs de lier automatiquement des positions de référence (latitude/longitude), des photographies et des enregistrements de commentaires audio aux fiches terrain créées. Cet outil est donc préférablement utilisé à l'aide d'un terminal mobile, facilement exploitable sur le terrain (léger, maniable, peu encombrant, disposant d'une grande autonomie électrique, résistant aux conditions extérieures, etc.) et disposant des équipements nécessaires au recueil des données (caméra, récepteur GPS, compas électronique, microphone, etc.). Ce terminal peut aussi bien être utilisé par un opérateur à pied que dans un véhicule (voiture, hélicoptère...).

3.2. Terminal mobile

Le terminal mobile utilisé pour le recensement terrain est un PDA PSION EP10 (voir Figure 2), qui rassemble les caractéristiques techniques suivantes : protection contre les poussières et éclaboussures (IP54), protection contre les chutes sur surfaces dures (résistance à 26 chutes de 1,50 m sur béton), appareil photographique couleur 3,2 mégapixels, récepteur GPS SIRFstarIV, compas électronique, batterie 3600 mA Li-Ion (autonomie nécessaire pour fonctionner au moins une journée entière sans rechargement), accueil de carte mémoire microSD (16 Go) et encombrement minimum : 158 mm x 78 mm x 30 mm. Lors de l'ouverture d'une session de terrain, des procédures d'auto-test sont lancées afin de vérifier le bon fonctionnement de toutes les ressources nécessaires.



Figure 2. Assistant personnel numérique utilisé

3.3. Fonctionnalités

Les formulaires de saisie reprennent le formalisme et les champs des fiches de site et défense de la notice méthodologique (Roche, 2011) en leur attribuant une chronologie : l'opérateur commence par renseigner une fiche site dans laquelle il vient intégrer des fiches défense. Ces fiches permettent d'une part de décrire l'environnement de la structure de défense (fiche site) et d'autre part de caractériser l'ouvrage, l'aménagement ou la méthode de protection. Ces formulaires sont adaptés à la taille et à la résolution de l'écran du terminal mobile, sous forme d'onglets, afin de fournir à

l'opérateur un confort d'utilisation satisfaisant. Au démarrage d'une session, celui-ci peut soit créer une nouvelle fiche, soit ouvrir une session déjà débutée et incomplète, soit ouvrir une session non validée pour en modifier les valeurs renseignées (voir Figure 2). L'opérateur peut par ailleurs déclencher à tout moment des relevés complémentaires constitués de tout ou partie des éléments suivants : photographie et son azimuth (angle de prise de vue par rapport au Nord), position GPS, commentaire audio ou texte libre. Ces relevés sont alors associés à la fiche en cours de renseignement (site ou défense). L'ensemble des données est enregistré sous un format non propriétaire, permettant leur exploitation au moyen d'outils bureautiques classiques (fichiers .xml, .jpg ou .wav). Cependant l'outil bureau dédié est proposé pour compléter cet outil terrain.

4. ROSCOF – outil bureau

4.1. Objectifs

L'outil bureau est un logiciel utilisé à partir d'un ordinateur PC sous Windows. Pour exploiter pleinement les fonctionnalités développées pour l'outil, celui-ci doit disposer d'une connexion Internet et d'un accès à un répertoire de stockage choisi pour la base de données sur les ouvrages. NB : ce répertoire peut être hébergé sur Internet, sous un intranet ou sur un réseau local ou étendu.

L'outil de bureau permet à l'opérateur d'importer les sessions de terrain, de les éditer, de les compléter et de les valider. Les compléments apportés peuvent notamment s'appuyer sur les relevés créés en parallèle du renseignement des fiches. A l'issue de cette étape, la session terrain peut être considérée comme validée et être sauvegardée localement ou versée dans une base de données partagée. Dans ce dernier cas, l'ensemble des personnes ayant accès à la base peut consulter les informations relatives aux sites et défenses. Une cartographie dynamique facilite l'affichage des données, mais il est aussi possible de les exporter vers un SIG.

4.2. Validation des données terrain

L'outil bureau permet d'accéder directement aux informations contenues sur le terminal mobile et de les importer « par session ». Les sessions à valider apparaissent alors à l'opérateur sous la forme d'une fiche (de site ou défense) associée à une cartographie des relevés et leurs informations (voir Figure 3). Pour chaque relevé, il est possible de l'afficher et de le supprimer, voire de le modifier (image associée, commentaires texte et coordonnées GPS).

A l'issue de la vérification des données, un formulaire numérique d'inspection, comprenant la fiche de site et ses fiches défenses associées, peut être généré automatiquement à des fins de sauvegarde, de transmission ou d'impression papier. Ce formulaire reprend le format des fiches de la notice méthodologique (Roche, 2011) avec les fiches de site au format A3 et les fiches défenses au format A4. L'ensemble des relevés conservés font l'objet d'une ou plusieurs pages complémentaires, annexées soit à la fiche de site, soit à la fiche défense concernée. Par ailleurs, une aide à la réalisation de plans de situation est proposée pour la fiche de site et le fichier est modifiable en écriture pour tout complément (insertion d'images, etc.). Enfin, lors de la validation des données terrain, il est automatiquement proposé de les intégrer dans une base de données, qui contiendra l'ensemble des informations collectées, exceptés les commentaires audio.

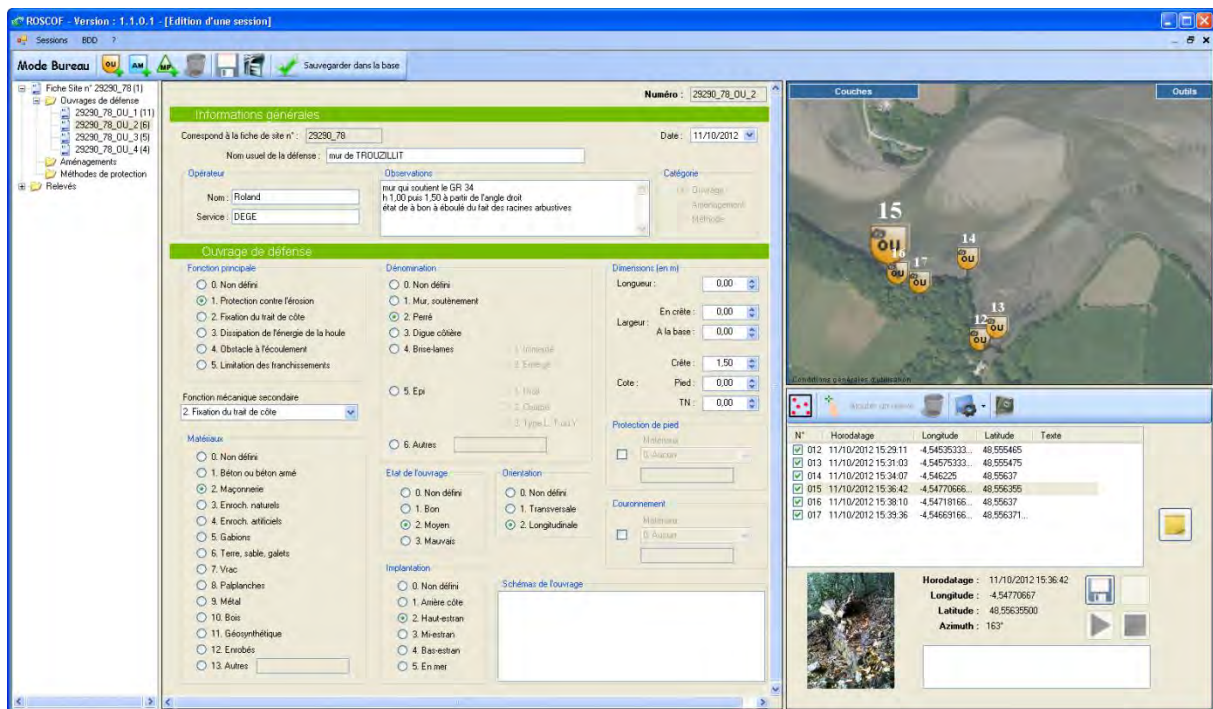


Figure 3. Aperçu de l'outil bureau

4.3. Module base de données

Contrairement à l'outil bureau qui exploite localement les sessions terrain réalisées, le module base de données permet de transférer les fiches créées dans une base de données. Il est ainsi possible de centraliser et de faciliter l'accès aux données à plusieurs sites distants d'un même service. En outre, l'enrichissement de ces fiches peut faire appel à des éléments non collectés directement sur le terrain (par exemple : adjonction d'images non prises le jour de la visite initiale, etc.).

La base de données permet ainsi d'accéder indépendamment aux fiches sites et défenses à partir d'une liste d'affichage des fiches disponibles, via l'utilisation de filtres. La consultation d'une fiche consiste à afficher le formulaire associé. Il est à ce stade nécessaire de gérer des droits d'accès pour que quelques personnes seulement puissent modifier les fiches de la base de données ; ces droits sont gérés localement par le service d'accueil de ROSCOF. Pour l'ensemble des personnes visualisant les données, il est possible de consulter les fiches et leurs relevés associés. En particulier, il est possible de récupérer des positions GPS, des photographies ou des captures de la cartographie dynamique. La base de données permet d'autre part, aux personnes en ayant les droits, d'ajouter des informations complémentaires à une fiche : par exemple insérer des photographies, des croquis/coupes d'ouvrages, du site, etc. Comme après validation des fiches avant import dans la base de données, il est possible de générer un formulaire informatique correspondant à une fiche site et/ou défense, à des fins de sauvegarde, de transmission ou d'impression papier. L'ensemble des données de la base est exportable vers un SIG : l'ensemble de la base ou seules les données correspondant à des fiches pré-sélectionnées.

5. Validation et déploiement

5.1. Expérimentation

La méthodologie de recensement des ouvrages côtiers à l'aide des outils ROSCOF – terrain et bureau – a été testée dès le premier trimestre 2012 par un comité d'utilisateurs restreint, parmi lesquels la Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Finistère et les Centres d'Études Techniques de l'Équipement de Méditerranée et Sud-Ouest (aujourd'hui Directions Territoriales Méditerranée et Sud-Ouest du Cerema). Des ajustements ont alors été apportés aux outils ROSCOF pour corriger quelques dysfonctionnements résiduels. De plus, des améliorations ont été réalisées à la demande des utilisateurs ainsi qu'à l'initiative de l'équipe de pilotage et de réalisation du projet afin d'améliorer l'ergonomie des outils. Notamment, il est désormais possible de remplacer une photographie réalisée au moyen du PDA par une autre image issue d'un appareil photo numérique ou d'une photothèque. De plus, le choix d'affichage de différentes couches cartographiques est possible : la couche cartographique Ortho Littorale est maintenant utilisable pour vérifier ou modifier le positionnement des relevés effectués sur le terrain.

5.2. Mise à disposition

La diffusion de l'outil ROSCOF (terrain et bureau) a ainsi pu débuter dès la fin de l'année 2013. Le module complémentaire « base de données » est actuellement en cours de finalisation. À l'instar de la diffusion de la notice méthodologique et du logiciel-masque, ces outils sont diffusés via le site Internet du Cerema. Une licence d'utilisation est cependant à remplir afin de faciliter le suivi des applications de la chaîne logicielle et d'assurer un service d'assistance en cas de difficultés.

6. Perspectives

L'outil ROSCOF ayant montré l'intérêt de disposer rapidement d'une information cartographique sur le littoral, une autre application simple et fonctionnant sur le même terminal mobile sera développée prochainement. Il s'agit de l'outil CRISI : outil de collecte d'informations par visites de terrain suite à une inondation.

L'outil pourra aussi être valorisé pour une approche de diagnostic des ouvrages côtiers, en lien avec le développement et la valorisation de la méthodologie de « Visites simplifiées et comparées » pour les ouvrages côtiers. Enfin, l'ensemble des informations collectées via l'outil ROSCOF et renvoyées au Cerema pour analyse sera valorisé au travers d'un site Internet ayant vocation à constituer une référence nationale sur l'évolution du littoral, dans le cadre du projet d'actualisation du « Catalogue Sédimentologique des côtes françaises » piloté par le Cerema.

7. Conclusions

L'outil ROSCOF, modules de terrain et de bureau, permet de favoriser les recensements de terrain des ouvrages côtiers suivant une méthodologie nationale. Cet outil permet d'obtenir des gains de temps non négligeables sur une opération lourde à mettre en œuvre mais absolument nécessaire pour obtenir une vision nationale des types d'ouvrages côtiers sur nos littoraux, pour aboutir à des

stratégies locales de gestion du trait de côte adaptées au milieu et éventuellement d'adapter nos structures de protection aux enjeux du changement climatique. Cet outil, diffusé gratuitement à tous ceux qui souhaitent s'impliquer dans cette démarche nationale, donne la possibilité à ces organismes de gérer en réseau une base de données spécifique à leurs ouvrages côtiers avec des possibilités de lien vers des représentations cartographiques. Pour rendre possible une agrégation au niveau national, ces organismes sont simplement invités à communiquer au Cerema leurs résultats qui seront restitués sous la forme d'une analyse mise à disposition de tous sur Internet et qui constituera un des éléments nécessaires à la constitution d'un socle commun de référence sur l'évolution du trait de côte.

Remerciements : *L'équipe de pilotage et de réalisation du projet remercie le comité des utilisateurs qui regroupe les services ayant spontanément exprimé leur volonté de s'inscrire dans cette démarche nationale pour leur confiance, en particulier Anne-Marie L'AOUR et Jean-Pierre TERRASSON de la DDTM 29, Céline TRMAL de la DTer Méditerranée et Jérôme REVEL et Yves NEDELEC de la DTer Sud-Ouest du Cerema et Maëlle ALLAIN de la Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature du MEDDE. À ce premier groupe se sont également récemment ajoutés MM. François PLANAS et Guy VINOT de la DDTM 66.*

Références bibliographiques :

- Boullay R., Villemagne G. (2009), Préconisations pour le recensement des ouvrages de protection contre les aléas côtiers. CETMEF.
- Roche A. (2011). Préconisations pour le recensement des ouvrages de protection contre les aléas côtiers. Notice méthodologique. CETMEF.

Influence de la susceptibilité à l'érosion hydrique des bassins-versants sur l'évolution du rivage : exemples dans le sud de la Nouvelle-Calédonie

Pascal Dumas¹, Olivier Cohen¹

1. Géographes, CNEP Centre des Nouvelles Études sur le Pacifique (EA 4242), Université de la Nouvelle-Calédonie, 145, avenue James Cook BP R4 - 98851 Nouméa Cedex
pascal.dumas@univ-nc.nc ; olivier.cohen@univ-nc.nc

RESUME

Les paysages de la Nouvelle-Calédonie sont marqués par la montagne dont les sols sont naturellement sensibles à l'érosion. Plus en aval, les apports sédimentaires massifs ont entraîné des bouleversements du système littoral : engorgement des embouchures, hypersédimentation des fonds de baies et progradation des deltas, etc. Si certains secteurs de la Nouvelle-Calédonie subissent une érosion côtière, il semble à l'inverse que d'autres, situés à proximité de débouchés de cours d'eau, soient plus stables voire connaissent une avancée. Pour tenter de mieux comprendre l'influence des processus d'érosion sur l'évolution du rivage, nous proposons de mettre en relation une modélisation de la susceptibilité à l'érosion du sol avec une étude diachronique d'images satellites de sites en aval de bassins-versants.

ABSTRACT

New-Caledonia landscapes are characterized by mountain steep slopes and very soils sensitive to erosion. Downwards, massive sediment inputs impacted severely the coastal system: river bed obstruction, shoreface oversedimentation and deltas progradation are observed. If some coastal stretches suffer from coastal erosion, some others, close from river mouths, seem to be stable or in accretion. In this paper, we present a method to quantify the impact of watershed soil erosion on shoreline evolution and we discuss our preliminary results.

MOTS-CLES : Nouvelle-Calédonie, érosion des sols, bassin-versant, évolution du rivage, SIG

KEYWORDS : New-Caledonia ,soil erosion, watershed, shore evolution, GIS

1. Introduction : contexte d'étude, enjeux et objectifs

La Nouvelle-Calédonie est située au Sud de la Mélanésie, à environ 1 200 km à l'Est de l'Australie. D'une superficie totale de 18 575 km², cet archipel est constitué de la Grande-Terre, des quatre îles Loyauté (Lifou, Maré, Ouvéa, Tiga), de l'archipel des Belep, de l'Île des Pins et de quelques îlots lointains (fig. 1). La Grande-Terre est une bande d'environ 450 km de long sur 40 à 70 km de large, traversée du Nord au Sud par une chaîne montagneuse qui culmine à 1 628 m. Cette île étroite et montagneuse est encerclée par des formations coralliennes de type barrière, longues de 1 600 km délimitant un lagon de 24 000 km².

L'archipel jouit d'un climat tropical océanique marqué par une saison chaude et humide, de mi-novembre à mi-avril, où se succèdent des dépressions évoluant parfois en cyclones tropicaux et une saison sèche de mi-septembre à mi-novembre caractérisée par de nombreux feux de brousse. Avec 250 000 habitants et une densité moyenne d'environ 14 hab./km², la Nouvelle-Calédonie reste très peu peuplée. L'importance d'un domaine montagnard, difficile à aménager, explique que la plus grande partie de la population vit près des côtes (Dumas, 2004). Au niveau économique, l'exploitation minière de nickel est la première activité exportatrice du territoire. Actuellement 7^{ème} producteur mondial de nickel, la Nouvelle-Calédonie possède environ un quart des ressources mondiales de ce minerai. Des débuts de l'exploitation du minerai (commencée vers 1874) à aujourd'hui, ce sont plus de 160 millions de tonnes de minerai qui ont été extraites, soit plus de 300 millions de mètres cube de stériles latéritiques qui ont été remaniés (Laganier, 1995).

Sur la Grande Terre, île principale de l'archipel, l'érosion des sols est un problème environnemental majeur. Elle résulte d'un contexte naturel favorable à son développement (climat tropical marqué par des épisodes pluvieux intenses, fortes pentes), mais elle est accélérée par les activités anthropiques. Les causes majeures d'érosion sont les mauvaises pratiques agricoles, la construction d'infrastructures de communication ou d'aménagements hydrauliques, l'urbanisation des pentes et surtout l'exploitation minière du nickel pratiquée à ciel ouvert sur de vastes surfaces (plus de 300 000 ha de cadastre minier soit 18% de la superficie du pays) ; elle entraîne la destruction de la végétation et le décapage des sols. Sur les surfaces ainsi dénudées, l'érosion est alors très active particulièrement au niveau des stériles non stabilisés qui sont entraînés dans le lagon *via* le réseau hydrographique.

L'érosion des zones basses côtières, quasi-généralisée à l'échelle du monde, n'épargne pas la Nouvelle-Calédonie (Garcin et Vendé-Leclerc, 2014). Elle menace des portions de plaines côtières très étroites, concentrant population et activités économiques. A l'inverse cependant, certains autres secteurs, au niveau de débouchés de cours d'eau, semblent y échapper : le rivage est stable, voire avance grâce à des apports sédimentaires importants en provenance des bassins-versants. Ces apports provoquent de multiples bouleversements dans tout le système littoral (Spir, 2010) :

- exhaussement du fond des lits des rivières, favorisant les inondations répétées dans les lits majeurs et dans les parties aval des cours d'eau ;
- appauvrissement des sols des plaines alluviales, périodiquement recouvertes lors des crues ;
- modifications des morphologies fluviales et littorales : envasement des lits de rivières, des mangroves, des embouchures, progradation des deltas ;
- turbidité et hypersédimentation dans les fonds de baies provoquant l'étouffement des coraux et des organismes sessiles ;

L'espace littoral de la Nouvelle-Calédonie relève aujourd'hui d'enjeux patrimoniaux et socio-économiques majeurs. L'archipel fait ainsi partie des 34 « points chauds » de biodiversité de la planète (Myers *et al.*, 2000) prioritaires en termes de conservation. En juillet 2008, une grande partie de ses lagons (environ 15 000 km²) a été inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO. Cette mesure est bien une reconnaissance de la valeur exceptionnelle de sa biodiversité marine et souligne aussi la nécessité de sa protection et sa valorisation durables. Enfin, en avril 2014, a été créé le parc naturel de la mer de Corail qui avec 1,3 millions km², constitue la plus importante aire marine protégée de France et compte désormais parmi les plus grandes du monde. Au-delà du patrimoine naturel, le littoral néo-calédonien constitue aussi le patrimoine économique du pays. Il est le support exclusif d'une partie des activités économiques très liées au milieu naturel, telles que l'aquaculture, la pêche, et le tourisme considérés comme des pôles d'activités porteurs susceptibles de représenter une alternative au « tout nickel » (environ 20 % du PIB) et de stimuler l'économie dans les années à venir. Mais cette utilisation de plus en plus intense et diversifiée fragilise ce milieu d'une grande richesse. Ainsi, si la Nouvelle-Calédonie veut pratiquer une gestion durable des ressources littorales, tout en assurant une mise en valeur économique des mers et des côtes, la lutte contre l'érosion hydrique des sols doit être un enjeu prioritaire. Notre réflexion s'inscrit par conséquent dans une démarche de Gestion Intégrée de la Zone Côtière (GIZC).

Les références bibliographiques sur des études mettant en relation érosion du sol due à l'activité minière et évolution du rivage sont rares (Bird *et al.*, 1984 ; Garcin *et al.*, 2013). Dans cet article, nous présentons nos méthodes et leurs limites, et discutons quelques résultats préliminaires. Il s'agit ici d'une première approche qui vise à : 1) identifier et hiérarchiser les secteurs les plus producteurs de sédiments terrigènes en amont, 2) détecter des impacts de l'hypersédimentation sur l'évolution du rivage en aval. Pour cela, nous proposons de mettre en relation :

- une modélisation de la susceptibilité à l'érosion du sol basée sur l'Équation Universelle Révisée de Pertes en Sol (Wischmeier et Smith, 1978) et adaptée au contexte néo-calédonien. Elle permet de quantifier et de cartographier les processus d'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant ;
- une étude diachronique d'images satellites à haute résolution spatiale de sites en aval des bassins-versants étudiés, menée avec des méthodes classiques de photo-interprétation et digitalisation. Cette analyse permet de délimiter et suivre les mouvements des lignes de rivage. Elle aide également à mesurer l'évolution de la position et des surfaces de mangroves ; ces dernières se développant sur des bancs terrigènes, le plus souvent à l'embouchure des cours d'eau ;

Nous avons sélectionné nos sites d'étude après le calcul de la carte d'érosion potentielle. Ils se localisent aux débouchés de cours d'eau drainant de bassins-versants peu à très productifs en matériaux.

2. Méthodologie

2.1. La modélisation de la sensibilité du sol à l'érosion en nappe

De nombreuses approches consacrées à la spatialisation et la quantification des pertes en sols ont été développées au sein de modèles couplant les processus hydrologiques et érosifs aboutissant à de réels progrès dans la modélisation de l'érosion hydrique des sols (Jetten *et al.*, 1999). Toutefois ces modélisations sont souvent appliquées à des zones géographiques restreintes (à l'échelle de la

parcelle, du versant ou d'un petit bassin versant) et nécessitent pour leur calibration de nombreuses mesures expérimentales de terrains. On peut citer par exemple les modèles SWAT - Soil and Water Assessment Tool - (Arnold *et al.*, 1995), et SWIM - Soil and Water Integrated Model- (Krysanova *et al.*, 1996). Dans le cadre de notre approche nous avons privilégié la mise en œuvre de l'Equation Universelle de Perte en sols – USLE - qui permet d'apporter une estimation des particules de sol susceptibles d'être arrachées et de spatialiser les zones les plus sensibles à l'érosion en nappe. Ce modèle empirique a été développé sur la base d'un important échantillonnage de milliers de mesures d'essais d'érosion en parcelles et sur des petits bassins versants de la Grande Plaine américaine. Bien que conçue aux États-Unis, USLE constitue l'un des modèles les plus mis en pratique et adapté à des contextes climatiques, pédologiques et topographiques spécifiques en milieu tempéré comme tropical (Renard *et al.*, 1997 ; Dumas *et al.*, 2010 ; Payet *et al.*, 2011).

Même si le modèle USLE et ses dérivées RUSLE (Revised Universal Sol Loss Equation) ne prennent pas en charge les processus de transport/dépôt par le réseau hydrographique, leur robustesse et leur reproductibilité à différents niveaux d'échelles et à différents milieux (Jabbar et Chen, 2005) permettent de mettre en lumière les zones du bassin versant les plus sensibles à l'érosion hydrique et de donner un ordre de grandeur des apports terrigènes. Ces premières estimations apportent une connaissance de la dégradation des bassins versants pour les territoires peu renseignés, afin de pouvoir définir une meilleure gestion des littoraux.

La méthodologie repose sur le croisement de cinq couches d'information. Les paramètres qui entrent en jeu sont : l'agressivité des précipitations (R), l'érodibilité des sols (K), l'inclinaison et la longueur de la pente (LS), la couverture végétale (C) et les pratiques de conservations des sols (P). L'équation s'écrit : $A=R.K.LS.C.P.$, dans laquelle A la perte en sol potentielle est exprimée en tonne/hectare/an. La mise en œuvre de cette équation s'est faite à l'aide d'un Système d'Information Géographique (ArcGIS) pour la visualisation, l'analyse, l'élaboration et le croisement des différentes sources de données.

Le facteur d'érosivité des précipitations sur le sol (R) repose sur les données pluviométriques du modèle World Climate (<http://www.worldclim.org>). La modélisation consiste en l'interpolation de données climatiques mensuelles moyennes de stations météorologiques, sur une période de plus de 50 ans (1950-2000) en fonction des données existantes. La résolution de ces données varie de 10 arc-minutes à 30 arc-secondes, soit 1km (données exploitées dans le cadre de cette étude). Le calcul de R se base sur l'équation d'Arnoldus (1980) : $R= \sum (P_i)^2 / P$ où P_i correspond aux précipitations mensuelles et P à la moyenne des précipitations annuelles.

L'érodibilité des sols (K), qui traduit la susceptibilité des sols à être désagrégés et emportés a été déterminée à partir de la cartographie de Podwojewski et Beaudou (1987) recensant une vingtaine d'unités pédologiques sur la Grande Terre. A partir de ces données les pourcentages d'argile, de limon, de sable et de matière organique de chaque grand type de sols ont été renseignés. Ces valeurs ont permis par la suite le calcul du facteur K à l'aide du triangle de texture de l'USDA (Brown, 2003) et du tableau de correspondance de Stone et Hilborn (2000) permettant ainsi de déduire à partir de la texture les valeurs d'érodibilité des sols.

Le facteur topographique (LS) se décline en deux variables : l'inclinaison (S) et la longueur (L) de la pente. L'action de l'inclinaison de la pente sur le ruissellement est amplifiée par la longueur de la pente. Le calcul et la spatialisation des facteurs L et S reposent sur l'utilisation d'un MNT qui a été élaboré à partir de la BD TOPO-NC au 1/10 000. La relation permettant d'obtenir ce facteur LS est la

suivante (Wischmeier et Smith, 1978): $LS = (\lambda/22,1)^m \times (65,41\sin^2\theta + 4,56\sin\theta + 0,065)$ où λ représente la longueur de pente en mètre, θ l'inclinaison de la pente en % et m la longueur d'inclinaison variant de 0,2 à 0,5. La mise en œuvre de ce facteur s'est faite à partir d'un algorithme AML (Arc Macro Language) exécutable sur ArcInfo développé par Van Remortel *et al.* (2004) sur la base de l'équation précédente.

Le facteur de la couverture des sols (C), qui assure une protection du sol contre l'effet de la pluie, s'appuie sur une typologie d'une vingtaine de types d'occupation du sol réalisés sur l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie à partir de la classification supervisée d'images satellites SPOT 5 réalisées en 2008 par la Direction des Technologies et Services de l'Information. En l'absence d'information de terrain (pourcentage de sols recouvert par la canopée, hauteur des formations végétales...) la détermination des indices C s'est appuyée sur une compilation de recherches bibliographiques sur les caractéristiques de formations végétales similaires renseignant cet indice compris entre 0 (formations denses de type forêt, limitant fortement le processus érosif) et 1 (zones nues représentant la plus grande sensibilité à l'érosion). Faute de renseignements sur les pratiques de conservation du sol, la valeur 1 a été attribuée au facteur P sur l'ensemble de la zone d'étude. Les pratiques anti-érosives sont ainsi considérées comme nulles n'affectant pas le produit final de pertes en sol.

2.2. L'évolution du rivage au débouché des bassins-versants étudiés

Nous avons travaillé sur des images satellites à très haute résolution spatiale. Le premier intérêt d'utiliser ce support est la plus haute fréquence des prises de vue que celle des photographies aériennes classiques. Ainsi, sur les 10 ou 11 années étudiées, nous aurions dû nous contenter de deux campagnes de photographies aériennes alors que, suivant les sites, nous disposons de 3 à 5 images satellites. Si elles n'ont pas été prises à intervalles réguliers, elles permettent cependant de lire les paysages dans différentes conditions (ex. : marée haute ou basse) et faire parfois apparaître des mouvements de détails invisibles sur les photos aériennes plus rares (cf. résultats). Le deuxième intérêt est d'accéder à des images jusqu'en 2012 et 2013 alors que les photographies aériennes les plus récentes dataient de 2007. Les premières scènes THR dont nous disposons datent de 2002 et 2003 (images Quickbird à 0,66 m de résolution spatiale), les dernières de 2012 et 2013 (GeoEye à 0,42 m). Avec ce type d'images, la marge d'erreur de mesure est essentiellement liée à la précision de l'opérateur (Jeanson *et al.*, 2014) lors de la digitalisation. Nous nous sommes fixés une marge de plus ou moins 3 pixels donc en moyenne 1,5 m. Afin d'étudier l'évolution du rivage en aval des bassins-versants, nous avons retenu deux indicateurs :

- L'évolution du trait de côte est mesurée le long de transects régulièrement espacés (fig. 2a). En l'absence de rupture de pente marquée, comme on en trouve sur les zones en érosion (talus ou microfalaises), digitaliser le trait de côte n'est pas chose facile. Nous avons donc choisi de prendre en compte la limite de la végétation de haut de plage toujours facilement décelable : on peut considérer qu'elle marque la limite des plus hautes hautes laisses de mer. Cette végétation est constituée de plantes rases (liseron, pelouse), parfois d'arbres (philaos, cocotiers, banians) qui peuvent masquer la partie supérieure de la plage.
- La surface des mangroves est un bon indicateur de l'accumulation de sédiments en milieu côtier (Alonghi, 2009 ; Gardel *et al.*, 2011) : elles colonisent rapidement des bancs terrigènes dans les embouchures, sur les estrans et dans les petits fonds. Elles contribuent également à la sédimentation. Comme cela a pu être fait par d'autres auteurs, nous avons digitalisé le périmètre et calculé la

surface des parcelles continues de mangrove avec une façade maritime et en évitant les arbres isolés. Nous n'avons pas pris en compte celles uniquement à l'intérieur des embouchures.

3. Résultats et discussion

Le modèle RUSLE apporte une estimation moyenne potentielle des pertes de sols, fournie pour chaque maille de 50 m (fig. 1). Sur les bassins versants étudiés, la valeur moyenne évaluée de matériaux pouvant être potentiellement arrachés varie de 10,6 à 114 t/ha/an ce qui est considéré dans ce dernier cas comme élevé (FAO : [http:// www.fao.org/docrep/t1765f/t1765f03.htm](http://www.fao.org/docrep/t1765f/t1765f03.htm)). Sur la plaine littorale l'érosion est faible (<10 t/ha/an) alors que les valeurs extrêmes (>150) se localisent principalement sur la chaîne montagneuse où se combinent des reliefs escarpés, des terrains dénudés notamment d'origine minière, des sols fragiles ainsi que des précipitations agressives.

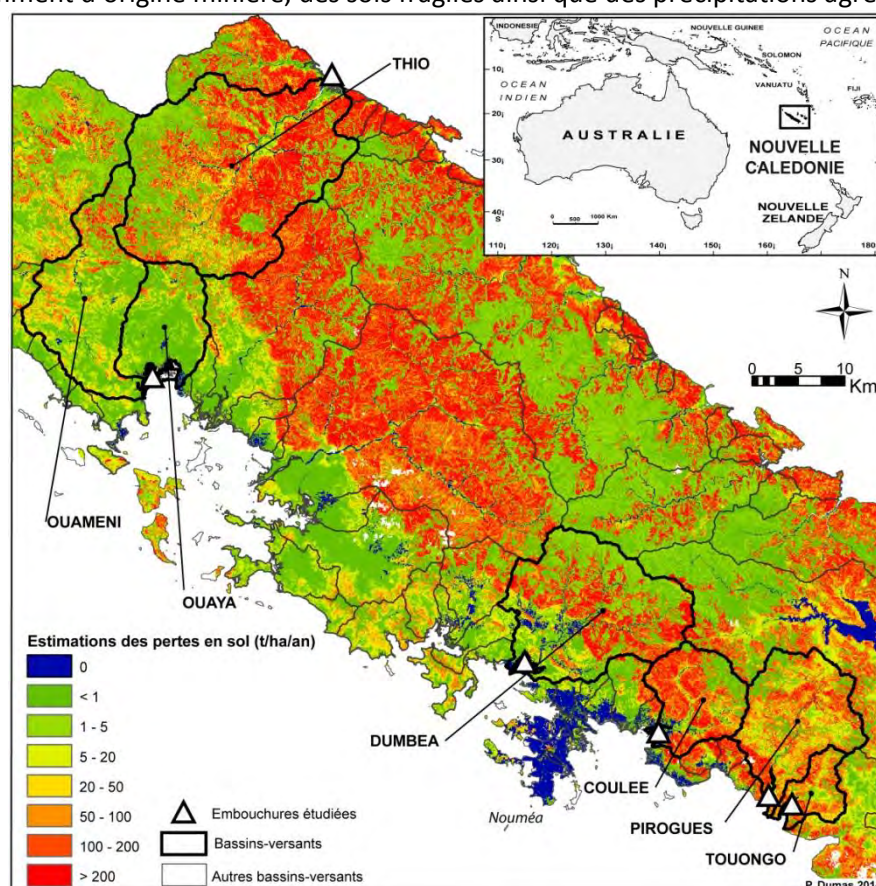


Figure 1 : cartographie des pertes en sol dans le sud de la Nouvelle-Calédonie

Il convient de rappeler que le modèle ne tient pas compte des processus de transport/sédimentation des matériaux terrigènes, majoritairement dépendant de la compétence des cours d'eau. Les estimations annoncées ne donnent ainsi en aucun cas une prédiction des apports sédimentaires vers la côte, mais renseignent sur la quantité de matériaux potentiellement fournis par le bassin versant et révèlent donc son altération actuelle. De plus, des réserves doivent être émises sur l'utilisation du modèle USLE hors de son contexte d'expérimentation initiale,

notamment au vu de l'échelle d'analyse, du choix des équations ou encore de la qualité des données utilisées. Enfin, ce modèle ne s'appliquant qu'à l'érosion en nappe, ne prend pas en compte l'érosion linéaire, de ravine ou encore de solifluxion qui peuvent être des formes courantes en Nouvelle-Calédonie. Ces résultats, devant encore être validés par des mesures terrains, doivent dans ce sens être considérés comme des ordres de grandeur permettant notamment d'établir une hiérarchisation des zones d'émission.

Site étudié	Période d'étude	Surface du bassin-versant en km ²	Surface de mine et décharge minière en km ²	Perte de sols en t.10 ³ /an	Longueur de linéaire côtier étudié en km	Evolution du trait de côte en m	Taux d'évolution en m/an	Evolution de la mangrove en ha	Evolution de la mangrove en ha/an
La Coulée	2003-2013	93	4,05	1057,7	3,94	-	-	6,85	0,68
La Dumbéa	2004-2013	231	1,20	1776,7	6,31	-	-	5,89	0,65
Ouaya/Ouaméni	2002-2013	277	0,00	521,9	5,3	-	-	18,42	1,67
La Thio	2002-2013	396	12,15	4297,1	4,71	2,43/3,88	0,22/0,38	-	-
Rivière des Pirogues	2003-2013	144	3,61	1101,5	1,14	-1,6/0,07	0,16/0,007	-	-
Touongo	2003-2013	38	1,30	315,4	0,91	0,78	0,08	-	-

Tableau 1 : principaux paramètres calculés

Au vu de ces résultats chiffrés (tab. 1), il semble qu'il existe une relation entre évolution du trait de côte (m/an) et érosion des bassins-versants (t.10³/an) avec un coefficient de corrélation de 0,97, mais calculé sur trois sites seulement. Les valeurs d'évolution pour un site sont des moyennes qui peuvent cacher des disparités. Par exemple, à Thio où nous avons procédé à des mesures tous les 500 m le long de la plage, si l'évolution globale est de 2,44 m, les valeurs s'échelonnent de 11 m pour un secteur à proximité d'une digue bloquant le transit sédimentaire à -11,5 m au niveau d'un cordon sableux, rompu lors d'une crue. Ce secteur se trouve aujourd'hui au bord d'une nouvelle embouchure (fig. 2a). Si on ne prend pas en compte cette mesure, l'évolution moyenne passe à 3,88 m. Même chose à l'embouchure de la rivière des Pirogues qui semble globalement en érosion (-1,6 m en 10 ans) ; mais en ne retenant pas le transect le plus en recul au niveau d'un cordon barrant un bras mort du fleuve, ayant cédé, on obtient une évolution moyenne de 0,07 m. Dans cette analyse du trait de côte, le choix de la position des points de mesure pris en compte est donc essentiel, surtout dans des zones d'embouchure très mobiles.

La corrélation entre érosion des bassins-versants (t.10³/an) et l'évolution des mangroves (ha/an) est, quant à elle, négative (r = -0,83). Cela semble contredire notre hypothèse de départ, mais doit également être interprété avec prudence : le calcul n'est fait que sur 3 stations et sur un période courte de 10 ans en moyenne. De plus, une augmentation de la superficie ne coïncide pas toujours avec une avancée du rivage ; sur le même site d'étude, nous nous sommes aperçus d'une progression sur les tannes d'arrière-mangrove (fig. 2b). Celle-ci s'accompagne également d'une densification de certaines zones dont ne peut rendre compte une étude des superficies. Sur le site de la Coulée, on observe à la fois une extension sur les tannes et une progression de la ligne de rivage.

L'interprétation des résultats chiffrés doit être complétée par une analyse qualitative du paysage littoral. Celle-ci permet de détecter des traces d'atterrissement sur l'estran et les petits fonds que nos deux indicateurs ne permettent pas d'identifier. Par exemple, à la rivière des Pirogues, nous avons pu identifier sur les images intermédiaires entre le début et la fin de la période d'étude, le développement de flèches sableuses de part et d'autre de l'embouchure et l'apparition d'un banc, parallèle au rivage, à environ 500 m du large (fig. 2c). Nous avons observé une évolution similaire, mais avec une moindre ampleur au débouché de la Touongo (fig. 2d).

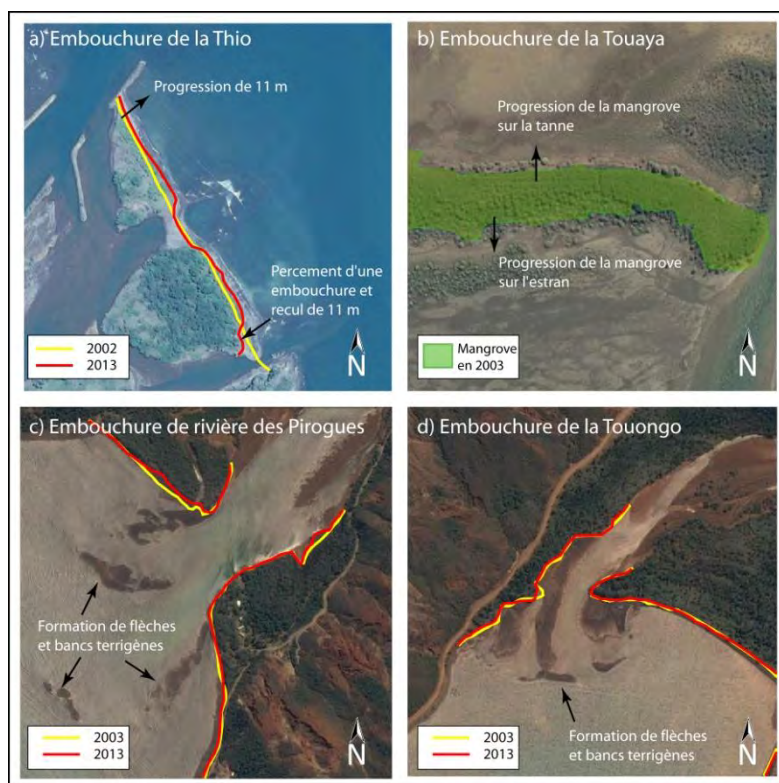


Figure 2 : exemples d'évolutions au niveau de quatre embouchures (source des images : GeoEye)

4. Conclusion et perspectives

Ce travail conduit à une meilleure compréhension de la distribution spatiale des dynamiques d'érosion en nappe sur les bassins versants et permet au-delà des valeurs exprimées une comparaison relative entre les secteurs de la zone d'étude. Dans ce sens, cette cartographie et hiérarchisation des zones les plus polluantes en termes de production de sédiments terrigènes peuvent servir d'outil d'aide à la décision en matière de gestion et d'aménagement des bassins versants et de préservation des régions côtières.

Les premiers résultats de corrélation entre l'érosion des bassins-versants et l'indicateur trait de côte sont encourageants ; ceux concernant l'érosion et la progression de la mangrove doivent être pris avec prudence. Il n'est pas possible pour l'instant de valider les relations statistiques présentées : dans la phase suivante, il nous faudra travailler sur un plus grand nombre de sites et une période plus longue (quelques décennies).

L'évolution d'un rivage ne dépend pas que des apports sédimentaires terrigènes. Dans un système littoral, d'autres éléments sont à prendre en compte : par exemple la bathymétrie (comblement plus rapide dans les baies de faible profondeur) et l'hydrodynamique marine (dans les zones de faible énergie, l'accumulation devrait se faire plus rapidement). A un stade ultérieur, nous espérons pouvoir aborder ces aspects pour aboutir au final à une typologie des secteurs côtiers distinguant ceux sous l'influence de l'hydrodynamique marine et ceux sous l'influence des bassins-versants.

Bibliographie

- Alongi D. (2009). *The energetics of mangroves*. Springer, Londres, 216 p.
- Arnold J.G., Williams J.R., Srinivasan R., King K.W., Giggs R.H. (1995). *SWAT Soil and Water assessment Tool : draft user manual*, US department of Agriculture, Agriculture Service, Temple, TX.
- Arnoldus, H.M.J. (1980). An approximation of the rainfall factor in the USLE, *Assessment of Erosion*, Wiley, Chichester, England, p. 127-132.
- Bird E.C.F., Dubois J.P., Itis J.A. (1984). *The impacts of opencast mining on the Rivers and Coasts of New Caledonia*. The United Nations University, Tokyo, 64 p.
- Brown, R.B. (2003). *Soil Texture*, Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Fact Sheet SL29, 8 p.
- Dumas P. (2004). *Caractérisation des littoraux insulaires : approche géographique par télédétection et SIG pour une gestion intégrée en Nouvelle-Calédonie*. Thèse de géographie, Orléans, 402 p.
- Dumas P., Printemps J., Mangeas M., Luneau, G. (2010). Developing Erosion Models for Integrated Coastal Zone Management. A Case Study of New Caledonia West Coast. *Marine Pollution Bulletin*, n°161, p. 519-529.
- Garcin M., Vendé-Leclerc M. (2014). *Observatoire du littoral de Nouvelle-Calédonie – Rapport préliminaire : observations, état des lieux et constats*. Rapport BRGM/RP-63235-FR, 125 p.
- Garcin M., Baills A., Le Cozannet G., Bulteau T., Auboin A-L., Sauter J. (2013). Pluri-decadal impact of mining activities on coastline mobility of estuaries of New Caledonia (South Pacific) *Journal of Coastal Research*, SI 65, p. 494-499, http://ics2013.org/papers/Paper3643_rev.pdf
- Gardel A., Gensac E., Anthony E.J., Lesourd S., Loisel H., Marin D. (2011). Wave-formed mud bars: their morphodynamics and role in opportunistic mangrove colonization. *Journal of Coastal Research*, SI 64, p. 384-387. http://www.ics2011.pl/artic/SP64_384-387_A.%20Gardel.pdf
- Jabbar M.T., Chen X. (2005) Soil degradation risk prediction integrating RUSLE with geoinformation techniques, the case of northern Shaanxi province in China. *American journal of applied sciences*, vol. 2, n° 2, p. 550-556.
- Jeanson, M., Anthony, E.J., Dolique, F., Cremades, C. (2014). Mangrove evolution in Mayotte Island, Indian Ocean: a 60-year synopsis based on aerial photographs. *Wetlands*, 34, p.459-468.
- Jetten V., De Roo A., Favis-Mortlock D. (1999) Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models. *CATENA* 37 (3–4), p. 521-541. DOI:10.1016/s0341-8162(99)00037-5
- Krysanova, V., Mueller-Wohlfeil, D.-I., Becker, A. (1996). *Integrated Modelling of Hydrology and Water Quality in mesoscale watersheds*. PIK, Report n°18, 32p.
- Laganier R. (1995). *Contribution à l'étude des processus d'érosion et des risques naturels dans les îles du Sud-Ouest du Pacifique*, Thèse Univ. de Lille, Atelier national de Reproduction des Thèses, Lille.
- Myers N., Russell A., Mittermeier C., Mittermeier G., Da Fonseca A.B., Kent J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, p. 853-858.
- Payet E., Dumas P., Pennober G. (2012). Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du SO de Madagascar, le Fiherenana. *VertigO*, Vol 11, n°3 <http://vertigo.revues.org/12591>

- Podwojewski P., Beaudou A. (1987). *Carte morpho-pédologique de la NC au 1/200000*. ORSTOM, 15p.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703, vol 703.
- Spir I. (2010). *Etude de l'engravement de la rivière Kwé, de son estuaire et de la baie – Prolongation du suivi des pièges à sédiments*. Rapport technique, EMR, Vale NC, 77 p + annexes.
- Stone, R.P., Hillborn D. (2000). *Universal Soil Loss Equation*, Ontario, Canada, [En ligne] URL: <http://www.giser.be/wp-content/uploads/2012/05/USLE-infosCanada.pdf>
- Van Remortel, R.D., Maichle, R.W., Hickey, R.J. (2004). Computing the LS-Factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using C++ executable. *Computers & Geosciences* Volume 30, Issues 9-10, p. 1043-1053.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. US department of agriculture, agricultural handbook n°537, Washington DC., 58 p.

Exposition des infrastructures à l'érosion côtière

Développement d'un outil de planification de l'aménagement côtier, Québec, Canada

Christian Fraser¹, Pascal Bernatchez¹, Steeve Dugas¹

1. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Centre d'études nordiques, Université du Québec à Rimouski

300 allée des Ursulines, G5L 3A1, Rimouski, Québec, Canada

Christian.Fraser@uqar.ca ; Pascal.Bernatchez@uqar.ca ; Steeve.Dugas@uqar.ca

RÉSUMÉ

Cette analyse de l'exposition des infrastructures à l'érosion côtière répond à un besoin concret exprimé par les responsables de l'aménagement du territoire et constitue la première étape d'une étude sur la vulnérabilité des communautés côtières face à l'érosion côtière. L'exposition des infrastructures (bâtiments, routes, chemin de fer, réseaux d'aqueduc et d'égout, sentiers pédestres et pistes cyclables) a été calculée selon 7 périodes entre 2007 et 2100. Le calcul de l'exposition se base sur deux paramètres : 1) le taux probable de déplacement de la ligne de rivage mesurée pour chaque unité homogène et 2) sur l'érosion événementielle maximale mesurée pour chaque type de côte. La démarche permet non seulement d'obtenir un portrait actuel et futur de l'exposition des infrastructures à l'érosion, mais procure surtout un outil de planification de l'aménagement et des interventions en bordure du littoral. L'outil est directement utilisable dans un système d'information géographique (SIG) et un recueil cartographique a aussi été produit afin d'assurer l'accessibilité des données pour tous les intervenants locaux et régionaux.

ABSTRACT

This analysis of infrastructures' exposure to coastal erosion addresses an important concern expressed by land managers. It represents the first step of a study on the vulnerability of coastal communities to coastal erosion. The infrastructures' exposure (buildings, roads, railway, sewerage and waterworks system, walking and biking trails) has been calculated for 7 periods between 2007 and 2100. Exposure calculation is based on two parameters: 1) probable rate of coastline movement for each homogeneous coastal unit and 2) on the maximum coastline retreat during one event for each type of coastal system. This approach not only allows getting a current and future picture of infrastructures' exposure, but also provides a planning tool for coastal management. The tool is directly usable in a geographic information system (GIS) and a map collection was also produced to provide a better data accessibility for local and regional stakeholders.

MOTS-CLÉS : exposition des infrastructures, vulnérabilité, érosion côtière, outil de planification, aménagement côtier, Québec, Canada

KEYWORDS: infrastructure exposure, vulnerability, coastal erosion, planning tool, coastal management, Québec, Canada

1. Introduction

La problématique de l'érosion côtière n'est pas nouvelle au Québec. La mise en place d'ouvrages de protection a connu une forte croissance à partir du milieu du siècle dernier et ne cesse de

s'amplifier encore de nos jours (Bernatchez *et al.*, 2008). Les communautés côtières et les différents niveaux de gouvernement au Québec ont toujours été en réaction face à cet aléa et moins en prévention. Le manque de connaissances sur les aléas côtiers ainsi que le manque d'outils pour l'aménagement, la prévention et le choix de stratégies d'adaptation sont au premier plan des raisons évoquées par les communautés côtières et les gestionnaires du territoire (Bernatchez *et al.*, 2008 ; Drejza, 2011 ; Friesinger et Bernatchez, 2010 ; Fraser et Desmeules, 2006) .

Depuis le début des années 2000, plusieurs démarches ont été mises en place au Québec maritime afin de palier à ces manques. Plusieurs régions ont été étudiées afin d'évaluer l'évolution historique de la ligne de rivage et de projeter son évolution future. Ces données ont ensuite servi à proposer un zonage du risque, qui représente un outil réglementaire très demandé par les responsables de l'aménagement du territoire (Bernatchez *et al.*, 2012a ; 2012b; Fraser *et al.*, 2012; Bernatchez *et al.*, 2008; Dubois *et al.*, 2006). Certaines régions ont aussi fait l'objet d'une analyse coûts-avantages permettant de faire un choix éclairé sur les stratégies d'adaptation à préconiser (Tecsult, 2008 ; Leclerc et Dupuis, 2008). Cependant, ces outils ne permettent pas d'évaluer l'exposition actuelle et future des infrastructures côtières sur de grands territoires. En contrepartie, plusieurs études sur la vulnérabilité côtière dressent un portrait sur de grands territoires, mais les données sont souvent peu utilisables concrètement par les responsables de l'aménagement à l'échelle des communautés et par conséquent les résultats sont peu opérationnels (Boruff *et al.*, 2005 ; Yoo *et al.*, 2011 ; Thielier et Hammar-Klose, 2000 ; Vafeidis *et al.*, 2008 ; Hinkel, 2011). Une étude sur l'exposition des routes nationales à l'érosion et à la submersion côtière dans l'Est du Québec (Drejza *et al.*, 2014) représente la seule autre étude du genre au Québec. Dans le contexte où les communautés côtières et les gouvernements manquent d'outils pour faire face à cette problématique, il est primordial que la recherche sur la vulnérabilité côtière vienne concrètement en support à la gestion du territoire.

L'objectif principal de cette étude est ainsi d'améliorer la planification de l'aménagement du territoire en fonction de l'aléa érosion côtière et de faciliter le choix des solutions d'adaptation à court, moyen et long terme. L'originalité de l'outil repose d'abord sur une excellente collaboration avec les gouvernements locaux, régionaux et provinciaux. Ensuite, l'étude présente des données de haute résolution sur l'ensemble des infrastructures du territoire : bâtiments, routes provinciales et municipales, réseaux d'aqueduc et d'égout, chemin de fer, sentiers pédestres et pistes cyclables. Enfin, la base de données est structurée afin d'offrir un outil concret, facilement utilisable par les responsables de l'aménagement. Pour développer la méthode, deux MRC (Municipalités régionales de comté) de la baie des Chaleurs ont été choisies, représentant près de 200 km de côtes (figure 1). Les MRC sont des entités administratives qui regroupe plusieurs municipalités et qui possèdent des pouvoirs sur l'aménagement du territoire. Cette analyse de l'exposition des infrastructures à l'érosion côtière constitue la première étape d'une étude sur la vulnérabilité des communautés côtières dans son ensemble face à l'érosion côtière.

2. Méthodologie

2.1. Implication des responsables de l'aménagement du territoire

Des entrevues ciblées avec les responsables de l'aménagement ont été réalisées afin 1) de présenter le concept d'exposition et de vulnérabilité, 2) de récolter des informations sur leurs connaissances des phénomènes naturels et de leurs impacts ainsi que sur les enjeux, 3) de récolter de l'information sur les mesures d'adaptation, les mesures d'urgence ainsi que sur la gouvernance et

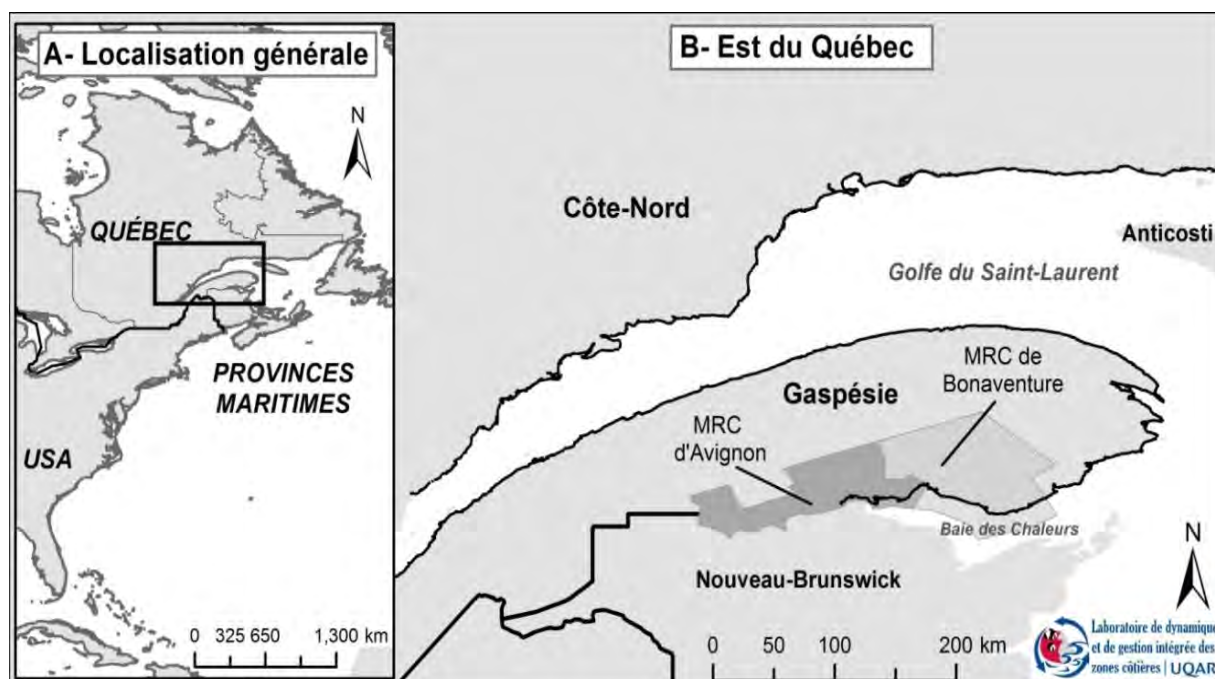


Figure 1. Localisation du territoire d'étude

4) de préciser leurs besoins au niveau des outils de planification. Dans un premier temps, ces rencontres ont surtout permis d'acquérir des informations sur leur territoire, de bien orienter la cueillette et l'analyse des données de la présente étude afin de s'assurer de répondre aux besoins exprimés par les intervenants. Les résultats des entrevues sur les solutions d'adaptations et la gouvernance seront utilisés ultérieurement plus en détails dans une étude sur la vulnérabilité.

2.2. Caractérisation et évolution côtière

L'étude de la vulnérabilité des infrastructures à l'érosion côtière repose dans un premier temps sur la dynamique côtière et sur la sensibilité des côtes à l'érosion. Une caractérisation détaillée de la côte actuelle a été réalisée ainsi que son évolution historique par photo interprétation. Ce travail est basé sur une méthode développée par les chercheurs de la Chaire de recherche en géoscience côtière de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) (Bernatchez *et al.*, 2010 ; 2012a ; 2012b ; Fraser *et al.*, 2012). Une base de données est ainsi générée permettant l'analyse des types de côte, de l'état des côtes, des processus actifs, des types de protection côtière et de l'état de ces protections (Drejza *et al.*, 2014).

Le calcul de l'évolution historique a été réalisé par photo-interprétation à l'aide du logiciel « Digital Shoreline Analysis System », version 3.1, développé par la Commission géologique des États-

Unis (USGS) (Thieler *et al.*, 2005). Ce logiciel a permis de générer de manière automatique des transects recoupant les lignes de rivage de 1934, 1963 et 2007 et ce à tous les 50 m. Une étape très importante consiste à valider les taux obtenus pour chaque transect de mesure. Certains transects ont été annulés lorsque jugés imprécis ou mal positionnés par rapport à la ligne de rivage. Certains secteurs de haute falaise ont aussi dû être invalidés dû à l'imprécision causée par l'effet de parallaxe. Enfin, quelques secteurs ont été invalidés dus à des erreurs de distorsion dans l'ortho rectification des images. Cette validation manuelle des taux permet de réduire l'erreur totale maximale à 0,06 m/an (Bernatchez *et al.*, 2010 ; 2012 ; Fraser *et al.*, 2012).

2.3. Scénarios d'évolution future de la côte

Les scénarios ont été calculés selon des zones homogènes le long du littoral. Ce sont des subdivisions des cellules hydrosédimentaires selon les types de côte et l'homogénéité de l'évolution côtière. Puisqu'une même cellule hydrosédimentaire peut inclure des zones de forte érosion, des zones de moindre recul ainsi que des zones d'avancée, et ce sur différents types de côte, il importe donc de définir avec précision des zones homogènes pour lesquelles le calcul sera effectué. Deux scénarios ont été calculés afin de projeter l'évolution du littoral. Par la suite, pour chaque zone homogène, le scénario le plus probable a été choisi en fonction de la compréhension de la dynamique côtière et des scénarios climatiques projetés (Bernatchez *et al.*, 2008 ; Bernatchez *et al.*, 2010).

Scénario 1 (S1) : moyenne de toutes les mesures effectuées dans la zone homogène, soit le taux de migration moyen pour une période donnée.

Scénario 2 (S2) : moyenne de tous les taux de recul (les taux de migration positifs ou nuls sont exclus) pour la période la plus intense. Le scénario 2 implique donc une accélération de l'érosion côtière par rapport à la moyenne historique.

Aucun scénario : si des actions anthropiques ont modifié la côte dans la zone (remblai, zone portuaire, secteur artificialisé sur toute la période d'analyse), aucune mesure ne peut être effectuée. S'il manque des photographies aériennes ou si la distorsion des photographies est trop importante, aucune mesure historique n'a pu être faite, aucun scénario n'est donc élaboré.

2.4. Recul événementiel mesuré et appréhendé

Au taux d'érosion probable, s'ajoute le recul maximum atteint lors d'un événement selon le type de côte. Ces valeurs de recul par type de côte sont basées sur les mesures des stations de suivi de l'érosion côtière du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtière (LDGIZC) de l'UQAR (Bernatchez *et al.*, 2010 ; 2012a ; 2012b ; Fraser *et al.*, 2012). Dans la baie des Chaleurs, ces valeurs vont de 3 m dans les falaises rocheuses à 17,2 m sur les flèches littorales. Dans le cas de certaines falaises rocheuses, une valeur d'encoche maximale a été ajoutée. Les encoches sont causées par les vagues à la base des falaises (encoches basales) ou encore causées par la météorisation ou des processus hydrogéologiques sur des couches plus friables de la paroi rocheuse (encoches sommitales ou de mi-falaise). Une encoche peut prendre plusieurs années voire plusieurs décennies à se former selon les processus et la lithologie, mais un effondrement se produit en un instant. Il est donc important d'ajouter cette valeur pour assurer une projection adéquate du trait de côte dans le futur (Bernatchez *et al.*, 2012a ; 2012b ; Fraser *et al.*, 2012).

2.5. Traitement des infrastructures ponctuelles

Les infrastructures ponctuelles comprennent tous les bâtiments sur le territoire. La base de données du rôle d'évaluation foncière du Québec pour 2010 a été utilisée pour répertorier les bâtiments et ainsi obtenir le type d'utilisation et la valeur foncière inscrite au rôle. À l'aide des images orthorectifiées de 2007, chaque point centroïde situé dans la zone d'exposition a été déplacé sur la façade côté mer des bâtiments et ce, à l'échelle du 1 : 500. Les images obliques, prises à vol d'hélicoptère en septembre 2010, ont aussi été utilisées afin d'obtenir plus de précision et de se situer spatialement avec la base de données. L'identification et l'utilisation des bâtiments ont été validées à l'aide des bases de données cadastrales fournies par chacune des MRC. Une validation sur le terrain a aussi été nécessaire pour certaines zones afin de bien associer le centroïde de la matrice foncière avec le bon bâtiment.

2.6. Traitement des infrastructures linéaires

Les infrastructures linéaires considérées dans cette étude comprennent les routes provinciales et municipales, les réseaux d'aqueduc et d'égout, le chemin de fer, les sentiers pédestres et les pistes cyclables. Les routes et le chemin de fer ont été extraits de la *Base de Données Topographiques du Québec* (BDTQ). À l'aide des images de 2007, les tracés ont été validés et édités afin de longer le côté mer de l'infrastructure. Les réseaux d'aqueduc et d'égout ainsi que les sentiers récréotouristiques ont été numérisés par les MRC ou par l'équipe de réalisation. Suite à la validation de tous les tracés auprès des aménagistes locaux, une segmentation a été effectuée afin d'obtenir des tronçons de 10 m. Cette segmentation a été effectuée automatiquement à l'aide d'une fonction du logiciel ArcGis.

La valeur de construction ou de remplacement d'une infrastructure linéaire n'est pas uniforme le long des tracés; chaque tronçon présente des caractéristiques et des contraintes variées qui influencent les coûts. De plus, dans le cas des routes, il existe plusieurs catégories allant du chemin secondaire non pavé à l'autoroute. Il a été convenu pour les fins de l'étude de créer deux classes : routes provinciales et routes municipales. L'objectif ici est de donner un ordre de grandeur pour apprécier l'importance économique de chaque type d'infrastructure. Afin d'obtenir une valeur plausible, des personnes ressources compétentes des ministères provinciaux et d'entreprises privées spécialisées ont été interpellées.

2.7. Calcul de l'exposition

Pour chaque point représentant un bâtiment et pour chaque ligne représentant un tronçon de 10 m d'une infrastructure linéaire, la distance la plus proche à la ligne de rivage a été calculée automatiquement à l'aide d'une fonction du logiciel ArcGis. Une validation manuelle a été réalisée. L'exposition a ensuite été calculée selon 7 classes entre 2007 et 2100. Les classes 2007-2015 et 2015-2020 représentent l'exposition à court terme. Les 3 classes 2020-2030, 2030-2040 et 2040-2050 permettent d'évaluer l'exposition à moyen terme et enfin, les classes 2050-2060 et 2060-2100 représentent un horizon à long terme.

3. Application de la méthode : exemple de la MRC de Bonaventure

Pour la MRC de Bonaventure (figure 1), 76 cartes et 28 fiches explicatives ont été produites. Sur une longueur totale de côte de 105 km, l'analyse indique que 15,8 km d'infrastructures linéaires et 72 bâtiments sont exposés à court terme (d'ici 2020), représentant une valeur de 19 millions de dollars (tableau 1). A long terme (d'ici 2100), c'est 33,3 km d'infrastructures linéaires et 310 bâtiments qui seront exposés pour une valeur de 47,4 millions de dollars.

Tableau 1. Portrait général des infrastructures exposées pour la MRC de Bonaventure

Type d'infrastructure	2020 - Court terme			2050 - Moyen terme			2100 - Long terme		
	Longueur (km)	Nombre	Valeur (millions \$)	Longueur (km)	Nombre	Valeur (millions \$)	Longueur (km)	Nombre	Valeur (millions \$)
Bâtiments	na	72	3,8	na	161	8,6	na	310	18,8
Routes	8,3	na	9,4	12,4	na	14,0	15,9	na	17,8
Aqueduc et égouts	5,6	na	5,3	6,9	na	6,6	7,9	na	7,4
Chemin de fer	0,8	na	0,5	2,8	na	1,7	5,5	na	3,4
Sentiers récréotouristiques	1,0	na	0,01	2,5	na	0,01	4,0	na	0,02
TOTAL	15,8	72	19,0	24,6	161	31,0	33,3	310	47,4

* Les chiffres sont cumulatifs dans le temps

Les cartes permettent la localisation des infrastructures exposées ainsi que le type et l'état des protections côtières. L'exposition des infrastructures est exprimée avec un code de couleur (figure 2).

Les secteurs où sont concentrées les infrastructures font l'objet d'une fiche descriptive qui permet de préciser la dynamique côtière et les particularités locales (figure 2). Ce complément d'information spécifique à chaque secteur procure les connaissances de base pour déterminer le type d'aménagement à considérer.



Figure 2. Exemple de carte d'exposition des infrastructures à l'érosion côtière et de fiche technique dans la MRC de Bonaventure

L'enquête auprès des responsables locaux et régionaux de l'aménagement révèle que le phénomène de l'érosion côtière est très préoccupant. En effet, 91 % des répondants des deux MRC à l'étude observent le phénomène sur leur territoire et 85 % de ceux-ci ont noté une augmentation de l'importance de l'érosion dans le temps. Les répondants indiquent que l'outil développé dans cette étude servira d'abord pour la planification du développement (73 %), ensuite pour informer et sensibiliser les citoyens (45 %) et en troisième lieu pour l'aide à l'élaboration et à l'application de la réglementation (41 %).

4. Conclusion

On reproche souvent à la recherche scientifique de ne pas répondre aux besoins exprimés par les gestionnaires locaux et la population. Cette étude est un exemple de recherche appliquée à la gestion du territoire qui se traduit non seulement par des résultats scientifiques, mais aussi par le développement en amont d'un outil qui peut être directement utilisé par les responsables de l'aménagement du territoire. L'outil permet de cibler toutes les infrastructures exposées à l'érosion côtière d'ici 2100. Les secteurs prioritaires à court terme sont ainsi vite identifiés et les zones problématiques à moyen et long termes sont mises en lumière afin de pouvoir agir en prévention. Il devient donc plus facile d'élaborer des plans d'aménagements et de cibler des solutions d'adaptation avant que la problématique soit trop grande.

L'analyse des résultats d'entrevues réalisées auprès d'une diversité d'acteurs à différentes échelles spatiales (de la collectivité locale au gouvernement central) permet de dresser un portrait du territoire et des interrelations qui existent entre les organisations. Elle permet aussi d'identifier les contraintes et les écueils potentiels pour la gestion et la prévention des risques côtiers. Il s'agit alors d'une étape essentielle dans l'analyse de la vulnérabilité. Ainsi, l'analyse de l'ensemble des usages, de la vocation des infrastructures et du territoire, de la perception du risque, des conditions socio-économiques et des types de gouvernance permettront d'établir des priorités d'action en fonction de l'importance des enjeux accordée par les intervenants locaux et régionaux (et non par les scientifiques). La collaboration établie avec le milieu permettra de développer ensemble une démarche originale et appliquée pour évaluer la vulnérabilité des communautés aux aléas côtiers.

Remerciements:

L'équipe de recherche tient à remercier le gouvernement du Québec pour son soutien financier ainsi que pour l'utilisation des données du rôle d'évaluation municipale. Merci aux municipalités régionales de comté (MRC) pour l'utilisation des données cadastrales. Merci aux responsables de l'aménagement de chaque municipalité (directeur(trice) général(e), directeur(trice) des travaux publics, inspecteur(trice) municipal(e)) pour leur participation aux entrevues et pour avoir fourni plusieurs documents et informations pertinentes pour l'étude.

Références

- Bernatchez, P., Bouchard, J-D., Dugas, S., Drejza, S., Fraser, C., Morneau, F., Nicorici, C., Jolivet, Y. (2010). *Principes et fondements méthodologiques appuyant l'évaluation des marges de recul d'érosion en zone côtière*. Document de travail remis au ministère de la Sécurité Publique du Québec, avril 2010, 42 p.
- Bernatchez, P., Drejza, S., Dugas, S. (2012a). *Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des îles de la Madeleine*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones

- côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, juillet 2012, 71 p. et annexes.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Dugas, S., Drejza, S. (2012b). *Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC d'Avignon*. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, août 2012, 49 p. et annexes.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S., Morissette, A. (2008). *Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 256 pages.
- Boruff, B.J., Emrich, C., Cutter, S.L. (2005). Erosion hazard vulnerability of US coastal counties. *Journal of Coastal Research*, 21(5), 932–942.
- Drejza, S., Friesinger, S., Bernatchez, P. (2014). *Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec*, Volume I, Projet X008.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère des Transports du Québec, mars 2014, 187 p. + annexes.
- Drejza, S., Bernatchez, P., Clermont, D. (2011). Effectiveness of land management measures to reduce coastal georisks, eastern Québec, Canada. *Ocean and Coastal Management*, 54 ; 290-301.
- Dubois, J.-M.M., Bernatchez, P., Bouchard, J.-D., Daigneault, B., Cayer, D., Dugas, S. (2006). *Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du Saint-Laurent pour la période 1996-2003*. Conférence régionale des élus de la Côte-Nord, 291 p. + annexes.
- Fraser, C., Bernatchez, P., Dugas, S., Drejza, S. (2012). *Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC de Bonaventure*. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, août 2012, 50 p. et annexes.
- Fraser, C., Desmeules, P. (2006). *Plan de gestion intégrée de la zone côtière de Carleton et de Saint-Omer, Québec, Canada ; Outil pour le développement durable du territoire*. Comité côtier Carleton - Saint-Omer, Conseil régional de l'environnement Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine, 88 pages.
- Friesinger, S., Bernatchez, P. (2010). Perceptions of Gulf of St-Lawrence coastal communities confronting environmental change: hazards and adaptation, Québec, Canada. *Ocean and Coastal Management*, 53; 669-678.
- Hinkel, J. (2011). Indicators of vulnerability and adaptive capacity: towards a clarification of the science-policy interface. *Global environmental change* 21:198–208.

- Leclerc, M., Dupuis, P. (2008). *Recherche d'une solution économique et durable à la problématique d'érosion littorale à Pointe-aux-Outardes*. Pour le compte de la Ville de Pointe-aux-Outardes et du Ministère de la Sécurité publique, en collaboration avec OURANOS et divers partenaires. Rapport de recherche INRS-ETE R990 et Aquapraxis Inc. 10136-100. 220 pages + 9 annexes.
- Tecsult (2008). *Analyse coûts-avantages de solutions d'adaptation à l'érosion côtière pour la Ville de Sept-Îles*. rapport d'étude réalisé pour la Ville de Sept-Îles, 90 p.
- Thieler, E.R., Hammar-Klose, E.S. (2000). *National Assessment of Coastal Vulnerability to Future Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast*. U.S. Geological Survey, Open File Report, pp. 99–593.
- Vafeidis, T., Nicholls, R.J., McFadden, L., Tol, R.S.J., Hinkel, J., Spencer, T., Grashoff, P.S., Boot, G., Klein, R.J.T. (2008). A new global coastal database for impact and vulnerability analysis to sea-level rise. *Journal of coastal research*. 24 (4) 917-924.
- Yoo, G., Hwang, J.H., Choi, C. (2011). Development and application of a methodology for vulnerability assessment of climate change in coastal cities. *Ocean and Coastal Management*, 54, 524-534.

La vulnérabilité face au risque de submersion marine

Exposition et sensibilité des communes littorales de la région Pays de la Loire (France)

Elie Chevillot-Miot¹, Denis Mercier²

1. Doctorante en géographie à l'Université de Nantes
Laboratoire LETG-Nantes-Géolittomer UMR 6554 CNRS
Campus du Tertre - BP 81 227
44 312 Nantes cedex 3, France
Elie.Chevillot-Miot@univ-nantes.fr

2. Professeur de géographie à l'Université de Nantes
Laboratoire LETG-Nantes-Géolittomer UMR 6554 CNRS
Campus du Tertre - BP 81 227
44 312 Nantes cedex 3
Institut Universitaire de France
Denis.Mercier@univ-nantes.fr

RESUME.

Cet article analyse la vulnérabilité des communes littorales de la région des Pays de la Loire (France) face au risque de submersion marine. Ce travail s'inscrit dans les études menées après la tempête Xynthia du 28 février 2010, qui avait submergé de nombreux territoires topographiquement bas (sous la côte des 4,50 m NGF), provoqué des dommages considérables sur les habitations et entraîné la mort de 41 personnes dans les départements de la Charente-Maritime et de la Vendée. Cette étude consiste à identifier parmi 120 communes des départements de la Loire-Atlantique et de la Vendée, les territoires les plus vulnérables au risque de submersion marine et cherche à comprendre les facteurs de vulnérabilité par une analyse des correspondances multiples (ACM). La typologie des communes est fonction de critères de vulnérabilité : la topographie, les enjeux humains/fonciers, l'historique des submersions marines ainsi que des éléments de gestion propre aux risques naturels (plan de prévention des risques, plans communaux de sauvegarde, recensement des digues de protection). Les résultats, présentés sous forme cartographique, permettent de retenir les facteurs topographique et historique comme éléments déterminant la prédisposition de ces communes à subir des submersions marines.

ABSTRACT.

This article analyzes the vulnerability of coastal communities facing marine submersion hazard, in the region Pays de la Loire (France). This work is related to studies lead after the storm Xynthia, 28 February 2010, which submerged many low areas (under the altitude of 4,50 m NGF). Xynthia caused considerable damages on habitations and the death of 41 peoples in Charente-Maritime and Vendée. This study aims to identify among 120 municipalities in Loire-Atlantique and Vendée, the most vulnerable ones to marine submersion hazard. The study intends to understand what make these municipalities potentially vulnerable using a statistical analysis: multiple component analysis (MCA). A typology of municipalities is built according to criteria of vulnerability, such as topography, human and real estate stakes, marine submersion archives, elements of natural hazards management. Cartographic results show that topographical and historical factors are key elements to determine vulnerable municipalities to marine submersion hazard.

MOTS-CLES : vulnérabilité – submersion marine – tempête Xynthia – urbanisation du littoral – analyse des correspondances multiples – Loire-Atlantique et Vendée

KEYWORDS: vulnerability – marine submersion hazard – storm Xynthia – coastline urbanization – multiple correspondence analysis – Loire-Atlantique and Vendée departments

1. Introduction

Les problématiques du développement des territoires littoraux bas français ont ressurgi après la tempête Xynthia en février 2010. Les connaissances des aléas de submersions marines et leurs historicités manquent sur ces espaces depuis le début de la Seconde Guerre mondiale. Cette absence d'événement marquant a eu pour conséquence une perte de conscience et de connaissance de cet aléa. Les effets de mobilité des personnes ont dû concourir également à cette perte de la mémoire, malgré l'existence de photographies aérienne et de cartes postales (Garnier, 2010 ; Acerra et Sauzeau, 2012). De nos jours, on constate un accroissement de la production du risque de submersion marine (Vinet et al., 2012) lié au développement des résidences et à l'évolution démographique dans des zones potentiellement submersibles.

L'étude identifie les communes les plus vulnérables face au risque de submersion marine, en région Pays de la Loire, en fonction de critères d'exposition et de sensibilité : des critères topographiques, enjeux humains et fonciers, historique des événements de submersion marine, et éléments de gestion.

La vulnérabilité est ici entendue comme « les effets possibles d'un phénomène naturel dangereux (aléa naturel) sur les populations, les biens et l'environnement. Elle est fonction de la densité des populations, des biens exposés et du degré de dommages possibles lors d'une catastrophe naturelle. Mais elle dépend aussi de la capacité d'une société à résister à la crise et à retourner à un fonctionnement normal après la catastrophe (résilience) » (Auly et al., 2012).

L'étude s'intéresse plus particulièrement à l'exposition et à la sensibilité des communes de la région Pays de la Loire, à travers une analyse statistique dite "ACM", analyse des correspondances multiples. Elle met en valeur les relations entre les communes littorales et les critères de vulnérabilités cités ci-dessus, et aboutit à une cartographie de la vulnérabilité face au risque de submersion marine.

2. Les critères de vulnérabilités et leurs sources

L'étude porte sur 120 communes littorales, insulaires et rétrolittorales des départements de la Loire-Atlantique et de la Vendée. Les communes retenues ont été déterminées en fonction de plusieurs critères de vulnérabilité face au risque de submersion marine.

Les aspects physiques constituent le premier critère, avec les sous-critères de topographie et de typologie des côtes. Le premier fait référence à la cartographie LIDAR d'une résolution spatiale de 1 mètre sur 1 mètre du programme Litto-3D de GEOPAL24. Elle met en lumière, de manière très fiable, les zones basses (sous la cote de 4,50 m NGF). Le LIDAR a permis de délimiter dans un premier temps le champ de l'étude. La cote de 4,50 m NGF choisie représente un compromis entre les plus hautes

²⁴ Portail géographique des Pays de la Loire : <http://www.geopal.org>

eaux connues (PHEC), lors de la tempête Xynthia, c'est-à-dire la cote de 4,20 m NGF et la cote relevée au plus fort de la tempête à l'Aiguillon-sur-Mer de 4,70 m (Mercier et Chadenas, 2012). La typologie des côtes fut relevée sur chacune des communes littorales et insulaires (côte basse ou haute, cordon dunaire) d'après des observations cartographiques de l'Institut Géographique National (IGN).

Les critères qui suivent font référence à la sensibilité face au risque de submersion marine, et s'orientent vers l'historicité, les enjeux et les éléments de gestion. Le critère portant sur les éléments historiques intègre les surfaces terrestres submergées lors de la tempête Xynthia (Géopal) et les événements de submersions passés. Ils sont de l'ordre de 0 à 14 phénomènes de submersions de l'an 567 à 2012. On relève donc des prédispositions de certaines communes à être touchée par ce type d'aléa. Ce critère dépend des travaux des historiens (Garnier et Surville, 2010 ; Sarrazin, 2012). Les documentations et les récits d'événements catastrophiques recensés sont nombreux, surtout à la fin du XVI^e siècle, car plus riches, plus denses et plus précis (date, heure de la submersion, coefficient de marée, vitesse et orientation du vent, hauteur d'eau, surface submergée, dégâts causés), d'autres sources n'indiquent cependant qu'une simple date (Sarrazin, 2012). Les sources de données proviennent également de sites en ligne dédiés à des communes comme La Faute-sur-Mer. À partir de 1982, les informations relevées émanent du site internet Prim.net. Il fait état pour l'ensemble du territoire français de tous les arrêtés de reconnaissance de catastrophe naturelle par commune, déclenchés à l'échelle départementale par le préfet. Ici, l'arrêté concerne l'aléa "chocs mécaniques liés à l'action des vagues", faisant référence à la submersion marine. Cependant, en comparant avec la surface terrestre submergée lors de la tempête Xynthia, on constate que certaines communes sous arrêtés Catnat, n'ont pas été pour autant submergées. Cette source de données est donc à prendre avec beaucoup de précautions.

Le troisième critère s'oriente sur les enjeux humains et fonciers, avec trois sous-critères : la part des retraités, qui fait référence ici à la catégorie socioprofessionnelle en 2009 ; la densité de population en 2009 (Insee25) et, enfin, l'estimation de la part de bâtis sous la cote 4,50 m NGF.

Le critère « retraité » est basé sur l'âge des victimes lors de la tempête. Les travaux de Vinet et al. (2011) ont montré que l'âge était un facteur aggravant la vulnérabilité. La population âgée serait plus vulnérable face au risque de submersion marine, en raison de sa mobilité restreinte, ajouté à des hauteurs d'eau supérieures à 50 cm (Mercier et Chadenas, 2012). Le problème de ce critère, issu de source Insee, est qu'il ne fait pas la différence entre les personnes mobiles ou à mobilité réduite. Cette catégorie n'est pas la seule à être vulnérable, les jeunes enfants le sont également (Vinet et al., 2012). Il semblerait donc intéressant également de recenser le nombre d'enfants dans les sources Insee. Néanmoins, le nombre de ces personnes âgées et des jeunes enfants est bien plus important en période estivale. Obtenir leur nombre approximatif semble aboutir à la réalisation d'une étude sur la capacité d'accueil maximale, en période estivale, de ces communes (Chadenas et al., 2009).

Le choix du critère « densité de population » est équivoque car il paraît évident que plus la population sera nombreuse sur un espace restreint en zone basse, plus elle sera vulnérable. Néanmoins, cette information n'est connue qu'à l'échelle de la commune et non à celle des quartiers situés en zones basses, et uniquement sur la population permanente. L'afflux de touristes occasionnels ou habitants de résidences secondaires en période de vacances, n'y figurent pas. En effet, la population communale en période estivale est multipliée par 5, voire 10 sur certaines communes littorales (Chevillot-Miot, 2012). Ce manque de précision est une limite majeure de ce

²⁵ <http://www.insee.fr> : Institut national de la statistique et des études économiques

critère. Une estimation du nombre de bâtis situé en zone basse a été réalisée pour pallier cette limite.

Le critère « foncier » a donc été retenu. Néanmoins, il s'agit ici de tous les types de bâtis, indépendamment, de leur superficie. Il y a donc des bâtis de types industriels, commerciaux, résidentiels, ou agricoles ainsi que les postes de transformateurs électriques qui y sont recensés. Une nouvelle estimation pourrait être réalisée en prenant en compte la BD TOPO de l'IGN. Elle permet de différencier les types de bâtiments, leur hauteur et le nombre exact de bâtis en zone basse. Cependant, des études comme celle d'I. Le Berre (2013) ont noté que le plan cadastral n'était pas toujours mis à jour. Certains bâtis ont subi des transformations, des agrandissements ou bien ont été détruits, comme par exemple dans les communes impactées par la tempête Xynthia, sous décision de l'État.

Le dernier critère concerne les éléments de gestion comprenant deux sous-critères : les communes possédant ou non un Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) prioritaire, fixé par les services de l'État en date du 16 février 2011, les communes possédant ou non un Plan Communal de Sauvegarde (PCS). Ces éléments de gestion des risques naturels permettent une meilleure connaissance des aléas littoraux, identifient les communes soumises à ces risques littoraux - dont la submersion marine - et améliorent et préparent la gestion de crise. Une réflexion s'est portée sur le critère « Plan de Prévention des Risques Littoraux prioritaire ». En effet, ces communes concernées sont déjà désignées comme vulnérables et dans le cas de notre analyse de la vulnérabilité, cette donnée pourrait s'avérer redondante. Néanmoins, dans les ACM réalisées, il a été prouvé que ce critère n'était en aucune manière redondant, puisqu'il permettait à d'autres critères comme les « surfaces terrestres submergées lors de Xynthia » et la « part de bâtis situés en zones basses » d'avoir plus de poids dans l'analyse statistique. Le recueil des « Plans Communaux de Sauvegardes » pose problème. Cette donnée est normalement téléchargeable sur la base de données GASPARD, sur le site du Ministère de l'Environnement. Mais en réalité, cette base de données n'est pas mise à jour. Par conséquent, la recension des PCS par commune s'est effectuée sur d'autres sites internet. L'analyse de la vulnérabilité dépend donc avant tout des données recueillies, de leur fiabilité et de la façon dont elle a été réalisée.

3. L'analyse des correspondances multiples

La cartographie LIDAR et les surfaces terrestres submergées de la tempête Xynthia ont délimité la zone d'étude. Les autres critères furent renseignés dans un tableau Excel. Au final, le tableau est constitué de 120 individus (communes) et de 9 variables (critère) qualitatives et quantitatives. Une fois le tableau de données complété, les valeurs quantitatives, comme les « enjeux humains/foncier », et les « surfaces terrestres submergées », furent transformées en valeurs qualitatives, en créant des intervalles de valeurs. Ensuite, une Analyse Composante Multiple (ACM) a été réalisée sur le tableau de données transformé, sous le logiciel libre R (3.0.1). L'objectif de l'analyse est de mettre en valeur des relations entre les variables et les individus. Elle permet de décrire le jeu de données, d'en sortir un résumé, ou bien d'en réduire les dimensionnalités (Factominer²⁶ ; R-Project²⁷). Cette méthode caractérise les liens potentiels entre les communes et

²⁶ <http://factominer.free.fr> : Factominer est un package R dédié à l'analyse exploratoire multidimensionnelle de données (à la Française). Il a été développé et il est maintenu par F. Husson*, J. Josse*, S. Lê*, d'Agrocampus Rennes, et J. Mazet.

les critères de vulnérabilité. Une fois l'analyse lancée, deux graphiques de nuage de points en ressortent. Le premier est centré sur les variables : les critères de vulnérabilité et leurs liaisons linéaires. Il s'agit d'un résumé de la matrice des corrélations. Elle cherche notamment les variables synthétiques, celles qui sont les plus structurantes. Le second, concerne les individus projetés. Si les communes sont proches, cela signifie qu'elles sont semblables, c'est-à-dire qu'elles ont les mêmes caractéristiques de vulnérabilité. L'ACM montre donc les similarités entre les individus sur toutes les variables. Il est possible par la suite, d'établir des profils de communes, selon leur variabilité. L'étape suivante a consisté à mettre en lien ces deux graphiques de nuage de points, de caractériser des groupes de communes par les critères de vulnérabilité, regroupés dans un tableau (Tableau 1). Puis un indicateur de vulnérabilité a été attribué à chacun de ces groupes, en fonction des critères de vulnérabilité. La dernière étape consiste à exporter les coordonnées des points-communes du graphique de nuage de points, dans un tableur Excel ; et d'attribuer un indicateur de vulnérabilité à chaque commune en fonction de ses caractéristiques. Le nouveau tableau a ensuite été exporté dans un SIG (ArcGis 9.3) pour réaliser une cartographie de la vulnérabilité des communes face au risque de submersion marine (Figure 1).

4. Résultat cartographique et discussion

Les communes à l'indicateur de vulnérabilité « très fort » ont toutes été fortement submergées lors de Xynthia, excepté La Barre-de-Monts. Néanmoins, la part des bâtis situés en zone basse est supérieure à 50 % et ont toute des côtes basses totalement ou en partie, et possèdent un PCS. Les communes à l'indicateur de vulnérabilité « fort » ont toutes été submergées par le passé au minimum à six reprises, mais également lors de Xynthia de manière moins importante. Elles ont toutes ou en partie des côtes basses. Ce sont des communes où la part des retraits constitue, au moins, la moitié de la population communale. Ces deux premiers indicateurs de vulnérabilité regroupent des communes situées en fond de baie et sont donc sensibles au vu de leurs critères d'historicité et d'enjeux fonciers (Voit Tableau 1).

Dans l'indicateur de vulnérabilité « moyen », les communes sont situées soit dans l'estuaire de la Loire, soit en fond de baie de Bourgneuf. Elles se situent entre l'indicateur de vulnérabilité « fort » et « faible ». Certaines ont été plus submergées, mais sans enjeux bâtis et humains, et d'autres peu submergées mais avec davantage d'enjeux humains et fonciers.

L'indicateur de vulnérabilité « faible » (en vert) s'applique à des communes situées en majorité à proximité du littoral, quatre sont en arrière-pays, et une est insulaire (l'île d'Yeu). Elles sont en grande majorité directement exposées aux aléas météo-marins, mais sont peu sensibles, grâce à la géomorphologie des côtes (falaises et/ou dunaires), qui joue le rôle de barrière de « protection » naturelle. Cependant, les enjeux humains et fonciers ne sont pas négligeables sur certaines communes.

Le dernier indicateur de vulnérabilité « très faible » (en vert foncé) relève des communes situées en zone rétro littorale, à l'exception de Préfaillies et la Plaine-sur-Mer, au sud de la côte de Jade. Il n'y a pas eu de submersion par le passé et les enjeux humains et fonciers sont mineurs.

²⁷ Site dédié au téléchargement des Packages, permettant l'utilisation de fonctions statistiques sur le logiciel R, telles que analyse composante multiple.

Cette cartographie de synthèse démontre que les critères d'historicité structurent les deux premiers axes factoriels et sont représentatifs de l'information totale. Ce travail révèle également une certaine logique géographique des indicateurs de vulnérabilité. Les communes les plus vulnérables sont situées en fond de baie (Aiguillon et Bourgneuf), puis dans l'estuaire de la Loire, ensuite le long du linéaire côtier à falaises et/ou dunaires, et enfin en zones rétro littorales basses. Cette logique géographique démontre surtout l'importance des effets de site, ici les fonds de baie davantage soumis au risque de submersion marine, engendré par un phénomène météorologique. Les échancrures marquées présentent une topographie basse, des côtes sableuses et peuvent conduire lors de tempête à un phénomène de résonance des vagues. Celles-ci sont comme prises au piège, les unes après les autres, et conduisent à une surélévation du niveau d'eau dans la baie peu profonde (Perherin, 2007). Ces phénomènes se produisent également dans d'autres régions du monde, comme la Nouvelle-Orléans submergée après le passage de l'ouragan Katrina (de catégorie 3) en 2005 (Jonkman et al., 2009). Ou bien le typhon Haiyan aux Philippines en novembre 2013 (catégorie 5) entraînant des vagues de submersions de cinq mètres de hauteurs sur la ville de Tacloban située dans la baie de San Pedro et San Pablo (Mori et Mase, 2013). Ces territoires ont accru leurs enjeux au fil du temps. Par le passé, les terres submergées étaient des terres agricoles, devenues avec le « boom touristique », des zones urbanisées (Renard, 2005 ; Legal, 2008). La politique de gestion des risques naturels dans les pays développés devient alors de plus en plus complexe à mettre en œuvre au vu de la pression foncière et économique qui en découle (Kolen et al., 2010). Cette étude montre une autre méthode pour parvenir à ce type de résultat. Cependant, on remarque une inégalité dans les sources de données. Leur accès est primordial pour réaliser une étude de la vulnérabilité quelles que soient les échelles spatiale, temporelle et la méthode utilisée.

5. Conclusion

L'analyse de la vulnérabilité, à travers une ACM sur 9 critères et 120 communes littorales, rétro littorales et insulaires de la région Pays de la Loire, met en lumière certaines d'entre elles comme étant potentiellement vulnérables face au risque de submersion marine. Cette vulnérabilité n'est pas nouvelle, au vu des événements de submersions passés. Les prédispositions de ces communes à être impactées par une submersion marine sont dues majoritairement à leurs aspects physiques, tels qu'une topographie basse, des côtes sableuses et sont localisées en fond de baie. La question de l'avenir de ces communes se pose. Jusqu'où sont-elles prêtes à accepter le risque de submersion marine (Tranchant, 2010), en termes de moyens financiers et sur le plan psychologique ? Ces communes vulnérables sont-elles encore conscientes du risque de submersion marine après la catastrophe Xynthia ?

Remerciements

Les auteurs remercient le projet de recherche COSELMAR (compréhension des socio-écosystèmes littoraux et marins), financé par la région Pays de la Loire et porté par l'Ifremer et l'Université de Nantes, qui a subventionné cette étude dans le cadre d'un stage de Master 2 Géographie et Aménagement des Espaces Maritimes. Nous remercions également Sophie Pardo (LEMNA), Patrice Guillotreau (IEMN-IAE) et Laurent Godet (LETG Nantes Géolittomer) pour leur aide et les conseils concernant les méthodes statistiques.

Table des figures

Tableau 1: Les caractéristiques par indicateurs de vulnérabilité

Caractéristiques	Descriptif des caractéristiques	Indicateur de vulnérabilité
1	- Surface terrestre submergée par Xynthia entre 20 et 80 % - Evénements de submersions entre 3 et 4 - Part de bâtis en zones basses par commune entre 50 à 100 % - Présence d'un PPRL prioritaire et d'un PCS - Présence de côte basse, quasiment aucune côte haute et dune	Très fort
2	- Entre 6 et 14 événements survenus - Surface submergée lors de Xynthia inférieure à 20 % par commune - Part des retraités entre 55 et 70 % de la population totale - Présence d'un PPRL prioritaire et d'un PCS - Présence de côte basse, côte haute et dune	Fort
3	- Surface submergée par Xynthia entre 20 et 80 % - Part des retraités entre 20 et 35 % - Côte basse - Parfois présence d'un PCS, pas de PPRL prioritaire	Moyen
4	- Part des retraités compris entre 45 et 55 % de la population totale par commune - Densité de la population supérieure à la moyenne en France métropole - Présence de dune et côte haute - Bâtis en zones basses entre 30 et 50 %	Faible
5	- Faible densité de population - Bâtis en zones basses entre 15 et 30 % - Pas d'historique de submersion - Pas de surface submergée par Xynthia	Très faible

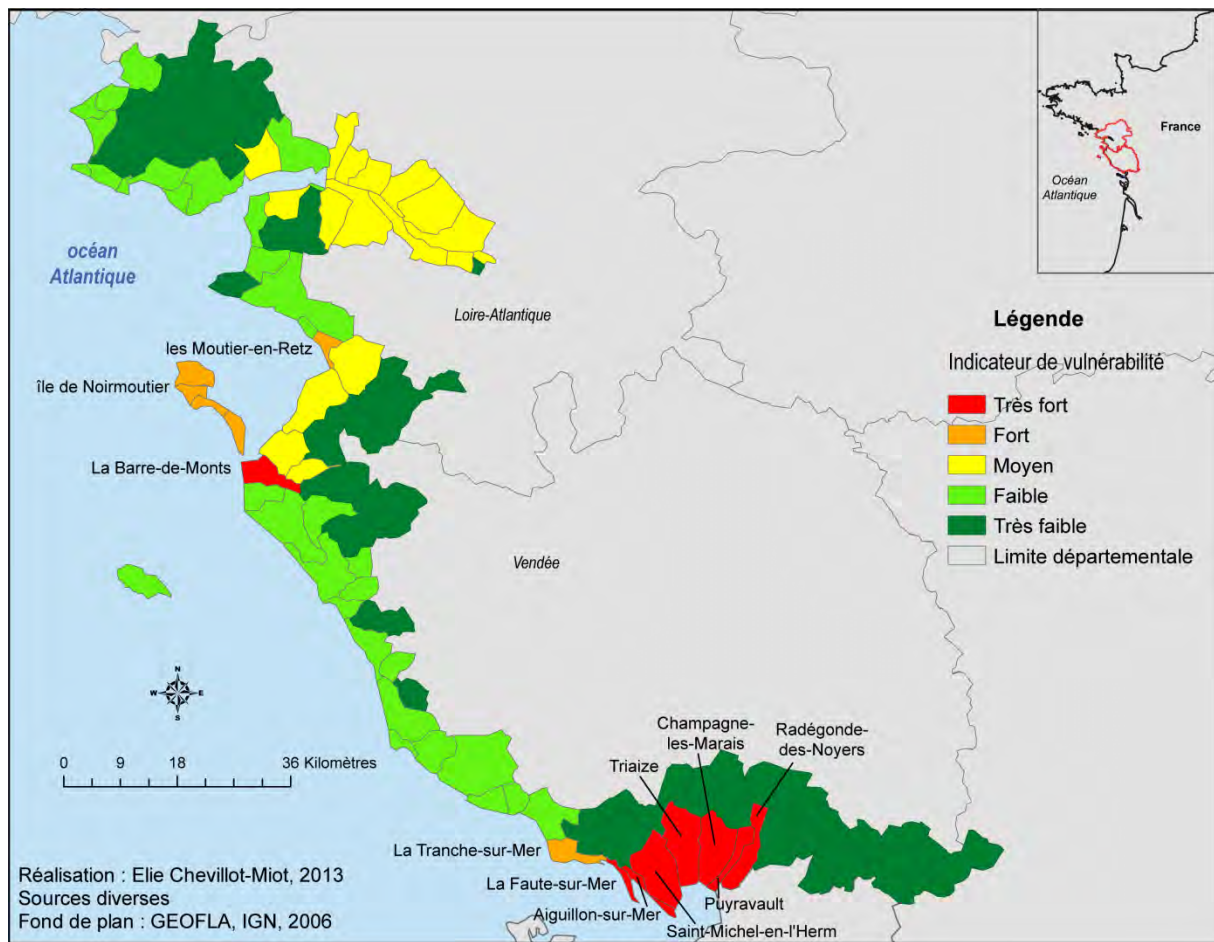


Figure 1 : La vulnérabilité de la région Pays de la Loire face au risque de submersion marine d'après l'analyse des correspondances multiples

Bibliographie

- Acerra M., T Sauzeau, 2012, « Zones construites, zones désertes sur le littoral atlantique. Les leçons du passé », Revue Norois, n°222, pp. 103-114.
- Auly T., P Laymond, M-C. Prat, J Veiga, 2012, « Petit vocabulaire des risques et des catastrophes d'origine naturelle », Auly T et Prat M-C (coord), Edition Confluences, p 64.
- Chadenas C., P Pottier, A Pouillaude, J-F. Struillou, L Després, 2009, « Pour une meilleure adéquation entre pression humaine et ressource littorales : évaluer la capacité d'accueil du territoire », Cahiers nantais, n°2, pp. 57-68.
- Chevillot-Miot É., 2012, « La Vulnérabilité du bâti face au risque de submersion marine sur l'île de Noirmoutier », Mémoire de Master 1 Géographie et Aménagement, Université de Nantes, 120 p.
- Factominer : Package R dédié à l'analyse exploratoire multidimensionnelle de données (à la Française). Il a été développé et il est maintenu par F. Husson, J. Josse, S. Lê, d'Agrocampus Rennes, et J. Mazet. [Factominer.free.fr]
- Garnier É., 2010, « 500 ans de vîmers sur le littoral de Poitou-Charentes : risque et vulnérabilité des sociétés », dans SAUZEAU T.(dir), Comprendre Xynthia, expliquer un phénomène, Journée d'étude de la région Poitou-Charente, Poitiers, pp. 11-17. [http://www.poitou-charentes.fr]

Garnier É., F Surville, 2010, « La tempête Xynthia face à l'histoire, submersion et tsunamis sur les littoraux français du Moyen Age à nos jours : L'exemple du littoral aunisien et de ses prolongements d'entre Loire et Gironde », La Croix Vif, 174 p.

Géopal : Programme commun de l'information géographique [<http://www.geopal.org>]

Insee : L'Institut national de la statistique et des études économiques [www.insee.fr]

Jonkman s-n., B Maaskant, E Boyd, M-L. Levitan, 2009, "Loss of life caused by the flooding of New Orleans after hurricane Katrina: analysis of the relationship between flood characteristics and mortality", Risk Analysis, Vol 29, n°5, pp. 676 - 698.

Kolen B., R Slomp, W Van Balen, T Terpstra, M Bottema, S Nieuwenhuis, 2010, "Learning from French experiences with storm Xynthia: Damages after a flood", Ministerie van Verkeer en Waterstaat, MKV Consultants, 89 p.

Le Berre I., M Philippe, H Villerme, 2013, « Partager une base d'information géographique pour évaluer la vulnérabilité à la submersion marine : approche économique et géographique », Colloque 14, Risques littoraux et maritimes, Journées scientifiques de l'Université de Nantes.

Legal P-Y., 2008, « L'urbanisation, de Merlin-Plage à la loi littorale », Les Vendéens et la mer, de la grande pêche au Vendée Globe, La Roche-sur-Yon, Éditions du CVRH, pp. 649-662.

Mercier D., C Chadenas, 2012, « La tempête Xynthia et la cartographie des « zones noires » sur le littoral français : analyse critique à partir de l'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée) », Norois, n° 222, pp. 45-60.

Mori N., Mase H (coord.), 2013, "Analysis of coastal disaster by typhoon Haiyan". Coastal disaster research section, Disaster prevention research insitut Kyoto university. [<http://goo.gl/Aoy1PI>]

Perherin C., 2007, « Contribution à l'analyse des phénomènes de surcotes et de submersion marines. Secteur du Pertuis Breton (Vendée) », École Nationale des Travaux Publics de l'État, Rapport de stage, 94 p.

Renard J., 2005, « La Vendée : un demi-siècle d'observation d'un géographe », Presse Universitaire Rennes, 308 p.

Sarrazin J-L., 2012, « "Vimer de mer" et sociétés littorales entre Loire et Gironde (XIV^e-XVI^e siècle) », Norois, n° 222, pp. 91-102.

R-Project : site dédié au logiciel R, téléchargement des packages [R-Project.org]

Tranchant M., 2010, « Culture du risque et résilience dans l'histoire de l'Occident », dans Sauzeau T (dir), Comprendre Xynthia, expliquer un phénomène, Journée d'étude de la région Poitou-Charentes, Poitiers, pp 7-11.

Vinet F., L Boissier, S Defossez, 2011, « La mortalité comme expression de la vulnérabilité humaine face aux catastrophes naturelles : deux inondations récentes en France (Xynthia, var, 2010) », VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 11 Numéro 2 | septembre 2011, mis en ligne le 07 octobre 2011. URL : [<http://vertigo.revues.org/11074>]

Vinet F., S Defossez, T Rey, L Boissier, 2012, « Le processus de production du risque « submersion marine » en zone littorale : l'exemple des territoires « Xynthia » », Norois, n° 222, pp. 11-26.

L'extension des résidences secondaires sur le littoral de l'archipel de Kerkena : Enjeux et risques

Mounira Kebaïli Tarchouna¹

1. Géographie, Unité de recherche de la Faculté des Sciences Économiques et Juridiques, Institut Supérieur des Sciences Humaines, Université de Jendouba
14 Avenue de l'environnement, Cité Jardins de Soukra, L'Aouina, 2045 Tunis, Tunisie
ke.tarchouna_mounira@yahoo.fr

RESUME.

Kerkenia est un archipel de basse altitude situé sur la côte orientale de la Tunisie au nord du golfe de Gabès. C'est un milieu naturellement vulnérable. Il figure parmi les espaces les plus sensibles à l'élévation du niveau de la mer dans le monde, en raison de la subsidence active de la terre et de la remontée avérée du niveau marin, ainsi que de la présence de côtes basses. Des indices archéologiques sous l'eau montrent que la mer a gagné de l'espace aux dépens des terres. Ce changement négatif du milieu est dû à des causes naturelles, en particulier l'affaissement du sol par subsidence. Mais aux cours de ces dernières décennies, l'Homme a également contribué à la dégradation du milieu par l'extension du bâti pieds dans l'eau, surtout les résidences secondaires. En plus de l'exiguïté des plages, les résidences secondaires sont très proches du rivage. Elles sont construites sur les roches qui alimentent les plages en sédiments. Par conséquent la dynamique locale de ces plages est perturbée et l'érosion marine est accentuée. L'extension du bâti est en relation avec les enjeux naturels, économiques et fonciers, car le littoral est aujourd'hui l'espace le plus recherché dans le monde et en Tunisie à cause de sa valeur économique et des potentialités qu'il offre pour l'aménagement portuaire, touristique et industriel. Pour cela, le bâti a occupé les terres agricoles, les falaises et même une partie des sebkhas littorales à Kerkena. Mais ces sebkhas et les côtes basses sont menacées d'être annexées à la mer en cas de l'élévation du niveau marin de quelques décimètres.

ABSTRACT.

Kerkenia is an archipelago of low -lying on the eastern coast of Tunisia in the northern Gulf of Gabes. It is a naturally vulnerable areas. It is among the most sensitive to rising sea level in the world space, due to the active subsidence of the earth and the proven sea level rise, as well as the presence of low-lying coasts. Archaeological evidence shows that underwater sea won space at the expense of land. This negative change in the environment is due to natural causes, particularly the collapse of soil subsidence. But in recent decades, man has also contributed to environmental degradation by extending the built waterfront, especially second homes. In addition to the narrowness of the beaches, the homes are very close to the shore. They are built on rocks that feed sediment beaches. Therefore the local dynamics of these beaches is disturbed and sea erosion increased. The extension of the building is related to the natural, economic and land issues. The coast is now the most sought after area in the world and Tunisia because of its economic value. For this, the frame occupied farmland, cliffs and even some coastal sebkhas to Kerkena. But these sebkhas and low coasts are threatened to be annexed to the sea in the event of sea level rise of a few feet.

MOTS-CLES : Milieu vulnérable, subsidence de la terre, enjeux, niveau marin, risques

KEYWORDS: vulnerable environment, subsidence of the land, challenges, sea level, risks

1. Introduction

Kerkena est un archipel méditerranéen de basse altitude situé sur la côte orientale de la Tunisie au nord du golfe de Gabès, à 18 km de la ville de Sfax. Il s'étend sur 150 km² et il est formé de deux principales îles occupées par près de 14 000 habitants : la grande île est Cherguia et la deuxième est Gharbia (figure 1). Il comprend aussi quelques îlots inhabités. C'est un milieu naturellement vulnérable. Il figure parmi les espaces les plus sensibles à l'élévation du niveau de la mer dans le monde, en raison de la subsidence active de la terre et de la remontée avérée du niveau marin, ainsi que de la présence de côtes basses. L'archipel risque de perdre plus de terres en faveur de la mer, et l'action anthropique est en train d'aggraver ce risque par l'extension du bâti pieds dans l'eau, en particulier les résidences secondaires.

La problématique à Kerkena est la vulnérabilité naturelle qui est à l'origine de la mobilité du trait de côte vers l'intérieur des terres, et l'aggravation de cette vulnérabilité par l'Homme, qui par la construction sur le rivage perturbe la dynamique sédimentaire des plages déjà très exigües et aggrave le risque d'érosion et de submersion marine. Le présent travail propose de montrer dans une première partie les principaux sites de résidences secondaires à Kerkena et les enjeux de l'extension du bâti, et d'analyser dans une deuxième partie les risques de la construction dans les espaces sensibles et le rôle de l'Homme dans l'aggravation des risques d'érosion et de submersion marine.

2. L'extension des résidences secondaires à Kerkena et les enjeux

Le phénomène de la construction des résidences secondaires à Kerkena a pris de l'importance à partir des années 1980 et s'est accentué depuis les années 1990.

2.1 Localisation littorale des zones de résidences secondaires

- La zone d'El H'sar, Kastil et Cercina :

La zone d'El H'sar et Kastil située sur la côte ouest de l'archipel à proximité de la zone touristique, est le premier site de résidences secondaires à Kerkena. Au début des années 1970, il y avait quelques maisons éparpillées au bord de la mer. Pendant les années 80, la ligne bordière de la mer fut occupée par des maisons, jusqu'à l'interdiction de la construction à cause de la découverte des ruines de la ville romaine de Cercina et la mise en place d'une délimitation de la zone archéologique pour protéger ce site. Vers le sud ouest de cette zone, à Cercina les résidences de haut standing sont pieds dans l'eau. Elles s'étendent sur le rivage jusqu'à Kantra à proximité du village d'Ouled Yaneg, c'est-à-dire jusqu'au pont qui lie l'île Cherguia à l'île Gharbia, occupant la baie de Sidi Fraj et Kantra où la côte est très basse. Dans cette zone la côte est basse à l'exception de la côte où il y a Borj El H'sar (Kebaïli Tarchouna 2013).

Les propriétaires des résidences sont des kerkeniens installés en ville surtout à Sfax et à Tunis, et il y a quelques anglais qui possèdent des résidences à Cercina. Cette course à la construction dans cette zone s'explique par sa proximité de la zone touristique unique de l'archipel, par la profondeur relative des eaux marines de la côte ouest de l'archipel par rapport à la côte Est, et par des enjeux économiques et fonciers. D'ailleurs, malgré l'interdiction de construction dans la zone de Borj El H'sar, après la révolution du 14 janvier 2011, les propriétaires des terrains dans cette zone

archéologique ont profité de l'absence de l'autorité de la municipalité pour construire sans permis de construction, à l'instar de ce qui s'est passé dans toutes les régions de la Tunisie.

- Les résidences secondaires de Bourousse :

Bourousse est un nouveau quartier situé sur la côte Est de l'archipel entre Ouled Kacem et Ouled Yaneg. Il occupe la partie la plus élevée de Kerkena après le Jorf d'Ouled Ezzedine sur la côte nord de l'île Gharbia. L'altitude de ce quartier atteint 12 mètres et le point le plus élevé dans l'archipel est de 13 mètres, ce qui a donné beaucoup d'importance à ce site. C'est un site stratégique. De plus, il est sur la route principale et proche de la zone touristique. Bourousse est divisé en deux parties ou deux lignes. La première ligne de maisons est pieds dans l'eau, la deuxième rangée occupe les terres les plus hautes du site et ses résidents ont une belle vue sur mer. Les villas sont de haut standing.

- La zone de Bounouma, Dahmanine et Marsa El Echrine :

Le site de Bounouma, Dahmanine et Marsa El Echrine s'étend sur une ligne côtière qui prend la forme d'une crique demi-circulaire sur la côte ouest de l'archipel. Ce golfe est limité au sud ouest par Rass Founkhal (*Rass* veut dire cap) et au nord par Rass Bounouma (figure 1). C'est une zone de résidences secondaires de haut standing, et la majorité de ces résidences est pieds dans l'eau.

- La zone de Sidi Youssef dans l'île Gharbia :

Dans l'île Gharbia, on trouve un espace de résidences secondaires au débarcadère de Sidi Youssef, c'est-à-dire à l'extrémité ouest de l'île et de l'archipel de Kerkena, formant un village de vacances. La situation au débarcadère de Sidi Youssef, à partir duquel l'archipel est lié au continent, présente des atouts, puisque ce village est bordier de la mer et c'est l'espace bâti le plus proche de la ville de Sfax.

2.2 Les enjeux de l'extension des résidences secondaires à Kerkena

Le littoral est aujourd'hui l'espace le plus recherché dans le monde et en Tunisie à cause de sa valeur économique et des potentialités qu'il offre pour l'aménagement portuaire, industriel ou touristique. La Tunisie a concentré la majorité de ses activités sur le littoral : 94% des établissements industriels et 95% de la capacité d'hébergement touristique.

Le bord de la mer exerce une attraction sur l'Homme depuis l'antiquité, mais cette attraction n'était pas de la même intensité qu'aujourd'hui et n'avait pas les mêmes raisons. En Tunisie, ce phénomène s'est accru après les années 1960 et cette date coïncide avec celle des premiers aménagements touristiques. Cela montre l'importance du rôle du tourisme dans l'occupation du littoral. Depuis le décollage du tourisme et jusqu'à présent, les hôtels occupent de plus en plus l'espace littoral tunisien. En outre, plusieurs tunisiens pensent de plus en plus aux loisirs et aux vacances, et à l'investissement dans le foncier. Ils ont construit des résidences secondaires sur le littoral aux environs des zones touristiques.

Le mouvement est devenu une course vers la construction au bord de la mer. Par conséquent, les prix des terrains du littoral tunisien se sont élevés d'une façon spectaculaire ces dernières décennies, à partir des années 1980 et surtout pendant les années 1990 jusqu'à présent. Le tourisme balnéaire est à l'origine de cette hausse des prix. L'État et les investisseurs privés ont des enjeux économiques et fonciers sur le littoral, car l'investissement dans le foncier et en particulier sur le littoral, assure une plus-value foncière importante. L'évolution du tourisme balnéaire et l'augmentation de la demande en terrains littoraux pour la construction, ont abouti à la spéculation sur le foncier. C'est à

partir de cet enjeu foncier et de l'évolution de la mentalité des tunisiens que le nombre de résidences secondaires s'est accru sur le littoral de la Tunisie en général et à Kerkena en particulier. Dans cet archipel, les acteurs sont les kerkeniens du continent ou de l'étranger et quelques investisseurs dans le foncier. La localisation de la première zone de résidences secondaires qui est El H'sar, Kastil, Cercina, est en relation avec l'aménagement de la zone touristique de Sidi Fraj. De même, le choix de Bourousse comme espace de résidences secondaires, en plus de sa situation stratégique, est en relation avec cette zone touristique (Kebaïli Tarchouna 2013).

Le projet d'écotourisme de Founkhal a également contribué à l'accroissement du nombre des résidences secondaires. Depuis que l'État a annoncé ce projet dans les années 1990, l'extension des résidences secondaires s'est accrue partout dans l'archipel, et en particulier dans la zone de Bounouma limitée au sud ouest par le cap de Sidi Founkhal, donc située à proximité de la zone touristique prévue pour l'archipel. Au cours de ces dernières années, la construction des résidences secondaires a concerné même l'espace limitrophe du site prévu pour l'écotourisme à Founkhal.

Cet intérêt porté de plus en plus à Kerkena a entraîné l'intervention d'autres acteurs comme les entrepreneurs privés, à l'exemple de celui qui a construit les villas de haut standing de Cercina et de ceux qui ont construit les résidences de Sidi Youssef au bord de la petite plage du débarcadère. Ces acteurs ont une stratégie commerciale à travers la satisfaction de la demande en maisons au bord de la mer. Mais leur rôle reste limité par rapport à la construction individuelle des villas dans l'île Chargaia, et il est plus important dans l'île Gharbia.

Au débarcadère de Sidi Youssef, il y a trois cités construites par des entrepreneurs privés. La proximité de la ville de Sfax de Sidi Youssef est une faveur. Ces résidences constituent un arrière pays à cette ville privée de plage et de littoral non pollué. De plus, l'importance de ce site et sa valeur foncière et stratégique ont incité les propriétaires des terrains limitrophes à construire des villas. De même, les enjeux sur les résidences secondaires dans l'île Gharbia ne se sont pas limités dans la zone de Sidi Youssef à l'extrémité ouest de l'île. En 2009, une résidence appartenant à des français fut construite au nord-est de l'île à Ras El Bargouth entre l'extrémité Est de l'île et Jorf Mellita (figure 1).

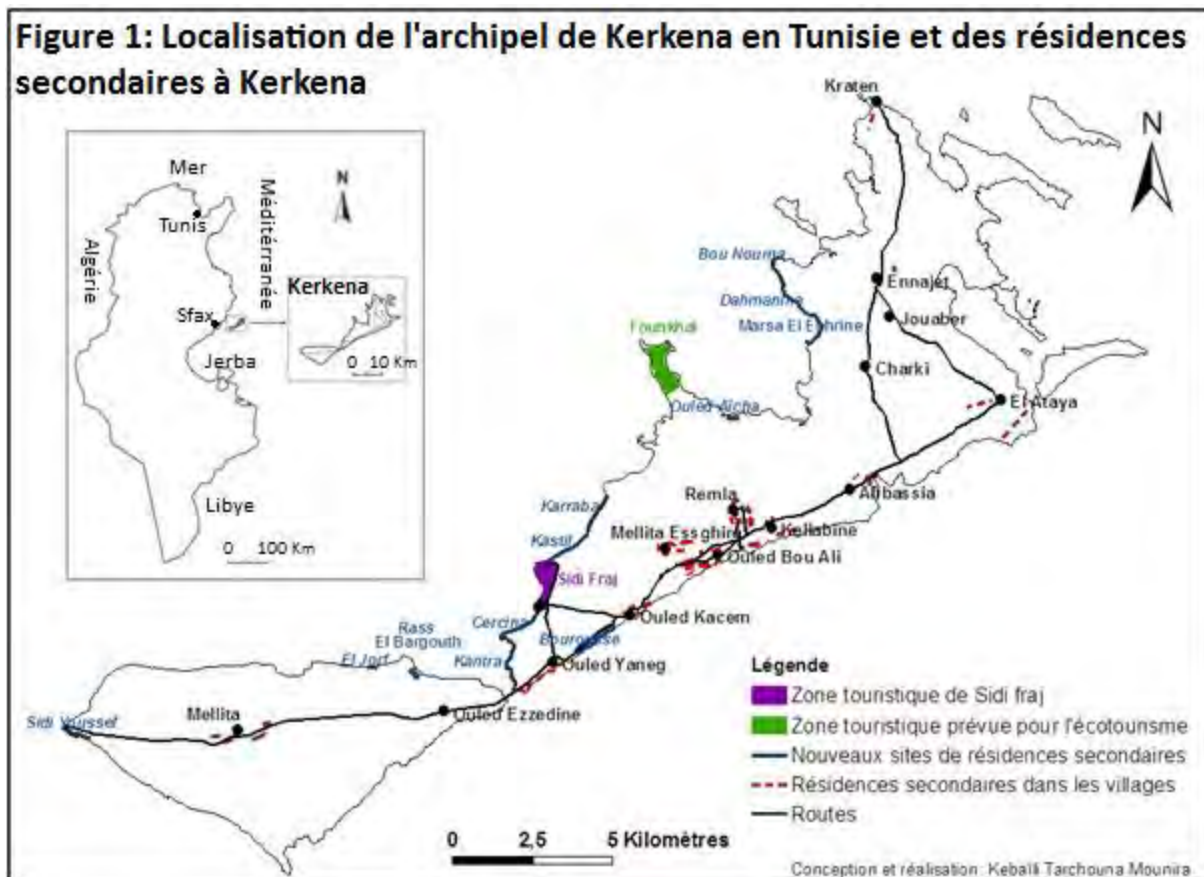


Figure 1. Localisation de l'archipel de Kerkena en Tunisie et des résidences secondaires à Kerkena

L'insularité a contribué à l'extension des résidences secondaires à Kerkena. La particularité dans cet archipel, c'est que la zone touristique est très limitée, cependant les résidences secondaires occupent un espace très étendu sur le littoral, dans les nouveaux sites, ainsi que dans les villages. Les principaux acteurs sont les kerkeniens du continent et de l'étranger. Ils ont contribué au changement du paysage de l'archipel, à la littoralisation du bâti et à l'extension des villages. Mais l'extension de l'habitat sans tenir compte de la vulnérabilité naturelle de l'archipel a des impacts négatifs sur le milieu et aggrave les risques d'érosion et de submersion marine. Dans ce qui suit, nous allons étudier ces impacts et ces risques.

3. Les risques de l'extension de l'habitat dans les espaces sensibles

3.1 Vulnérabilité naturelle de Kerkena

L'archipel de Kerkena est un milieu naturellement vulnérable, en raison de la subsidence active de la terre et de la remontée avérée du niveau marin, ainsi que de la présence de côtes basses. Il figure parmi les espaces les plus sensibles aux variations du niveau marin. « Les résultats de l'analyse

des enregistrements marégraphiques du port de Sfax (à 18 km de Kerkena et appartenant à la même province géologique), montrent que la remontée marine est bien en cours et qu'elle s'est faite (au vingtième siècle) à une vitesse de l'ordre de 5,7 mm/an, autrement dit un rythme 3 à 4 fois plus rapide que la moyenne mondiale. » (Oueslati 2004, p 435) à cause de sa subsidence. « Cette subsidence qui intéresse l'ensemble de la partie septentrionale du golfe de Gabès est démontrée par des données géologiques : ... Les laisses marines de la transgression eutyrrhénienne (depuis 125 000 ans) se situent à des altitudes nettement inférieures à celles d'autres parties des côtes tunisiennes. » (Oueslati, 1986 ; 2004 p 513).

Plusieurs indices comme les données archéologiques témoignent du retrait du rivage aux dépens des terres de l'archipel et prouvent que ce retrait est plus important que dans le reste du littoral tunisien. La collaboration des chercheurs archéologues et géomorphologues donne l'approche géo archéologique qui a démontré les modifications de l'environnement au cours des temps historiques. Le plus important indice archéologique est la partie de la ville romaine de Cercina submergée par la mer. Les ruines se poursuivent sur quelques hectomètres en avant du rivage. On trouve « Hajrat El Baou » (hajra en arabe : pierre) qui émerge partiellement à marée basse (Figure 2). « Elle est de forme quadrangulaire et faite en béton armé de petits moellons. Mais tout autour et au large de cette « Hajra » existent plusieurs structures toujours immergées, dont des alignements de blocs en place sous 2 mètres d'eau à marée haute, et le plus important se poursuit sur une distance de 100 m parallèlement à la côte. » (Chelbi, 1995 et Oueslati, 1995). Selon Chelbi, cette « Hajra » était une base du complexe portuaire de Cercina. Il pense qu'elle peut être « un poste de contrôle ou peut-être même un phare. » (Chelbi, 1995).



Figure 2. Hajrat El Baou, vestige d'une construction romaine, émerge à marée basse à environ 200 m du rivage de Borj El H'sar - Source : cliché personnel, août 2009.

La mer a gagné de l'espace aux dépens des terres, les sebkhas s'étendent par salinisation du sol et la végétation des terrains bas situés au contact de la mer se dégrade. Ces changements négatifs du milieu sont dus essentiellement à des causes naturelles qui sont l'affaissement du sol par subsidence, la remontée du niveau marin et l'absence de cours d'eau important pour alimenter la côte en sédiments. L'absence de cours d'eau et le caractère souvent vaseux de l'avant côte expliquent la

faiblesse des accumulations sableuses sur le rivage de l'archipel. Les plages sableuses sont rares et peu étendues, on les trouve surtout sur la côte occidentale et septentrionale de l'archipel, comme Sidi Youssef dans l'île Gharbia, Sidi Fraj où il y a la zone touristique, et Mkaren Khlifa à l'extrémité de la presqu'île de Founkhal où est prévu un projet d'écotourisme. Les plages de Kerkena se limitent à quelques mètres de largeur et comptent essentiellement sur la dynamique locale pour leur fourniture sédimentaire. Nous avons observé que la majorité des plages de la côte ouest de l'archipel est caractérisée par sa richesse en cailloux et petites pierres, car elle repose sur des formations géologiques résistantes ou elle est bordée par des caps rocheux. En plus de l'exigüité des plages, la construction de résidences secondaires très proches du rivage aggrave les risques d'érosion marine et d'avancée de la mer.

3.2 Aggravation de la vulnérabilité naturelle de Kerkena par l'action anthropique

Les résidences secondaires sont très proches du rivage. Elles sont construites sur les roches qui alimentent les plages en sédiments. Par conséquent, la dynamique locale de ces plages est perturbée et l'érosion marine est accentuée. L'Homme n'a pas pris en considération la vulnérabilité naturelle de l'archipel lorsqu'il a élargi son espace bâti, comme c'est le cas à Bounouma (Figures 3 et 4).



Figure 3. Une maison à Bounouma sur une petite falaise en érosion - Source : cliché personnel, août 2009



Figure 4. Le bâti atteint la mer à Dahmanine - Source : cliché personnel, août 2009.

Nous voyons sur la photo 2 la petite falaise érodée en bas formant des encoches. La construction sur cette falaise perturbe sa dynamique locale et entraîne l'accélération de l'érosion. La formation des encoches et l'éboulement des roches contribuent à l'avancée de la mer. Nous observons sur la photo 3 l'empiètement de l'homme sur la mer. La clôture de cette résidence secondaire est bâtie sur la plage atteignant la mer. Son propriétaire a bâti sur une propriété publique et l'a associée à sa propriété privée d'une part, et d'autre part il a privé la mer des sédiments qui l'alimentent. Ainsi, les vagues s'attaquent directement au mur extérieur et cela augmente leur force et par conséquent augmente l'érosion marine.

Cette action anthropique est en train de perturber le milieu et d'aggraver la situation de l'archipel déjà vulnérable. L'Homme n'a pas tenu compte de l'évolution future du milieu lorsqu'il a construit des résidences sur le rivage. Chacun veut s'approcher le maximum de la mer pour avoir une belle vue

et pour ceux qui ont des maisons sur la côte ouest, en plus de la belle vue, ils se baignent devant leurs maisons. Les résidents de Kastil, El H'sar et Karraba se baignent dans la mer en regardant Borj El H'sar le monument ottoman qui s'élève dans la zone archéologique de la ville romaine de Cercina submergée par la mer et connue par « Hajrat El Baou » qui émerge partiellement à marée basse.

Les constructions actuelles sur le rivage sont menacées par le même processus d'avancée de la mer à cause de la subsidence de la terre et l'accentuation de l'érosion marine. Leurs propriétaires, qui sont en majorité conscients de ce risque, ne sont pas inquiets car le processus du retrait du rivage est lent puisque la ville de Cercina revient à plus de deux mille ans. Mais l'Homme peut accélérer le processus de l'avancée de la mer par son comportement vis-à-vis de l'environnement et ses aménagements.

La construction en front de mer perturbe l'écosystème et accentue l'érosion marine. En hiver lorsque le vent est fort, les vagues atteignent les clôtures des villas construites sur les terres basses. Pour les villas construites sur une terre relativement haute à El H'sar, deux propriétaires ont détruit la falaise pour construire des escaliers et descendre à la mer. L'un d'eux l'a détruite partiellement et l'autre complètement. Ici donc, l'action anthropique est un facteur d'érosion et l'Homme participe à la dégradation du milieu. (Kebaïli Tarchouna M, 2013).

Ainsi, ces constructions sont menacées dans l'avenir d'avoir la même situation connue aujourd'hui par quelques maisons situées à l'entrée du village d'Ouled Yaneg du côté d'Ouled Kacem, sur la côte orientale de l'archipel. « Ces maisons encore habitées, risquent de s'écrouler à cause du développement de l'encoche que les vagues sont en train de creuser dans la partie inférieure d'une falaise évoluant dans les argiles sableuses mio-pliocènes couvertes par un épais encroustement calcaire. » (Oueslati A, 2004)

Ces maisons apparaissent sur la falaise au site d'accostage d'Ouled Yaneg avec un petit mur de protection. Vers le sud-ouest de cette falaise où sont construites des résidences secondaires, la situation est plus grave. Le sommet de la falaise en calcaire est détruit, les maisons risquent de s'écrouler et les vagues à haute marée attaquent le mur de protection entraînant sa destruction.

L'érosion marine s'est manifestée également sur la côte de Cercina, entre Rass Ameur et la zone touristique, où il y a une petite falaise haute de 1 à 2,5 m et devancée par une petite plage sableuse large de quelques mètres.

3.3 Les moyens de lutte contre l'érosion marine et l'avancée de la mer

Pour protéger la côte de Cercina Sidi Fraj, l'État a implanté au début des années 1990, une murette sur l'estran à quelques décimètres du pied de la falaise, et un mur de soutènement en glakis. Mais la situation s'est aggravée car les résidences secondaires qui étaient peu nombreuses se sont multipliées. Certaines d'entre elles sont construites à quelques pas du sommet de la petite falaise et entre cette dernière et la murette de protection. Aujourd'hui la côte de Cercina est entièrement occupée par les résidences secondaires.

En 2009, la protection contre l'érosion marine s'est poursuivie. Notre travail de terrain en été 2009 nous a permis d'observer l'avancement des travaux à Cercina. Il s'agit d'un projet élaboré par le Ministère de l'Équipement. Les travaux effectués consistent à un enrochement sur la petite falaise de Cercina pour lutter contre l'invasion marine et l'avancée de la mer vers les résidences secondaires.

L'enrochement a couvert la petite falaise et il n'y a plus de plage. L'accès à la mer est devenu un peu difficile à cause de l'enrochement. C'est pourquoi un escalier est construit dans les pierres.

Avant la fin des travaux en 2009, en comparant entre la partie aménagée et la falaise encore naturelle, nous avons remarqué l'érosion de la falaise de Cercina haute de près de 2 mètres. Nous avons observé le développement des encoches creusées par les vagues dans la partie inférieure de la falaise formée de roches à dominance argileuse. Cette érosion menace la partie supérieure de s'écrouler et entraîne l'avancée de la mer. C'est pourquoi l'enrochement apparaît nécessaire dans ce cas, bien que sur le plan esthétique, la falaise naturelle est beaucoup plus belle que celle aménagée par l'enrochement. (Kebaïli Tarchouna 2013).

Outre les moyens de protection utilisés par l'État, nous remarquons des initiatives privées de la part des propriétaires des résidences secondaires pour protéger leurs constructions par des petits murs. Mais ces murs ne font qu'aggraver l'érosion marine parce qu'ils sont construits sur le bas de la plage, perturbant ainsi la dynamique locale de la mer. Par conséquent, ils sont endommagés par l'érosion marine. Ces initiatives privées ont augmenté après l'évènement du 16 février 2010, quand la mer a envahi une grande partie du littoral de Kerkena pendant les 6 heures d'une haute marée, et surtout après la réapparition de ce phénomène le 1^{er} mars 2010. Elles perturbent la dynamique sédimentaire de la plage, par conséquent l'érosion marine va s'accélérer. D'autre part la protection de cette manière constitue un enlaidissement du paysage et une privatisation de la mer.

Sur la côte orientale et septentrionale, où sont localisés les villages et où l'altitude est très basse et le rivage est façonné dans des roches tendres, la situation est plus grave et le paysage est dominé par les sebkhas. Nous avons observé quelques palmiers dégradés sur l'estran, touchés par la mer à marée haute, témoignant ainsi de la continuation du processus de recul du trait de la côte. De plus, l'érosion marine est très efficace parce que les roches sont tendres. D'ailleurs, elle est responsable d'un petit recul du trait de côte par l'attaque des pieds des marabouts situés sur ce rivage comme Sidi Massaoud à El Ataya, Sidi Amor à Kellabine et Sidi Saïd à Ouled Bou Ali. Pour protéger le littoral de l'invasion marine, on a installé des enrochements sur le rivage de Remla et Ouled Bou Ali. Ces enrochements favorisent un certain amortissement des vagues grâce à la pénétration des eaux dans les vides qui séparent les blocs dont ils sont formés, mais ils ont aussi des impacts négatifs. Ils ont entraîné un enlaidissement du paysage et une accentuation du risque d'inondation par la stagnation des eaux pluviales dans la sebkha.

La protection du littoral de Kerkena est indispensable malgré ses impacts négatifs car cet archipel risque de perdre une grande partie des terres basses, en particulier les sebkhas, en faveur de la mer. « Une élévation du niveau marin même de quelques décimètres serait lourde de conséquences. Elle entraînerait de profondes modifications dans les paysages ainsi que dans le tracé du rivage. » D'importants espaces risquent de se trouver annexés à la mer. Ceci est le cas en particulier des nombreux marais maritimes et des sebkhas. » (Oueslati 2004, p 513).

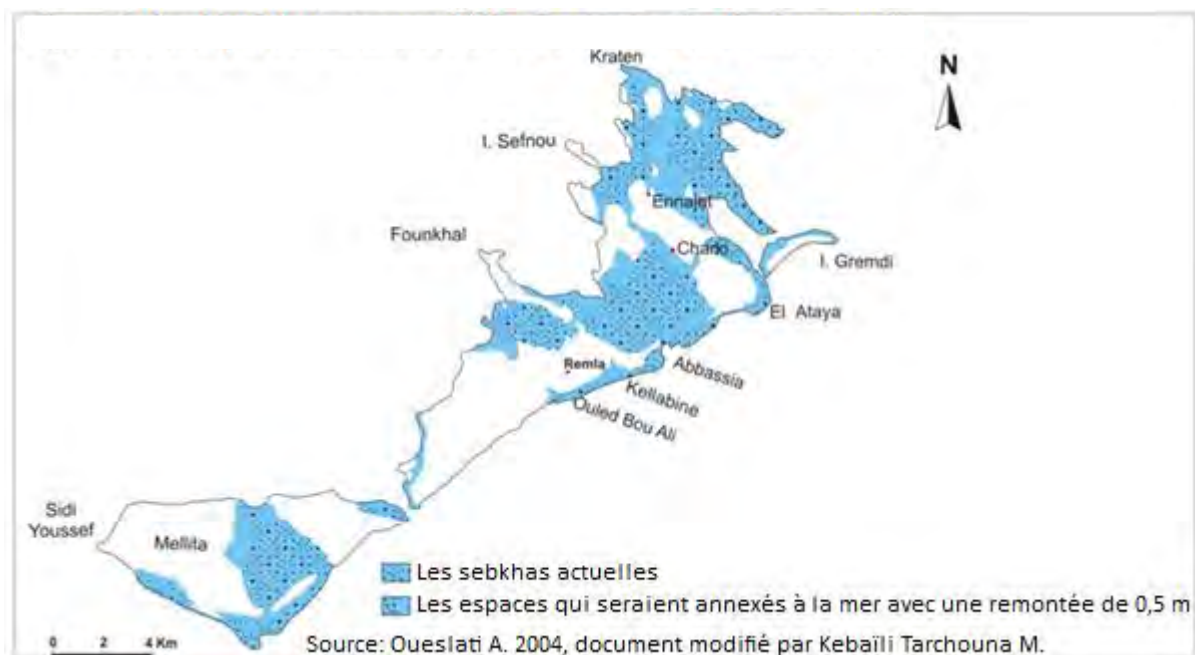


Figure 5. L'archipel de Kerkena et l'élévation annoncée du niveau marin

D'après cette hypothèse et la figure 5, les résidences construites sur les côtes basses et à côté des sebkhas risquent d'être envahies par la mer, la superficie de l'archipel serait plus petite et le nombre d'îlots serait plus grand. Toutes les sebkhas et les terres basses qui les entourent seraient annexées à la mer, c'est-à-dire l'archipel risque de perdre plus que le tiers de ses terres en faveur de la mer dans le cas d'une élévation du niveau marin de 0,5 mètre.

4. Conclusion

L'insularité est à l'origine de l'extension des résidences secondaires. La majorité des kerkeniens du continent est attachée à l'archipel et préfère y passer les vacances d'été. Pour cela ces kerkeniens ont construit des résidences secondaires dans les villages participant à leur extension, et dans des nouveaux sites occupant le bord de la mer. Le littoral est de plus en plus convoité et les terrains sont de plus en plus rares à cause de l'insularité. Les kerkeniens du continent qui construisent des résidences secondaires, expriment leur attachement à l'archipel et leurs enjeux économiques et fonciers.

L'extension continue des constructions au bord de la mer, nous laisse penser que dans l'avenir tout le littoral de Kerkena serait occupé par le bâti, et que la pression de l'Homme sur le milieu serait de plus en plus grande. La construction dans des espaces sensibles comme les sebkhas et le rivage a des impacts négatifs sur le milieu, à cause de la vulnérabilité de l'archipel de Kerkena résultant de sa subsidence et de sa basse altitude. La salinisation des sols et l'érosion marine se sont accentuées ces dernières années, car l'Homme n'a pas tenu compte de cette vulnérabilité en étendant l'espace bâti. Il a construit sur la falaise participant à sa dégradation et à l'érosion marine, et sur le bas des plages qui sont déjà très étroites et qui s'alimentent des débris des roches. Ainsi l'action anthropique a

perturbé la dynamique locale de la mer, a contribué à l'accentuation de l'érosion marine et l'aggravation des risques du changement du trait de côte et de l'avancée de la mer.

Ces risques qui menacent l'archipel ont nécessité l'intervention de l'État par des projets de protection du littoral. Certains de ces projets sont déjà exécutés, d'autres ne le sont pas encore et l'étude est en cours. Mais la situation à Kerkena ne pourrait pas attendre, il est urgent de protéger cet archipel et de contrôler la construction sur le littoral, car en cas de l'élévation du niveau de la mer de quelques décimètres cet archipel risque de perdre plus que le tiers de ses terres en faveur de la mer, en particulier les côtes basses et les sebkhas.

Bibliographie

- Chelbi F (1995), « *L'archéologie sous-marine* », dans La Tunisie, carrefour du monde antique, Dossier Archéologique n° 200. p 128-133.
- Miossec A (1994), « *Défense des côtes ou protection de l'espace littoral. Quelles perspectives ?* » Acte de colloque international (1991). Cahier nantais. Nantes, 364 pages.
- Miossec A (1998), « *Les littoraux entre nature et aménagement* » ; Paris édition SEDES, collection Campus, 192 pages.
- Kebaïli Tarchouna M (2013), « *L'archipel de Kerkena : organisation de l'espace et aménagement* », thèse de doctorat en géographie sous la direction du professeur Abdelkarim Daoud, Université de Tunis, Faculté des Sciences Humaines et Sociales, 340 p.
- Oueslati A (1986), « *Jerba et Kerkna île de la côte orientale de la Tunisie, leur évolution géomorphologique au cours du quaternaire* », publication Université de Tunis (210 pages).
- Oueslati A, Pascoff R, Slim H et Troussset P (1987), « *Déplacement de la ligne de rivage en Tunisie d'après les données de l'archéologie à l'époque historique* » ; Collection CNRS Déplacements des lignes de rivage en Méditerranée, p 67-85.
- Oueslati A (1993), « *Les côtes de la Tunisie : Géomorphologie et environnement et aptitudes à l'aménagement* » ; Publication de la Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Tunis, 387 p.
- Oueslati A (1994), « *Les côtes de la Tunisie ; Recherches sur leur évolution au Quaternaire* » ; Publication de la Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Tunis, 402 p.
- Oueslati A (1995), « *Les îles de la Tunisie* » ; Publication CERES, 368 p.
- Oueslati A (2004), « *Littoral et aménagement en Tunisie* » Publication de la Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Tunis, 526 p.
- Paolo Antonio Pirazzoli (1993), « *Les littoraux* » ; Collection Géographie d'aujourd'hui, édition Nathan, Paris, 191p.
- Paskoff R (1981), « *L'érosion des côtes* » ; PUF, collection Que Sais-Je ?, 128 p.
- Paskoff R et Sanlaville P. (1983), « *Les côtes de la Tunisie : variation du niveau marin depuis le Tyrrhénien* » ; Maison Orient Méditerranéenne, 192 p.

Mise en perspective de la vulnérabilité des enjeux à l'érosion et aux différents types d'inondation sur la partie sableuse du littoral du Languedoc-Roussillon

Paul Sauboua¹, Hugues Heurtefeux¹

1. EID Méditerranée, Pôle littoral

165 avenue Paul Rimbaud, F-34184 Montpellier Cedex 4, France

psauboua@eid-med.org ; hheurtefeux@eid-med.org

RESUME.

Cette étude a permis d'évaluer la vulnérabilité des enjeux à l'érosion, la submersion marine et aux autres types d'inondation sur le littoral du Languedoc-Roussillon. Réalisée en 2013, elle a mobilisé les résultats de travaux effectués dans le cadre du CPER 2007-2013 par l'EID Méditerranée et le BRGM ainsi que des données produites par les services de l'Etat, notamment de la DREAL LR.

L'évaluation de la vulnérabilité des enjeux sur le littoral s'est faite en croisant zonages d'aléas et enjeux géoréférencés par traitement sous logiciel de SIG ArcGis v°10.0. Dans cette étude, ce sont plusieurs aléas présents sur le littoral qui ont été étudiés au travers d'une analyse multicritères, dans laquelle des critères quantitatifs ont été précisés au moyen de critères qualitatifs. Les zonages de vulnérabilité ont été croisés à 18 catégories d'enjeux réparties en trois thématiques : santé humaine, économie, lié à l'environnement. Le long des 190 km de la côte sableuse du Languedoc-Roussillon, ce sont près de 94 000 bâtiments et 3 641 km de réseaux qui ont été étudiés. La représentation des résultats s'est faite au moyen d'un atlas dans lequel le linéaire étudié a été subdivisé en 38 secteurs. Pour chacun de ces secteurs, la vulnérabilité à l'érosion et à la submersion marine et aux autres types d'inondation ont fait l'objet de deux cartes employables au 1 : 25 000. Ces cartes ont été associées à des histogrammes donnant pour chacune des 18 catégories d'enjeux son importance vis-à-vis du reste du littoral et sa valeur de vulnérabilité globale.

ABSTRACT.

This study has permitted to define stakes vulnerability to erosion, sea submersion and others types of flood on coastal areas in Languedoc-Roussillon. Realized in 2013, this work has integrated results from studies carried out into the CPER 2007-2013 by EID Méditerranée and BRGM with data from State structures too, as DREAL LR.

Stakes vulnerability evaluation on coastal areas has been realized by superimposition of hazard zonings and georeferenced stakes with ArcGis v°10.0 GIS software. Concerning the hazards, this study was a multi-criteria analysis. Vulnerability zonings have been crossed with 18 stakes categories split in three themes: human health, economy and linked to environment. On a coastline of 190 km, it represents almost 94 000 buildings and 3 641 km of networks. Sand Languedoc-Roussillon coastline has been subdivided in 38 sectors and results are presented on an atlas for each sector. Two maps at 1:25 000 scale present for each sector erosion vulnerability and sea submersion and other types of flood vulnerability. With these maps, the overall vulnerability of each stakes category and its significance as regard to the rest of the coastline are given on histograms.

MOTS-CLES : vulnérabilité, érosion, submersion marine, analyse multi-critères, Languedoc-Roussillon

KEYWORDS: vulnerability, erosion, sea submersion, multi-criteria analysis, Languedoc-Roussillon

1. Introduction

Les dernières orientations stratégiques de gestion du littoral en Languedoc-Roussillon datant de la Mission Interministérielle d'Aménagement du Littoral en 2003, il paraissait nécessaire dans le cadre du Contrat de Projet Etat-Région (CPER) 2007-2013 de proposer des orientations de gestion actualisées. Ce travail avait donc pour objectif de définir la vulnérabilité des enjeux présents sur ce littoral au regard des aléas érosion et submersion marine présents à l'horizon 2030, ainsi que des autres types d'inondation.

L'étude s'est portée sur les communes littorales ayant une façade maritime entre le Racou (Pyrénées Orientales) et le Grau-du-Roi (Gard), correspondant à un linéaire côtier sableux de près de 190 kilomètres. A partir de la définition de la vulnérabilité du territoire (ii), la méthode employée a été basée sur la caractérisation précise des enjeux présents (iii). Le croisement de ces données (iv) a permis l'obtention de résultats (v) représentés sous forme de cartes et d'histogrammes, donnant pour chaque enjeu sa valeur de vulnérabilité globale et son importance vis-à-vis du reste du littoral.

2. Définition de la vulnérabilité du territoire aux aléas érosion, submersion marine et aux autres types d'inondation

2.1. Méthode d'évaluation de la vulnérabilité

2.1.1. Recours à une analyse multi-critères

La vulnérabilité exprime et mesure le niveau de conséquences prévisibles de l'aléa sur les enjeux (MEDDE, 2009). Cette étude a été basée sur une analyse multi-critères afin de préciser les valeurs de vulnérabilité aux aléas érosion et submersion marine obtenus depuis des travaux du BRGM et de la SOGREAH effectués dans le cadre du CPER en 2011. Il a été décidé d'employer des facteurs additionnels à ces résultats afin de rendre cette étude plus complète.

Pour l'érosion, il s'agit de données relatives à l'existence d'aménagements de protection douce sur le littoral. De la même façon, au-delà de la vulnérabilité à la submersion, c'est la question de la vulnérabilité aux inondations qui doit être considérée dans une perspective de préconisations de gestion. Or en zones littorales basses, qui composent l'essentiel du littoral du Languedoc-Roussillon, d'autres aléas peuvent entraîner des inondations. Les crues, les élévations du niveau des lagunes retro-littorales et les remontées de nappes sont autant de facteurs pouvant générer des inondations. Ils se produisent d'ailleurs souvent de manière concomitante avec les submersions marines.

2.1.2. Eléments de cadrage

La méthode employée dans cette étude avait pour objectif de pouvoir classer par priorité les secteurs littoraux sur lesquels programmer des opérations d'aménagement. Dans ce sens, les résultats ont vocation à permettre la définition de grandes orientations de gestion à moyen terme par comparaison entre secteurs. Ainsi, il ne s'agit pas d'apporter des préconisations de gestion de façon locale ni d'être mis en comparaison avec des documents réglementaires de planification tels que les Plans de Prévention des Risques (PPR).

Il a été décidé dans cette étude de présenter la vulnérabilité du littoral du Languedoc-Roussillon à l'horizon 2030. Ainsi, l'échelle temporelle choisie n'est pas celle de l'action mais de la préparation à

l'action. Concernant l'échelle de réflexion, la sectorisation en 38 unités hydrosédimentaires du Racou (Pyrénées Orientales) au Grau-du-Roi (Gard) de Brunel (2013) a été employée. Ces unités sont des portions de littoral au comportement relativement homogène de l'avant côte entre 1895 et 1984, séparées par des limites naturelles ou anthropiques.

2.2. Vulnérabilité à l'érosion

La note globale de vulnérabilité à l'érosion a été déterminée par la valeur de vulnérabilité à la distance au trait de côte, de laquelle est déduite une valeur méliorative d'aménagement de protection douce.

$$\text{Vuln. à l'érosion} = \text{Vuln. distance au trait de côte} - \text{Val d'aménagement de protection douce}$$

2.2.1. Critère quantitatif : distance au trait de côte

Cette étude s'est appuyée sur les résultats du travail de la SOGREAH (2011) relatif à l'actualisation de l'aléa érosion en Languedoc-Roussillon et réalisée dans le cadre du CPER. Ce travail a permis d'identifier au 1 : 25 000 la position supposée du trait de côte en 2030 pour l'ensemble du Golfe du Lion. A partir de ce trait de côte supposé, cinq classes ont été définies et une valeur de vulnérabilité a été attribuée en fonction de l'éloignement au trait de côte. La classification a été basée sur la valeur des 100 mètres, qui d'après le paragraphe III de l'article L 146-4 de loi n°86-2 du 3 janvier 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral, peut être considérée comme la distance en deçà de laquelle les enjeux présentent une vulnérabilité à l'érosion.

2.2.2. Critères qualitatifs : présence et état d'aménagements de protection douce

Une action du CPER avait permis en 2010 d'obtenir une évaluation des aménagements de protection douce sur le littoral du Languedoc-Roussillon (EID, 2011). 215 aménagements, apports sableux et maillages de ganivelles, participant à la gestion morphologique du littoral y avaient été étudiés. L'existence de tels aménagements de protection douce sur un secteur permet à celui-ci de mieux appréhender le recul, influant à partir d'une certaine largeur de plage sur la vitesse de son recul. Ce paramètre a donc été pris en compte dans l'attribution de la valeur de vulnérabilité à l'érosion.

La présence de ces ouvrages a permis d'affecter une valeur méliorative à la valeur de vulnérabilité attribuée aux enjeux vis-à-vis de leur distance au trait de côte. Cette valeur méliorative dépendait de la nature du ou des aménagements présents, ainsi que de leur état et efficacité.

2.3. Vulnérabilité à la submersion et aux autres types d'inondation

2.3.1. Critères employés, définition d'une note globale de vulnérabilité aux différents types d'inondation

Dans une perspective de préconisations de gestion, la réflexion sur la vulnérabilité aux aléas littoraux ne peut être limitée à l'aléa submersion marine, ni à la frange littorale. Le contexte géomorphologique du Languedoc-Roussillon se traduit par une vulnérabilité des enjeux littoraux à la submersion marine, mais aussi aux crues, aux élévations du niveau des lagunes et aux remontées de

nappes. Ces aléas ont donc aussi été pris en compte dans cette étude. En outre, les zones retro-littorales peuvent aussi être impactées par ces aléas.

Pour la zone littorale, la note globale de vulnérabilité aux différents types d'inondation a été obtenue à partir de l'évaluation de plusieurs critères :

- Les hauteurs d'eau et périodes de retour des submersions. Ce critère a été précisé au moyen d'un facteur historique des tempêtes, fonction du nombre d'évènements météo-marins qu'a subi le secteur. Ce facteur a été obtenu à partir des données CatNat depuis 1982.

- La localisation des zones potentiellement inondables par crue depuis l'atlas des zones inondables (DREAL LR, 2010). Un facteur historique des tempêtes a aussi été ajouté à ce critère.

- La localisation en zones sur lesquelles des inondations dues aux élévations du niveau des lagunes sont possibles, à partir de l'atlas des zones inondables par submersion marine (DREAL LR, 2009).

- La localisation en zones sur lesquelles des inondations par remontée de nappes avaient déjà été observées à partir d'une étude encadrée par le Service Maritime et de Navigation du Languedoc-Roussillon (Lapeyre, 2004).

En zone retro-littorale la note globale de vulnérabilité aux différents types d'inondation a été obtenue à partir de l'évaluation des mêmes critères, excepté pour la submersion marine. Ne disposant pas de données LIDAR pour ces secteurs, l'évaluation s'est faite à partir du recensement des zones inondées par submersion marine lors d'évènements météo-marins (Lapeyre, 2004).

La note de vulnérabilité finale est donc fonction de l'aléa submersion marine et des autres aléas pouvant générer des inondations, la valeur relative à la submersion ayant une part plus importante. Le critère de fréquence probable de retour des évènements a aussi été intégré par l'emploi des données CatNat sur 30 ans.

2.3.2. Description des critères quantitatifs : hauteurs d'eau et périodes de retour des submersions

La plupart des études d'évaluation de la vulnérabilité à la submersion marine ne prennent en compte que l'aléa de référence, c'est-à-dire l'aléa de période de retour centennale. Or la probabilité d'occurrence est un paramètre aussi important à la définition de l'aléa que son intensité. Les dommages causés par des évènements de période de retour plus faible ne sont donc pas pris en compte alors que leur fréquence étant plus élevée, si les dommages induits sont importants il semble nécessaire de prendre en compte leur influence.

Pour ces raisons, l'aléa submersion a été étudié aux périodes de retour annuelle, décennale, cinquantennale et centennale dans cette étude. Pour les trois premières périodes de retour, les travaux réalisés se sont appuyés sur les résultats du BRGM (2011). Le zonage pour la période de retour centennale a été effectué dans cette étude en se basant sur les préconisations de la DREAL LR (2012) et à partir de données LIDAR de 2009 constituées d'un semis de points d'une maille de 5m.

Pour chaque surface de territoire, en fonction de son altitude, le travail préalable aura permis par traitement sous logiciel de SIG ArcGis v°10.0 d'y attribuer une valeur de vulnérabilité à la submersion marine, pour chacune des périodes de retour prises en compte. La valeur de vulnérabilité globale a ensuite été construite à partir de ces différentes valeurs et de leurs probabilités d'occurrence respectives. Elle correspond dans ce sens à la vulnérabilité probable pour une année.

Pour cela, il n'est considéré que l'évènement qui aura la plus grande intensité sur un an. Il est fait en outre l'hypothèse qu'il n'y a par an qu'un seul et unique évènement météo-marin générant un phénomène de submersion induisant des dommages.

Ainsi, soient : $P_{\text{évènement}}$: la probabilité de survenue d'un évènement sur une année, $P_{\text{évènement}} = 1$

P_X : la probabilité de survenue d'un évènement de période de retour X , X pouvant être centennal, cinquantennal, décennal ou annuel, $P_X = \frac{1}{X}$

Etant donné qu'il n'y a qu'un seul évènement dommageable par an, l'évènement est donc considéré comme centennal, cinquantennal, décennal ou annuel et ces divers évènements ne peuvent exister simultanément au cours d'une année. On obtient par conséquent :

$$P_{\text{évènement}} = P_{\text{centennal}} + P_{\text{cinquantennal}} + P_{\text{décennal}} + P_{\text{annuel}}$$

$$1 = \frac{1}{100} + \frac{1}{50} + \frac{1}{10} + P_{\text{annuel}}$$

$$P_{\text{annuel}} = 1 - \frac{1}{100} - \frac{1}{50} - \frac{1}{10} = \frac{100 - (1 + 2 + 10)}{100} = \frac{87}{100}$$

De la même façon, soient : Vuln. globale, la valeur de vulnérabilité globale

Vuln. $_X$, la valeur de vulnérabilité pour l'aléa en période de retour X , X pouvant être centennal, cinquantennal, décennal ou annuel

$$\text{Vuln. globale} = P_{\text{centennal}} \times \text{Vuln. centennale} + P_{\text{cinquantennal}} \times \text{Vuln. cinquantennale} + P_{\text{décennal}} \times \text{Vuln. décennale} + P_{\text{annuel}} \times \text{Vuln. annuelle}$$

$$\text{Vuln. globale} = \frac{1}{100} \times \text{Vuln. centennale} + \frac{1}{50} \times \text{Vuln. cinquantennale} + \frac{1}{10} \times \text{Vuln. décennale} + \frac{87}{100} \times \text{Vuln. annuelle}$$

C'est donc cette valeur de vulnérabilité globale à la submersion marine qui a été précisée par l'historique local des tempêtes et les valeurs de vulnérabilité aux autres aléas inondation.

3. Définition des enjeux présents sur le littoral du Languedoc-Roussillon

3.1. Identification des catégories d'enjeux

Par cohérence entre les documents d'orientations de gestion, les catégories d'enjeux utilisées ont été les mêmes que celles préconisées par la directive européenne sur l'évaluation et la gestion des risques d'inondation (MEDDE, METL, 2012), et celles employées pour l'évaluation préliminaire des risques inondations (MEDDE, 2012). Le patrimoine culturel, les zones Natura 2000 et ZNIEFF n'ont pas été traités. Les catégories d'enjeux étudiés appartiennent donc à trois différentes thématiques : les enjeux de santé humaine, les enjeux économiques et les enjeux liés à l'environnement.

Les données géoréférencées sur les enjeux ont été obtenues à partir de bases de données de l'IGN, de l'INSEE et de services de l'Etat. La définition des enjeux a été réalisée en grande partie au moyen de la BD-TOPO® V2.1 de l'IGN (2011). Les données de l'INSEE ont permis de préciser des éléments relatifs à la population et aux activités économiques (INSEE 2009 ; 2011) et celles des services de l'Etat les enjeux liés à l'environnement (DREAL LR, 2011 ; MEDDE, 2012).

3.2. Enjeux de santé humaine

La vulnérabilité des personnes a été évaluée au travers de la population présente sur le territoire, ainsi que du nombre de bâtiments d'hébergement, d'accueil et d'appui à la population. Huit indicateurs ont ainsi été étudiés :

- **Population** : Population habitant sur un secteur considéré comme vulnérable ;
- **Population vivant dans des habitations de plain-pied** : Population habitant sur un secteur considéré comme vulnérable et sans espace refuge ;
- **Habitations** : Nombre d'habitations en secteur vulnérable ;
- **Habitations de plain-pied** : Nombre d'habitations en secteur vulnérable sans espace refuge ;
- **Hébergements touristiques légers** : Nombre de campings et villages de vacances ;
- **Etablissements publics administratifs et d'appui à la population** : Nombre de bâtiments administratifs et militaires ;
- **Etablissements publics d'enseignement** : Nombre d'établissements d'enseignement primaire, secondaire et supérieur ;
- **Etablissements de type hospitalier** : Nombre d'hôpitaux, d'établissements thermaux ;

3.3. Enjeux économiques

Six indicateurs ont été étudiés pour les enjeux économiques :

- **Activités économiques** : Nombre d'établissements présents en secteur vulnérable ;
- **Emploi** : Effectifs salariés présents en secteur vulnérable ;
- **Bâti** : Nombre de bâtiments de plus de 20m², sans distinction de fonction ;
- **Réseau routier** : Mètres linéaires de voies de communications primaires et secondaires ;
- **Réseau ferré** : Mètres linéaires de voies ferrées ;
- **Conduites de matières premières** : Mètres linéaires de conduite ou tapis roulant ;

3.4. Enjeux liés à l'environnement

De par les préconisations faites par les services de l'Etat ce sont 4 types d'indicateurs qui ont été étudiés. Les installations nucléaires de base et les centrales nucléaires n'y figurent pas car aucune de ces infrastructures n'est présente sur le territoire étudié :

- **Réservoirs d'eau et stations de pompage** : Nombre de réservoirs et de stations de pompage ;
- **Stations de Traitement des Eaux Usées (STEU)** : Nombre de STEU de capacité supérieure à 200 Equivalents Habitants ;
- **Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE)** : Nombre d'ICPE soumises à autorisation ;
- **Etablissements SEVESO seuil haut** : Nombres d'établissements SEVESO classés « seuil haut ».

4. Attribution d'une valeur de vulnérabilité aux différents enjeux

Etant donné les différentes catégories d'enjeux étudiées ce sont plus de 94 000 enjeux surfaciques qui ont été testés et 3 641 kilomètres de réseaux ferrés, routiers et de conduites de matières premières. C'est en outre un territoire sur lequel la population dépasse les 202 000 individus (INSEE, 2009). La figure 1 présente les différentes étapes ayant permis l'attribution d'une valeur de vulnérabilité globale à chacun des 18 types d'enjeux.

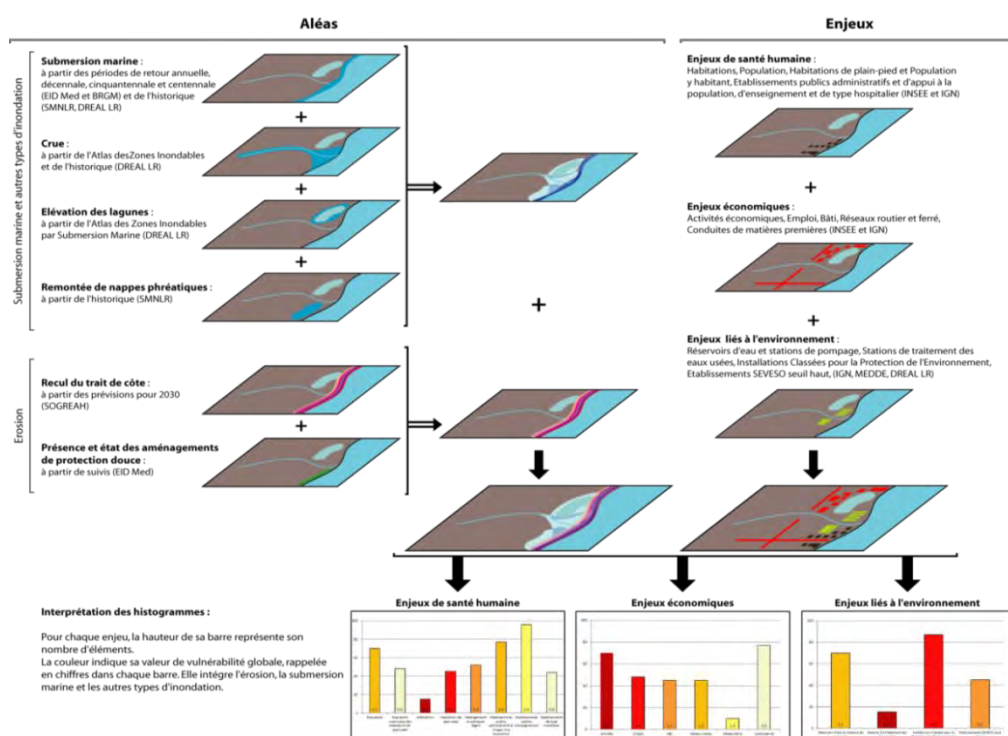


Figure 1 : Processus d'attribution d'une valeur de vulnérabilité globale aux différents enjeux

La définition des éléments pris en compte pour l'évaluation de la vulnérabilité à l'érosion d'une part, et de la vulnérabilité à la submersion marine et aux autres types d'inondation d'autre part, a permis de générer une couche de vulnérabilité globale. Intégrant les informations liées à l'érosion et aux aléas inondation, cette couche est constituée de pixels de 5 mètres de côté auxquels ont été attribués une valeur de vulnérabilité unique. Elle couvre un territoire de près de 66 123 hectares. Par traitement sous logiciel d'information géographique ArcGis v°10.0, les couches d'enjeux ont été superposées à la couche de vulnérabilité globale.

Pour les enjeux correspondant à des bâtiments, il a été attribué à chacun d'entre eux la valeur de vulnérabilité la plus élevée des pixels intersectant leur emprise. Ce choix méthodologique a été fait car en zone d'urbanisation dense, les vulnérabilités peuvent être sous évaluées. En effet si peu de points du maillage du LIDAR ont atteint le sol, alors une zone vulnérable ne sera pas identifiée en totalité comme telle. Une autre méthode a été employée pour des enjeux de surface plus élevée. Les réseaux, les hébergements touristiques légers et les données de population de 4 hectares, couvrent des surfaces suffisantes pour obtenir une vulnérabilité moyennée. Disposant d'une meilleure couverture LIDAR, une moyenne de la vulnérabilité globale pour chacun de ces enjeux a été définie.

5. Présentation des résultats au moyen d'un atlas

L'ensemble des résultats a ensuite été traité par secteur d'étude. Pour chacun des 38 secteurs, le nombre d'enjeux présent par catégorie a été obtenu ainsi qu'une note de vulnérabilité. Les résultats ont été présentés sous forme de cartes accompagnées d'histogrammes :

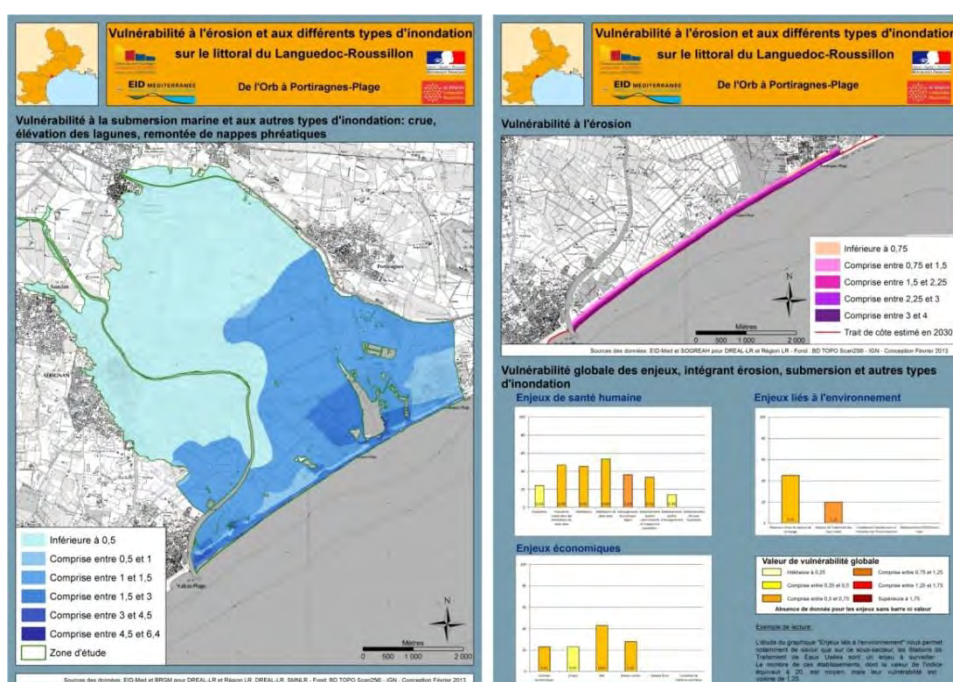


Figure 2 : Représentation des résultats pour un secteur d'étude

Conclusion

Sur le plan méthodologique, cette étude est apparue intéressante par l'ensemble des paramètres pris en compte, et notamment pour les aléas. Il s'agissait dans ce sens d'une étude multi-aléas et pour laquelle plusieurs périodes de retour ont été mobilisées pour la submersion marine. Ces éléments théoriques ont en outre été précisés de manière sectorielle par un historique des événements passés sur 30 ans. Cette approche a dans ce sens paru pertinente puisqu'elle a été citée dans le récent guide méthodologique sur les PPR Littoraux (MEDDE, 2013).

L'interprétation des résultats a permis de déterminer les secteurs sur lesquels se produiraient le plus de dommages de façon globale, et les secteurs sur lesquels se produiraient les dommages les plus importants pour des catégories d'enjeux en particulier. Ces deux types d'information, qui se recoupaient sur les secteurs prioritaires, ont permis aux décideurs la définition de grandes orientations de gestion par comparaison entre secteurs. Des zones particulièrement exposées ont pu en outre être identifiées au sein de chacun des 38 secteurs.

Remerciements:

Cette étude a été effectuée à partir de financements de l'Etat, de la DREAL Languedoc-Roussillon et de la Région Languedoc-Roussillon.

Références bibliographiques

- Brunel C., (2013). *Définition des limites des cellules de l'atlas des bilans sédimentaires*. Laboratoire CEFREM – Université de Perpignan Via Domitia.
- BRGM, (2011). *Evaluation des submersions marines lors des tempêtes en Languedoc-Roussillon – Validation de la méthodologie*. Septembre 2011.
- DREAL Languedoc-Roussillon (2009). *Atlas numérique des zones inondables par submersion marine – Littoral sableux du Languedoc-Roussillon – Elaboration d'un Système d'Information Géographique*. Janvier 2009.
- DREAL Languedoc-Roussillon (2010). *Atlas des zones inondables – Système d'information géographique – Base de données numériques géographiques – Notice*. Avril 2010.
- DREAL Languedoc-Roussillon (2011). *Installations Classées pour la Protection de l'Environnement*. <http://adelie.application.developpement-durable.gouv.fr/syntheseFiche.do?fiche=14251&visu=ok&page=1>
- DREAL Languedoc-Roussillon (2012). *Guide régional d'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux Languedoc-Roussillon*. Novembre 2012.
- EID Méditerranée, (2011). *Annexe Cartographique- Représentation des résultats de l'évaluation des aménagements de protection douce par commune*. Février 2011.
- IGN, (2011). *BD TOPO® Version 2 – Descriptif de contenu*. Janvier 2011.
- INSEE, (2009). *RFL 2009 Densité de population en Languedoc-Roussillon*. http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=0&ref_id=donnees-carroyees&page=donnees-detaillees/donnees-carroyees/r91.htm
- INSEE, (2012). *Nombre d'établissement et effectifs salariés par secteur d'activité et tranche d'effectifs salariés au 31 décembre 2010*. http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=99&ref_id=etab-eff-sal-par-sates
- Lapeyre, J., (2004). *Mise en place de l'atlas cartographique des zones inondables par submersion marine du Languedoc-Roussillon*. Mémoire de Master, Université de Perpignan.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, et de l'Energie (2009). *Prim.net - Bouquet prévention risques majeurs. Glossaire risques majeurs*. <http://www.risquesmajeurs.fr/glossaire-risques-majeurs>
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (2012). *Principaux enseignements de la première évaluation des risques d'inondation sur le territoire français – EPRI 2011*. Mars 2012.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (2012). *Portail d'information sur l'assainissement communal*. <http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/services.php>
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (2013). *Guide méthodologique : Plans de prévention des risques littoraux*. Décembre 2013.

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Ministère de l'Egalité des Territoires et du Logement (2012). Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en œuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. *Bulletin officiel* n°2012/14 du 10 août 2012, pp101-140.

SOGREAH, (2011). *Actualisation de l'aléa érosion en Languedoc-Roussillon* - Rapport provisoire. Juillet 2011.

THEMATIQUE
REPRESENTATIONS

REPRESENTATIONS
THEMATIC

Entre conscience collective et expertise profane : connaissances et perceptions sociales liées à l'érosion marine à Lacanau en Gironde

Nicolas Rocle¹, Bruno Bouet¹, Silvère Chassériaud¹

1. UR ADBX, Irstea – Centre de Bordeaux
50 avenue de Verdun, 33612 Cestas, France

nicolas.rocle@irstea.fr ; bruno.bouet@irstea.fr ; silvere.chasseriaud@irstea.fr

RESUME.

Partant du constat que les discours et pratiques actuels participent du maintien et du renouvellement d'un modèle de gestion des risques littoraux essentiellement fondé sur les « savoirs experts », cet article s'intéresse aux « savoirs profanes » relatifs à l'érosion marine sur la commune de Lacanau en Aquitaine. Partant d'une enquête par questionnaire réalisée en 2013 et d'une analyse de littérature grise, il démontre d'une part qu'un socle de savoirs profanes portant sur l'érosion marine à l'échelle locale s'observe et converge en outre avec les savoirs experts disponibles, d'autre part que les points de vue citoyens recueillis rejoignent en grande partie les préoccupations gestionnaires actuelles. Cette contribution vise ainsi à discuter des obstacles institutionnels à la mise en place d'une gouvernance participative dans la définition et la mise en œuvre des stratégies d'adaptation aux risques environnementaux.

ABSTRACT.

French public management of risk currently depends upon settled assumptions that local citizens either lack knowledge about risk or are likely to reason on the basis of their emotions and in the short-term. Consequently, they are frequently excluded from decisional arenas making adaptation choices, such as planned retreat from danger (here coastal erosion) or re-location. Indeed, governing practice on risk management tends to prioritize expert knowledge in coastal geomorphology in the taking of these decisions. However, based on a questionnaire survey carried out with over 500 individuals (inhabitants, professionals and tourists) in Lacanau, Aquitaine coastline, we found that, on the contrary, citizens have extensive knowledge about risk. Moreover, their knowledge maps onto that held by scientists. Not only do they know about coastal erosion, but they can articulate their knowledge in synthetic ways and envisage long-term solutions to problems. Arguments for their exclusion based on lack of knowledge cannot therefore be sustained. Our findings thus go towards removing one of the institutional obstacles blocking change towards participatory governance for risk management.

MOTS-CLES : environnement, risques, érosion marine, savoirs profanes, gouvernance participative, Aquitaine

KEY WORDS: environment, natural hazards, coastal erosion, lay knowledge, participatory governance, Aquitaine (France)

1. Introduction

Face aux défis soulevés par le changement climatique, la réduction des vulnérabilités particulièrement élevées des zones côtières (Adger *et al.*, 2005) est devenue une priorité mondialement partagée²⁸. Pour ce faire, diverses options d'adaptation sont envisagées (IPCC, 2014) sur ces « territoires à risques » (Meur-Férec et Morel, 2004) : l'ajustement (*accommodation*) des systèmes à un environnement nouveau ou changeant (par rehausse des habitations, introduction de nouvelles cultures...) ; la protection (digues, enrochements) des enjeux exposés ; et enfin le repli stratégique (ou « relocalisation des biens et des activités » - *planned retreat*). « Cette méthodologie de gestion de l'espace consiste à déplacer, à reculer, les enjeux présents sur le territoire à une distance suffisante, vers l'arrière-pays, afin de mettre à l'abri ceux-ci des risques qu'ils peuvent encourir face à la mer » (Cousin, 2011). Si cette stratégie n'a trouvé jusqu'à présent que peu de traductions concrètes en France, un appel à projets national « Expérimentation de la relocalisation des activités et des biens » a été lancé par le Ministère en charge de l'Ecologie en mars 2012. Sous l'égide et la coordination du Groupement d'Intérêt Public (GIP) Littoral Aquitain, trois sites pilotes sont aujourd'hui dépositaires de ce projet en Aquitaine : les communes de Lacanau, de La Teste-de-Buch (Gironde) et de Labenne (Landes). La station balnéaire de Lacanau-Océan, emblématique des situations de tension entre un impératif socio-économique de maintien d'une attractivité touristique et des vulnérabilités inhérentes au phénomène d'érosion marine, constitue un terrain propice à l'analyse de ces tensions et des politiques élaborées pour y faire face. Cette communication s'inscrit dans le cadre d'une thèse de sociologie²⁹ consacrée à l'analyse des modes de gouvernance territoriale de l'adaptation au changement climatique (Keskitalo *et al.*, 2010) sur les littoraux français, en analysant notamment les différents facteurs de vulnérabilité et plus spécifiquement les capacités sociales et institutionnelles d'adaptation (Smit et Wandel, 2006) face aux changements environnementaux sur les littoraux français.

La problématique traitée par cette communication est la suivante : quelles sont les aptitudes et capacités de mobilisation des populations (touristes, résidents, commerçants) au regard d'un projet de relocalisation des biens et des activités face au recul du trait de côte ? Spontanément, nombreux sont ceux qui parmi nous répondraient de manière tout à fait pessimiste à cette interrogation. Nous savons, ou croyons savoir, que les individus sont généralement attachés aux biens qu'ils possèdent, et qu'ils le sont d'autant plus que ces biens sont précieux et appréciés à un temps *t* par la majorité des membres d'une société donnée (en ce qui nous concerne, par exemple, une propriété en bord de mer). De façon encore spontanée, nous dirions que quiconque a un intérêt particulier à défendre (un bien, une activité...) sur le littoral, aura plutôt tendance à perdre de vue « l'intérêt général » et combattrait féroce toute personne et tout projet qui lui paraîtraient attentatoire à la conservation de ses avantages privés. Souvent encore, nous avons tendance à penser que l'individu « ordinaire » est en général peu doté en informations « objectives », c'est-à-dire scientifiquement élaborées et avérées, concernant l'environnement et son cadre de vie, comme s'il se fiait en la matière à ses seules croyances et prénotions (et depuis les travaux de Festinger nous n'ignorons pas

²⁸ Cette recherche a été menée dans le cadre de l'appel à projets national « Expérimentation de la relocalisation des activités et des biens : recomposition spatiale des territoires menacés par les risques littoraux » (MEDDE, 2013), en partenariat avec le Groupement d'Intérêt Public (GIP) Littoral Aquitain et la commune de Lacanau.

²⁹ « L'adaptation au changement climatique : vulnérabilités et gouvernance adaptative des territoires littoraux en France métropolitaine et d'outre-mer », Nicolas Rocle, Irstea - Centre Emile Durkheim.

non plus que les croyances sont habituellement « sélectionnées » en fonction de leur efficacité à réduire les « dissonances cognitives ». En vertu de toutes ces raisons ou opinions, nous n'hésitons pas ou peu à soutenir que la mesure de relocalisation jouirait inévitablement, aux yeux des populations locales concernées, d'une mauvaise « acceptabilité ». La « loi d'airain » des intérêts particuliers, et celle non moins importante du « déni du risque » sous toute sa variété, obérerait ainsi gravement les capacités d'adaptation d'une société entière.

L'objectif de cette communication est de mettre à l'épreuve, à l'aune des résultats d'une enquête quantitative ayant porté sur les perceptions et représentations du « risque érosion marine » à Lacanau, l'ensemble des croyances spontanées dont nous venons d'établir la liste. La présente communication démontrera que, contrairement au discours commun observé au sein des dispositifs de gestion et de prévention des risques naturels, une sensibilité commune et un socle de « savoirs profanes »³⁰ existent et convergent avec les « savoirs experts » disponibles en géomorphologie littorale. Il sera également démontré la « proximité » des points de vue citoyens et des préoccupations gestionnaires actuelles quant aux modes d'adaptation envisagés à l'échelle locale face au « problème érosion », en particulier celui de la relocalisation des biens et des activités. Nous avancerons ensuite quelques éléments de compréhension tâchant d'éclairer ces convergences.

2. Méthodologie

Les résultats présentés dans cet article sont issus d'une enquête par questionnaire menée sur la commune de Lacanau en juin et juillet 2013. Le questionnaire a été repris et adapté de celui administré en 2009 pour l'étude des perceptions et représentations liées à la submersion marine en Languedoc-Roussillon (projet ANR-MISEEVA, voir Hellequin *et al.*, 2014). L'échantillon se compose de 507 individus répartis en trois catégories : résidents (principaux et secondaires), touristes (dont excursionnistes à la journée) et professionnels (gérants de commerces, bars/restaurants, ou « autres » tels que écoles de surf, agences immobilières...). Il a été construit par la méthode des quotas, à partir des données Insee de la commune (recensement 2009) en ce qui concerne la répartition de résidents principaux et secondaires (respectivement 25% et 75%) ainsi que celle des professionnels. Lors des traitements statistiques, cinq idéaux types ont été élaborés afin de synthétiser la lecture des variables sociodémographiques puis de dégager de nouvelles catégories visant à dépasser les trois catégories initiales. Cependant, aucun lien significatif au plan statistique (Analyses des Correspondances Multiples) n'apparaît entre ces idéaux types et les résultats présentés ; les variables sociodémographiques, testées indépendamment, ne sont pas davantage discriminantes.

3. L'érosion marine à Lacanau : confluences des savoirs et des préoccupations

Les citoyens ordinaires à Lacanau manquent-ils de connaissances scientifiques relatives au risque d'érosion marine auquel ils sont exposés ? A la lumière des résultats obtenus, une présomption de lacune ou de déficit en ce domaine n'a pas été vérifiée. En effet, une large majorité d'individus disent de l'érosion marine qu'elle est un phénomène mondial (78%) et en augmentation dans le temps (82%), ce qui rejoint les principales observations de la littérature spécialisée aux échelles

³⁰ Nous dénommerons ainsi les connaissances des individus dits « ordinaires », en sachant cette catégorie largement imaginaire.

européenne, nationale (Commission Européenne, 2004) et régionale (Aubié *et al.*, 2011). Les effets « objectifs » associés à l'érosion et relevés par les spécialistes au plan local sont également cités par les personnes interrogées, que celles-ci aient ou non constaté *de visu* le phénomène, dans l'ordre décroissant suivant : « perte de plage sèche à marée haute », « déplacements des dunes », « fragilisation des ouvrages de protection du front de mer », « recul du trait de côte à plus long terme ». De même, à l'instar des géomorphologues qui, pour apprécier les dynamiques d'érosion marine affectant le trait de côte, mentionnent une alternance de phases rapides et lentes, les appréciations de « vitesse » du processus au sein de l'échantillon témoignent d'une caractérisation comparable (« rapide » - 36%, « lent » - 36% et « les deux » - 28%). Les personnes interrogées reconnaissent pour 86% l'origine naturelle de l'érosion et attribuent également des causes humaines (59%) – dont le changement climatique – à son accentuation. À ce sujet, « savoirs profanes » et « savoirs experts » coïncident : sur le plan scientifique, l'érosion est avant tout caractérisée comme un processus naturel, lié principalement à la houle et au vent, mais l'est également comme processus étant renforcé par des facteurs anthropiques (*e.g.* la réduction des apports sédimentaires fluviaux) ainsi que par certains effets du changement global (MEDDE, *op. cit.*). Cette convergence sensible des diagnostics se retrouve aussi dans l'estimation temporelle de la menace pour les habitations et les aménagements du front de mer. Peu de personnes interrogées en effet se considèrent menacées dès aujourd'hui ou dans les dix prochaines années, et une grande majorité situe la menace après ces dix années voire au-delà. Ces estimations se révèlent particulièrement proches des projections des positions du trait de côte aux horizons 2020 et 2040, réalisées par l'Observatoire de la Côte Aquitaine (Aubié *et al.*, *op. cit.*).

Les répondants ont-ils une faible conscience des risques naturels touchant le territoire et une faible connaissance des différentes modalités de gestion afférentes ? Les données recueillies témoignent d'un partage du diagnostic établi dans les documents de planification (Schéma de Cohérence Territoriale des Lacs Médocains dont fait partie Lacanau) et dans les plans de prévention des risques naturels (PPRN). En effet, parmi une liste de dix risques menaçant prioritairement le territoire, les personnes interrogées désignent, à l'instar de ces documents-cadres, les incendies de forêt (71%) puis l'érosion marine (69%). Coïncidant par ailleurs avec les démarches et réflexions engagées aux niveaux communal, régional et national, l'érosion marine est reconnue comme une préoccupation actuelle (73%), sans pour autant être jugée comme immédiatement menaçante pour la commune. En ce qui concerne la connaissance des modes d'action disponibles, les personnes interrogées ont déjà eu vent d'un éventail assez large des modalités existantes et sont aussi très majoritairement favorables à la poursuite, dès que possible, des actions habituellement mises en œuvre à Lacanau, à savoir les méthodes dites « douces » (entretien des dunes et rechargement des plages) et les ouvrages de protection (Fig. 1). La mesure de relocalisation s'avère quant à elle moins connue (45% contre 71% en moyenne pour l'ensemble des modalités de gestion) mais n'a cependant pas suscité l'opposition radicale attendue. Cette mesure est en effet envisagée par 77% de l'échantillon – à court, moyen ou long terme (Fig. 1). De ce point de vue encore, les perceptions des personnes interrogées sont proches des scénarii élaborés par les gestionnaires dans lesquels les « méthodes douces » et ouvrages de protection sont des expédients mis en œuvre dans le but de maintenir temporairement le front de mer et de planifier le repli (MEDDE, 2013).

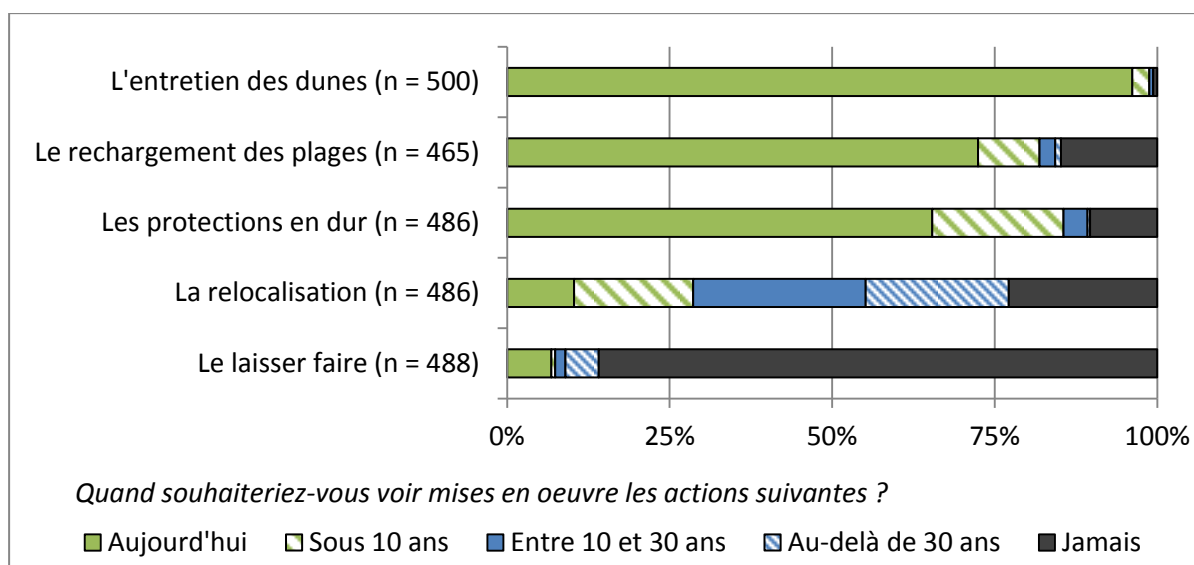


Figure 1. Horizons temporels indiqués pour la mise en œuvre des actions face à l'érosion marine (%)

Les individus sont-ils inféodés à leurs intérêts privés ? Les personnes ayant un intérêt financier (ou autre) à le faire rejettent-elles sans l'ombre d'une hésitation la mesure de relocalisation ?

Au-delà des rapprochements entre savoirs experts et profanes, une réflexivité vis-à-vis de la problématique dans son ensemble se dégage. Une majorité des individus plaident notamment pour le renforcement des protections tout en questionnant le fondement même de cette démarche au regard de son coût collectif et des effets négatifs sciemment associés : seuls 7% considèrent en effet les protections comme des solutions définitives, et 35% indiquent qu'elles déplacent le problème ailleurs (Fig. 2). La relocalisation, option d'adaptation perçue comme une solution définitive par 23,5% de l'échantillon (Fig. 2), n'est guère rejetée *a priori*, bien que ses conditions de mise en œuvre soient légitimement interrogées. Ainsi, près d'un tiers des individus (29,5%) font remarquer qu'elle créerait des problèmes supplémentaires (Fig. 2).

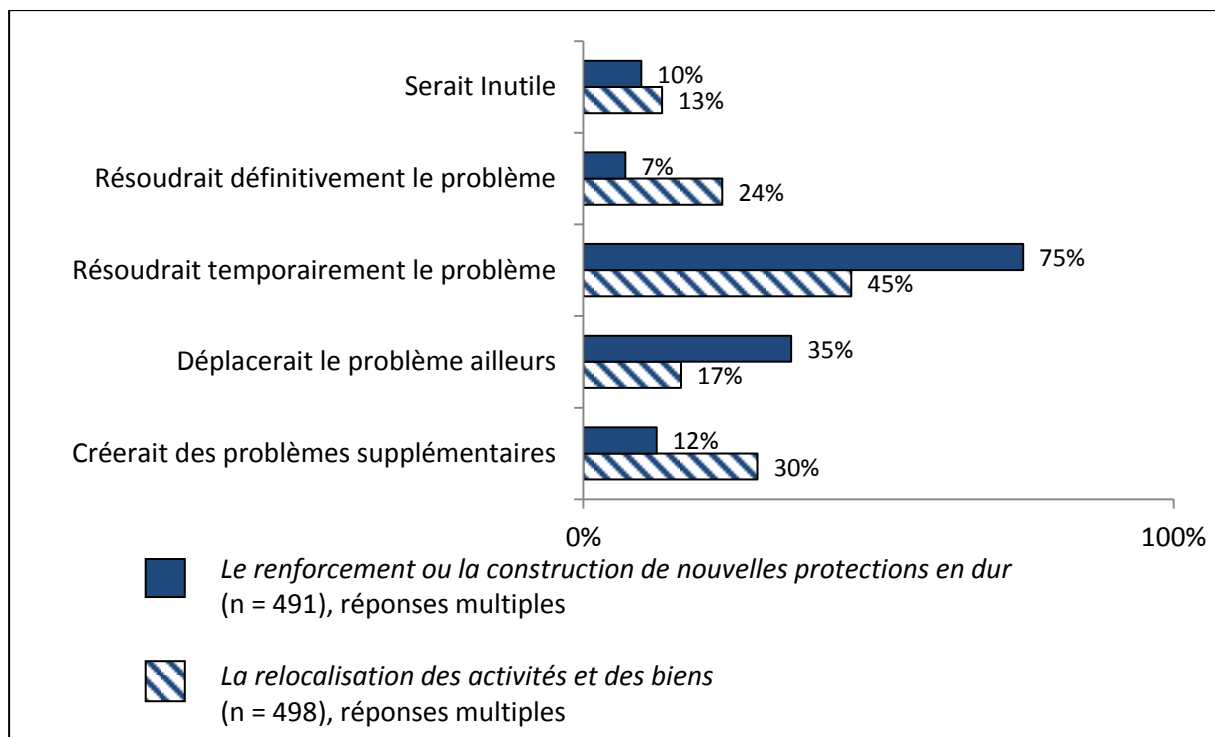


Figure 2. Qualification des méthodes « protections en dur » et « relocalisation » (% d'observations)

Les doutes les plus rencontrés par les enquêteurs ont notamment porté sur le financement d'une telle mesure, les conditions d'indemnisation des personnes délogées, les délimitations de la zone concernée, le ou les lieux de réimplantation et l'impact sur l'attractivité de la commune. Ces interrogations sont également partagées par les gestionnaires et investiguées dans le cadre de diverses évaluations de la faisabilité d'un « repli stratégique » à Lacanau (MEDDE, *op. cit.*), illustrant ainsi les convergences de préoccupations entre citoyens et gestionnaires. Ces différents éléments attestent d'une capacité des acteurs à « monter en généralité », autrement dit à ne pas raisonner aux seules aunes de leurs émotions ou de leurs intérêts privés. Entre autres exemples, 67% de l'échantillon considèrent qu'il faut protéger la nature « quel qu'en soit le coût », tandis que 30% seulement estiment que les habitations doivent l'être au même prix. Si les comportements motivés par la sauvegarde des intérêts privés existent naturellement, il serait cependant moins réducteur d'admettre qu'ils ne se résument pas à cette seule dimension.

4. Une historicité, une sensibilité et une popularité de l'érosion marine à l'échelle locale

Nos résultats diffèrent de ceux acquis par d'autres études portant sur les perceptions et représentations des risques côtiers. Ces dernières mettent notamment en évidence des différences de perceptions entre catégories d'acteurs ainsi qu'un faible niveau général d'informations et de connaissances sur les phénomènes d'érosion côtière (Roussel *et al.*, 2009) et de submersion marine (Hellequin *et al.*, *op. cit.*). Comment comprendre notre singularité ? Trois éléments, étayés par nos résultats, sont proposés dans cet objectif. Par leur généralité, ils ambitionnent de rendre davantage

raison de l'absence de différence significative entre les « profils sociologiques » de l'échantillon (cf. méthodologie). Ces éléments sont : i) la matérialité et la visibilité du processus ; ii) son abondante prise en compte politique et médiatique depuis plusieurs décennies ; iii) l'existence de ce que nous pouvons appeler une « sensibilité » commune ou collective.

L'érosion est en effet, à la différence de la submersion marine, un processus permanent et visible au quotidien (72% des personnes interrogées déclarent l'avoir observé à Lacanau). Cette qualité « testimoniale » s'acquérant avec le temps et la plus ou moins grande fréquentation de la station, les résidents principaux et professionnels résidant à Lacanau en sont en grande majorité témoins (95%) ainsi que les résidents secondaires et touristes-excursionnistes (62%). Ces populations « extérieures » à Lacanau fréquentent en effet « intensément » ce territoire (de deux à cinq fois ou plus durant les cinq dernières années pour près de 90% d'entre elles) et peuvent connaître l'érosion marine pour l'avoir observé auparavant sur d'autres littoraux. La matérialité ou visibilité du processus, parfois spectaculaire à très court terme (suite à des tempêtes ou grandes marées) bien que plus discrète sur le long terme (recul lent mais continu du trait de côte), peut favoriser l'émergence d'une connaissance et sensibilité à l'érosion.

Une deuxième dimension réside dans la prise en compte, ancienne et actuelle, de la problématique érosion par les pouvoirs publics au niveau local – mais aussi régional (GIP Littoral Aquitain) et national (MEEDDM, *op. cit.*, MEDDE, *op.cit.*). La problématique érosion marine doit en fait être comprise comme consubstantielle à la création de la station Lacanau-Océan au début du XX^e siècle (Augustin, 2007). Dès 1931 (Magnon, 2006), la « mise en visibilité » de l'érosion n'a fait que se renforcer à mesure de l'avancement des implantations humaines conjointement au recul progressif du bord de mer qui les accueillait. Sa traduction dans des dispositifs de protection n'est pas récente (premier rempart construit en 1976) et sa prise en charge s'est encore illustrée récemment par l'engagement de la commune de Lacanau en tant que site pilote dans les stratégies régionale (2009) et nationale (2012) de gestion du trait de côte. En outre, la thématique de l'érosion marine fait l'objet d'un ample traitement médiatique, au sein de la presse quotidienne régionale notamment, mais pas seulement. Durant les événements météorologiques et océanographiques intenses de l'hiver 2013-2014, le quotidien « Sud-Ouest » a par exemple consacré plus d'un article par jour (53 au total) au cours du mois de janvier 2014 à cette thématique.

Cette sensibilité collective au sujet de l'érosion semble traduire simultanément un attachement et des inquiétudes partagées liées à la menace d'une « identité touristique » (Rieucau et Lageiste, 2006) historiquement constitutive de la station Lacanau-Océan. Le climat, l'environnement et les activités de loisirs sont à ce sujet les principales motivations de la présence des résidents et de la venue des touristes. Le surf, facteur majeur de réputation de la station selon 91% des personnes interrogées, est pratiqué par plus d'un tiers d'entre elles. Plage et baignade, détente, promenade sur le front de mer ou en forêt et balade à vélo, comptent parmi les pratiques les plus en vogue localement. La prégnance de ces « mœurs et coutumes balnéaires » exacerbe selon nous d'autant plus la « sensibilité » et l'attention des résidents et amateurs du littoral canaulais à la « situation-problème » engendrée par l'érosion du littoral. Le thème de l'érosion est bien un sujet d'intérêt et de mobilisation important au niveau local, que ce soit en termes de recherches personnelles d'informations (un tiers de l'échantillon), de participation à des forums publics (30% des résidents principaux) ou encore de discussion avec l'entourage (92% des résidents principaux et 69% des résidents secondaires et touristes-excursionnistes).

5. Conclusion et perspectives

Nous avons ainsi cherché à montrer, à partir de cette étude de cas, le caractère infondé des présupposés selon lesquels le « grand public », qu'il soit riverain ou non d'une zone exposée à des phénomènes naturels potentiellement dangereux, n'aurait que des informations insuffisantes, une vision partielle ou biaisée des risques, ainsi que des comportements déterminés par le seul intérêt privé. Nos résultats paraissent ainsi soutenir et conforter les principes de la cogestion des ressources naturelles (Barthélémy, 2005), à l'image de la gestion concertée des ressources en eau (Garin et Rinaudo, 2002), ou encore de l'*adaptive co-management* (Moller et al., 2004). Ces courants envisagent « les rapports entre la nature et les sociétés à l'instar de systèmes socioécologiques capables d'adaptation et de résilience dans une perspective de durabilité. Pour accompagner les changements affectant les systèmes, la gestion relèverait d'exercices de concertation, de participation et d'apprentissages mutuels pour coconstruire des politiques à l'interaction des connaissances expertes et profanes » (Barthélémy et Souchon, 2009). Cette participation de toutes les parties prenantes se retrouve également parmi les principes de la Gestion Intégrée des Zones Côtières (Hénocque et Kalaora, 2013) ainsi que dans les multiples recommandations internationales et nationales en termes d'inclusion du public dans des dispositifs de concertation visant à participer à l'élaboration des décisions (Convention d'Aarhus, article 7 de la Charte de l'Environnement...). A cela trois arguments et attentes (Joly, 2008) : une plus grande richesse des connaissances à la disposition du décideur (« argument épistémique »), du fait d'une plus grande hétérogénéité des personnes et des savoirs en débat ; une plus grande qualité de la démocratie (« argument normatif »), du fait même d'une participation vue comme propice au renforcement de la citoyenneté ; une plus grande qualité de mise en œuvre des décisions prises à l'issue des débats (« argument pragmatique »), du fait d'une plus grande légitimité acquise au cours du processus participatif. Un accès plus ouvert de la société civile aux sphères de décision et de gestion ne participerait-il pas alors de capacités sociales d'adaptation accrues ?

Bibliographie

- Adger W.N., Hughes T.P., Folke C., Carpenter S.R., Rockström J., (2005). Social-Ecological Resilience to Coastal Disasters, *Science*, vol. 309, n° 5737, p. 1036-1039
- Aubié S., Mallet C., Favennec J., Hoareau A., (2011). *Caractérisation de l'aléa érosion (2020-2040) de la Côte Aquitaine dans le cadre de l'étude stratégique de gestion du trait de côte*. Rapport BRGM/RP-59095-FR Observatoire de la Côte Aquitaine, août 2011.
- Augustin J.-P., (2007). *L'attractivité plurielle d'une station océane : Lacanau-Océan dans le sud-ouest de la France*, <http://teoros.revues.org/830>
- Barthélémy C., (2005). *Les savoirs locaux : entre connaissances et reconnaissance*, <http://vertigo.revues.org/2997>
- Barthélémy C., Souchon Y., (2009). La restauration écologique du fleuve Rhône sous le double regard du sociologue et de l'écologue. *Natures Sciences Sociétés*, vol. 17, n° 2, p. 113-121.
- Commission Européenne, (2004). *Vivre avec l'érosion côtière en Europe. Espaces et sédiments pour un développement durable*, Rapport du programme EUROSION, Mai 2004 http://www.eurosion.org/project/eurosion_fr.pdf
- Cousin A., (2011). *Propositions pour une stratégie nationale de gestion du trait de côte, du recul stratégique et de la défense contre la mer, partagée entre l'État et les collectivités territoriales*. Rapport MEDDTL, novembre 2011.
- Garin P., Rinaudo J.-D., (2002). Savoirs profanes et expertises en débat pour une planification concertée de la gestion de l'eau. *Sociologies pratiques*, vol. 7, p. 93-112.

- Hellequin A.-P., Flanquart H., Meur-Férec C., Rulleau B., (2014). Perceptions du risque de submersion marine par la population du littoral languedocien : contribution à l'analyse de la vulnérabilité côtière, *Natures Sciences Sociétés*, vol. 21, n° 4, p. 385-399.
- Hénocque Y., Kalaora B., (2013). *Gestion intégrée*, <http://www.participation-et-democratie.fr/node/1328>.
- IPCC, (2014). *Coastal Systems and Low-Lying Areas*. Working Group II – Chapter 5, Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Joly P.-B., (2008). Le citoyen dans les débats d'experts - examen critique des transformations contemporaines de l'expertise scientifique, *Actes du colloque Les nouveaux enjeux de l'expertise scientifique*, Maison de la Chimie, Paris.
- Keskitalo E.C.H., (2010). *Developing Adaptation Policy and Practice in Europe: Multi-level Governance of Climate Change*, Springer.
- Magnon R., (2006). *Lacanau-Océan a cent ans : 1906-2006*, Ville de Lacanau.
- Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, (2013). Vers la relocalisation des activités et des biens : 5 territoires en expérimentation, *Actes du Séminaire national de lancement du 14 février 2013*, Paris.
- Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, (2012). *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Vers la relocalisation des activités et des biens*. Rapport MEDDE, juin 2012.
- Meur-Férec C., Morel V., (2004). L'érosion sur la frange côtière : un exemple de gestion des risques. *Natures Sciences Sociétés*, vol. 3, n° 12, p. 263-273.
- Moller H., Berkes F., Lyver P., Kislalioglu M., (2004). *Combining science and traditional ecological knowledge : monitoring populations for co-management*, <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss3/art2/>
- Rieucan, J., Lageiste, J. (dir.), (2006). *L'empreinte du tourisme : contribution à l'identité du fait touristique*, Paris, l'Harmattan.
- Roussel S., Rey-Valette H., Henichart L-M., Pi Alperin M-N., (2009). Perception des risques côtiers et gestion intégrée des zones côtières (GIZC). *La Houille Blanche*, n° 2, p. 67-74
- Smit B., Wandel J., (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, vol. 16, n° 3, p. 282-292.

Une vision exclusivement technique du littoral, longtemps imputée aux ingénieurs du génie civil, aujourd'hui dépassée. Étude des cas néerlandais, anglais et français

Servane Gueben-Veniere¹

1. Laboratoire PRODIG UMR 8586, Université Paris 1
2 rue Valette, 75 000 Paris
servaneveniere@yahoo.fr

RESUME.

Les ingénieurs du génie civil, réputés et souvent critiqués pour leur approche technique - parfois exacerbée - du littoral et de sa gestion, offrent aujourd'hui des discours plus nuancés accordant une place importante à l'intégration d'enjeux environnementaux. Ces derniers ne sont plus systématiquement perçus comme une contrainte supplémentaire mais désormais aussi comme une opportunité à saisir pour imaginer de nouvelles solutions de gestion adaptée à ce territoire entre terre et mer, dynamique et complexe par essence. Toutefois, les discours recueillis auprès d'une centaine d'acteurs de la gestion côtière ne sont pas monochromes et des nuances plus ou moins « vertes » ont été relevées. Le poids des influences culturelles semble plus pertinent à prendre en compte pour expliquer ces nuances. Ainsi, la vision anglaise du littoral et de sa gestion affiche une couleur vert franc, tandis que celle des Français offre par exemple un vert en demi-teinte.

ABSTRACT.

Civil engineers, known and often criticized for their technical approach of the coast and of coastal management, express nowadays a more nuanced language, giving a larger place to environmental stakes. These ones are no longer systematically seen as another requirement but also now as an opportunity to imagine new solutions of coastal management more adapted to this territory between sea and land, dynamic and complex in essence. However, the discourses of a hundred stakeholders in coastal management are not uniform in their beliefs and differences have been revealed. The importance of cultural influences seems to be more relevant to be taken into account in explaining them. The English vision of the coast shows a darker shade of green whereas the French one is somewhat lighter.

MOTS-CLES : *Ingénieurs, représentations, littoral, gestion, Pays-Bas, Angleterre, France, mouvement écologique et social*

KEYWORDS: *Engineers, representations, coast, coastal management, Netherlands, England, France, social and ecological movement*

1. Introduction

Les ingénieurs du génie civil sont des acteurs incontournables de la gestion du littoral nord-ouest européen et leur puissante influence dans les décisions d'aménagement du territoire n'a pratiquement jamais été ébranlée depuis la naissance de leur corps de métier. Ce n'est qu'au cours de la seconde moitié du XX^e siècle qu'une critique de plus en plus nourrie à l'égard de certaines pratiques a progressivement remis leur autorité en cause. Les rangées d'épis, dressées telles de gigantesques cicatrices le long de la côte, ont ainsi été largement décriées dès les années 1980 et témoignaient d'une conception figée du littoral, niant l'essence même de ce territoire entre terre et mer : la mobilité. Pourtant l'on observe aujourd'hui de nouvelles pratiques de gestion du littoral plus « vertes », respectant et utilisant même le caractère dynamique du littoral pour concevoir ces solutions innovantes de gestion. Les Néerlandais se sont tournés par exemple vers le rechargement en sable dès le début des années 1990 et n'ont cessé depuis d'optimiser cette technique. Les Anglais sont devenus spécialistes du *managed realignment*, forme de dépoldérisation partielle, et les côtes sud et est du pays comptent aujourd'hui 25 opérations de la sorte. En France, les techniques de récréation de vasières artificielles semblent prometteuses.

Si l'éventail des profils des acteurs en charge de la gestion du littoral s'est considérablement élargi au cours des dernières décennies, les ingénieurs n'en restent pas moins des acteurs essentiels. Par conséquent, on peut se demander comment ces derniers se représentent le littoral qu'ils aménagent aujourd'hui et dans quelle mesure leur vision de ce territoire a évolué leur permettant ainsi d'envisager de nouvelles pratiques de gestion côtière. Une centaine d'entretiens, complétée de graphes associatifs³¹, a été effectuée dans les trois pays depuis 2010 afin d'analyser ces représentations. Les résultats seront articulés en trois parties : la première compare la façon dont ingénieurs et autres scientifiques se représentent le littoral ; la deuxième met en valeur les différences culturelles comme facteur explicatif principal des différences observées ; enfin la troisième offre des pistes de réflexion pouvant expliquer ce phénomène.

2. De plus en plus d'environnement dans les discours des ingénieurs, consacrés au littoral.

Les nouvelles pratiques plus « vertes » de gestion du littoral, observées en Angleterre, aux Pays-Bas mais aussi en France, n'auraient pu être développées sans que les acteurs de la gestion de ce territoire ne soient eux-mêmes convaincus de l'importance d'associer une dimension environnementale à tout projet de gestion. Par dimension environnementale, doit être comprise une acception géographique du terme environnement, c'est-à-dire un construit social relevant d'interactions complexes entre le milieu littoral et les usages qui en sont faits, ce que Y. Veyret nomme le « *géoenvironnement, [...] [qui] se caractérise par des emboîtements d'échelle [...] et s'analyse aussi en termes de temporalités* » (Veyret, 2007, p. 134). Pour ce faire, différents éléments ont été recherchés dans l'analyse des discours : des éléments ayant trait à la spécificité du milieu et du paysage littoral, des éléments relevant de l'aspect dynamique du littoral et de sa complexité, mais aussi des actions visant à protéger, préserver ou encore « *travailler avec la nature* » comme cela a été mentionné à plusieurs reprises.

³¹ Cette technique consiste à demander à l'interlocuteur, à partir d'un mot inducteur – ici le littoral – d'exprimer plusieurs mots ou expressions lui venant à l'esprit et de les organiser selon une structure graphique imposée.

2.1. Un territoire complexe

Le premier point qui ressort de l'analyse transversale des discours et des graphes associatifs, quelle que soit la formation ou le pays des acteurs rencontrés, est la complexité qui caractérise le territoire littoral. Une complexité révélée dans un premier temps par la difficulté à le définir. Le littoral a été qualifié d'interface, de zone aux délimitations floues, d'image ou d'histoire, d'espace de transition, ou encore associé à la sensation « d'être proche de la mer ». Ceci met en exergue l'importance des facteurs subjectifs pour définir le littoral. Selon le type de côtes et leur découpage, le sentiment d'appartenance au littoral peut se développer jusque très loin dans les terres ou au contraire disparaître assez rapidement.

Dans un deuxième temps, plusieurs acteurs, ingénieurs ou non, ont abordé spontanément la notion de système complexe pour définir le littoral, mettant en valeur sa spécificité de milieu entre terre et mer requérant une gestion adaptée d'une part, et les nombreuses interactions tant physiques que socio-économiques à prendre en compte d'autre part. Aux Pays-Bas, ingénieurs comme non ingénieurs ont mis en avant le caractère complexe du littoral en décrivant les nombreuses interactions et rétroactions présentes et en considérant chaque fois les échelles spatio-temporelles impliquées : de 10 à 25 ans pour l'occupation du sol, de 25 à 100 pour les réseaux de communication et d'énergie développés, et de l'heure à la centaine de siècles pour le milieu physique littoral. Une tempête peut en effet, produire une modification des évolutions morphodynamiques littorales en quelques jours, voire quelques heures, alors que des phénomènes érosifs ou d'accumulation sédimentaire observés à petite échelle, impliquent une échelle temporelle de l'ordre du siècle.

Cette notion de complexité est également apparue dans les graphes associatifs relatifs au littoral³². Les résultats des premiers mots associés au mot inducteur littoral sont présentés dans la figure suivante, et peuvent être considérés comme les plus importants aux yeux des personnes interrogées.

³²Au total 38 personnes ont répondu, soit 17 ingénieurs pour 21 autres personnes. Les Pays-Bas sont surreprésentés puisque 21 personnes, toutes professions confondues, ont répondu contre 8 en France et 9 en Angleterre. De même, les réponses des ingénieurs néerlandais sont plus nombreuses (8) que celles de leurs homologues français (4) ou anglais (5).

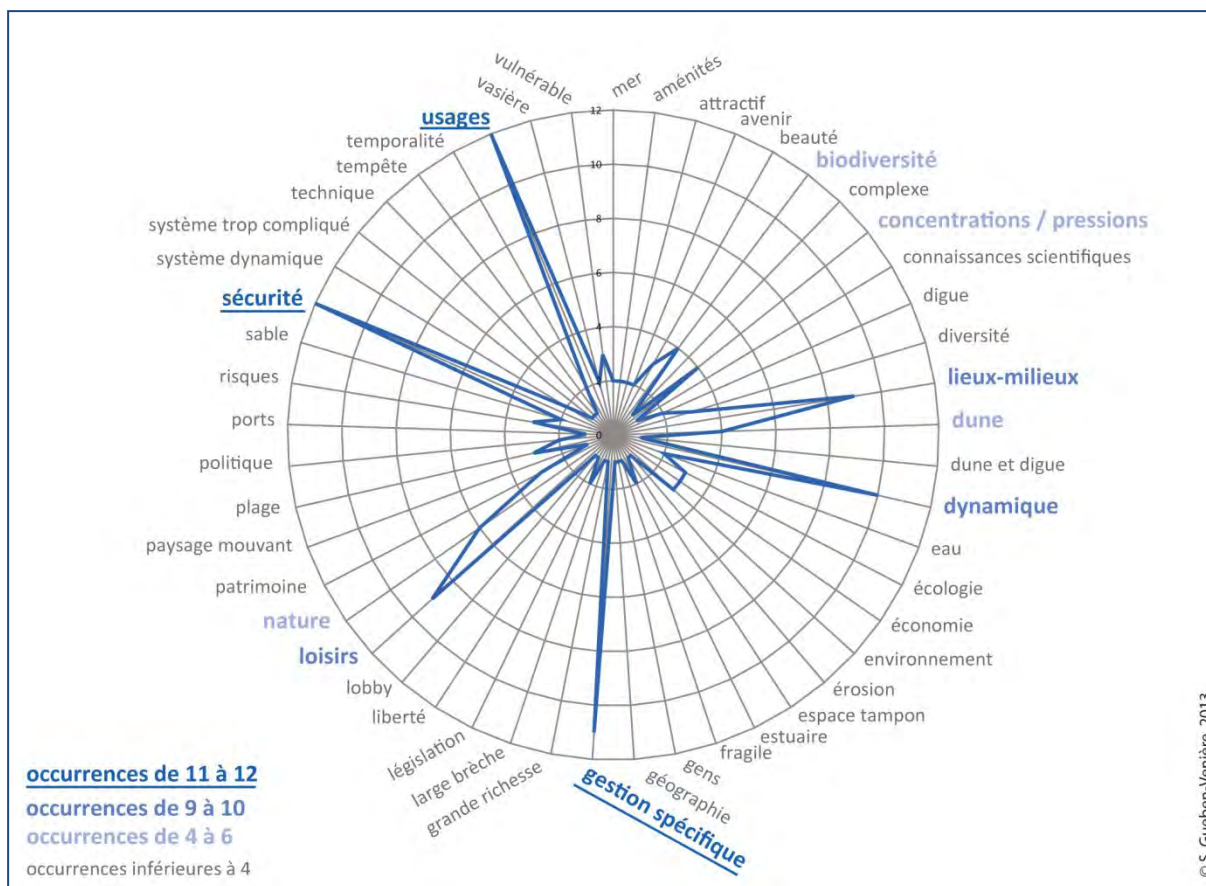


Figure 1 : mots signifiants utilisés pour décrire le littoral, tous acteurs et tous pays confondus.

Il ressort en premier lieu les termes : *usages*, *sécurité* - cités 12 fois - et *gestion spécifique*, citée 11 fois. Ces mots décrivent une forme de complexité liée à la concurrence de multiples usages sur un territoire restreint et confirment ainsi les propos tenus en entretiens : le littoral permet de nombreux *usages* et nécessite par conséquent une *gestion spécifique* pour permettre un développement en toute *sécurité*. Ces trois mots, qui arrivent en tête du nombre d'occurrences, mettent en exergue une vision sociale du littoral, guidée par des aspects sécuritaires. Viennent ensuite les mots : *dynamique*, *lieux-milieux* et *loisirs* avec une occurrence respective de 10, 9 et 9, ce qui ajoute à cette première vision sociale, une dimension physique et dynamique. Enfin le mot *nature* a été cité 6 fois et les mots *biodiversité*, *concentrations/pressions* et *dune* 4 fois chacun. Cette troisième catégorie de mots décrit un autre aspect de la complexité du littoral : contenir les multiples pressions exercées sur ce territoire de frange pour en préserver la grande richesse écologique à l'origine même de son attraction. L'ensemble de ces trois catégories de mots offre un concentré de ce qui compose le littoral pour l'ensemble des personnes rencontrées, ingénieurs ou non, que l'on qualifiera de « vision sociale et physique » du littoral.

Un second niveau d'analyse à consister à distinguer les graphes remplis par les ingénieurs des autres graphes (Fig. 2).

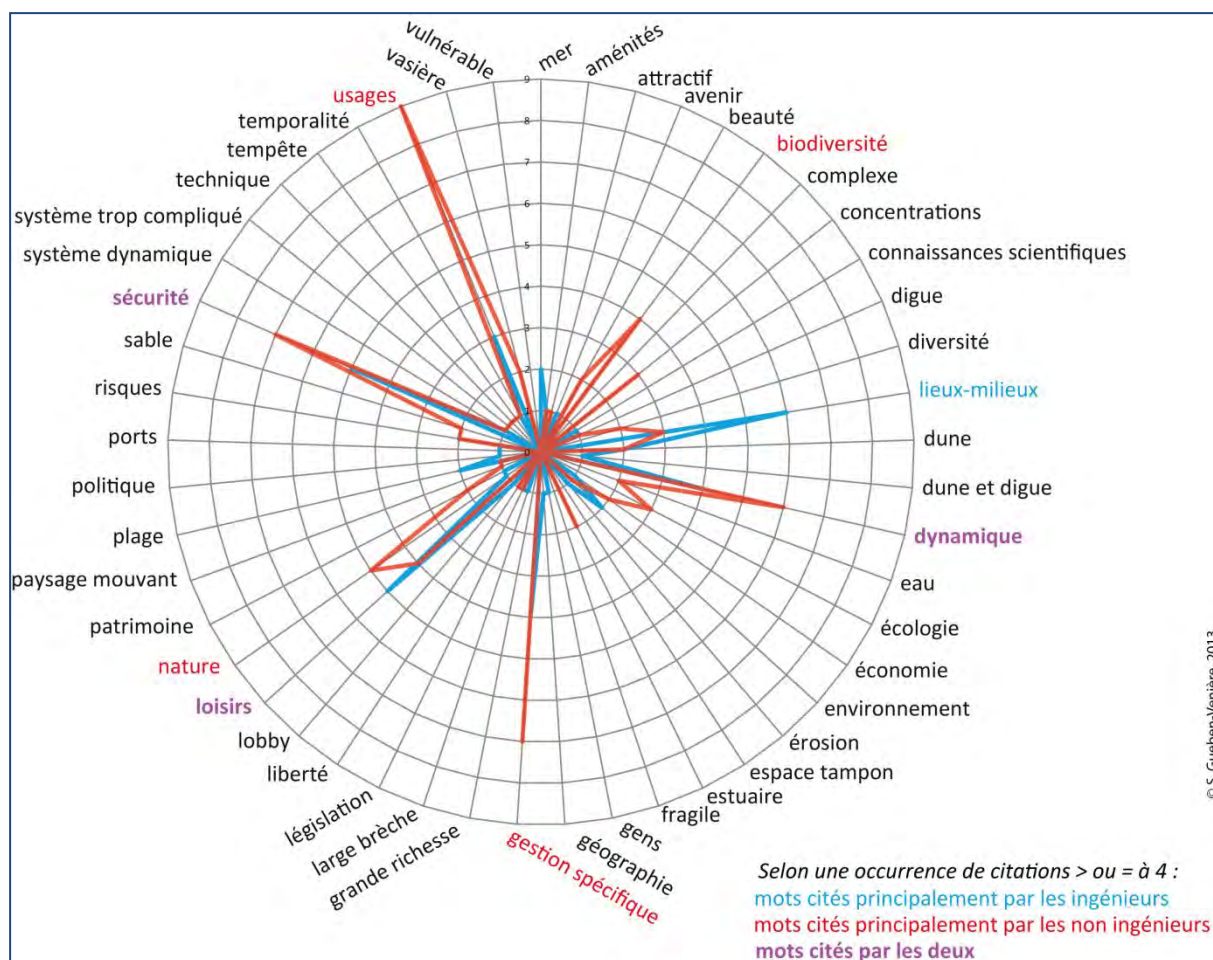


Figure 2 : mots signifiants utilisés par ingénieurs et non ingénieurs pour décrire le littoral

Le terme *lieux-milieux* atteint la plus grande occurrence chez les ingénieurs (6 sur 17 ingénieurs). Pour une plus grande lisibilité, différents mots initialement employés par les enquêtés et relevant de la description, ont été réunis derrière la combinaison *lieux-milieux*. Il s'agit d'une part des grandes unités géographiques, tel le littoral méditerranéen, le littoral atlantique, le littoral de la Manche, la côte est anglaise ou la côte sud anglaise ; d'autre part d'unités biogéographiques telles les vasières, les prés salés, les prairies, les marais, ou encore d'unités géomorphologiques telles les falaises, les côtes sableuses, les estuaires, les baies ou les lagunes. Le mot de polder, paysage littoral par excellence, a également été regroupé dans cette catégorie. Ainsi, un tiers des ingénieurs rencontrés a mentionné en priorité pour décrire le littoral, différents lieux et milieux qui le composent. Ceci montre que ces derniers ne considèrent pas le littoral d'un bloc, mais plutôt comme la résultante de forces érosives ou constructrices, ayant façonné au fil du temps divers paysages faisant ressortir différentes unités biogéographiques également liées au gradient de salinité propre à ce territoire.

Ce constat, s'il peut sembler évident *a priori*, est néanmoins très important pour expliquer la façon des ingénieurs d'envisager la gestion du littoral. Par ailleurs, la plus faible occurrence de ce terme de *lieux-milieux* retrouvée chez les non ingénieurs comparativement aux autres mots cités, ne

doit pas masquer un manque d'intérêt de ces derniers pour ce thème, mais sans doute leur recours à un vocabulaire environnemental plus riche pour décrire le littoral, divisant ainsi le total d'occurrences.

Ainsi, la distinction faite entre les graphes produits par les ingénieurs et ceux produits par les non ingénieurs, met principalement en relief une forte homogénéité : les thèmes mentionnés de façon récurrente par les non ingénieurs le sont aussi par les ingénieurs.

Chez les non ingénieurs, les *usages* du littoral sont fortement mis en avant (près d'un non ingénieur sur deux a cité ce mot) et offrent une vision prioritairement sociale du littoral. Or la combinaison *lieux-milieus*, qui arrive en tête des occurrences pour les ingénieurs, recouvre également une vision sociale complétée d'une vision physique du littoral. La deuxième catégorie de mots (*sécurité* et *loisirs* pour les ingénieurs, et *sécurité* et *gestion* pour les non ingénieurs) renforce cette homogénéité en décrivant dans les deux cas une vision sécuritaire du littoral. Enfin, la troisième catégorie de mots offre une vision définitivement environnementale chez les non ingénieurs et une vision environnementale et sociale chez les ingénieurs. La présence d'enjeux environnementaux pour décrire le littoral, constatée dans la figure 1 se retrouve donc à la fois chez les ingénieurs et les non ingénieurs. Ainsi le littoral n'est plus perçu uniquement du point de vue sécuritaire et technique par les ingénieurs. Cette constatation confirme donc l'homogénéité des propos recueillis en entretien auprès des deux catégories d'acteurs et le caractère complexe du littoral.

2.2. Un territoire dynamique

Le second point de ressemblance constatée entre les discours des ingénieurs et des non ingénieurs, concerne l'aspect dynamique du littoral. Le mot *dynamique* même a été cité 10 fois par 38 personnes au total et figure ainsi en quatrième position des mots directement reliés à la notion de littoral. Là encore, les graphes produits par les ingénieurs et par les non ingénieurs montrent une similitude (Fig. 2) : l'aspect dynamique du littoral est décrit dans des proportions équivalentes par les premiers (4 sur 17) et les seconds (6 sur 21). L'analyse complémentaire des entretiens confirme ce constat.

Bien que la perception de la dynamique du littoral soit très variable selon les acteurs interviewés, tous prennent en compte la mobilité du littoral, envisagent les mouvements de marées et décrivent les courants dynamiques. Cette composante dynamique du littoral s'avère non seulement partagée par l'ensemble des acteurs mais est aussi présentée comme une évidence, à l'origine même de leur réflexion sur la gestion de ce territoire à mettre en œuvre : « *Vous êtes obligé d'envisager le littoral de façon dynamique, sinon vous ne pouvez tout simplement pas faire de gestion du littoral !* »³³.

Une seconde lecture des entretiens laisse toutefois percevoir des discours plus ou moins « teintés » de vert, et apporte quelques nuances à cette première analyse. Néanmoins, celle-ci montre déjà que la distinction classiquement faite entre vision techniciste du littoral, longtemps imputée aux ingénieurs et celle plus large et intégrée, généralement attribuée aux autres scientifiques n'est désormais plus pertinente. D'autres facteurs doivent être cherchés pour expliquer les nuances observées.

³³ Extrait d'entretien : « You must see the coast in a dynamic way, otherwise you simply can't manage the coast ! »

3. Du « vert clair³⁴ » au vert franc : une question d'influences culturelles avant tout

3.1. Des discours nationaux marqués

Lorsque la seconde question majeure des entretiens - *Selon vous, à quoi correspondrait une gestion idéale du littoral ? En somme, comment envisagez-vous le littoral de demain ?* - a été posée, il a été possible de distinguer un discours néerlandais, un discours anglais et un discours français.

Aux Pays-Bas plusieurs acteurs, ingénieurs ou non, ont expliqué que la stratégie nationale comme les modes de gestion mis en œuvre actuellement allaient, selon eux dans le sens d'une gestion optimisée et pouvaient presque être qualifiés d'idéaux. Quatre points majeurs ont été mentionnés pour justifier ces propos : la vision à long terme développée par l'État, l'existence d'une réelle concertation et la progression de la pluridisciplinarité, les apports des études d'impacts environnementaux et des analyses coûts bénéfices et enfin la prise en compte du caractère dynamique du littoral comme base de réflexion dans tout projet de gestion. Ainsi, un discours positif assez fort se dégage chez les Néerlandais. Les quelques remarques concernant de possibles améliorations relèvent d'une recherche de flexibilité, mais globalement, selon les acteurs rencontrés, l'organisation de la gestion côtière aux Pays-Bas semble répondre aux enjeux néerlandais tant sécuritaires qu'environnementaux et permettre une vision à long terme.

En Angleterre, ce discours positif a également été remarqué. Sans aller jusqu'à affirmer que leur organisation était déjà optimale, les Anglais interviewés, ingénieurs comme non ingénieurs, ont exprimé une certaine satisfaction du schéma de gestion qui se met progressivement en place depuis le milieu des années 1990. Le rôle des *Coastal Groups* et des *Shoreline Management Plans* a été mentionné de façon très positive. Les SMPs (*Shoreline Management Plans*) sont des plans régionaux de gestion des processus côtiers. Lancés par le gouvernement au milieu des années 1990, les SMPs ont marqué un tournant dans la politique de gestion côtière anglaise et galloise. Non plus calqués sur des limites administratives, ces plans ont pris pour échelle de gestion celle des cellules sédimentaires correspondant à « *un compartiment littoral contenant un cycle complet de sédimentation incluant les sources de production sédimentaire, la mobilisation des sédiments, leur transport et enfin leur dépôt*³⁵ ». Autrement dit, à chaque compartiment littoral a été attribué un plan de gestion dans le but de prendre en compte les effets de rétroaction d'un ouvrage de protection côtière et d'éviter ainsi une aggravation des phénomènes d'érosion en aval de la dérive littorale ou de bloquer les transports sédimentaires. Enfin, un autre facteur d'amélioration est ressorti dans les discours anglais : la nécessité de prolonger l'effort de pluridisciplinarité d'ores et déjà engagé.

Côté français, le discours s'est révélé bien plus critique sur le fonctionnement actuel de la gestion du littoral, et le chemin restant à parcourir pour atteindre une gestion optimisée, bien plus long. Outre les efforts à faire sur l'adoption d'une échelle de gestion adéquate, un problème général d'organisation et de superposition de multiples plans réglementations, directives etc. a été pointé du doigt par l'ensemble des acteurs rencontrés, ingénieurs ou non et tenu pour responsable par la majorité des acteurs d'un manque de vision globale et intégrée de la gestion côtière. Cette « désorganisation » serait due, selon les acteurs rencontrés, à la décentralisation. Sans remettre en

³⁴ Expression empruntée à M. Bess, 2011, *La France vert clair. Écologie et modernité technologique 1960-2000*, Éd. Champ Vallon, Seyssel, coll. L'environnement a une histoire, 402 p.

³⁵ EUROSION, 2004, p. 32

cause cette décision politique prise il y a plus de vingt ans, ingénieurs et non ingénieurs, quelle que soit leur échelle d'intervention, ont fait part de sa difficile mise en œuvre et des conséquences négatives que la décentralisation a impliquées. L'absence d'un « chef de file » bien identifié, la complexité croissante d'obtention de financements ou le manque de contrôle, entre autres points, ont été mentionnés à plusieurs reprises.

3.2. Des tendances nationales affirmées par les graphes associatifs

Ces spécificités culturelles ont été confirmées par l'analyse des graphes associatifs associés au groupe de mots inducteurs « gestion optimisée du littoral ». La figure 3 reprend les résultats des graphes en distinguant les réponses formulées par les acteurs néerlandais, anglais et français³⁶. On observe un éclatement des courbes qui met bien en exergue l'existence de tendances nationales dans la façon de décrire le littoral et sa gestion.

Le mot *sécurité* par exemple, que l'on retrouvait en tête des occurrences pour décrire le littoral actuel, et par ailleurs de façon équilibrée chez les ingénieurs comme les non ingénieurs (Fig. 1 et 2), se retrouve uniquement dans les graphes produits par les Néerlandais. Ainsi, la vision sécuritaire qui dominait la description du littoral, tous acteurs et tous pays confondus, se révèle être une spécialité néerlandaise. Ceci confirme une tendance remarquée dans l'ensemble des entretiens menés aux Pays-Bas : le mot *sécurité* appartient définitivement au vocabulaire des Néerlandais qui ne se sont par ailleurs jamais exprimés en termes de *risque*.

³⁶ Afin de mieux rendre compte des résultats produits et d'éviter tant que faire se peut des distorsions liées au nombre variant des réponses obtenues selon les pays, une pondération a été effectuée. Les chiffres apparaissant sur l'axe de mesure ne correspondent donc pas à l'occurrence des mots cités mais respectent en revanche leur proportion.

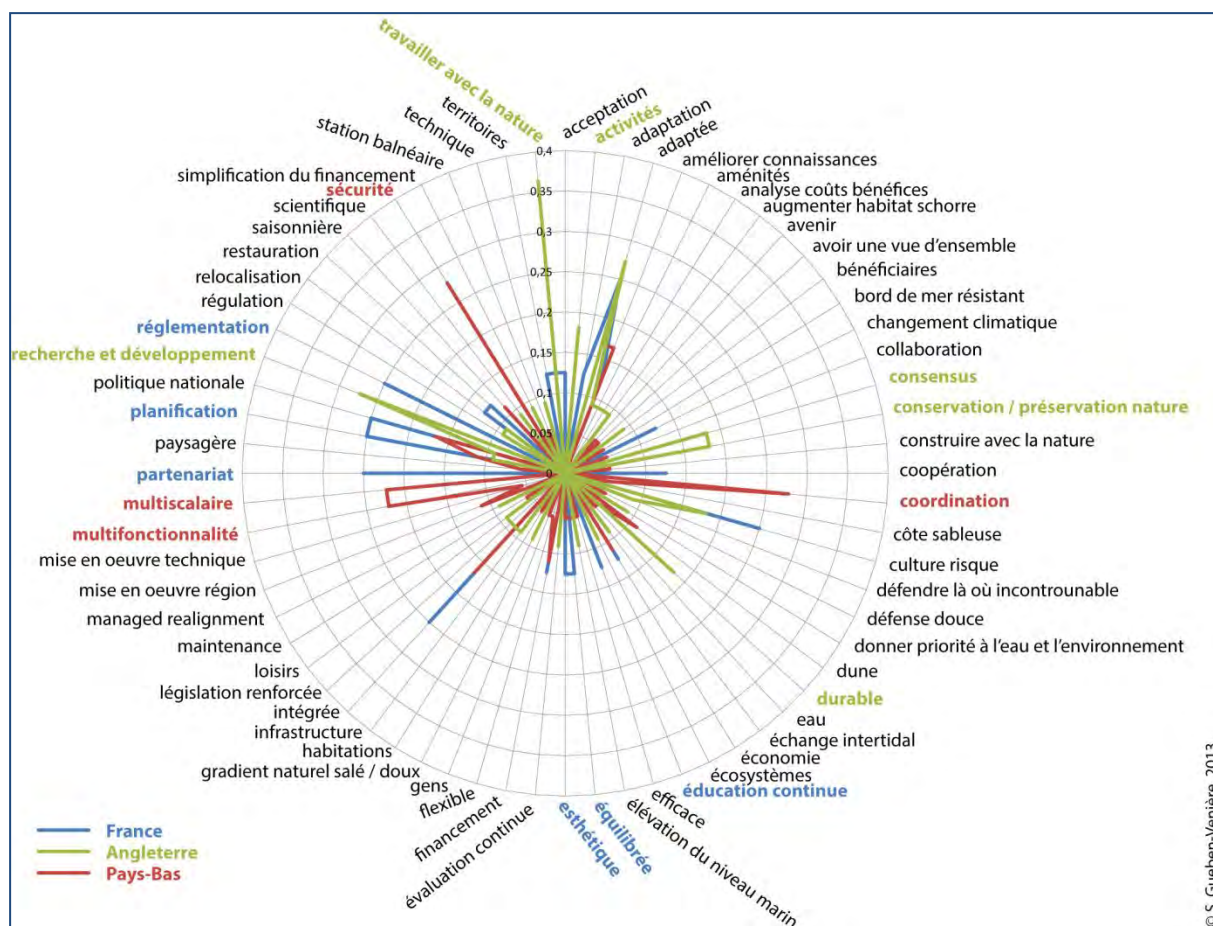


Figure 3 : mots significatifs distingués par pays et associés à une gestion optimisée pour le littoral de demain.

La vision des Néerlandais rencontrés peut ainsi être qualifiée de « verte » dans la mesure où ces derniers placent désormais au cœur de leur réflexion sur la gestion du littoral à adopter la sécurité et l'environnement, dans les limites imposées par le contexte socio-économique et démographique bien particulier des Pays-Bas.

La notion de *risque* en revanche a été beaucoup plus souvent mentionnée dans les discours français et se retrouve indirectement dans le graphe de la figure 3. Les plus fortes occurrences décrivent en effet une vision très réglementaire de la gestion du littoral de demain. En complément des entretiens, il est possible d'interpréter cette vision comme une demande, un objectif à atteindre et non comme l'approbation de quelque chose déjà en place. Ce point semble constituer une priorité pour les acteurs français, ce qui relègue au second rang de leurs préoccupations l'intégration d'enjeux environnementaux, encore parfois perçus comme une contrainte supplémentaire plus que comme une opportunité à saisir pour développer de nouveaux modes de gestion plus complets. Cette vision « vert clair » que les acteurs français se font du littoral et de sa gestion ne doit toutefois pas être assimilée à un manque d'intérêt pour les enjeux environnementaux. Les Français rencontrés, bien souvent, ont montré une volonté de les intégrer de façon entière et globale en tenant compte non seulement des différents secteurs qu'ils recouvrent, mais aussi des différentes

fonctionnalités à préserver ou restaurer. Le respect des continuités (trames verte et bleue) relève d'une complexité de mise en œuvre qui peut justifier en partie le relatif retard des Français par rapport à leurs homologues anglais et néerlandais.

Enfin, la vision environnementale qui ressortait de façon générale dans la description du littoral et de sa gestion s'affirme considérablement en Angleterre. L'expression « travailler avec la nature », qui apparaît en premier lieu, confirme les propos tenus en entretiens sur l'échelle de gestion à adopter tant spatiale (cellule sédimentaire) que temporelle (moyen et long termes). Les résultats anglais donnent ainsi définitivement la priorité à l'intégration d'enjeux environnementaux. En cela on peut avancer que les Anglais rencontrés ont une vision que l'on peut qualifier de « vert franc ».

4. Une appropriation plus ou moins aboutie par les ingénieurs du mouvement écologique et social caractéristique des années 1970.

Le mouvement écologique et social qui a caractérisé les années 1970, communs aux trois pays, constitue l'un des facteurs explicatifs principaux de l'évolution générale de pratiques de gestion côtière plus respectueuses de l'environnement. En revanche, la façon dont les ingénieurs néerlandais, français et anglais se sont appropriés ce mouvement, peut expliquer en partie les différences culturelles observées.

Si les ingénieurs anglais ont fait face à une certaine déconsidération dans leur pays, leurs homologues français et néerlandais semblent au contraire avoir dominé le discours naissant sur l'environnement et par conséquent les pratiques d'aménagement du territoire. Les Pays-Bas et la France, pour des raisons différentes, ont cultivé une admiration solide pour leurs ingénieurs. En France, le prestige des diplômes délivrés par l'École des Ponts et Chaussées, puis par l'École Polytechnique, toutes deux construites sur le principe de méritocratie, a fait des ingénieurs le symbole de la réussite sociale et professionnelle, faisant surgir ainsi une figure autoritaire et respectée de l'ingénieur français. Le mouvement écologique et social a donc été vécu comme un véritable bouleversement par ces derniers, remettant en cause non seulement leurs méthodes de travail mais aussi leur autorité jusqu'alors incontestée. Toutefois, l'ouverture de postes clés de gestion côtière à des non ingénieurs a été la plus tardive en France et ne s'effectue que depuis le milieu des années 2000. Aux Pays-Bas, la nécessité historique de se protéger contre les submersions marines a octroyé d'emblée une forte reconnaissance aux ingénieurs, garants de la préservation du pays tout entier. Ainsi, la remise en cause brutale, en 1973, de la fermeture de l'estuaire de l'Escaut oriental – dernière étape du gigantesque plan Delta proposé par les ingénieurs au lendemain de la tempête meurtrière de 1953 pour définitivement protéger le pays de la menace de submersion marine – a également été vécue comme un traumatisme par les ingénieurs néerlandais. Cependant, ces derniers ont réagi très rapidement en redoublant d'inventivité pour imaginer un barrage amovible garantissant la sécurité de la province zélandaise mais aussi la qualité environnementale du delta. Cette prouesse technique a finalement confirmé leur rôle incontournable dans la gestion du littoral et restauré une confiance ponctuellement perdue.

Les ingénieurs anglais n'ont en revanche jamais bénéficié d'une reconnaissance sociale très forte dans leur pays. Les sciences de l'ingénieur, longtemps exclusivement construites sur un apprentissage pratique, ont fait l'objet d'un certain mépris par l'aristocratie anglaise. Par ailleurs, c'est de cette catégorie sociale qu'est né un mouvement naturaliste précoce, qui s'est développé en tenant les ingénieurs pour responsables de nombreuses pollutions et défigurations des campagnes

anglaises (Mathis, 2010). Enfin, l'importance du linéaire côtier britannique (4400 km) a incité les acteurs de la gestion côtière à réfléchir dès la fin des années 1980 aux coûts et bénéfices induits par les solutions de gestion retenues. Pour ce faire, un travail pluridisciplinaire, et en particulier l'embauche de géomorphologues au sein d'Environment Agency pour mieux comprendre le fonctionnement dynamique du littoral, est apparu évident. Les ingénieurs anglais ont donc été naturellement intégrés au renouvellement de la réflexion menée sur la gestion du littoral à mettre en œuvre. La création parallèle des *Coastal Groups* pluridisciplinaires, mentionnés supra, n'a pas été un obstacle pour ces derniers, et certains en ont parfois même pris la direction.

5. Conclusion

De façon générale, ingénieurs comme non ingénieurs s'accordent pour considérer le littoral comme un territoire complexe et dynamique, requérant une gestion spécifique, intégrant plusieurs enjeux, dont des enjeux environnementaux. Ainsi, la distinction classique établie entre vision techniciste du littoral, longtemps imputée aux ingénieurs, et vision plus large, généralement attribuée aux autres scientifiques, semble désormais dépassée. Les discours plus ou moins « verts » consacrés au littoral trouvent en revanche d'autres formes d'explications en examinant les influences culturelles et notamment la façon dont les ingénieurs anglais, néerlandais et français ont accueilli le mouvement écologique et social caractéristique des années 1970. Le prestige et le pouvoir cultivé des ingénieurs français et néerlandais a contribué à rendre plus difficile que pour leurs homologues anglais le renouvellement de la réflexion sur la gestion du littoral à mettre en œuvre.

Bibliographie

Abrie J.-C., 2003, *Pratiques sociales et représentations*, Paris, PUF, 253 p.

Goeldner-Gianella L., 2013, *Dépolderiser en Europe occidentale. Pour une géographie et une gestion intégrées du littoral*, PUS, collection Territoires en mouvements – 1, Paris, p.350 p.

Mathis C.-F., 2010, *In Nature We Trust. Les paysages anglais à l'ère industrielle*, PUPS, Paris, 685 p.

Représentations des risques côtiers et stratégies d'adaptation : une manière d'appréhender la dimension humaine des risques côtiers

Elisabeth Michel-Guillou¹, Catherine Meur-Ferec²

1. Psychologie environnementale, CRPCC EA 1285, Institut des Sciences de l'Homme et de la Société, Université de Bretagne Occidentale, Université Européenne de Bretagne, 20 rue Duquesne – CS 93837 – 29238 Brest cedex 3, Elisabeth.Michel-Guillou@univ-brest.fr

2. Géographie, LETG Brest (Géomer, UMR 6554 CNRS), Institut Universitaire Européen de la Mer, Université de Bretagne Occidentale, Université Européenne de Bretagne, Rue Dumont D'Urville – Technopole Brest Iroise – 29280 Plouzané – France, meurferec@univ-brest.fr

Résumé.

Dans le cadre d'une recherche interdisciplinaire sur les risques côtiers, nous proposons une approche croisée de psychologue environnementale et de géographe pour étudier la manière dont les habitants de communes littorales se représentent les risques d'érosion et de submersions marines. Quels liens peuvent exister entre ces représentations et les préférences en matière d'adaptation aux risques ? Pour ce faire, une enquête par questionnaire en face à face a été menée auprès de 894 habitants de cinq communes côtières en Bretagne. Les résultats mettent tout d'abord en évidence que les risques côtiers ne sont pas les premiers cités parmi les risques en général. Ensuite, en matière de risques d'érosion et de submersion, les représentations diffèrent sensiblement selon les enquêtés et sont significativement liées aux préférences en termes de stratégies d'adaptation. Ces résultats constituent des éléments de compréhension des prises de position des habitants face aux risques, et contribuent donc plus largement à la connaissance de la vulnérabilité des territoires côtiers.

MOTS-CLES : Représentations Sociales / Risques Côtiers / Vulnérabilité perçue / Adaptation / Psychologie Environnementale / Géographie

ABSTRACT.

As part of an interdisciplinary research on coastal risks, we propose a cross approach of environmental psychologist and geographer to study the perception of the inhabitants of coastal communities in matter of coastal erosion and marine flooding. What links could exist between this perception and preferences for risk coping? A large survey was conducted among 894 residents of five coastal towns in Brittany (France). First, the results show that coastal risks are not mentioned among the top risks. Then, in terms of coastal risks of erosion and flooding, perception differs significantly between respondents and are clearly related to preferences in terms of coping. Such results provide some understanding of the way of inhabitants are thinking the risks, and therefore contribute more widely to the knowledge of the vulnerability of coastal areas.

KEYWORDS : Perception / Coastal risks / Perceived vulnerability / Risk coping / Environmental psychology / Geography

Remerciements : ce travail a bénéficié d'une aide de l'Agence Nationale de la Recherche portant la référence 2010-CEPL-001-01, programme Cocorisco (Connaissance et Compréhension des Risques Côtiers). Les auteurs expriment tous leurs remerciements à Gwennaëlle Auger, et aux étudiants des masters Expertise et Gestion de l'Espace Littoral et Psychologie Sociale des Représentations : Etudes qualitatives et quantitatives de l'UBO.

1. Introduction et état de l'art

Aujourd'hui, de nombreuses interrogations portent sur les changements environnementaux globaux (élévation du niveau marin, variations du climat, déséquilibres sédimentaires...) mais aussi sur les conséquences de l'attractivité sans cesse croissante des espaces littoraux provoquant une augmentation de la construction de résidences et d'infrastructures dans des zones parfois très exposées aux aléas marins. Par ailleurs, les impacts des récentes tempêtes de l'hiver 2014 et le bilan de Xynthia sur les côtes vendéennes et charentaises en 2010 révèlent les faiblesses du processus actuel de la gestion des risques côtiers en France.

Une équipe interdisciplinaire (géologie, géomorphologie, géographie, ethnologie, droit, économie, psychologie de l'environnement) a monté en 2010 un projet de recherche scientifique, COCORISCO (Connaissance, compréhension et gestion des risques côtiers)³⁷. Son objectif est, d'une part, de comprendre la vulnérabilité des côtes face aux risques de l'érosion et de la submersion, et, d'autre part, de progresser vers des stratégies de prévention et de gestion. Ce programme privilégie une approche systémique de la vulnérabilité (Hellequin *et al.*, 2013) fondée sur quatre composantes principales : (1) Les *aléas* (processus d'érosion et submersion, prédisposition des sites, les événements actuels ou passés) ; (2) Les *enjeux* (biens et personnes exposées) ; (3) Les *politiques* de gestion et les *mesures* de protection et de réparation ; (4) Les *représentations* (manière dont les acteurs locaux, gestionnaires de l'espace littoral (ex. : élus, services de l'Etat...) et usagers de cet espace (ex. : habitants, professionnels de la mer...) perçoivent leur environnement et les risques).

C'est plus particulièrement au sein de ce dernier axe que se situe l'étude présentée dans cet article ; elle se donne pour objectif de comprendre comment des populations habitant des communes à risques (côtiers), et donc susceptibles d'être concernées par les risques d'érosion et/ou de submersion, se représentent ces risques et quel lien ces représentations peuvent avoir avec leurs préférences en matière d'adaptation. Chercher à comprendre le rapport des personnes à ces risques, en se fondant notamment sur la notion de vulnérabilité perçue, constitue une approche de la vulnérabilité actuellement peu étudiée dans la littérature scientifique. Cette dimension apparaît cependant essentielle pour comprendre les liens entre pratiques et représentations et donc éclairer les politiques publiques de gestion de ces risques.

1.1 Une dimension essentielle de la vulnérabilité : la vulnérabilité perçue

Au XXème siècle, les recherches sur les risques dits « naturels » ont longtemps privilégié l'étude des aléas et donc des approches issues des sciences de la terre et de l'ingénieur. Les autres dimensions du risque, notamment les enjeux, étaient abordés essentiellement en termes de vulnérabilité structurelle ou matérielle (résistance des matériaux, moyens de mitigation physique....). Puis, les sciences sociales ont peu à peu investi le champ des risques naturels et ont développé dans les années 1980, la notion de vulnérabilité sociale, prenant en compte les facteurs structurels et fonctionnels des sociétés exposées (structure de la population, organisation sociale et politique, usages, croyances...). L'objectif est alors de mieux cerner la fragilité d'un système dans son ensemble et ses capacités de reconstruction (Birkmann, 2006 ; Becerra, *et al.*, 2009 ; Metzger et D'Ercole, 2011).

³⁷ Programme financé par l'Agence Nationale de la Recherche, référence 2010-CEPL-001-01., dans le cadre de l'APR Changements Environnementaux Planétaires, mars 2011-février 2015, site web cocorisco.fr.

L'approche « psycho-socio-environnementale » (Navarro-Carascal et Michel Guillou, sous presse) y contribue. Elle vise à identifier les facteurs psychologiques, sociaux et culturels mais aussi les conditions de vie (proximité et expérience de risques) et la relation au lieu de vie. Ces facteurs participent à la compréhension de la vulnérabilité globale par la meilleure connaissance de ce que l'on peut appeler *la vulnérabilité perçue* (Moser, 1998). Nous considérons cette approche « psycho-socio-environnementale » comme complémentaire des recherches plus classiques en sciences sociales et nous souhaitons en démontrer l'intérêt à la fois académique et opérationnel.

1.2 Les représentations sociales, fondement de la vulnérabilité perçue

Il est communément admis en psychologie (par exemple, Joffe, 2003 ; Slovic, Fischhoff et Lichtenstein, 1979 ; Slovic, 2000) qu'il existe de grands écarts entre les systèmes d'appréciation des risques par les experts et les systèmes de représentation de ces risques par les « profanes », autrement dit, les personnes non averties (habitants, usagers...). Or ce grand décalage dans l'appréhension des risques engendre des difficultés dans leur gestion. Une meilleure connaissance des représentations pourrait contribuer à réduire ces problèmes. La théorie des représentations sociales, concept majeur de la psychologie sociale notamment en France, apporte ici un éclairage précieux (Joffe, 2003 ; Moscovici, 1976). Les représentations sociales correspondent ainsi à différentes formes de connaissances (éléments informatifs, cognitifs, normatifs, croyances...) véhiculées par la société. C'est une forme de pensée sociale qui permet aux individus d'appréhender leur environnement et qui leur confère une vision du monde. Les représentations sociales sont donc une construction sociale de la réalité, élaborée et partagée par un groupe social et ayant une visée pratique (Jodelet, 1999) qui a pour but de rendre cette réalité signifiante (Abric, 2001). Elles sont fortement contextualisées et dépendent de l'ancrage social des groupes. Doise et ses collègues (Clémence, Doise et Lorenzi-Cioldi, 1994 ; Doise, 1985) définissent les représentations sociales comme des principes générateurs de prises de position et organisateurs des différences individuelles (Doise, 1985). En tant que principes générateurs de prises de position, les représentations sociales fournissent aux individus des points de référence communs qui permettent de réguler les rapports sociaux. En tant que principes organisateurs, elles génèrent des différences et des variations entre les individus (Clémence *et al.*, 1994). Autrement dit, selon l'importance de l'enjeu pour les personnes, et selon leur insertion sociale, les prises de position individuelles envers l'objet varieront (Doise, 1992, 1985).

Ainsi, les représentations sociales des risques par la société, et de manière plus spécifique par les communautés ou groupes sociaux, influencent leurs décisions et leurs actions face à ces risques. Les perceptions et jugements que les populations exposées ont des risques, de leur dangerosité et de leur propre propension à subir des dommages influencent leur capacité de réponse individuelle ou collective et leurs stratégies d'adaptation. Par conséquent, il s'avère important de le reconnaître et de le prendre en compte pour la construction des actions institutionnelles de prévention.

1.3. Objectifs

Ces concepts constituent la base de notre modèle d'analyse de la dimension sociale et humaine des risques côtiers. Ainsi, les représentations nous renseignent sur la façon dont les personnes conçoivent le risque (leurs croyances, leur inquiétude, leurs prises de position...). Nous émettons

l'hypothèse que ces représentations jouent sur les préférences en termes de stratégies d'adaptation et notamment d'aménagements (consolider le trait de côte, ne rien faire, reculer...).

Ces résultats constituent des éléments de compréhension des représentations des habitants face aux risques (leurs attitudes, leurs perceptions, leur sensibilité...), et contribuent donc plus largement à la connaissance de la vulnérabilité des territoires côtiers.

2. Méthodologie

2.1 Une enquête par questionnaire sur cinq sites

En 2012-2013, une enquête a été menée dans le cadre du programme Cocorisco, à partir de questionnaires passés en direct auprès de 894 personnes, réparties sur 5 communes côtières de Bretagne (France) : Guissény, Ile de Sein, Ile Tudy-Combrit, Tour-du-Parc et Pénestin (cf. figure 1). Ces sites-ateliers ont été choisis afin de construire une analyse pluridisciplinaire et de produire des comparaisons inter-sites. Ils sont tous exposés aux risques côtiers, mais ils sont différenciés du point de vue de leurs caractéristiques géomorphologiques et sociales.

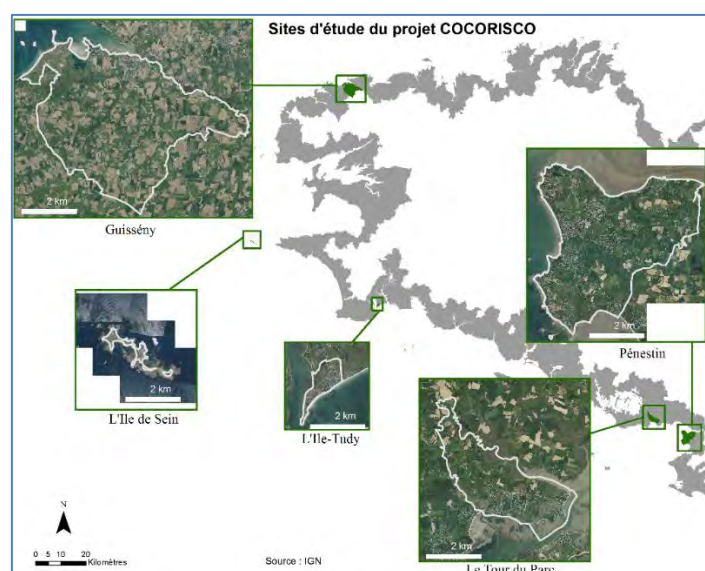


Figure 1 : Les sites d'enquête

La commune de *Pénestin* est une grande commune balnéaire (22 km²) du Morbihan comptant 1910 habitants et 3 020 habitations (Insee³⁸, 2009). Les résidences secondaires y représentent plus des deux tiers des logements et la population est presque multipliée par dix entre la période estivale et le reste de l'année. Le recul d'une falaise argileuse, qui met en péril les habitations construites sur

³⁸ Les chiffres fournis dans la présentation des cinq communes sont issus des résultats du recensement de 2009 mené par l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE).

sa partie sommitale, est la préoccupation majeure de la commune en matière de risque côtier. Pénestin ne fait pas l'objet d'un PPR (Plan de prévention des Risques) concernant ces risques.

Le *Tour-du-Parc* est une commune morbihannaise (9 km²) de 1135 habitants et 907 habitations. Elle est à la fois marquée par le tourisme résidentiel avec 50 % de résidences secondaires, et aussi par une importante activité conchylicole. Une partie de la commune est constituée d'anciens marais salants bordés de quartiers pavillonnaires. Le Tour-du-Parc est régulièrement fragilisé lors des tempêtes par la submersion de ces zones basses. Un PPR concernant les risques submersion est en cours d'élaboration sur cette commune depuis 2011.

La commune de *l'Île-Tudy* dans le sud Finistère est de très petite taille (1,3 km²) et compte 681 habitants et 1473 habitations. On y dénombre 70 % de résidences secondaires ce qui atteste d'un tourisme résidentiel très important. L'urbanisation s'est beaucoup développée près de la côte depuis les années 1950 et s'est largement étendue dans un ancien marais maritime polderisé au XIX^{ème} siècle. Depuis 1997, un PPR réglemente strictement les nouvelles constructions en zone exposée aux risques côtiers.

L'Île de Sein est une petite île (0,6 km²) basse qui culmine à 9 m d'altitude et est de ce fait vulnérable aux fortes tempêtes. Seulement 211 habitants sont recensés à Sein mais la population est souvent multipliée par plus de 10 en été. L'île compte 341 habitations dont près des deux tiers sont des résidences secondaires. Sein n'est pas doté d'un PPR, ni même d'un cadastre.

La commune de *Guissény* est étendue (27 km²) et partagée entre un secteur bas de plaine littorale, en partie poldérisée, et un secteur plus élevé de plateau. Elle compte 1988 habitants pour 1207 habitations. Guissény a la particularité de rester une commune encore très agricole avec une cinquantaine d'exploitations en activité, malgré l'essor du tourisme résidentiel et de la rurbanisation. Contrairement à la plupart des communes côtière bretonnes, elle compte principalement des résidences principales (deux tiers) et concerne moins de retraités que d'actifs. L'érosion d'un cordon dunaire expose certains quartiers récents bâtis en bord de polder à un risque de submersion. En 2007, la commune s'est dotée d'un PPR qui limite les zones constructibles.

Le taux d'échantillonnage par habitation est en moyenne de 15%. Néanmoins le nombre très variable d'habitations sur les différentes communes nous a conduit à retenir des taux d'échantillonnage variés qui vont de 21% pour la commune la moins peuplée (Ile de Sein) à 10% pour la commune la plus peuplée (Pénestin). Au total 894 questionnaires ont pu être exploités.

2.2 Présentation de l'échantillon

Notre échantillon est constitué de 56% de femmes et 44% d'hommes, vivant majoritairement en couple (79%). La moyenne d'âge est de 62 ans, s'échelonnant entre 18 et 93 ans. Ce sont majoritairement des personnes retraités (65%), les actifs représentant 33% (dont 29% avec emploi et 4% sans emploi). Les personnes ayant effectué des études secondaires courtes (BEP-CAP) sont les plus représentées (40%), viennent ensuite les personnes ayant mené des études supérieures courtes (BTS, 23%) ; le pourcentage de personnes ayant effectué des études supérieures longues s'élève à 14% et seulement 2% déclarent n'avoir aucun diplôme. Enfin, 41% des enquêtés déclarent faire partie d'une association (de riverains, sportive, écologique, de loisirs, culturelle...). En lien avec le lieu d'habitation, 96% des enquêtés habitent une maison et 90% sont propriétaires de leur logement. Les habitants en résidence principale sont les plus nombreux (57%). Les personnes interrogées habitent

majoritairement leur commune depuis au moins 10 ans (66%) et 55% y vivent à l'année. Les habitants ont majoritairement acheté leur bien (72%), contre 16% ayant hérité de leur habitation.

Notre échantillon, basé sur une sélection aléatoire d'habitations, n'est pas représentatif, au niveau socio-démographique, de la population parente de chaque commune. Néanmoins nous avons veillé à réaliser les enquêtes sur l'ensemble de la semaine, en journée et en début de soirée, en période de vacances scolaires et en dehors, chez des résidents permanents et secondaires. Le but était de limiter le plus possible le risque de surreprésenter les personnes âgées, inactives ou celles résidant en permanence, plus facilement joignables.

2.3 Outil de recueil et opérationnalisation des variables

L'enquête a été menée par questionnaire administré en direct. Il est constitué de 29 questions (indépendamment du talon sociologique : sexe, âge, profession, niveau d'étude, situation familiale, membre d'association) qui ont été construites à partir d'une étude exploratoire menée par entretiens semi-directifs auprès de 44 habitants des mêmes communes. La première partie du questionnaire porte sur l'habitation et le cadre de vie, la seconde sur les risques (en général) sur la commune et la troisième sur les risques côtiers. Il est constitué de questions fermées, d'échelles d'opinions et d'associations de mots.

En rapport à notre objectif principal, cherchant à explorer l'existence d'un lien entre les représentations du risque et les stratégies d'adaptation, nous explicitons ci-dessous la manière dont nous avons opérationnalisé nos variables.

2.3.1 Comment opérationnaliser la représentation du risque ?

La représentation du risque nous permet d'étudier la manière dont les individus enquêtés conçoivent en général les risques sur leur commune et le risque côtier plus particulièrement. Pour mesurer cette représentation, nous avons utilisé trois indicateurs.

Le premier cherche à identifier la manière dont les enquêtés perçoivent les risques en général. La question est directement posée sous forme d'association de mots « *Donnez-moi les 3 premiers mots ou expressions qui vous viennent spontanément à l'esprit lorsque je vous parle des « risques sur votre commune »* ». Le traitement de cette question a fait l'objet d'une analyse de contenu que nous explicitons ci-dessous.

Le deuxième indicateur nous permet de mesurer l'inquiétude que la personne éprouve face à d'éventuels dégâts que subirait sa commune : « *La perspective de subir des dégâts causés par la mer sur la commune vous inquiète-t-elle ou pas ?* ». Les personnes exprimaient leur degré d'accord sur une échelle de Likert en 5 points allant de « pas du tout inquiet » (1) à « très inquiet » (5). Cette variable nous permet d'évaluer un degré de sensibilité personnelle face au risque.

Le troisième indicateur permet de mesurer ce que nous nommons le « positionnement » face aux risques côtiers. Dans ce cas, il s'agit d'étudier les prises de position que les enquêtés adoptent en réponse aux questions :

- « *Que pensez-vous des risques côtiers actuels (érosion/inondation marine) sur votre commune ?* »
 - Le risque est réel
 - Les conséquences peuvent être importantes

- « *Que pensez-vous du risque futur de montée du niveau marin ?* ».
- Le risque est réel
- Il va falloir s'en préoccuper dans les 10 ans
- Les conséquences seront importantes
- Rien ne prouve que cela arrivera

Pour ce faire, les enquêtés exprimaient leur degré d'accord sur une échelle de Likert en 5 points allant de « tout à fait d'accord » (1) à « pas du tout d'accord » (5).

2.3.2. Comment opérationnaliser les préférences en termes de stratégies d'adaptation ?

Ce dernier point nous permet d'identifier les stratégies d'adaptation préférées par les enquêtés. Une liste d'actions habituellement mises en place pour limiter les risques côtiers (MEDDMM, 2010) leur était proposée. Ils évaluaient chacune en donnant leur degré d'accord sur une échelle de Likert en 5 points allant de « pas du tout adapté » (1) à « tout à fait adapté » (5) : « 1. adapter l'architecture des habitations, 2. consolider les ouvrages de protection contre la mer, 3. construire davantage d'ouvrages de protection, 4. démolir et reculer les habitations, 5. entretenir et restaurer les dunes, 6. alerter et évacuer les populations lorsque le risque survient, 7. interdire toute nouvelle construction en zone à risque, 8. recharger les plages en sable, 9. rouvrir certains terrains sur la mer, 10. aucune action n'est nécessaire ».

2.4 Procédure d'analyse des données

L'étude est à la fois basée sur l'analyse de données qualitatives (association de mots) et quantitatives (questions fermées et échelles d'opinions). « *Undoubtedly a clever combination of quantitative and qualitative measures offers the most profound insight into people's relations with meaningful places.* » (Lewicka, 2011, p. 221).

Les **associations de mots** suscités par l'expression « *risque sur ma commune* » ont été traitées à partir d'une analyse de contenu thématique manuelle. Cette dernière est essentielle pour mener à bien une analyse de données qualitative, elle-même indispensable pour l'étude approfondie d'un thème (Bardin, 2007 ; Krippendorff, 2004). C'est Berelson (1952) qui imposa cette technique comme un outil méthodologique « objectif » de description du contenu des communications car s'appuyant sur des règles d'analyse strictement énoncées et des objectifs de recherche clairement identifiés. La méthode repose notamment sur une grille d'analyse de contenu permettant une catégorisation. Une fois la première version de la grille de catégories établie « à dire d'experts », elle est soumise à un test de fiabilité. Pour ce faire, nous avons extrait les réponses de 100 enquêtés au hasard parmi les 894. Ces réponses ont été réparties dans les catégories de la grille par six juges indépendants. Puis les répartitions de chaque juge ont été comparées entre elles (calcul d'un score inter-juges). La grille a été retravaillée jusqu'à obtention d'un score d'accord inter-juges de 84,30%.

Par ailleurs, les **échelles d'opinions** ont été soumises à des analyses de la variance. La distribution de notre population ne suivant pas une loi normale, des tests non paramétriques ont été effectués : le test *U* de Mann-Whitney pour la comparaison de deux échantillons indépendants et le Kruskal-Wallis pour la comparaison de plusieurs échantillons indépendants.

Enfin, concernant les prises de position face aux risques côtiers, nous avons créé un **indice** qui nous a permis d'identifier des profils de réponses, autrement dit des personnes regroupées selon

leur positionnement commun face aux risques. Ces profils ont été construits à l'aide du test des k-moyennes qui permet de regrouper les individus en un nombre de classes déterminé³⁹. Cette méthode aussi nommée « techniques d'agrégation autour de centres mobiles » est particulièrement appropriée pour les grands tableaux de données (Lebart, Morineau et Piron, 2000).

3. Résultats

3.1. Quelle représentation du risque ?

3.1.1. 29% des personnes évoquent spontanément les risques côtiers

En premier lieu, nous avons pour objectif de repérer la manière dont les enquêtés se représentent les risques sur leur commune. Afin d'influencer au minimum les personnes, nous avons posé la question sous forme d'associations de mots à l'expression « *risques sur votre commune* ». Une première analyse thématique nous permet de regrouper les mots et expressions en plusieurs catégories. Lorsque les personnes parlent des risques sur leur commune, elles évoquent spontanément : les risques quotidiens (risques domestiques, cambriolages, risques routiers, incendies...), les risques environnementaux (pollutions, dégradations du milieu...), les risques côtiers (érosion, inondations marines, tempêtes...), les ouvrages de protection (digues, parfois dénigrement des actions...), les risques liés à l'aménagement urbain (urbanisation, enlaidissement, impact sur la vie personnelle), les risques liés à la démographie (saisonnalité, baléarisation, vieillissement, dépeuplement...), le ressenti sur les risques en général (peur, inquiétude, ou, au contraire, plaisir), la minimisation des risques (ou l'absence de risque).

Sur la base de cette analyse de contenu, nous avons réparti exclusivement les personnes en quatre groupes : (1) celles qui citent d'autres risques mais jamais les risques côtiers (46%) ; (2) celles qui évoquent au moins une fois un risque côtier (29%) ; (3) celles qui considèrent qu'il n'y a pas ou peu de risques en général sur leur commune (18%) ; et (4) celles qui ne savent pas ou ne répondent pas (7%). Ainsi, moins d'un tiers des personnes évoque les risques côtiers comme un phénomène menaçant potentiellement leur commune.

3.1.2. Une faible inquiétude de subir des dégâts

Pour affiner l'analyse des représentations, nous avons cherché à évaluer si les personnes pouvaient être inquiètes ou pas pour leur commune face aux risques côtiers (cf. tableau 1).

	Pas inquiets	Pas position	inquiets	Total
Guissény	81	36	64	181
Île de Sein	21	16	34	71
Île Tudy	96	58	56	210
Pénestin	163	72	66	301
Le Tour-du-Parc	46	37	48	131
Total	407	219	268	894

Tableau 1 : Inquiétude perçue face à la perspective de subir des dégâts causés par la mer sur les communes

³⁹ Pour un exemple d'utilisation de cette méthode statistique, cf. les travaux de Valence et Roussiau (2012).

Parmi les enquêtés, 46% se disent "pas inquiets" face à la perspective de subir des dégâts causés par la mer sur leur commune, 30% se disent "inquiets" et 24% ne prennent pas position ou ne se prononcent pas. En outre, le niveau d'inquiétude n'est pas le même selon la commune d'habitation ($\chi^2=33,90$; $df=8$; $p<.00005$). Les habitants de Pénestin se disent moins souvent inquiets, contrairement aux habitants de l'île de Sein qui apparaissent plus nombreux à être inquiets relativement aux autres enquêtés. Ce contraste peut s'expliquer par la différence d'étendue et d'altitude entre ces deux communes ; sur Pénestin un grand nombre d'habitations situées en retrait de la côte est peu exposé à la mer contrairement à l'île de Sein (cf. figure 1).

3.1.3. Des prises de position variées face aux risques côtiers

Après l'association spontanée de mots à l'expression « *risque sur votre commune* », nous avons cherché à identifier plus finement l'appréhension des risques côtiers par les habitants. Pour ce faire, nous avons construit un indice de « prise de position face au risque côtier » en reprenant l'ensemble des propositions énoncées en méthodologie. Les réponses à l'item « *rien ne prouve* » ont été inversées pour conserver la même orientation (favorable/défavorable) que les autres items. D'autre part, les non réponses (3,6% du corpus) ont été associées à la modalité « 3 » de l'échelle d'accord. Nous justifions ce traitement par le fait que, pour cette question, les personnes qui ont choisi, de ne pas se prononcer (soit parce qu'elles ne le souhaitent pas, soit parce qu'elles ne se sentent pas concernées) peuvent se rapprocher des personnes qui choisissent de ne pas prendre position (modalité « 3 » sur l'échelle, valeur intermédiaire). D'autre part, pour appuyer cette interprétation, nous précisons que l'ensemble des enquêtés a donné une réponse à au moins un des énoncés. Le coefficient de cohérence interne (alpha de Cronbach) s'élève à 0,79. Pour créer notre indice, nous avons utilisé le test des k-moyennes qui nous permet de construire quatre classes représentées au sein de la figure 2.

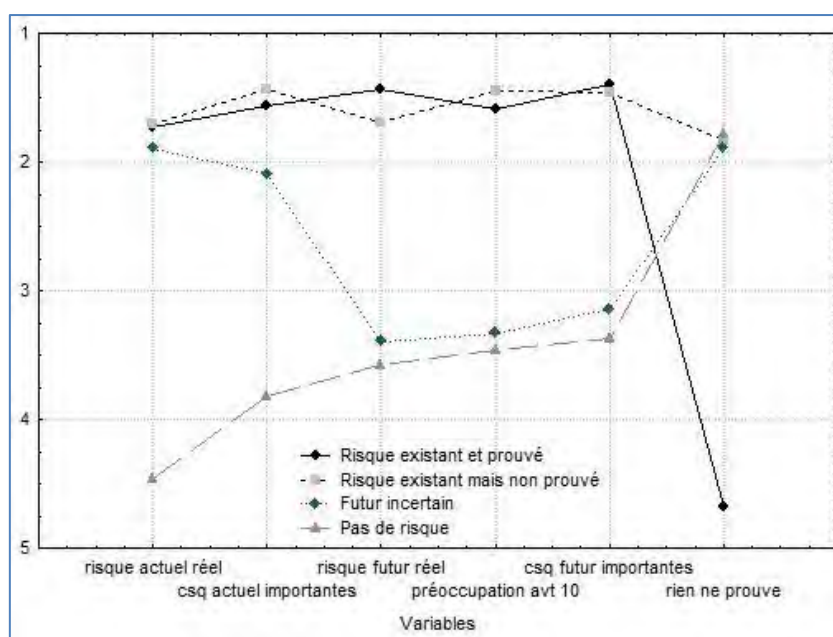


Figure 2 : Indice de prise de position face aux risques côtiers
Tracé des moyennes et représentation des profils

Note : Moyenne des réponses sur une échelle d'opinion allant de « 1 » (tout à fait d'accord) à « 5 » (pas du tout d'accord).

Quatre groupes de prises de position face aux risques côtiers peuvent ainsi être identifiés : (1) *Le risque est existant et prouvé* (n=313) : il regroupe les personnes se déclarant les plus sensibilisées face au risque côtier ; ces personnes estiment que le risque côtier, actuel et futur, et ses conséquences sont importants et ne sont pas d'accord avec l'idée que « rien ne prouve que cela arrivera » ; (2) *Le risque existe mais il n'est pas prouvé* (n=271) : ce groupe est constitué d'individus également sensibles au risque côtier mais à la différence du premier, ils ne sont pas totalement convaincus que le phénomène est prouvé ; (3) *Futur incertain* (n=158) : ce groupe rassemble des personnes qui semblent d'accord avec l'existence d'un risque actuel mais qui ne prennent pas position sur l'existence du risque futur ; de ce fait, ces personnes mettent également en doute la preuve du phénomène ; (4) *Pas de risque* (n=152) : ces personnes ne sont pas d'accord avec l'existence d'un risque côtier actuel, elles ne prennent pas position concernant le risque futur et par conséquent ne sont pas d'accord avec l'idée que le phénomène est prouvé.

Ces premiers résultats permettent d'identifier la manière dont les enquêtés des communes exposées étudiées se représentent le risque. Si, spontanément, les habitants apparaissent peu préoccupés par ces questions (association de mots) lorsqu'on leur demande explicitement leur opinion sur le sujet, ils prennent des positions différentes voire opposées les unes par rapport aux autres. Ces positions sont logiquement susceptibles d'être en lien avec des préférences en termes de stratégies d'adaptation face aux risques côtiers. C'est ce que nous tentons de vérifier dans la partie suivante.

3.2. Quelles stratégies d'adaptation aux risques côtiers ?

3.2.1 Consolider et ne pas reculer

Nous avons ensuite étudié les prises de position des enquêtés face aux stratégies d'adaptation couramment mises en place pour faire face aux risques côtiers. A partir de l'échelle de réponse proposée aux enquêtés, nous avons regroupé leurs réponses en trois catégories : (1) Les stratégies jugées adaptées (réponses 4 et 5 sur l'échelle de Likert), (2) Les stratégies n'ayant pas suscité de prise de position (réponse 3 ou non réponse), (3) Les stratégies jugées peu adaptées (réponses 1 et 2 sur l'échelle). Les réponses sont recensées dans le tableau 2.

	Stratégies adaptées	Pas position	Stratégies peu adaptées
Adapter l'architecture des habitations	47%	17%	36%
Consolider les ouvrages de protection contre la mer	80%	11%	8%
Construire davantage d'ouvrages de protection	62%	17%	22%
Démolir et reculer les habitations	20%	15%	65%
Entretenir et restaurer les dunes	82%	8%	10%
Alerter et évacuer les populations lorsque le risque survient	85%	9%	6%
Interdire toute nouvelle construction en zone à risque	85%	8%	7%
Recharger les plages en sable	33%	19%	48%
Rouvrir certains terrains sur la mer	28%	20%	52%
Aucune action n'est nécessaire	8%	17%	74%

Tableau 2 : Les prises de position face aux stratégies d'adaptation (en pourcentage)

Une très grande majorité de personnes estime qu'une action est nécessaire (74%). Parmi les actions privilégiées, on retrouve : « interdire toute nouvelle construction en zone à risque » (85%), « alerter les populations » (85%), « entretenir et restaurer les dunes » (82%) et « consolider les ouvrages de protection contre la mer » (80%). Parmi les stratégies jugées les moins adaptées, on trouve « démolir et reculer les habitations » (65%) et « rouvrir certains terrains sur la mer » (52 %).

3.2.2. Considération du risque et position interventionniste

Nous rappelons que la représentation du risque est étudiée ici à travers trois variables : (1) l'évocation spontanée des risques sur la commune (association de mots), (2) l'inquiétude perçue face à la perspective de subir des dégâts causés par la mer sur la commune et (3) les prises de position face aux risques côtiers.

Quel lien entre l'évocation spontanée des risques sur la commune et les stratégies d'adaptation préférées ?

Dans un premier temps, nous avons simplement croisé l'évocation spontanée des risques avec l'item « aucune action n'est nécessaire ». Un lien significatif apparaît ($\chi^2=14,65$, $dl=6$, $p<.05$) mettant en évidence que les personnes qui rejettent l'item « aucune action n'est nécessaire » sont celles qui citent spontanément des termes faisant référence aux risques côtiers. Autrement dit, les personnes citant spontanément ces risques sont plus nombreuses à estimer également qu'il faut agir envers les risques côtiers.

Quel lien entre le niveau d'inquiétude et les stratégies d'adaptation préférées ?

A l'évidence, lorsque l'on est inquiet par la perspective de subir des dégâts causés par la mer sur sa commune, on estime qu'« aucune action » n'est pas une stratégie adaptée, à l'inverse des individus qui ne sont pas inquiets ($\chi^2=10,00$, $dl=4$, $p<.05$). En outre, lorsque l'on n'est pas inquiet, on estime que construire davantage d'ouvrages de protection n'est pas adapté, à l'inverse également de ceux qui sont inquiets ($\chi^2=26,95$, $dl=4$, $p<.00005$). Les personnes peu inquiètes estiment également que reculer les habitations n'est pas adapté, à l'inverse cette fois des personnes qui ne prennent pas position ($\chi^2=27,58$, $dl=4$, $p<.00005$) ; cette même configuration de lien est observée pour l'item « recharger les plages en sable » ($\chi^2=21,09$, $dl=4$, $p<.0005$). Concernant l'interdiction de construire en zone à risque, le lien apparaît davantage entre les personnes inquiètes qui jugent cette stratégie adaptée, contrairement aux personnes peu inquiètes ($\chi^2=12,77$, $dl=4$, $p<.05$). Et enfin, ce sont les personnes peu inquiètes qui estiment que « rouvrir certains terrains sur la mer » est une stratégie peu adaptée contrairement aux personnes inquiètes qui estiment plus que les autres que c'est une action adaptée ($\chi^2=12,93$, $dl=4$, $p<.05$).

Quel lien entre les prises de position face aux risques côtiers et les stratégies d'adaptation préférées ?

Ce croisement met en évidence des résultats significatifs. D'une manière générale, les personnes qui estiment qu'il n'y a pas de risque privilégient « aucune action n'est nécessaire » ($\chi^2=33,39$, $dl=6$, $p<.00005$). A l'inverse, les personnes qui estiment que le risque existe et qu'il est prouvé estiment qu'il faut intervenir. Globalement, elles sont les plus favorables à toutes les stratégies et notamment à celle concernant la démolition et le recul des habitations ($\chi^2=17,89$, $dl=6$, $p<.01$).

En conclusion, sur les préférences en termes de stratégies d'adaptation, on observe clairement que les positions les plus interventionnistes, quelle que soit la stratégie, concernent davantage les personnes qui sont les plus inquiètes face au risque côtier et qui estiment que ces risques existent et

que leur aggravation future est prouvée. Ce résultat n'a rien de surprenant mais il permet de démontrer que les représentations des risques influencent nettement les avis des habitants sur les politiques d'adaptation à mener. Cet élément est important, à la fois pour mieux comprendre les attitudes des personnes exposées et certaines difficultés d'application des politiques publiques de gestion des risques (notamment la réticence au repli).

4. Discussion et conclusion

Spontanément, en association à l'expression « *risque sur votre commune* », moins du tiers (29%) des personnes interrogées fait référence à un élément des risques côtiers (submersion, inondation, érosion, tempête...). Ce chiffre montre une faible vulnérabilité perçue, ces risques n'étant pas présents dans leur quotidien. Pourtant, lorsqu'on demande aux personnes de se positionner sur les risques côtiers actuels sur leur commune, les deux tiers (66%) déclarent que le risque est réel, et seulement 17% appartiennent au groupe qui considère que le risque n'existe pas. Ce décalage apparent reflète non pas un sentiment d'inquiétude face aux risques mais une prise de position suscitée par la demande du chercheur (Doise, 1982). En ce sens, on accède aux représentations sociales des risques côtiers qui varieront selon l'importance du sujet pour les personnes. Ainsi, différents groupes d'individus se distinguent selon leur position face aux risques côtiers : ceux qui considèrent que le risque existe et qu'il est prouvé, ceux qui estiment que le risque existe mais qu'il n'est pas prouvé, ceux qui pensent que le futur est incertain, et ceux qui déclarent qu'il n'y a pas de risque.

Ces différentes prises de position sont clairement liées aux préférences en termes d'adaptation. Ainsi les positions les plus interventionnistes en matière d'aménagement côtier se rapportent plutôt aux personnes qui estiment que ces risques existent et que leur aggravation future est prouvée ; et les personnes qui minimisent ces risques considèrent davantage qu'aucune action n'est nécessaire. Les prises de position par rapport aux risques influencent donc les préférences des habitants sur les interventions d'adaptation à mener ou pas. Ces résultats contribuent à expliquer notamment le décalage existant entre la stratégie nationale de gestion du trait de côte (MEEDDM, 2012) et son application sur le terrain (Meur-Ferec et Rabuteau, sous presse). Par exemple, la relocalisation prônée par cette politique publique est considérée comme inadaptée par les deux tiers des personnes interrogées.

Les résultats de cette recherche montrent donc des liens entre les représentations des risques côtiers et les stratégies d'adaptation. Ces éléments permettent d'appréhender la dimension humaine et sociale des risques côtiers qui constitue une composante fondamentale de la vulnérabilité globale aux risques. Nos résultats soulignent par conséquent l'importance pour les politiques publiques de considérer les positions des personnes concernées et/ou exposées aux risques pour saisir le décalage fréquemment observé entre politiques et pratiques.

Dans la continuité de cette recherche, nous pensons que ces positions face aux risques côtiers et ces préférences en matière d'adaptation sont aussi en relation avec l'attachement au lieu (Lewicka, 2011). En ce sens, des travaux démontrent que les personnes fortement attachées à leur lieu d'habitation ont tendance à minimiser le risque (Billig, 2006 ; Moser, 2009 ; Navarro, 2009 ; Flanquart *et al.*, 2013), notamment parce qu'un lieu de vie participe à la construction de l'identité des personnes (Bonaiuto *et al.*, 2002). Nous approfondissons actuellement cette hypothèse.

Références bibliographiques

- Abrieu, J.-C. (Ed.) (2001) *Pratiques sociales et représentations*. Paris : PUG. Nombre de pages
- Bardin, L. (2007). *L'analyse de contenu*. Paris : PUF. Nombre de pages
- Becerra S., Peltier A. (2009). *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*. Paris, l'Harmattan, 575 p.
- Berelson, B. (1952). Content analysis in communication research. New York, US: Free Press. Nombre de pages
- Billig, M. (2006). Is my home my castle? Place attachment, risk perception, and religious faith. *Environment and Behavior*, 38, 248-265.
- Birkmann J. (dir) (2006) *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Toward Disaster Resilient Societies*, United Nations University Press, 400 p.
- Bonaiuto, M., Carrus, G., Martorella, H., Bonnes, M., (2002). Local identity processes and environmental attitudes in land use changes: the case of natural protected areas. *Journal of economic psychology* 23, p. 631-653.
- Clémence, A., Doise, W. et Lorenzi-Cioldi, F. (1994). Prises de position et principes organisateurs des représentations sociales. Dans C. Guimelli (Ed.), *Structures et transformations des représentations sociales* (pp. 119-152). Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.
- Dardel E. (1952) *L'Homme et la Terre*. Nature de la réalité géographique. Réédition 1990, Paris, CTHS. Pages ?
- D'Ercole, R., Metzger P., 2011. Les risques en milieu urbain : éléments de réflexion, *EchoGéo* [En ligne], numéro 18, mis en ligne le 5 décembre 2011. URL : <http://echogeo.revues.org/12640>.
- Doise, W. (1992). L'ancrage dans les études sur les représentations sociales. *Bulletin de Psychologie*, 45, 189-195.
- Doise, W. (1985). Les représentations sociales : Définition d'un concept. *Connexions*, 45, 243-253.
- Doise, W. (1982). *L'explication en psychologie sociale*. Paris : Presses Universitaires de France. Nombre de pages
- Flanquart, H., Hellequin A.-P., Vallet P. (2013). Living alongside hazardous factories: risk, choice and necessity. *Health, Risk & Society*, 15:8, p.663-680.
- Hellequin A.-P., Flanquart H., Meur-Ferec C., Rulleau B. (2013). Perceptions du risque de submersion marine par la population du littoral languedocien : contribution à l'analyse de la vulnérabilité côtière, *Nature, Sciences, Sociétés*, 21, p. 385-399.
- Jodelet, D. (1999).- Représentations sociales : Un domaine en expansion. In D. Jodelet (Ed.), *Les représentations sociales* (pp. 47-78, 6e éd.). Paris : Presses Universitaires de France. Nbre de pages
- Joffe, H. (2003). Risk : From perception to social representation. *British Journal of Social Psychology*, 42, 55-73.
- Krippendorff, K. (2004). *Content Analysis: An Introduction to Its Methodology* (2nd ed.). Thousand Oaks, California : SAGE. Nombre de pages
- Lebart, L., Morineau, A. et Piron M. (2000). *Analyse exploratoire multidimensionnelle* (3^e éd.). Paris : Dunod. Nombre de pages, retrait en début de ligne ?
- Lewicka M. (2011) Place attachment: How far have we come in the last 40 years? *Journal of Environmental Psychology* 31, p. 207-230.
- MEEDDM (2010). *La gestion du trait de côte*, Editions Quae. 304 p.

- Meur-Ferec C., Rabuteau Y. (sous presse). Plonevez-les-Flots : un territoire fictif pour souligner les dilemmes des élus locaux face à la gestion des risques côtiers. *L'espace Géographique*.
- MEEDDM (2012). Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte : vers la relocalisation des activités et des biens : principes communs, recommandations stratégiques, programme d'actions 2012-2015, 20 p.
- Michel-Guillou, E. (2011). La construction sociale de la ressource en eau. *Pratiques Psychologiques*, 17, 219-236.
- Moscovici, S. (1976). *La psychanalyse, son image, son public*. Paris : PUF. Nombre de pages
- Moser, G, (2009). *Psychologie environnementale. Les relations homme-environnement*. Bruxelles : De Boeck. Nbre de pages
- Moser, G. (1998). Attribution causale et sentiment d'insécurité de victimes de différents types de vols. *Les Cahiers Internationaux de Psychologie Sociale*, 39, 43-52.
- Navarro-Carascal, O., et Michel-Guillou, E. (sous presse ?). Analyse des risques et menaces environnementales : un regard psycho-socio-environnemental. Dans D. Marchand, D., S. Depeau, S. & K. Weiss, K. (Eds.), *L'individu au risque de l'environnement*. Paris : In Press ? déjà dit.
- Navarro, O. (2009) Représentations sociales de l'eau dans un contexte de conflits d'usage: le cas de la sierra Nevada de santa Marta, Colombie. *Cahiers Internationaux de Psychologie Sociale*, 81, 65-86.
- Slovic, P. (2000). *The perception of risk*. London: Earthsca. Nombre de pages
- Slovic, P., Fischhoff, B. & Lichtenstein, S. (1979). Rating the risks. *Environment*, 21, 14-20.
- Valence, A. et Roussiau, N. (2012). Les représentations des Droits de l'Homme et de l'immigration : une approche systémique de la pensée sociale. *Les Cahiers Internationaux de Psychologie Sociale*, 95-96, 369-392.

Perception *versus* représentation du risque de submersion et autres risques : ce que révèle une querelle sémantique

Hervé Flanquart¹

1. Territoires, Villes, Environnement & Société, Université du Littoral Côte d'Opale - Maison de la Recherche en Sciences de l'Homme

21, quai de la Citadelle, 59140 Dunkerque

hflanquart@yahoo.fr

RESUME

Que ce soit en sociologie, en géographie humaine ou en psychologie sociale, les querelles sont récurrentes pour savoir quel terme est le plus exact pour décrire les rapports psychiques et sociaux que les individus entretiennent avec les risques auxquels ils sont soumis. Certains préfèrent employer l'expression « perception du risque », d'autres celle de « représentation du risque ». Si le débat peut sembler à première vue anecdotique – voire oiseux, on constate néanmoins, du moins lorsque l'on se penche sérieusement sur la question, que le choix des termes n'est pas neutre. Qu'il renvoie aux conceptions, souvent peu explicites, du chercheur sur les rapports de connaissance et d'action que les individus entretiennent avec leur environnement physique et social, et en particulier avec les risques. Ces rapports au risque sont-ils pleinement conscients et réflexifs, ou au contraire spontanés et « enfouis » ? Sont-ils prioritairement de l'ordre de l'individuel ou socialement construits ? Renvoient-ils plus à la nature de l'espèce humaine ou sont-ils surtout l'émanation du contexte culturel ? Nous nous proposons de répondre – au moins partiellement – à ces questions en nous appuyant sur une enquête faite en 2010 en Languedoc et portant sur les rapports que les populations littorales entretiennent avec le risque de submersion marine. Si ces rapports possèdent une forte dimension consciente, s'ils donnent lieu si ce n'est à un débat public structuré du moins à des échanges soutenus entre individus, si enfin le chercheur peut faire surgir au cours de ses interviews des discours relativement cohérents et structurés sur cette question, alors il semble légitime de parler de « représentation du risque ». Au contraire, si les rapports à ce risque de submersion sont surtout infra-conscients, s'ils ne s'inscrivent que peu dans les échanges privés et encore moins dans le débat public, si le chercheur constate de fortes contradictions et de grandes lacunes dans les réponses spontanées des habitants à ses questions, alors l'expression « perception du risque » est plus appropriée pour rendre compte de la réalité.

Mots-clés : Représentations, Perceptions

1. Introduction

Que ce soit en sociologie, en psychologie sociale ou en géographie humaine, les débats sont récurrents pour savoir quel terme est le plus exact pour décrire les rapports que les individus entretiennent avec les risques auxquels ils sont soumis. Certains préfèrent utiliser l'expression « perception du risque », d'autres celle de « représentation du risque ». Si le débat peut sembler à première vue anecdotique, voire oiseux, on constate néanmoins, du moins lorsque l'on se penche sérieusement sur la question, que le choix des termes n'est pas neutre. Qu'il renvoie à la conception, souvent peu explicite, que le chercheur possède des rapports de connaissance et d'action que les individus entretiennent avec leur environnement physique et social, et en particulier avec les risques. Ces rapports au risque sont-ils pleinement conscients et réflexifs, ou au contraire spontanés et « enfouis » ? Sont-ils prioritairement de l'ordre de l'individuel ou socialement construits ? Renvoient-ils plus à la nature humaine ou sont-ils surtout l'émanation du contexte culturel ?

A partir de ce que l'on peut trouver dans la littérature sur le sujet et en évoquant des enquêtes de perception auxquelles j'ai pu participer – notamment celle faite en 2010 en Languedoc et portant sur les rapports que les populations littorales entretiennent avec le risque de submersion marine (Rey-Valette *et al.*, 2013) –, je me propose d'apporter quelques éléments de réponse à ces questions. Mon intervention se déroulera en trois temps. Dans le premier, j'argumenterai pour montrer que la perception ne se limite aucunement – comme lui reprochent souvent celles et ceux qui veulent exclure ce mot du vocabulaire des rapports aux risques – à une simple transmission d'informations en provenance des sens. Le deuxième temps sera utilisé pour montrer que le terme de perception est plus adapté si l'on veut évoquer un rapport au risque qui est fragmenté et mouvant, alors que celui de représentation convient mieux lorsque la prise en compte du risque de l'individu ou du groupe social est unifiée et plutôt stable. Enfin, dans le troisième temps de cette intervention – qui en constituera aussi la conclusion –, je me propose de montrer comment on peut articuler les deux termes de perception et de représentation, et comment représenter dans un schéma les rapports qu'ils entretiennent entre eux.

2. Percevoir avec ses sens et ses souvenirs

Le reproche que l'on fait souvent à l'expression perception du risque est d'être trop liée aux facultés sensorielles des individus, pas assez à leurs aptitudes d'analyse. Cette locution aurait le défaut de véhiculer l'idée que c'est seulement en le voyant, en le sentant, en l'entendant, en le palpant qu'on entre en relation avec le risque ; or, comme celui-ci est quelque chose d'incontestablement complexe, de non spontanément construit, parler à son propos de perception paraît relever d'une vision naïve, presque absurde des choses. Patrick Peretti-Watel, partisan déclaré de l'utilisation du terme « représentation », explique que celle-ci possède sur celui de « perception » l'incontestable avantage d'assumer « la richesse du travail cognitif qui construit le risque au lieu de simplement l'apercevoir, sans connoter négativement cette richesse » (2000, 199). Pourtant, comme je vais tenter de le montrer, en-dehors du fait qu'il est celui qu'emploient les psychologues

cognitivistes et les sociologues anglo-saxons et qu'il a été de plus longtemps dominant en France, le terme de perception n'a pas tous les défauts qu'on lui attribue ; il possède même quelques atouts sérieux. Il existe des raisons épistémologiques fortes pour l'utiliser et le préférer dans certains contextes à celui de représentation.

D'abord penchons-nous sur la définition commune du mot perception. Qui fait l'effort d'aller voir dans un dictionnaire de français courant (le *Petit Robert*, par exemple) découvre qu'on emploie le mot dans trois sens différents (si on laisse de côté celui qui a trait au recouvrement de l'impôt), mais assez proches :

- le premier – « vieilli » nous avertit le *Petit Robert* – est celui d'« acte, opération de l'intelligence, représentation intellectuelle » ;
- le deuxième, qui relève plus spécifiquement du domaine de la psychologie, renvoie à « la fonction par laquelle l'esprit se représente les objets » ;
- Enfin, le troisième, littéraire cette fois, est celui de « prise de connaissance, sensation, intuition ».

Notons d'abord que, malgré leurs divergences, les trois définitions renvoient clairement à une fonction, un processus qui mobilise au moins autant l'esprit, les facultés cognitives que les sens ; ensuite que deux d'entre elles incluent la notion de « représenter/représentation ». Aussi, contrairement à ce qu'affirment les adversaires de son utilisation pour décrire la relation au risque des individus, le terme de perception possède, dans son usage courant, un sens plus large que celui de représentation. Ce qui rend dès lors difficilement compréhensible l'hostilité qu'ils lui marquent : il semble qu'ils amputent (volontairement ou par simple méconnaissance) la définition du mot perception de tout ce qui renvoie à l'aspect cognitif, au fonctionnement mental de l'opération de percevoir... pour ensuite lui reprocher de ne pas contenir ce qu'ils viennent eux-mêmes de retirer !

Si on abandonne maintenant le sens courant du terme pour se tourner vers celui qui lui est attribué en psychologie, discipline où il est intensément utilisé (voir par exemple Sjöberg, 2000 ; Slovic, 1987 ; Fischhoff *et al.*, 1978), on constate que, là, la complexité de l'opération de percevoir est encore mieux soulignée. Ainsi, Claude Bonnet (2006, 69), cherchant à définir ce qui se passe quand un individu perçoit, insiste d'emblée sur l'aspect complexe du processus. Il le définit comme un ensemble d'activités « liées à la prise de connaissance (consciente ou non) de notre monde environnant et de nos actions propres », et le voit donc comme constitué de toute une série d'interactions entre l'être psychique et son milieu externe et interne. La perception n'est en aucun cas un simple « chemin » qui amènerait, avec une totale fidélité, des images, des sons, des goûts, ou encore des ressentis internes, au cerveau, où ils seraient « lus » de manière neutre. Au contraire, la perception, que Bonnet caractérise comme le « produit de l'activité d'un organisme biologique, ou si l'on veut biologique-et-mental », est une activité qui doit être envisagée à différents niveaux pour être comprise. Et ces niveaux s'empilent de manière hiérarchique, du moins pour les trois premiers : le plus bas étant celui de la « biochimie moléculaire », le deuxième, un cran au-dessus, celui de la « neurophysiologie unitaire (neurone isolé) », le troisième celui des « populations de neurones », le

quatrième celui des « activités cérébrales organisées » et le cinquième – le plus élevé – celui du « mental ou psychologique » (71). Pour Bonnet, quand on tente de décomposer le processus pour comprendre en quoi consiste l'opération de percevoir, on constate que si les influx nerveux partent bien des différents récepteurs⁴⁰, ils subissent ensuite, tout au long de leur chemin, des traitements qui sont à la fois sensoriels, de structuration et d'interprétation. Il n'existe par ailleurs aucune « structure "centrale" vers laquelle convergeraient les informations » brutes de toute transformation et où elles seraient décryptées de manière automatique ; bien au contraire, dès l'étape de leur acheminement, existent des rétroactions, des redescentes vers les récepteurs qui permettent « la coordination d'informations distribuées dans différentes structures et condui[sent] ainsi à leur mise en cohérence. » (p.84)

Dans ce modèle qui s'appuie sur les recherches récentes en psychologie cognitive (rendues possibles en partie par les progrès faits en imagerie cérébrale), on est bien loin de la définition de la perception qui reçoit les critiques des tenants exclusifs du terme de « représentation des risques ». Ces critiques paraissent en effet surtout s'adresser à la tradition du béhaviorisme radical, qui est pourtant abandonnée par l'immense majorité des psychologues depuis près d'un demi-siècle. Le paradigme cognitiviste – éclairé par les neurosciences – qui m'inspire dans ma défense de l'expression « perception des risques » se situe bien loin de ce courant qui défend l'idée d'un enchaînement automatique stimulus/réaction (Le Ny, 2002). Dans ce paradigme, parler de la perception d'un objet, d'un son, d'une odeur, d'un mouvement, etc., c'est au contraire évoquer un processus qui mobilise tout autant le cerveau et ses fonctions neuronales que les capteurs sensoriels (œil, oreille, nez, etc.). Car même si ces derniers sont les premiers à s'activer dans le phénomène de perception, ils ne possèdent guère d'indépendance et reçoivent du cerveau, avant même la fin du traitement, des informations qui les amènent à modifier leur travail.

Il est possible et logique d'affirmer que ce qui est vrai pour la perception d'objets et situations simples l'est encore plus quand ceux-ci et celles-ci présentent une certaine complexité. S'il est par exemple impossible de regarder un objet rond et rouge sans que soit automatiquement mobilisée une partie de ce que nous avons rencontré par le passé qui possède cette forme et cette couleur, combien est-il encore plus inconcevable que le cerveau n'utilise pas les informations stockées lorsque nous sommes confronté à un danger présentant des caractéristiques complexes (comme celui de subir une submersion marine lorsqu'on réside en bord de mer ou une explosion ou une intoxication par un nuage toxique quand il y a une usine dans notre environnement immédiat)⁴¹ !

⁴⁰ Ces récepteurs ne sont d'ailleurs pas seulement ceux associés aux cinq sens (cas des stimulations sensorielles extéroceptives) mais aussi ceux qui nous permettent de capter des « sensations » à l'intérieur de notre propre corps (cas des stimulations sensorielles kinesthiques).

⁴¹ Cette mobilisation de connaissances et sensations emmagasinées au cours du passé est par ailleurs non seulement inévitable mais de plus stimulée par l'émotion engendrée par le danger, comme certains spécialistes du cerveau l'ont montré (Damasio, 2010).

Lorsque nous traversons une rue et que nous voyons une voiture arriver, la perception du risque qu'elle représente pour notre sécurité mobilise des savoirs, des souvenirs et des émotions. Nous utilisons tout à la fois notre connaissance de ce qu'est l'objet voiture, l'estimation spontanée que nous faisons de son allure et de la distance minimum nécessaire pour qu'elle puisse s'arrêter, les informations enregistrées de manière infra-conscientes sur l'attitude et la vigilance du chauffeur que nous apercevons à travers le pare-brise (nous a-t-il vu ? est-il au contraire distrait ? Etc.)⁴², la conscience de l'état sec ou mouillé de la chaussée, et bien d'autres choses encore. C'est l'ensemble de ces éléments, perçus et croisés avec notre capacité estimée à ce moment-là à faire un écart brusque pour éviter la collision (sensation kinesthétique), qui fait que nous percevons cette arrivée comme plus ou moins dangereuse. Dans cette opération mentale complexe d'estimation d'un risque et de prise de décision, les sens ne sont pas les seuls à travailler, souvenirs et facultés d'analyse sont elles aussi pleinement mobilisés. Ainsi, bien que disposant du même appareil sensoriel que le nôtre, un individu qui n'aurait jamais été confronté à l'objet automobile (parce qu'il vivrait par exemple dans une tribu très isolée de Papouasie-Nouvelle-Guinée) n'aurait absolument pas la même perception du danger que représente son arrivée à vive allure. Peut-être le surestimerait-il et s'enfuirait-il très loin alors qu'il n'aurait été nécessaire que de s'écarter d'un mètre ou moins encore pour éviter d'être renversé. Peut-être serait-il au contraire incapable de bouger, paralysé qu'il serait par sa soudaine confrontation à un phénomène totalement étranger à son cadre cognitif et pour lequel il n'a encore acquis aucune réaction adéquate. De même, quelqu'un qui verrait un pistolet ou un revolver braqué sur sa personne, mais qui ne connaîtrait ni la nature ni l'usage de cet objet, distinguerait bien le métal briller, le regard agressif de celui qui tient l'arme, mais ne percevrait pas du tout de la même façon que nous qui en avons vu des centaines, au moins à l'écran, le danger devant lequel il se trouve. Les Amérindiens n'ont dû comprendre la dangerosité des fusils tenus par les premiers colons européens que lorsque ces derniers ont commencé à s'en servir. Avant qu'ils ne se mettent à « cracher du feu », pour reprendre les termes utilisés dans les westerns, les « bâtons » des pionniers devaient sembler bien inoffensifs. En revanche, par la suite, les Amérindiens, qui ont acquis un certain nombre de connaissances sur ces objets et les ont classés dans la catégorie des armes particulièrement dangereuses, se sont mis à percevoir différemment le danger qu'il y avait à être face à quelqu'un qui en disposait et s'apprêtait à s'en servir.

Percevoir un risque constitue bien une opération complexe, dont une grande partie est infra-consciente, mobilisant à la fois ce que nos sens envoient comme informations à notre cerveau et ce que celui-ci possède déjà en stock comme représentations et connaissances permettant de les interpréter. Ce n'est pas très différent de ce qui se passe lorsque l'on perçoit de l'ennui ou une tension dans une assemblée que l'on rejoint : ces états particuliers n'existent pas en tant que tels dans le monde physique, mais cela n'empêche pas que l'on puisse enregistrer des signes de leur

⁴² En 2013, la gendarmerie et les instances de sécurités routières se sont d'ailleurs inquiétées des conséquences pour les piétons et pour les motards de la mode des vitres latérales avant fortement teintées. Voir par exemple <http://sosconso.blog.lemonde.fr/2013/11/20/faut-il-interdire-les-vitres-teintees-des-voitures/> (consulté le 24 mars 2014).

possible existence ; et ce sont ces signes qui sont traités par notre cerveau pour donner un sens, un nom à l'atmosphère qui nous entoure. Ils sont confrontés entre eux et comparés à des souvenirs de moments où ils étaient également présents et ont alors été décryptés comme propres à des situations d'ennui ou de tension.

Les connaissances inconscientes acquises par implémentation (Bronner, 2010), les schémas culturels acquis par socialisation, les expériences particulières, etc. sont sans cesse mobilisés et croisés – le plus souvent de manière au moins partiellement inconsciente – avec ce que nos sens font remonter vers le cerveau. Et c'est ce croisement qui constitue la perception. On peut détecter, en rejoignant un groupe assemblé, tous les signes d'une situation d'ennui ou de tension, il n'est absolument pas nécessaire que l'on se soit pour autant formulé les choses clairement. Mais, si quelqu'un venait à nous interroger sur ce que nous ressentons à ce moment-là, on serait certainement capable de citer au moins une partie des éléments caractéristiques de ce que l'on perçoit⁴³.

Pour ce qui est du risque, le mécanisme est assez semblable : il n'a, comme l'ennui ou la tension, pas d'existence physique propre ; mais, comme pour ces deux « sensations », cela n'empêche pas qu'on puisse le percevoir. Dans l'exemple du risque industriel encouru lorsque l'on réside ou séjourne à proximité d'une raffinerie ou d'un haut-fourneau, ce sont les odeurs de gaz que l'on sent, le bruit des torchères que l'on entend, le souvenir d'un accident industriel grave relaté par les médias présent à notre esprit et bien d'autres éléments encore qui, assemblés et recombinaés dans notre cerveau, font qu'on le perçoit (plus ou moins consciemment) d'une certaine façon. Pour le risque de submersion, les choses sont assez semblables, puisque ce sont les bruits et images de la mer déchaînée, les informations plus ou moins alarmistes transmises par les médias, les constats personnels qui ont pu être faits dans le passé à propos de l'avancée de la mer dans les terres, etc. qui, composés ensemble, déterminent sa perception par les habitants des zones littorales basses.

Pour résumer ce premier point de notre intervention, on peut donc dire que la notion de perception est bien plus riche que celle de représentation, puisque la première inclut la seconde et pas l'inverse. On peut citer une fois encore Claude Bonnet sur ce point, lorsqu'il affirme que « la fonction primordiale de la perception n'est pas la contemplation du monde mais l'action » et que pour ce faire elle utilise toujours des représentations, même « chez des individus non langagiers, bébés et animaux »⁴⁴.

⁴³ C'est d'autant plus vrai si l'on adhère à la thèse de Damasio (2010) sur l'utilisation du corps et non seulement le cerveau dans le stockage des émotions et connaissances. Kahneman (2012, 66) partage cette thèse, puisqu'il écrit : « [L]a cognition est incarnée ; vous pensez avec votre corps, pas seulement avec votre cerveau ».

⁴⁴ Chez des espèces animales non langagières, des stimulations entraînent un comportement de fuite ou de capture de proie. Et Bonnet explique que ce ne peut être du seul domaine du réflexe : « Une conception purement réflexologique ne peut être maintenue, du moins chez les vertébrés. Même les réflexes médullaires sont susceptibles de modulation de leur amplitude par le cortex. A ne considérer que les espèces évoluées,

3. Perception fragmentée et mouvante *versus* représentation unifiée et stable.

Si l'emploi du terme de perception est souvent plus adéquat que celui de représentation pour rendre compte des relations que les individus entretiennent au quotidien avec les risques, ce n'est pas seulement, comme nous venons de le voir, parce qu'il a un sens plus large et ne possède pas le principal défaut qu'on lui prête généralement (il renverrait à un mécanisme purement sensoriel), c'est aussi parce qu'il ne suggère pas, contrairement à ce que fait son concurrent, que les individus ont une vision claire et arrêtée des risques. Parler de perception ne sous-entend pas qu'il existerait dans le cerveau des individus, pour chaque type de risque, quelque chose de construit et cohérent qui n'attendrait que la question du chercheur pour en sortir toute armée, un peu comme Minerve émergeant de la tête de Jupiter. Or, les expériences d'enquête auprès de personnes subissant des risques montrent que cette idée est fautive : les personnes que nous avons interrogées, aussi bien sur le risque de submersion marine qu'industriel, n'avaient généralement pas réfléchi de manière méthodique à la question et ne possédaient à son propos aucun système déjà construit qui aurait pu mériter le nom de « représentation ». Bien-sûr, elles n'étaient pas vierges de sensations et de réflexions partielles sur la question, mais à l'exception notable des militants environnementalistes et de rares passionnés de la question, ces éléments ne formaient aucunement un ensemble cohérent et bien circonscrit. Au contraire, au gré des réponses données à nos questions, apparaissaient souvent d'importantes contradictions. Les personnes rencontrées possédaient certes toutes des informations, des sentiments, des souvenirs sur le risque industriel ou celui de submersion, et étaient certainement prêtes à les mobiliser quand leurs sens étaient éveillés par des phénomènes inhabituels et potentiellement inquiétants (fumées particulièrement denses, signes de tempête, etc.), néanmoins très peu d'entre elles possédaient ce que l'on pourrait appeler *une* représentation du ou des risques évoqués.

Ainsi, la perception du risque doit être vue comme un édifice à plusieurs étages abritant des connaissances et processus cognitifs, conscients pour les plus élevés, infra-conscients pour les plus bas, au statut mal déterminé pour les intermédiaires. Et il existe des migrations d'un étage à l'autre. Par exemple du conscient à l'infra-conscient quand, du fait de la familiarité avec le risque, de sa fréquentation quotidienne, on se met à l'oublier (Flanquart *et al.*, 2013 ; Tulloch et Lupton, 2003). Ou dans le sens inverse, quand, à la faveur d'un accident ou d'une catastrophe dont on est soudainement informé, le danger occulté depuis longtemps ré-émerge à la conscience (Bickerstaff *et al.*, 2006).

Il est ainsi difficile d'adhérer à l'idée que, quand le chercheur interroge un individu sur ses rapports à un risque précis, il aurait surtout pour tâche – grâce à des questions bien posées et qui se recoupent – de traquer puis de faire émerger en paroles quelque chose de déjà bien construit : une représentation (Abric, 2003). La façon dont l'individu considère le risques est instable, variable dans

toutes manifestent des capacités d'apprentissage et de généralisation qui traduisent l'existence de représentations [...]. » (91)

le temps, et ce n'est que parce qu'il est sollicité par le chercheur que l'interviewé construit, dans l'instant, en mobilisant les éléments de perception qu'il possède et en les faisant souvent passer du statut d'inconscient à celui de conscient, un discours plus ou moins organisé. On peut alors légitimement appeler « représentation » ce qui émerge, mais il faut savoir que celle-ci est « bricolée » dans l'instant, que son existence est essentiellement circonstancielle et provisoire ; le chercheur aurait bien tort de croire qu'elle préexistait à la question qu'il a posée et l'a fait naître⁴⁵ ! Il est plus exact de dire que les individus ont une perception – spontanée, en partie consciente et en partie inconsciente – des risques, et que celle-ci ne devient représentation que quand ils sont sollicités pour en parler, ou parce que pour des raisons professionnelles ou d'engagement social ils s'y intéressent particulièrement. De manière générale, on peut affirmer que le terme de représentation est difficilement conciliable avec les adjectifs « inconscient », « instable », « fragmentaire » et « émotionnel », qui pourtant caractérisent le plus souvent notre rapport au risque, quel qu'il soit (Slovic and Peters, 2006)⁴⁶.

Pour terminer cette discussion sur les mérites comparés des expressions perception du risque et représentation du risque, il est bon de discuter un dernier argument développé par Patrick Peretti-Watel (2000, 199) en faveur de la seconde. Pour lui, la première « suppose que celui-ci existe réellement », et l'utiliser impliquerait alors « que l'on tranche entre les risques concrets, qui seuls méritent d'être perçus, et ceux qui relèvent de l'imaginaire inquiet d'individus irrationnels ». Ainsi, on serait par exemple capable de percevoir le risque de submersion, mais pas celui lié à la damnation éternelle. En revanche, on pourrait se représenter les deux ; en fait surtout leurs dommages respectifs : les inondations de bâtiments et d'espaces publics et les morts et blessés dans le premier cas, les tourments de l'enfer dans le second. Pour intéressant qu'il est, l'argument est néanmoins peu convaincant. Si l'on compare la phrase suivante « Dans le groupe social X les individus *ne perçoivent pas le risque* de damnation parce qu'ils ne sont pas croyants » à cette autre phrase « Dans le groupe social X les individus *n'ont pas de représentation du risque* de damnation parce qu'ils ne sont pas croyants », on peut dire : d'abord qu'aucune des deux formulations n'est impossible, ensuite qu'elles possèdent des sens assez voisins. Le fait qu'on parle ici de damnation éternelle, risque dont l'existence est loin d'être démontrée, n'empêche aucunement, comme l'affirme Peretti-Watel, d'employer le terme de perception : il présente à peu près le même degré d'exactitude dans l'énonciation et dans la compréhension du phénomène décrit que celui de représentation.

⁴⁵ On pourrait même aller plus loin et avancer l'idée que ce sont les chercheurs et eux seuls qui, aux cours des enquêtes, construisent des représentations à partir du matériau recueilli. Une pour chaque idéaltype d'habitant.

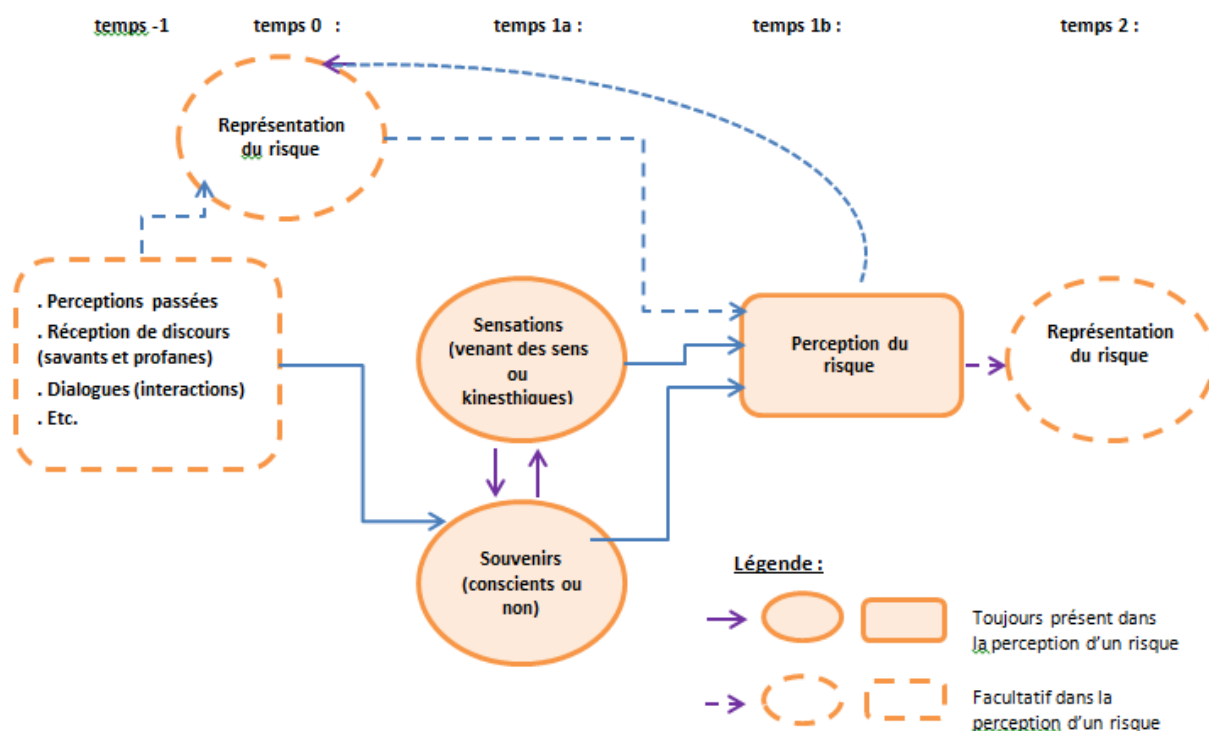
⁴⁶ Les psychologues Paul Slovic et Ellen Peters (2006, 322) considèrent qu'il existe deux manières de percevoir le risque, l'une qui serait émotionnelle (*risk as feelings*) et l'autre qui serait analytique et rationnelle (*risk as analysis*). Si cette dernière, qui renvoie à une façon d'appréhender la réalité essentiellement délibérative et verbale, est en affinité avec la notion de représentation, la première, qui est intuitive, automatique, innée, spontanée, narrative et basée sur l'expérience, l'est beaucoup moins ; elle est bien plus proche de la « perception ».

4. Conclusion.

Pour achever cet examen des mérites comparés de l'utilisation des termes perception et représentation dans les rapports que les individus entretiennent avec les risques, je propose de nous pencher brièvement sur l'article de Baggio et Rouquette (2006) intitulé « La représentation sociale de l'inondation: influence croisée de la proximité au risque et de l'importance de l'enjeu ». Les deux psychologues, qui ont interrogé 583 étudiants de Nîmes, Montpellier et Reims sur leur rapport au risque d'inondation, utilisent dans leur article presque autant de fois le mot perception que représentation (37 contre 47), et ce sans jamais les opposer. Et s'ils ont choisi, comme on peut le constater, d'utiliser le mot représentation dans le titre de l'article, ce n'est pas, du moins peut-on le supposer, parce qu'ils l'estiment supérieur à celui de perception, mais bien plutôt parce qu'il correspond mieux à ce qu'ils veulent décrire, c'est-à-dire la façon dont les étudiants possèdent, plus ou moins, à propos du risque d'inondation, un ensemble construit de connaissances, de craintes, etc.. En effet, dans leur texte, le terme de perception est souvent associé à du vocabulaire renvoyant au monde des sentiments et des sensations labiles, alors que celui de représentation – auquel ils adjoignent souvent le qualificatif « sociale » et définissent comme « la construction d'un savoir de sens commun, qui se distingue d'une connaissance scientifique acquise » (104) – se trouve fréquemment enchâssé dans un champ lexical évoquant quelque chose de construit, organisé et régulé (voir Annexe 1). Ainsi, à côté des 34 utilisations de « représentation » sans liaison forte avec du vocabulaire vraiment signifiant, il y en a six qui marquent la structuration/organisation, trois la construction, trois l'aspect plus ou moins élaboré et une la régulation. On constate donc qu'est bien présente, dans ce texte, l'idée que la représentation est, à la différence de la perception, quelque chose de non spontané, quelque chose qui ne peut exister que si l'individu (ou le groupe social) a préalablement opéré un travail plus ou moins formel de construction d'un « objet ». L'usage que font Baggio et Rouquette des deux termes est donc en bonne concordance avec celui qui est proposé dans cette communication.

En conclusion, on peut dire que la représentation d'un risque n'est pas obligatoirement présente dans l'esprit des individus, mais que quand elle existe elle contribue, à côté de ce qui est perçu par les sens et décrypté et interprété par notre cerveau, à la perception spontanée du risque. Cela peut être schématisé de la manière suivante (figure 1).

Figure 1 : Perception et représentation d'un risque



Si l'on considère un risque particulier, par exemple celui de submersion, alors l'expérience individuelle et collective des individus, les informations qu'ils reçoivent de différentes sources (médias, questionnaires du risque, association de riverains, etc.) et les échanges qu'ils ont avec leurs proches (temps -1) peuvent contribuer à leur faire construire une représentation de ce risque (temps 0). Mais celle-ci peut aussi ne pas exister du tout ou être très fragmentaire, comme notre enquête auprès des habitants de Carnon-Plage, de Lattes et de Palavas-les-flots a pu le montrer (Rey-Valette *et al.*, 2012). Au cas où elle existe, elle sera mobilisée (temps 1a), à côté de ce qui est du domaine de ce qui est recueilli par les sens ou au sein même du corps (temps 1a) – et qui peut être immédiat ou au contraire plus ancien et cristallisé en souvenirs – pour construire dans l'instant la perception du risque (temps 1b). Celle-ci constitue ensuite à son tour un élément de construction (temps 2) d'une éventuelle représentation – organisée et stabilisée – ou de sa modification (retour au temps 0) si elle existe déjà.

Comme on l'aura constaté tout au long de cette intervention, il s'agit moins de rejeter l'un des deux termes pour attribuer toutes les vertus au second, que de bien situer l'un par rapport à l'autre. Le terme perception est plus en adéquation avec la réalité lorsque les rapports au risque – de submersion ou autre – sont surtout infra-conscients, ne s'inscrivent que peu dans les échanges privés et encore moins dans le débat public, lorsque le chercheur constate de fortes contradictions et de

grandes lacunes dans les réponses spontanées des habitants à ses questions ; en revanche, le terme de représentation est plus légitime lorsque l'on évoque des rapports au risque qui possèdent une forte dimension consciente, donnent lieu si ce n'est à un débat public structuré du moins à des échanges soutenus entre individus, lorsque le chercheur peut faire surgir au cours de ses interviews des discours relativement cohérents et structurés sur cette question.

Bibliographie.

Abric J.-C. (2003). *Méthodes d'étude des représentations sociales*, Ramonville-Saint-Agne, Erès.

Baggio S. et Rouquette M.-L. (2006). La représentation sociale de l'inondation: influence croisée de la proximité au risque et de l'importance de l'enjeu. *Bulletin de Psychologie*, 2006/1, n°481, p. 103-117.

Bickerstaff K., Simmons P., and Pidgeon, P. (2006). Situating local experience of risk: Peripherality, marginality and place identity in the UK foot and mouth disease crisis. *Geoforum*, 37, p. 844-858.

Bonnet C. (2006). La perception. *Psychologie cognitive*, Rosny, Bréal.

Bronner G. (2010). Cerveau et socialisation. Quelques éléments de discussion. *Revue Française de Sociologie*, 2010/4, Vol.51.

Damasio A. (2010). *L'erreur de Descartes*, Paris, Odile Jacob.

Fischhoff B., Slovic P., Lichtenstein S., Read S. and Combs B. (1978). How safe is safe enough : a psychometric study of attitudes towards technological risks and benefits ». *Policy Sciences*, 9, p. 127-152.

Flanquart H. (2013). *Le risque et les individus. Essai de sociologie cognitive et analytique de la perception des risques, application privilégiée aux risques territoriaux*, Habilitation à Diriger des Recherches en sociologie, Université Paris-Diderot.

Flanquart H., Hellequin A.-P. et Vallet P. (2013). Living alongside hazardous factories: risk, choice and necessity. *Health, Risk & Society*, 15:8, p. 663-680.

Kahneman D. (2012), *Système 1/système 2, les deux vitesses de la pensée*, Paris, Flammarion.

Le Ny J.-F. (2002). *Béhaviorisme*, in Guy Tiberghien. *Dictionnaire des sciences cognitives*, Paris, Armand Colin.

Peretti-Watel P. (2000), *Sociologie du risque*, Paris, Armand Colin.

Rey-Valette H., Rulleau B., Meur-Férec C., Flanquart H., Hellequin A.-P. et Sourisseau E. (2012). Les plages du littoral languedocien face au risque de submersion : définir des politiques de gestion tenant compte de la perception des usagers. *Géographie, économie, société*, 2012/4 – Vol.14, p. 369-392.

Sjöberg L. (2000). Factors in risk perception. *Risk Analysis*, vol.20, n°1, p. 1-11.

Slovic P. and Peters E. (2006). Risk perception and affect. *Current Directions in Psychological Science*, vol. 15, n°6, p. 322-325.

Slovic P. (1987). Perception of risk. *Science*, 4799, p. 280-285.

Tulloch J. et Lupton D. (2003). *Risk and Everyday Life*, London, Sage Publications.

Annexe 1 : utilisation du terme « représentation » dans le texte de Baggio et Rouquette (2006)

	nombre d'occurrences	citations
Aspect construit de la représentation	3	« ils construisent , donc, une représentation ad hoc » (103) ; « doivent en construire une représentation acceptable 104 « les usagers vont construire une représentation » (104) ; « Une représentation sociale peut être définie comme étant la construction d'un savoir... » (104).
Aspect plus ou élaboré (sophistiqué) de la représentation	3	« des représentations ayant le même degré de partage et d' élaboration » (103) ; « semblent avoir une représentation sociale plus élaborée de l'inondation » (109) ; « une représentation sociale plus ou moins élaborée » (112).
Aspect structuré, organisé de la représentation	6	« toute représentation est organisée autour d'un noyau central » (104) ; « Les contingences de l'environnement [...] donnent forme à la représentation sans remettre en cause sa structure signifiante » (104) ; « cette structure stable n'est cependant pas le seul élément de la représentation » (104) ; « repérer une ébauche d' organisation de la représentation sociale de l'inondation » (105) « au point de paraître organisateur de la représentation » (110) ; « repérage des relations et de la hiérarchie entre les éléments de la représentation » (110).
Aspect régulé de la représentation	1	« Le système périphérique [...] concrétise la représentation et permet sa régulation » (104).
Utilisation de représentation sans proximité immédiate avec l'un des 4 aspects précédents	34	Exemples : « La mise en évidence de cette hypothèse sera opérée au moyen de techniques utilisées dans l'étude des représentations sociales » (105) « Cette dernière tâche visait à repérer, de manière plus précise, le rôle des variables manipulées dans la recherche sur la représentation sociale de l'inondation » (106) « L'objectif de l'étude leur était brièvement présenté : « une recherche portant sur les représentations sociales de l'inondation » (106) « Des différences sensibles apparaissent entre les représentations sociales de l'inondation qu'ont les individus » (108).

THEMATIQUE ACTEURS

STAKEHOLDERS THEMATIC

Quand la mer fait le mur

D'Anjouan (Comores) à Yaté (Nouvelle-Calédonie), paroles et actions autour de l'érosion des rivages insulaires

Gilbert David¹, Pascal Dumas², Loeiza Lancelot³, Catherine Sabinot⁴, Kamardine Sinane¹

1. UMR Espace-Dev, IRD, maison de la télédétection, 500 rue J.F. Breton, 34 000 Montpellier, France
gilbert.david@ird.fr ; kamardine.sinane@hotmail.com

2. CNEP/UMR Espace-Dev, Univers. de Nouvelle-Calédonie, 145 avenue J. Cook, BP R4, 98851 Nouméa
pascal.dumas2@gmail.com

3. Université de Bretagne Occidentale, master EGEL, IUEM, 4 place Nicolas Copernic, 29280 Plouzané
lancelot.loeiza@hotmail.fr

4. UMR Espace-Dev, IRD, Anse Vata, BP A5, 98851 Nouméa/cédex
catherine.sabinot@ird.fr

RESUME.

Dans les îles de la zone intertropicale, la construction de murs en haut de plage est perçue comme un moyen efficace de protéger les espaces et les populations littorales de l'érosion du trait de côte, jugée d'origine exclusivement naturelle. S'appuyant sur deux études de cas, aux Comores et en Nouvelle-Calédonie, le présent article montre, d'une part, que l'extraction de sable est un puissant facteur de vulnérabilité des littoraux sédimentaires à l'aléa érosion et, d'autre part, que les constructions de murs sont un révélateur des enjeux autour des territoires littoraux et ravivent souvent des jeux d'acteurs qui s'inscrivent dans les rapports sociaux et politiques entre le local et le global.

ABSTRACT.

In tropical islands, building seawalls is seen as an effective way to protect coastal areas and populations against the erosion of the shoreline, judged exclusively driven by nature. Based on two case studies, the Comoros and New Caledonia, this article shows that sand mining is a strong driver of the vulnerability of sedimentary coasts to erosion. It shows also the stakeholders' games and issues dealing with building seawalls at local and more global scales.

MOTS-CLES : littoraux insulaires, érosion des plages, murs de protection, représentations, jeux d'acteurs, Comores, Nouvelle-Calédonie.

KEYWORDS: island shoreline, beach erosion, seawalls, perceptions and representations, stakeholders game, Comoros, New Caledonia

1. Introduction

Tous les dirigeants des petits Etats insulaires perçoivent aujourd'hui la montée du niveau moyen des océans comme un risque majeur pour la viabilité de leur territoire. En 2007, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) prévoyait pour la décennie 2090-2099 une élévation de 0,18 à 0,59 m du niveau moyen de la mer par rapport à la période de référence 1980-1999 (IPPC, 2007). Ces prévisions ont conduit ces dirigeants à jouer en décembre 2009 un rôle majeur dans la 15e Conférence des parties (COP15) de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), dit « Sommet de Copenhague sur le climat ». Malgré l'éloquence de leurs plaidoyers, ils n'ont pas été écoutés et ont quitté Copenhague le 18 décembre 2009 fort mécontents. La solidarité internationale qu'ils espéraient s'est dissoute dans les égoïsmes nationaux des grands pays émetteurs de carbone, renforcés par la crise économique (David, 2012). Désormais, la montée du niveau des océans, le risque côtier et l'érosion du trait de côte, sa principale manifestation, font partie du quotidien des populations insulaires, y compris dans les îles hautes où l'érosion affecte les populations littorales et devient un objet majeur de préoccupations, suscitant des demandes d'interventions auprès des pouvoirs publics pour construire en haut de plage des murs de protection. Mais ces derniers sont loin d'être la panacée espérée. Leur manque d'efficacité n'est pas uniquement un problème d'ingénierie côtière mais résulte également d'une absence de perspective globale concernant l'aléa érosion et la vulnérabilité de la population à son égard, telle est l'hypothèse principale défendue ici. Elle se nourrit de deux hypothèses secondaires qui lui sont associées : a) l'érosion côtière n'est pas uniquement imputable à des facteurs naturels. Des facteurs anthropiques, notamment l'extraction de sable, doivent également être pris en compte ; b) les constructions de murs sont un révélateur des enjeux autour des territoires littoraux et ravivent souvent des jeux d'acteurs qui s'inscrivent dans les rapports sociaux et politiques entre le local et le global. Deux exemples viennent appuyer notre propos : l'île d'Anjouan dans l'archipel des Comores (océan Indien) et la commune de Yaté, à l'extrémité sud de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie (océan Pacifique).

2. Matériel et Méthode

2.1. Méthodologie

Notre analyse repose sur la comparaison de deux sites fort éloignés l'un de l'autre mais représentatifs de nombreuses îles hautes qui, comme la Nouvelle-Calédonie, bénéficient d'un lagon et d'un récif barrière pouvant alimenter en sédiments leurs plages ou, comme Anjouan, disposent de sable d'origine volcanique permettant de suppléer à des récifs insuffisamment développés. Ces deux sites d'étude ont été retenus car des recherches y ont été conduites récemment, thèse de K. Sinane (2013) sur Anjouan, ou sont en cours : partenariat IRD, Université de Nouvelle-Calédonie, Commune de Yaté. Compilant les résultats de ces deux études, l'analyse ambitionne à la fois d'identifier les caractères communs à chaque site et leurs caractères spécifiques, partant du postulat que les relations de nature anthropique entre le risque côtier associé au changement climatique et les murs relèvent de cette double dimension. En multipliant les sites d'études jusqu'à ce que plus aucun caractère commun ou spécifique ne soit identifié, il sera ainsi possible dans le futur de dresser la liste exhaustive de ces caractères puis une typologie de ces relations. Les résultats présentés ici ne sont donc que les prémices de cette étude à venir.

2.2. Les sites d'étude

2.2.1. L'île d'Anjouan

Située dans le canal du Mozambique, Anjouan est une des quatre îles de l'archipel des Comores. De superficie réduite (424 km²), elle abritait près de 244 000 habitants en 2003, soit une densité moyenne de 575 hab/km², la plus élevée des Comores. En raison du relief très montagneux – le sommet de l'île (1595 m) n'est qu'à 7 km du bord de mer – la majeure partie de la population vit sur la bande littorale, qualifiée d'espace insulaire utile par Robineau (1966), qui abrite les principaux centres urbains. Ce littoral se compose de trois façades maritimes : la Baie d'Anjouan, le littoral Sud-Ouest, le littoral Est, respectivement délimités par trois presqu'îles : Jimilimé au Nord, Sima à l'Ouest et Nioumakélé au Sud. Au total, 35 plages y ont été étudiées (Fig. 1).

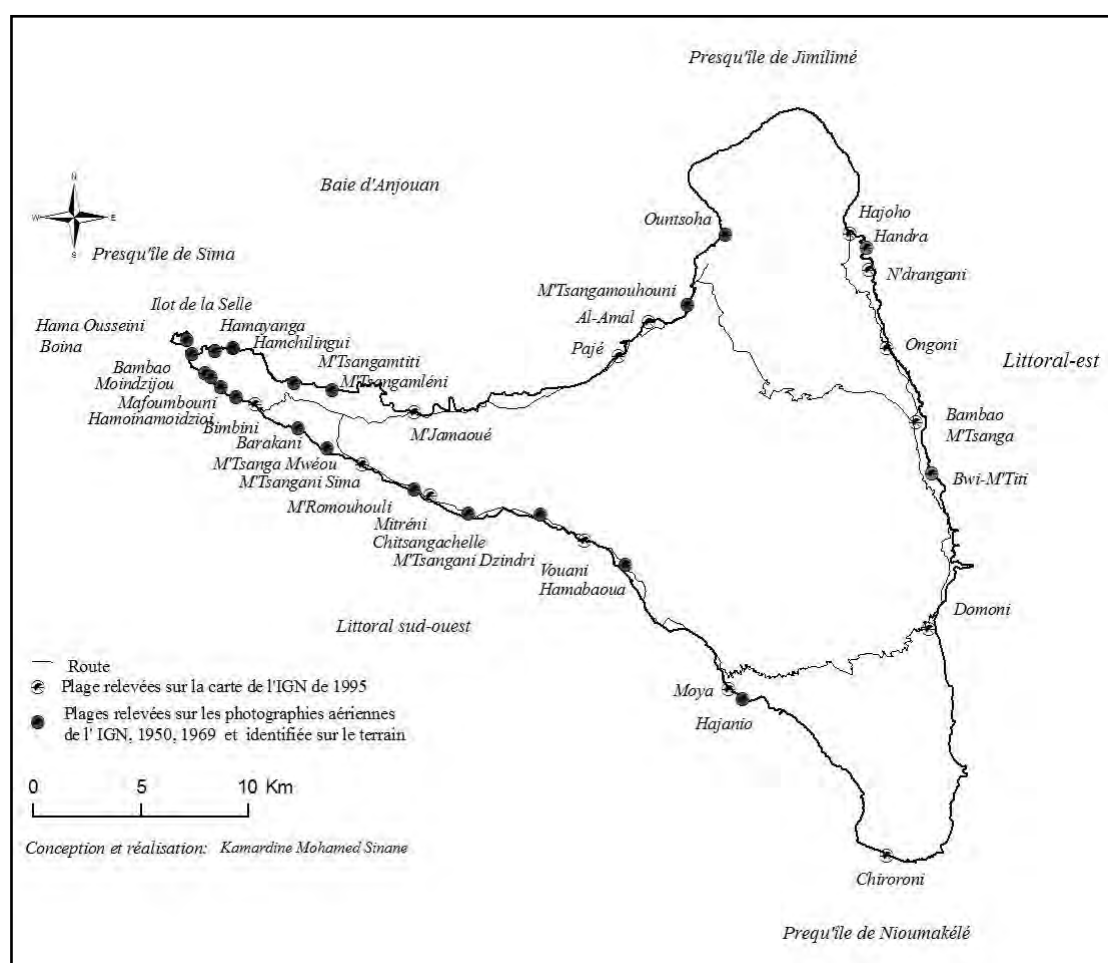


Figure 1- Les façades maritimes d'Anjouan et leurs plages

2.2.2. La Commune de Yaté

Située à la pointe Sud Est de la Grande Terre (Fig. 2) et d'une superficie de 1338 km², cette commune est la plus étendue et la moins dense (1,4 hab/km²) de Nouvelle-Calédonie. Au dernier recensement de 2009, sa population s'élevait à 1881 habitants (dont 95% d'origine mélanésienne). Le littoral de Yaté se réduit à une étroite bande de 80 km de long pour une superficie d'environ 100 km², soit 7,5% de la surface communale, sur laquelle se concentrent les zones urbanisées (environ 300 ha) et la plupart des terres de culture et d'élevage de la commune (460 ha environ), la population se répartissant en quatre tribus (Unia, Waho, Touaourou et Goro) de l'aire coutumière Djubéa-Kapone. L'intérieur se compose principalement du domaine minier, des formations forestières et de maquis s'étendant sur le parc de la Rivière Bleue et la Plaine des Lacs. C'est au sud de cette dernière, à cheval entre les communes de Yaté et du Mont-Dore, sur le plateau de Goro, riche en latérite, qu'a commencé au début des années 2000 la construction d'un complexe d'extraction de minerai et de production de nickel et cobalt. Aujourd'hui aux mains de la multinationale VALE, l'usine a débuté sa production en 2010, non sans avoir fait l'objet d'une vive opposition de la part d'associations environnementales et des tribus riveraines, conduisant notamment à la création du comité Rhéébù Nùù. De longues négociations ont abouti au *Pacte pour un développement durable du Grand Sud* signé en 2008 entre l'industriel et les communautés locales pour une durée de 30 ans. Il engage l'opérateur à créer et mettre en œuvre des dispositifs spécifiques pour accompagner le développement du Grand Sud de manière durable.

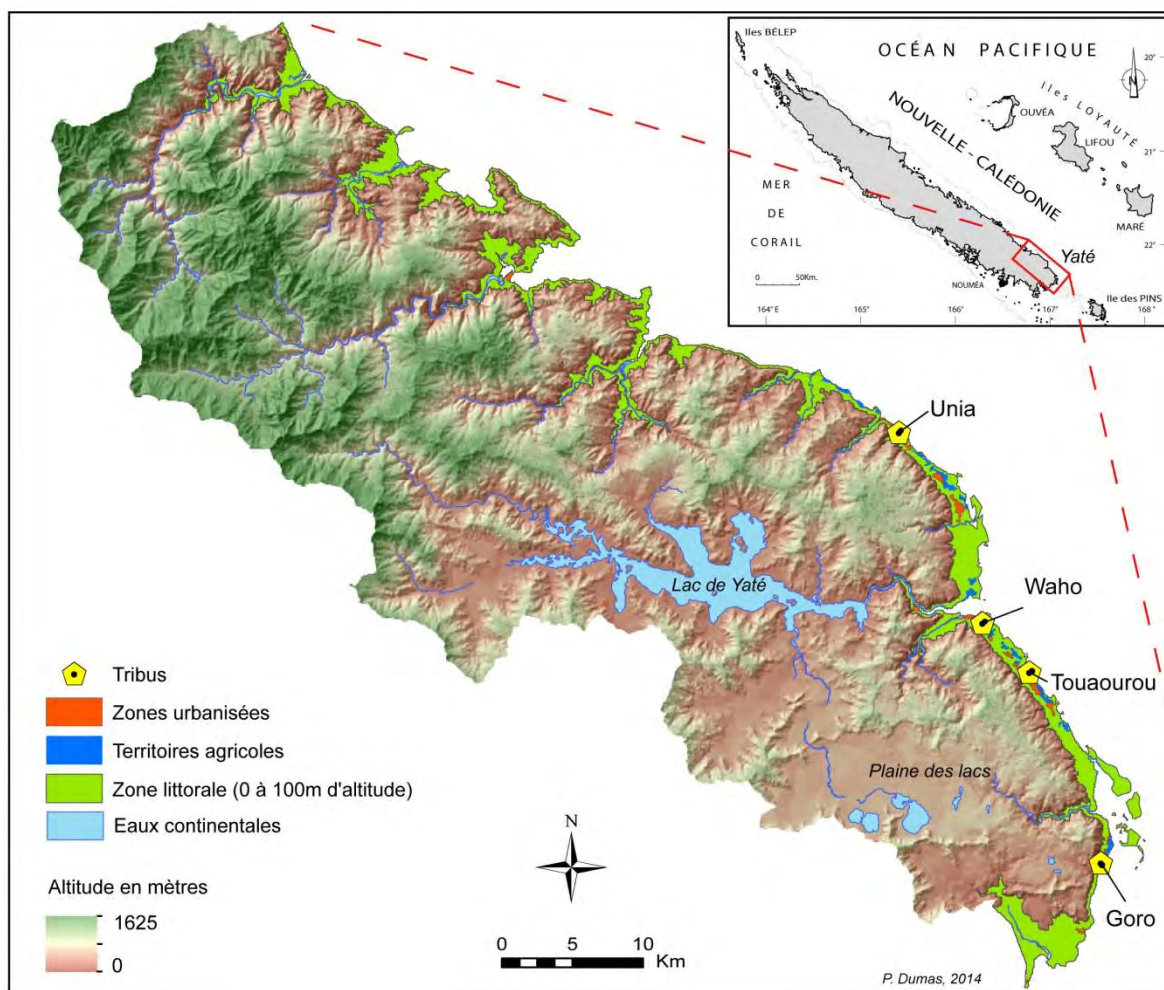


Fig. 2 : Yaté : une commune au littoral très étroit

3. Etude de cas n°1 : Anjouan

Le mur vertical construit parallèlement à la ligne de rivage est le type d'ouvrage de défense du littoral le plus couramment observé à Anjouan, il est appelé localement « digue côtière ». Les plus épais (une trentaine de centimètres) se composent de pierre basaltique et de galets enrobés de béton. Les moins épais ne dépassent guère la dizaine de centimètres et sont uniquement formés de béton. Dans la plupart des cas, le sable utilisé pour la fabrication du béton provient des plages, parfois il est même extrait du stock sédimentaire qu'il est censé protéger. Aujourd'hui, les murs occupent environ une dizaine de kilomètres du littoral de l'île. Avant l'indépendance, leur construction était réservée au soutènement de la route en corniche et les prises de décision ne concernaient que les autorités coloniales. Depuis l'avènement de la République des Comores en 1975 et l'aggravation de l'érosion côtière, les murs de bord de mer sont devenus un élément central du paysage et du jeu des acteurs des villages côtiers. Les intervenants dans les débats et les prises de décision relatifs à leur construction relèvent de quatre principaux groupes d'acteurs : - les pouvoirs

publics qui se déclinent selon quatre niveaux (l'Etat, le gouvernorat, la commune, la localité) ; - la société civile : les ONG, les associations communautaires et les autorités coutumières locales ; - les entreprises privées autorisées à postuler aux appels à projets de construction de murs ; - les organismes internationaux et régionaux finançant ces opérations.

Pour les acteurs locaux (pouvoirs publics, autorités locales, ONG, associations communautaires), les murs présentent l'avantage sur tout autre moyen de défense du littoral d'être visibles par tous et de donner une impression de solidité. Plus l'ouvrage est imposant, plus il est jugé efficace. Confronté au risque majeur que représente la montée du niveau de la mer, les communautés côtières ressentent un impérieux besoin de se protéger ; le mur est alors l'ouvrage qui rassure le plus face aux assauts des vagues, à l'instar des murs des maisons « en dur » qui protègent les familles du vent cyclonique. Autre avantage, lorsque le mur est construit sur l'estran comme à Bimbini (Fig. 3), un simple remblai permet de récupérer l'espace perdu par l'érosion passée. Dans ce contexte, ces communautés ne peuvent être que favorables à la construction de murs (qui satisfont les stratégies individuelles et collectives de sécurisation foncière et de préservation des habitations), d'autant que la totalité du coût financier est prise en charge par la collectivité internationale et qu'aucun aspect négatif n'est porté à leur connaissance puisque, par absence de volonté politique, aucune étude d'impact n'est réalisée malgré la loi cadre de 1994. En effet, pourquoi perdre du temps et de l'argent pour étudier l'impact d'un projet qui, par définition, ne peut être que positif puisqu'il répond à la demande locale et qu'il s'inscrit dans le cadre d'un programme international ou régional dont il convient d'utiliser les fonds. La défense lourde du littoral est donc présentée aux Comores comme partie intégrante d'une politique de gestion intégrée des zones côtières (GIZC) et, ces dernières années, les autorités du pays accompagnées de leurs partenaires internationaux, régionaux ont inauguré plusieurs murs de lutte contre l'érosion, notamment dans le cadre du Programme régional pour la Gestion Durable des zones côtières des pays de l'océan Indien (PROGECO) dont cinq des quinze projets financés aux Comores étaient des digues côtières



Figure 3 – Construction d'un mur financée par l'UE sur la plage de Bimbini

Si les pouvoirs publics comoriens et les autorités locales cherchent à mobiliser l'aide internationale en matière de GIZC pour renforcer leur image de défenseur du littoral auprès des communautés locales (ce qui revient à mobiliser l'international pour servir le local et le national), les organismes régionaux (Commission de l'océan Indien) et internationaux (PNUD, UE) qui financent la construction des ouvrages contre l'érosion ont une démarche totalement opposée. Ils utilisent le local pour renforcer leur stature à l'international dans le contexte hautement mobilisateur du changement climatique, auquel les littoraux des petits États insulaires en développement sont particulièrement vulnérables. Cette stratégie revient à traduire au niveau local les priorités de l'agenda environnemental international en s'appuyant sur deux postulats implicites : - la résolution des problèmes locaux est subordonnée à la résolution des problèmes globaux, - ce qui est bon pour le global ne peut être mauvais pour le local. De fait, le recours systématique à des ouvrages de défense lourde traduit une insuffisance d'analyse des acteurs régionaux et internationaux vis-à-vis des causes locales de l'érosion côtière, notamment de l'extraction des sédiments des plages, qui en 2008 et 2009 concernait environ 14 000 m³ de sédiments chaque mois (Sinane, 2013 ; Sinane *et al.*, 2010), extraction qu'ils considèrent trop souvent comme un « secteur économique » à part entière, faisant vivre les populations les plus démunies de l'île, indispensable à la viabilité économique de l'île d'Anjouan et à son équilibre social dans un contexte général de grande pauvreté. Cette analyse partielle, voire partielle, fait écho à l'impuissance et au manque de volonté des pouvoirs publics locaux et nationaux pour s'attaquer aux causes anthropiques de l'érosion côtière à Anjouan. Soucieux de ne pas susciter le mécontentement de leurs administrés et électeurs, ils préfèrent faire

l'amalgame entre la dégradation de l'environnement par l'Homme et le réchauffement climatique, stratégie qui présente l'avantage de masquer un problème local d'érosion anthropique en désignant une responsabilité collective de dimension planétaire et qui lui permet de surcroît d'attirer les bailleurs internationaux.

4. Etude de cas n°2 : Yaté

En Nouvelle-Calédonie, les préoccupations de plus en plus vives des populations du littoral concernant l'érosion côtière ont conduit les services du Gouvernement à créer en 2013 l'Observatoire du littoral de Nouvelle-Calédonie (OBLIC). L'érosion y est traitée sous trois angles : - le recul du trait de côte, - la mobilité des îlots sableux du lagon, - les aléas et risques de submersion (Garcin, Vendé-Leclerc, 2014). Le recul du trait de côte est la problématique la plus généralisée ; elle concerne les grandes îles (Ouvéa, Ile des Pins, Ile Ouen...) comme la Grande-Terre : Hienghène (Koulnoué), Ponérihouen (Tiakâ), Touho, Poindimié, Bourail (Poé), Païta (Karikaté) et bien sur Yaté où les dynamiques environnementales et sociales vécues et perçues sont représentatives du contexte calédonien et peuvent être éclairées par la situation anjouanaise. Aujourd'hui, les habitants de Yaté craignent que l'érosion de leur littoral entraîne la perte de lieux d'habitations, d'espaces vivriers et de certains espaces à valeur patrimoniale, notamment des lieux de sépulture de la période précoloniale. En effet, les initiatives privées prises pour défendre le trait de côte (plantations de palétuviers sur l'estran et de cocotiers en haut de plage, empilements de troncs parallèlement au rivage ou de pneus de voitures et de camions sur le haut de l'estran) se sont révélées peu efficaces (Fig. 4a).



Figure 4 : aménagements de protection de la côte à Yaté

A la demande de la population, un aménagement lourd de défense du trait de côte sous forme d'enrochements, financé par la mairie de Yaté et mesurant aujourd'hui 500 mètres de long, a été construit en 2009 pour protéger les bâtiments publics les plus exposés de la tribu de Touaourou (Fig. 4b). Comme à Anjouan, ce type de protection est majoritairement jugé efficace et donne l'impression d'être en sécurité : les enrochements « empêchent la mer de monter » et retiennent le sable. La rapidité de mise en œuvre de ce type d'aménagement est également salué : « mettre les cailloux, c'est ce qui va plus vite » nous confiait un habitant. Les avis négatifs émanent surtout des

habitants impliqués dans l'activité touristique et portent principalement sur la faible insertion des murs dans le paysage « traditionnel » du littoral qu'attendent les touristes en visitant Yaté.

D'une manière générale, les habitants des tribus Touaourou et Goro ont observé un recul du trait de côte de plusieurs mètres (2 à 3 m en moyenne, 12 m dans certains endroits)⁴⁷ ces dix dernières années et craignent que la mer atteigne leurs habitations, voire fasse disparaître une bonne partie de la plaine littorale : « peut être dans 20 ans il n'y aura plus de bord de mer ». Ils nous expliquent qu'avant il était possible de passer à cheval ou en voiture sur le bord de mer alors qu'aujourd'hui ce n'est plus le cas. Le changement climatique est souvent mis en avant pour expliquer ces problèmes d'érosion. Les marées seraient ainsi plus importantes et la mer plus agitée qu'auparavant. En revanche, les prélèvements de sable sont jugés trop réduits en volume ou trop éloignés de la plage pour conduire à l'érosion du trait de côte, d'autant que l'activité extractrice est bien moindre aujourd'hui que dans les années passées. Les prélèvements de sable concernaient alors quatre sites des hauts de plage des tribus de Touaourou et de Wao. Au sud de la tribu d'Unia, une carrière située à l'intérieur des terres (Waran) est toujours en activité. Ce sable sert aujourd'hui à la construction de bâtiments privés mais n'est plus utilisé par la commune, contrairement aux pratiques passées. On l'emploie également très ponctuellement lors de certains grands événements coutumiers ou festifs ; saupoudré sur la latérite, il permet d'éviter la poussière.

Si les habitants de Yaté n'établissent aucune relation entre l'extraction de sable et l'érosion côtière, certains jugent les miniers responsables de cette érosion. La mine est en effet souvent stigmatisée en Nouvelle-Calédonie lorsque survient un problème environnemental. Il a d'ailleurs été montré que l'extraction minière avait un impact sur le système littoral avec le développement de processus tels que l'engorgement des embouchures, l'hypersédimentation des fonds de baies et la progradation des deltas, suite aux apports sédimentaires massifs des bassins versants en amont (Bird, 1984 ; Dumas, 2004 ; Garcin *et al.* 2013). En revanche, même si pour l'instant à Yaté aucune action directe de la mine sur l'érosion du trait de côte n'a été établie, l'industriel s'est engagé, au travers du Pacte du Grand Sud, à assurer un développement durable de la région. Il est donc systématiquement sollicité pour financer des travaux de préservation du patrimoine naturel et il est probable qu'il soit le bailleur des futurs ouvrages de protection du littoral contre l'érosion.

5. Éléments de discussion

D'un point de vue économique et politique, le cas d'Anjouan semble plus représentatif de la situation internationale que Yaté. Dans le premier cas, le risque côtier est uniquement appréhendé dans le cadre de projets d'une durée de quatre à cinq ans conçus et réalisés par des organisations internationales. Les autorités anjouanaises ne disposent donc ni de la maîtrise financière ni de la maîtrise technique qui leur permettraient de planifier sur le long terme la réduction de ce risque. La situation est radicalement différente à Yaté dont les autorités disposent de manière pérenne de l'appui financier de l'usine VALE pour mobiliser la communauté scientifique sur la problématique de l'érosion côtière et engager les travaux permettant de réduire ce risque.

⁴⁷ Ces estimations se doivent d'être prises avec précaution et corrélées à des relevés scientifiques. Les modifications de la ligne rivage font actuellement l'objet de mesures par des techniques classiques de visu-interprétation et digitalisation à partir de données satellites à très haute résolution spatiale (THR). Une première analyse sur un pas de temps de 4 ans entre 2 images THR Geoeye n'a permis d'observer aucun changement significatif. Une nouvelle étude multitemporelle en cours sur une période de 50 ans devrait apporter des résultats plus révélateurs.

En revanche, Yaté et Anjouan se rejoignent dans le fait que les prélèvements de sable sont rarement identifiés par les habitants comme une des causes de l'érosion, attitude qui semble très commune sur les littoraux où sévit l'érosion. Leur caractère insulaire complique singulièrement la sensibilisation à mener pour rendre acceptable à tous les acteurs locaux, privés comme publics, le fait de ne plus prélever de sable de plage. En effet, si certaines carrières peuvent fournir du sable de concassage, c'est souvent dans des quantités très insuffisantes ou à des coûts élevés, ce qui n'encourage donc ni les privés ni les structures publiques à s'y approvisionner, que ce soit en Nouvelle-Calédonie ou aux Comores. Quoiqu'il en soit, il convient de rappeler que même si ces deux sites insulaires sont exposés à des problématiques et enjeux similaires, leurs contextes sont très différents. Anjouan constitue un système très anthropisé qui a connu un doublement de sa population ces 20 dernières années. Les extractions de sable sont donc en hausse et constituent la première cause de l'érosion côtière (Sinane, 2013), fragilisant grandement le patrimoine naturel comme économique de ce territoire restreint. A Yaté, marqué par une pression démographique bien moindre, les extractions de sable sont moins importantes et le recul du trait de côte, bien qu'il soit aujourd'hui inquiétant et menaçant pour quelques familles qui ont diminué leur activité agricole, craignent pour leurs habitations et leur patrimoine culturel, n'est pas encore un problème concernant autant de population et aux conséquences aussi importantes qu'à Anjouan. Enfin, la Nouvelle-Calédonie est une île bien plus vaste qu'Anjouan et la problématique de l'approvisionnement en sable peut y être solutionnée à une échelle supra communale tandis qu'Anjouan ne peut compter que sur ses propres ressources, le commerce inter-îles de sable relevant encore de l'utopie aux Comores.

Bibliographie

- Bird E.C.F., Dubois J.P., Itis J.A. (1984). *The impacts of opencast mining on the Rivers and Coasts of New Caledonia*. The United Nations University, Tokyo, 64 p.
- David, G. (2012). Changements climatiques et droits de l'homme : responsabilité et équité sous contrainte des égoïsmes nationaux. *Changement climatiques et droits humains*. Paris, Edition Espérance, p. 207-237.
- Dumas P. (2004). *Caractérisation des littoraux insulaires : approche géographique par télédétection et SIG pour une gestion intégrée. Application en Nouvelle-Calédonie*. Thèse de géographie, Université d'Orléans, 402 p.
- Garcin M., Vendé-Leclerc M. (2014). *Observatoire du littoral de Nouvelle-Calédonie – Rapport préliminaire : observations, état des lieux et constats*. Rapport BRGM/RP-63235-FR, 125 p., 154 fig.
- Garcin M., Baills A., Le Cozannet G., Bulteau T., Auboin A-L., Sauter J (2013) - Pluri-decadal impact of mining activities on coastline mobility of estuaries of New Caledonia. *Journ. Coast. Res*, 65, 494-499
- Robineau, C. (1966). *Société et économie d'Anjouan*. Paris, Orstom, 263 p.
- Sinane, K. (2013). *Les littoraux des Comores, dynamique d'un système anthropisé, le cas de l'île d'Anjouan*. Thèse de géographie, Université de la Réunion/IRD, 295 p.
- Sinane, K., David, G., Pennober, G., Troadec, R. (2010). Fragilisation et modification des formations littorales meubles sur l'île d'Anjouan (Comores) : Quand l'érosion d'origine anthropique se conjugue au changement climatique, *Vertigo – la revue électronique en sciences de l'environnement*, Volume 10 Numéro 3 | décembre 2010, 17 p. [En ligne], mis en ligne le 20 décembre 2010. URL : <http://vertigo.revues.org/10528>

Analyse des solidarités territoriales facilitant l'adaptation à la montée du niveau de la mer

Quelques enseignements issus du projet SOLTER en Languedoc-Roussillon

Hélène Rey-Valette¹, Yann Balouin², Cécile Bazart¹, Catherine Bernier Boissard³, Valérie Clément¹, Olivia Delanoë⁴, Yoann Foucher³, Bénédicte Guérinel⁵, Cécile Hérivaux², Régis Morvan⁵, Julie Rosaz¹, Bénédicte Rulleau⁶, Paul Sauboua⁷, Marc Willinger¹

1. UMR LAMETA, Faculté d'Economie, av R. Dugrand CS79606 34960 Montpellier Cedex 2 France

helene.rey-valette@univ-montp1.fr; valerie.clement@univ-montp1.fr; cecile.bazart@lameta.univ-montp1.fr, julie.rosaz@lameta.univ-montp1.fr

2. BRGM, Direction Régionale Languedoc-Roussillon / Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies, 1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier, France y.balouin@brgm.fr; c.herivaux@brgm.fr

3. UMR ARTDEV, Site Saint Charles, rue Henri Serre 34090 Montpellier, catherine.bernie-boissard@unimes.fr

4. INEA, Ingénieurs-conseil, Nature, Environnement, Aménagements – 1, rue Abbé Fabre, 30250 Sommières, France Olivia.delanoë@inea.fr

5. DREAL Languedoc-Roussillon, 520 allée Henri II de Montmorency 34064 Montpellier Benedicte.Guerinel@developpement-durable.gouv.fr, Regis.MORVANI@developpement-durable.gouv.fr

6. CEARC, Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines, 11 boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt, benedicte.rulleau@uvsq.fr

7. EID Méditerranée, Pôle Littoral, 165 av. P. Rimbaud 34184 Montpellier Cedex 4. psauboua@eid-med.org

RESUME.

L'adaptation à la montée du niveau de la mer liée au changement climatique suppose de réduire la vulnérabilité du littoral et par là de relocaliser certains enjeux trop exposés. L'hypothèse du projet SOLTER est que ces politiques d'adaptation ne relèvent pas des seules communes littorales et qu'il existe un gradient de solidarité décroissante du littoral vers l'arrière-pays qu'il s'agit d'étudier pour définir les échelles pertinentes d'intervention. Cette recherche a été menée sur le site pilote du SCOT du Biterrois. L'analyse a porté sur les solidarités des populations identifiées à travers une enquête de perception et des expérimentations avec incitations réelles auprès de 258 habitants de deux communes littorales et trois communes de l'arrière-pays situées respectivement à 15 km, 29 km et 40 km du littoral. L'existence de solidarités objectives entre communes a aussi été étudiée à travers quelques indicateurs de ressemblance et de complémentarité dans les domaines écologique, économique, institutionnel et en matière de gestion des risques.

ABSTRACT.

Adaptation to sea level rise resulting from climate change seeks to reduce coastal vulnerability through the relocation of assets at risk. The SOLTER project is based on a hypothesis that adaptation policies are not solely the responsibility of coastal towns but that solidarity gradually decreases from the coast towards the hinterland. The project aims to examine this hypothesis in order to define the appropriate levels of intervention. Research was undertaken in a pilot area around Béziers. The analysis focuses on the solidarity of populations identified through a perception survey and experimental sessions involving 258 inhabitants of five towns, two located on the coast and three located in the hinterland respectively 15, 29 and 40 km away from

the coast. Objective solidarity between the various towns was also examined using various indicators of similarity and complementary from ecological, economic, institutional and risk-management viewpoints.

MOTS-CLES : Trait de côte, submersion marine, solidarité territoriale, économie expérimentale, équité.

KEYWORDS: Coastline, marine submersion, territorial solidarity, experimental economics, equity

1. Introduction

Le changement climatique induit des risques spécifiques pour les territoires littoraux liés à l'élévation du niveau de la mer. Cette dernière va se traduire par la submersion permanente de certaines terres basses mais aussi, lors des tempêtes, par des submersions qui peuvent devenir récurrentes et dont le champ d'impact pourra être important. En effet, même sans changement de la fréquence des tempêtes, les effets seront largement plus prononcés du fait de la hauteur d'eau supplémentaire. A l'échelle du SCOT du Biterrois dont les six communes littorales constituent les sites pilotes du projet SOLTER, des cartes de submersion ont été élaborées à l'horizon 2060 pour une hypothèse d'une augmentation du niveau de la mer de 40 cm (Magnier, 2013). L'analyse de ces cartes montre que les effets futurs des tempêtes les plus fréquentes pourraient être comparables à ceux d'une tempête actuellement cinquantennale et que les niveaux d'eau atteints lors des tempêtes aujourd'hui centennales seraient équivalents à ceux des tempêtes décennales en 2060. La part du bâti actuel exposé en 2060 à une tempête centennale varie de 12 % ou 13 % pour les communes les moins exposées (Agde et Vendres) à 48 % pour la plus concernée (Sérignan) ; les trois autres communes ayant des positions intermédiaires (30 % pour Vias, 35 % pour Portiragnes et 36 % pour Valras (Balouin, 2014)). Cette vulnérabilité accrue est d'autant plus problématique que les territoires littoraux font l'objet d'une attractivité démographique soutenue, en particulier dans le cas du département de l'Hérault où les flux de migration sont les plus forts de France. Elle s'explique aussi par le fait que le golfe du Lion est une des plus grandes baies sableuses d'Europe avec une faible pente et une forte exposition aux vents.

Les politiques d'adaptation au changement climatique mettent en avant l'intérêt d'anticiper ces évolutions pour réduire les dommages et favoriser les processus de résilience, tant naturels que sociaux, notamment par des logiques de gestion adaptative (Holling, 1978). En ce qui concerne l'anticipation de la montée du niveau de la mer, de nouvelles logiques de gestion (MEDDTL, 2012) visent à réduire la vulnérabilité en déplaçant les enjeux exposés et en restaurant le caractère naturel de ces zones pour bénéficier d'infrastructures naturelles de protection plus résilientes. Bien évidemment ces mesures constituent des innovations difficiles à mettre en œuvre et à faire accepter tant par les populations que par les gestionnaires et élus du littoral. Au contraire elles impliquent des changements de référentiel, de représentations sociales et de modalités d'action publique qui supposent des apprentissages spécifiques (Argyris et Schön, 1996). L'importance des facteurs institutionnels, tels la légitimité de l'institution ou les concertations, sur l'acceptabilité de ces politiques (Myatt *et al.*, 2003) impliquent une transformation des dispositifs de gouvernance.

Ces politiques nécessitent de s'interroger sur les recompositions territoriales car elles dépassent les communes, voire les intercommunalités, strictement littorales. Il s'agit de mettre en cohérence les planifications territoriales, mais aussi d'étudier les formes et les niveaux de solidarités entre les communes littorales, rétro-littorales et de l'arrière-pays. Ces solidarités sont fonction des bassins

d'usage des plages et des interactions liées aux mouvements migratoires, aux transferts d'activité et aux différentiels d'attractivité, notamment touristique, que peuvent entraîner les relocalisations. Cette question des solidarités intervient aussi au niveau de la définition des échelles perçues comme légitimes pour la mutualisation de ces risques, les modalités d'indemnisation et les échelles d'assiettes fiscales pour financer ces aménagements face à la raréfaction des budgets publics. L'objectif du projet SOLTER⁴⁸ est d'étudier ces solidarités selon deux approches complémentaires : les solidarités « comportementales » à partir des perceptions des populations et les solidarités collectives entre communes. Faisant l'hypothèse de solidarités décroissantes en fonction de l'éloignement du littoral, il s'agit de s'interroger sur les échelles d'actions les plus pertinentes et les plus légitimes. Dans une première partie nous détaillerons notre grille d'analyse des solidarités territoriales ainsi que les protocoles des approches mises en œuvre. Les premiers résultats seront ensuite présentés en appréhendant les solidarités comportementales dans la deuxième partie et les solidarités collectives dans la troisième.

2. Présentation de la grille d'analyse des solidarités territoriales

La problématique de la solidarité peut être déclinée dans le temps à travers la solidarité inter générationnelle, dans l'espace avec les stratégies multiniveaux et les intercommunalités, et plus généralement par le caractère redistributif des politiques publiques. Nous nous limiterons ici à l'étude des solidarités territoriales en relation à l'adaptation à la montée du niveau de la mer.

2.1. La problématique de solidarité territoriale pour l'adaptation à la montée du niveau de la mer

La solidarité territoriale face à l'adaptation au changement climatique se décline en deux composantes. D'un point de vue collectif, il s'agit d'optimiser les planifications territoriales et de maintenir les facteurs d'attractivité mais aussi de gérer les mouvements migratoires et les transferts fiscaux et d'activité entre les communes en fonction de la localisation des zones de repli. Concernant les solidarités individuelles, il s'agit de savoir si on doit limiter les contributions fiscales aux personnes concernées ou élargir le champ des prélèvements et à quelle échelle spatiale ceux-ci seraient considérés comme justes et par là socialement acceptables. De même, on peut s'interroger sur le maintien d'une socialisation de ces risques. Les réponses à ces questions peuvent être facilitées par l'étude des niveaux de solidarité territoriale (figure 1) en considérant les relations économiques, institutionnelles, écologiques, mais aussi les zones de concernement du devenir des plages (bassin d'usage récréatif du littoral).

⁴⁸ Solidarités territoriales et stratégies pour la résilience du littoral à la submersion marine. Projet de recherche partenariale financé par le programme Liteau (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie) et le Contrat de Projet Etat Région Languedoc-Roussillon.

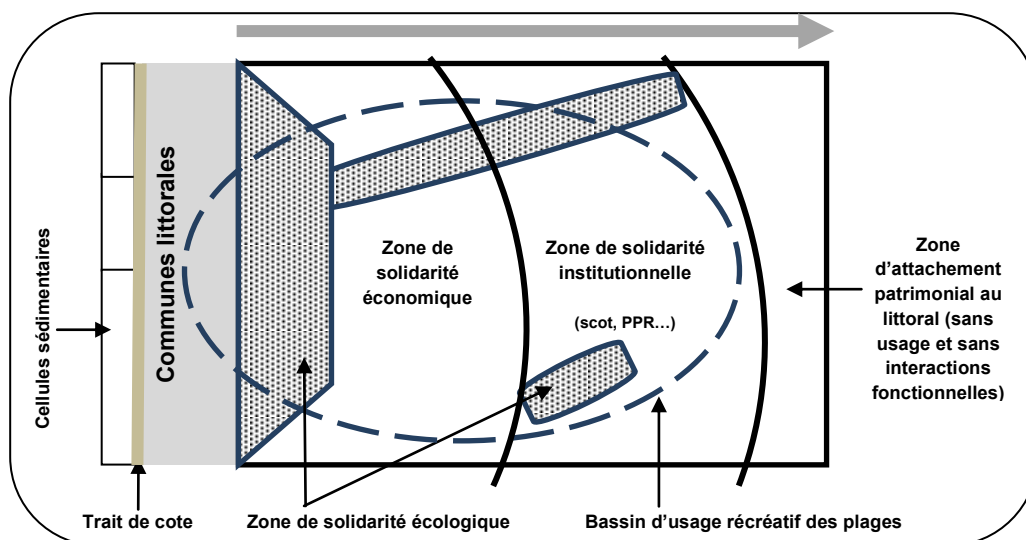


Figure 1. Présentation des interactions fonctionnelles des territoires littoraux avec leur arrière-pays

Notre hypothèse est que plus on s'éloigne du littoral et plus les formes et niveaux de solidarité entre les individus ou entre les communes sont faibles.

2.2. Les protocoles d'enquête et d'expérimentation des solidarités comportementales

Pour étudier les perceptions des populations, des enquêtes et des sessions expérimentales ont été réalisées sur les sites pilotes du projet, à savoir le SCOT⁴⁹ du Biterrois. Elles ont été menées dans 2 communes littorales (Vendre et Valras-Plage), et 3 communes de l'arrière-pays (Béziers, Murviel-lès-Béziers et Saint Chinian respectivement à 15 km, 29 km et 40 km de la côte). Nous avons veillé à ce que les effectifs de la zone littorale et de l'arrière-pays soient équilibrés. Au sein des communes littorales, à partir des cartes d'aléa (Magnier, 2013 ; Balouin, 2014), nous avons distingué les résidents exposés, pour qui la solidarité est une forme d'assurance, et ceux non exposés. Les participants ont été recrutés principalement par contact téléphonique⁵⁰ à partir de l'annuaire. Un forfait de participation de 15 euros était versé pour compenser leur déplacement ainsi que leur temps. Les sessions et la passation du questionnaire ont pu être organisées dans des salles communales gracieusement mises à disposition par les mairies. Plusieurs approches complémentaires ont été mises en œuvre.

⁴⁹ Le SCOT du Biterrois rassemble 270 000 habitants répartis entre 87 communes.

⁵⁰ Quelques tentatives ont aussi été faites de mobilisation des personnes dans la rue et sur les marchés, de distribution de tracts aux élèves du principal Lycée de Béziers, de mailing à des associations locales et d'article d'information dans le principal quotidien local, mais qui se sont révélées peu efficaces.

En premier lieu des sessions expérimentales ont été organisées avec les participants⁵¹ afin de révéler (i) leur propension à prendre des risques à partir d'une tâche de choix de portefeuille (Gneezy et Potters, 1997) et (ii) leur solidarité comportementale envers des personnes exposées à un risque de perte à partir d'une variante du « jeu de solidarité » de Selten et Ockenfels, (1998). Dans la variante employée du jeu de solidarité, les participants étaient affectés à un groupe de six personnes disposant d'un montant de 60 euros uniformément répartis entre tous les membres. Trois des membres du groupe étaient exposés au risque de perdre leur dotation⁵² alors que les trois autres membres n'étaient exposés à aucun risque. La tâche de chaque membre du groupe consistait à attribuer un montant de son choix (entre 0 et 10) à un fond destiné à la protection des membres exposés⁵³. Le jeu de solidarité permet de mesurer l'intensité des préférences solidaires des individus selon qu'ils soient ou non exposés au risque. Cet indicateur peut ensuite être pris en compte pour évaluer l'attitude des participants par rapport au risque de submersion et en fonction de leur lieu d'habitation.

Une enquête de perception associée à une évaluation des consentements à payer pour divers scénarios d'adaptation a aussi été menée. Les questionnaires étaient passés après la phase d'économie expérimentale. Ils étaient auto-administrés en présence de chercheurs et stagiaires avec un taux d'encadrement d'une personne de l'équipe pour 3 à 4 enquêtés. Le questionnaire était construit en 5 modules et administré en deux temps. La première partie (3 modules) portait sur la commune, l'habitation, l'attachement au littoral, les usages des plages, la connaissance du littoral et la perception de la submersion et des risques associés. Une présentation orale des hypothèses de montée du niveau de la mer et des caractéristiques des politiques mises en œuvre (concertation, période, échelonnement, taille de la zone concernée par le recul) était ensuite effectuée. La deuxième partie comprenait un module relatif au « *choice experiment* » et un module sur les perceptions des modalités de relocalisation avant de finir sur les questions socio-économiques. Ce questionnaire permet d'analyser les solidarités territoriales en comparant les réponses selon que les enquêtés habitent une commune située sur le littoral ou dans l'arrière-pays, et selon leur exposition (30 % des enquêtés des communes littorales) à la submersion. Ces comparaisons ont principalement porté sur :

les consentements à payer pour la mise en œuvre des politiques de relocalisation,

les préférences quant au caractère solidaire ou non des modalités de financement des opérations de relocalisation,

les choix de critères de différenciation des indemnisations ainsi que de justice et d'acceptabilité des opérations de relocation.

Treize sessions ont été organisées pour un total de 191 participants aux sessions d'économie expérimentale et de 258 personnes enquêtées (122 pour le littoral (dont 36 exposés à la submersion) et 136 pour l'arrière-pays (66 relevant de la zone de solidarité à la fois économique et institutionnelle (Béziers à 15 km du littoral) et 71 relevant seulement de la zone de solidarité institutionnelle (37 à Murviel-lès-Béziers à 29 km et 34 à Saint Chinian à 40 km).

⁵¹ Une session en labo a été préalablement organisée auprès de 36 étudiants.

⁵² En fait les individus réellement exposés dans la réalité étaient aussi exposés dans le jeu.

⁵³ Au total les gains des participants se sont échelonnés entre 15 euros (indemnisation forfaitaire) à 26,8 euros

2.3. La définition d'indicateurs pour rendre compte des solidarités collectives entre communes

Une grille analytique de la solidarité collective entre communes a été élaborée en s'appuyant sur la distinction de référence de Durkheim entre la solidarité mécanique, qui s'explique par une logique de similitude, et la solidarité organique, qui rend compte des liens d'interdépendance. Cette distinction peut être rapprochée des formes de proximité proposées par le courant de l'économie éponyme. Cette approche a en effet été mobilisée pour étudier les interactions entre les risques naturels et les territoires (Torre et Zuindeau, 2009). Ainsi la proximité institutionnelle qui renvoie à des valeurs communes peut être associée à la solidarité mécanique, tandis que la solidarité organique relèverait de la proximité organisée qui vise à coordonner les comportements. A partir de ce cadre de référence, nous avons sélectionné des indicateurs aptes à rendre compte des similitudes et des relations de coordination entre communes concernant les flux économiques et les dispositifs institutionnels, notamment les dispositifs de gestion des risques d'inondation.

Par ailleurs nous avons étudié les formes d'interactions écologiques entre territoires en classant les six logiques d'interactions distinguées par Delanoë et Thompson (2010), et par Mathevet et al (2010) selon cette même partition entre similitude et complémentarité. Ainsi les relations fonctionnelles définissant l'intégrité et l'identité des territoires ainsi que les continuités nécessaires à leur cohésion écologique s'apparentent à une logique de la similitude, tandis que la logique de complémentarité recouvre les autres formes de solidarité écologique définies par les auteurs à savoir : la complémentarité des sites et celle liées à la mobilité des espèces qui peut s'exprimer au niveau des habitats soit au cours du cycle de vie, soit dans le temps plus long de la dynamique des populations, soit enfin par rapport à des changements des aires de répartition des espèces en réponse à des changements environnementaux.

Afin de respecter le principe de parcimonie qui conditionne l'opérationnalité des systèmes d'indicateurs, nous avons sélectionné un nombre restreint et équilibré parmi les indicateurs territoriaux caractéristiques de ces formes de solidarité pour les domaines retenus (tableau 1).

Tableau 1: Indicateurs solidarités entre communes au sein du Scot du Biterrois

	Indicateurs de ressemblance	Indicateurs de complémentarité
Solidarité économique	• Produit de la taxe d'habitation en 2010 • Capacité d'accueil des communes (campings, hôtels, résidences secondaires)	• Nombre d'équipements communs (sports, loisirs, culture, établissements scolaires) • Lien domicile-travail avec le littoral • Indicateur d'emplois en 2009
Solidarité institutionnelle	• Potentiel financier par habitant (2010) • Nombre de résidences secondaires/occasionnelles pour 1000 résidences principales	• Communes appartenant à un périmètre institutionnel identique à une commune littorale (SAGE, EPCI, TRI, SIVOM) • Mise en place d'une fiscalité commune
Solidarité face au risque d'inondation	• Taux de logements concernés par le risque d'inondation par cours d'eau	• Appartenance au TRI de Béziers
Solidarité écologique	• Partage avec les communes littorales d'espaces naturels à enjeux	• Répartition sur le territoire des trames de milieux naturels (Trame Verte et Bleue) • Gestion partagée de sites à très forts enjeux : Natura 2000 (Directive Habitats)

3. Comment les habitants perçoivent-ils les solidarités face au risque de submersion ?

3.1. Identification d'un gradient de solidarité en fonction de la distance au littoral

Les résultats du jeu de solidarité révèlent une forte propension des participants à la solidarité : 80% des participants ont contribué au fond de protection en faveur des membres de leur groupe exposés au risque de perte, avec une contribution moyenne de 45%. Alors que chez les personnes exposées la solidarité ne peut être différenciée de l'auto-assurance car ils sont susceptibles de bénéficier du fonds de protection, il est frappant de constater que les personnes non-exposées révèlent une solidarité réelle à travers leur contribution à un fonds de protection dont ils sont certains de ne pas pouvoir bénéficier. Ainsi les non-exposés ont contribué en moyenne 4,07 euros en comparaison aux 4,98 euros de contribution moyenne des exposés. L'analyse des contributions des participants en fonction de leur exposition réelle au risque de submersion révèle que les non-exposés effectifs contribuent davantage (4,64 euros en moyenne) que les exposés (4,00 euros). On remarque également que la contribution décroît avec la distance de l'habitation par rapport au trait de côte : la contribution moyenne des habitants des communes littorales et de Béziers est de 4,74 euros contre 3,8 euros pour les communes de l'arrière-pays. Finalement on peut noter que les femmes contribuent davantage (4,8 euros) que les hommes (4,2 euros). À noter aussi une corrélation positive entre ceux qui ne contribuent pas dans le jeu qui ont aussi plus souvent une propension à choisir des financements non solidaires dans l'enquête.

3.2. Des choix de financement solidaire des politiques de relocalisation quelle que soit la zone

L'enquête a permis de hiérarchiser les types de financement préférés pour les politiques de relocalisation, en distinguant le cas des équipements publics et des biens privés. On observe en premier lieu une forte similarité des choix quel que soit les types de biens. Concernant les biens privés, près de la moitié des enquêtés (47 %) ont opté pour un financement de la relocalisation pris en charge par la collectivité dans son ensemble, c'est-à-dire par une fiscalité nationale, sans doute en relation avec le fait que c'est traditionnellement l'Etat et les collectivités qui prennent en charge les coûts de protection du trait de côte. Ce financement implique que les individus contribuent indépendamment de leur exposition, c'est-à-dire qu'il existe une mutualisation des coûts d'adaptation. Les enquêtés non solidaires qui ont choisi des modes de financement individuels (assurance) ou locaux (taxe circonscrite aux communes littorales) ne représentent que 19 % des répondants. Les choix restant qui concernent un tiers des enquêtés (34 % pour les biens privés et 43 % pour les équipements publics) correspondent à des impôts à l'échelle régionale ou départementale ou une augmentation des taxes de séjour. Il s'agit d'une logique hybride entre la solidarité nationale et l'absence de solidarité, où les financements solidaires restreints à une échelle de proximité peuvent être considérés comme la contrepartie des externalités positives (services récréatifs) et des retombées économiques générées. Ce sont les individus qui bénéficient de la ressource qui contribuent à son financement, indépendamment de leur exposition.

3.3. Des choix d'indemnisation fortement différenciés

Actuellement, les indemnisations s'effectuent sur la base du prix du marché, sans tenir compte de situations particulières, notamment le principe croissant de responsabilité (Markovits, 2007) qui pourrait être appliqué à l'encontre de ceux qui ont acheté leur bien en étant informés des risques. La hiérarchisation des critères proposés pour le calcul des indemnisations témoigne d'une priorité donnée aux résidences principales (30 % des enquêtés), et à un niveau quasi identique au principe utilitariste général d'indemnisation au prix du marché (29 %). Le principe de responsabilité conduisant à une indemnisation réduite des propriétaires informés au moment de l'achat arrive en troisième position (14 %) tandis que le revenu du propriétaire ou l'attachement au bien en lien avec l'ancienneté de la propriété ne recueillent respectivement que 12 % et 10 % des préférences des enquêtés. On observe des différences de hiérarchisation selon les zones : l'indemnisation au prix du marché étant plus souvent choisie sur le littoral tandis que les enquêtés de l'arrière-pays sont plus nombreux à choisir le principe de responsabilité.

4. Des solidarités collectives décroissantes et polarisées

Plusieurs cartes de solidarités ont été produites par thème (écologique, économique, institutionnelle, gestion des risques) ou par forme de solidarité (ensemble des ressemblances et des complémentarités). A partir d'une moyenne non pondérée des indicateurs, la carte de synthèse (figure 2) témoigne d'un gradient géographique décroissant et d'un pôle fort autour de Béziers.

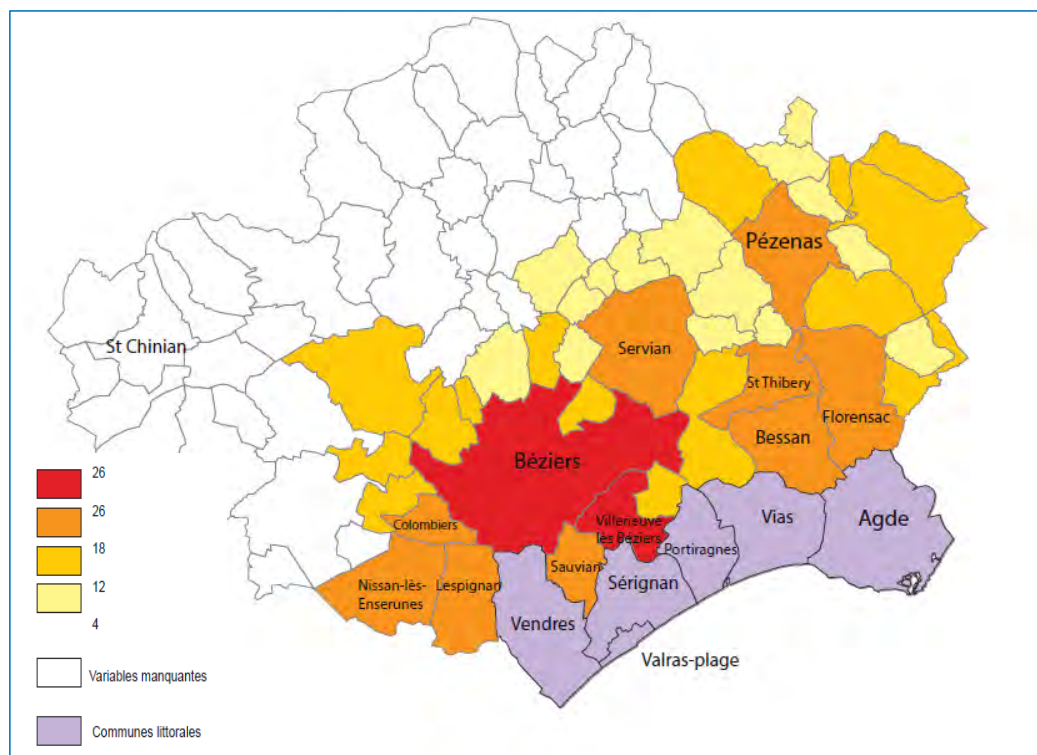


Figure 2. Carte de synthèse des solidarités collectives entre communes

5. Conclusion

Cette communication a présenté les résultats du projet SOLTER, dont la deuxième phase vise à mettre en place des ateliers de prospective participative pour définir des stratégies d'adaptation. Ces premiers résultats tendent à valider l'hypothèse d'un gradient de solidarité selon la distance au littoral même si d'autres facteurs expliquent cette solidarité. Ces résultats devront cependant être confirmés par le traitement en cours des consentements à payer pour la mise en œuvre des opérations de relocalisation. En outre les travaux ont permis d'appréhender l'attachement et les usages du littoral pour les communes de l'arrière-pays, de préciser les modalités de fréquentation des plages à différentes échelles de temps (journalière, hebdomadaire et mensuelle) en exploitant les données des caméras liées au suivi du trait de côte (Balouin et *al.*, 2014) et d'analyser en détail les conditions et modalités de mise en œuvre et de financement des opérations de recul.

Bibliographie

- Argyris C., Schön D.A. (1996). Apprentissage organisationnel. Théorie, méthode, pratiques. Paris, DeBoeck Univ.
- Gneezy U., Potters J. (1997). An Experiment on Risk Taking and Evaluation Periods. *The Quarterly Journal of Economics* 112 (2), 631–45.
- Balouin Y. (2014). Evaluation de l'aléa submersion marine sur les communes littorales du SCOT du Biterrois. Colloque de restitution de la phase 1 du projet SOLTER, Montpellier, 13/03/2014, 12 p.
- Balouin Y., Rey-Valette H., Picard P-A. (2014). Automatic assessment of beach attendance using video images – development and application to the Lido of Sète Beach, France. *Soumis à Ocean & Coastal Management*, 15 p.

- Delanoë O., Thompson J. (2010). Construire un projet de territoire autour de la solidarité écologique. *Espaces naturels*, 32, 36-37.
- Holling C.S. (1978). *Adaptive Environmental Assessment and Management*. Wiley, London.
- Magnier A. (2013). Cartographie de l'aléa submersion marine dans le golfe du Lion. Etude de deux sites pilotes du projet SOLTER. Rapport Master Pro Gestion des catastrophes et des risques naturels. Département de Géographie, Université Paul Valéry Montpellier, 86 p
- Markovits D. (2007). Luck Egalitarianism and Political Solidarity, *Theoretical Inquiries in Law*, 9, 271-307
- Mathevet R., Thompson J., Delanoë O., Cheylan M., Gil-Fourrier C., Bonnin M. (2010). La solidarité écologique: un nouveau concept pour la gestion intégrée des parcs nationaux et des territoires. *Natures Sciences Sociétés* 18(4), 424-433.
- MEDDTL (2012). Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Vers la relocalisation des activités et des biens, Rapport 20p.
- Myatt L.B., Scrimshaw M.D., Lester J.N. (2003). Public perceptions and attitude towards a forthcoming managed realignment scheme: Freiston Shore, Lincolnshire, UK., *Ocean & Coastal Management* 46, 565-582.
- Selten R., Ockenfels A. (1998). An experimental solidarity game. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 34, 517-539.
- Torre A., Zuideau B. (2009). Les apports de l'économie de la proximité aux approches environnementales : inventaires et perspectives. *Natures, Sciences, Sociétés*, 17, 349-360.

Gestion des risques côtiers et émergence de réseaux d'acteurs dans la Péninsule acadienne (Nord-Est du Nouveau-Brunswick)

Julie Guillemot¹

1. Développement durable et zone côtière / Université de Moncton Campus de Shippagan
218, boulevard J-D Gauthier Shippagan (Nouveau-Brunswick) E8S1P6 Canada
Julie.guillemot@umcs.ca

RESUME : Les collectivités côtières sont confrontées à des modifications rapides de leur environnement que l'on peut associer au changement climatique. Nous nous intéressons à l'apparition de ce nouvel enjeu dans la Péninsule acadienne et à sa prise en charge par les différents acteurs publics, privés et de la société civile. À travers l'analyse de leurs discours à propos du processus d'adaptation et de leur rôle, nous soulignons les convergences mais aussi les divergences existant entre les acteurs. Nous observons l'émergence d'une approche collective à l'échelle régionale. Pour que cette approche puisse influencer la prise en charge du dossier de l'adaptation, plusieurs défis restent à relever. S'assurer de l'appui du secteur privé et des deux paliers gouvernementaux provincial et fédéral en est un. L'autre élément crucial concerne la capacité de ce collectif à générer un dialogue éclairé entre les usagers et les gestionnaires de ce territoire culturellement tourné vers la mer.

MOTS -CLES : gouvernance territoriale, risque côtier, réseau, coopération, compétition, représentation, Péninsule acadienne, Nouveau-Brunswick.

ABSTRACT: Coastal communities are confronted to rapid changes in their environment. These changes can be associated to climate change. We consider this new issue of the Acadian Peninsula and the way public, private and civil stakeholders are taking it over. Through an analysis of their discourse on the process of adaptation and their role, we underline convergences and divergences that exist between stakeholders. We observe the emergence of a collective approach at the regional level. For this approach to influence how the adaptation issue is taken over, many challenges will have to be surmounted. One of them is to obtain private sector support as well as support from the federal and provincial levels. Another crucial element concerns the collective capacity to generate an enlightened dialogue between users and managers of this territory which has strong cultural ties with the sea.

KEYWORDS: Territorial governance, coastal risk, network, cooperation, competition, Acadian Peninsula, New Brunswick.

1. Introduction

Les collectivités côtières sont confrontées à des modifications rapides de leur environnement que l'on peut associer au changement climatique: tempêtes, inondations, érosion des côtes, impacts sur les ressources halieutiques (Vasseur et Catto, 2008). Nous nous intéressons à l'apparition de ce nouvel enjeu dans la Péninsule acadienne et à sa prise en charge par les différents acteurs publics, privés et de la société civile. Dans le cadre de cette communication, nous décrivons le territoire, les principaux risques climatiques identifiés et les acteurs concernés. À travers l'analyse du discours des acteurs à propos du processus d'adaptation et de leur rôle, nous soulignons les convergences mais aussi les divergences existant au sein de ce collectif en émergence.

2. Présentation du territoire

La Péninsule acadienne est une unité administrative et historique située au nord-est de la Province du Nouveau-Brunswick⁵⁴, au Canada (figure 1). Ce territoire comprend plus de 200 km de linéaire côtier sur lequel on retrouve 18 ports de pêche (Dubé, 2005). C'est une région rurale, dépourvue de centre urbain d'importance, parsemée de petites collectivités. En 2011, on dénombre moins de 50 000 habitants sur un territoire de plus de 2 000 km² (CSRPA, 2014a). Plusieurs communautés sont particulièrement exposées aux effets du changement climatique (Chouinard *et al.*, 2006). Les usagers de ce territoire sont déjà en mesure d'en observer certains effets comme la remontée du niveau de la mer et surtout la diminution du couvert de glace de mer⁵⁵ pouvant augmenter les risques côtiers (Stervinou *et al.*, 2013). L'érosion du littoral et la submersion marine sont les principales menaces climatiques qui se concrétisent par des pertes matérielles lors des épisodes de tempêtes comme en 2000⁵⁶ et 2010.

La Péninsule acadienne est éloignée des centres économiques et décisionnels de la Province. L'exploitation des ressources naturelles (tourbe, bleuets⁵⁷ cultivés, pêche et ostréiculture) est au cœur de l'économie. Le tourisme axé sur la mise en valeur de la culture acadienne et des plages génère aussi des emplois saisonniers. Cette région est actuellement confrontée à de sérieuses difficultés socio-économiques, la population y est vieillissante et en diminution et le revenu médian est généralement inférieur à celui de la province⁵⁸.

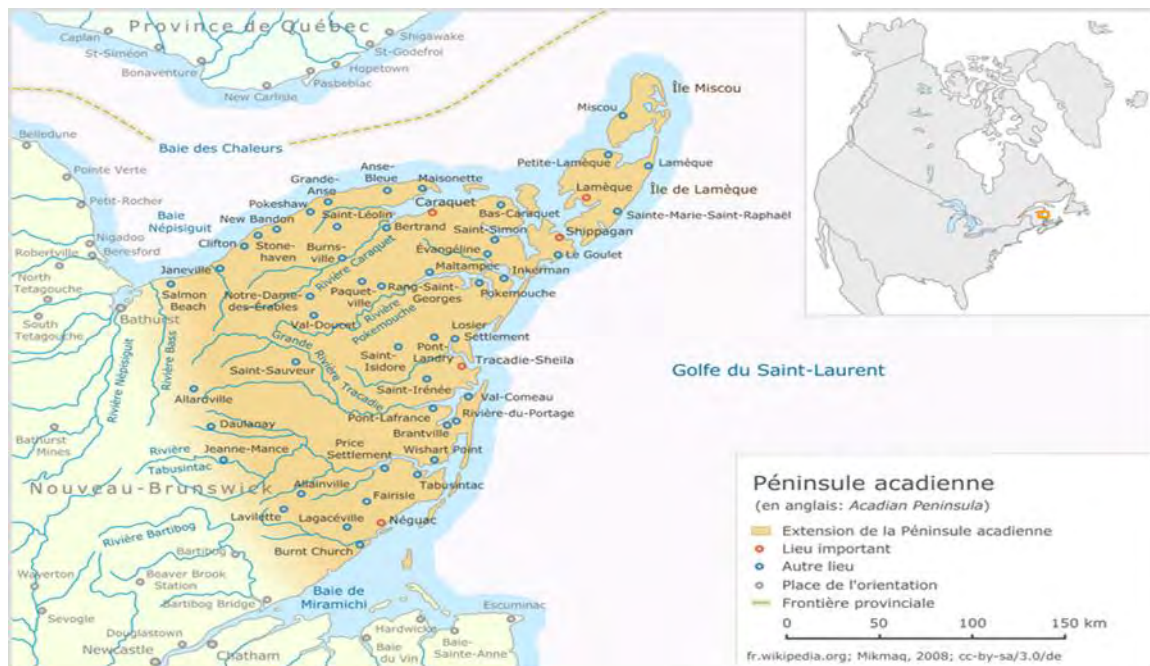
⁵⁴ 2011 population du Nouveau-Brunswick : 751 171 pour une superficie de 71 377 km² (environ 10 habitants au km²) (Statistiques Canada, 2011)

⁵⁵ La couverture de glace au pied des falaises et sur les plages protège ces espaces de la force de mer en hiver. Lors des hivers doux, comme ceux observés depuis la fin des années 1990, l'installation de cette protection naturelle est retardée.

⁵⁶ Par exemple pour la tempête de 2000, il y a eu 88 alertes enregistrées concernant des pertes matérielles dues à la submersion sur le territoire allant de Val-Comeau à Miscou, dont 14 seulement dans le village de le Goulet (données terrain).

⁵⁷ Myrtilles

⁵⁸ Selon Statistiques Canada 2006, dans le comté de Gloucester qui englobe les 2/3 de la Péninsule, le revenu médian après impôt en 2005 par famille de recensement est de 5 000 \$ inférieur à celui de la Province (41 000\$ versus 46 160 \$). Les principales municipalités (Shippagan, Tracadie, Neguac, Lamèque) affichent aussi des revenus inférieurs sauf Caraquet qui dépasse légèrement la moyenne provinciale.



régionalisation de certains services (ex : sécurité, planification) et de regroupement de petites communautés a été récemment initié. L'étude des arrangements institutionnels formels ou informels entre les acteurs du secteur public, les acteurs du secteur privé ayant une influence locale, et la société civile ou les organismes communautaires qui en sont l'incarnation permet de caractériser le système local de gouvernance (Plante *et al.*, 2006). Nous faisons alors ressortir la place des acteurs portant l'enjeu de l'adaptation et les moyens à leur disposition au sein de cette gouvernance du territoire.

4. Méthodologie

L'approche méthodologique choisie est celle de l'étude de cas (Roy, 2003). Nous sommes impliquées depuis 2011 auprès de plusieurs collectivités de la Péninsule acadienne dans le cadre d'un projet de recherche-action portant sur l'accompagnement des communautés côtières face au changement climatique. Cela nous a permis de collecter des données qualitatives par observation participante. Nous avons assisté ou animé de nombreuses réunions publiques ou en groupe de travail dans trois municipalités⁵⁹. Pour aborder plus spécifiquement la prise en charge de l'enjeu au niveau régional nous utilisons des données issues d'entrevue semi-dirigée auprès d'acteurs du secteur public, privé et de la société civile (n= 14) faites de juin 2013 à mars 2014. De ces entrevues 7 personnes avaient un rôle directement en lien avec le secteur municipal et 2 relevaient de ministère provinciaux et 5 étaient actifs dans des organismes communautaires. Ces données ont fait l'objet d'une analyse thématique afin de faire ressortir les convergences et divergences entre acteurs concernant les représentations sur le risque et l'adaptation et sur la mise en œuvre de l'adaptation régionalement (responsabilité, atouts et limites). Nous utilisons le logiciel N. Vivo (QSR, NVivo10, Burlington, MA USA). Nous avons aussi utilisé des sources documentaires (rapports, site Internet gouvernementaux et des OSBL - Organisation Sans But Lucratif - et journaux), notamment pour la partie portant sur la gouvernance territoriale.

5. Gouvernance territoriale et adaptation au changement climatique

Le territoire de la Péninsule acadienne est largement non municipalisé : 51 localités sur 65 sont des DSL (district de services locaux). Les DSL ont été créés en 1967, ce sont des entités administratives non incorporées en municipalité et relevant donc du gouvernement provincial. Leur population n'ont pas de représentants élus pour administrer les affaires locales, mais peuvent former un comité consultatif. Ce comité n'a aucun pouvoir de décision, il conseille le ministre sur certains aspects comme la prestation des services locaux sur son territoire, le budget, le taux d'impôt foncier (Finn, 2008). Des projets de regroupements entre municipalité et DSL sont en cours au Nouveau-Brunswick, ils visent à augmenter le pourcentage de territoire municipalisé, c'est à dire ayant un gouvernement local élu responsable de la gestion du territoire. Ces regroupements sont supportés par la Province, mais non imposés. Ainsi, dans la Péninsule acadienne, fin 2013, les habitants de 18

⁵⁹ Le Goulet en 2011 à titre d'observatrice 4 réunions. De septembre 2011 à avril 2014, dans le cadre de la démarche d'accompagnement (animatrice ou personne ressource), 15 réunions pour le secteur de Sainte-Marie-Saint-Raphaël et 20 pour la ville de Shippagan.

DSL jouxtant la ville de Tracadie-Sheila ont voté par referendum en faveur d'un regroupement avec cette municipalité. L'aménagement du territoire se fait grâce au service d'urbanisme d'un organisme régional, la **Commission des Services régionaux de la Péninsule Acadienne (CSR PA)**. Les CSR ont été créées par le gouvernement provincial au début de 2013 afin d'aider les différentes localités à mieux organiser leur offre de services. En 2014, la CSRPA coordonne principalement deux services : l'urbanisme et la collecte des déchets. Les territoires municipalisés possèdent chacun un plan d'urbanisme assorti d'un cadre réglementaire (arrêtés de zonage), mais faute de ressource humaine pour en assurer la réactualisation ces derniers sont souvent désuets. Les DSL n'ont généralement pas de réglementation d'urbanisme spécifique locale : seules les règles provinciales s'appliquent⁶⁰. Il n'y pas encore de planification régionale de l'aménagement. Les nouvelles CSR ont cependant la particularité d'assoir à une même table régionale des représentants élus des municipalités et des représentants non élus des DSL, ce qui lui donne la possibilité d'être un forum de discussion en matière de développement régional.

Dans ce territoire, l'adaptation au changement climatique se fait en parallèle au développement d'une approche collective et institutionnalisée de gestion des risques côtiers (aide post-inondation et protection des routes, organisation des mesures d'urgence). Au niveau des individus et des collectifs locaux la prise en compte des risques côtiers est ancrée dans les pratiques (ex : entraide). Cependant, comme ailleurs, l'irrésistible développement de l'habitat proche du rivage conjugué aux effets du changement climatique augmente les risques. Cette situation favorise le développement d'approches complémentaires selon trois axes : la gestion des tempêtes et la protection du littoral, l'aménagement et la réglementation et finalement la recherche et la sensibilisation.

Pour la **gestion des tempêtes** les habitants font confiance à leurs réseaux d'entraide et à leur connaissance du milieu pour faire face (Guillemot, 2013). Il existe depuis 2005 un service régional⁶¹ des mesures d'urgence visant à coordonner les efforts des municipalités mais assez peu connu du grand public et couvrant difficilement tout le territoire. Le palier provincial et le palier fédéral peuvent aussi intervenir conjointement lors des événements majeurs pour assurer la sécurité et aider à reconstruction. Au Nouveau-Brunswick ces aides couvrent surtout les frais occasionnés par les inondations qui ne sont traditionnellement pas couverts par les assureurs privés. Les programmes d'aide ne financent pas le recul des habitations. Dans le secteur étudié, quelques habitations menacées par l'érosion ont déjà été déménagées au frais de leur propriétaire. Lorsque cela est financièrement et techniquement possible les propriétaires tentent de régler le problème en enrochant le littoral. L'enrochement permet aussi de protéger plusieurs axes routiers provinciaux bordant le littoral et est alors défrayé par le ministère du transport du Nouveau-Brunswick. L'enrochement des berges nécessite parfois l'obtention d'une autorisation, mais cela n'implique pas la consultation des autres usagers du secteur.

En ce qui concerne **l'approche réglementaire**, la politique provinciale de protection des zones côtières du Nouveau-Brunswick de 2002, en plus de protéger les écosystèmes, vise à diminuer les risques pour les personnes et les infrastructures publiques dans le contexte du changement

⁶⁰ Pour les DSL des îles Lamèque et Miscou, suite aux pressions de la population, un plan rural a été fait en 1997 pour mieux encadrer le développement des bleuetières et des tourbières. Cependant ce plan n'a pas été réactualisé depuis.

⁶¹ Ce service est une spécificité de la Péninsule acadienne, les autres régions du Nouveau-Brunswick n'ayant pas choisi cette stratégie collective pour répondre aux exigences du gouvernement provinciale qui exige depuis 2005 que chaque municipalité soit dotée d'un plan de mesures d'urgence.

climatique, mais elle n'est pas assortie d'un cadre réglementaire provincial contraignant. Par contre, en lien avec cette politique, les municipalités de la Péninsule acadienne, ont introduit une zone d'inconstructibilité à l'intérieur de 30 m de tout plan d'eau douce ou salée dans leurs règlements de zonage municipal. Ce type de zonage n'existe toutefois pas pour les DSL (CSRPA, 2014). La politique provinciale de conservation des terres humides est assortie d'un règlement qui interdit la construction de nouvelles infrastructures à moins de 30 m des zones désignées « terres humides », ce qui permet de réglementer le développement sur 53 % du littoral néo-brunswickois (Robert Capozzi, communication personnelle).

Afin de stimuler les changements de comportement, l'amélioration des pratiques et le développement des connaissances, il existe une équipe gouvernementale provinciale de 8 personnes, le Secrétariat au changement climatique, chargée de la réduction des gaz à effet de serre et de l'adaptation. Ce Secrétariat a un mandat de sensibilisation et de coordination des différentes instances à toutes les échelles de gouvernance (entre ministère, entre les provinces, avec le fédéral, avec les acteurs territoriaux) mais il n'a pas de programmes financiers spécifiquement dédiés à l'adaptation au changement climatique. Cependant, plusieurs projets de recherche et de sensibilisation ont été financés soit par des fonds spéciaux ou par un fond général (le fond en fiducie pour l'environnement du Nouveau-Brunswick, FFE NB).

Dans les sections 6 et 7, nous présentons, à partir de l'analyse des entrevues le regard porté par les acteurs sur leurs rôles ainsi que les opportunités d'adaptation pour la région.

6. Regards sur les acteurs de l'adaptation et leurs rôles

C'est sans surprise que nos premiers résultats font ressortir le rôle central de la **municipalité**. Cette entité ressort clairement comme étant un acteur incontournable. Elle est présentée comme étant responsable du développement du territoire et de la sécurité des citoyens à travers une information transparente sur les risques. Des répondants soulignent la difficulté à concilier ces deux rôles « *C'est là que le développement se fait le plus et dans les communautés, c'est le long des côtes. On ne se cachera pas non plus. Mais, il faut quand même...on a, je crois, en tant que gouvernement ou municipalité, une responsabilité envers les gens qui viennent s'établir dans nos communautés.* » (entrevue, 2013). Les **DSL** sont bien moins présent sur cette scène, ou alors ils sont évoqués comme étant une forme d'organisation territoriale faisant obstacle au développement ou à une action collective d'adaptation. Plusieurs acteurs évoquent ainsi la **pleine municipalisation** du territoire comme étant une priorité. Cependant, certains représentants de DSL affectés par les effets du changement climatique sont pleinement engagés dans des démarches d'adaptation. Mais les spécificités de ces territoires, sans élus, sans budget géré localement et sans plan d'aménagement, restreignent leur action et leur légitimité.

Trois organisations, permettant de mutualiser les efforts des municipalités, sont actives dans le dossier de l'adaptation au changement climatique. Au niveau régional, le **forum des maires** est une OSBL regroupant les 14 maires de la Péninsule acadienne et vise à discuter et à faire avancer certains dossiers ayant un impact pour toutes les municipalités (ex : infrastructure de transport). Ce forum a voté en décembre 2012, suite au travail de sensibilisation d'un maire dont la municipalité est

particulièrement affectée, une résolution faisant de la réalisation d'un plan d'aménagement du littoral une priorité commune. Par la suite le forum a approché l'Institut de Recherche sur les Zones Côtières (IRZC) pour qu'il devienne leur partenaire dans cette démarche⁶², ce qui débouche sur une entente entre ces deux organismes au printemps 2014. La **CSRPA** (commission de services régionaux de la Péninsule acadienne) est le second organisme régional jouant un rôle au niveau de l'adaptation. La CSRPA est surtout associé à la mise œuvre d'un cadre réglementaire tenant compte des risques à travers le travail de son service d'urbanisme. Selon des répondants, cette entité devrait aussi informer sur les risques quand ils sont connus lors des demandes de permis de construction. Cet organisme est souvent cité comme pouvant favoriser le développement d'une vision régionale dans le cadre de l'adaptation, ou d'autres dossiers. Elle est, par exemple, responsable de la mise en œuvre d'une approche régionale des mesures d'urgence et devrait générer un plan d'aménagement régional d'ici 2018. Il s'agit aussi d'un nouvel espace de dialogue comprenant les municipalités et les DSL. À la demande du même leader municipal que dans le cas du forum des maires une résolution a été votée en mai 2013 pour appuyer l'établissement d'un comité sur le changement climatique. Finalement **AFMNB** (Association francophone des municipalités du Nouveau-Brunswick) joue un rôle au niveau provincial. Cette organisation a été impliquée dans un programme de recherche fédéral-provincial (2008-2012)⁶³ en établissant des ponts entre les municipalités, des chercheurs et le gouvernement. Elle a pour rôle de soutenir les municipalités membres en facilitant l'accès à de l'information sur des préoccupations communes, en stimulant le réseautage et en effectuant un travail de lobbying au niveau du gouvernement.

Dans la Péninsule acadienne, les **institutions de recherche et de formation** (Institut de Recherche sur les Zones Côtières –IRZC, université et collège communautaire) sont vues comme étant des acteurs clefs⁶⁴ dans le dossier de l'adaptation pour informer et former les gens, pour proposer des options et, selon certains, pour porter le dossier de l'adaptation. Ces institutions ont été au premier plan dans la « mise à l'agenda » de cet enjeu (ex : réalisation de cartes des risques, animation de séances d'information/dialogue, accompagnement). Des chercheurs étaient impliqués dès 2005-2006 auprès de communautés. Le programme de recherche fédéral-provincial (2008-2012) a aussi permis de développer des expertises concernant la représentation des risques et le transfert de cette information aux citoyens et de nouer des relations avec le monde municipal.

Les **OSBL ayant un mandat environnemental** sont des acteurs émergeant dans le dossier de l'adaptation. Elles sont relativement peu citées par nos répondants et encore peu présentes dans le

⁶² L'objectif de cette démarche est de collecter et de gérer des fonds afin de financer des études sur les risques et d'expérimenter des options d'adaptation dans la région (Communiqué de presse 18 mars 2014).

⁶³ Programme ICAR (Initiative de collaboration pour l'adaptation régionale) dans les provinces de l'atlantique. Localement ce projet a permis de créer des cartes représentant des scénarios de risque servant de base à un dialogue citoyen-municipalité-chercheur pour émettre des recommandations d'adaptation.

⁶⁴ Nos entrevues ayant eu lieu surtout dans le secteur de Shippagan cela peut avoir une influence sur ces réponses puisque l'université et IRZC sont situés dans cette ville. Le fait que les personnes passant les entrevues soient des chercheurs intervient aussi.

dossier de l'adaptation. Cependant l'une d'elle est une pionnière, la sensibilisation et la compréhension des risques côtiers est cœur de son mandat depuis le début des années 2000. Mais pour les autres ce dossier déborde souvent de leur mandat centré sur le suivi et la protection de la qualité de l'eau. Ces organisations s'impliquent cependant ponctuellement au sujet de la sensibilisation au changement climatique et de ses effets, selon les sources de financement accessibles. Depuis le milieu des années 2000, leur principal bailleur de fonds privilégie de plus en plus les démarches d'adaptation (FFE NB).

Les **citoyens** sont rarement considérés par nos répondants comme étant des intervenants de l'adaptation mais plus souvent comme des « récepteurs ». Ils sont pourtant actuellement en « première ligne » des stratégies d'adaptation puisque les premiers responsables d'assurer leur sécurité et la protection de leurs biens. Ils ont donc la responsabilité de s'informer des risques et d'agir en conséquence. Cela explique l'omniprésence du discours sur l'importance de les informer adéquatement sur les risques et les solutions d'adaptation. L'information sur les risques vise aussi à rendre politiquement acceptable les conséquences directes associés aux choix d'adaptation (ex : restreindre les droits des propriétaires pour éviter des constructions dans les zones à risque) voire à faire de chaque citoyen un acteur capable de dénoncer des approches de « maladaptation » (ex : destruction de zones humides). Elle vise aussi à augmenter la pression politique venant de la base sur les différents paliers du gouvernement. Dans le cadre des projets d'accompagnement des citoyens sont aussi impliqués dans des groupes de discussion permettant d'utiliser leurs connaissances et leurs jugements pour définir des recommandations sur les risques et les options d'adaptation, mais ce rôle est moins mis en avant par nos répondants.

Le **secteur privé**, les entrepreneurs sont assez peu présents dans le discours des acteurs. Plusieurs secteurs économiques comme l'agriculture, la pêche, le tourisme, l'exploitation des tourbières pourraient être affectés par le changement climatique, mais cela ne semble pas être vécu comme une urgence. Il s'agit par contre de réseaux qui pourraient être utilisées pour diffuser des informations grâce aux organisations sectorielles ou territoriales (chambre de commerce, office du tourisme). Certains de ces acteurs pourraient aussi s'impliquer dans le développement d'expertises locales d'adaptation. De plus le poids politique de ces acteurs est reconnu comme étant important, ils peuvent donc aider à faire émerger cet enjeu... ou à l'enterrer! Les assureurs sont parfois évoqués. Même si les risques naturels ne sont pas couverts, certains craignent de perdre leurs droits généraux d'assurance en cas de durcissement des réglementations ou de la diffusion d'information sur les zones à risques. La possibilité de recours juridique contre les acteurs autorisant ou interdisant « abusivement » les constructions est aussi parfois évoquée. L'organisation actuelle du territoire, avec une frange littorale largement privée, et la quasi absence de planification du développement font en sorte que ce sont en premier lieu les échanges entre acteurs privés qui influencent l'occupation du littoral. Cependant plusieurs acteurs collectifs (ex : association touristique, municipalité, ministère) interviennent de manière indirecte en épaulant, ou pas, des projets privés.

Le **gouvernement du Nouveau-Brunswick** est fréquemment mentionné comme un acteur à mobiliser pour avoir un cadre réglementaire concernant l'urbanisation du littoral ou une politique incitative permettant de dissuader en douceur les investissements risqués. Son rôle serait aussi de rendre l'information accessible à tous, de financer des recherches et d'aider les citoyens confrontés aux conséquences désastreuses des tempêtes. Mais à ce sujet, plusieurs mentionnent qu'une réflexion devrait être faite sur l'aspect préventif (aider à adapter les habitations aux inondations ou à les déménager) versus l'approche réactive habituelle en post-tempête. Le rôle du **gouvernement fédéral** est très peu évoqué sauf pour certains sujets spécifiques comme l'entretien des havres de pêche dont il est responsable. Pourtant, l'intervention financière du gouvernement provincial au plan de l'adaptation à court ou à long terme, est souvent associée à l'existence d'une enveloppe budgétaire fédérale (recherche, réparations post-tempête).

La **nature** est finalement un acteur bien présent dans le discours de plusieurs acteurs. Ses caprices ont le pouvoir de mettre, ou pas, l'enjeu de l'adaptation à l'ordre du jour. Elle peut en détruisant des infrastructures de protection valider ou invalider des choix d'adaptation et c'est elle qui décide de l'horizon temporel de l'adaptation : *«La dame nature, on n'a pas de contrôle là-dessus», « on est bon pour 5 ans peut être ...jusqu'à la prochaine tempête [...] et quand y'a pas de glace c'est un problème »* (Extraits d'entrevues, 2013-14)

7. Regards sur l'adaptation

Pour avoir des approches collectives d'adaptation, cela nécessite qu'il y ait un dialogue et l'émergence de positions communes sur la nature du problème, sur la définition de ce peut être l'adaptation et sur les rôles des différentes entités. Concernant la reconnaissance de l'existence du problème et de sa nature les discours convergent : les acteurs rencontrés dans le cadre de cette étude, et en particulier ceux proches du milieu municipal, sont conscients des conséquences actuelles et futures associées au changement climatique. L'érosion et la submersion marine sont au cœur des préoccupations. Les effets d'événements climatiques brutaux comme des pluies diluviennes ou des mini-tornades sont aussi parfois évoqués. Les acteurs ne remettent pas en question l'existence du changement climatique. Pour les répondants, l'adaptation est largement associée à la planification et à l'aménagement des activités et aura des conséquences sur le développement du territoire. Certains font alors des liens avec la gouvernance locale et le monde politique tandis que d'autres recentrent leur regard en rapprochant l'adaptation de la protection de l'environnement et de la gestion des risques. Pour beaucoup l'adaptation reste une affaire de coût et de choix économique. Cela fait référence aux pertes anticipées liées aux restrictions concernant le développement futur mais aussi aux ressources humaines à mobiliser sur ce dossier et aux dépenses pour protéger ce qui est déjà là.

Si les acteurs convergent sur l'idée qu'il va falloir **penser à occuper et aménager le territoire différemment** pour diminuer les risques, un dialogue serait encore nécessaire sur ce que veut dire aménagement, sur la manière de générer ce changement et sur les conséquences au niveau du développement que cela peut avoir. En effet l'aménagement couvre différentes approches de la protection des berges par leur artificialisation au recul stratégique. Les positions divergent notamment concernant l'approche réglementaire. Pour plusieurs, elle risque de provoquer une vive opposition de la part des propriétaires et investisseurs et s'avérer inefficace ou inapplicable. D'autant plus que le manque de moyens des services d'aménagement ne facilite pas la mise en œuvre de cette option. L'approche réglementaire devrait alors être doublée voire remplacée par une campagne d'information et des incitations à l'adaptation. Compte tenu de l'incertitude associée aux événements climatiques futurs et des difficultés financières actuelles auxquels sont confrontés les villages, les municipalités endossent difficilement la responsabilité de contraindre le développement. Un cadre global régional ou provincial serait alors le bienvenu pour que cette responsabilité soit portée par un collectif incarnant l'intérêt général et prônant une approche équitable pour toutes les collectivités, c'est à dire limitant la compétition entre ces territoires qui cherchent tous à attirer des investisseurs. Ce cadre n'existe pas encore, nous avons par contre constaté qu'il est aussi possible de tirer profit de la compétition entre les localités même au sujet de l'adaptation en misant sur l'émulation entre les différents territoires et le support apporté par la convergence des démarches. Il est en effet plus facile de justifier des changements et des dépenses quand d'autres entités voisines font de même et inversement l'inertie devient de moins en moins une option quand les localités voisines s'engagent.

Concernant la **protection du littoral** les discours divergent nettement. Pour quelques-uns, il est impossible de lutter contre la mer par des approches techniques. Pour d'autres, selon les enjeux à protéger et l'exposition ou non à la « grande mer » une approche basée sur des infrastructures de protection comme des enrochements pourrait ou devrait être tentée. Cependant la grande majorité, en s'appuyant sur leur vécu ou sur le discours de scientifiques, mentionne plusieurs inconvénients associés à cette approche : leur coût, la détérioration de la côte accélérée aux extrémités des structures et le fait que cela reste une protection sur le court terme. Quelques-uns mentionnent la perte de la plage comme inconvénient ou les conflits d'accès à cette plage occasionné par ces structures. Aucun répondant n'envisage la possibilité de réglementer davantage la construction de ces infrastructures comme pouvant être une approche d'adaptation même s'ils évoquent les conflits associés à leur érection. La **solution du déménagement** des infrastructures les plus à risque ne fait pas l'unanimité : inévitable pour certains, elle est la dernière solution à envisager pour beaucoup, après la protection de la côte et l'adaptation du bâtiment (ex : surélever les maisons). À ce sujet la nature du risque et la géographie crée des inégalités entre les collectivités : pour plusieurs secteurs menacés par l'érosion la protection ou l'accommodement sont inapplicables ou financièrement inaccessibles. Plusieurs soulignent le fait qu'il n'existe pas de programme gouvernemental au Nouveau-Brunswick permettant de soutenir un recul stratégique des habitations que la menace soit l'érosion ou la submersion marine ce qui rend cette option inaccessible. Cette approche est aussi

jugée politiquement risquée et devrait être mise en œuvre seulement s'il existe une véritable volonté populaire et sans avoir recours à l'expropriation. Pour ce qui est de l'accommodation, il est intéressant de noter que peu de personnes mentionnent l'importance de sécuriser également la vie des résidents à travers une adaptation des pratiques lors des événements de tempête alors que cette approche consiste à maintenir des populations dans des zones de plus en plus inondables.

Concernant **les forces et les limites de la région** au regard de l'adaptation au changement climatique trois éléments ressortent. Plusieurs soulignent le rôle central de la recherche pour développer une expertise scientifique et technique et accompagner les municipalités dans leurs processus. La majorité revient sur l'importance de l'éducation et de la sensibilisation du grand public. Pour certains, avoir une population régionale globalement consciente des problèmes liés au changement climatique est un atout, pour d'autres cette sensibilisation reste à faire. Et finalement la possibilité de développer une approche collective est vécue pour certains comme une faiblesse régional à cause du légendaire « esprit de clocher » des localités tandis que d'autres le voient comme une force en émergence. Au sujet des limites, plusieurs déplorent le manque de moyens notamment pour soutenir les approches stratégiques visant le long terme. La municipalisation du territoire et le développement d'approches régionales sont considérés comme un moyen d'acquérir plus de ressources pour permettre l'adaptation des communautés : en faisant en sorte que les DSL participent à ce mouvement, en mettant en commun des ressources humaines, en développant une force politique en mesure de compenser le faible poids électoral de la région. Par contre, nous constatons que les notions de dialogue et de concertation permettant de repenser le développement en fonction de la donne climatique et de penser collectivement aux priorités en termes d'adaptation est peu présent dans le discours des acteurs⁶⁵.

8. Conclusion

Au sujet des risques côtiers dans la Péninsule acadienne, on observe un monde municipal en mouvement soutenu par des acteurs de la recherche et en second lieu par des OSBL environnementales. Le défi pour que ce mouvement prenne de l'ampleur est alors d'arrimer à cette démarche les intérêts et les ressources du secteur privé (les citoyens et les entrepreneurs) et ceux du gouvernement provincial et fédéral. Par contre, comme il n'existe pas encore de vision globale au niveau de la Province concernant la question de l'adaptation au changement climatique et des risques côtiers, développer une approche régionale au niveau de la Péninsule leur donnera peut-être l'opportunité d'influencer le futur cadre d'intervention provincial. Le manque de cadre descendant et de ressources gouvernementales favorisent aussi une approche participative de l'adaptation d'une

⁶⁵ Cependant le président du Forum des maires justifie l'implication du Forum envers la création de ce plan régional d'aménagement du littoral par l'importance d'avoir « une concertation sur un plan d'actions communes » (Communiqué de presse 18 mars 2014) et un comité consultatif élargi comprenant des représentants des DSL, des municipalités, des chercheurs, des OSBL environnementales et du gouvernement a été prévu à cet effet.

part pour mettre en commun les connaissances, les expertises et les moyens mais aussi pour produire des recommandations co-construites par les acteurs. En effet cette co-construction favorise leur acceptabilité malgré les conséquences négatives, comme les restrictions au développement, associées à leur mise en œuvre. La crédibilité de la démarche collective est alors cruciale pour pousser les différents décideurs à considérer ces recommandations.

S'il existe de nombreuses convergences et leviers favorables à une approche collective régionale, nous avons identifié plusieurs divergences entre les localités et les acteurs qui devront être discutées pour permettre l'enrôlement de tous. La première fracture provient du régime de gouvernance : le **rôle des DSL** dans une approche régionale sera à discuter. La seconde est liée à la nature et à l'ampleur des risques auxquels chaque collectivité est confrontée, qui génèrent des **inégalités géographiques** : certains villages sont davantage affectés. En effet les localités situées face au Golfe sont considérées comme étant plus à risque et celles confrontées au recul de falaises plus démunies que celles menacées d'inondation, puisque pour ces dernières, des accommodations techniques comme la surélévation des bâtiments pourraient être une alternative au retrait. Finalement un dialogue sera nécessaire autour du **regard porté sur le développement du territoire** : l'identité territoriale est fortement liée à son histoire et sa géographie maritimes et pour plusieurs, il semble impossible de se développer en dehors de la frange côtière puisque « *tout est côtier* » dans la Péninsule. Dans les entrevues, la possibilité de laisser la place à la nature est rarement évoquée par les acteurs et seuls quelques répondants font le lien entre développement durable et adaptation. Cela nous laisse penser que cet enjeu ne génère pas actuellement de remise en question majeure dans la manière d'habiter et de développer le territoire. Reste à savoir si le renouvellement de la gouvernance locale et la création de collectifs visant une meilleure adaptation seront favorables à une réflexion sur le développement de la Péninsule acadienne tenant compte des multiples dimensions de l'espace côtier : identitaire, économique mais aussi vecteur de risques.

Remerciements :

Cette recherche s'est faite grâce au soutien financier du CRSH (Conseil de recherches en sciences humaines) à travers l'ARUC-DCC (Alliance de Recherche Universités-Communautés- Défis des Communautés Côtières) et de Faculté des études supérieures et de la recherche (FESR) de l'Université de Moncton. Nous avons également apprécié le soutien de l'Université de Moncton Campus de Shippagan et par-dessus tout la collaboration et l'ouverture des nombreux intervenants contactés.

Bibliographie

- Chia, E., Rey-Valette, H. et Mathé. S. (2007). L'aquaculture et le développement durable : entre système de régulation et gouvernance. ERSA/ASRDLF. Paris
- Chouinard O., Plante S., Martin. G. (2006). Engagement des communautés face au changement climatique : une expérience de gestion intégrée à Le Goulet et Pointe-du-Chêne au Nouveau-Brunswick, Vertigo, 7, 3, <http://vertigo.revues.org/1912>
- CSRPA Commission de Services Régionaux Péninsule Acadienne. (2014a). La CSR en chiffres, <http://www.csrpa.ca/fr/la-csr-en-chiffres>

- CSRPA Commission de Services Régionaux Péninsule Acadienne. (2014b). Réglementation - Service d'urbanisme, <http://www.csrpa.ca/fr/reglements-municipaux>
- Dubé, J.-G. (2005). Profil socioéconomique et sociodémographique de la Péninsule acadienne en 2005. *Entreprise Péninsule*.
- Finn, J.-G. Commissaire sur l'avenir de la gouvernance locale. Nouveau-Brunswick. (2008). Bâtir des gouvernements locaux et des régions viables : plan d'action pour l'avenir de la gouvernance local au Nouveau-Brunswick, Fredericton : Gouvernement du Nouveau-Brunswick, <http://www.gnb.ca/cnb/promos/flg/index-f.asp>.
- Guillemot, J. (2013). Rapport synthèse sur l'application d'un questionnaire à Sainte-Marie-Saint-Raphaël et Cap-Bateaux (DSL)-Juillet 2012-Avril 2013. Données non publiées.
- Moser, S. C. et Ekstrom, J. A. (2010). A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *PNAS*, 107(51). p. 22026-22031.
- Plante, S., Boisjoly, J. et Guillemot, J. (2006). Gestion intégrée des îles habitées de l'estuaire du Saint-Laurent (Québec) et développement territorial. L'expérience de la mise en œuvre d'un comité de gestion intégrée à l'Isle-aux-Coudres. *VertigO* 7, 3, <http://vertigo.revues.org/209>
- Plante, S., Chouinard, O. et Martin, G. (2011). Gouvernance participative par l'engagement citoyen à l'heure des changements climatiques : étude de cas à Le Goulet, Pointe-du-Chêne et Bayshore Drive (Nouveau-Brunswick). *Territoire en mouvement*, 11(2008-3). p. 33-49.
- Roy, S. N. (2003). L'étude de cas. Recherche sociale : de la problématique à la collecte de données. B. Gauthier. Sainte-Foy Presses de l'Université du Québec. p. 159-183.
- Stervinou, V., Mayrand E, Chouinard, O., et Thiombiano, N. (2013). La perception des changements environnementaux : le cas de la collectivité côtière de Shippagan, Nouveau-Brunswick, *VertigO*, 13, 1, <http://vertigo.revues.org/13482>.
- Vasseur, L. et Catto, N. R. (2008). Chapitre 4 : Canada Atlantique. Vivre avec les changements climatiques au Canada: édition 2007. Ottawa, Gouvernement du Canada. p. 119-170.

Productions et circulation des connaissances sur les risques côtiers. L'exemple de la Bretagne

Hélène Martin-Brelot¹, Frédérique Chlous²

1. EA2219 Géoarchitecture

UBO 6 avenue Victor Le Gorgeu, 29238 BREST Cedex 3 France

helene.martin-brelot@univ-brest.fr

2. UMR PALOC

MNHN 57 rue Cuvier, 75231 Paris cedex 05 France

frederique.chlous@mnhn.fr

RESUME.

De nombreux acteurs prennent part à la gestion des risques côtiers. Ils sont issus des services de l'Etat, élus ou techniciens des collectivités territoriales, membres de bureaux d'études, adhérents d'associations, scientifiques. Dans le cadre du programme de recherche COCORISCO, des entretiens ont été conduits dans cinq communes situées dans le Finistère (Guisseny, L'île-de-Sein, L'île-Tudy) et le Morbihan (Le Tour-du-Parc, Pénestin). Les analyses thématique et textuelle des entretiens révèlent l'hétérogénéité des connaissances mobilisées dans la gestion des risques côtiers. Si elles portent principalement sur les aléas, elles sont élaborées par des acteurs divers qui privilégient l'expérience ou la modélisation, le format cartographique ou le discours. Les différentes connaissances sont distribuées selon leur position et leur légitimité à l'intérieur d'un système de savoirs hiérarchisé. Elles sont le produit de la définition des risques côtiers, des connaissances et des compétences disponibles. Actuellement, on observe une volonté de tendre vers une normalisation des contenus et des formats (atlas), qui faciliterait la production de documents réglementaires. Les connaissances circulent au sein de multiples réseaux plus ou moins ouverts, hétérogènes en fonction des territoires et de la présence ou non de certains acteurs clés. L'analyse révèle un double mouvement dans lequel certains acteurs revendiquent la prise en compte des connaissances issues de l'expérience tandis que les acteurs des services de l'État et des collectivités prennent conscience de l'intérêt de les intégrer.

ABSTRACT.

Many stakeholders take part in the management of coastal risks. They are coming from State services, elected or working in local authorities, engineering consultants, members of associations or scientists. Within the COCORISCO research program, interviews were conducted in five localities in the Finistère département (Guisseny, L'île de Sein, L'île Tudy) and in the Morbihan (Le Tour du Parc, Penestin). Thematical and textual analysis of the interviews disclose the heterogeneity of knowledge which is used in the coastal risks management. Dealing mainly with natural hazards, knowledge is produced by different people who favour experiment or modelling, map medium or discourse. The different pieces of knowledge are distributed according to their position and legitimacy inside a system organised into a hierarchy. They are the product of the definition of coastal risks, and of the available knowledge and competences. Currently a will to go towards more normalisation (drawing up of atlas) in order to implement reglementary documents can be observed. Knowledge circulate within numerous networks which are more or less open, heterogenous according to territories and to the presence or not of some key actors. The analysis reveals a double movement in which some actors claim the consideration of experiment-based knowledge whereas State and local authorities show a growing interest in integrating it.

1. Introduction

Depuis la tempête Xynthia, de nombreuses réglementations ont vu le jour dans la prise en compte des risques côtiers, plaçant les gestionnaires face à une complexité inédite (Meur-Férec et Rabuteau, 2013). Le programme de recherche interdisciplinaire « CONnaissance, COMpréhension et gestion des RISques Côtiers » (COCORISCO 2011-2014, financé par l'ANR) vise à enrichir les connaissances théoriques et appliquées dans plusieurs domaines relatifs à la gestion des risques côtiers : aléas, enjeux et représentations des risques. Cette communication s'adosse plus spécifiquement sur les travaux concernant la constitution et le fonctionnement des réseaux d'acteurs. L'ensemble des participants à la gestion des risques côtiers est étudié, qu'ils relèvent des collectivités territoriales ou des institutions nationales, des bureaux d'étude ou des centres de recherche, ou encore des associations présentes dans le processus. Alors que ces acteurs possèdent des savoirs et des savoir-faire variés, qu'ils sont intégrés dans de multiples réseaux qui ne se recouvrent pas toujours et qu'ils agissent à différentes échelles territoriales, quelles connaissances sont produites et comment participent-elles à la gestion des risques côtiers ? Ce questionnement nous permet de nous centrer sur les différents objets des connaissances (aléas, enjeux, jeux d'acteurs, représentation sociales), mais également sur leur format de production (carte schéma, numérique, texte) ainsi que leur provenance (études scientifiques ou issues de l'expérience). Si la production des connaissances est contrainte par les coûts humains et financiers, leur intégration est assujettie aux exigences des documents réglementaires et à la définition prépondérante du risque. Celle-ci, anciennement construite, porte son attention sur les aléas et il existe à son propos une certaine proximité « institutionnelle » (Gilly et Torre, 2000) entre les bureaux d'étude et les services des collectivités territoriales et de l'État. Les connaissances produites, plus ou moins légitimes sont intégrées au sein des réseaux d'acteurs. Certains d'entre eux sont modestes et très territorialisés, d'autres veulent imposer une normalisation et une généralisation des connaissances. Ils sélectionnent alors principalement les outils de modélisation et les atlas. Quels sont alors les choix opérés dans un contexte de forte incertitude, de complexité et de changement rapide en matière de législation ?

Après avoir identifié les acteurs présents dans la gestion des risques côtiers sur cinq communes des départements du Finistère et du Morbihan (Guisseny, Île-de-Sein, L'île-Tudy, Le Tour-du-Parc, Pénestin), des entretiens semi-directifs ont été menés, de juin à novembre 2012, auprès d'une quarantaine de personnes. Il s'agit de membre des services de l'État, des collectivités territoriales, de bureaux d'études, d'établissements publics administratifs et d'associations. Ce découpage renvoie à l'analyse d'Habermas (1997), selon laquelle plusieurs types d'acteurs s'investissent dans l'espace public, avec des finalités différenciées. Le théoricien de la démocratie délibérative distingue les acteurs issus du système politique central (institutions gouvernementales, administratives, judiciaires...), ceux issus des systèmes fonctionnels de la société et enfin, les acteurs de la société civile.

Les objets de la production de la connaissance seront discutés, puis nous nous intéresserons aux statuts des connaissances et enfin à leur circulation au sein des réseaux d'acteurs.

2. Objets de la production des connaissances

Face à la multiplicité et à la complexité des questions posées dans la mise en œuvre des politiques publiques (Muller et al, 1998), différentes connaissances sont intégrées dans le processus de construction de prise de décision et notamment la production de documents réglementaires. Concernant la gestion des risques côtiers, l'aléa est principalement documenté, les enjeux font l'objet de quelques études, les analyses des représentations des usagers et des jeux des acteurs sont absentes des documents. Les données produites sont le plus souvent des représentations spatiales numériques synchroniques (Feyt, 2011).

2.1. Des connaissances relatives à la production de documents réglementaires

Si l'on excepte quelques exemples portant sur la mise en œuvre de travaux de construction ou de réhabilitation d'ouvrages de protection, la grande majorité des connaissances produites sont exploitées dans la production de documents réglementaires et d'urbanisme. Leur nombre et leur contenu se sont accrus depuis les événements dramatiques liés à la tempête Xynthia en 2010. Qu'il s'agisse des PPR/PPRL (plan de prévention des risques/ littoraux), des PCS (plan communal de sauvegarde), des DICRIM (document d'information communal sur les risques majeurs), des PAPI (programme d'actions et de prévention contre les inondations), des PSR (plan submersions rapides)... chacun en fonction de ses objectifs et de ses cibles nécessite une connaissance fine et territorialisée des risques côtiers. Les documents d'urbanisme tels que les PLU (plan local d'urbanisme) et les SCOT (schéma de cohérence territoriale) doivent également présenter les risques et les dispositions envisagées pour leur prévention, notamment sous la forme de zonage afin de visualiser les réglementations. L'objectif à court terme (2015) est d'identifier et cartographier les zones à risques de submersion et de produire les plans de gestion sur l'ensemble de la France (Directive européenne 2007/60/CE). Ainsi de nombreux documents ont été produits ou doivent l'être (Le Bourhis, 2007).

Les démarches et le niveau de précision diffèrent d'un type de document à l'autre, cependant différents points peuvent apparaître : diagnostic du territoire, caractérisation des aléas (à des temporalités différentes), recensement des enjeux, identification des dispositifs existants, stratégie face aux enjeux, mesures à mettre en œuvre. La variété des documents réglementaires prescrits est de plus combinée à une hétérogénéité de mise en œuvre : *« il y a beaucoup des PCS qui sont quand même pas forcément bien faits et puis, des DICRIM, j'ai eu des bons exemples, j'ai aussi eu des plutôt mauvais. C'est-à-dire que le DICRIM, ça peut être tout et n'importe quoi. Ça peut être une feuille A4 recto-verso en noir et blanc, qui montre quelles sont les zones avec une carte du PPR qui a été reprise »* (Conseil général 29).

2.2 Aléas, enjeux, représentations : inégalités de traitement

Considérant que la vulnérabilité globale est la résultante des interactions entre aléas, enjeux, gestion mise en œuvre et sensibilité des populations (Meur-Ferec, 2008), il est intéressant d'identifier le type de connaissances qui circule lors de la production des documents réglementaires. L'aléa est sans conteste la composante de la vulnérabilité la plus étudiée. Les bureaux d'études au service des collectivités territoriales portent ainsi leurs efforts sur la détermination des risques de submersion, de l'évolution du trait de côte en développant des mesures de terrain et des outils de modélisation. L'identification de cette composante est maîtrisée par les bureaux d'études : *« On sait faire les aléas, parce que c'est du factuel, c'est du quantitatif. Et, il y a maintenant la partie enjeux...*

elle est relativement complexe à mettre en œuvre, parce que on est sur des choses qui peuvent être subjectives, politiques, culturelles et il y a différentes méthodes qu'on regarde aujourd'hui, pour savoir comment tenir compte de ces enjeux. » (Bureau d'étude). Les études des représentations sociales et des jeux d'acteurs ne sont pas évoquées dans le cadre de nos entretiens.

Les acteurs de la gestion des risques sont conscients de la complexité de l'identification de la vulnérabilité et notamment des manques qui concernent l'interface terre-mer, la profondeur historique, la compréhension de la gouvernance, le tout en s'appuyant sur une vision dynamique du territoire. Les interactions entre les différentes composantes naturelles – économiques - sociales sont décrites comme complexes à modéliser d'autant plus que le temps imparti pour produire les documents est relativement court, que les moyens financiers et humains ne sont pas toujours suffisant et qu'un problème de méthode est identifié (DGPR).

Si les connaissances portant sur les aléas sont l'objet d'attention, il est néanmoins nécessaire de les homogénéiser et les regrouper. Différents outils ont alors été conçus, ainsi l'atlas des risques littoraux a débuté suite à la circulaire Xynthia du 7/04/2010. Des cartes de zones basses provisoires ont été établies à l'échelle nationale, et notamment en Bretagne, pour réaliser un porter à connaissance sur les risques de submersion marine. Elles ont ensuite été précisées par le SHOM (Service hydrographique et océanographique de la marine), le CETMEF (Centre d'étude techniques maritimes et fluviales) et les DDTM (Direction Départementale des Territoires et de la Mer), suite à la circulaire du 27/07/2011 relative à la prise en compte de la submersion marine dans le PPRL. Le programme nommé Litto3D vient renforcer ce besoin de connaissance, il s'agit d'un modèle numérique altimétrique continu terre-mer réalisé par le SHOM et l'IGN, hébergé en Bretagne par l'infrastructure de données spatiales GéoBretagne. Par ailleurs, l'objectif est également de créer un suivi du trait de côte au niveau départemental afin d'agréger les données comme ce qui existe dans le département de la Manche.

Si la production de données concernant les aléas se structure et prend en compte leur complexité, elle doit également intégrer et gérer les incertitudes. Les améliorations des systèmes de mesure et des modèles permettent de les réduire, mais non de les annuler sachant qu'il est nécessaire d'identifier les événements fréquents, moyens et extrêmes, ainsi que les transformations climatiques et l'élévation du niveau de la mer. Ces derniers sont sujet à discussion : *« L'État a pris deux options pour notre zone, c'est plus 20 centimètres dans les années à venir et puis, jusqu'à 60 centimètres pour ce qu'ils appellent « l'événement centennal »... Le 60 cm, on trouve ça très sous-estimé, ils n'ont pas voulu faire peur à tout le monde, mais la plupart des scientifiques disent que ce sera beaucoup plus que ça, ce sera au minimum 1 mètre, voire 1,50 mètre, voire plus »* (Association). Au delà, la question de l'échelle de travail interroge : *« nous étions précis à 1 mètre, c'était gênant par rapport à un permis de construire donné, mais, en masse d'enjeux, on ne s'est pas complètement trompé »* (DREAL). Cependant, le niveau micro intéresse les propriétaires des terrains incriminés et les réajustements sont possibles si le pétitionnaire peut fournir un levé topographique contradictoire. L'incertitude n'est pas négligée mais intégrée selon une règle simple : *« Nous demandons aux bureaux d'études de prendre en compte les incertitudes à chaque étape de la procédure. Et, au final, s'ils ne sont pas capables de déterminer la précision du modèle, par exemple, il faut qu'ils prennent par défaut 25 centimètres. Donc, il faudra expliquer aux élus que lorsqu'on aura déterminé l'événement de référence, non seulement on va rajouter l'élévation du niveau de la mer, mais aussi, 25 centimètres d'incertitude sur les résultats »* (DDTM 56)

L'aléa, pourtant la composante de la vulnérabilité la plus étudiée, pose de nombreuses questions quant à son intégration dans les documents réglementaires. Les connaissances ne sont pas homogénéisées et les atlas ne sont pas encore opérationnels, les compétences sont hétérogènes et la complexité de la question à traiter génère de nombreuses incertitudes.

3. Différents statuts de connaissance en fonction des producteurs

Parler de « statut » des connaissances revient à s'interroger sur leur position et leur légitimité à l'intérieur d'un système de savoirs et de compétences hiérarchisé. La légitimité renvoie au niveau de confiance accordé aux connaissances, qui est fonction de la manière dont elles sont produites et de l'autorité des acteurs dont elles émanent. On distingue ainsi d'une part, des connaissances qui reposent sur l'acquisition d'une certaine expérience locale des risques côtiers, et d'autre part, des connaissances fondées sur la modélisation de données acquises principalement sur les aléas. Chaque approche conduit à des spécificités en termes de décision et de gestion.

Ces remarques sont corroborées par une analyse des entretiens avec le logiciel Alceste, qui fait ressortir clairement des univers sémantiques spécifiques selon les grandes catégories d'acteurs et leurs échelles territoriales d'action (Figure 1). Ainsi, les deux premières classes restituent un vocabulaire relatif d'une part, à l'action de protection contre la mer (dune, digue, cordon dunaire, sable, protéger, enrochement, polder...) et d'autre part, à la vie quotidienne (gens, dire, aller, voir, maison, vivre, pouvoir, maire, donner, écouter, habiter, heure...). Il se rapporte à la parole des acteurs des communes (Sein, Le Tour-du-Parc, Guissény, Île-Tudy). La troisième classe fait ressortir des mots relevant d'une action au niveau régional, tenant compte d'enjeux à la fois globaux (enjeu, climat, changement, adaptation, international...) et locaux (territoire, action, charte, SCOT, politique, côtier...). Un champ lexical plus technique (étude, État, ouvrage, projet, dossier, subvention, budget...) renvoie au discours des bureaux d'études, mais aussi à celui des structures intercommunales (SIVOM Combrit / Île-Tudy, Lorient Agglomération) qui ont eu à monter des dossiers tels que des PAPI. Enfin, une cinquième classe à forte connotation administrative (service, DDTM, comité, réunion, piloter, direction, DREAL...) est spécifique au discours des agents de l'État (DDTM, DREAL).

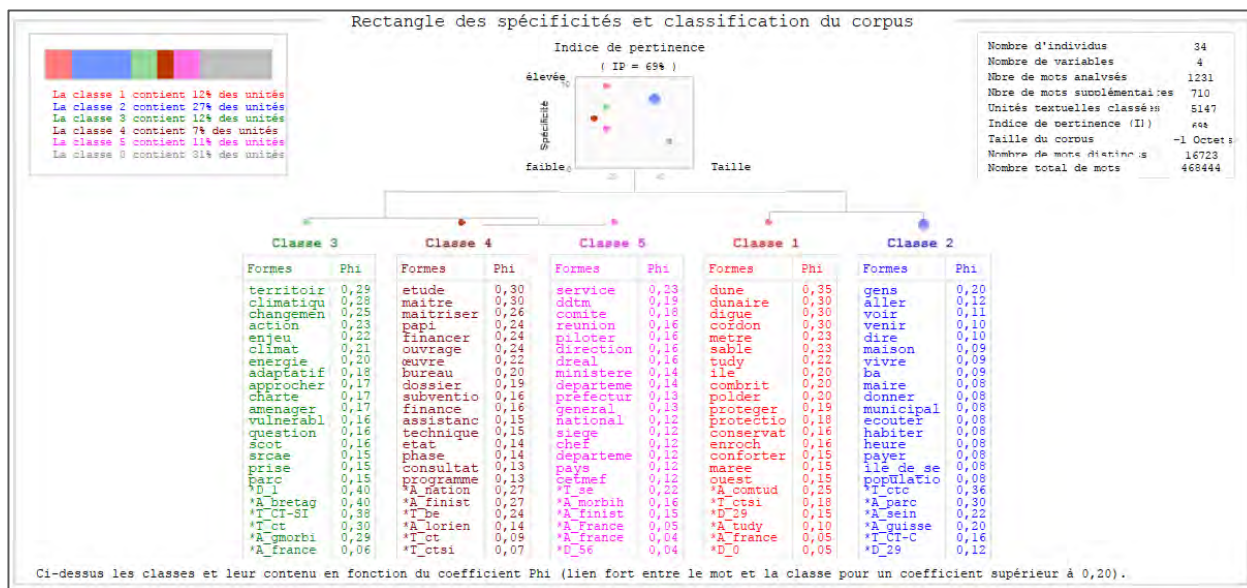


Figure 1. Résultat d'une analyse du corpus d'entretiens des gestionnaires sous Alceste

3.1 Des connaissances fondées sur l'expérience

Le processus de légitimation de ce type de connaissances passe par la présence physique, quotidienne et à l'année, d'individus ou de groupes d'individus sur le territoire potentiellement exposé aux risques de submersion et d'érosion. Il s'agit donc principalement des habitants, des professionnels dont l'activité est en lien avec la mer (pêcheur, conchyliculteurs, sauveteurs...), et des élus locaux. Leur présence sur le littoral permet une observation *in situ* et en temps réel de l'état des protections contre la mer, du trait de côte, du niveau de la mer, voire du changement climatique : « *Moi, ayant quand même fréquenté les sites depuis plusieurs années, j'ai bien vu quelles étaient les conséquences de ce réchauffement, de la montée du niveau des eaux (...) on a vu ces dunes partir, ces arbres tomber sur la plage. Tous ces signes de disparition, petit à petit, du cordon dunaire.* » (Structure intercommunale, 29). Si ce type de savoir issu de l'observation directe corrobore souvent les discours scientifiques sur l'élévation du niveau marin, il peut également les contredire : « *... étant utilisateur de la mer et du rivage côtier depuis 45 ans à peu près, ayant des repères fixes à savoir les bâtiments ostréicoles, je peux vous dire que depuis 40 ans à peu près, on avait beaucoup plus d'inondations et des hauteurs plus importantes à plusieurs reprises dans l'année (...).* » (Association, 56).

La valorisation de l'expérience et de la proximité va souvent de pair avec un regard critique sur la distance, à la fois géographique et culturelle des décideurs vis-à-vis du « terrain ». La non prise en compte des spécificités du contexte et des contraintes locales peut apparaître comme un défaut dans le processus de construction d'une connaissance complète et juste des risques côtiers. Ainsi, bien que les élus se fient aux connaissances des scientifiques et des bureaux d'études, ils sont enclins à utiliser également le savoir empirique local pour les aider à prendre une décision : « *Dans cette commission (DUNES), on a un pêcheur, (...) c'est une mémoire. Tous les jours, il a été à la mer depuis qu'il est tout petit, il a 70 ans ou 75 ans, et il connaît le coin comme sa poche, le courant. Donc, ces*

gens-là, ils nous révèlent des choses, c'est extraordinaire, parce que bon, (...) quand on est adjoint, il faut savoir faire entre Serge Suanez qui est scientifique et les gens du cru, qui ont la mémoire, qui savent comment (...) la mer va réagir (...). Et donc, il faut faire un peu l'amalgame des deux. » (Mairie, 29)

Un certain « bon sens » semble l'emporter, et certains maires se disent capables d'assumer la responsabilité d'une action qui pourrait être invalidé par les services de l'État, s'ils sont certains qu'elle répond à une nécessité de protection des populations. La référence aux « anciens » est ici prégnante. Ces derniers sont réputés avoir su se protéger efficacement contre les dégâts de la tempête, par exemple, en disposant leur maisons les unes contre les autres, à l'écart du bord de mer, et en privilégiant d'étroites ouvertures.

Le sentiment de défiance vis-à-vis des services de l'État peut être accru devant le constat de contradictions entre différentes mesures prises « *dans l'urgence* » suite à Xynthia. Par exemple, le plan de submersion rapide (PSR) ou « plan digue » conforte l'idée de protection immédiate et va à l'encontre d'une autre politique, qui consiste à tenir compte de la mobilité naturelle du trait de côte et à prôner le recul stratégique et la relocalisation des enjeux.

3.2 Des connaissances qui reposent sur la modélisation

Principalement produit par les acteurs scientifiques, ce type de connaissances repose sur l'élaboration de modèles théoriques destinés à prévoir l'aléa et ses conséquences sur les biens exposés aux risques. Les « mathématiques » tiennent lieu de garantie pour l'élaboration des cartes d'aléas qui servent à établir les PPR, mais leur validité repose sur l'observation de données de terrain qui sont à réviser en permanence. La principale limite de cette approche, privilégiée par les services de l'État, est de favoriser un niveau global de connaissances. Cela va de pair avec une volonté d'unifier les savoirs relatifs aux risques côtiers et de produire des règlements applicables si possible dans tous les contextes. L'approche du « terrain », reconnue comme nécessaire par tous les acteurs, prend ici la forme de protocoles plus ou moins formalisés de collecte et de traitement de données. Elle diffère radicalement de la connaissance par l'expérience décrite précédemment, qui passe par l'intégration instinctive de tous les paramètres physiques, économiques, et socio-culturels d'un territoire.

Les données recueillies portent principalement sur l'évolution du trait de côte. Un classement des observatoires par le BRGM met en avant le caractère systématique, organisé et pérenne du processus de collecte et de traitement des données. Ainsi, en Bretagne, les DDTM du Morbihan et du Finistère arrivent derrière l'Institut universitaire européen de la mer - IUEM (Observatoire du domaine côtier), et la Communauté d'agglomération du Pays de Lorient (Observatoire du Littoral de Cap L'Orient). Les principaux utilisateurs d'outils de modélisation – les services de l'État, ne sont donc pas les plus fins connaisseurs (au sens d'initiateurs et concepteurs de la production de données) des terrains sur lesquels ils ont à prendre des décisions. Cependant, ce problème est identifié, puisque des protocoles de collecte de données par photos aériennes ou satellitaires sont organisés par la DREAL Bretagne pendant la survenue de l'événement critique pour vérifier l'adéquation des modèles utilisés pour établir les PPR avec la réalité.

La légitimité des connaissances fondées sur la modélisation de données est importante puisqu'elle émane d'acteurs scientifiques dont la vocation est de construire des outils de prévision et d'aide à la décision. Cependant, elle tend à être remise en question pour son manque de connexion

avec la réalité et avec les problématiques spécifiques des contextes locaux. À la complexité des modèles mathématiques dont tous les acteurs sont loin de maîtriser les modalités de conception, s'ajoute, pour les élus locaux, celle des cadres juridiques qui entourent la gestion des risques côtiers. Les besoins en accompagnement sont accrus. Ceci nous conduit à nous intéresser à la façon dont circulent les connaissances.

Les deux types de connaissances se juxtaposent et sont mobilisées de manière consciente ou inconsciente à des temps différents. L'expérience présente l'avantage d'intégrer toutes les dimensions du risque (aléas, enjeux, représentations, gestion) mais elle manque de formalisation, elle est difficile à transmettre sous la forme de cartes, support privilégié pour la mise en forme de documents réglementaires. Elle repose sur des savoirs qui peuvent disparaître avec les personnes qui les détiennent. La modélisation de l'aléa est adossée à des méthodes et des protocoles reproductibles, mais n'est pas exempte d'incertitudes. Ces modèles sont cependant mis en avant car ils permettent les généralisations.

4. La circulation des connaissances

Qu'elle porte sur l'aléa ou sur les dispositifs réglementaires, qu'elle soit pragmatique ou plus théorique, la connaissance circule au sein de multiples réseaux plus ou moins ouverts, hétérogènes en fonction des territoires et de la présence ou non de certains acteurs clés. Cette partie décrit l'observation d'un double mouvement dans lequel certains acteurs, non inclus dans les débats sur la gestion des risques côtiers, s'imposent pour voir leurs avis reconnus tandis que d'autres, animateurs légitimes en la matière (services de l'État, gros bureaux d'études, scientifiques...), prennent conscience de l'importance d'associer des connaissances multiples, notamment en provenance des acteurs de terrain.

4.1 Des réseaux plus ou moins ouverts

De façon assez logique, on observe un lien entre l'importance de la structure dont fait partie l'interviewé, en termes de taille de territoire et/ou de quantité de personnel employé, et la taille de son réseau, mesurée ici en quantité d'acteurs uniques cités⁶⁶. Les petits bureaux d'études et les petites associations tendent ainsi à citer moins d'acteurs différents que les plus gros. Selon ce critère de citation, les interviewés des services de l'État, du Conseil Régional et des Conseils généraux ont un réseau plus étendu que les structures intercommunales, qui sont elles-mêmes plus connectées que les communes.

Au niveau départemental, le graphe réalisé sous Gephi à partir des citations entre acteurs interviewés montre des réseaux finistériens et morbihannais relativement fermés, les DDTM et les conseils généraux jouant un rôle central au sein de chaque entité (**Figure 2**). Les agents de la DDTM et du Conseil général du Finistère citent plus d'acteurs que leurs homologues du Morbihan. Ceci peut

⁶⁶ En moyenne, 71 acteurs uniques (i.e. acteurs différents cités au moins une fois lors d'un entretien) sont cités par entretien. Par acteurs, on entend aussi bien des personnes physiques (Mr ou Mme Untel), ou morales (« l'entreprise X », « l'association Y », « IFREMER »...), que des territoires (« Noirmoutiers », « le département de la Manche », « la Région PACA » « les Pays-Bas » etc.) ou des termes génériques (« les communes », « les gens », « les préfets »).

être lié au choix d'organisation des DDTM suite à la réforme de l'administration territoriale de l'État lancée en 2007. Dans le Finistère, des équipes dispersées sur tout le territoire, encadrées par un délégué territorial, remontent les infos et relayent les conseils ou la doctrine de l'État. Au contraire, dans le Morbihan, le choix de la centralisation a été fait, avec des délégués territoriaux qui effectuent seuls le portage des politiques auprès des élus et la remontée du travail au siège de Vannes où se concentrent les équipes. Il est à noter aussi qu'au moment des entretiens, une personne de la DDTM 56, citée maintes fois pour ses compétences et sa disponibilité venait de quitter ses fonctions pour un autre poste. Cette évocation illustre l'importance des relations de confiance entre personnels de différentes structures (Crozier, 2000) mais aussi la fragilité des réseaux dans un contexte de réduction des effectifs et de rotation rapide des personnels des services déconcentrés de l'État.

Les communes s'insèrent pour une part dans des réseaux constitués à la faveur de la gestion d'un problème particulier. Au moment des entretiens en 2012, c'est la tempête Johanna de 2008 qui est dans les esprits, et bien sûr Xynthia qui a remis à plat la politique en matière de plan de prévention des risques littoraux (PPRL). L'élaboration de ces plans conduit les élus à être très concentrés sur le montage de dossiers, avec la multiplication des études, le souci d'obtenir des financements, et en même temps, de satisfaire la population. De leur côté, les techniciens peuvent bénéficier de l'apport de réseaux comme les GIZC Bretagne, GIZC Morbihan ou Natura 2000 qui leur permettent de se tenir informés des législations, d'échanger des savoir-faire et de dépasser d'éventuels clivages entre élus locaux.

Le manque de vision globale et à long terme des élus est une critique récurrente entendue de la part des associations locales rencontrées pour cette étude. Certaines participent à des groupes de réflexions élargis à l'échelle régionale ou nationale. On se rend compte cependant qu'elles ont souvent dû s'imposer à défaut d'avoir été invitées par les animateurs officiels de ces réseaux. Un moyen de s'insérer dans le débat a par exemple été de diffuser, sur leur site Internet et avant que les maires ne le fassent, les cartes provisoires des zones basses obtenues directement auprès de la préfecture. C'est par ailleurs en faisant entendre leurs voix auprès d'élus du Conseil général ou en utilisant des relais nationaux (ex. France Nature Environnement, présent aux réunions du Grenelle de la Mer) que des associations ont pu intégrer les comités de pilotage organisés par la DDTM pour l'élaboration des PPRL.

Cette forme d'intégration dans les réseaux passe par une reconnaissance (Honneth, [1992], 2000). et par une prise en compte de savoirs et de visions d'acteurs non pensés au départ comme légitimes. Il s'agit d'une piste de progression pour la gestion des risques côtiers, identifiée de façon assez récente. Ainsi, pour les labellisations de plan submersion rapide (PSR), la DREAL envisageait au moment des entretiens de créer un petit comité au niveau régional qui associerait des assureurs, des associations de victimes, des associations de défense de l'environnement pour labelliser les projets. Il s'agit aussi de « *voir un peu leur perception et les connaître un peu plus* (DREAL) ». Quelles sont les manières de développer concrètement cette interconnaissance ?

4.2 L'ouverture passe par la contribution scientifique

Le Grenelle de l'environnement a instauré à partir de 2007 le principe de la « gouvernance à cinq », associant État, élus, syndicats représentatifs des salariés, entreprises et associations dans toutes les démarches de concertation relatives aux politiques et aux projets portés par l'État. En conséquence, on ne trouve pas de réseau constitué sur la question des risques côtiers aujourd'hui qui soit totalement fermé. Cependant, lorsque l'on descend à une échelle plus locale, les écarts entre la théorie et la pratique peuvent s'avérer flagrants.

Un point qui fait débat est celui d'une meilleure articulation des problématiques « risques » et « urbanisation », qui se traduit concrètement par un dialogue plus conséquent entre les services concernés par chaque thématique au sein des administrations déconcentrées, mais aussi entre ces dernières et les élus locaux. Ici, la sensibilisation aux effets du changement climatique est un levier de progression qui implique une meilleure connaissance du rapport aux risques, celui-ci étant dépendant de facteurs historiques et socio-culturels qu'il s'agit d'élucider. De plus, la recherche de la « bonne échelle » de gouvernance des territoires est une préoccupation centrale, l'intercommunalité étant souvent supposée, dans les discours, favoriser l'appropriation de ce type de problématiques par la population et les communes. Dans le même ordre d'idées, la gestion de l'alerte en cas de crise est un point à améliorer. Il s'agirait d'impliquer davantage les usagers et leur conférer un rôle de surveillance, d'alerte et d'action en cas de menace. Pour cela, connaître leurs représentations des risques s'avère indispensable.

Plusieurs programmes de recherche pluridisciplinaires sur les risques côtiers se sont développés ces dernières années. Leur intérêt est double. D'une part, ils contribuent à enrichir et faire évoluer la définition des risques dans toutes leurs dimensions, en incluant, comme COCORISCO, des lots de travail sur l'aléa, les enjeux, la culture du risque et les dispositifs réglementaires. D'autre part, en favorisant les partenariats multiples, publics et privés, ils permettent à des collectivités locales de ne pas être seulement considérées comme des sites d'études, mais à leurs acteurs de devenir légitimes en participant pleinement à l'élaboration de nouvelles connaissances. On peut citer le programme européen ANCORIM qui a permis, pour la Bretagne, de faire travailler ensemble la Région, la communauté d'agglomération de Lorient, et un bureau d'études privé (GEOS) aux côtés de partenaires scientifiques (BRGM, IFREMER). Par ailleurs, pour ces « nouveaux » acteurs impliqués dans des programmes scientifiques (chargés de mission, responsables de service environnement au sein de structures intercommunales, chefs de bureaux d'études), l'intérêt est aussi de gagner en crédibilité pour convaincre les élus de modifier leurs points de vue et le cas échéant, leurs pratiques. À ce titre, le projet européen IMCORE (2007-2011) sur la prise en compte des effets du changement climatique en zone côtière, associant l'UBO et le Syndicat intercommunal du Golfe du Morbihan (SIAGM), est souvent cité en exemple dans les entretiens.

5. Conclusion

La gestion des risques de submersion marine et d'érosion présente une complexité propre aux milieux littoraux qui rend difficile la transposition de connaissances et de savoir-faire acquis par exemple dans le cas des inondations fluviales. Cette complexité s'entend tout d'abord en termes de

gouvernance d'espaces qui se trouvent à l'interface terre/mer, avec des directions (DIRM, DREAL) aux compétences croisées et de nombreux textes juridiques qui restent à articuler. Par ailleurs, le caractère mouvant du milieu littoral, l'accélération de l'élévation du niveau marin doivent nécessairement être pris en compte. Enfin, les enjeux sur ce territoire ont tendance à augmenter, les bords de mer demeurant des espaces très attractifs et prisés par la population.

Construire une gestion des risques d'érosion/submersion nécessite de produire des connaissances aujourd'hui centrées sur les aléas. L'intérêt porté aux enjeux s'accroît mais l'étude des représentations sociales et des jeux d'acteurs restent encore l'apanage des chercheurs. Dans le cadre de questions complexes, la participation des divers acteurs doit permettre de collecter des informations variées (scientifiques, techniques, locales⁶⁷) et de partager les savoirs et savoir-faire. Ainsi, sera-t-il possible de confronter des visions du monde et d'explorer davantage de réponses. L'enrichissement des connaissances par les savoirs locaux — complémentaires des savoirs scientifiques — intéresse de plus en plus les scientifiques et les gestionnaires des territoires. Le caractère relativement nouveau, mouvant, multi-acteurs et multi-échelles du problème incite à la mise en place de débats et de concertations, un objectif explicite étant de parvenir à créer une véritable culture du risque chez l'ensemble des personnes concernées. Par ailleurs, les nouveaux outils issus de la modélisation et de la géomatique peuvent permettre d'intégrer des visions hétérogènes du territoire. Ainsi, des solutions spécifiques, qui passent par l'intégration de connaissances hétérogènes et par des collaborations multi-acteurs, sont à inventer.

Bibliographie

- Bacqué M.-H., Rey H. & Sintomer Y. (2005). « La démocratie participative, un nouveau paradigme de l'action publique ? », in *Gestion de proximité et démocratie participative*, Paris, La découverte, 9-46.
- Crozier, M. (2000). *A quoi sert la sociologie des organisations? Vers un nouveau raisonnement pour l'action*, Seli Arslan
- Feyt, G. (2011). « Les visages et usages de l'information géographique dans le processus de décision territoriale », in *Les SIG au service du développement territorial, sous la dir. Roche, S. ; Caron, C.*
- Gilly, J. P., & Torre, A. (2000). *Dynamiques de proximité*. Editions L'Harmattan, 301 p.
- Habermas J. (1997). *Droit et démocratie : entre faits et normes*, Paris, Gallimard, 551 p.
- Honneth Axel, (2000). *La lutte pour la reconnaissance*, Paris, CERF, [1992].
- Le Bourhis, J.-P., (2007). « Du savoir cartographique au pouvoir bureaucratique. Les cartes des zones inondables dans la politique des risques (1970-2000) », *Genèses*, 68, 75-96.
- Meur-Ferec, Y. Rabuteau (2013). « Des textes au terrain : les défis posés aux élus locaux par la gestion des risques côtiers d'érosion / submersion », *La Gazette des communes*, Cahiers détachés, septembre 2013
- Meur-Ferec C. (2008). *De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral : un itinéraire de géographe*. Edilivre, Collection universitaires, Paris.
- Muller P., Surel Y. (1998). *L'analyse des politiques publiques*, Paris, Montchrestien, Collection clefs.

⁶⁷ La compétence d'usage reconnue aux habitants peut aller dans certains cas jusqu'à la « responsabilisation » des individus, dans les décisions comme dans la réalisation concrète (Bacqué et al., 2005)

THEMATIQUE POLITIQUES
INTEGREES ET STRATEGIES

MANAGEMENT POLICIES
AND STRATEGIES

La gestion des risques côtiers

L'évaluation des politiques publiques pour l'optimisation des performances de gestion des risques.

Stéphanie Defossez¹

1. UMR GRED (Gouvernance, Risques, Environnement, Développement) – Université Paul-Valéry-Montpellier 3

911 avenue Agropolis, BP 64501, 34394 Montpellier cedex 1

stephanie_defossez@hotmail.com

RÉSUMÉ.

Les modes de gestion des risques font l'objet de régulières remises en questions, particulièrement suite à un évènement grave. Force est de constater que l'évolution des territoires et la nécessaire prise en compte du changement global doivent faire évoluer la gestion des risques et ainsi réduire, autant que faire se peut, les victimes et dommages des risques littoraux. Les contextes géographiques, économiques, sociaux et politiques locaux participent selon nous à la réussite ou à l'échec des mesures prises. Ainsi, l'objet de cette communication vise à exposer les méthodologies de l'évaluation des politiques publiques et de faire ressortir par des études de cas, des évaluations de la gestion en termes de réglementations, de conscience du risque et de mitigation. L'évaluation portera sur un quartier de la commune de Oye-Plage (62) exposé aux risques littoraux et peu préparée.

ABSTRACT.

The policies of the risks are regularly questioned, particularly after a disaster. So, we believe that the evolution of territories and the global change have to develop the policies management and contribute to reduce, as much as possible, the victims and the damages of the coastal risks. According to us, the local geographic, economic, social and political contexts participate in the success or in the failure about risk management. The aim of this communication is to explain the methodologies of the evaluation of the policies management, in terms of rules, hazard's knowledge and mitigation. Oye-Plage is a example of exposure to coastal risk which is not prepared.

MOTS-CLÉS : *érosion côtière, submersion marine, politiques publiques, évaluation, changement global*

KEYWORDS: *coastal erosion and flood, management policies, assessment, global change,*

1. Introduction

L'hiver 2013-2014 est marqué par l'assaut de tempêtes répétitives et d'épisodes de submersions sur le littoral français et particulièrement la côte atlantique encore hantée par les événements de février 2010. Xynthia a rappelé la vulnérabilité territoriale et sociétale des littoraux et a réactivé des questionnements sur la gestion des risques. Les zones noires devenues zones de solidarité portent la responsabilité anthropique de l'endommagement et l'État a immédiatement réagi pour l'ensemble des territoires littoraux en réamorçant les procédures de Plan de Prévention des Risques encore trop peu nombreux sur des territoires pourtant exposés à des risques majeurs. En 2011, selon le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL), seuls 46 PPR submersion marine et 29 PPR érosion côtière sont approuvés (et respectivement 71 et 42 prescrits) sur 800 communes (235 000 maisons) situées dans des zones exposées à la submersion (Anziani, 2010). Cette même année, le ministère lance les « Plans Submersions Rapides » et « Plan National d'Adaptation au Changement Climatique » afin de renforcer les actions de gestion des zones à risques. Dans ce contexte, nous sommes amenés à nous demander quelle est la performance de telles mesures et s'il existe *in fine*, de véritables solutions de réduction de l'endommagement ? Quels sont les objectifs de gestion ? L'adaptation des sociétés face aux risques se fonde sur les politiques publiques institutionnelles mais aussi les mesures individuelles ou collectives de la société civile.

2. La gestion des risques littoraux en France : une vision (trop) techniciste ?

2.1. Des littoraux vulnérables

En France, tout comme pour le risque inondation, les risques littoraux sont traités par les politiques publiques à travers une vision techniciste de protection par des ouvrages lourds. La volonté de stabiliser le trait de côte prévaut et s'inscrit dans la lutte contre la mer alors que d'autres pays d'Europe du nord-ouest visent la protection de la population contre la mer (Badewin, 2013). Ces aléas interdépendants – l'érosion agit sur les conséquences de la submersion et réciproquement – nécessitent une gestion à différentes échelles temporelles. La protection⁶⁸ contre la submersion marine revêt un caractère ponctuel de crise tandis que l'érosion côtière s'inscrit sur du temps plus long. L'intensité, l'ampleur et la récurrence de ces aléas restent incertains et s'ajoute à l'élévation relative du niveau de la mer. Face à ces aléas naturels, l'endommagement s'accroît ces dernières décennies par une expansion des enjeux et vulnérabilités. Les populations avancent vers la frange côtière quand cette dernière avance vers les terres provoquant un télescopage entre les deux et une réduction de la zone de sécurité séparant les enjeux des aléas (Meur Férec et Morel, 2004). Le MEDDTL estime à plus de 6 millions la population permanente des communes littorales métropolitaines, à laquelle s'ajoute une capacité d'accueil touristique estimée à plus de 7 millions de lits.

2.2. La lutte contre la mer

Face aux aléas littoraux se sont développées des mesures de lutte contre la mer, dès le Moyen-Âge « le barricadage de la côte est en route » et les « murs et épis se multiplient au tournant du XXe siècle et plus encore lorsque le tourisme entraîne le développement d'une urbanisation côtière inconsidérée » (Miossec, 1998). D'un côté se trouvent les mesures de défense contre la mer avec la mise en place d'ouvrages lourds (digues, épis) et de mesures plus souples de réparation des dégâts et de stabilisation du milieu (rechargement). D'un autre côté, les actions sur les enjeux et vulnérabilités participent surtout à minimiser l'endommagement potentiel sans pouvoir le supprimer.

⁶⁸ Le terme de protection est usité au sens large et ne se contente pas des mesures de protection au sens d'ouvrages lourds

L'ensemble de ces mesures doit composer avec le spectre du changement global ce qui complexifie d'autant plus encore la gestion. La première difficulté réside dans la prévision des conséquences sur les territoires littoraux en termes de récurrence de la tempétuosité et de prévision d'élévation du niveau marin tellement la dynamique littorale répond à une multitude de facteurs (Hénaff et al, 2013). La seconde tient à la prise en compte locale de telles prévisions agissant, majoritairement, de manière négative sur le développement local.

Même si les mesures de prévention tendent à se développer le constat de la gestion des risques montre la prédominance des ouvrages de défense tant du côté de l'affichage politique que des attentes des populations.

3. Pour une évaluation de la gestion des risques

Face à la demande sociale et aux attentes des populations et en tenant compte des mutations territoriales et sociales qui s'inscrivent dans la perspective du changement climatique, les politiques publiques et les mesures individuelles se doivent d'évoluer pour continuer d'être performantes ou au contraire améliorer leur performance.

Notre objectif consiste à évaluer la performance que nous définissons comme la combinaison de l'efficacité et de la pertinence. L'efficacité traduit l'adéquation entre les objectifs émis et les résultats obtenus ainsi que sa part de réalisation et dans quelles mesures ; tandis que la pertinence analyse la relation entre les objectifs et les attentes par un positionnement socio-économique (Deleau et Nioche, 1986). Les objectifs de gestion et de son évaluation se déterminent en fonction de l'identification et de la hiérarchisation des enjeux définis. Ce diagnostic des enjeux nécessite également une évaluation pour tous les types d'enjeux de la vulnérabilité matérielle (type de bâti...), fonctionnelle (état des réseaux...) et humaine (densité de populations, vécu...).

Cette méthode se veut transposable à d'autres territoires et aléas mais concerne ici principalement les mesures de prévention.

4. Côte d'Opale : les côtes basses meubles vulnérables et anthropisées

De nombreux territoires ont dû faire face aux tempêtes successives de la fin de l'année 2013, mais la commune de Oye-Plage⁶⁹ a particulièrement attiré notre attention par une initiative préventive des élus relayée par les médias. Nous avons donc cherché à savoir si la commune avait intégré une transmission et une mémoire des risques littoraux dans la gestion de son territoire.

4.1. Un territoire exposé aux tempêtes et submersions marines

La tempête « Xaver » est prévue le long de la côte d'Opale dans la nuit du 5 au 6 décembre 2013, où les départements du Nord et du Pas-de-Calais passent en vigilance orange « submersion marine ». Les coefficients de marées supérieurs à 100 et les vents forts (mais non exceptionnels) atteignant environ 60 km/h (Données Météo France) provoque une surcote de 4,75 m par rapport à l'IGN69 (marégraphe de Dunkerque) soit une récurrence légèrement supérieure à une période de retour

⁶⁹ Nous développerons d'autres exemples lors de la communication orale notamment sur la côte languedocienne.

centennale qui est de 4,70 m (Daubord, 2014). Les SDIS des deux départements renforcent les effectifs humains et la logistique matérielle sur l'ensemble du littoral sous l'influence de leurs homologues belges qui ont déjà procédé à des évacuations (Entretien SDIS 59, mars 2014). La municipalité de Oye-Plage recommande aux populations d'un quartier très exposé à la submersion marine de dormir hors de leurs habitations.

Cette commune de 5475 habitants (INSEE, RGP 2009) qui a pris son essor à la fin des années 1970 est située entre Dunkerque et Calais, le long du littoral côte d'Opale (fig. 1). Le site naturel du platier d'Oye qui s'étend sur le cordon dunaire est réglementé en réserve naturelle du platier d'Oye en 1987. Le centre urbain de la commune s'est développé à environ 1 km du rivage hormis le lotissement des « Escardines » (fig. 1) construit dans les années 1970 en arrière du cordon dunaire. Ce quartier bordé par la réserve naturelle présente certes des enjeux quantitativement faibles -144 habitations sur 2297 au total sur la commune (INSEE, RGP 2009)- mais très exposés aux risques littoraux. Des relevés de terrain nous ont permis de déterminer d'une part, la vulnérabilité du bâti celui-ci majoritairement de plain-pied donc particulièrement vulnérable en cas de submersion sans évacuation préalable et d'autre part, la vulnérabilité du réseau de communication en impasses (fig. 1). Début décembre 2013 à Oye-Plage, seul ce quartier des « Escardines » est concerné par l'alerte. La municipalité explique que *« c'est la première fois que nous sommes exposés à un risque de submersion marine »* (Nord Littoral, 06.12.2013). *« Si vous le pouvez, dormez à l'extérieur du lotissement (des Escardines) cette nuit », écrit la mairie dans un communiqué* » (Publication AFP, 05.12.2013). En fait le littoral de Oye-Plage a déjà subi des coups de mer mais ils n'étaient pas jusqu'alors dénommés ainsi. La tempête de 1953, « événement majeur (qui a fait des milliers de morts sur les côtes de la Mer du Nord) a provoqué une surcote marine de près de 2 mètres et inondé toute le secteur du Platier d'Oye » (Meur-Férec, 2006). Le lotissement n'est alors pas encore sorti de terre.

Après le passage de la tempête, le retour d'expérience est plutôt positif, aucune victime à déplorer, des dégâts relativement faibles et une situation plutôt bien gérée (Entretien SDIS 59, mars 2014).

4.2 Quid de la prévention en l'absence d'évènement majeur

Cette section propose une évaluation de l'efficacité des mesures de prévention du quartier des « Escardines » même si les mesures de protection lourdes restent privilégiées. En termes de gestion, la situation est « préoccupante et reflète l'absence de politique de prévention à long terme » (Meur-Férec, 2006). L'ensemble des mesures de prévention relevant des politiques publiques nationales est évalué en fonction de leur application et de leur performance à échelle locale.

4.2.1. La course aux PPR prioritaires, l'effet « Xynthia »

Le Plan de Prévention des Risques (institué en 1995), désormais bien identifié par les élus locaux, les gestionnaires et les populations, affiche le principal intérêt de la réglementation d'occupation des sols avec la prise en compte des aléas. Depuis le traumatisme de février 2010 sur la côte Atlantique, l'État a tenté de renforcer son image de gestionnaire et d'afficher de nouvelles actions avec le Plan de Submersions Rapides. Les procédures des PPR littoraux sont relancées. Les objectifs visent d'une part la réduction (voire l'arrêt) des constructions et l'augmentation des mesures d'adaptation. Dans la région Nord-Pas-de-Calais, 12 communes sont concernées par un PPR prioritaire dont Oye Plage.

La première limite réside dans l'absence de rétroaction des réglementations qui certes peuvent s'avérer performante pour réguler l'occupation des sols future mais reste lacunaire pour l'existant. L'édification des « Escardines » date des années 1970 bien avant la loi Littoral (1986) et la création de la réserve naturelle (1987). La zone habitée se situe dans la bande des 100 mètres rendue inconstructible par la loi de 1986 et la limite de la réserve naturelle a simplement contourné les habitations. Ainsi l'existant n'est simplement pas réglementé.

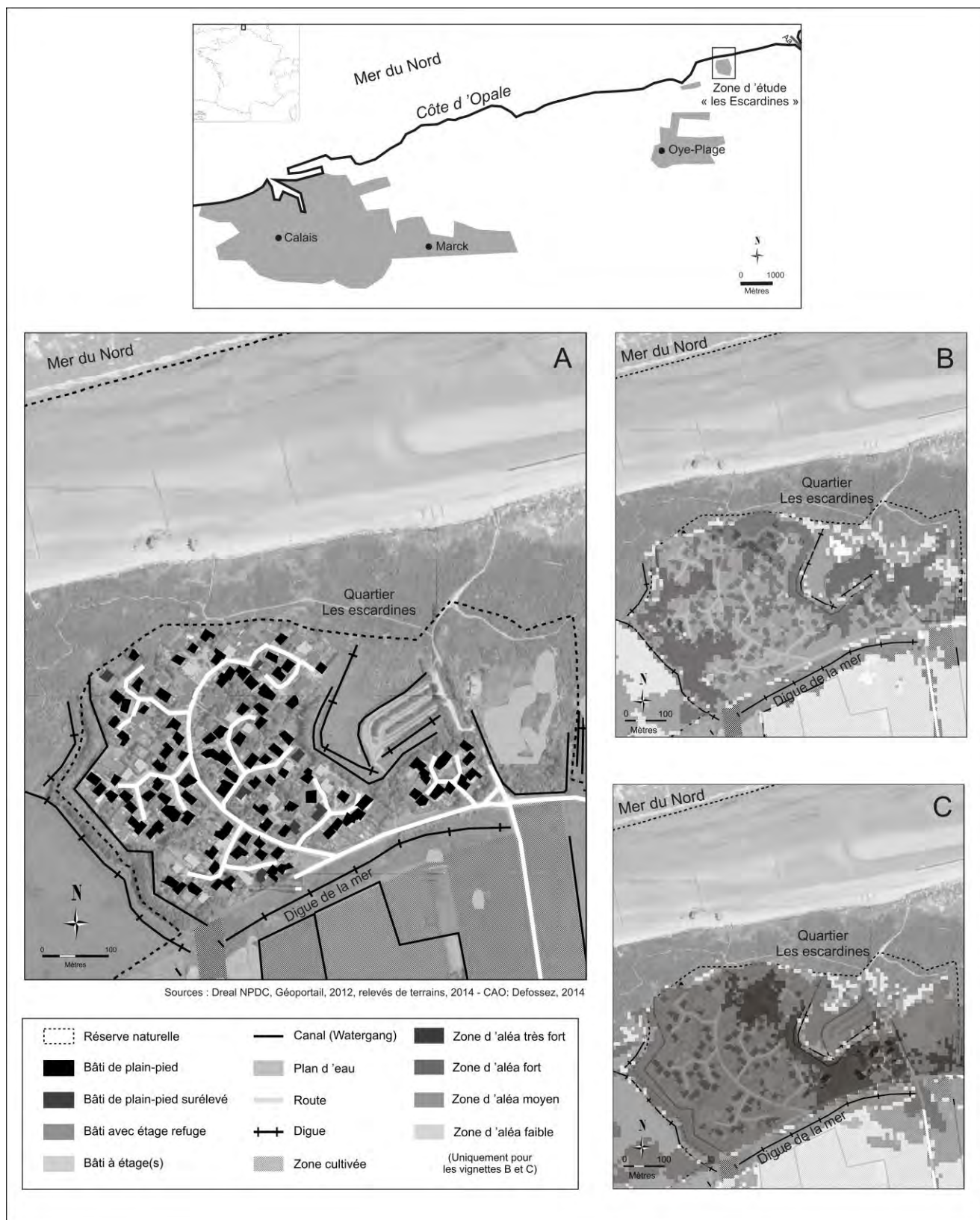


Figure 1. Localisation du site d'étude – A. Enjeux et vulnérabilités – B. Zonage de l'aléa actuel – C. Zonage de l'aléa à l'horizon 2100 avec prise en compte du changement climatique.

Le PPR est en cours d'approbation, il peut donc jusqu'à présent être jugé totalement inefficace puisque dans le quartier des « Escardines » cette mesure n'est pas à l'origine de l'arrêt du projet initial qui prévoyait une véritable station balnéaire. La pertinence de la mesure apparaît également peu probante. Plus de 16 ans après l'institution d'une mesure, celle-ci n'est pas appliquée, ce qui montre le peu de crédit ou la perception négative de la part des acteurs locaux. Le PPR est avant tout perçu comme une contrainte, nuisible au développement de la commune pour les élus et à la revente des biens pour les populations (Caumont et Fasquel, 2012). Les objectifs atteints ne correspondent donc pas aux objectifs attendus de la mesure PPR.

Mais l'État a lancé un nouveau programme en février 2011 : le Plan Submersions Rapides. Nous n'avons pas le recul nécessaire pour évaluer ce projet, cependant en analysant le contenu du document coordonné par le MEDDTL (2001), il s'agit de politiques publiques de gestion des risques déjà existantes sans actions novatrices si ce n'est d'inclure la prise en compte des aléas avec les perspectives de l'élévation du niveau de la mer (60 cm pour Oye-Plage) à l'horizon 2100 (DREAL 59/62, 2011). Le zonage de l'aléa est par conséquent devenu plus alarmant (fig. 1).

La réglementation de l'occupation des sols ne peut à elle seule être performante face au risque, notamment en ce qui concerne l'existant. Il paraît ainsi indispensable dans l'objectif de sauver les vies humaines d'organiser au mieux la gestion de crise.

4.2.2. Une prise en compte locale des risques : la préparation à la gestion de crise

Les outils de préparation et de gestion de crise se situent à plusieurs échelles et entre plusieurs acteurs : la préfecture, les services de secours (SDIS) et les communes. Le quartier étudié présente une vulnérabilité fonctionnelle élevée étant donné la configuration des lieux. Une route en impasse à laquelle s'agglomèrent plusieurs ruelles, elles aussi en impasses, constitue le réseau d'évacuation par la route. La géographie des lieux accentue cette vulnérabilité, en effet, le lotissement se situe dans une cuvette entre le cordon dunaire au nord et la digue de la Mer au sud (fig. 1). Selon les études portant sur l'aléa submersion marine (DREAL 59/62, 2011), la submersion ou la rupture du cordon dunaire qui fait office de protection naturelle aux habitations laisserait 15 minutes pour l'évacuation des 144 foyers du lotissement. Évidemment le temps d'évacuation dépasse ces 15 minutes. Il est donc nécessaire d'organiser au préalable une évacuation anticipée par l'intermédiaire du Plan Communal de Sauvegarde. Lors de la tempête de début décembre 2013, la municipalité recommande aux habitants des « Escardines » de loger hors de leurs habitations, le Plan Communal de Sauvegarde est prêt mais pas déclenché. La commune restera en alerte orange « submersion marine » et ne nécessite pas, selon les services de prévision et de secours d'être évacuée. La performance de la mesure reste difficile à évaluer étant donné l'absence d'application lors de l'évènement mais l'existence d'un PCS dans la commune offre une solution adaptée (de nombreuses communes à risque restent encore sans aucun plan de secours). Les recommandations de la mairie n'ont-elles pas sensibilisé les habitants des « Escardines », en effet seuls trois foyers avaient prévu de ne pas passer la nuit chez eux et aucune personne ne s'est rendue à la salle communale mise à la disposition des habitants (La Voix du Nord, 06.12.2013). Là encore le constat de la performance reste mitigé.

La difficulté dans l'application des recommandations d'évacuation réside, pour ce territoire, dans l'absence d'évènements marquants qui a marqué les esprits.

4.2.3. L'absence d'évènements marquants liée à l'absence d'information préventive

La constatation d'une absence de conscience et de connaissance du risque concerne la commune de Oye-Plage (Caumont et Fasquel, 2012) et s'étend de manière générale au littoral Côte d'Opale (selon l'entretien mené auprès du SDIS 59, mars 2014). La tempête de 1953 reste dans les esprits en Belgique et aux Pays-Bas mais s'est étiolée de la mémoire des populations du Nord-Pas-de-Calais, il n'y a pas eu de transmission intergénérationnelle. Pour cet évènement et d'autres (1976 ou 2013), les dommages s'avèrent relativement faibles sans victime à déplorer. Finalement l'ampleur des dommages potentiels ne s'est jamais matérialisée, annihilant la conscience du risque. Il n'existe

aucune prise en compte du risque dans les décisions d'aménagement, ni par les populations voire par les services de secours et de crise⁷⁰. Cette absence d'évènement se ressent sur l'évaluation de la performance de l'information préventive.

Le récent Dossier Départemental des Risques Majeurs⁷¹ du Nord-Pas-de-Calais (2012) apporte de nombreuses informations générales sur les risques littoraux mais sans jamais localiser les aléas ou spécifier l'ampleur des phénomènes sur des territoires précis. Aussi la performance paraît ici limitée en matière d'information territorialisée. Il s'agit donc de s'informer ou d'être informé (car là réside le problème) par des documents communaux comme le Document d'Information Communale sur les Risques Majeurs, le Document Communal Synthétique ou l'Information Acqureur Locataire. La première limite énoncée ici concerne l'accès à l'information ; certes l'information se trouve de plus en plus disponible sur internet mais encore faut-il que le futur acqureur ou locataire ait une connaissance ou une conscience *a minima* que le territoire soit soumis à un risque et que l'information soit disponible. Pour la commune de Oye-Plage, aucun DICRIM ou DCS n'est accessible via internet et les demandes auprès de la municipalité sont restées sans réponses. L'Information Acqureur Locataire rendue obligatoire depuis le 1^{er} juin 2006 (initié par la loi Bachelot de 2003) apparaît comme la seule information concernant les risques littoraux sur la commune. Disponible sur internet (arrêté mis à jour en 2011), il concerne « l'inondation par submersion marine et érosion du trait de côte » et doit être remis à tout acqureur ou locataire d'une zone à risque. Mais là encore l'information n'est pas spatialisée, difficile alors de connaître la position de son logement en zone à risque. Tous ces freins à l'accès à l'information pèsent sur l'absence de conscience du risque et exposent les populations aux conséquences des phénomènes naturels.

La performance de l'information préventive sur la commune de Oye-Plage reste insatisfaisante. Cependant les objectifs de conscience du risque pourraient être atteints. En effet, selon une enquête menée par le CETE Nord Picardie, la diffusion de l'information via internet freine la vente de maisons du lotissement (Caumont et Fasquel, 2012). Mais l'effet pervers apparaît immédiat pour les habitants des « Escardines » qui ont conscience du risque qu'ils résident dès lors dans des maisons invendables.

L'endommagement lié à la tempête « Xaver » sur la Côte d'Opale s'est avéré relativement faible mais on ne peut affirmer que les politiques publiques soient à l'origine de l'atténuation des dommages. En effet, selon les retours d'expérience du SDIS les phénomènes naturels n'avaient pas de caractère exceptionnel et les secours mis en place ont donc été suffisant. Là encore cet évènement n'aura pas marqué les esprits ni alimenté une conscience du risque.

5. Conclusion

L'évaluation menée sur une portion de territoire montre toute la difficulté d'application des mesures de prévention et le long cheminement vers la performance. Et « tout le monde s'accorde sur le fait que la gestion côtière va bien au-delà de la simple application de solutions techniques en réponse à des problèmes techniques » (Henocque, 2006). Reste à impliquer les acteurs du risque vers une gestion ou plutôt une adaptation face au risque et au changement global. *In fine*, la gestion des risques naturels n'entre probablement pas dans les préoccupations quotidiennes des territoires exposés même si les attentes en matière de réduction des victimes et de l'endommagement restent prégnantes. Les mesures globales ne paraissent pas adaptées aux contextes locaux et l'absence des objectifs de prévention rendent la gestion trop superficielle.

⁷⁰ Nous avons mené une cinquantaine d'entretiens informels avec le personnel du SDIS 59 et les populations.

⁷¹ Le DDRM de décembre 2004 ne mentionne pas le risque submersion marine

Bibliographie et références

- Anziani A. (2010). *Xynthia : les leçons d'une catastrophe*. Rapport d'information n° 554 (2009-2010), sur les conséquences de la tempête Xynthia, déposé le 10 juin 2010, 132 p.
- Bawedin V. (2013). L'acceptation de l'élément marin dans la gestion du trait de côte : une nouvelle gouvernance face au risque de submersion ? Les cas du Lincolnshire, de l'Essex (Angleterre), du littoral picard et du bassin d'Arcachon (France), *Annales de géographie*, 2013/4 n° 692, p. 422-444.
- Caumont V., Fasquel F. (2012). *Risque de submersion marine et marchés fonciers et immobiliers sur le littoral du Nord-Pas-de-Calais. Phase 1 : Approche qualitative des marchés et exemples d'adaptation*, CETE Nord-Picardie, 33 p.
- Daubord C. (2014). *Caractérisation de 7 évènements de tempête de l'automne-hiver 2013 – 2014*, Rapport du SHOM, n°01-2014, 37 p.
- Deleau M., Nioche J.P. (1986). *Evaluer les politiques publiques : méthodes, déontologie, organisation*, Rapport pour le Commissariat Général du Plan, la Documentation Française, Paris, 180 p.
- DREAL 59/62, SR/DRNHM (2011). *Détermination de l'alea de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique en région Nord – Pas-de-Calais*, Etape 2-2 : Modélisation des aléas littoraux actuels et à l'horizon 2100, 388 p.
- Hénaff A., Meur-Férec C., Lageat Y. (2013). *Changement climatique et dynamique géomorphologique des côtes bretonnes. Leçons pour une gestion responsable de l'imbrication des échelles spatio-temporelles*, CybergeO : European Journal of Geography [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 654, mis en ligne le 27 septembre 2013, consulté le 17 février 2014. URL : <http://cybergeO.revues.org/26058> ; DOI : 10.4000/cybergeO.26058
- Henocque Y., (2006). *Leçons et futur de la gestion intégrée des zones côtières dans le monde*, VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 7 Numéro 3 | décembre 2006, mis en ligne le 21 décembre 2006, consulté le 12 décembre 2012. URL : <http://vertigo.revues.org/2490> ; DOI : 10.4000/vertigo.2490
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (coord.). (2011), *Plan submersions rapides – Submersions marines, crues soudaines et ruptures de digues*, 80 p.
- Meur-Férec C. (2006) *Essai inédit de la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral : un itinéraire de géographe*, Document présenté en vue de l'Habilitation à Diriger des Recherches, vol 1, Université de Nantes, 247 p.
- Meur-Férec C., Morel V. (2004). L'érosion sur la frange côtière : un exemple de gestion des risques, *Natures Sciences Sociétés*, 2004/3 Vol. 12, p. 263-273.
- Miossec A. (1998). Les sociétés face à l'élévation contemporaine du niveau de la mer, *Annales de Géographie*, t. 107, n°600. pp. 201-219.
- Journal « Nord Littoral », édition du 06.12.2013
- Journal « La voix du Nord », édition du 06.12.2013
- Publication « AFP » du 05.12.2013

How to establish operational recommendations to manage sea flooding risk on a reclaimed coast?

Should the inner shore of the Arcachon Bay (Gironde, France) be depolderised or should the dykes be maintained?

Lydie Goeldner-Gianella¹, Frédéric Bertrand²

1. Géographie, UMR 8586 PRODIG, Université Paris 1.

191 rue Saint Jacques 75 005 PARIS.

Lydie.Goeldner@univ-paris1.fr

2. Géographie, UMR 8586 PRODIG, Université Paris 4.

191 rue Saint Jacques 75 005 PARIS.

frederic.bertrand@paris-sorbonne.fr

ABSTRACT. The BARCASUB program dealt with coastal flooding risk in the Arcachon Bay (France) and with the possible management of this risk through a soft defense measure: "de-polderisation". The article doesn't describe the whole aspects of the program. It only presents the operational methodology developed to establish proposals of flooding risk management, such as de-polderisation in particular, compared to doing nothing, conserving the dikes or reinforcing them. We detail the steps that we have followed: establishing firstly a gradient of eligibility for depolderisation between the management units of the studied polders (2) and doing then, for the most eligible sectors, a cost-benefit analysis of each possible method of flooding risk management (3), in order to obtain distinguished management recommendations for each polder (4). This methodology seems reproducible, provided a strong interdisciplinary work is conducted to obtain both physical and social data or quantitative and qualitative data, all needed for the evaluation.

RESUME. Le programme BARCASUB a porté sur le risque de submersion marine à l'intérieur du bassin d'Arcachon (France) et sur la gestion potentielle de ce risque par une mesure souple de défense : la "dépolddérisation". La communication n'évoque pas la totalité des aspects traités dans le programme, mais expose la méthode opérationnelle que nous avons développée pour établir des préconisations de gestion du risque de submersion passant en particulier par la dépolddérisation, que nous avons comparée au laisser-faire, à la conservation des digues ou à leur rehaussement. Nous détaillons les étapes que nous avons suivies : établissement d'un gradient d'éligibilité à la dépolddérisation entre les casiers des polders étudiés (2) et analyse coûts/avantages de chaque mode possible de gestion du risque pour les casiers les plus éligibles (3), afin d'aboutir à des préconisations différenciées de gestion selon les polders étudiés (4). Cette méthodologie paraît reproductible, à condition de travailler en forte interdisciplinarité pour obtenir des informations tant physiques et sociales que quantitatives et qualitatives, toutes nécessaires à l'évaluation.

KEYWORDS: risk management, marine flooding, de-polderisation, assessment, issues, exposure, costs.

MOTS-CLES : gestion du risque, submersion marine, dépolddérisation, évaluation, enjeux, exposition, coûts.

1. Introduction

The BARCASUB Research Programme (2010-13) dealt with the risk of sea-flooding in the Arcachon Bay (France) and potential management of this risk through use of the "depolderisation" technique (Bertrand and Goeldner-Gianella, 2013). This project brought five teams together – the research laboratories PRODIG, LGP, EPOC, the BRGM and the EA PRISM – and four local managers or stakeholders. Traditionally in France, the risk management techniques and sea-flooding prevention have consisted of heavy defences taking the form of embankments or reinforcement of the dykes that protect the polders. There is another, more flexible, method of risk management consisting in reopening the polders to the sea, by using locks or creating breaches in the dykes, or even dismantling a dyke. This depolderisation generally translates in the rapid restoration of saltmarsh, through the effects of sedimentation. In North America, as well as in north-western Europe, such natural environments are perceived ever more frequently as infrastructure in terms of defence against sea incursion (French, 2006) and of adaptation to climate change. Increased attention is thus being paid to these saltmarshes, their extent and plant density being positive related to the attenuation of the energy of the swell and height of the waves, as well as with the stabilisation of the coastline (Shepard *et al.*, 2011). It should therefore be possible, where the saltmarsh is sufficiently extensive, to limit the build-up of dykes. This solution should be of great economic interest in the context of climate change, as the British have well understood (Goeldner-Gianella, 2013).

If depolderisation is not mentioned or implemented to any great extent in France, the current scientific and political context would seem to be increasingly favourable to its implementation. Consequently, BARCASUB was created following a consultation launched nationally by the Conservatoire du littoral at the beginning of the twenty-first century concerning the adaptation of its properties to climate change. It was storm Xynthia that highlighted the dangers of sea flooding in France and this translated into the publication of a *national coastline management strategy* (2012) that evoked the mobility of the coastline and more flexible management techniques, such as the restoration of the ecosystems. This strategy is also the basis for experimentation with strategic withdrawal at pilot sites. Finally, these events promoted the development of an operational debate about depolderisation, especially along the coastline of the reclaimed *Bas-Champs* of Picardy (Bawedin, 2013). At regional level, the authorities in Aquitaine (such as the "GIP Littoral aquitain") who are very aware of the coastal risks, launched a *regional management strategy for the coastal strip* and are participating in the national strategic withdrawal experiment. Finally, on a local level, the Arcachon Bay has been hit in recent years by numerous storms, resulting of accidental depolderisations. The owner of the sites affected, the Conservatoire du littoral, is interested in this innovative management method since it finds itself having to deal with the increasing costs of dyke maintenance (Clus-Auby *et al.*, 2006). Finally the current context of having to establish the first local sea-flooding risk prevention plans around the Arcachon Bay has proved very sensitive.

The BARCASUB project team wondered whether it were physically possible to use depolderisation as a risk management method to prevent sea flooding in Arcachon Bay and whether this would be considered socially acceptable and economically advantageous. Our paper will not discuss all of the aspects dealt with under this programme – such as an assessment of the local sea-flooding hazard and the inland expansion of submersions, the role played by a depolderised marsh ecosystem in attenuating the risk of sea flooding and social protest against sea-flooding and depolderisation (see Goeldner-Gianella *et al.*, 2013). We shall discuss here the operational method we developed to make recommendations for managing the risk of flooding from the sea, in combination with possible depolderisation. The method was devised for three polders on the south-eastern shore of the Arcachon Bay (Certes, Graveyron, Malprat) which were originally built in the eighteenth century for fish-farming purposes. The Conservatoire du Littoral acquired these polders starting from 1984, to preserve their natural and cultural heritage and open them to the public. The cost of repairing the dykes as a result of the storms and flooding in 1999, 2009 (Klaus) and 2010 (Xynthia) exceeded €700,000 (Bertrand and Goeldner-Gianella, 2013) and could further increase in the future due to

increased submersion of these polders (Anselme *et al.*, 2008). Consequently, the Conservatoire has contemplated whether to allow the sea to flood some of the polders, or at least to stop maintaining some of the dykes. Thus, it recently abandoned to the sea the "Pointes" of the polders of Graveyron and Malprat that had accidentally been breached. The method presented here concerns the three above-mentioned polders, which are broken down into internal "basins" ringed by low dykes or channels and edged by dykes of soil widely seeded with ripraps and sometimes separated from the sea by a saltmarsh dotted with hunting lakes (figures 1 and 2).

2. Establishing a scale of eligibility for depolderisation in view of the risk of sea-flooding

In order to establish management recommendations for the three polders in question, we initially constructed a scale of eligibility for depolderisation in view of the flooding risk to the internal "management units" for these polders (units determined in the polder management plans). A dual assessment – that of the factors involved in exposure to sea-flooding hazard (2.1) and that of the issues constituted by each polder (2.2.) – made it possible to create this scale (2.3).

2.1. Assessing the factors of exposure to sea-flooding hazard and the degree of exposure of management units

In assessing the factors of exposure to sea-flooding hazard that would involve damaging the polders and their management units, we took into account the natural sea defence infrastructure, i.e., the saltmarshes alongside the dykes, as well as the condition of the artificial defence infrastructure, i.e. the condition of the dykes themselves, and finally the topography of the basins in relation to their degree of submergibility. Based on very carefully spatialised information scaled to the size of the management units or sections of dykes, we assessed the respective importance of the mentioned exposure factors: factor absent or only faintly present (marked 0), with an average presence (marked 1) or strongly present (marked 2).

The first damage factor, by order of intervention in the course of flooding, concerns the condition of the saltmarsh in view of the generalised morphological disintegration, largely due to the creation of the hunting lakes. Two indicators made it possible to define the condition of the saltmarsh and the degree of anthropic pressure exercised on this environment, despite the regulation of hunting in the marine public domain: the relative area of the hunting-lakes in proportion to the total area of the saltmarsh – reduced to the linear measurement of the frontal dyke for each unit – and the speed at which the edge of the saltmarsh retracted between 2000 and 2009 also compared with the adjacent management unit. The second factor involved in the progress of flooding – through overflowing, rising higher than or breaching the dykes – was their state of repair. Irregular maintenance of sea dykes in fact explains why the crest of the dykes are all built to different heights, as is shown by topographical elevations and LIDAR data. Such irregularities can produce increased effect of overflow at the lowest points of each crest, thus favouring the acceleration of waves crashing against the inner side of the dyke and the tearing out of entire sections of dyke, which in itself is liable to breaching, especially in sections that are susceptible to external erosion. The state of the dykes was thus differentiated on the basis of the average height of the sections of each unit. The last factor to be considered is the topography of the management units on which flooding is propagated. The conversion to MNT of the LIDAR data makes it possible to determine the height reached by the potential flooding, resulting from the propagation of the tidal wave that moves closer and closer to the inside of the polders as the water levels reach 4.69 m IGN - an extreme water level combined with wave and wind conditions of storm Klaus and a tide with a coefficient of 95 taking account of a sea level of +0.25 cm based on the worst case scenario adopted by the ONERC in 2030.

The addition of the three exposure factors provides, for each management unit, a degree of exposure to submersion, whether it be slight (marked between 0 and 2), average (3 or 4) or high (5)

or 6). The sectors the most exposed to submersion can thus be found in the parts downstream of the polders, especially at their Pointes corresponding to Branne and Brèche units (fig. 1).

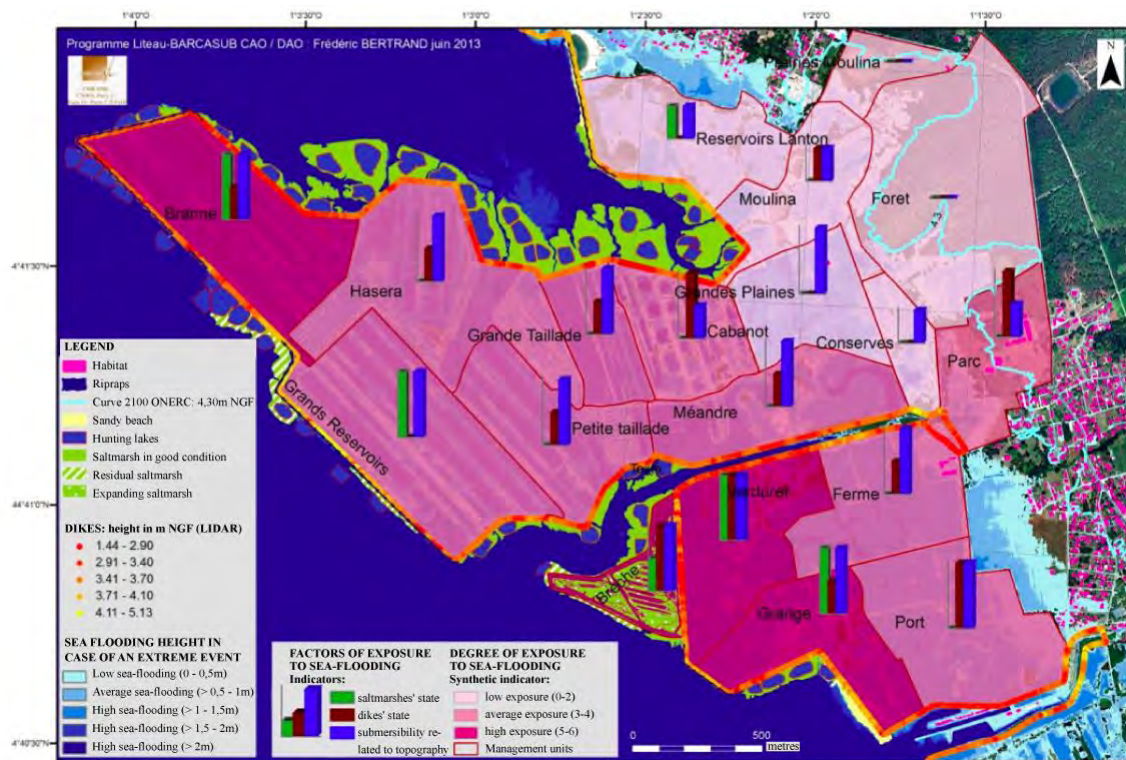


Figure 1. Factors and degrees of exposure to flooding hazard in the polders of Certes and Graveyron

2.2. Assessment of the issues present in the polders and their extent per management unit

In a second stage, an assessment of the issues present in the three polders was operated on the basis of distribution into major categories, namely, the production factors (inland fishing and cattle-rearing), recreational facilities (hunting from a hide, rambling on the dykes) and heritage sites (flora and bird life, sites of outstanding natural beauty). In the case of Malprat, there is also an environmental health factor involving the control of mosquitoes that can be added to the previous three factors. This assessment is based on different sources, such as interviews with the operators, counting the number of walkers, making an inventory of hunting grounds, data for the management plans, etc.). Certain factors are absent from the polders, but are present on the dykes or in their vicinity and have been associated with adjacent management unit. For instance, hunting and walking have been associated with the neighbouring units since these activities can rely or affect the dykes. Based on carefully spatialised information in relation to the management units or sections of dyke, we assessed the respective importance of each issue, using the same notation principles as previously (from 0 to 2). After adding up these marks, each management unit achieved a set of factors considered to be low (a mark of < 4), average (a mark of 4 to 6) or high (a mark higher than or equal to 7). Here again, the strongest factors were concentrated in the parts below the polders, especially the Branne and Brèche Pointes (figure 2).

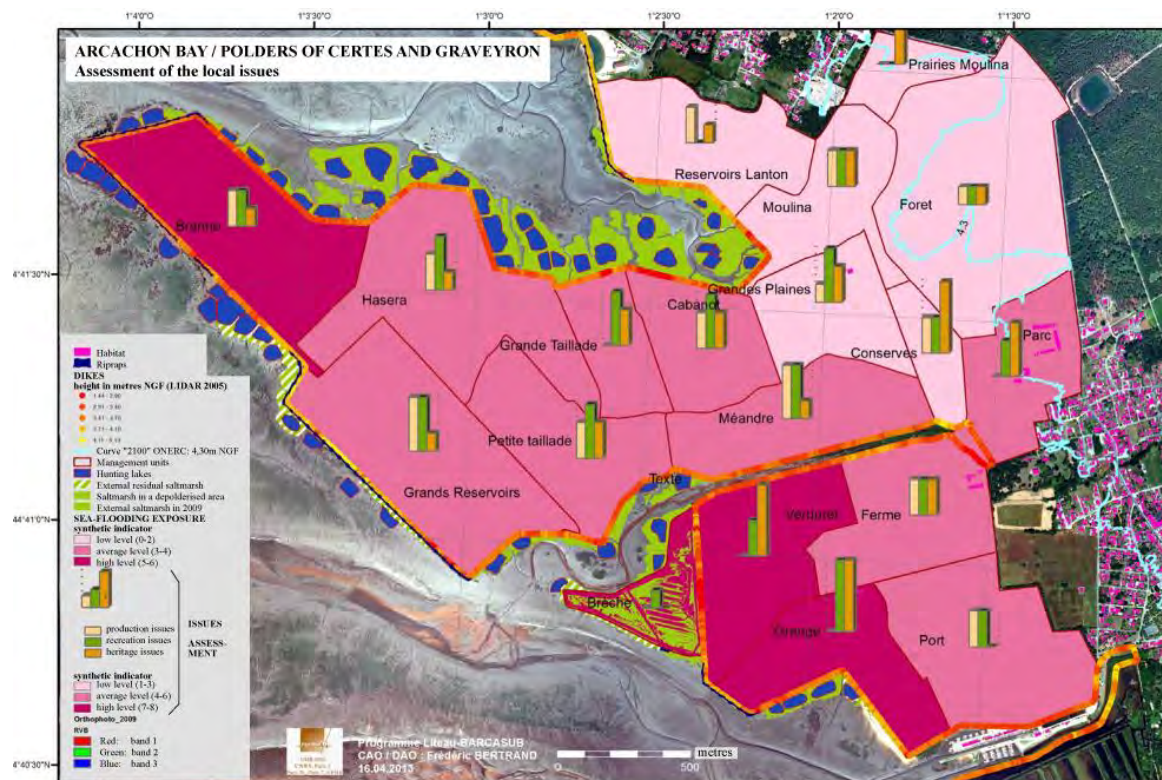


Figure 2. Types and extent of the issues exposed to a sea-flooding risk at Certes and Graveyron

2.3. Establishing an eligibility scale for depolderisation to deal with the risk of sea-flooding

The eligibility scale for depolderisation was obtained by cross-matching the results from this dual assessment, applying an algebraic sum and subtracting for each management unit the total value allocated to the issues in the total value assigned to the exposure to hazard, in such a way as to obtain a scale of "eligibility for depolderisation" (marked from -17 to +4). We consider a management unit to be more eligible for depolderisation if its exposure to hazard exceeds the value of the issues present. Positive values or those slightly less than 0 thus translate into high eligibility, since they represent greater risks or lesser issues. The Brèche unit at Graveyron is a case in point, since the exposure is considerable and the risk issues are low due to an accidental opening to the sea that has been there for many years. The Grandes Plaines unit at Certes, on the other hand, illustrates a situation in which the exposure is less than the scope of the issues (which are heritage-based and above all recreational) and thus the unit would appear on the face of it to be less eligible. This eligibility scale for depolderisation has helped us to find basins which deserve a cost-benefit analysis that is more detailed of all the possible risk management scenarios.

3. Creating a cost-benefit analysis for management units eligible for depolderisation

In the case of the management units that are most eligible for depolderisation, a cost-benefit analysis was performed, taking account of the costs of all the possible risk management methods for these units (3.1.), the way in which the issues developed depending on the method chosen (3.2.) and the potential for reconstituting a saltmarsh if the site were to be depolderised (3.3.).

3.1. Costs of the various risk management methods with or without depolderisation

An assessment of the cost of the various risk management methods has been difficult to conduct, due particularly to the fact that there is extreme variability in the cost of ripraps which depends on both their availability (changing according to the weather or economic circumstances) and their quality. The results obtained for Arcachon Bay circa. 2010 are therefore hard to use for generalisation purposes. The dykes should be built up by one metre at Malprat and by 1.30 m at Certes and Graveyron to reach a height of 4.70 m which would be only slightly higher than the highest water level of flooding by 2030 as defined above. The cost of dyke reinforcement would be less than that of heightening them, not necessarily in linear metres but due to the generalisation of the extension process which would also involve changing the level of thirty or so tidal gates. Depolderisation of a management unit – which at first sight might appear to be less costly – would only really be cheaper on condition that it would not be necessary to build an additional rear protective dyke for the other management units. Furthermore, depolderisation using gates would be more costly than depolderisation through creating a breach without riprap. The costs need to be estimated case by case however, depending on the configuration of the defence system chosen and the length of the front and rear dykes to be repaired, heightened or built.

3.2. Changes to the issues involved, especially in cases of depolderisation

The changes in issues based on the management methods chosen also deserve to be examined. Certain activities appeared to us to be better suited to depolderisation than others, such as walking, for which one can imagine maintaining footbridges installed over the breaches, or hunting for which the cabins and the lakes could be moved – an option currently studied in the Bas-Champs of Picardy. While certain factors will inevitably change in the case of depolderisation (decline of inland fishing and heritage factors), animal husbandry would be transformable without great loss of value. To move from cattle grazing on wet meadows to sheep rearing on saltmarshes would be conceivable and viable as far as the farmers of today are concerned as long as a herd of 60 cows and a flock of about 100 ewes could be kept. At high tide, the sheep would shelter on the higher ground of the saltmarsh and in the case of flooding they would be sheltered by the polders.

3.3. Assessment of the potential for the reconstitution of a saltmarsh in a case of depolderisation

The choice of a submersion management method also depends on the effective potential for reconstituting the saltmarsh. In order to establish this potential for the recolonisation by vegetation of a depolderised area, F. Bertrand used as the basis, the follow-up performed since 2003 in the sectors that were accidentally depolderised, in such a way as to determine the current ecological gradient of the expanding saltmarsh. The lower limit adopted is that of the continuous plant ground cover in which cover with vegetation exceeds 75%, corresponding to the lower limit of a saltmarsh that is firmly established. The upper limit is that of the limit of the plant growth in the highest part of the saltmarsh. When these values – which are different for each polder – are known, it will be possible to determine the extent of the area that could be recovered by a saltmarsh in a case of depolderisation. The results thus show a strong potential for a saltmarsh reconstitution of virtually the entire areas of these three polders.

4. Proposals for Arcachon Bay and conditions for reproduction

The taking account of the financial (3.1), socio-economic (3.2) and bio-geographical (3.3) criteria has made it possible to arrive at the creation of ten operational datasheets combining the results for management units that would initially appear to be eligible for depolderisation, and resulting in recommendations. BARCASUB will deliver its various recommendations for each polder (4.1). We also consider this operational methodology to be reproducible under certain conditions (4.2).

4.1. Differentiated recommendations for the three polders

At the conclusion of this analysis, we should like to discuss the best management options proposed for each polder. At Certes, due to the cost, which would be lower than the current cost of maintaining the dykes, depolderisation by creating an unstabilised breach at Branne Pointe, with the construction of a short rear dyke, would seem to be the most desirable solution. This would have little impact overall on the current issues (hunting, walking, animal husbandry) and would deal with the high exposure to sea-flooding hazard.

DATASHEET 6 : CERTES Units 6, 19 : "Branne" and "Grands réservoirs"	Management objectives : 1, 2, 3 1. To respect the local issues' plurality /2. To conserve natural heritage /3. To favour public reception.
Proposed dykes' management method(s): - Proposal F1 : depolderisation of the Branne unit through an unstabilised breach in the northern-eastern dyke of the unit and construction of a new inner dyke (length 590 m ; height 3,50 m) to protect the rest of Certes. - Proposal F2 : depolderisation of the Grands Réservoirs' management unit through an unstabilised breach in the southern dyke of the unit and construction of a new inland dyke (length 1537 m; height 3,50 m).  BARCASUB programme / Liteau. Proposals: L. Goeldner & F. Bertrand	"Costs": (all prices are exclusive VAT and back to 2010) - F1: 364.000 € - F2: 922.200 € => higher than the maintenance's cost of the Grands réservoirs' sea dyke (length 414 m + 1160 m of ripraps; 530.200 €). - Losses of a freshwater marsh with many birds (obj. 2) and of large areas for breeding (obj. 1). "Advantages": (all prices are exclusive VAT and back to 2010) - F1 cost is lower than the maintenance's cost of the Branne's sea dyke (length 765 m + 1735 m of ripraps : 836.750 €) - F1-F2: the restoration of a large saltmarsh eventually located behind a ruined dyke would help to maintain coastal hunting - in difficulty on the western side of Certes (obj. 1). - F1-F2 : removing the walking possibilities on a new inner dyke would barely change the observable coastal landscape and would profitably shorten the long tour of Certes (obj.3). - F1-F2: the saltmarsh recovery potential is high (see attached figure) and the loss of a freshwater marsh would be compensated by the restoration of a saltmarsh (obj. 2). Final recommendation: to depolderise the Branne unit only, to maintain fishery, breeding and birds in Grands réservoirs.

Figure 3. Example of the operational datasheet proposed for the western part of the Certes polder

While depolderisation by means of a tidal gate, being considered for the Grandes Plaines unit, seems expensive to us in view of the complete absence of impact due to hazard exposure (fig. 1), it could nevertheless be contemplated in the context of the extension of the recent reopening of the Cabanot unit, which in this case involves objectives that are not defensive but solely ecological. At Graveyron, due to the high cost of depolderisation and the extent of the issues to be preserved on and at the foot of the dykes (walking and hunting), we merely propose retaining the current breach (which equates with accepting the accidental depolderisation of the Brèche unit), without additional reinforcement of the rear dyke but with preservation of the ruined dykes and the high plants present in this recolonised area (*Tamaris*, *Baccharis*). At Malprat, considering the average level of issues other than those related to hunting and the proven potential for plant recolonisation, depolderisation by an accidental break of the two rear units would appear to be a desirable extension of the accidental depolderisation that has already occurred for the Pointe.

4.2. Scientific and operational conditions of reproducibility of the assessment

This operational methodology, described in greater detail in the final report of the BARCASUB project (Bertrand and Goeldner-Gianella, 2013) would appear to be replicable on condition that the information was necessary for performing successive assessments relative to the levels of submersion and their modelling, the state of the natural and artificial infrastructures, the local cost of

dyke construction and maintenance, knowledge of the current issues and the potential changes to the restored saltmarshes. This information was first acquired by BARCASUB through fruitful cooperation between scientists and managers, as well as between exact sciences and humanities.

Acknowledgements: *We thank our partners for their financial support (MEDDE - Liteau), Conseil Général de Gironde, Conseil Régional d'Aquitaine) as well as the Conservatoire du littoral and the SIBA.*

References

- Anselme B., Durand P., Goeldner-Gianella L., Bertrand F. (2008). Impacts de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un marais maritime endigué (bassin d'Arcachon, France). *VertigO*, vol. 8/1254.
- Bawedin V. (2013). L'acceptation de l'élément marin dans la gestion du trait de côte : une nouvelle gouvernance face au risque de submersion ? *Annales de géographie*, vol. 692, p. 422-444.
- Bertrand F., Goeldner-Gianella L. (2013). *BARCASUB. La submersion marine et ses impacts environnementaux et sociaux dans le Bassin d'Arcachon (France) : est-il possible, acceptable et avantageux de gérer ce risque par la dépollérisation ?* Rapport final pour le programme Liteau, juillet 2013, 198 p.
- Clus-Auby C., Paskoff R., Verger F. (2006). Le patrimoine foncier du Conservatoire du littoral et le climatique: scénarios d'évolution par érosion et submersion. *Annales de géographie*, vol. 648, p. 115-132.
- French P.W. (2006). Managed realignment – the developing story of a comparatively new approach to soft engineering. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n° 67, p. 409-423.
- Goeldner-Gianella L. (2013). *Dépollériser en Europe occidentale. Pour une géographie et une gestion intégrées du littoral*, Publications de la Sorbonne, Paris, 350 p.
- Goeldner-Gianella L., Bertrand F., Pratlong F., Gauthier-Gaillard S. (2013). Submersion marine et dépollérisation: le poids des représentations sociales et des pratiques locales dans la gestion du risque littoral. *Espace, Populations, Sociétés*, vol. 1-2, p. 193-209.
- Shepard C.C., Crain C.M. & Beck M.W. (2011). The Protective Role of Coastal Marshes: A Systematic Review and Meta-analysis, <http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0027374>.

Quelle gouvernance des risques littoraux aux îles Loyauté (Nouvelle-Calédonie), dans le cadre du réchauffement climatique ?

Matthieu Le Duff¹, Pascal Dumas², Michel Allenbach³

1. Laboratoires EA 3325 PPME - EA 4242 CNEP, Université de la Nouvelle-Calédonie,
BP R4 – 98851 Nouméa Cedex.
matthieu.leduff@yahoo.fr

2. Laboratoire EA 4242 CNEP, Université de la Nouvelle-Calédonie,
BP R4 - 98851 Nouméa Cedex.
pascal.dumas@univ-nc.nc

3. Laboratoire EA 3325 PPME, Université de la Nouvelle-Calédonie,
BP R4 - 98851 Nouméa Cedex.
michel.allenbach@univ-nc.nc

RESUMÉ : Cette communication a pour objet de présenter le projet de thèse sur lequel nous venons de nous engager. Il s'agit ici de présenter notre terrain d'étude et les principaux éléments structurant notre réflexion ainsi que nos orientations en termes de méthodologies. Une analyse plus détaillée du risque tsunami sur les côtes des îles Loyauté est présentée en guise de résultat afin que l'on prenne toute la mesure des implications territoriales de cet aléa. Nous concluons en revenant sur l'intérêt de notre démarche dans le contexte insulaire océanien.

ABSTRACT: The object of this paper is to present our thesis project on which we have just undertaken. After the description of our land studies and the main elements structuring our reflection as well as our methodology orientation, an analysis more detailed by the tsunami risk on the loyalty island coast is presented in order to understand the territorial implication of this risk on the New Caledonian coast. We shall end by returning on the interest of our method in the Oceanian island context.

MOTS CLÉS: Nouvelle-Calédonie, littoral, risques naturels, savoirs traditionnels, tsunamis, SIG.

KEYWORDS: New-Caledonia, natural hazards, traditional knowledge, tsunamis, SIG

1. Introduction

1.1. Localisation et caractéristiques géo-climatiques de notre terrain d'étude

Les îles Loyauté (Lifou, Tige, Maré et Ouvéa) se situent à une centaine de kilomètres au vent de la Grande-Terre⁷², selon un axe parallèle à celle-ci, orienté nord-ouest / sud-est. Ces îles sont des atolls coralliens soulevés, qui se caractérisent par un profil général relativement plat avec des falaises côtières plus importantes marquant les limites d'anciennes constructions récifales aujourd'hui exondées. Celles-ci soulignent les différentes phases de surrection occasionnées par le mouvement vertical affectant la zone. On observe, par ailleurs, que l'amplitude du mouvement vertical diminue du sud au nord de l'arc (Dubois *et al.*, 1973), ce qui se concrétise par des altitudes décroissantes pour les îles : 148 m pour Maré, 105 m pour Lifou, 95 m pour Tige et 48 m pour Ouvéa.

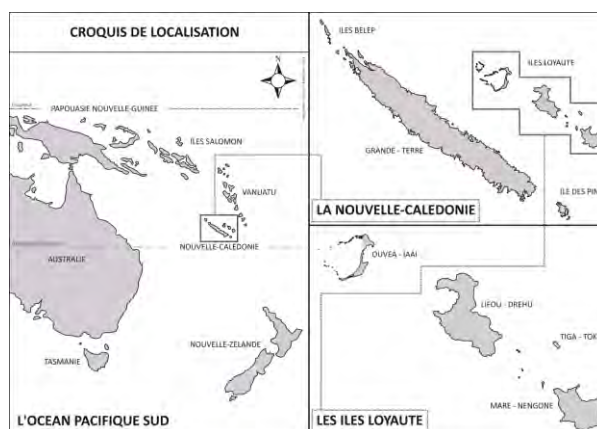


Figure 1 : Contextualisation multiscalaire du terrain d'étude. (Le Duff, 2014).

Le chantier sur lequel porte la thèse est localisé régionalement sur ce qu'il est convenu d'appeler la « ride des Loyauté », il s'agit d'un bombement lithosphérique de pré-subduction. Ce mouvement de convergence caractérise la frontière de plaque indo-australe avec la plaque pacifique. Il en résulte une exposition privilégiée à certains aléas :

- Glissements de terrain
- Tremblements de terre
- Tsunamis

Région située au nord du tropique du Capricorne entre 20° et 22° 30' de latitude sud et 164° et 167° 30' de longitude est, les îles Loyauté se caractérisent par un climat tempéré pouvant être qualifié de « tropical océanique » (Météo France, 1995). Elles sont concernées par les phénomènes climatiques extrêmes, tels que les cyclones et tornades. Si la connaissance que l'on a des cyclones ayant impacté le littoral calédonien peut être améliorée et complétée, il n'en demeure pas moins que le phénomène est connu et géré. Concernant les tornades, la situation est très différente. D'une part, aucune étude sur le phénomène n'existe en Nouvelle-Calédonie, seul un article publié sur le site de Météo France en 2013 en fait état. D'autre part, un recensement rapide auprès de la population nous a permis d'identifier plus d'une quinzaine d'épisodes sur les 30 dernières années, aux impacts parfois considérables. Les dernières en date sont survenues en avril 2012 et 2013 à Lifou et en janvier 2014 à Ouvéa.

Bien que les caractéristiques climatiques générales de la Nouvelle-Calédonie tendent vers un optimum tempéré et les conditions tectoniques locales à un équilibre précaire (Pelletier et Pillet,

⁷² Expression empruntée à Leenhardt RH, de son ouvrage éponyme « Au vent de la grande-terre : les îles Loyauté de 1840 à 1895 ».

2004 ; Pelletier et Ioualalen, 2006), la permanence de ces phénomènes au fort potentiel d'impact et de leurs corollaires : submersions marines, érosion et recul du trait de côte, constituent autant de sujets d'inquiétudes pour les autorités en charge de leur gestion.

Les conséquences du réchauffement climatique, dont la connaissance scientifique générale se précise et s'affirme chaque jour d'avantage (GIEC, 2013, 2014), sont au cœur des préoccupations des populations, ainsi que le démontrent les échanges que nous pouvons avoir avec elles. Certes, la population des Loyauté n'est pas très importante, 17 436 habitants (ISEE, 2010) soit 8.8 habitants par km², ce qui représente 7.1 % de la population calédonienne. Cela limite les pressions anthropiques qui ont parfois des effets amplificateurs désastreux en Océanie, mais les enjeux sur l'espace littoral sont significatifs. D'une part, l'essentiel des populations Loyaltiennes vit à proximité immédiate du littoral et d'autre part, l'une des voies de développement économique passe par l'exploitation touristique de ces zones côtières.

1.2. Contexte historique et institutionnel de la gestion des risques en Nouvelle-Calédonie

C'est là un point essentiel que la question de la gestion de ces phénomènes extrêmes, car au 1^{er} janvier 2014, la compétence de la sécurité civile a été transférée de l'Etat à la collectivité et ce, dans le cadre de la poursuite de la feuille de route instituée par les accords de Nouméa en 1998.

Avant d'aller plus loin, il convient de rappeler que la Nouvelle-Calédonie dispose d'un statut juridique particulier dit *sui generis*, directement issu de l'histoire politique récente du pays. À partir des années 60, le discours indépendantiste monte en puissance et les tensions avec le pouvoir colonial s'accroissent jusqu'en 1984 où la situation dégénère en quasi-guerre civile jusqu'en 1988. Ce que l'on appelle avec pudeur « les événements » et qui renvoie au conflit armé de cette période, constitue le point de départ du processus de décolonisation initié par la signature des accords de Matignon-Oudinot en 1988, puis des accords de Nouméa en 1998. Ce dernier précise dans son préambule qu' : « *au terme d'une période de vingt années, le transfert à la Nouvelle-Calédonie des compétences régaliennes, l'accès à un statut international de pleine responsabilité et l'organisation de la citoyenneté en nationalité seront proposées au vote des populations intéressées. Leur approbation équivaldrait à la pleine souveraineté de la Nouvelle-Calédonie* ».

Le transfert de la compétence de la sécurité civile s'inscrit au sein de ce processus. Il faut rappeler que le modèle de gestion des risques littoraux, en métropole, s'articule autour d'un axe principal, constitué par le plan de prévention des risques naturels (PPR). Les PPR sont des documents d'urbanisme « *qui réglementent l'utilisation des sols en fonction des risques naturels auxquels ils sont soumis. Cette réglementation va de l'interdiction de construire à la possibilité de construire sous certaines conditions* » (MEDDE, 2006). Au même titre que les documents d'urbanisme et d'aménagement du territoire, le PPR repose sur un principe de base qui est l'existence d'un cadastre.

En Nouvelle-Calédonie, certaines terres disposent d'un statut particulier, il s'agit des terres coutumières, celles-ci représentent 26% du foncier de la Nouvelle-Calédonie. Aux îles Loyauté, cela représente 97 % du foncier. Ces terres coutumières sont réputées « inaliénables, incessibles et incommutables ». Ces principes furent établis, dès 1868, par le pouvoir colonial pour définir le règlement relatif aux « réserves indigènes ». Si la réalité qui se cache derrière ces principes visait à maintenir les populations autochtones aux périphéries⁷³ du territoire afin d'asseoir la pérennité et la suprématie du pouvoir colonial sur la Nouvelle-Calédonie, il faut souligner le fait paradoxal que cela a permis aux Loyaltiens de conserver leur mode de gestion du territoire. En effet, les îles Loyauté ne présentaient pas de grands intérêts pour l'Empire, car les terres n'étaient pas propices au développement d'une agriculture intensive et l'absence de minerais dans les sous-sols ne permettait

⁷³ « L'espace foncier mélanésien de la Grande Terre est réduit à 13 % de sa superficie initiale sous les coups de boutoir des opérations dites du « grand cantonnement », conduites entre 1897 et 1903 sous l'autorité du gouverneur Feillet ». (Terrier, 2010).

pas l'exploitation et la mise en valeur économique. Plus d'un siècle après, les accords de Nouméa reprennent ces principes, mais cette fois-ci dans une optique toute différente, il ne s'agit plus de maintenir les communautés autochtones en périphérie du pays, mais au contraire de reconnaître leur identité et leur antériorité sur le territoire. A ce titre, seul les détenteurs de droits sur les terres, reconnus par la coutume, peuvent décider de l'orientation à donner à l'organisation de l'espace coutumier, la réglementation française et son arsenal d'outils de gestion étant inapplicables.

Comme le souligne Pontier (2010), la Nouvelle-Calédonie présentant des particularités aussi bien géographiques, culturelles, juridiques que politiques et constitutionnelles, il convient donc de s'interroger sur la pertinence d'y transposer, en l'état, le modèle métropolitain de sécurité civile.

1.3. Une culture forte, ancrée dans la terre

Il faut rappeler certaines particularités du lien unissant le peuple kanak à la terre, car les logiques d'aménagement relevant de ces représentations sont toutes autres que ce que l'on peut observer en France. Ainsi, « l'espace kanak », en termes d'aménagement spatial, semble parfaitement anarchique à toute personne ne disposant pas des clefs de lecture adaptées. Comme le souligne Eddy Wadrawane (2010) « *Dans l'espace kanak, savoir cultiver la distance entre les personnes et les objets est indispensable. Cette culture de la distance permet d'exprimer une hiérarchisation ordinale ou statutaire dans l'espace. Des pratiques sociales sont dévolues à chaque espace attribué. À l'exemple de l'aire des arrangements et des évaluations des coutumes à la devanture et à l'intérieur des cases ou des espaces de rassemblement des « tas » de coutumes. (...) L'objectif de l'agencement spatial en tribu est de se maintenir et maintenir des distances ce qui se résume à, « chacun doit savoir garder sa place et demeurer à la place qui lui est dévolue ». La hiérarchie et les fonctions claniques servent de cadre de référence à la répartition des zones d'occupation, face à un repère centralisateur, souvent les édifices religieux où l'on va prier. »*

Ces quelques éléments constituent autant de points d'entrée dans la compréhension de l'aménagement du territoire kanak et marquent, par là même, la complexité de la lecture de l'organisation spatiale des tribus et l'ancrage culturel fondamental de l'acte d'implantation de tout objet sur l'espace foncier.

1.4. Objectifs et finalité de notre approche

Les éléments exposés précédemment permettent de définir notre objectif : identifier les points stratégiques pour définir un modèle de gestion des risques littoraux.

Pour cela, nous prendrons appui sur deux démarches principales, se voulant complémentaires. L'une relevant du champ disciplinaire de la géographie physique, peut être qualifiée de démarche quantitative, car il s'agira d'identifier les processus physiques à l'œuvre et de quantifier leurs impacts sur les littoraux ; l'autre relevant de la géographie culturelle et prenant appui sur une démarche plus qualitative où nos objectifs porteront sur l'analyse des particularités culturelles kanak.

2. Méthodologie

2.1. Une approche quantitative

L'approche quantitative visera à évaluer les aléas et leurs évolutions en prenant appui sur des outils techniques tels que SIG et télédétection. L'analyse diachronique des fonds d'imageries satellitaires, aériennes et cartographiques ainsi que les traitements statistiques sur les bases de données météo-océanologiques nous permettra d'identifier des tendances sur l'évolution des événements climatiques extrêmes et leurs conséquences sur les littoraux. Cette approche globale de notre terrain d'étude sera affinée par des relevés et observations de terrains : mesures DGPS pour l'élaboration de profils de plage et de modèles numérique de terrain (MNT), photogrammétrie afin

de suivre l'évolution du trait de côte et analyser les processus érosifs en cours. On aura également recours à l'analyse des archives photographiques telles que les cartes postales et les fonds privés qui permettront d'apporter certaines précisions sur des secteurs bien identifiés.

Ce travail de terrain s'inscrira dans un cadre particulier. En effet, au vu de la nature des aléas en jeu, des évolutions d'ores et déjà observées par les populations et des inquiétudes justifiées soulevées par les autorités coutumières et administratives locales, il nous a paru pertinent et innovant de mener cette approche de terrain selon un modèle « collaboratif » avec ces structures locales. Le terrain retenu pour la mise en place de cette démarche est l'île d'Ouvéa, car l'érosion côtière induit, dès aujourd'hui sur cette île, la nécessité de réponses adaptées.

Notre volonté est d'apporter un changement dans les paradigmes habituellement rattachés à ce type d'étude, ceux-ci renvoyant à une certaine hiérarchisation des connaissances, l'approche instrumentale ou « scientifique » étant généralement la seule réellement prise en considération. De cette conception verticale, nous souhaitons passer à une approche horizontale où l'ensemble des savoirs seront considérés comme égaux et traités comme tels. L'autre objectif de cette approche est d'apporter certaines connaissances et savoir faire aux structures déjà sur place afin que celles-ci puissent, par la suite, disposer d'une relative autonomie dans l'analyse et la compréhension des phénomènes affectant leur littoral et constituer ainsi des relais privilégiés pour la diffusion des connaissances auprès des populations.

D'un point de vue pragmatique, cela permettra également la constitution d'une base de données extrêmement précise, la fréquence des relevés de terrain pouvant être plus importante grâce à la présence sur place d'observateurs aguerris aux techniques de suivi. Les connaissances du terrain, et les éléments culturels relatifs à ces aléas, ou mis en jeu par ces phénomènes, seront ainsi directement intégrés à l'analyse par la mise en place de ce partenariat.

2.2. Une approche qualitative

L'approche qualitative apparaît pertinente pour l'analyse « géo-culturelle » des savoirs relatifs aux risques naturels. Les outils que nous utiliserons seront les entretiens avec les populations et les autorités locales ; le recensement et l'analyse des témoignages écrits et traditions orales, notamment les recueils de contes et légendes des îles Loyauté ; les recherches auprès des archives. Les correspondances des missionnaires catholiques et protestants constitueront une source d'information de premier ordre quant à l'identification d'épisodes géo-climatiques anciens, de même que cela nous permettra de mieux comprendre l'évolution des représentations face à ces risques naturels.

Nous nous intéresserons également à des éléments de linguistique vernaculaire. L'analyse des vocables utilisés pour désigner les phénomènes et le questionnement que l'on portera sur les toponymes et anthroponymes (Herrenschmidt, 2004) nous permettra de faire le lien avec les savoirs locaux et la tradition orale ainsi qu'avec les éléments relatifs aux modes de transmission des savoirs et des dispositifs de gestion développés traditionnellement. Quelques exemples permettent de mettre en avant la richesse de ces éléments aux îles Loyauté :

- Lieu dit à Lifou « *Traqa la hnageje* » : « Là où la mer est arrivée ».
- Nom de famille à Maré : « *Wowene* » : « Tremblement de terre ».
- Prénom à Ouvéa : « *Waakoio* » : « Grosse vague ».

Enfin, les caractéristiques particulières de la mythologie kanak, expliquant la constitution de la société et les places et devoirs de chacun, constituera un point fondamental à étudier. En effet, ces éléments sont la base même de la représentation cosmogonique de la réalité par le peuple kanak et en ce sens, ils établissent le socle culturel des sociétés Loyaltiennes (Leenhardt, 1947 ; Guiart, 1963 ; Herrenschmidt, 2004).

3. Résultats

3.1. Le risque tsunami aux îles Loyauté : caractéristiques de l'aléa

Nous allons présenter ici les principales caractéristiques du risque tsunami aux îles Loyauté et le mode de gestion utilisé par les autorités locales. Cela nous permettra de revenir brièvement sur le programme de prévention que nous avons établi, en collaboration avec les autorités institutionnelles et coutumières.

En introduction, nous avons défini la dynamique générale affectant la frontière entre la plaque indo-australe et la plaque pacifique. Le dernier épisode tsunamigène important, survenu dans cette zone de subduction, remonte au 28 mars 1875. Le sud de Lifou est alors largement balayé par un tsunami généré par un violent séisme. Les conséquences de cet épisode sont la destruction totale des tribus de Joj, Mu et Ahmelewedr. On dénombre 25 morts et plusieurs dizaines de blessés. Des dégâts importants sont également signalés à Luengoni, tribu située à quelques kilomètres au nord de ce secteur et, sur l'ensemble du littoral, des variations du niveau de la mer sont observées. C'est également cette catastrophe qui marque le déplacement des tribus de Mu et Ahmelewedr sur le plateau. Depuis 1875, une vingtaine de tsunamis ont touché les côtes de la Nouvelle-Calédonie, mais ceux-ci ont été d'une ampleur bien moindre, n'occasionnant aucun dégât majeur et aucune victime (Sahal *et al.*, 2010).

Le mouvement de convergence affectant la frontière de plaque au large des îles Loyauté est considérable, de l'ordre de 12 cm/an. La sismicité locale indique une activité normale sur les secteurs nord et sud de l'arc vanuatais, mais dans sa partie centrale, située entre les Loyauté et Erromango, Tanna, Anatom (Vanuatu) un « gap sismique » est observable.

Pillet et Pelletier (2004), soulignent que « *depuis 1920, environ 10 mètres de convergence ont été absorbés au contact des plaques, ce qui correspond à un séisme de l'ordre de la magnitude 8 si la zone est bloquée. Nous sommes donc potentiellement dans la période de retour d'une rupture majeure au large d'Erromango Tanna, pouvant générer un tsunami dans le sud du Vanuatu et aux îles Loyauté. Un évènement comparable à celui de 1875 se reproduira et peut se produire demain, dans 1 an, 10 ans, 50 ou 100 ans.* »

3.2. Des îles vulnérables

Une rapide analyse statistique va nous permettre de mieux saisir le degré d'exposition des côtes Loyaltiennes au risque tsunami. En effet, les îles Loyauté présentent un haut degré d'exposition à la fois humain, économique, environnemental et structurel. On entendra par zone à risque (ZR) les secteurs situés entre 0 et 10 m d'altitude et à une distance inférieure à 500 m du trait de côte. On constate ainsi que sont situés en zone à risque :

- 40 % de la population résidente
- 46 % des élèves (pendant les heures d'ouverture des établissements)
- 80 % des structures touristiques
- 51 % des établissements recevant du public
- 51 % des installations classées pour la protection de l'environnement

C'est donc à la fois l'intégrité physique d'une large partie de la population qui est directement remise en question, mais également l'ensemble de l'architecture économique et administrative des îles qui pourraient être mises à mal en cas de tsunami. L'observation en détails de ces statistiques nous permet de souligner l'extrême vulnérabilité de l'archipel face à ce type de phénomène (Le Duff, 2013).



Figure 2 : Atlas tsunami : carte de la tribu de Wabao à Maré (a) : document issu des ateliers de cartographie participative (b). (Le Duff, 2013).

3.3. Un terrain de travail particulier nécessitant une approche adaptée

Ne pouvant avoir recours aux outils utilisés habituellement, le Haut-commissariat de la République en Nouvelle-Calédonie (HCRNC) a cherché à développer une autre approche, et a établi un programme de prévention au risque tsunami reposant sur l'implication des populations. Il s'agissait là d'une première tentative en Nouvelle-Calédonie de projet « collaboratif » en matière de sécurité civile. Les conclusions issues de ces travaux sont encourageantes et orientent actuellement les premières réalisations de chemins d'évacuation et de zones-refuges sur les îles Loyauté. Ce dispositif a également reposé sur :

- Le développement de supports de communication en langues vernaculaires
- L'organisation de campagne de sensibilisation et d'ateliers participatifs en tribu
- L'aide à la planification préventive et l'encadrement d'exercices d'évacuations (établissements scolaires, internats, administrations, dispensaires, tribus)
- La rédaction d'articles de vulgarisation, la participation à des émissions radios et télévisées

A titre d'exemple, la carte présentée ci-dessus est une bonne illustration du travail issu des ateliers participatifs menés à la tribu de Wabao (Maré) en juillet 2013.

4. Conclusion

Après avoir dressé un portrait de notre terrain d'étude et spécifié les modalités de notre approche, la présentation synthétique d'un premier bilan statistique concernant le risque tsunami vient donner un éclairage concret à notre démarche.

Les îles Loyauté sont très largement soumises à différents types d'aléas et l'absence de réglementation applicable aux territoires coutumiers en matière de gestion des risques naturels ainsi que la non prise en compte de ces phénomènes par les administrations et les politiques locaux ont conduit au développement d'une vulnérabilité sans précédent des communautés vivant sur les littoraux des îles Loyauté.

La Nouvelle-Calédonie est un petit pays disposant de moyens de sécurité civile limités (Viret, 2008). La double insularité des populations Loyaltiennes induit un degré d'isolement relativement important et la nécessité d'une certaine autonomie face à la survenance d'une catastrophe. C'est pourquoi le développement de projets participatifs a un rôle fondamental. Non seulement, ces projets participent au développement d'une véritable culture du risque, mais en intégrant immédiatement les demandes des populations au projet de mise en sécurité ou d'étude de l'aléa, ils remettent au centre de la démarche les aspects socioculturels. Le tout forme un ensemble cohérent, connu et compris par la population, rendant ainsi beaucoup plus efficaces les dispositifs de sécurité.

David (2006) soumettait l'hypothèse que l'ensemble des sociétés océaniques avait un fondement commun, au sens où leur survie dépendait de leur capacité d'adaptation aux catastrophes naturelles. Dans cette optique, il semblerait que l'occidentalisation des modes de vie océaniques tende à effacer les connaissances traditionnelles relatives à ces phénomènes. C'est pourquoi il est non seulement urgent de recenser ces savoirs vernaculaires, mais également de les étudier afin de s'en inspirer pour établir une politique de réduction des risques réellement adaptée au contexte socioculturel insulaire océanique et aux futurs défis générés par le réchauffement climatique. C'est là tout l'enjeu de notre travail de thèse, mais également la justification de l'approche croisée quantitative et qualitative qui est au cœur de ce projet.

Bibliographie

- Allenbach M., Hoibian T. (2006). Enjeux, spécificités et perspectives de la gestion intégrée du littoral dans l'espace insulaire français du sud-ouest Pacifique, IXèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, 12-14 septembre 2006, Brest.
- David G. (2006). La gestion des risques comme base de la viabilité des sociétés de l'Océanie insulaire. *Actes du colloque « La gestion des risques : des pratiques ancestrales au SIG »*.
- Dubois J., Launay J., Recy J. (1973). Les mouvements verticaux en Nouvelle-Calédonie et aux îles Loyauté et l'interprétation de certains d'entre eux dans l'optique de la tectonique des plaques. Cahier de l'ORSTOM, série Géologie, vol. V, n° 1, p. 3-24.
- Dumas P. (2004). Caractérisation des littoraux insulaires : approche géographique par télédétection et SIG pour une gestion intégrée. Application en Nouvelle-Calédonie. Thèse en géographie, Université d'Orléans.
- GIEC. (2013). Rapport n°5, Volume 1. Changement climatique : les éléments scientifiques, octobre 2013, Suisse.
- GIEC. (2014). Rapport n° 5, Volume 2. Changement climatique : impacts, adaptation et vulnérabilité, mars 2014, Suisse.
- Guiart J. (1963). Structure de la chefferie en Mélanésie du Sud. Institut d'ethnologie, Musée de l'homme, Paris.
- Herrenschmidt JB. (2004). Territoires coutumiers et projet de développement en Mélanésie du Sud (Îles Loyauté, Vanuatu, Fidji). Thèse en géographie, Université de Paris IV-Sorbonne.
- ISEE. (2010). Situation démographique 2010, Nouméa.
- Le Duff M. (2013). Rapport de synthèse : prévention du risque tsunami aux îles Loyauté, octobre 2013, Lifou.
- Leenhardt M. (1947). *Do Kamo, la personne et le mythe dans le monde mélanésien*, Gallimard, 1947.
- Loualalen M., Pelletier B. (2006). Rapport de fin d'étude sur l'estimation des risques de tsunamis pour les Îles Loyauté, Nouvelle-Calédonie, IRD, décembre 2006.
- MEDDE. (2006). Le PPR, un outil pour une stratégie globale de prévention, janvier 2006, Paris.
- Météo France (1995). Atlas climatique de Nouvelle-Calédonie, décembre 1995, Nouméa.
- Pelletier B., Pillet R. (2004). Tectonique active, tsunamis et sismicité en Nouvelle-Calédonie. Notes techniques sciences de la terre, géologie, géophysique, revue n°28, mai 2005.
- Pontier JM. (2010). Les conditions du transfert de compétences en matière de sécurité civile. Les assises de la sécurité civile, juillet 2012, Nouméa.
- Sahal A., Lavigne F., Pelletier B., Schindele F., Chatelier J. (2010). Un catalogue des tsunamis en Nouvelle-Calédonie du 28 mars 1875 au 30 septembre 2009. *Compte-rendu Géoscience*, n°342, p. 434-447.
- Terrier C. (2010). L'histoire de la Nouvelle-Calédonie. Maison de la Nouvelle-Calédonie, 2010.
- Viret J. (2008). Le transfert de compétence à la Nouvelle-Calédonie en matière de sécurité civile, août 2008.
- Wadrawane E. (2010). L'école aux marges de la tribu. Approche anthropologique des stratégies d'accueil et d'intégration de l'institution scolaire en Nouvelle-Calédonie (Province Nord et Îles). Thèse en science de l'éducation, Université de Bordeaux 2.

Une stratégie régionale en Aquitaine pour la gestion de la bande côtière

Arnaud Gueguen¹

1. GIP Littoral Aquitain

11, avenue Pierre Mendès France, 33700 Mérignac

arnaud.gueguen@littoral-aquitain.fr

RESUME.

Le littoral aquitain est intensément touché par l'érosion côtière. Le partenariat aquitain organisé au sein du GIP Littoral Aquitain a souhaité se donner les moyens d'apporter une réponse qui soit collective et la plus pertinente possible au regard des enjeux de développement durable du littoral, en prenant le temps d'élaborer une stratégie régionale de gestion de la bande côtière. Cette stratégie régionale décline la stratégie nationale présentée par le gouvernement en mars 2012 et met en avant le principe de prévention, elle encourage à développer la connaissance et la culture du risque, elle engage à étudier toutes les possibilités techniques pour gérer un risque existant, sans exclusion ni tabou, notamment sur le repli stratégique. Elle offre également un cadre de gouvernance pour des prises de décisions partagées et concertées au niveau local en définissant un cadre : la stratégie locale. Les 7 territoires identifiés comme à risque important d'érosion en Aquitaine ont tous volontairement initié l'élaboration d'une stratégie locale érosion. Bien que nécessaire, le lancement des sept stratégies locales érosion d'Aquitaine, ne sera néanmoins pas suffisant pour résoudre les problèmes posés par l'érosion. Se pose aujourd'hui les questions du positionnement des stratégies locales dans le panorama juridique français, des compétences/responsabilités et du financement de la gestion du risque d'érosion.

MOTS-CLES : Bande côtière ; Érosion ; Risque ; Stratégie ; Anticipation ; Gouvernance

1. Introduction

Les processus érosifs côtiers sont actifs partout dans le monde et le littoral aquitain n'y échappe malheureusement pas. Comme le montrent les travaux les plus récents de l'Observatoire de la côte aquitaine, la côte sableuse recule en moyenne de 1 à 3 m par an et notre côte rocheuse de 20 cm par an. Si aucune action n'est menée, plus de 2 200 hectares de terres seront menacées par la mer d'ici à 2040.

Les habitants, les élus et les gestionnaires du littoral ont essayé de composer avec ce phénomène en mettant en œuvre les techniques disponibles pour protéger les personnes et les biens : gestion des dunes, rechargement de plage, stabilisation de falaise, ouvrages de fixation du trait de côte. Mais, bien que nécessaires, ces actions de défense s'apparentent souvent à un combat sans fin, coûteux pour la collectivité. Elles ont généralement apporté un bénéfice localement mais ont aussi parfois eu des conséquences négatives, notamment sur les territoires voisins en entraînant une augmentation de l'érosion.

L'ambition aquitaine d'un développement durable de son littoral interroge depuis longtemps les modes de gestion du trait de côte, et de ce questionnement est née la volonté de bâtir une « **stratégie régionale de gestion de la bande côtière** ». Il s'agit d'un projet innovant, unique en France, qui permet à l'ensemble des acteurs publics du littoral de s'appuyer à la fois sur un cadre commun traduisant une ambition collective et de disposer d'une boîte à outils pour mettre en œuvre localement une gestion durable de la bande côtière.

Dans un premier temps, seront présentés dans cet article les modalités d'élaboration et le contenu de la stratégie régionale de gestion de la bande côtière (I). Puis sera développée la mise en œuvre de cette stratégie (II).

2. La première stratégie régionale « érosion » élaborée entre État et collectivités

2.1. L'érosion, un problème majeur pour le littoral aquitain

Le littoral aquitain est intensément touché par l'érosion côtière. L'Observatoire de la côte aquitaine (S. Aubie et al, rapport BRGM n°59095,2011) a ainsi évalué à l'échelle de la côte sableuse un recul moyen de **1 à 3 m/an (avec un maximum de 6 m/an) et un recul de 20 cm/an sur la côte rocheuse. A l'horizon 2040, 2 233 ha dont 177 ha sont des zones d'habitat, 83 ha des zones d'activité de loisir et de tourisme et 9ha des zones d'activité économique, pourraient disparaître.** Une grande partie du littoral de la côte sableuse a pu être préservé d'une urbanisation trop proche de l'océan, l'érosion côtière n'est donc pas un problème pour l'ensemble du littoral aquitain. En revanche, certains secteurs sont particulièrement menacés tels que la côte rocheuse des Pyrénées-Atlantiques, la pointe du Médoc ou des hot spots comme Lacanau, Biscarosse, ou Capbreton.

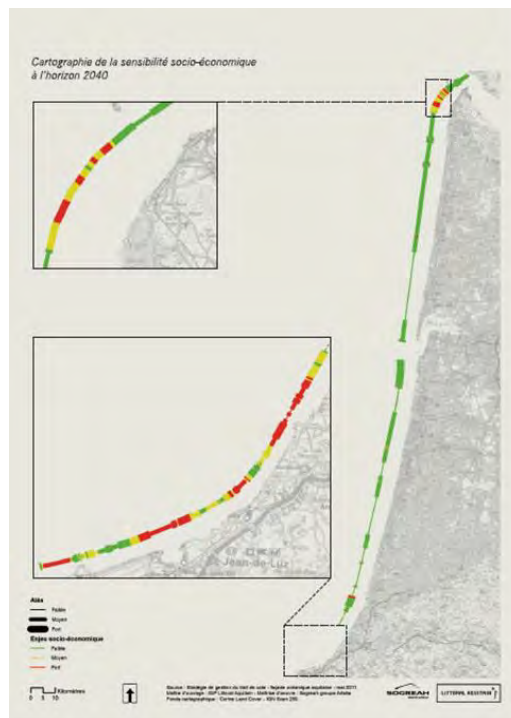


Figure 1. Chiffres clefs risques érosion en Aquitaine

Figure 2. Cartographie de la sensibilité socio-économique à l'horizon 2040

2.2. Une mobilisation régionale

Le partenariat aquitain organisé au sein du GIP Littoral Aquitain a souhaité se donner les moyens d'apporter une réponse qui soit collective et la plus pertinente possible au regard des enjeux de développement durable du littoral, en prenant le temps d'élaborer une stratégie régionale de gestion de la bande côtière. Réunis en assemblée générale le 4 juillet 2009, les élus du littoral aquitain et les services de l'État ont officiellement lancé la démarche stratégique de gestion de la bande côtière. Cette mobilisation traduit la prise de conscience des enjeux liés aux risques côtiers au niveau du littoral aquitain. Il s'agit de la première réflexion, en France, associant tous les partenaires à l'échelle régionale sur le sujet de l'érosion côtière.

En tant qu'outil de gouvernance réunissant l'ensemble des collectivités et les services de l'État, le GIP Littoral Aquitain s'est vu confier l'élaboration de cette stratégie régionale. Il était l'instance locale et régionale de suivi de l'étude, le lieu de discussion et d'expression des différents points de vue concernant la gestion de la bande côtière. Les assemblées générales et les conseils d'administration du GIP ont permis de rendre compte aux élus de l'état d'avancement de la réflexion et de leur soumettre les premières pistes de la stratégie. Ces deux instances ont joué le rôle de comités de pilotage régionaux. Tout au long de la démarche et à un rythme soutenu les différents services de l'État (DREAL, DDTM, sous-préfectures) et les techniciens des collectivités territoriales (le conseil Régional, les trois conseils Généraux ainsi que les communautés de communes et les communes) ont été associés à la démarche et invités à apporter leurs contributions.

Un comité scientifique associant les spécialistes des questions d'érosion a été créé afin de valider la méthode de qualification de l'aléa. Ce comité scientifique s'est entouré des compétences nécessaires en fonction des sujets traités : économie (économiste de Bordeaux III), écologie (ONF, CELRL, Conservatoire botanique...), urbanisme (agences d'urbanisme). Certains de ces scientifiques intervenaient au titre du Réseau de recherche littorale aquitain. L'Observatoire de la côte Aquitaine a joué un rôle important dans la démarche en étant le maître d'œuvre de la définition des aléas aux

échelles régionale et locale (pour les 3 sites-tests). D'une façon plus globale, celui-ci s'est vu aussi confier la mission d'assister le GIP, maître d'ouvrage de la démarche. De nombreuses réunions entre le GIP, l'Observatoire de la côte aquitaine et le titulaire du marché d'étude ont été organisées afin de préparer les décisions. Enfin, à travers l'élaboration d'un marché d'étude, le GIP s'est entouré de la capacité de travail et de l'expertise d'Artélia-Sogreah, bureau d'étude engagé dans des réflexions métropolitaines similaires.

2.3. Le contenu de la stratégie régionale

2.3.1. Que dit cette stratégie ?

La stratégie régionale met en avant le principe de prévention, elle encourage à développer la connaissance et la culture du risque, elle engage à étudier toutes les possibilités techniques pour gérer un risque existant, sans exclusion ni tabou, notamment sur le repli stratégique⁷⁴. Elle offre également un cadre de gouvernance pour des prises de décisions partagées et concertées au niveau local. C'est un véritable changement de paradigme dans la gestion d'un risque littoral.

2.3.2. Comment est-elle organisée ?

La stratégie régionale est constituée de quatre documents

- une introduction générale — partie #1. Ce document précise le contexte et la méthode d'élaboration la stratégie régionale.
- une sensibilité régionale à l'érosion côtière — partie #2. Elle offre un diagnostic régional du risque érosion en s'appuyant sur la qualification de l'aléa et des enjeux, sur l'analyse des actions passées de gestion de la bande côtière.
- un document d'orientation et d'actions — partie #3. Il réunit les éléments de doctrine communs nécessaires pour mener une action de gestion globale du trait de côte à l'échelle du littoral aquitain. Sa mise en œuvre par chacun des acteurs publics aquitains, dans le cadre de ses compétences, doit permettre de limiter les risques littoraux. Afin d'éviter les réponses précipitées à des situations de crise souvent contraires à un aménagement durable, cette stratégie vise à limiter la survenue de crise par l'anticipation en combinant les actions de prévention et la planification d'actions d'adaptation au recul du trait de côte.
- un guide de l'action locale — partie #4. Il vise à fournir aux collectivités littorales aquitaines un ensemble de méthodes communes. Cet ensemble constitue une aide à la décision en permettant de reproduire localement les démarches menées d'une façon expérimentale sur trois sites-tests (Lacanau, Contis et Ciboure).

Ces documents n'ont aucune valeur réglementaire en tant que tels mais visent cependant à orienter les politiques publiques menées en Aquitaine pour mieux gérer la bande côtière. Le cadre régional défini dans cette stratégie a vocation à être adapté et affiné par des réflexions plus locales.

2.3.3. Quels en sont les grands principes et quelles actions en découlent ?

Dans le respect des politiques nationales et européennes de gestion des risques naturels, cinq grands principes sont ainsi édictés au plan régional, eux-mêmes déclinés en actions, pour la plupart en cours de réalisation.

Principe n°1 : Prévoir le risque, améliorer la connaissance et développer la culture du risque

- Maintien du suivi pluriannuel de suivi du trait de côte à l'échelle régionale par l'Observatoire de la Côte Aquitaine (270 km de côte suivi au cm près).

⁷⁴ En Aquitaine le « repli stratégique » regroupe les notions de déplacement, de suppression et de relocalisation (suppression puis réimplantation d'un bien ou activité).

- Parution fin 2012 de l'atlas de l'aléa érosion du littoral sableux aquitain par l'Observatoire de la Côte Aquitaine.
- Financement par l'appel à projet du Conseil Régional du programme de recherche consacré à la dynamique du trait de côte dans le programme PERMALA portés par les scientifiques du Réseau de Recherche Littorale Aquitain.

Principe n°2 : Prévenir le risque

- Une mobilisation des services de l'Etat pour l'élaboration des Plan de Prévention des Risques littoraux prioritaires après la tempête Xynthia.
- Une intégration effective du risque érosion par les collectivités territoriales dans les derniers SCoT littoraux aquitains arrêtés (Schéma de Cohérence Territoriale Lacs Médocains, Schéma de Cohérence Territoriale Bassin d'Arcachon Val de L'Eyre).

Principe n°3 : Gérer de façon optimale les situations existantes

- Maintien de l'action quotidienne d'accompagnement des processus naturels sur les dunes par l'Office National des Forêts dans le cadre d'une mission d'intérêt général confiée par l'Etat.
- Sélection de sites avec le Conservatoire du littoral et l'ONF pour la mise en œuvre d'une évolution naturelle surveillée.
- Lancement de l'estimation des potentiels et de la faisabilité technique des rechargements en sédiments avec l'Observatoire de la Côte Aquitaine.
- Lancement des actions de luttes actives conformément à la stratégie locale sur le site test de Ciboure.
- Réponse Aquitaine à l'appel à projet national sur la « relocalisation des activités et des biens » réunissant aux côtés du GIP les communes de Lacanau, de La Teste-de-Buch et de Labenne.

Principe n°4 : Préparer et gérer les crises

- Elaboration exemplaire des Plan Communaux de Sauvegarde dans les Landes avec le soutien du centre de gestion de la fonction publique territoriale.

Principe n°5 : Faciliter la mise en œuvre et la cohérence des actions de gestion

- Etude des solutions de gestion dans le cadre des stratégies locales de gestion de la bande côtière (cf. ci-après).
- Soutien technique du GIP Littoral Aquitain et de l'Observatoire de la Côte Aquitaine à l'élaboration de stratégies locales.

La mise en œuvre de la stratégie régionale couvre donc l'ensemble des champs de la gestion des risques côtiers : connaissance, culture du risque, etc. Elle passe par la reconnaissance et le soutien d'actions existantes (Observatoire de la côte aquitaine, actions de l'ONF sur les dunes) mais aussi par l'ouverture de grands chantiers régionaux sur le rechargement et le repli stratégique. Cf. article de M. Martin RENARD du GIP Littoral Aquitain.

2.4. Pourquoi des stratégies locales érosion ?

La stratégie régionale du littoral aquitain est la première déclinaison régionale de la stratégie nationale de gestion du trait côte présentée par le gouvernement français en mars 2012. L'élaboration de cette stratégie a donc permis de démultiplier l'impact des recommandations nationales, de partager l'aléa, de hiérarchiser les secteurs les plus menacés, d'identifier les quatre modes de gestion adaptés à l'érosion en aquitain et de définir une méthode locale de déclinaisons des grands principes régionaux : la stratégie locale de gestion de la bande côtière.

Cette déclinaison locale est apparue comme une nécessité dans la mesure où au niveau local, les réponses à l'érosion côtière sont souvent apportées au coup par coup et le plus généralement dans l'urgence, sans mise en cohérence des actions à l'échelle géographique pertinente (celle du bassin de

risque) et sans croisement avec les autres politiques d'aménagement. Par ailleurs, la stratégie régionale de gestion de la bande côtière a défini à l'échelle régionale des modes de gestion de référence par type de secteur. Ce travail, même s'il a été réalisé avec méthode et rigueur, et a intégré le maximum de connaissances, ne pouvait pas tenir compte de l'ensemble des projets des territoires et des dynamiques locales. Il n'était donc pas possible, ni souhaitable, de définir des préconisations de gestion fine pour l'ensemble du littoral aquitain. La définition d'une stratégie locale⁷⁵ de gestion des risques littoraux était donc le lien indispensable entre l'approche régionale et les actions locales, dans les secteurs où le risque est important.

Dans le cadre de la définition de la stratégie régionale de gestion de la bande côtière, le GIP Littoral Aquitain a testé l'élaboration de stratégies locales de gestion de la bande côtière sur 3 sites-tests : Lacanau, Contis et Ciboure. De cette expérience le GIP en a déduit des principes, produit un guide de recommandation et défini un CCTP type.

Plusieurs étapes ont été identifiées pour élaborer les stratégies locales en Aquitaine :

- définition et cartographie du niveau d'aléa du littoral du territoire avec et sans ouvrage
- identification et cartographie des enjeux impactés par l'érosion à court et long terme ;
- mesure de l'importance du risque érosion sur le littoral de la collectivité ;
- construction de différents scénarios de gestion du littoral avec a minima étude du scénario d'inaction et de repli stratégique ;
- comparaison des scénarii entre eux par une analyse coût avantage et une analyse multicritère (AMC) ;
- définition de la solution la mieux adaptée à la situation locale et au projet de territoire ;
- proposition de sorties opérationnelles permettant de mettre en œuvre le projet retenu ;
- proposition d'éléments de mise à jour des documents de prévention et des documents d'urbanisme ;
- définition d'un programme d'action de prévention des érosions/submersion.

Chacune de ses étapes fait l'objet d'une description technique et de recommandations précises consolidées au niveau régional dans le guide de l'action locale.

3. De la stratégie à l'action

3.1 Une mobilisation locale totale

Aujourd'hui les documents cadres nationaux et régionaux sont largement partagés et déclinés localement par les collectivités territoriales. Ainsi les 7 territoires identifiés comme à risque important d'érosion en Aquitaine ont tous volontairement initié l'élaboration d'une stratégie locale érosion :

- Soulac - Communauté de communes de la Pointe du Médoc - 2011-2014 ;
- Lacanau - Commune de Lacanau - 2009-2014 ;
- Passes du Bassin d'Arcachon - communes de Lège Cap Ferret, La Teste de Buch, Biscarrosse et Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon – 2014-... ;
- Mimizan ; Communauté de communes de Mimizan ; 2012 – 2014 ;
- Capbreton ; Commune de Capbreton avec Labenne ; 2014 -... ;
- Côte Basque Nord ; Agglomération côte basque Adour ; 2012 -... ;
- Côte Basque Sud ; Agglomération sud pays basque ; 2012 - ... ;

75 L'échelle locale s'entend ici donc par opposition à l'échelle régionale. Le périmètre doit être étudié au regard du risque.

En Aquitaine les 7 stratégies locales de gestion de la bande côtière sont donc toutes lancées et sont élaborées suivant la même méthode définie au niveau régional.

3.2. Une étape nécessaire mais insuffisante pour résoudre les problèmes d'érosion

A l'heure où l'Etat cherche à mobiliser les collectivités pour définir des stratégies locales inondation⁷⁶ pourtant obligatoire dans chaque territoire identifié comme à risque important d'inondation (TRI), les résultats aquitains peuvent surprendre. En effet, sans contrainte réglementaire, ni obligation calendaire, l'ensemble des collectivités du littoral aquitain ont su se mobiliser pour initier une démarche qui doit leur permettre d'anticiper les problèmes d'érosion des années à venir et définir un programme d'action, d'adaptation ou de lutte contre l'érosion.

Cette différence entre érosion-submersion ne peut pas être complètement attribuée à une différence de perception des phénomènes. Il est possible de voir dans la mobilisation générale aquitaine sur l'érosion les fruits des travaux de gestion intégré de la zone côtière de l'ensemble des élus et services des collectivités et de l'État au sein du GIP Littoral Aquitain. L'analyse régionale et le test de la méthode sur 3 collectivités test représentatives du reste du littoral ont été suffisamment convaincants pour enclencher des dynamiques locales à l'échelle régionale.

Bien que nécessaire, le lancement des sept stratégies locales érosion d'Aquitaine, ne sera néanmoins pas suffisant pour résoudre les problèmes posés par l'érosion. Il est en effet permis de douter de la réussite de la mise en œuvre de stratégies locales :

- si les actions identifiées ne peuvent être financées faute de capacité financière suffisante et/ou de maître d'ouvrage compétent ou responsable ;
- si les actions vertueuses mises en œuvre dans l'intérêt général sont contrecarrées par les conséquences négatives d'ouvrages ayant pour seul but de préserver des enjeux privés et parfois érigés illégalement sur le DPM ;
- si les actions de relocalisation ne peuvent être mise en œuvre faute de clarification de leur portage et de leur financement⁷⁷ ;
- si les outils dont l'État à la charge (PPR, stratégie départementale de gestion du DPM) ne sont pas articulés avec les stratégies locales et autres outils d'urbanisme (PLU, PPR)
- etc...

Se pose donc aujourd'hui clairement la question du positionnement des stratégies locales dans le panorama juridique français, mais aussi des compétences/responsabilités et du financement de la gestion du risque d'érosion.

3.3. Une nécessaire clarification de la gestion du risque érosion

En France, la gestion du risque inondation et par extension la submersion bénéficie d'une clarification récente de ces questions. Ainsi la compétence prévention des inondations devrait-elle pleinement incomber aux intercommunalités à partir du 1er janvier 2016⁷⁸. Le plan digue prévu après Xynthia, renommé par la suite plan de submersion rapide, permet quant à lui une participation

⁷⁶ Obligation issue de l'article L566-7 du code de l'environnement introduite par l'article 221 de la loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 dite Grenelle II.

⁷⁷ L'érosion marine (cote sableuse) contrairement au mouvement de falaise (côte rocheuse) n'est à ce jour pas considérée comme un aléa générateur d'un risque naturel majeur au sens de l'article L561-1 du code de l'environnement, ce qui empêche l'expropriation ou l'acquisition amiable financée à 100% par le Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs.

⁷⁸ La compétence Gestion de l'Eau, des Milieux Aquatiques et de Prévention des inondations dite GEMAPI a été créée par la loi n° 2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles.

importante du niveau national⁷⁹ aux travaux de lutte contre les inondations. Enfin, le cadre stratégique est quant à lui très clair entre la stratégie nationale, le plan de gestion des risques inondation défini à l'échelle au niveau du bassin, et les stratégies locales élaborés pour chaque TRI. Les efforts ont donc été majeurs. Ils n'ont néanmoins pas permis d'éclairer la gestion du risque érosion qui reste donc le parent pauvre de la gestion des risques naturels.

La stratégie nationale de gestion du trait de côte élaborée par l'Etat en concertation avec les collectivités et présentée par le gouvernement en mars 2012 présente néanmoins l'opportunité d'un cadre national pour résoudre ces problématiques. Le littoral aquitain est donc particulièrement dans l'attente des travaux menés par le Ministère de l'Écologie dans le cadre de cette stratégie nationale de gestion du trait de côte et particulièrement à l'axe B consacré aux stratégies locales érosion et l'axe D intitulé « préciser les modalités d'intervention financière ».

4. Conclusion

Avec la validation d'une stratégie régionale « érosion » en juin 2012 et le lancement dans la foulée par les collectivités territoriales de toutes les stratégies locales, l'Aquitaine a su faire preuve d'anticipation et d'ambition. La prise de conscience régionale a permis de démultiplier les effets de la stratégie nationale. Néanmoins, cette avance régionale et locale est confrontée à des difficultés opérationnelles. Il faut maintenant que les maires, les présidents d'intercommunalités disposent des moyens et des outils pour mener à bien les actions délicates à accomplir sur le plan social, juridique ou financier. Tout cela rend nécessaire de s'inscrire dans le cadre d'une solidarité et/ou d'une ambition nationale, faute de quoi il sera difficile d'apporter des réponses à la hauteur des enjeux aujourd'hui connus et partagés.

Les tempêtes de cet hiver 2014 ont été très impactantes pour le littoral aquitain tant en terme de recul du trait de côte⁸⁰ que de dégâts évalués à plus de 19 Millions d'euros⁸¹. Ces tempêtes ont mis à rude épreuve les capacités d'anticipation des phénomènes mais surtout ont conforté la nécessité de mettre en œuvre très rapidement des actions de lutte active ou de repli stratégique pour limiter le risque pour les personnes et maintenir la capacité de développement durable du littoral aquitain.

Bibliographie et références

S. AUBIE, C. MALLET et J. FAVENNEC en collaboration avec A. HOAREAU (2011) : Caractérisation de l'aléa érosion (2020-2040) de la Côte Aquitaine dans le cadre de l'étude stratégique de gestion du trait de côte. Observatoire de la Côte Aquitaine, rapport BRGM/RP-59095-FR, 59 illus. 97 p., 2 Ann.

GIP Littoral Aquitain, Stratégie régionale de gestion de la bande côtière, septembre 2012.

⁷⁹ Via la participation du Fonds de Prévention des Risques Naturels majeurs dit Fonds Barnier.

⁸⁰ Recul supérieur à 30m en certains secteurs, falaise dunaire généralisée sur l'ensemble de la côte sableuse etc – rapport BRGM et ONF pour le compte de l'Observatoire de la côte aquitaine en cours d'élaboration

⁸¹ Estimation provisoire réalisée par le GIP Littoral Aquitain, rapport en date du 26 mars 2014.

La vulnérabilité des populations de la côte Est du Cotentin 1700-1914

L'approche historique dans l'analyse des enjeux, de l'aléa et de la gestion du risque de submersion

Suzanne Noël¹

1. CRHQ, Université de CAEN

Esplanade de la Paix, Bât. N, Campus n°1, 1er étage Porte SB 104, CS 14032, 14032 Caen Cedex 55,
France

snoel.zhl@gmail.com

RESUME.

L'érosion du cordon dunaire de la côte Est du Cotentin a nécessité une gestion précoce du risque de submersion. En sciences humaines, travailler sur la vulnérabilité littorale, c'est s'interroger sur les facteurs anthropiques qui minorent ou majorent le niveau de résistance d'une société face aux aléas. Les sources historiques rendent possible la caractérisation de l'aléa de submersion, sa fréquence, son impact et son évolution dans le temps. Cette analyse nécessite l'élaboration d'une base de données indicées portant sur plusieurs siècles. Les sources apportent aussi un éclairage sur l'évolution des usages et les profondes mutations de cette région. Or, ces nouveaux enjeux fragilisent le cordon dunaire et font émerger un nouveau mode de valorisation dans lequel les incursions de la mer n'ont plus leur place. Ces enjeux vont fortement peser sur la solution du « tout endiguement » qui voit le jour au XVIIIe siècle malgré les réticences des d'habitants des intendants et des préfets.

MOTS CLES : Histoire, vulnérabilité, société ancienne, aléa de submersion, indice de submersion, base de données de submersions, enjeux, politiques publiques, digue, usages du rivage, zones humides littorales, mutations anthropiques du littoral.

ABSTRACT.

The erosion of the coastal dune on the east coast of the Cotentin required early flood risk management. According to the human sciences, study the vulnerability of an area is to examine the human factors that play down, or increase the level of resilience of a society facing hazards. Historical bases make it possible to characterize the hazard of flooding, its frequency, its impact and its evolution over time. This analysis requires the development of an historical indexed database. Sources highlight too the evolution of uses and profound agrarian and military changes of this area. These new challenges weaken the coastal dunes. Furthermore, marine submersions have no place in this type of economic development. These factors will contribute to political solution "all damming" of the early eighteenth century despite the preventive measures and opposition of people then "Intendants" and prefects.

Keywords: History, vulnerability, storm surge, storm surge database, public policy, sea wall, coastal wetlands, uses of shorelines, coastal anthropogenic changes.

Introduction

En Europe, les recherches portant sur la vulnérabilité des sociétés face aux aléas de submersion connaissent un fort engouement pour diverses raisons : événements dramatiques récents, rapports alarmants du GIEC, budgets en berne des Etats, d'une part, et des associations de défense contre la mer, d'autre part. Le Centre de Recherche en Histoire Quantitative contribue aux programmes normand-britannique LiCCo (Littoraux et changement Côtier) et normand-vendéen BLiNiS (Barrière Littorale et Niveau de Submersion) menés respectivement par le Conservatoire du Littoral et le laboratoire de géomorphologie de Caen⁸². L'Union Européenne a confié dernièrement la responsabilité scientifique du volet 'histoire' du projet FP7 RISC-KIT à Emmanuel Garnier, enseignant chercheur à l'université de Caen⁸³.

Si notre discipline est « sollicitée » par des programmes éloignés de nos terrains de recherche usuels c'est que la méconnaissance du passé nuit aux débats prospectifs en cours (Garnier 2012 ; Desarthe, 2013). Disséquer les origines de nos *habitus* en matière de gestion de l'aléa de submersion permet de mieux comprendre les choix des derniers siècles et de se libérer d'un passé trop idéalisé. Cette démarche implique une exploration des enjeux économiques, sociologiques, environnementaux, politiques et philosophiques qui ont influé sur la capacité d'adaptation des hommes aux contraintes de leur environnement. Elle induit aussi l'étude de l'évolution de l'aléa de submersion, composante essentielle de notre sujet (Antoine et Carozza, 2003).

Les temps de rupture sont des moments particulièrement recherchés car ils font ressortir les racines de nos choix et de nos modes d'aménagement du littoral.

Pour illustrer notre propos, la zone d'étude retenue est la côte orientale du Cotentin. L'analyse porte à la fois sur les grèves et sur les 20 km à l'intérieur des terres. Entre 1650 et 1800, cet espace connaît de profondes mutations dans son occupation. En raison des avantages halieutiques et militaires du Cotentin, les Archives Nationales, le service historique de la défense de Vincennes et l'IGN de Saint Mandé conservent un riche corpus cartographique et documentaire. La Presse, l'Intendance de Caen, le chartrier de la seigneurie de Fontenay-sur-Mer et les archives des associations syndicales comblent les archives lacunaires des amirautés du Cotentin et des administrations territoriales du XIXe siècle. La diversité de ces sources autorise l'analyse fine de la vulnérabilité des sociétés anciennes, de l'aléa de submersion et des choix opérés pour contrer la mer.

1. Les facteurs anthropiques de vulnérabilité

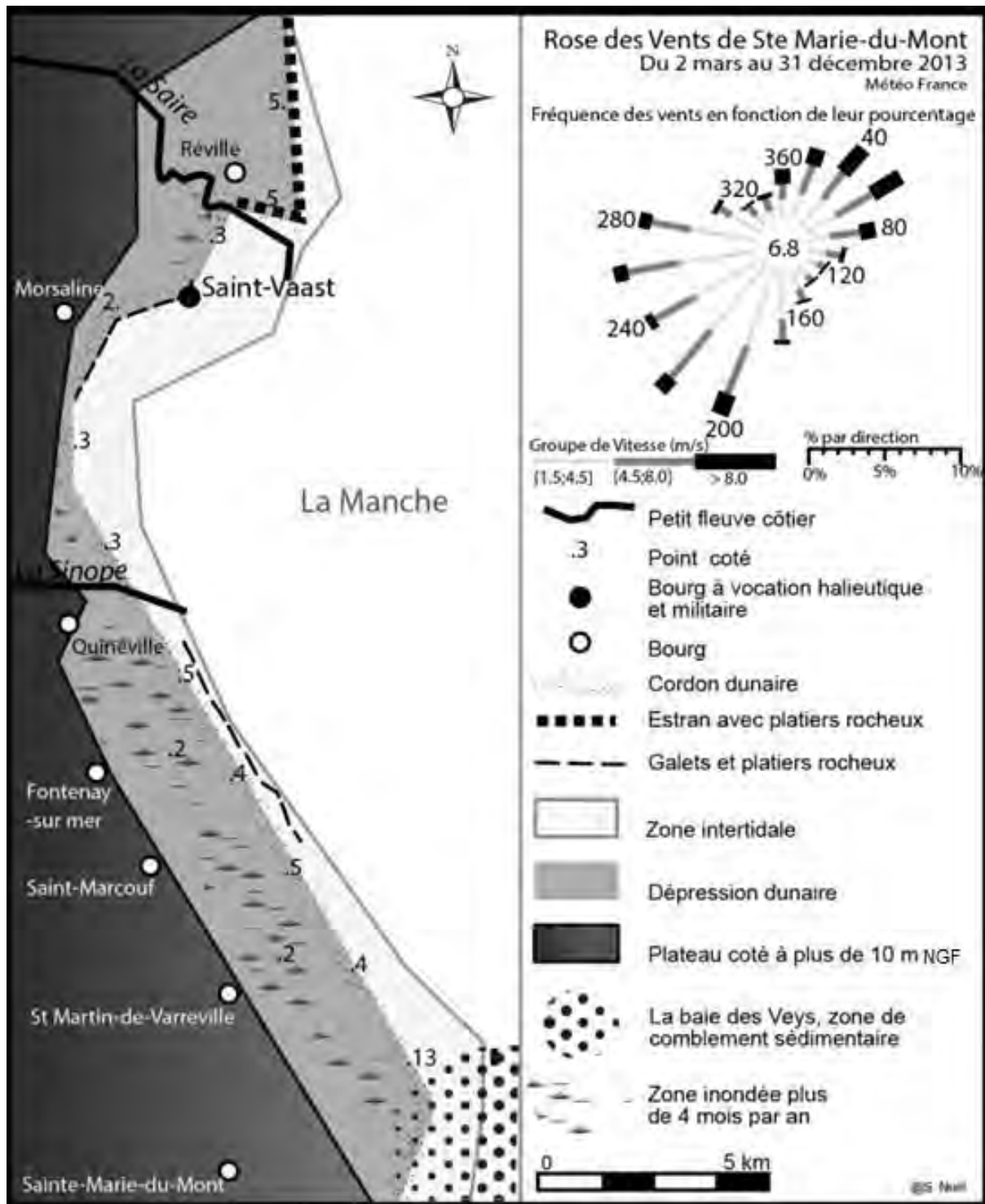
1.1. S'établir sur un espace mouvant

Notre zone d'étude s'étend sur 36 kilomètres de côte orientée nord-sud, de Réville à Sainte-Marie-du-Mont (figure 1). Ces paroisses maritimes se découpent en quatre espaces. A l'Est, un vaste estran se découvre à basse mer sur 1,8km à Saint-Vaast-la-Hougue et sur 600 m à Quinéville. Un cordon dunaire étroit, peu élevé et consolidé au gré des tempêtes, protège de la submersion une zone humide littorale. Quelques hameaux de pêcheurs sont implantés sur ce cordon sableux. Le cordon dunaire est çà et là accolé à un platier rocheux. Sur l'un d'eux se trouve Saint-Vaast-la-Hougue, petit bourg à vocation halieutique et militaire. Les autres bourgs se sont abrités des colères de la mer en se développant, au-delà de leur marais maritime, entre la courbe de niveau 5 et 10 sur un plateau situé entre 400m et 4000m de la mer.

⁸² Pour en savoir plus sur LiCCo: <http://www.licco.eu/>. La coordinatrice du projet BLiNiS est Bernadette Tessier, DR CNRS, UMR M2C Caen.

⁸³ Pour en savoir plus <http://www.risckit.eu/>.

Figure 1: Carte de la côte Est du Cotentin



Le littoral de cette partie du Cotentin a peu bougé au cours des derniers siècles. Il ne connaît ni la phase d'accrétion extraordinaire de la côte ouest de l'isthme, ni de phase d'érosion intense (Claude Larssonneur, 1971). C'est cependant un espace fragile et mouvant peu apte à supporter des infrastructures fixes sans contrer sa dynamique de régénération (Paskoff, 2007). Même si la

population est consciente de la fragilité de cette barrière naturelle, le littoral connaît une exploitation et une anthropisation accrues du XVIIIe au XIXe siècle⁸⁴.

1.2. Un estran intensément exploité

1.2.1. Une zone d'extraction de pierre, sable, galets et granulat marin

La grève est un lieu ancestral d'extraction. La pierre et le sable sont utilisés dans la construction. Les matériaux nécessaires à l'entretien des chemins « sont pris à la mer ». Le granit de Réville est très prisé. A la fin du XVIIIe siècle, son exploitation s'intensifie avec le développement du bourg de Saint-Vaast, la fortification du rivage, l'édification de routes, de ponts et des digues. Les cahiers de Doléances d'Equeurdreville, Tournaville, Barfleur et Réville relient directement la submersion du 31 décembre 1788 à la surexploitation des pierres du littoral pour les chantiers du port de Cherbourg (Bridrey, 1908).

1.2.2. L'enlèvement des amendements marins : la tange et le varech

La tange se concentre essentiellement au fond des baies et des estuaires de Basse-Normandie et du nord de la Bretagne. En raison du modeste débit de la Sinepe et de la Saire, l'enlèvement de la tange n'alimente pas un trafic intense (50 000 m³ par an dans le havre de la Saire)⁸⁵. Toutefois, par facilité, la tange est prélevée trop près des dunes et des chemins du rivage au point de les déstabiliser et de nuire à la circulation⁸⁶. Par ailleurs, la tange n'est pas enlevée immédiatement après son extraction. Elle est entreposée sur les dunes afin d'être séchée et lavée de son sel par la pluie. Ce dépôt nuit à la végétation qui maintient le sable et lors du retrait, les convoyeurs affouillent les rives de la Saire et de la Sinepe⁸⁷.

Le varech des rochers est l'autre ressource immémoriale du rivage. Mélangée au fumier ou à la tange, cette algue sert d'amendement. Brûlée dans des fours, elle produit des pains de soude vendus à l'industrie du verre. C'est aussi un combustible bon marché pour les populations du littoral démunies en bois. La coupe du varech contribue à l'érosion du littoral car elle est effectuée juste avant les grandes marées d'équinoxe et au moment des plus grandes tempêtes d'hiver. Or, les lamineuses amortissent le choc de la houle et leurs haptères confortent la structure des parcs ostréicoles et des digues.

1.2.3. Une ressource halieutique intensivement exploitée

De très nombreux rapports font état de la grande richesse ichtyologique et malacologique du Cotentin oriental⁸⁸. Les pêcheurs valorisent cette manne en employant une multitude de rets sur la plage et dans les rochers. Ils font aussi usage de pêcheries composées de longs filets maintenus par des piquets. Grâce à une connaissance fine des courants et des migrations annuelles et journalières, l'estran est exploité toute l'année et à grande échelle⁸⁹. Sur les grèves de Saint-Vaast, dans l'anse

⁸⁴ Arch. Dep. Calvados C4176, 1737, « Depuis Sainte Marie du Mont jusqu'à Quinéville, le rivage de la mer est bordé de marais, herbages et pâturages qui se continuent sur environ 5 lieues de longueur et demy lieue de profondeur [...] Toute cette étendue de pasturages, marais et terrains précieux n'est séparée de la mer que par une longue chaine de dunes, ensablements et digues de terre élevés au-dessus du niveau des mers vives-eaux (niveau des plus grandes marées d'équinoxe) qui la met à couvert. Sans cette élévation, ces terrains seroient entièrement submergés, se trouvant deux à trois pieds plus bas que les mers de vives-eaux. Malgré l'extrême nécessité de conserver et entretenir ces digues et élévations naturelles, on s'aperçoit tous les jours du progrès que fait la mer sans y apporter de remède. »

⁸⁵ Arch. Dep. Manche 84 ED 1 D 4 registre des délibérations de Saint Vaast, 6 février 1831.

⁸⁶ Arch. Nationales, MAR C 4 159 Mémoire sur la situation actuelle de la Hougue du 12 octobre 1739

⁸⁷ Arch. municipales de Quinéville. Lettre du 19 août 1813.

⁸⁸ Arch. Nationales MAR C 5 36-37, MAR C 4 159, 24 juillet 1731, MAR C 4 174

⁸⁹ *Ibidem*, p.134.

abritée des vents de secteur ouest à Nord Nord-Est par la pointe de Réville, se concentrent une cinquantaine de parcs à huîtres. Du XVII^e au XIX^e siècle, l'ostréiculture est le moteur économique de Saint-Vaast-la-Hougue (Annick Perrot, 2012).

Contrairement aux usages recensés précédemment, la pêche ne contribue pas directement à l'érosion du littoral mais le cumul de toutes les activités induit des « affouillements » et un piétinement répété au détriment du cordon dunaire. L'Administration Royale et les populations du littoral ont conscience que ces pratiques accélèrent l'érosion et le risque de submersion. Le règlement du 19 novembre 1765 pris dans l'amirauté de Cherbourg précise que les premières lois visant à limiter les prélèvements de pierre, sable, tange et galets remontent au 13 novembre 1705⁹⁰. Ces mesures pour la conservation du littoral seront reprises et précisées tout au long du XIX^e siècle⁹¹.

1.3. Côté terre : de nouveaux enjeux

1.3.1. Quand la submersion devient un risque non acceptable

A l'arrière du littoral, les zones humides connaissent de profondes mutations du XVII^e au XIX^e siècle. Au début de l'Epoque Moderne cet espace est sujet aux inondations,– fluviales et maritimes. En raison de ces fortes contraintes et de la faible pression agraire, leur valorisation seigneuriale est très extensive. Les terrains sableux servent à la fois de garennes et de lieu de pacage des moutons. Les vastes landes et marais tourbeux situés dans les parties les plus basses sont exploités par le « commun des habitants ». De Lestre à Sainte-Marie-du-Mont chaque paroisse vidange ces terrains bas grâce au percement de taret⁹². Ces derniers alimentent en eau des roselières et de nombreuses mares seigneuriales louées par baux pour la « tente aux oiseaux » et la capture des anguilles⁹³.

Au XVII^e siècle, le statut de ces terres change progressivement. Les zones humides considérées comme des terres vaines et vagues, deviennent des terres de conquête. A l'initiative de grands seigneurs et de Princes, les marais se couvrent de canaux et de fossés (Marcel Duval, 1963 et Pierre Gouhier, 1998). A la fin du XVII^e siècle, les tarets sont dotés d'écluses permettant une gestion plus fine de l'envoie des marais destinés à l'élevage⁹⁴. Le maillage des fossés et des canaux s'intensifie jusqu'au milieu du XIX^e siècle (Poncet, 1999). Pour accroître les surfaces mises en herbe, de grands projets de poldérisation voient le jour aux XVIII^e et XIX^e siècles le long des grèves d'Audouville et de Sainte-Marie-du-Mont dans la Baie des Veys⁹⁵.

Les attentes en matière de retombées économiques progressent à la hauteur des investissements et des coûts d'entretien. Les envahissements de la mer qui font partie du mode de gestion des marais au début de l'époque Moderne ne sont plus les bienvenus dans cette seconde valorisation hautement spécialisée et dispendieuse.

1.3.2. Un cordon dunaire « peau de chagrin »

La cote d'élévation des dunes et la proximité des amendements marins encouragent une valorisation agraire au plus proche du rivage. De Saint-Vaast à Morsaline, le cordon dunaire ne

⁹⁰ Service Historique de la Marine de Cherbourg, Fonds Groult 3631, 19 novembre 1765

⁹¹ Arch. Dep. Manche 4 Mi 115 8 Journal de Cherbourg

⁹² Les tarets sont des exutoires évacuant les eaux pluviales et fluviales vers la mer.

⁹³ Arch. Dep. Manche 356 J 182, 1585, et 356 J 64, 1661. Tente aux oiseaux: capture des oiseaux migrateurs dans les gabions seigneuriaux à l'aide de filets proches de ceux des pêcheurs.

⁹⁴ Arch. Dep. Calvados C 280 - 2Mi_577

⁹⁵ Arch. Dep. Calvados C4176 et Arch. Nationales G 213-214-218, Bn F SP13163 polders de l'ouest.

dépasse pas les 25 m de largeur au XVIII^e siècle⁹⁶. Sur la dune même, l'envahissement est notoire. Les huit redoutes qui défendent le rivage de Sainte-Marie-du-Mont à Réville favorisent l'affaissement du cordon dunaire et par mesure de conservation elles sont progressivement endiguées⁹⁷. A Saint-Vaast, les abbesses de la Sainte-Trinité de Caen, propriétaires des dunes, lotissent progressivement ces terrains au cours du XVIII^e siècle (Annick Perrot, Suzanne Noel 2014). Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, plusieurs communes cèdent leurs dunes pour créer des lotissements balnéaires. Enfin, l'accroissement du commerce et de l'approvisionnement militaire intensifie la circulation du chemin des dunes entre Barfleur et le Grand Vey.

2. L'aléa de submersion de 1700 à 1914 : chronologie, fréquence et intensité

2.1. Éléments de méthodologie

Grâce aux archives de l'Intendance de Caen, on peut suivre l'évolution de l'aléa de submersion au fil des avaries. Pour analyser l'évolution de cet aléa, nous avons utilisé l'échelle indicielle de submersion ; élaborée dans le cadre de la recherche doctorale de Suzanne NOEL. Elle croise deux échelles ; l'échelle de submersion de Météo-France (Olivier Cantat, Stéphane Costa, Pauline Letortu, 2012) et l'échelle indicielle de submersion d'Emmanuel Garnier (2009). Ces deux échelles ont ensuite été précisées en faisant une synthèse des dégâts recensés dans les sources entre 1600 et 1914 sur le littoral normand. La création de cet indice vise quatre objectifs : se doter d'une échelle adaptée à la zone géographique de l'étude (le littoral de la Manche), rendre possible une comparaison des événements dans le temps et dans l'espace, rendre ces résultats exploitables par d'autres communautés scientifiques et enfin permettre la comparaison des phénomènes d'inondation et de submersion.

Indice	Type de submersion	Gravité des dégâts occasionnés par la mer
-1	mention	Mention dans les sources, absence d'informations complémentaires.
1	faible	Dépassement faible du cordon dunaire, d'une digue ou d'un port. La digue ou le cordon dunaire sont affaiblis ou affaiblis et ils nécessitent des travaux.
2	modérée	Les eaux pénètrent sur la voie publique, d'un quai ou les terres les plus proches du littoral. La digue ou le cordon dunaire, sans avoir rompu, sont endommagés et nécessitent des travaux urgents dont le coût est supérieur à celui de l'entretien courant.
3	forte	Dégâts importants: la digue ou le cordon dunaire ont rompu. Les infrastructures d'assèchement des marais arrière-littoraux ont pu être endommagées. Des travaux lourds, devant être amortis financièrement sur plusieurs années, sont menés pour restaurer ces infrastructures défensives. Des maisons sont inondées durant plusieurs jours. Dégâts sur les cultures (submersion ou envahissement de quelques hectares par des sédiments marins) nuisent aux récoltes de l'année.
4	Très forte	La digue ou le cordon dunaire a rompu et les infrastructures d'assèchement des marais arrière-littoraux sont endommagées. Des travaux lourds sont menés pour restaurer ces infrastructures. Des maisons ont été culbutées par les flots, d'autres sont inondées durant plusieurs jours. Les dégâts sur les cultures s'étendent au-delà des 500 premiers mètres à l'intérieur des terres. Des engins et des bateaux ont été déplacés par les flots à l'intérieur des terres. Des bêtes sont mortes. Les cultures situées le long du littoral sont perdues. Les entreprises du littoral connaissent plusieurs jours de chômage. La frange côtière touchée est à l'échelle d'un département ou d'une région.
5	Exceptionnelle	Événement exceptionnel par son impact géographique, démographique et économique, pertes humaines, émeutes, disette, abandon d'habitat, ralentissement économique supérieur à une année.

Les événements de submersion sont ensuite indicés et classés chronologiquement.

⁹⁶ BnF, CPL GE C 2362, plan N°74,72,75, 1764. SHD Vincennes J 10 C 499.

⁹⁷ Arch. Dep. Calvados C4176. Les redoutes ont été construites à partir de 1686.

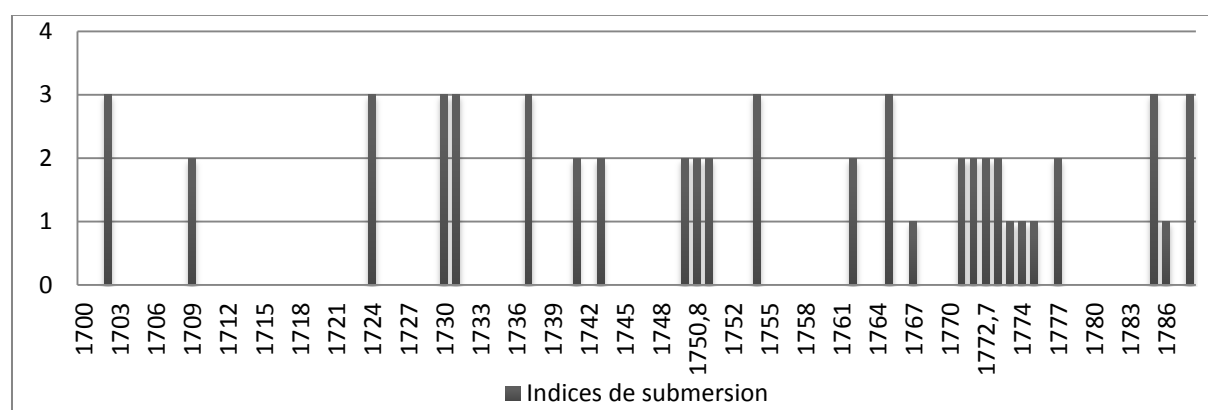
2.2. Analyse des dommages

Trente-sept événements de submersion sont recensés dont vingt-six entre 1700 et 1789.

Les deux « très fortes » submersions, indice 4, ont lieu en 1869 et 1909. En 1909, les dommages causés aux infrastructures de défense contre la mer sont estimés, de Cherbourg au Grand Vey, à 359 000 francs⁹⁸. Onze submersions « fortes », indice 3, marquent notre période d'étude. Dix-sept submersions de niveau 1 et 2 ont touché les côtes au XVIIIe et sept entre 1869 et 1912. Les affouillements constituent la première cause d'avaries sur les infrastructures du rivage⁹⁹.

Toutes les submersions arrivent par vents de secteur Est à Nord-Est. Ces vents puissants sont dévastateurs quand ils coïncident avec une forte marée et une dépression prononcée favorable à la surcote comme lors de la « forte » submersion des 1^{er}, 2 et 3 novembre 1724¹⁰⁰. 95 % des submersions surviennent durant l'automne et l'hiver et les deux tiers entre le 25 décembre et fin mars. De ce fait, les grandes marées de janvier à l'équinoxe de mars sont toujours attendues avec appréhension¹⁰¹. Côté mer, le cordon dunaire ou les digues, fragilisés par les tempêtes hivernales, rompent plus aisément. Côté terre, les cours d'eau et les canaux d'assèchement, chargés des eaux pluviales de l'hiver, peinent à s'écouler et refluent à l'intérieur des terres sous la pression de la mer.

Figure 2: chronologie des submersions (Suzanne Noël, Annick Perrot, 2014)



⁹⁸ Arch. Dep. Manche, ADM S Cherbourg 8

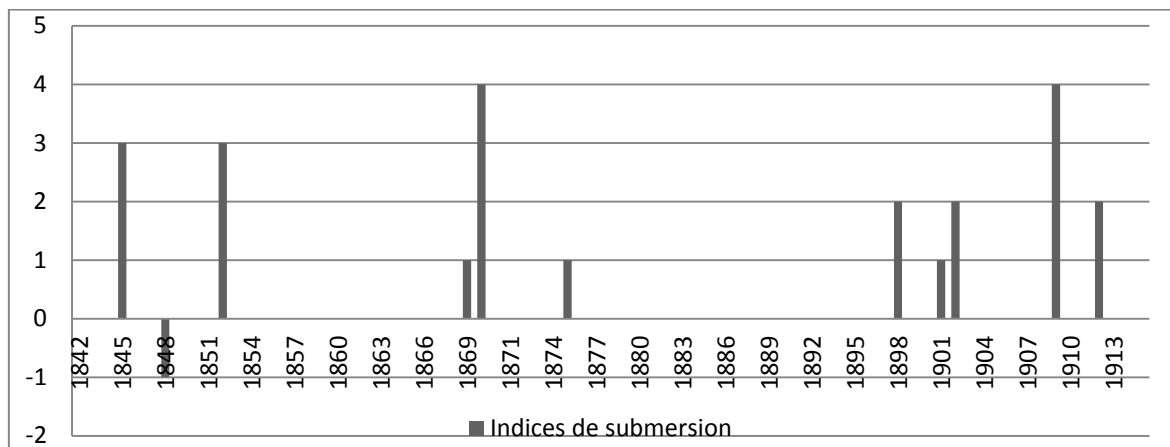
⁹⁹ Affouillement : désigne le travail de sape de la houle sur les digues qui finissent par s'éventrer

¹⁰⁰ Arch. Dep. Calvados C 4180 Service hydrographique et océanographique de la marine : <http://www.shom.fr/>.

Les 1er et 3 novembre 1724 le coefficient de marée de la haute mer est de 108 et le 2 novembre de 111.

¹⁰¹ Arch. Dep. Calvados C 4182, 12 janvier 1763,

Figure 3: chronologie des submersions entre 1842 et 1915¹⁰²



Aucune submersion ne mène à de graves crises démographiques et frumentaires comme lors des « années pourries » de 1709, 1725, 1740/1742 1768/69, 1788/1789 qui ont marqué l'histoire de la Normandie et de la France (Le Roy Ladurie, 2009 et Lepetit, 2006). Aucune submersion ne conduit non plus à la disparition de villages entiers comme dans le nord de l'Europe (Blackbourn, 2006). Aucun décès humain n'est mentionné. Les cinq submersions les plus fortes en 1724, 1750, 1852, 1869, 1909, ont cependant entraîné la mort de bêtes, la destruction d'habitations et de plusieurs kilomètres de digues, la submersion de villages de pêcheurs, la salinisation des superficies agricoles à plus de 1km des côtes. Contrairement aux sources qui traitent des inondations fluviales, les répercussions agraires à moyen et long termes sont peu détaillées. Les rapports du XVIIIe siècle font surtout état des dégâts touchant les infrastructures d'assèchement et de défense contre la mer. La Presse du XIXe siècle apporte un peu plus de détails.

3. Le choix difficilement soutenable du « tout endiguement »

Pour contrer l'érosion inquiétante du cordon dunaire et fixer cet élément mouvant peu apte à supporter des infrastructures fixes (écluses, redoutes, routes et zones de dépôts), l'endiguement du littoral semble l'ultime solution.

3.1 Le financement de la Longue Rive : la nation mise à contribution

La submersion des 1^{er}, 2 et 3 novembre 1724 de Saint Vaast et du bas pays (Saint-Vaast, Rideauville, La Pernelle, Réville, Anneville et Quettehou) marque une rupture dans la gestion de su risque de submersion Pour la seconde fois dans l'histoire de France, l'Etat Royal décide de financer une infrastructure (ici la digue *la Longue Rive* qui s'étend de Saint Vaast au pont de Saire) visant à se prémunir d'un aléa naturel en imposant vingt généralités françaises¹⁰³. L'endiguement de 1.5 km de rivage est estimé à 130 300 livres soit dix fois la taille des communes concernées¹⁰⁴. Dès 1731 la Longue Rive subit les premiers assauts de la mer. Le coût des avaries est estimé à 77082 livres¹⁰⁵.

¹⁰² La plus grande partie des archives des Ponts et Chaussées ont été détruites pendant la Seconde Guerre Mondiale. De fait, la chronologie du XIXe siècle est probablement très incomplète. Elle ne repose que sur la Presse (les premiers journaux exploitables paraissent vers 1840) et quelques archives municipales et syndicales. Etrangement les délibérations municipales de cette côte font rarement mention de submersion à l'exception de celles de 1852 et 1909.

¹⁰³ La généralité est une circonscription administrative de l'Ancien Régime administrée par un représentant de l'Etat Royal : l'intendant. La superficie de la généralité de Caen est proche de la région Bas-Normande.

¹⁰⁴ Arch. Dep. Calvados C4180, Arrêt du Conseil du 2 avril 1726

¹⁰⁵ Ibidem, arrêt du Conseil du 24 mars 1733

Par la suite *la Longue Rive* s'accroît au gré des assauts de la mer mais aussi des moyens financiers. Les intendants refusent en effet de reconduire le mode de financement choisi en 1724 malgré les arguments des ingénieurs des Ponts et Chaussées et des subdélégués vantant tantôt la richesse céréalière du val de Saire et l'intérêt militaire de la digue, tantôt son utilité pour l'assèchement des marais¹⁰⁶. Des plans de financement et d'entretien à six ans puis neufs ans voient le jour. En 1741, les taillables de 25 paroisses contribuent au financement de la digue et le coût d'entretien de la toute nouvelle digue est estimé à 1800 livres sur 6 ans. En 1778, 36 paroisses sont mises à contribution¹⁰⁷. Avec l'expérience des avaries précédentes, le budget prévisionnel des investissements et de l'entretien est établi à 36180 livres sur trois ans et à 21499 pour l'entretien des 6 années suivantes (Suzanne-Noël, Annick-Perrot, 2014)¹⁰⁸.

3.2 De Quinéville à Sainte Marie du Mont : l'entretien des digues est vécu comme une corvée

Dès 1692, dans le cadre d'un financement exclusivement privé, propriétaires et bénéficiaires contribuent aux travaux d'assèchement et de « dicquerie » (endiguement du rivage). Dès que le cordon cède, on endigue. En 1737, un esprit de fronde règne parmi les propriétaires qui ont la charge financière des digues et du transport des matériaux. Pour contraindre les récalcitrants, l'intendant envoie une brigade de maréchaussée deux fois par semaine. Il doit renoncer à la corvée de route pour tous ceux qui entretiennent les digues. Malgré cet acquis reconduit régulièrement, le XVIII^e siècle est parcouru de plaintes et de demandes de subventions telles celles de 1753 :

« Supplient humblement les propriétaires de la paroisse de Saint Marie du Mont sur le bord de la mer, Et vous remontrent que pour conserver leurs fonds et les défendre contre la mer ils ont été dans la nécessité de construire des digues [...]. La construction et l'entretien de ces ouvrages ont couté depuis 30 ans plus de 90000 livres. Les suppliants, épuisés par des dépenses de ces ouvrages et les voyant détruits en la plus grande partie au commencement de l'année 1751. La mer répandue sur leurs fonds, il eurent recours à Monseigneur le Contrôleur Général. »¹⁰⁹

3.3 Fin XIX^e siècle : vers un financement public/privé des infrastructures de défense contre la mer

Durant et après la Révolution, le cap du tout endiguement est maintenu. Pour faciliter le financement des ouvrages et aussi mener des projets plus cohérents, les préfets encouragent fortement les propriétaires des bas-fonds à se regrouper en syndicat. Le syndicat de Sainte-Marie-du-Mont, créé en 1830 et celui de Ravenoville en 1842 sont les premiers de la Manche. Le financement des ouvrages de défense contre la mer reste ainsi privé mais en raison du caractère d'utilité publique des syndicats, le subventionnement est possible. Comme les intendants, les préfets supervisent ces structures et mettent l'ingénierie du corps des Ponts et Chaussées à disposition. Les arrêtés en matière de prélèvements marins (pierre, granulats, amendements) sont de plus en plus restrictifs. Ils ne s'appliquent cependant pas aux travaux militaires de la rade de Cherbourg ni aux entreprises chargées de poldériser la baie des Veys¹¹⁰. A la fin du XIX^e siècle, le montant des avaries dépasse de très loin les budgets établis après la réhabilitation des digues de 1869. Une seconde rupture intervient alors, l'Etat prend progressivement l'habitude de subventionner les dommages comme en 1852, 1869, 1898, 1902, 1909 et 1912¹¹¹.

¹⁰⁶ Ibidem, Lettre de l'intendant du 3 juillet 1737

¹⁰⁷ Arch. Dep. Calvados C 1481 et 1482 : plan de financement de la *Longue Rive*

¹⁰⁸ La digue a subi de graves avaries en 1730, 1731, 1739, 1741, 1750, 1755, 1762, 1767, 1771, 1777.

¹⁰⁹ Arch. Dep. Calvados C4176, lettre du syndic de Sainte-Marie-du-Mont à l'intendant Fontette – 8 juin 1753

¹¹⁰ J. Morier, G. Villers (1858), Etude sur l'origine, les transformations, le dessèchement et la mise en culture de la baie des Veys, Caen, A. Hardel, 34p.

¹¹¹ Arch. Dep. Manche 7 S Cherbourg 8. Archives du syndicat de Saint-Marcouf, Ravenoville, Fontenay sur Mer et Quinéville (consultable à la mairie de Ravenoville). Registre des délibérations du conseil municipal de Ravenoville et de Sainte Marie-du-Mont consultables en mairie.

Conclusion

Au XVI^e siècle, les ressources du rivage paraissent illimitées. Les grèves sont perçues comme un réservoir dans lequel sont prélevés de multiples ressources: faune, flore, amendements marins et matériaux de construction. En raison de l'augmentation de la population et du développement du commerce, le cordon dunaire qui protège de riches marais littoraux est assailli d'usages liés au pacage, au dépôt et à l'accès au rivage. À compter du XVIII^e siècle, l'extension des bourgs maritimes, des fortifications et des espaces agraires se fait systématiquement au détriment du cordon dunaire, principal obstacle à « l'envahissement de la mer ». L'administration est informée très tôt de l'impact de ces pratiques sur la conservation du rivage et prend des mesures mais l'érosion de l'estran est analysée uniquement « côté mer ». Les facteurs, « côté terre », de son démaigrissement restent complètement occultés jusqu'au XX^e siècle.

Or les nouvelles modalités de valorisation des marais et de l'estran ne sont compatibles ni avec la diminution hivernale du cordon dunaire ni avec les incursions de la mer. De graves dommages surviennent au début du XVIII^e siècle et encouragent l'administration royale à soutenir de vastes programmes d'endiguement. Avec le temps, les dégâts sont de plus en plus lourds, et la participation financière de l'état et des collectivités s'accroît mais la politique du tout endiguement est maintenue jusqu'au XX^e siècle. En 1895, un ingénieur affirme que l'élévation des digues et leur consolidation restent la seule option. « Voilà, [conclut-il] comment on peut pendant plusieurs siècles se défendre contre cet ennemi qui ne cesse d'être en guerre contre nous! »¹¹².

Les problèmes d'hier restent par conséquent ceux d'aujourd'hui. Le 14 novembre 2013, le président de l'association syndicale des digues et bas-fonds de Ravenoville, Saint-Marcouf, Quinéville et Fontenay-sur-mer a annoncé sa démission faute de moyens et de solutions pour entretenir les 6.5 km de digues « assis » sur 7 km de rivage¹¹³.

Mes remerciements à Emmanuel Garnier, mon directeur de thèse, Olivier Cantat, Wilfried Pitel, et Francette Noël.

Bibliographie références

- Antoine J.-M., Carozza J.-M. (2012), « Aléas, vulnérabilités et adaptations des sociétés du passé », in *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, Toulouse, Presses universitaires du Mirail, 130 p.
- Barré E. (1990), *Deux aspects de la vie maritime du Cotentin au Moyen-âge*, mémoire de DEA sous la direction de Lucien Musset, Université de Caen, 133p.
- Blackbourn D. (2006), *The conquest of nature, water landscape and the making of Modern Germany*, Norton et Company, New-York, 2006, 466p.
- Billard C. (2012), *Terre de Pêcheries, 4000 ans d'archéologie et d'histoire sur le littoral de la Manche*, Bayeux, OREP, 128p.
- Bridrey E. (1907, 1909, 1912), *Les Cahiers de doléances du bailliage de Cotentin pour les États généraux de 1789*, Imprimerie Nationale, Paris, 3 vol., 808p., 806p., 656 p.
- Cantat O., Costa S., Letortu P. (2012) « Les submersions marines en Manche orientale : approche inductive et naturaliste pour la caractérisation des facteurs responsables des inondations », in *Climatologie*, Aix-en-Provence, vol. 9, p. 31-59.
- Cantat P., Costa S., Letortu P. (2012) « Les submersions marines en Manche orientale : approche inductive et naturaliste pour la caractérisation des facteurs responsables des inondations », in *Climatologie*, Aix-en-Provence, vol. 9, 2012, p. 39.
- Cantat O., Costa S., Letortu P., Savouret E. (2012), « Le rôle des facteurs atmosphériques et marins dans la genèse des submersions côtières. Exemple en Manche orientale, de Barfleur au Tréport », in *Actes des Journées de la Commission Climat et société du CNFG*, Liège, p.31-46.

¹¹² Annuaire des cinq départements de la Normandie, Coutances, 51^e année, 10 juillet 1885.

¹¹³ Ouest France, Canton de Sainte-Mère Eglise, 14 novembre 2013.

- Cantat O., Costa S., Delahaye D., Gamas L., Lemaître M., Pirazzoli P.-A. (2004), « Vents forts et submersions de tempête en Manche orientale : analyse météo marine sur la période historique récente » In « *Actes du Colloque de l'Association Internationale de Climatologie : « Climat, mémoire du temps. Les relations climat espace société »* », p.1-4.
- Carpon A. (1817), « Notice topographique sur Saint-Vaast, les îles Saint-Marcouf, Tatihou et le Fort-la-Hougue (Manche) », in *Recueil de mémoire de médecine, de chirurgie et de pharmacie militaires*, Paris, t.III, p.140-161
- Dauphiné A. (2003), *Risque et catastrophes; Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, Paris, édition U, 288p.
- Delisle L. (1903), *Études sur la condition de la classe agricole et l'état de l'agriculture en Normandie au moyen-âge*, publié par la Société libre d'agriculture, sciences, arts et belles-lettres de l'Eure, Paris, H. Champion, 758p.
- Desarthe J. (2014), « **les sociétés bretonnes face aux tempêtes XVIe-XIXe siècles** » in *Les littoraux à l'heure du changement climatique*, Paris, Les Indes savantes, p. 35-57. [<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00981458>]
- Desarthe J. (2013), *Les caprices du bon vieux temps, Climat et sociétés dans l'ouest de la France (XVIe-XIXe siècle)*, Mémoire de thèse en histoire sous la direction de Vincent Milliot et d'Emmanuel Garnier, Université de Caen, Paris, Hermann, impr. 338p.
- Foisil M. (1993), *Le journal du sire de Gouberville*, les Éditions des Champs, Bricquebosq, 3 vol., 878p.
- Garnier E. (2009), *Le renversement des saisons, climats et sociétés en France (vers 1500-vers 1850)*, mémoire d'étude pour l'obtention de l'habilitation à Diriger des recherches, sous la direction de François Vion-Delphin, Christian Pfister Université de de Franche Comté, 2009, p.96
- Garnier E., Desarthe J. (2013), 'Cyclones and societies in the Mascarene islands 17th-20th centuries', *American Journal of Climate Change*, n°2, p.1-13.
- Garnier E., Desarthe J. (2012), « Visions croisées de l'historien et du courtier en réassurance sur les submersions. Recrudescence de l'aléa ou vulnérabilisation croissante ? », In *Gestion des risques naturels, Leçons de la tempête Xynthia*, Versailles : Quae, p. 105-128. [<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00737535>]
- Garnier E. (2013), « Histoire : entre modification, soumission et appropriation du milieu ». In *Le développement durable à découvert*, CNRS Editions, p.30-31.
- Garnier E. (2012), « Une histoire relique ou un retour d'expérience ? La contribution de l'historien au risque littoral de submersion » in *Séminaire pluridisciplinaire "Villes" de la MRSH*, 27 novembre 2012. http://www.iwff-fim.com/wp-content/uploads/2013/03/IM2013_colloque_Garnier.Pdf.
- Gouhier P. (1998), *L'intendance de Caen en 1700 : édition critique des mémoires rédigés sous la dir. de Nicolas-Joseph Foucault, pour l'instruction du duc de Bourgogne*, Paris, Éd. du Comité des travaux historiques et scientifiques, 575 p.
- Larsonneur C. (1971), *Manche centrale et baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles*, thèse ès-science naturelles, Université de Caen, 394 p.
- Lepetit D. (2006), *L'histoire du climat en Normandie sous l'Ancien Régime*, Mémoire de maîtrise en histoire sous la direction d'Emmanuel Garnier, Université de Caen, 178p.
- Le Roy Ladurie E. (2004, 2006, 2009), *Histoire humaine et comparée du climat*, Paris, Fayard, Tome 1,2,3, 287p., 739p., 611p.
- Lamb H.-H. (1991), *Historical Storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe*, Cambridge University Press, 204 p.
- Noël S., Perrot P. (2014, à paraître), « Enjeux, vulnérabilités et conservation du littoral au XVIIIe siècle. Histoire de l'aléa de submersion sur la côte Est du Cotentin », *Annales de Normandie*.
- Paskoff R. (2007), *L'érosion des plages, les causes, les remèdes*, Paris, Institut Océanographique, 184p.
- PierreJ.-I.1867), *Etudes sur les engrais*, Auguste Guoin, p.25-26.
- Perrot A. (2011), *Une société littorale au XVIIIe siècle Saint- Vaast la HOUGE et la mer*, mémoire de Master 2 en histoire sous la direction d'Alain Hugon, Université de Caen, 146p.
- Poncet F. (1999), *L'Élevage dans la région d'Isigny-sur-Mer (fin XVIIe siècle-1840)*, mémoire de maîtrise en histoire sous la direction de Jean-Marc Moriceau, Université de Caen, 291p.

Les sociétés antillaises face aux événements extrêmes

L'exemple des cyclones et des submersions (XVII^e - XX^e siècle)

Jérémy Desarthe¹

1. Caisse Centrale de Réassurance

31 rue de Courcelles, 75008, Paris, France

jdesarthe@ccr.fr

RESUME.

La question des événements extrêmes et du changement climatique est aujourd'hui prégnante. Par son rôle au sein du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, la Caisse Centrale de Réassurance, en associant des historiens et des modélisateurs, cherche à consolider ses modèles d'aléas (chronologie, fréquence) et de dommages (inventaires, coûts). Les territoires des Antilles françaises (Guadeloupe et Martinique) sont aujourd'hui exposés à différents risques et en particulier aux cyclones et aux submersions. Dans cette perspective, les informations collectées dans les archives offrent la possibilité d'analyser en détail ces phénomènes. Cette présentation s'articule alors autour de l'étude de la sévérité de ces phénomènes, de leurs impacts sur les sociétés et enfin des modes de gestion mis en œuvre par celles-ci.

ABSTRACT.

The issue of extreme events and climate change is now important. Through its role in the French system concerning natural disasters, CCR aims at consolidate its hazard and damage models in order to anticipate and foresee the costs of losses and the amount of compensations generated. Martinique and Guadeloupe are particularly exposed to natural hazards especially hurricanes and their corollaries – flooding and sea surges. In this context, archives are an essential asset for understanding hurricanes and their interactions with society. This presentation addresses the study of their severity, their impacts on societies and finally management methods implemented by them.

MOTS-CLES : CYCLONES, SUBMERSIONS, ANTILLES, RISQUE, VULNERABILITE, HISTOIRE

KEYWORDS: HURRICANES, SEA SURGE, ANTILLES, RISK, VULNERABILITY, HISTORY

1. Introduction

La question des événements extrêmes et du changement climatique est aujourd'hui prégnante (GIEC, 2014). Le coût croissant des catastrophes naturelles et la difficulté d'estimer leur période de retour complexifient l'analyse de l'exposition. Par son rôle au sein du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, la Caisse Centrale de Réassurance (CCR), en associant des historiens et des modélisateurs, cherche à consolider ses modèles d'aléas (chronologie, fréquence) et de dommages (inventaires, coûts) pour anticiper et prévoir les coûts et l'indemnisation des sinistres¹¹⁴.

Les territoires d'outre-mer apparaissent vulnérables face à la multiplicité des aléas et des risques (cyclones, séismes, éruptions volcaniques etc.) mais également en raison de littoraux particulièrement urbanisés (ONERC, 2012). Dans cette perspective, la Martinique et la Guadeloupe constituent un observatoire privilégié pour l'étude des événements extrêmes et en particulier des cyclones (Géode, 1999 ; 2006). Dans cette région, la période cyclonique s'étend entre les mois de juillet et novembre. Au-delà de la violence des vents, les cyclones appelés aussi « ouragans » dans cette région s'accompagnent fréquemment de fortes précipitations engendrant des phénomènes de crues rapides ainsi que des submersions marines. Ces dernières résultent à la fois de la montée du niveau de la mer liée à la baisse de la pression atmosphérique (surcote) et aux effets du vent sur la mer (houle).

Dès lors, l'analyse de ces deux phénomènes doit permettre d'appréhender l'exposition des biens et des personnes aux cyclones. Par leur intensité, les cyclones occasionnent de nombreux dommages qui affectent le fonctionnement des sociétés. À travers l'analyse de différents enjeux, il est possible d'appréhender leur vulnérabilité. Pour saisir l'évolution de celle-ci, il convient également de s'attarder sur les mesures de gestion du risque mises en œuvre afin de comprendre comment les sociétés ont composé avec ces phénomènes.

2. L'exposition des sociétés aux événements extrêmes

Les archives administratives comme la correspondance des gouverneurs, les rapports des ingénieurs ou encore les fonds communaux permettent de recueillir des informations sur les cyclones et les phénomènes corollaires (submersions, inondations). Continues depuis l'arrivée des français, les archives permettent alors de dresser une chronologie depuis 1635. Ainsi 94 systèmes dépressionnaires ont été recensés dont 24 se sont accompagnés de submersions. Pour évaluer leur intensité, l'échelle Saffir-Simpson a été utilisée. Elle a été développée en 1969 par l'ingénieur Herbert Saffir et le météorologue Robert Simpson pour estimer le potentiel d'endommagement des cyclones en fonction de la vitesse des vents¹¹⁵. Ainsi, il est possible d'attribuer un indice en fonction des informations collectées et des dommages aux bâtis ou aux cultures (Figure 1) (cf Blong, 2003 ; Garnier et Desarthe, 2013).

¹¹⁴ Loi du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles

¹¹⁵ On parle de cyclone quand la vitesse des vents est supérieure à 119 km/h, il est alors de classe 1. La classe 2 correspond à des vents supérieurs à 154 km/h, la classe 3 à 178km/h ; classe 4 à 209 km/h ; classe 5 à 252 km/h. Pour les phénomènes inférieurs à 119 km/h, on parlera de dépression ou tempête tropicale.

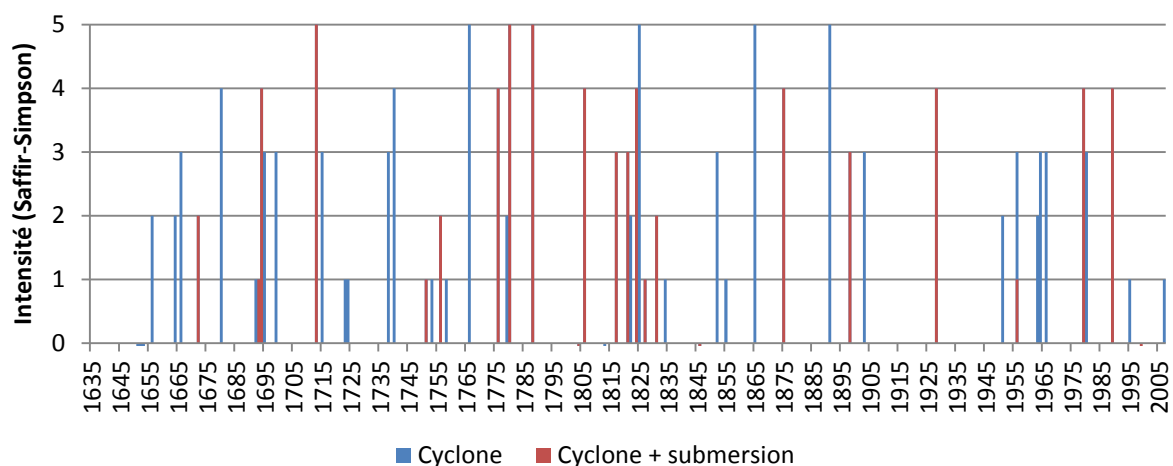


Figure 1 : Cyclones et submersions dans les Antilles françaises depuis 1635

Dès lors, on dénombre 56 cyclones pour l'ensemble des Antilles françaises, 23 touchent la Martinique et 22 la Guadeloupe et enfin 11 sont conjoints aux deux îles. La construction de cette chronologie permet d'estimer, si on la considère comme exhaustive, la fréquence de survenance d'un événement et donc sa période de retour, pour une intensité donnée. De par la méthode d'estimation de l'intensité Saffir-Simpson basée sur les dommages recensés sur les îles, il est possible qu'un événement majeur mais éloigné des Antilles soit classé dans une classe plus faible. Ces périodes de retour sont ainsi des approximations qu'il convient d'exploiter avec précautions.

Pour un phénomène de classe 5, la période de retour est de 50 à 55 ans dans les Antilles. La période de retour d'un cyclone est d'environ 7 ans et d'environ 4 ans pour une dépression ou tempête tropicale. Pour chacune des îles, les périodes de retour des tempêtes et dépressions tropicales sont similaires avec 7 ans pour la Martinique et 8 pour la Guadeloupe. De même pour les cyclones avec 11 et 12 ans. En revanche, pour les cyclones définis comme majeurs (classe 3 à 5), les périodes de retour divergent avec respectivement 22 et 19 ans. Avec 21 submersions, 37% des cyclones aux Antilles s'accompagnent de dommages liés à la mer soit une période de retour de 13 ans.

Dans les faits, la figure 1 met en évidence les périodes significatives. Ainsi, au XVIII^e siècle, les Antilles ont affronté 3 cyclones de classe 5 (1713, 1766 et 1780) et 3 de classe 4 (1740, 1776 et 1788). Cette répartition de l'activité cyclonique corrobore les études menées à l'échelle des Caraïbes (Caviedes, 1991 ; Mann *et al.*, 2009). Le 11 octobre 1780, aux dommages causés par le vent s'ajoutent les conséquences des submersions qui touchent différentes communes de la côte-sous-le-vent de Martinique¹¹⁶. À Saint-Pierre, le Fort construit au milieu du XVII^e siècle ne résiste pas aux vagues de plus de 8 mètres. Les communes du Prêcheur et du Carbet sont également touchées par les assauts de l'océan. Le même jour les vagues frappent les côtes de la Basse-Terre en Guadeloupe. Quatre ans après le dernier cyclone, les Antilles sont une nouvelle fois meurtries obligeant les autorités à agir rapidement en supprimant les droits de douanes et en suspendant la levée de l'impôt. En comparaison des siècles précédents, le XX^e siècle est relativement épargné avec 14 systèmes dépressionnaires dont 11 cyclones. Parmi les plus violents (échelle 4) figurent ceux de 1928, 1979 et 1989 qui se caractérisent également par des submersions.

¹¹⁶ Arch. Nat. Outre-Mer, COL C8A 79 n°10

3. Dommages et vulnérabilités

L'analyse des pertes et des dommages sur les différents enjeux permet d'appréhender la vulnérabilité des sociétés et des territoires (Thouret et D'Ercole, 1996 ; Vallette et Cartier, 2012). À partir des informations collectées, il est possible d'évaluer l'ensemble des dysfonctionnements qui affectent les populations.

3.1. Les enjeux économiques

Essentiellement tournée vers l'agriculture, l'économie antillaise subit de plein fouet les effets du vent. Outre la perte de la production, la destruction des arbres et des plants est susceptible d'impacter durablement l'économie. Par son importance jusqu'à la fin du XIX^e siècle, l'activité sucrière est particulièrement exposée. En effet, outre les dommages aux récoltes et la destruction des plantations, le vent détruit une grande partie des infrastructures de production. Dans la nuit du 5 au 6 septembre 1776 par exemple, les vents liés au passage d'un cyclone à proximité de la Guadeloupe concentrent leurs effets sur Grande-Terre. Ainsi, outre la perte des récoltes de cannes estimée à 30%, 88 % des moulins de Saint-François et 52 % de ceux de l'Anse-Bertrand sont détruits paralysant durablement l'économie et posant rapidement des problèmes de subsistance. Le cyclone est également susceptible d'accentuer des difficultés économiques préexistantes. En effet, la seconde moitié du XIX^e siècle est marquée par une profonde crise sucrière liée à la concurrence du sucre de betterave et du sucre cubain. (cf Butel, 2012).

À compter du début du XX^e siècle, la culture de la banane devient de plus en plus importante. Après le cyclone de 1928, elle fait l'objet d'une forte spéculation et le développement d'une flotte commerciale dans la décennie suivante l'érige en principal produit d'exportation. Ainsi, lors des cyclones de la seconde moitié du XX^e siècle, elle se trouve en première ligne sur le front cyclonique. En 1956, sur l'île de la Guadeloupe ce sont près de 5500 hectares qui sont détruits ou partiellement détruits par le vent¹¹⁷. De même en Martinique, 80% des bananeraies sont endommagées en 1963 absorbant ainsi 61% des aides agricoles de secours¹¹⁸. Lors du passage de David en 1979, la perte de 95% des cultures de bananes se traduit par un coût de 163 millions de francs pour les pertes de récoltes et de 145 millions de francs pour celle des bananiers. Au total la filière bananière concentre 68% des pertes agricoles. La production est stoppée pour une période d'environ huit mois impliquant le chômage d'environ 10 000 personnes dans les centrales d'emballage¹¹⁹.

L'essor du tourisme dans la seconde moitié du XX^e siècle accroît un peu plus la vulnérabilité des sociétés antillaises. Situées à proximité des côtes, les hôtels sont alors exposés aux forces du vent et de la mer. En 1979, la Martinique subit les effets d'une forte houle qui endommage une partie des infrastructures touristiques et des plages. À l'Anse-Mitan dans le secteur des Trois-Ilets, la mer a envahi la côte sur une profondeur de 9 mètres détruisant les infrastructures touristiques mais aussi les ouvrages de protections. Au total, les dommages sur le tourisme sont estimés à 20 millions de francs répartis entre la destruction des plages pour 7 millions de francs et celle des infrastructures pour 13 millions de francs¹²⁰.

3.2. Dommages aux maisons

Outre l'impact sur la vie économique, les populations doivent également composer avec l'endommagement de leur habitat. Le bâti antillais se caractérisait par une utilisation importante du bois et de la paille notamment dans la construction de cases. Toutefois, ce type de bâtiment ne

¹¹⁷ Arch. Dép. Guadeloupe, Série continue, 1736-1738

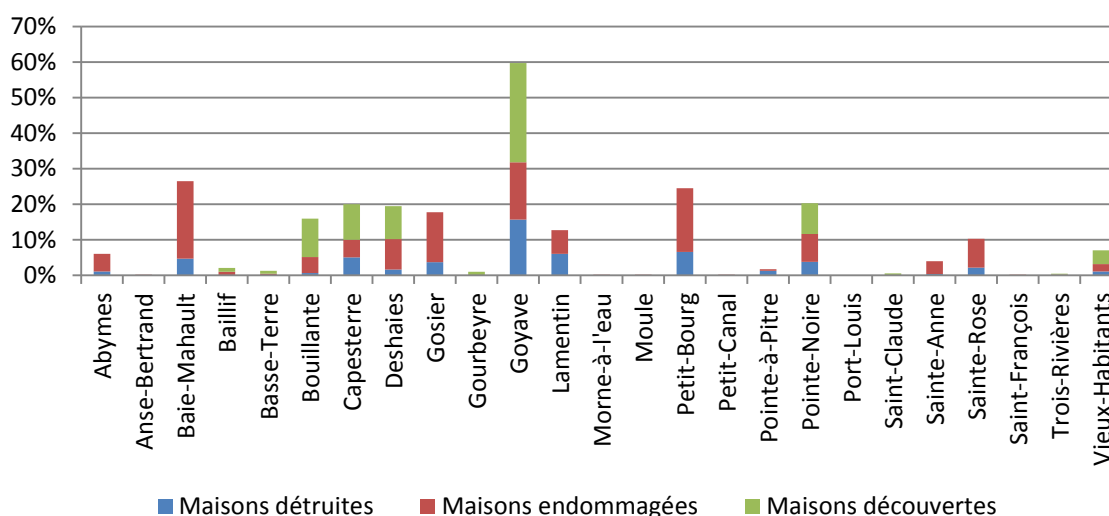
¹¹⁸ Arch. Dép. Martinique, 1042 w 115

¹¹⁹ Arch. Dép. Martinique, 1158 w 101-103

¹²⁰ Arch. Dép. Martinique, 1158 w 104

représentait plus que 3,6 % des habitations en Guadeloupe et 1,1 % en Martinique lors du recensement de 2007 (Calvet, Grislain-Letrémy, 2011). En l'état actuel des recherches, il est difficile de proposer une évolution de la nature du bâti dans les territoires d'outre-mer. Pour autant, dans la perspective d'évaluer le coût des sinistres, il est possible d'analyser la nature des dommages occasionnés lors des cyclones. Le 11 août 1956, Betsy (classe 3) frappe la Guadeloupe. Rapidement, le gouverneur fait dresser des inventaires détaillés sur la nature des pertes dans chaque commune. Les maisons touchées sont alors classées en trois types : « maisons détruites », « maisons endommagées » et « maisons découvertes ». A partir des données du recensement, on peut mesurer pour chaque commune le taux de maisons sinistrées (Figure 2).

Figure 4 : Dommages aux maisons lors du cyclone Betsy (1956) en Guadeloupe



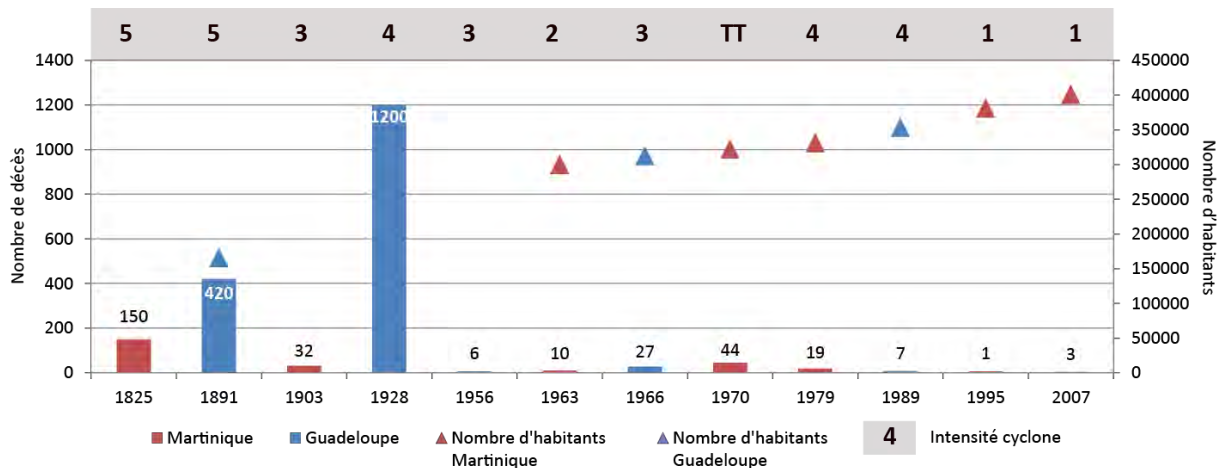
Les communes exposées au vent sont les plus touchées. Ainsi à Goyave, Baie-Mahaut, Petit-Bourg et Pointe-Noire plus de 20% des maisons sont endommagées. Pour Goyave, cette proportion atteint 60% et s'explique en grande partie par la destruction des toitures (27,9%). Particulièrement éprouvée, cette commune concentre également la plus grande proportion de maisons détruites. Les rapports d'inspection signalent qu'une grande partie des maisons endommagées dans cette commune sont constituées de cases ouvrant ainsi la voie à une nouvelle réflexion sur le choix des matériaux de construction¹²¹.

3.3. Mortalités et enjeux sociaux

Par leur violence, les cyclones se caractérisent également par une mortalité. Toutefois, les registres paroissiaux ne se font pas l'écho d'une forte surmortalité ou de l'émergence d'une épidémie au lendemain du cyclone. Cependant, les rapports des gouverneurs puis des préfets font fréquemment états des victimes (Figure 3).

¹²¹ Arch. Dép. Guadeloupe, Série Continue 1738

Figure 5 : Nombre de décès causés par les cyclones aux Antilles françaises



En dépit des moyens de prévention, l'aléa cyclonique demeure encore aujourd'hui à l'origine de nombreux décès. La mortalité dépend de la sévérité mais aussi du nombre de personnes exposées. L'essentiel des décès résulte de la chute de matériaux, de l'effondrement des maisons ou encore de l'imprudence. En 1891, la Martinique se trouve sur le passage du cyclone (classe 5) et subit de plein fouet les assauts répétés du vent qui détruit une grande partie du bâti ensevelissant de nombreux habitants, au total 420 personnes périssent. Le cyclone de 1928 (classe 4) reste le plus mortifère avec 1 200 personnes emportées en Guadeloupe. Avec l'accroissement de l'utilisation de matériaux plus résistants et des systèmes d'alertes plus efficaces, la mortalité continue de baisser tout au long du XX^e siècle pour atteindre 7 en 1989 avec Hugo (classe 4) puis 3 avec Dean (classe 1) en 2007.

Confrontées à la mort de leurs proches, les populations se retrouvent également dépourvues de ressources. Privés de maisons et d'emploi, elles sont alors dans l'incapacité de subvenir à leurs besoins. En 1928, 10% des guadeloupéens se retrouvent directement sinistrés par la perte ou l'endommagement de leur maison. De plus, la destruction des ressources alimentaires provoquent une hausse des prix qui entraînent de nombreux troubles sociaux. À Pointe-à-Pitre, plusieurs pillages ont lieu obligeant le gouverneur à faire intervenir la force publique. L'intervention jugée trop lente de la métropole fait ressurgir la rumeur d'une cession des Antilles aux États-Unis en contrepartie des avantages obtenus lors du traité de Versailles de 1919¹²².

4. La gestion des événements et des risques

L'étude de la gestion des événements permet de replacer le phénomène et ses dommages dans son contexte sociétal. En effet, les politiques et mesures mises en œuvre au cours de la période sont susceptibles d'éclairer les recherches sur l'évolution de la vulnérabilité. Elles ont potentiellement contribué à l'augmentation ou la réduction des dommages et des dysfonctionnements (André *et al.*, 2008).

4.1. Prévention et préparation

Dès le début du XVIII^e siècle, un système de prévention et d'alerte est attesté dans les Antilles. Le gouverneur prend chaque année un arrêté pour annoncer au début de juillet, l'arrivée de l'« hyvernage » et de la saison cyclonique. Cette mesure vise essentiellement à protéger les

¹²² Arch. Nat. Outre-Mer, Guadeloupe, TP, Carton 1157, dossier 2

infrastructures portuaires nécessaires à la vie économique. Les navires ont alors interdiction d'appareiller pendant la période cyclonique. Le ralentissement des activités commerciales nécessite alors de constituer une réserve de nourriture suffisante. Dès le printemps, les populations plantent du manioc sur les terres disponibles.

À côté de ces mesures de prévention, la prévision météorologique permet d'annoncer l'imminence d'une dépression. Les observations barométriques réalisées par les capitaines dans les différents ports de la Guadeloupe et de la Martinique permettent d'avertir les populations. Dès la baisse significative du baromètre, les autorités sont prévenues et avertissent par l'intermédiaire des forces de l'ordre et des milices l'ensemble des communautés. À la fin du XIX^e siècle, l'arrivée du télégraphe favorise l'émergence d'un réseau de surveillance à l'échelle de la Caraïbe permettant ainsi une meilleure prévision des cyclones. L'alerte déclenchée, les autorités prennent une série de mesures. Le capitaine du port doit avertir, par l'intermédiaire d'un fanal, les bateaux de regagner le port pour s'amarrer. À la demande des maires, les populations se préparent et font rapidement des réserves (eau, nourriture). Elles doivent également vérifier l'ensemble des contrevents et fenêtres. Devant le risque de submersion, les populations du littoral sont appelées à quitter leur maison et à trouver refuge sur les hauteurs.

En dépit de la mise en œuvre de ces mesures, le cyclone de 1928 entraîne la mort de près de 1 200 personnes ce qui en fait l'un des plus meurtriers depuis le XVIII^e siècle. Après ce traumatisme, un cadre normatif regroupant l'ensemble des mesures et pratiques est mis en place. Deux niveaux d'alerte sont alors prévus. Le premier averti les autorités de la présence d'un cyclone à proximité de l'île. Le second avis rend public l'arrivée du cyclone auprès des populations et des différentes administrations. Ces différentes mesures font l'objet d'une diffusion par voie d'affichage dans la presse régionale dès le début de la saison cyclonique. À partir de 1952, le nouveau cadre réglementaire des plans ORSEC reprend l'ensemble de ces mesures¹²³.

4.2. Le jour d'après : secours et expertises

Pour éviter que l'aléa se transforme en crise sociale profonde, le principal objectif au lendemain de l'événement est de fournir des secours aux populations et de relancer les activités. Là encore, les archives soulignent l'existence précoce de réseaux de solidarité entre les différentes îles. S'il est de coutume que la Martinique, la Guadeloupe mais aussi Saint-Barthélemy s'entraident, un plus large réseau de secours s'organise au lendemain des cyclones. Les autorités des différentes îles expédient des secours sous forme d'argent, de nourriture ou de fourniture de matériel. Ces solidarités s'expliquent en partie par l'interdépendance économique de ces îles. À l'échelle locale, les solidarités s'organisent pour reconstruire les différentes cases. Pour assurer l'approvisionnement en matériaux et aussi en nourriture, les droits de douanes sont fréquemment levés au lendemain du cyclone permettant ainsi de relancer au plus vite les activités économiques.

Un autre levier de la politique de gestion des risques est l'aide financière apportée par la métropole. Cette mesure est systématiquement mise en œuvre au lendemain d'une calamité naturelle depuis le XVII^e siècle (Desarthe, 2013, 2014). Pour les outre-mer, elle s'explique en grande partie par leur importance dans l'économie du pays. Outre les dégrèvements d'impôt accordés aux populations, des crédits sont généralement octroyés aux territoires sinistrés sous la forme de dons directs ou de prêts. Une part d'entre eux est consacrée au secours des plus démunis et l'autre aux collectivités locales afin de procéder aux réparations les plus urgentes. Les routes constituent alors la principale des priorités. Lors du passage d'Édith en 1963, le coût des réparations est estimé à 250 millions d'anciens francs et le pouvoir central dégage une enveloppe de 100 millions pour procéder aux réparations.

¹²³ Arch. Dép. Martinique, 1042 W 115

Au lendemain de la catastrophe, plusieurs expertises sont réalisées pour tenter de réduire durablement la vulnérabilité des sociétés. Ainsi, à compter de la fin du XIX^e siècle, un nouveau dispositif de secours apparaît : l'assurance (Ewald, 1990). En 1907, au lendemain de plusieurs séismes et quatre ans après le cyclone, une campagne de sensibilisation voit le jour dans l'ensemble de la Caraïbe. Déjà présente depuis longtemps dans le commerce maritime, l'objectif est alors de proposer une assurance contre les dommages causés au bâti et aux récoltes (à l'exception de la culture de la banane) par les cyclones mais aussi les séismes et les éruptions volcaniques. La pénétration de l'assurance dans les Antilles françaises est faible avec encore aujourd'hui moins de 50% de ménages assurés contre les catastrophes naturelles (Calvet et Grislin-Letrémy, 2011). En 1956, après le passage de Betsy sur la Guadeloupe, un inventaire réalisé par la préfecture auprès des principales compagnies d'assurance souligne que seulement 43 personnes ont été indemnisées en raison du cyclone. Pour autant, l'arrivée de l'assurance introduit une modification des politiques de secours (Desarthe, 2013). Les autorités privilégient principalement les populations qui ne disposent pas d'assurance. Depuis 2000, les dommages causés par les vents cycloniques sont pris en compte par le régime Cat Nat (Bidan, 2000).

Dans le domaine de la prévention, la question de la protection des populations est au cœur de ces différentes expertises. Parmi les mesures proposées figure leur déplacement. Ainsi en 1780, le bourg du Prêcheur (Martinique) est en partie submergé lors du cyclone du 11 octobre. Devant l'ampleur du phénomène, le gouverneur propose de faire déplacer le bourg vers le lieu nommé l'Abîme situé dans la zone des 50 pas géométriques jugée plus à l'abri des assauts de l'océan. La question se pose de nouveau au lendemain de la submersion de novembre 1956. La partie du bourg de la commune de Baillif (Guadeloupe) située entre le rivage et la route est en partie submergée avec au total 64 sinistrés. Les autorités proposent alors d'interdire les constructions dans cette zone et proposent le déplacement sur le terrain situé à 60 mètres du rivage. Des mesures similaires sont prises également dans les communes de Bouillante et de Vieux-Habitants dans la perspective de réduire la vulnérabilité des populations.

5. Conclusion

Au terme de cette présentation, les travaux menés au sein de la Caisse Centrale de Réassurance ont permis de recenser et de caractériser l'intensité des cyclones survenus dans les Antilles françaises depuis le XVII^e siècle. Les récentes études soulignent les nombreuses incertitudes concernant le lien entre le changement climatique et la fréquence ou l'intensité des cyclones (IPCC, 2013). À l'échelle des Antilles, les données collectées suggèrent une forte variabilité tout au long du XX^e siècle avec des périodes de faible activité cyclonique dans les Antilles françaises comme la période 1930-1950 et des périodes plus actives comme durant la période 1960-1980. Ce faisant, l'analyse des données sur la cyclogenèse (températures de l'océan, oscillation nord-Atlantique, phénomène El-Nino et El-Nina) permettrait éventuellement de comprendre cette variabilité. L'étude des différents dommages a permis de dresser un inventaire des effets de ces phénomènes et ainsi appréhender la vulnérabilité des sociétés et son évolution. Au-delà de l'analyse des dommages, cette étude a également montré tout l'intérêt des démarches pluridisciplinaires pour l'évaluation des risques et de la vulnérabilité.

Bibliographie

- André J.-C., Royer J.-F., Chauvin F., Les cyclones tropicaux et le changement climatique, *C. R. Geoscience*, vol. 340, p. 575-583
- Bidan P. (2000), Indemnisation des catastrophes naturelles : de la naissance vers l'âge adulte, *Risques*, n°42, p.3-7
- Blong R. (2003). A review of damage intensity scales, *Natural Hazards*, vol. 29, p. 57-76
- Butel P. (2012). *Histoire des Antilles Françaises*, Tempus, Paris.

- Calvet L., Grislain-Letrémy C. (2011). L'assurance habitation dans les départements d'Outre-Mer : une faible souscription, *Économie et statistique*, INSEE, n°447, p. 57-70
- Caviedes C.N. (1991), Five Hundred Years of Hurricanes in the Caribbean : Their Relationship with Global Climatic Variabilities, *GeoJournal*, n°23, p. 301-310
- Desarthe J. (2013). *Le temps des saisons. Climat, événements extrêmes et sociétés dans l'Ouest de la France (XVIe-XIXe siècles)*, Hermann, Paris.
- Desarthe J. (2014), **Les sociétés bretonnes face aux tempêtes XVIe-XIXe siècles**. In : Chaumillion E., Garnier E., Sauzeau T., *Les littoraux à l'heure du changement climatique*. Paris, Les Indes savantes, p. 35-57.
- Ewald F. (1990). La société assurancielle, *Risques. Les cahiers de l'assurance*, n°1, p. 5-23
- Garnier E., Desarthe J. (2013), Cyclones and Societies in the Mascarene Islands 17th-20th Centuries, *American Journal of Climate Change*, Vol. 2 No. 1, p. 1-13
- GEODE CARAÏBE (1999). *Les Antilles, terres à risques*, Karthala, Paris.
- GEODE CARAÏBE (2006). *La Caraïbe données environnementales*, Karthala, Paris.
- IPCC (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Mann M., Woodruff J., Donnelly J., Zhang Z. (2009). Atlantic hurricanes and climate over the past 1500 years, *Nature*, vol. 460, p. 880-883
- ONERC (2012). *Les outre-mer face au défi du changement climatique. Rapport au Premier ministre et au Parlement*, La Documentation Française, Paris.
- Thouret J.C., D'Ercole R. (1996). Vulnérabilité aux risques naturels e milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales, *Cahier des sciences humaines*, vol. 32, p. 407-422
- Vallette C., Cartier S. (2012). Dénombrer pour maîtriser les dommages des catastrophes naturelles, *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Volume 12, <http://vertigo.revues.org/12138>.

L'érosion des falaises côtières en région PACA : une approche interdisciplinaire géologie/sociologie

Cécilia Claeys¹, Nathalie Marçot², Laurent Fissier³, Jérémy Giuliano⁴, Thomas Lebourg⁵, Vincent Godard⁶, Thomas Dewez⁷

1. LPED - UMR 151 – Aix-Marseille Université

Centre St Charles, case 10 - 3, place Victor Hugo 13331 Marseille, cedex 03

cecilia.claeys@univ-amu.fr

2. BRGM Direction Régionale Provence Alpes Côte d'Azur

117 avenue de Luminy BP168 13276 Marseille cedex 09

n.marcot@brgm.fr ; l.fissier@brgm.fr ; j.giuliano@brgm.fr

3. GEOAZUR UMR 6526

Bât. 1, Campus CNRS, les Lucioles 250 rue Albert Einstein Sophia Antipolis 06560 Valbonne

lebourg@geoazur.unice.fr

4. CEREGE

Europôle Méditerranéen de l'Arbois - Avenue Louis PHILIBERT - BP 80 - 13545 Aix-en-Provence cedex 4

godard@cerege.fr

5. BRGM Direction des Risques et Prévention

3 avenue Claude Guillemin 45060 Orléans la Source

t.dewez@brgm.fr

RESUME.

Cette communication présente les résultats du projet VALSE dans lequel la recherche articule analyses géologiques et sociologiques dans une perspective d'aide à la gestion du risque instabilités de falaises côtières. Le risque est un objet d'étude pluri/interdisciplinaire en tant qu'il résulte de l'articulation entre un aléa (occurrence des éboulements) et la vulnérabilité des sociétés (incluant les représentations et les pratiques sociales des riverains et des gestionnaires). A partir d'une étude de cas, la commune de Carry-le-Rouet, ce projet propose un passage de la pluridisciplinarité (juxtapositions de savoirs disciplinaires) à une interdisciplinarité (coproduction de la problématique, définition conjointe du protocole de recherche, base de données multicritères). Le recours à l'analyse spatiale constitue un outil d'échange interdisciplinaire privilégié, permettant le croisement des variables géologiques et sociologiques.

ABSTRACT.

This communication presents the results of VALSE project in which the research articulates geological and sociological analyses in a perspective of assistance to the management of the instabilities of coastal cliffs risk. The risk is a pluri/interdisciplinary object of study as it results from the articulation between a probability of the collapses and the vulnerability of societies (included the representations and the social practices of the local residents and the administrators). From a case study, the municipality of Carry-le-Rouet, this project proposes a passage from multidisciplinary (juxtapositions of disciplinary knowledges) to interdisciplinarity (coproduction of the problem, definition of the protocol of research, database multicriteria). Using spatial analysis constitutes a tool of privileged interdisciplinary exchange, allowing the crossing of the geological and sociological variables.

MOTS-CLES : Géologie, sociologie, interdisciplinarité, risque, processus, mémoire, gestion

KEYWORDS: Geology, sociology, interdisciplinarity, risk, process, memory, management

1. Introduction

Cet article présente les premiers résultats interdisciplinaires du projet VALSE, « Vulnérabilité et Adaptation pour Les Sociétés face aux Erosions de falaises côtières en région PACA », financé par le Conseil Régional de Provence Alpes Côte d'Azur dans le cadre de son appel à projet. À partir d'une étude de cas, la commune de Carry-le-Rouet, ce travail articule analyses géologiques et sociologiques dans une perspective d'aide à la gestion du risque inhérent aux instabilités de falaises côtières.

Le risque est un objet d'étude pluri/interdisciplinaire en tant qu'il résulte de l'articulation entre un aléa (occurrence des éboulements) et la vulnérabilité des sociétés (incluant les représentations et les pratiques sociales des riverains et des gestionnaires). Ce projet propose un passage de la pluridisciplinarité (juxtapositions de savoirs disciplinaires) à une interdisciplinarité permettant une coproduction de la problématique, une définition conjointe du protocole de recherche ainsi que la constitution d'une base de données multicritères.

L'analyse porte sur l'érosion en tant que processus objectivé par la mesure géologique et en tant qu'objet de représentations et de pratiques sociales analysé par la sociologie à partir d'une enquête qualitative. Il s'agit moins d'opposer vérité scientifique et subjectivité des acteurs que de comprendre comment processus géologiques et sociaux sont peu ou prou en interconnexion et/ou en tension. En premier lieu, sont mis en regard les éboulements recensés et datés par les géologues et la mémoire que les acteurs locaux en ont. Dans un second temps, sont mis en regard l'aléa qualifié par les géologues et l'estimation du risque par les acteurs locaux.

2. Méthodologie : une démarche de recherche interdisciplinaire

L'articulation entre géologie et sociologie a été pensée à toutes les étapes de la recherche, de la formulation de la problématique à la définition du protocole de recherche et à l'analyse des résultats. En premier lieu, le territoire choisi, les falaises côtières de la commune de Carry-le-Rouet, se caractérise par son double intérêt géologique et sociologique. En effet, des événements d'éboulements réguliers et récents ont eu lieu sur des secteurs densément urbanisés, à forts enjeux sociaux, économiques et politiques au sein d'une commune périurbaine ayant connu une croissance démographique récente et rapide. Dans un second temps, le protocole de recueil de données sociologiques a été construit en concertation avec les géologues de l'équipe et en s'appuyant sur une étude de l'aléa réalisée par le BRGM (Marçot et al., 2007). L'enquête sociologique a porté sur les riverains immédiats des falaises, ainsi que sur les gestionnaires et professionnels, afin de cibler pour cette première recherche, les acteurs les plus proches physiquement et en termes de responsabilités. La grille d'entretien a été formulée de façon concertée afin d'intégrer au questionnement sociologique les préoccupations des géologues, mais aussi des gestionnaires. Enfin, le recours à l'analyse spatiale a constitué un outil d'échange interdisciplinaire privilégié, permettant le croisement des variables géologiques et sociologiques et une représentation accessible des données.

2.1. Les données géologiques

La cartographie récente de l'aléa « instabilités des falaises côtières » au 1/10 000^e sur les zones à enjeux du littoral des Bouches-du-Rhône (Marçot et al. 2014) ainsi que l'inventaire des événements de la base de données BDMVT (www.mouvementsdeterrain.fr) mis à jour en 2014, ont été les deux jeux de données utilisés. La première base de données a été acquise à dire d'expert pour le compte de la Direction Départementale des territoires et de la Mer des Bouches-du-Rhône (DDTM13). Elle permet d'avoir une connaissance fine et homogène de l'aléa sur le littoral urbanisé et sur le domaine public maritime. L'inventaire des événements a été réalisé à un temps donné et fournit une image la plus exhaustive possible des éboulements qui se sont produits sur le littoral et qui sont visibles à l'œil nu et/ou qui ont occasionné des dommages ou préjudices. Cet inventaire, en revanche, ne prend pas en compte les éboulements mesurés par l'analyse différentielle des scans laser effectués entre

février 2011 et juillet 2012. Ces données ont été analysées dans le cadre du projet VALSE (thèse Giuliano J. en cours) et sont en cours de géo référencement. Les premiers résultats semblent montrer un taux d'érosion de l'ordre d'un cm/an sur la base de 500 jours (volume total d'érosion détecté de 460 m³), et à l'échelle du littoral de Carry-le-Rouet.

2.2. Les données sociologiques

Il s'agit de la première recherche sociologique menée auprès des habitants et des gestionnaires relative au risque d'éboulement des falaises littorales de Carry-le-Rouet. Concernant cette problématique, une seule recherche préalable avait été menée sur ce même territoire. Elle portait sur les usagers du littoral de la commune et avait révélé que les Carryens ne constituaient que 20% de cette population de promeneurs (Azibi 2007). De ce fait, une approche qualitative est nécessaire dans un premier temps afin de saisir le champ lexical et les logiques argumentaires des habitants et des gestionnaires. De ce fait, 40 entretiens semi-directifs ont été menés auprès de riverains et de décideurs et gestionnaires. Ainsi, vingt et un habitants (dont vingt riverains directs des falaises littorales), treize professionnels et six décideurs/gestionnaires ont été interviewés. Parmi les professionnels et les décideurs/gestionnaires, six sont aussi riverains du littoral carryen, un habite dans la zone non littorale de la commune de Carry-le-Rouet et 12 vivent en dehors de la commune. Intégralement enregistré et retranscrit, ce corpus a fait l'objet d'une analyse thématique avec l'aide du logiciel N'Vivo.

2.3. L'analyse spatiale interdisciplinaire

Le recours à la cartographie permet de mettre en regard les données spatialisées préexistantes relatives à l'aléa (Marçot et al. 2014) et la spatialisation des discours des interviewés¹²⁴. Pour ce faire, les sociologues ont interrogé les acteurs locaux sur leur mémoire des éboulements passés et récents, ainsi que sur leur localisation. Les acteurs furent aussi interrogés sur leur estimation de la dangerosité de ces éboulements et sur la probabilité d'évènements futurs. Pour les riverains, ainsi que pour les gestionnaires et professionnels étant par ailleurs habitants de la zone littorale de Carry-le-Rouet, le géo-référencement de leur lieu d'habitation a été réalisé. Toutefois, afin de respecter l'anonymat des interviewés cette information a été agrégée à l'échelle de secteurs d'habitat homogènes proches de la toponomie vernaculaire.

3. Résultats

3.1. La mémoire des éboulements : une question de visibilité(s)

L'analyse révèle que les individus rencontrés ont une mémoire sélective des éboulements ayant eu lieu sur la commune. Le fait ne pas mentionner un évènement peut résulter de deux processus : soit l'individu n'en a jamais eu connaissance, soit il en a eu connaissance mais l'a depuis oublié. Dans les deux cas, il s'agit d'une situation d'invisibilité d'un évènement, soit par invisibilité immédiate, soit par effacement progressif. L'analyse spatiale mettant en regard le recensement des éboulements par les géologues (avec l'information en termes de volumes et de dommages occasionnés lorsque celle-ci est disponible), et la mémoire que les acteurs ont de ces évènements fournit des éléments de compréhension de ce processus de mise en invisibilité/visibilité (Figure 1).

¹²⁴ Si cette démarche s'inspire peu ou prou des méthodes issues de l'analyse des cartes mentales (Matlin 2001), elle ne s'inscrit cependant pas dans le cadre théorique de la psychologie cognitive visant à mesurer la distorsion entre réalité physique et sa perception par les individus.

Mémoire des événements et représentation du risque instabilités de falaises côtières à Carry-le-Rouet (Bouches-du-Rhône – France)

Projet VALSE : Vulnérabilité et Adaptation pour Les Sociétés face aux Erosions de falaises côtières en région Provence Alpes Côte d'Azur



Carte I. : Recensement des événements instabilités de falaises côtières et mémoire de l'ensemble des enquêtés (N = 40) à Carry-le-Rouet



Figure 1. Recensement des événements instabilités de falaises côtières et mémoire de l'ensemble des enquêtés (N=40) sur Carry-le-Rouet

Comme le révèle la carte de la figure 1, les éboulements mentionnés par le plus grand nombre d'interviewés (vingt et un individus) se trouvent dans le secteur de Barqueroute. Ce secteur a connu un éboulement relativement récent (2008) et surtout le plus important (500 m^3). Cet éboulement, situé dans une zone urbanisée a laissé une empreinte visible dans la falaise, réduisant la surface de propriétés privées situées en amont. Est ensuite mentionné le secteur du Port du Rouet (quinze individus). Deux événements y sont recensés, l'éboulement de 1965 dont le volume n'est pas répertorié, mais qui avait causé la mort d'une personne et l'éboulement de 2005 d'un volume de 200 m^3 . Ce secteur urbanisé est visible de la plage et a depuis fait l'objet de travaux d'aménagement. Ces deux secteurs se distinguent des autres par le nombre d'individus les mentionnant.

Par ailleurs, le secteur du Port de Carry-le-Rouet est mentionné par neuf individus. On y observe les éboulements parmi les plus récents (2013) et ce secteur a connu plusieurs éboulements au cours des dernières décennies (1998, 2008), ne dépassant toutefois pas les 10 m^3 . Le secteur de la Chapelle du Rouet est mentionné par six individus. Les derniers éboulements recensés remontent aux années 1994 et 1995. Ces éboulements sont peu visibles de la terre et touchent une zone non urbanisée. Enfin, dans le secteur du Moulin, les indices d'une dizaine d'éboulements de faible ampleur sont rapportés et deux événements sont recensés, ayant eu lieu en 2008 et 2013, d'un volume inférieur à 10 m^3 . Seulement cinq individus mentionnent ce secteur. Dans le secteur de la Tasse, des indices d'éboulements ont été recensés, ne dépassant pas les 10 m^3 . Seulement deux individus mentionnent ce secteur. Enfin, aucun éboulement n'a été recensé dans les secteurs de la Tuillière et de Cap Rousset, aucun des interviewés ne mentionne ces secteurs (Figure 2).

Ainsi la mémoire que les individus ont des éboulements est liée à la visibilité physique et sociale de ces événements. Au moins cinq facteurs de visibilité participent à la construction de la mémoire de ces événements :

- La *visibilité physique de l'évènement* : c'est-à-dire lorsque les traces des éboulements sont accessibles à la vue de par leur emplacement et/ou leur volume. Par exemple, ce retraité riverain se souvient : « *je donnais sur le Port donc je voyais tout là, c'était mon sémaphore là, et on a vu les falaises qu'il y avait en face s'écrouler tout le temps* ».
- La *visibilité physique de la gestion* : tout particulièrement par la réalisation de travaux d'aménagement ou de confortement.
- La *visibilité dans le temps* : c'est-à-dire des événements récents.
- La *visibilité des enjeux* : en particulier du fait de la proximité de constructions et plus encore dans le cas de dommages matériels et corporels causés par l'éboulement (dans le cas présent, un décès). Ce riverain raconte ainsi : « *il y a eu un incident mortel il y a peut-être 30 ou 40 ans ou 50 ans je ne sais pas, c'est très très vieux. Au début, au Rouet, on m'a dit qu'une pierre était tombée, mais ça remonte au début du siècle, du temps des... alors à part ça j'ai jamais entendu parler de, d'aucune....* ».
- La *visibilité intergénérationnelle* : la récente croissance démographique de Carry-Le-Rouet fait que seulement deux personnes de l'échantillon sont nées à Carry-le-Rouet, toutes les autres étant originaires d'autres communes, sinon d'autres régions de France. De ce fait, il n'existe pas pour ces individus de mémoire familiale intergénérationnelle relative à ce territoire.



Figure 2 : Illustration du littoral de Carry-le-Rouet 1- Eboulement à Barqueroute le 13 février 2008 de 500 m³ ; 2- Eboulement de 150 m³ au Port de Carry (partie Est) en 2013 ; 3- Travaux suite à l'éboulement d'avril 2005 au Port du Rouet ; 4- Arrêté municipal au niveau du Cap Rousset interdisant l'accès ; 5- Eboulement au Port de Carry (sentier du Léopard) le 15 décembre 2008 affectant les escaliers du sentier du littoral ; 6- Eboulement au Port de Carry (partie Est) le 6 février 2008 de 5 m³ (Photos © BRGM).

3.2. Qualifier le risque : une prédominance anthropocentrique

La mémoire des événements et l'estimation du risque d'éboulement par les acteurs rencontrés sont deux dimensions étroitement liées l'une à l'autre sans pour autant pouvoir être confondues. Comme le révèle la carte 11a de la figure 3, Barqueroute est le secteur le plus mentionné par les habitants à la fois du point de vue de la mémoire qu'ils ont des éboulements et de leur évaluation du risque. Inversement, le secteur de la Tuilière n'est pas mentionné par les individus, ni en termes d'éboulements passés ni en termes d'exposition présente au risque. Une telle adéquation ne s'observe pas pour les autres secteurs. Ainsi, les secteurs du Port du Rouet, du Moulin et du Port de Carry-le-Rouet, bien qu'ayant marqué les mémoires en termes d'éboulements passés, ne sont pas considérés par le plus grand nombre comme étant des secteurs à risque. De même, mais en effet de miroir, les secteurs du Cap Rousset, de la Tasse et de la chapelle du Rouet, bien que peu ou pas évoqués en ce qui concerne la mémoire d'éboulements passés n'en sont pas moins cités comme étant à risque (Figure 3).

Mémoire des événements et représentation du risque instabilités de falaises côtières à Carry-le-Rouet (Bouches-du-Rhône – France)

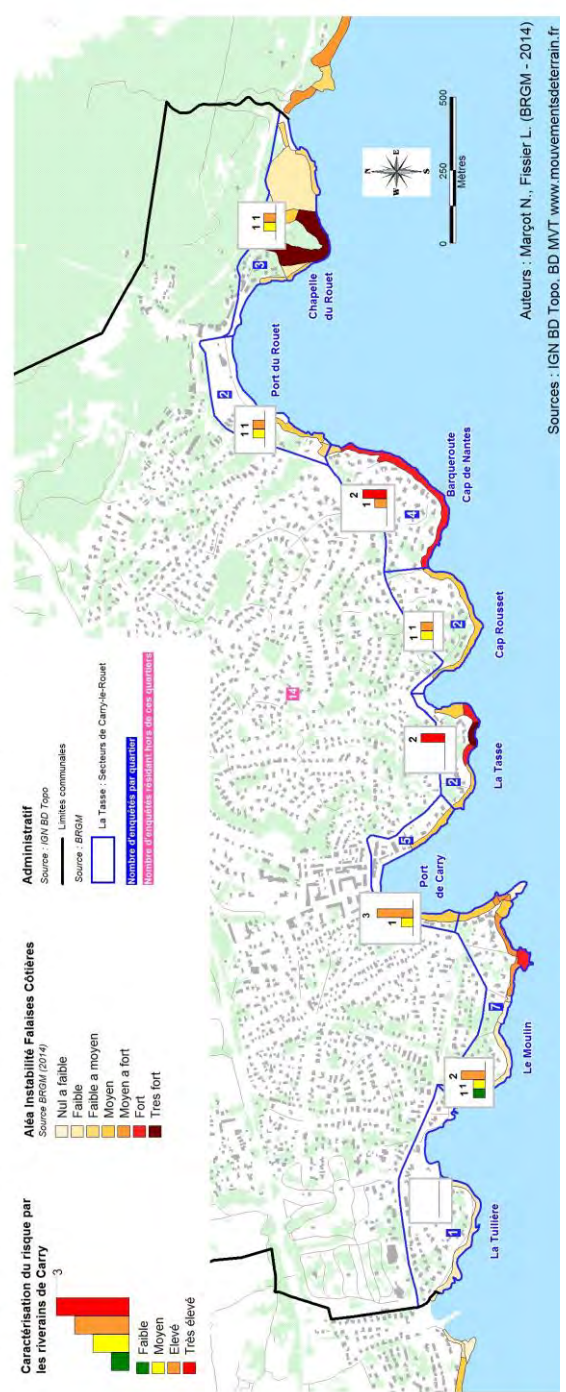
Projet VALSE : Vulnérabilité et Adaptation pour Les Sociétés face aux Erosions de falaises côtières en région Provence Alpes Côte d'Azur



Carte IIa. : Secteurs du littoral qualifiés de dangereux et/ou risqués par l'ensemble des enquêtés (N=40)

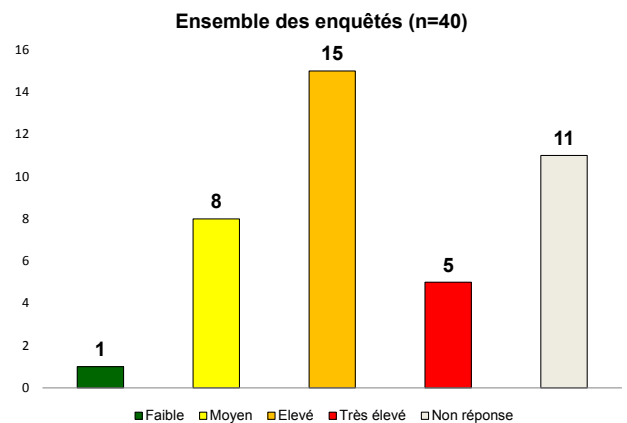


Carte IIb. : Risque objectif et caractérisation du risque par les habitants selon leur secteur d'habitation



Auteurs : Marçot N., Fissler L. (BRGM - 2014)
Sources : IGN BD Topo, BD MVT, www.mouvementsdterrain.fr

Figure 3 Carte IIa. Secteurs du littoral qualifiés de dangereux et/ou risqués par l'ensemble des enquêtés (N=40) ; Carte IIb. Risque objectif et caractérisation du risque par les habitants selon leur secteur d'habitation ; Graphique représentant l'ensemble des enquêtés.



La mémoire est un lien socialement construit entre le passé et le présent (Halbwachs 1925, Nora 2012), d'une part. Et d'autre part, l'évaluation du risque est un lien, scientifiquement estimé et/ou socialement construit, selon qu'elle est formulée par des experts ou des profanes, entre le présent et le futur (Giddens 1991, Beck 2003, Perreti 2006). De ce point de vue, quatre cas de figures se distinguent. Les deux premiers se caractérisent par une continuité entre passé et futur, tandis que pour les deux autres, les individus expriment des points de vue impliquant une discontinuité entre passé et futur :

- Une mémoire des éboulements passés et une qualification d'un risque actuel élevé (soit de fortes probabilités d'éboulements futurs) : c'est le cas du secteur de Barqueroute dont les éboulements passés sont physiquement et socialement visibles et qui fait l'objet d'arrêtés préfectoraux accompagnés d'une signalétique visible.
- Pas ou peu de mémoire d'éboulements passés et une qualification d'un risque faible : c'est le cas du secteur de la Tuillière qui n'a pas connu d'éboulements passés et qui n'est soumis à aucun arrêté.
- Pas ou peu de mémoire d'éboulements passés et une qualification d'un risque fort : les secteurs du Cap Rousset, de la Tasse et de la Chapelle du Rouet répondent dans des proportions différentes à cette configuration. Ainsi, aucun individu ne mentionne des éboulements passés pour le secteur du cap Rousset tandis que huit qualifient la zone de risquée, de même, deux versus sept pour la Tasse, six versus onze pour la Chapelle du Rouet. Ces trois secteurs font l'objet d'un arrêté municipal en interdisant l'accès, signalé par voie d'affichage.
- Une mémoire des éboulements passés et une qualification d'un risque faible : dans des proportions différentes, les secteurs du Port du Rouet, du Port de Carry-le-Rouet et du Moulin s'inscrivent dans cette configuration. Ainsi, quinze individus mentionnent des éboulements passés pour le secteur du Port du Rouet mais seulement six le considèrent comme à risque, de même neuf versus trois pour le Port de Carry-le-Rouet et cinq versus trois pour Le Moulin. Les secteurs du Port de Carry-le-Rouet et du Moulin ne font pas l'objet d'arrêtés d'interdiction, quelques panneaux localisés informent les passants de risques de chutes de pierres. En revanche, le Port du Rouet fait l'objet d'un arrêté municipal clairement affiché. Mais c'est aussi un secteur où ont été réalisés des aménagements particulièrement visibles (purge, grillage, digue).

Ainsi, quelle que soit la mémoire des éboulements passés, le facteur qui porte davantage les individus à qualifier un secteur de risqué est l'existence d'une réglementation clairement affichée et en interdisant l'accès. Comme le souligne cette riveraine « *Y'a des pancartes de partout, y'a des pancartes de partout* ». Ces résultats rendent compte d'une connaissance et d'une reconnaissance de la réglementation en vigueur et de façon induite d'une confiance dans les expertises sur lesquelles elle s'appuie. Ainsi résume cette autre riveraine : « *je pense que les panneaux sont utiles et que s'ils sont là il faut les respecter* ».

Toutefois, un autre facteur tend à contrebalancer cette (re)connaissance de la réglementation. Il s'agit de la présence visible de travaux d'aménagement. C'est en effet le cas du Port du Rouet qui est peu qualifié de risqué par les individus, malgré leur mémoire d'éboulements passés sur ce secteur et la présence d'une réglementation. Là, la confiance dans la technique l'emporterait sur la confiance dans la réglementation et la mémoire des événements passés. Cette posture s'inscrit dans une culture techniciste anthropocentrée. Ce riverain par exemple, souscrivant sans appel à la vision d'une humanité maîtresse de la nature, décrit avec admiration les travaux de confortement : « *Là ils ont mis d'énormes moyens, une grue de 80 tonnes, il y a 10 hommes encordés qui sont venus s'installer pour creuser 92 trous de 7 mètres de profondeur. Ils ont mis des grosses barres de fer, ensuite ils ont injectés de la résine, puis du béton, puis ils ont fait venir avec la grue de grande grilles en fer qu'ils ont*

posé sur la falaise, et puis ils ont injectés du béton, du béton, du béton, sur une grosse épaisseur ce qui fait que la falaise maintenant est complètement confortée ».

En effet, les riverains des falaises littorales de Carry-le-Rouet appartiennent à des couches sociales aisées, principalement du secteur privé et entrepreneurial, porteuses d'une telle culture techniciste anthropocentrée (Douglas et Wildavsky 1982).

Enfin, la prise en compte du secteur d'habitation des individus introduit une dimension complémentaire à l'analyse. Comme le révèle la carte IIb de la Figure 3, les individus habitant dans un secteur à fort aléa et visiblement réglementé tendent davantage à estimer, de façon générale, que le littoral carryen est risqué. Inversement, les individus habitants dans des secteurs à faible aléa tendent à davantage qualifier l'ensemble du littoral carryen comme à faible risque. Deux processus concomitants s'expriment ici : la généralisation du cas particulier, particulièrement exacerbée chez les couches sociales élevées (Bourdieu 1994) d'une part et d'autre part l'influence de la proximité spatiale (Slovic 2000). Le premier processus appartient à une stratégie de définition du bien commun par la généralisation de son intérêt particulier et le second à un effet de distorsion cognitive.

4. Conclusions et perspectives

Les résultats issus de cette première phase de recherche ont conforté l'intérêt heuristique d'une telle articulation interdisciplinaire. Le recours à la cartographie a confirmé sa capacité à faire dialoguer des données issues de disciplines très différentes. La posture de l'équipe a permis de mener ce dialogue interdisciplinaire en s'affranchissant d'une vision simpliste de la hiérarchie comtienne des savoirs, évitant tout particulièrement le réductionnisme positiviste opposant vérité scientifique et ignorance vernaculaire (Callon et al. 2001).

Par ailleurs, des contacts pris avec les riverains au cours des entretiens ont facilité les bonnes relations de travail avec la population pour les géologues, notamment pour l'installation d'appareils de mesures comme une station météorologique, et des électrodes plantées dans le sol et reliées par des câbles électriques, dans les parcelles privées, ayant pour but de mesurer la résistivité apparente des sols et de comprendre les processus de circulation de l'eau dans les formations géologiques, à l'arrière des falaises. L'interdisciplinarité a donc joué un rôle d'intégration.

Une réunion publique réunissant une quarantaine d'habitants a également permis de communiquer à la fois sur le projet et sur la connaissance scientifique en cours d'acquisition, et d'accroître le nombre d'interviews de riverains.

La seconde phase de recherche est en cours. D'une part, une enquête par questionnaires auprès des riverains des falaises côtières carryennes vient d'être réalisée, d'autre part l'estimation des volumes et des surfaces érodées, grâce à l'analyse comparative des scan laser sur le littoral de la commune de Carry-le-Rouet, réalisée dans le cadre d'une thèse au sein du projet VALSE, est en cours d'exploitation pour disposer d'une cartographie représentant de façon plus précise les éboulements récents (2011-2012).

Cette seconde phase permettra ainsi de mettre à l'épreuve de l'analyse quantitative spatialisée les résultats encourageants obtenus lors de cette première phase qualitative.

Bibliographie et références

- Azibi L. (2007), « Proposition d'une méthodologie de réduction de la vulnérabilité du risque instabilité de falaises côtières sur la commune de Carry-le-Rouet », *Mémoire de stage de fin d'étude de Master MASS*, BRGM.
- Beck U. (2003), *La société du risque*, Paris, Flammarion.
- Bourdieu P. (1994), *Raisons pratiques. Sur la théorie de l'action*, Paris, Le Seuil.
- Callon M., Lascoumes P. et Barthe Y., (2001), *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*, Seuil, Paris.

- Douglas M. and Wildavsky A. (1982), *Risk and Culture. An Essay on the Selection of Technological and Environmental Dangers*, University of California Press.
- Giddens A. (1991), *Les conséquences de la modernité*, Paris, L'harmattan.
- Giuliano J. (en cours) - Mécanismes multi-temporels et multi-échelles de l'évolution des falaises du littoral PACA, et plus particulièrement de la Côte Bleue dans les Bouches du Rhône. Thèse BRGM-GEOAZUR-CEREGE.
- Halbwachs M. (1925), *Les cadres sociaux de la mémoire*, Paris, Félix Alcan, Collection Les Travaux de l'Année sociologique.
- Marçot N. (2010) - Rapport de synthèse sur le projet « Valorisation de l'étude relative à la prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire en Provence Alpes Côte d'Azur ». Rapport final BRGM/RP-59324-FR.
- Marçot N. avec la collaboration de Mathon C. (2007) – Prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire en Provence-Alpes- Côte-D'azur – Rapports BGRM RP-55945-FR, RP-54316-FR, RP-53951-FR, RP-52829-FR.
- Marçot N., Schuller L., Mathon C. (2014) – Actualisation des connaissances et cartographie de l'aléa instabilités de falaises côtières sur le littoral des Bouches-du-Rhône. Rapport final BRGM RP-62643-FR.
- Matlin M.W. (2001), *La cognition : une introduction à la psychologie cognitive*, 4^{ème} édition, De Boeck University.
- Nora P. (1992), *Les lieux de mémoire*, 7 volumes, Gallimard, Paris, 1992.
- Peretti Wattel P. (2006), « Société assurantielle, société du risque ou culture du risque, in Risques », *Les cahiers de l'assurance*, n°67, septembre 2006.
- Slovic, P. (2000) *The perception of risk*, London, Earthscan.

Faisabilité de la relocalisation des activités et des biens menacés par des risques littoraux en France, l'exemple de Lacanau

Martin Renard¹

1. Groupement d'Intérêt Public du Littoral Aquitain
11 avenue Pierre-Mendès France ; 33700 Mérignac
Martin.renard@littoral-aquitain.fr

RESUME.

Les prévisions concernant les impacts du changement climatique sur le littoral et les grandes tempêtes de ces dernières années avec leurs conséquences humaines et matérielles de plus en plus importantes, amènent aujourd'hui à réfléchir sur l'anticipation des risques littoraux. C'est dans ce cadre que le Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie a lancé en mars 2012, dans le cadre de la Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte, un appel à projets national sur la « Relocalisation des activités et des biens dans les territoires fortement menacés par les risques littoraux ».

L'objectif est de passer sur le littoral français d'une politique de lutte (épis, digues, brise lames...) à une politique d'adaptation aux risques. Concernant les risques littoraux cette adaptation passe par un recul de l'urbanisation, techniquement appelée « relocalisation ».

Pour la première fois sur le territoire français, cet appel à projets a pour but de tester la faisabilité de telles opérations sur sept sites tests, dont trois en Aquitaine. Les études menées sur ces sites doivent se réaliser à droit constant, afin d'étudier le champ des possibles aujourd'hui et de faire remonter les incertitudes, blocages et pistes de réflexion au Ministère en charge de cet appel à projets.

A l'heure de la rédaction de cet article les études sont encore en cours, mais un certain nombre de questions sont d'ores et déjà identifiées notamment sur le site test de Lacanau, sujet de cet article, qui dispose d'un important front de mer urbain, menacé à moyen-long terme par le risque d'érosion marine. De nombreuses questions sont d'ores et déjà identifiées, comment acquérir préventivement des biens dont les aménités du littoral multiplient la valeur ? Où relocaliser les biens et activités menacés dans des espaces littoraux de plus en plus attractifs, mais fortement contraints par la législation et notamment par la loi Littoral ? Comment réserver des espaces fonciers sur le long terme pour anticiper des opérations de relocalisation ? Voici certaines des questions posées par la relocalisation, développées dans le cadre de cet article.

MOTS-CLES : Relocalisation ; Loi Littoral ; Erosion ; Urbanisme ; Aménagement ; Foncier ; Valeur des biens

1. Contexte de l'étude.

En mars 2012 le Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de l'Energie, dans le cadre de sa Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte, a lancé un appel à projets national sur la «Relocalisation des activités et des biens dans les territoires fortement menacés par les risques littoraux». Cet appel à projets d'une durée de deux ans (2013 – 2014) est en cours de déroulement à la date d'écriture de cet article et les conclusions des travaux évoqués ne pourront être rendues avant fin 2014.

Sur les sept sites tests retenus pour participer à cet appel à projets, trois se trouvent en Aquitaine (Lacanau (33) ; Labenne (40) et La Teste-de-Buch (33)). Le Groupement d'Intérêt Public du Littoral Aquitain¹²⁵ a pour mission d'assurer auprès de ces communes un appui technique, une coordination des études au niveau régional et de faire remonter les avancées et blocages au Ministère.

Chacune des trois communes doit étudier à droit constant¹²⁶ les possibilités de relocalisation des activités et des biens menacés à moyen et long terme par des risques littoraux sur leur territoire. Les risques étudiés sont ici liés aux aléas érosion marine et avancée dunaire.

Le principe de relocalisation.

« Action volontariste de réimplantation menée sur le territoire après une phase d'évacuation des personnes et de suppression des biens (ou activités) menacés par l'érosion. Elle vise au maintien sur le territoire des enjeux aujourd'hui menacés par l'érosion marine, qui sont le moteur économique du littoral aquitain » (Stratégie Régionale de Gestion de la Bande Côtière ; GIP Littoral Aquitain ; 2012).

2. Objectifs de l'étude.

Pour ces communes, les objectifs sont de maintenir leurs capacités d'accueil et leur fonctionnement économique qui dépendent en grande partie du tourisme balnéaire, en relocalisant sur leur territoire les enjeux menacés à moyen et long terme par le risque d'érosion marine. A Lacanau ces enjeux sont localisés dans un « périmètre de vulnérabilité » (figure 1), défini grâce aux projections du trait de côte au droit du front de mer à l'horizon 2100, sans prise en compte des ouvrages de protection et en tenant compte du réseau viaire existant.

Une opération de relocalisation relève d'un véritable projet urbain, qui doit prendre en compte la réintégration de zones menacées dans un tissu urbain déjà existant ou sur des territoires aux très fortes contraintes réglementaires (loi Littoral, espaces naturels protégés, Plan de Prévention des Risques...). Il s'agit donc de définir les possibilités actuelles, tant juridiques que financières, de la mise en place de telles opérations et de faire remonter ces résultats, ainsi que les points de blocage au Ministère.

¹²⁵ Le GIP Littoral Aquitain est un organisme public qui regroupe l'Etat, la Région Aquitaine, les trois départements littoraux d'Aquitaine et toutes les intercommunalités du littoral aquitain.

¹²⁶ Dans les règles du droit actuel.



Les biens et activités compris dans ce périmètre sont d'environ 1200 appartements et plus de 100 activités commerciales, pour une surface plancher estimée à 90 000 m².

Figure 1 : Périmètre de vulnérabilité

3. Présentation du site de Lacanau.

Des trois communes retenues en Aquitaine pour cet appel à projets national, celle de Lacanau, au regard des enjeux menacés (front de mer urbain), nous semble la plus propice à une présentation scientifique. Commune d'environ 4 500 habitants à l'année, elle peut accueillir durant la saison estivale 80 000 personnes sur les grands week-ends, qui font du tourisme sa première ressource économique. La proximité avec l'agglomération bordelaise en fait également une des destinations principales pour les excursionnistes girondins sur la côte médocaine.

Son organisation spatiale est typique des communes du littoral girondin et landais, avec un bourg en rétro littoral (entre 10 et 15 km de l'océan), un pôle autour d'un lac avec plusieurs petits hameaux et une station littorale en front de mer, tout cela sur une superficie de 214 km² (plus de deux fois la taille de Paris).

Malgré son importante superficie, la commune de Lacanau est soumise à une superposition de législations qui limitent fortement ses possibilités de développement. En grande partie composée de forêts domaniales, la commune est soumise à un Plan de Prévention des Risques des Incendies de Forêts qui interdit toute construction en forêt. La présence d'une façade maritime et d'un lac rendent la majeure partie de son territoire assujéti à la loi Littoral, qui contraint fortement ses possibilités de développement urbain (espaces proches du rivage, extension limitée de l'urbanisation, continuité de l'urbanisation, bande des 100 mètres...).

Cet espace à première vue important, se révèle finalement extrêmement contraint réglementairement, ce qui réduit les possibilités foncières pour effectuer une relocalisation des activités et des biens, qui sont menacés en front de mer.

Nous ne pourrions dans cet article détailler tous les points de blocage préalablement identifiés, ainsi que les premières pistes de réflexion qui commencent à émerger. Les conclusions complètes de ces études seront disponibles à la fin de l'appel à projets national (fin 2014). Nous vous proposons dans la partie qui va suivre d'avoir un premier aperçu de points qui nous sembleront essentiels de travailler dans les années à venir pour amorcer la faisabilité d'opérations de relocalisation.

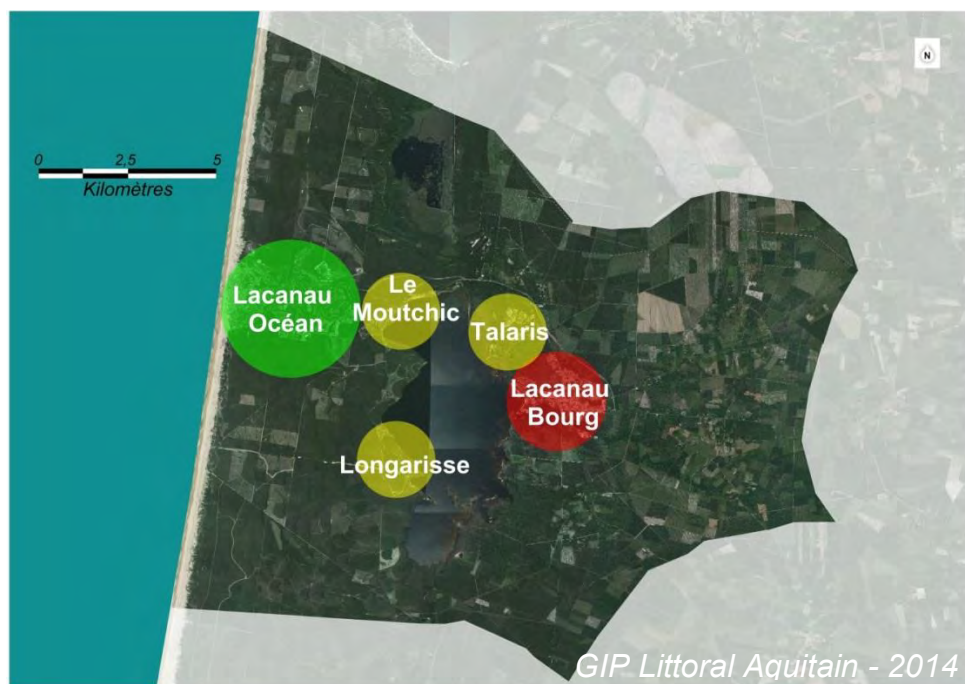


Figure 2 : Les centralités de la commune de Lacanau

4. Les premières grandes questions identifiées.

4.1 La sauvegarde du foncier à moyen – long terme

Une opération de relocalisation a pour objectif d'anticiper le risque, il s'agit pour les communes de passer d'une politique de protection à une politique d'adaptation. Cette anticipation doit s'appuyer d'une part sur les projections scientifiques du risque (Cf. figure 1), mais également sur l'anticipation des besoins fonciers pour réaliser de telles opérations.

La première piste de réflexion, qui suit la doctrine urbaine actuelle (Article L.121-1 du Code de l'Urbanisme), pousse évidemment à penser la densification de l'espace urbain existant sur le reste de la station balnéaire. Mais l'exemple de Lacanau nous montre que la zone à relocaliser du front de mer représente 40% de la totalité des logements de la station de Lacanau océan. Deux questions s'ouvrent alors : Est-il possible d'intégrer la totalité des biens et activités à relocaliser dans le tissu urbain existant, au regard de l'espace disponible mais également de la législation ? Comment réserver les espaces disponibles sur le moyen-long terme, sans pénaliser la commune dans son développement ?

La législation actuelle contraint déjà fortement les communes littorales dans leur réponse à la pression démographique qui pèse sur les espaces littoraux (+3,5% entre 1999 et 2009 à Lacanau¹²⁷).

¹²⁷ Lacanau a connu une croissance démographique de +3,5% entre 1999 et 2009 uniquement induite par le solde migratoire. Source : INSEE 2009.

De plus si l'on considère que les espaces disponibles doivent uniquement servir à préserver l'existant dans l'éventualité d'une relocalisation, cela signifie la fin du développement de nombreuses communes littorales, dont la plupart sont sujettes à des risques littoraux (submersion, érosion...). La réflexion menée sur la réglementation et les outils de portage foncier, doit permettre aux communes d'acquérir et de préserver des terrains urbanisables afin d'anticiper des opérations de relocalisation. La mise en réserve foncière sur du moyen-long terme (supérieur à 5 ans) va aujourd'hui à l'encontre des possibilités réglementaires¹²⁸ et le coût de leur acquisition va au-delà des capacités financières d'une seule commune.

Il apparaît nécessaire dans ce contexte de réfléchir à des adaptations réglementaires, voire à l'ouverture de nouveaux terrains à la construction dans un espace extrêmement contraint réglementairement, si le territoire souhaite d'une part réimplanter l'existant, mais également répondre à la pression démographique qui pèse sur les territoires littoraux.

4.2 La notion de transfert d'urbanisation

Cette problématique de la disponibilité foncière met en lumière une notion aujourd'hui inexistante dans le Code de l'Urbanisme, celle du transfert d'urbanisation. Pour éviter de pénaliser les communes dans leur développement, les opérations de relocalisation ne doivent pas être appréhendées comme une urbanisation nouvelle. Or au regard de la législation actuelle, si la zone du front de mer à relocaliser est déconstruite et l'équivalent en surface plancher reconstruit ailleurs sur la commune, cela sera considéré comme une urbanisation nouvelle.

Cela fait écho à la jurisprudence communément admise de la loi Littoral, qui indique que l'extension de l'urbanisation ne peut en général dépasser 10% de l'existant dans les Espaces Proches du Rivage¹²⁹ (Article L.146-4-II du Code de l'Urbanisme). Dépassant largement ce seuil de 10%, la relocalisation d'une zone aussi importante que le front de mer de Lacanau ne pourrait se faire à droit constant, que par étape et sur du très long terme, bloquant toute possibilité « d'évolution naturelle » de la commune durant des décennies.

¹²⁸ L'article L.123-2-a du Code de l'urbanisme indique que dans sans les zones urbaines ou à urbaniser, le plan local d'urbanisme peut instituer des servitudes consistant à interdire, sous réserve d'une justification particulière, dans un périmètre qu'il délimite et pour une durée au plus de cinq ans dans l'attente de l'approbation par la commune d'un projet d'aménagement global, les constructions ou installations d'une superficie supérieure à un seuil défini par le règlement ; les travaux ayant pour objet l'adaptation, le changement de destination, la réfection ou l'extension limitée des constructions existantes sont toutefois autorisés.

¹²⁹ Pour information, la classification EPR à Lacanau du fait de la présence de l'Océan et d'un lac, va de Lacanau Océan à Lacanau Bourg (ce qui représente plus de 12 Km à l'intérieur des terres).

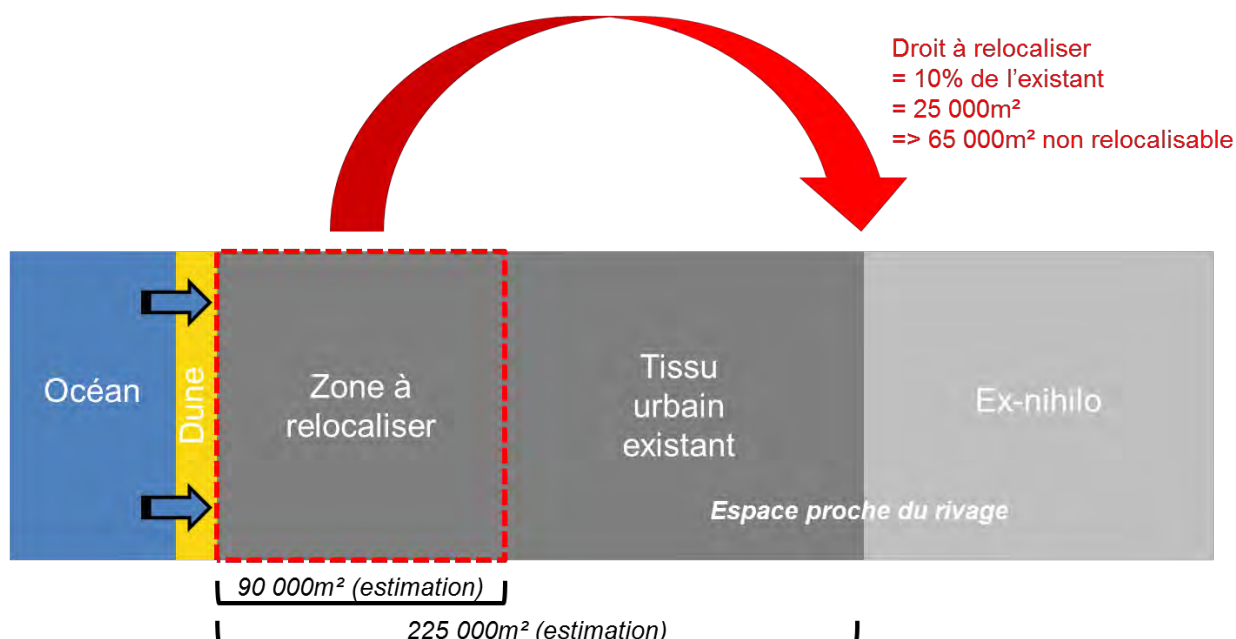


Figure 3 : La notion de transfert d'urbanisation

4.3 Adapter la loi Littoral aux contextes régionaux ?

Sans remettre en cause le bien-fondé de la loi Littoral et de son application stricte depuis plusieurs années, les problématiques réglementaires que nous venons de rencontrer démontrent la difficulté pour les communes à mobiliser leur potentiel de développement, mais également à réfléchir à des opérations de relocalisation.

Une adaptation de cette loi aux contextes régionaux apparaît donc de plus en plus nécessaire, comme les sénateurs Odette Herviaux et Jean Bizet l'explicitent dans un rapport d'information sénatorial paru le 21 janvier 2014¹³⁰. Le littoral français n'est pas homogène, tant dans son occupation que dans les risques qui le menacent. La côte aquitaine, majoritairement sableuse, est composée de grandes stations balnéaires construites en front de mer héritées de la MIACA¹³¹. Une majorité de ces stations est aujourd'hui menacée par l'érosion marine qui entraîne un recul du trait de côte en moyenne entre 1 et 3m par an¹³².

Adapter ou interpréter positivement la législation pour une opération de relocalisation, c'est donner l'opportunité aux communes de prévenir un risque inexorable, mais également l'occasion pour elles de revoir leur positionnement et leurs installations touristiques, cinquante ans après les premiers grands aménagements de la MIACA en Aquitaine. Adapter les contraintes réglementaires au niveau régional permettrait de ne pas créer de précédent réglementaire au niveau national et de répondre aux besoins spécifiques de chaque territoire. Cela serait également l'opportunité de passer d'une opération urbaine contrainte par le risque, à une opportunité de développement basée sur un véritable projet de territoire.

¹³⁰ Rapport d'information fait au nom de la commission du développement durable, des infrastructures, de l'équipement et de l'aménagement du territoire sur la loi littoral ; Odette Herviaux et Jean Bizet ; Rapport N°297 ; Enregistré à la présidence du Sénat le 21 janvier 2014.

¹³¹ Mission Interministérielle d'Aménagement de la Côte Aquitaine de 1967 à 1992.

¹³² Rapport du BRGM N°59055-FR ; Août 2011.

4.4 Les outils du portage foncier, opérationnel et financier de la relocalisation

Après avoir mis en avant les premiers blocages réglementaires auxquels se confronte actuellement l'étude de faisabilité d'une relocalisation à Lacanau, viennent les questions liées au portage et au financement de telles opérations. Trois problématiques ressortent des premières interrogations, celles de l'acquisition, des financeurs et des outils de portage.

Au regard de la situation économique actuelle tant au niveau national que local, il est peu probable dans les années à venir de voir apparaître des politiques interventionnistes de grande ampleur, comme cela s'est fait en Aquitaine avec la MIACA. Quelles sont alors les structures qui peuvent être porteuses de tels projets ? La plupart des communes du littoral aquitain ont un budget qui ne correspond pas à l'envergure des opérations envisagées. Bien qu'accueillant un nombre important de touristes durant la saison estivale, leur budget est défini pour répondre aux besoins des résidents principaux, qui sont en général peu nombreux. Se pose donc la question des partenaires financiers publics et privés, pour des stations balnéaires qui ont un rayonnement au moins régional, voire national. La relocalisation vise au maintien de l'habitat et de l'économie existante sur le territoire, le secteur privé en sera donc le premier bénéficiaire, comment alors intégrer sa participation financière ?

Contrairement à une opération urbaine « classique », les implications financières d'une opération de relocalisation sont doubles. Il faut en premier lieu acquérir les biens et les activités menacées, mais également les terrains potentiels pour effectuer leur réimplantation. Il faut partir du postulat que la zone du front de mer acquise est considérée comme « perdue » au regard des opérations urbaines possibles pour rentabiliser son achat. Si l'on souhaite minimiser le coût global de l'opération, il faut donc, par l'acquisition des espaces potentiels de réimplantation, réaliser une opération urbaine qui rentabilise, d'une part l'achat de ces terrains, mais également ceux du front de mer à relocaliser !

Au-delà de ces implications financières considérables, se pose la question du portage d'une telle opération. Le front de mer est le cœur économique des stations balnéaires, on ne peut donc pas le transformer en friche urbaine pendant dix ans pour réaliser une opération de relocalisation. Cela passe obligatoirement par un phasage complexe sur un temps long d'une telle opération urbaine. Une commune dont les services sont établis pour gérer 4 500 habitants, a-t-elle les capacités humaines et techniques de porter sur au moins 20 ou 30 ans une opération urbaine de cette envergure ?

Plusieurs critères sont à prendre en compte dans la définition du portage et du financement :

La temporalité : le front de mer actuel et les accès à la plage sont le cœur économique de la station, les travaux de déconstruction/reconstruction ne doivent pas impacter l'attractivité touristique de la commune, majoritairement axée sur le tourisme balnéaire.

Le financement : quelle mobilisation des partenaires publics et privés ?

Les outils : quel outil pour quelle échelle territoriale, une Société d'Economie Mixte / Société Publique Locale / Etablissement Public Foncier Local, un EPFR pour du régional, un Etablissement Public d'Aménagement pour le niveau national ?

Le fait de devoir réaliser une double acquisition foncière, pour les terrains menacés et les espaces de réimplantation, place la question foncière au centre de la viabilité financière d'une telle opération. Afin de limiter ce double impact qui rend à première vue impossible financièrement une opération de relocalisation pour des ensembles urbains conséquents, se pose la question de la valeur des biens menacés.

4.5 Quelle est la valeur des biens menacés par l'érosion ?

Le risque érosion n'est pas aujourd'hui considéré comme un « Risque Naturel Majeur », mais comme un « Risque Naturel Prévisible »¹³³, à ce titre l'Etat ou la commune n'ont pas la possibilité d'acquérir les biens menacés avec le Fonds de Prévention pour Risques Naturels Majeurs (fonds Barnier). Ce processus d'expropriation pour Risque Naturel Majeur se réalise à hauteur de 100% de la valeur du bien, cela se pratique sur les côtes rocheuses de Normandie et de Picardie¹³⁴, mais il est inéligible sur la côte sableuse. Il n'y a aujourd'hui aucun cadre juridique ou jurisprudentiel concernant l'acquisition de biens menacés par ce risque érosion marine sur une côte sableuse. Il faut donc réfléchir à une solution d'acquisition à l'amiable qui permettrait d'une part aux propriétaires d'être en partie indemnisés et d'autre part de limiter le coût global de l'opération, afin qu'elle soit financièrement réalisable. La difficulté réside dans le positionnement du curseur entre la valeur à 100% du bien (sans prise en compte du risque) et le moment où celui-ci se retrouvera sur la plage et dont la valeur sera égale à zéro.

Les pouvoirs publics ne sont pas dans l'obligation de protéger les biens menacés par des risques littoraux (loi de 1807 ; article 33). Si les riverains souhaitent ériger des ouvrages de protection en dur sur le Domaine Public Maritime, une autorisation des services de l'Etat leur est néanmoins nécessaire. Cela crée une ambiguïté pour les propriétaires, entre une indemnisation plus qu'incertaine et une protection non assurée par les pouvoirs publics. Cela peut servir de levier dans des négociations à l'amiable pour acquérir les biens menacés, afin de pouvoir mettre en place une opération de relocalisation sur le principe du gagnant-gagnant : Acquisition du bien en fonction de sa valeur économique, ce qui permet de diminuer le coût pour la puissance publique et au propriétaire d'être en partie indemnisé.

Ce principe du gagnant-gagnant se base sur le fait que si les aménités du littoral augmentent la valeur des biens, pourquoi le risque ne la diminuerait pas ? Le calcul de ce que l'on pourrait appeler la « valeur économique » du bien (lié à sa durée de vie et donc sa rentabilité) est extrêmement complexe et fait aujourd'hui l'objet d'une mission d'étude par le Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable. Ce point spécifique lié au coût d'acquisition de la zone à relocaliser n'a pas encore de cadre clairement défini, mais il est évidemment primordial pour la faisabilité financière d'une opération de relocalisation.

¹³³ Définitions liées au Code de l'Environnement.

¹³⁴ Ces côtes rocheuses sont soumises aux aléas d'érosion marine et d'infiltration d'eau par le haut, c'est ce second aléa qui est retenu pour justifier son caractère imprévisible.

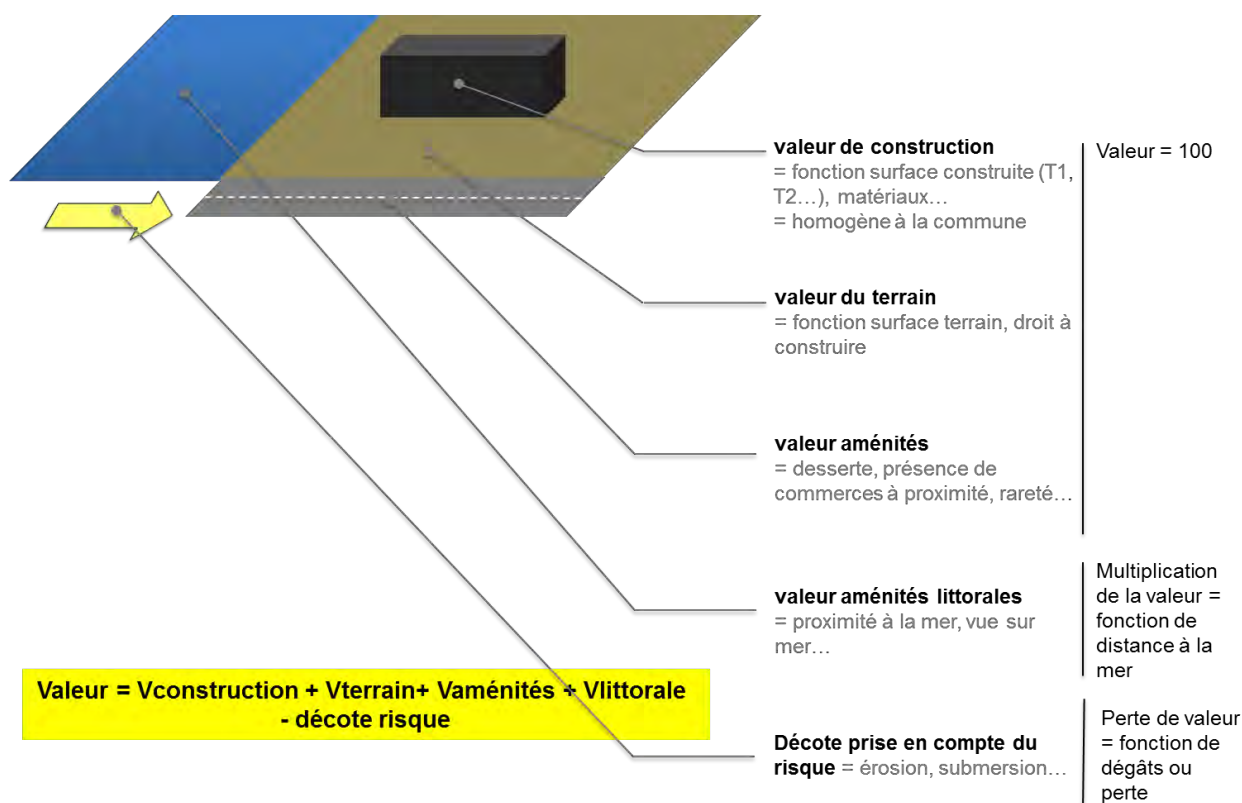


Figure 4 : Quelle valeur des biens menacés par l'érosion ?

5. Conclusion

L'étude en cours sur la faisabilité de la relocalisation des activités et des biens menacés par des risques littoraux soulève, comme l'on vient de le voir, de nombreuses questions qui ne pourront pas toute obtenir de réponse avant la fin de l'appel à projets national en décembre 2014.

Cependant, l'intérêt d'une mobilisation au niveau national sur ces questions permet de comparer les différentes problématiques en fonction des aléas, des enjeux, du risque, mais surtout des pistes de solutions envisagées par les différents sites. A mi-parcours de cet appel à projets national, le premier constat est la convergence des problèmes rencontrés, mais surtout des pistes de solutions envisageables.

Au-delà des questions réglementaires liées au foncier et à la loi Littoral pour la réimplantation, c'est avant tout la problématique de l'acquisition des biens menacés et de leur suppression qui pose la question de la viabilité financière d'une telle opération. Le GIP s'entoure aujourd'hui de nombreux experts pour réfléchir à cette question, qui s'en nul doute nécessitera de revoir les approches classiques de construction d'un projet urbain, mais également les modes d'acquisitions des biens et activités menacés.

Bibliographie

GIP Littoral Aquitain (2012) ; *Stratégie régionale de gestion de la bande côtière* ; GIP Littoral Aquitain

Herviaux et Bizet (2014); *Rapport d'information fait au nom de la commission du développement durable, des infrastructures, de l'équipement et de l'aménagement du territoire sur la loi littoral* ; Rapport N°297

MEDDE – Direction Générale de l'Aménagement du Logement et de la Nature (2012) ; *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte : vers la relocalisation des activités et des biens* ;

MEDDE - Direction Générale de l'Aménagement du Logement et de la Nature (2013) ; *Vers la relocalisation des activités et des biens – 5 territoires en expérimentation* ; Séminaire national de lancement du 14 février 2014.

MEDDE (2013) ; *Vers la relocalisation des activités et des biens – 5 territoires en expérimentation* ; Actes du séminaire de lancement du 14 février 2014

LISTE DES POSTERS

POSTERS LIST

Thématique Aléas / Hazards Thematic

- **Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux**
C. Perherin, A. Roche, C. Trmal, C. Roux, F. Pons, C. Boura
- **Influence de la géomorphologie de l'estran sur l'aléa érosion sur la côte sud de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent**
C. Pinsonnault, G. Marie, P. Bernatchez
- **Evolution mi-séculaire des côtes sédimentaires du département du Finistère**
E. Blaise, S. Suanez
- **Evolutions à moyen et court termes (XIX^e – XX^e) de l'avant-plage du secteur littoral de Combrit – Île-Tudy (Finistère) : Aspects méthodologiques, dynamiques et essai d'interprétation**
M. Jabbar, A. Hénaff, A. Deschamps
- **Actualisation du Catalogue sédimentologique des côtes françaises**
A. Roche, Y. Deniaud, F. Hedou, M. Allain

Thématique Enjeux / Issues Thematic

- **Diagnostic de la vulnérabilité du bâti de l'île de Noirmoutier (Vendée) face au risque de submersion marine : Premiers essais de quantification**
E. Chevillot-Miot, A. Creach, D. Mercier
- **L'option de la relocalisation des activités et des biens face aux risques côtiers : stratégies et enjeux territoriaux en France et au Québec.**
L. Mineo-Kleiner, C. Meur-Ferec, G. Marie

Thématique Gestion / Management Thematic

- **Partnering for Risk Management and Engagement on the Coast (PRIME-C)**
P. Deboudt, C. Audouit, V. Herbert, C. Rufin Soler
- **Impacts de niveaux d'eau extrêmes sur deux zones basses, aménagées et vulnérables, en domaine macrotidal : les agglomérations du Havre (Manche) et de Dunkerque (Mer du Nord)**
A. Maspataud, S. Elineau, A. Duperret, M.-H. Ruz
- **Élaboration d'un indicateur national de l'érosion côtière**
F. Hedou, A. Roche, C. Trmal, Y. Deniaud

Thématique Représentations / *Representations Thematic*

- **Etude de la perception du risque de submersion marine sur le polder de la plaine maritime flamande. L'exemple des communes de Gravelines/Grand-Fort-Philippe et Dunkerque**

A. Bourgois, S. Cornet, C. Leleu, A.-I. Seys, M.-H. Ruz, C. Rufin-Soler

Thématique Analyses transverses / *Cross-Disciplinary Analysis Thematic*

- **Risque de submersion marine : de l'aléa à sa gestion**
A. Creach, E. Chauveau, L. Pourinet
- **Understanding the coastline evolution in the Kerkennah archipelago**
L. Etienne, A. Daoud, G. Beltrando
- **La vulnérabilité des îles Wallis (Pacifique sud-ouest) face aux changements climatiques globaux. La gestion intégrée des zones côtières en contexte océanien**
M. Allenbach, Touraivane, T. Hoibian, A. Malau, M. Porcher
- **The CRISMA project and the modelling of the submersion on the coast of Charente-Maritime**
M. P. Daou, A. Cabal, C. Coulet, O. Bertrand, E. Blayo, A. Rousseau
- **Etude des systèmes de protection contre les submersions marines. Méthodologie issue du retour d'expérience Xynthia**
M. Igigabel, Y. Nédélec, N. Bérenger, N. Flouest, A. Bernard, C. Pitié, P. Chassé, Y. Deniaud

<http://cocorisco.sciencesconf.org/>