

Simulations numériques de tsunamis sur la côte méditerranéenne française : le cas d'Antibes

Sylvestre LE ROY, Rodrigo PEDREROS, Daniel MONFORT-CLIMENT, Monique TERRIER

BRGM – 3, avenue Claude Guillemin – BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – s.leroy@brgm.fr

RÉSUMÉ. – Le projet ALDES a consisté à étudier, par des simulations numériques détaillées, le risque tsunami sur 3 sites pilotes de la côte méditerranéenne française, pour des scénarios sismiques et gravitaires. Malgré l'intensité modérée des tsunamis susceptibles d'affecter ces côtes, Antibes apparaît particulièrement exposée, en particulier pour un scénario comme le glissement de terrain de l'aéroport de Nice de 1979.

Cet événement, à l'origine de nombreux dommages sur Antibes, a été simulé en s'appuyant sur des caractérisations du glissement menées par l'IFREMER. L'utilisation de calculs emboîtés (codes GEOWAVE et SURF-WB) a permis d'affiner la simulation jusqu'à une résolution de 3,75 m en intégrant explicitement les éléments urbains (modèle numérique d'élévation intégrant le bâti).

Les résultats s'avèrent cohérents avec les observations historiques, en termes de temps d'arrivée et de polarité de la vague sur la Baie des Anges et en termes d'inondation sur Antibes. La simulation montre que le quartier de la Salis est atteint au bout de 6 minutes par un tsunami dépassant les 3 m à la côte. Cette première vague, la plus importante, entraîne une submersion conséquente avec des courants localement élevés et des run-up pouvant atteindre 4 m.

Plusieurs tests de sensibilité ont été menés sur ce cas, permettant de mettre en évidence l'importance du choix des équations (Boussinesq – Saint-Venant) et de la description du glissement pour simuler un tsunami d'origine gravitaire. Enfin, ces résultats permettent de souligner l'intérêt d'une prise en compte explicite du bâti pour la représentativité des simulations de submersion en milieu urbain.

Mots-clés : Modélisation, Tsunami, Glissement de terrain sous-marin, Submersion, Milieu urbain

Numerical tsunamis simulations on the French Mediterranean coast: the case of Antibes

ABSTRACT. – The ALDES project consisted in studying tsunami hazards on 3 sites of the French Mediterranean coast, through detailed numerical simulations for both seismic and submarine landslide scenarios. Despite the moderate intensity of potential tsunamis on these coasts, the city of Antibes appears to be particularly exposed because of the bathymetry, in particular for a landslide scenario like the one that occurred on Nice airport in 1979.

This event has caused many damages in Antibes. It has been simulated using submarine landslide characterization realized by IFREMER. Nested calculations with the GEOWAVE model and the SURF-WB model have allowed simulating the tsunami and the associated flood at a 3.75m resolution, including explicitly urban elements (Digital Elevation Model including buildings, walls...), thanks to adapted numerical schemes in SURF-WB (well balanced and shock-capturing schemes).

The results obtained by simulation prove to be very coherent with observations in terms of arrival time and first wave polarity along the "Baie des Anges" coast and in terms of flood in Antibes. The simulation shows that, 6 minutes after the landslide, the "La Salis" area is reached by a 3 m high tsunami. This first wave is the most important one, and causes an important flood with locally fast currents and run-up values that can reach 4 m.

Several sensitivity tests have been realized on this case. They underline the importance of using Boussinesq equations rather than NLSW equations (also called Saint-Venant equations) for short wavelength tsunamis (caused by landslides). The landslide description reveals to be fundamental too, especially the slide volume and the sediments density. Finally, these tests show the interest to include explicitly the buildings to improve coastal flooding simulations in urban areas.

Key-words: Numerical modeling, Tsunami, Submarine landslide, Coastal flooding, Urban area

I. INTRODUCTION

Les récents événements dramatiques (Océan Indien en 2004, Samoa en 2009, Chili et Indonésie en 2010, Japon en 2011) ont montré l'exposition et le manque de préparation des sociétés humaines face au risque tsunami. Dans ce contexte et sous l'impulsion de la Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO et de 2 rapports de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, l'état français a financé

la mise en place d'un Centre d'Alerte aux Tsunamis pour l'Atlantique nord-est et la Méditerranée (CRATANEM) chargé de diffuser une alerte auprès de la Direction de la Sécurité Civile (DSC) pour ce qui concerne la France. En complément, le projet ALDES, réalisé pour le compte du Ministère de l'Intérieur, a permis d'identifier et de qualifier le risque tsunami pour la côte méditerranéenne française (intensité et niveaux de dommages potentiels), de réaliser des évaluations de risque détaillées (préjudices humains et dommages structuraux) pour 3 sites (Barcarès, Bandol et

Antibes) et de mettre en place des procédures d'alerte opérationnelles sur l'un des 3 sites.

Le travail présenté ici porte sur la modélisation d'un scénario historique particulièrement impactant pour le site d'Antibes : le tsunami généré par le glissement de terrain de l'aéroport de Nice en 1979. Après quelques rappels généraux sur les tsunamis, les modèles utilisés pour simuler la génération du tsunami, sa propagation et enfin la submersion à terre en milieu urbain sont présentés. La simulation menée sur Antibes est alors exposée, depuis les caractéristiques de la source et les grilles de calcul jusqu'aux résultats en terme de submersion et de validation. Enfin, quelques tests de sensibilité réalisés sur ce cas sont présentés afin d'identifier les paramètres les plus critiques pour les études de ce type.

Les autres simulations réalisées dans le cadre du projet et les évaluations de risque qui en découlent peuvent par ailleurs être consultées respectivement dans [Le Roy *et al.*, 2012] et [Monfort *et al.*, 2012].

II. LA MODÉLISATION DES TSUNAMIS

II.1. Quelques rappels sur les tsunamis

Un tsunami correspond à une série de vagues provoquée par une action mécanique brutale et de grande ampleur au niveau d'une mer ou d'un océan, généralement d'origine tectonique, volcanique ou gravitaire (glissements de terrain), voire d'une combinaison d'événements (par exemple un glissement de terrain sous-marin généré par un séisme). Les tsunamis se propagent dans toutes les directions, parfois sur plusieurs milliers de kilomètres, jusqu'à atteindre les côtes où ils peuvent avoir un impact dévastateur. Les tsunamis peuvent être décrits selon 3 phases : la génération, la propagation et l'inondation.

A la phase de génération, les tsunamis se caractérisent par des périodes allant de quelques minutes (généralement liés à des glissements terrain) à plus d'une heure (événements tectoniques majeurs). Les longueurs d'onde associées peuvent alors varier de plusieurs dizaines à quelques centaines de kilomètres. Elles sont alors généralement largement supérieures aux profondeurs rencontrées, et les tsunamis obéissent alors à la théorie des « ondes longues ».

En se propageant vers la côte, l'onde rencontre des profondeurs de plus en plus faibles qui font chuter sa vitesse, et par conséquent sa longueur d'onde. Comme la quasi-totalité de l'énergie transportée par le tsunami est conservée lors de sa propagation, cela s'accompagne d'une augmentation des hauteurs des vagues en eau peu profonde (gonflement). A proximité du rivage, les tsunamis subissent encore des phénomènes locaux comme la diffraction, la réflexion, la dissipation par frottement et parfois, localement, par déferlement.

L'inondation du domaine terrestre dépend ensuite à la fois des caractéristiques du tsunami près du rivage (amplitude, période et longueur d'onde des vagues) et de la topographie côtière. En cas d'inondation, le tsunami ne se comporte plus comme une onde, mais comme un torrent plus ou moins canalisé par la topographie et interagissant avec la végétation, les ouvrages et le bâti côtiers. La limite d'inondation, correspondant à l'enveloppe de l'incursion maximale de l'eau dans le domaine terrestre, permet de caractériser cette zone inondée. On parle de hauteur du run-up et de profondeur d'inondation comme étant respectivement l'altitude et la distance horizontale de la limite d'inondation par rapport au niveau de la mer avant le tsunami. Localement, on peut également s'intéresser à la hauteur d'inondation qui équivaut à la différence entre les altitudes du plan d'eau et celle du substrat. Ces différents concepts sont illustrés à la Figure 1.

II.2. Génération et propagation de tsunamis : le modèle GEOWAVE

Le code GEOWAVE [Watts *et al.*, 2003] s'appuie essentiellement sur le modèle à résolution de phase FUNWAVE, auquel a été ajouté un module spécifique pour la génération des tsunamis : TOPICS. Ce modèle a été testé et validé sur de nombreux cas de référence impliquant divers contextes et divers mécanismes de génération (par exemple [Poisson et Pedreros, 2010] aux Antilles ou [Poisson *et al.*, 2011] au Sri Lanka).

II.2.1. Le module TOPICS

Le module TOPICS (Tsunami Open and Progressive Initial Conditions System) permet de générer les vagues

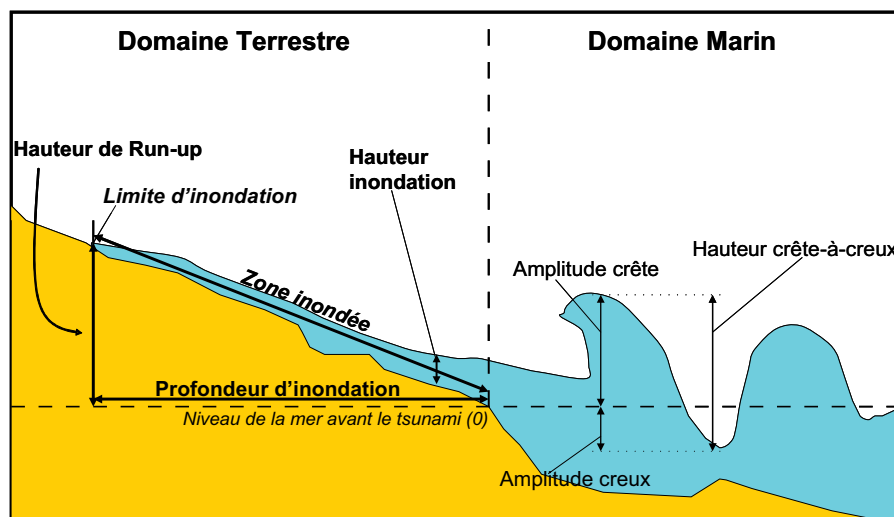


Figure 1 : Caractéristiques des tsunamis au niveau du rivage [Pedreros et Poisson, 2007].

provoquées par des séismes et des glissements sous-marins et subaériens, fournissant ainsi des conditions initiales pour le modèle FUNWAVE qui permet ensuite de simuler la propagation.

— Pour les séismes, l'initiation est modélisée en faisant appel aux algorithmes de [Okada, 1985], couramment utilisés pour ce type d'applications. Ces algorithmes permettent de calculer la déformation du plancher océanique à partir des caractéristiques de la faille à l'origine du séisme. Le tsunami initial est ensuite déduit en supposant que l'intégralité de la déformation est instantanément transmise à la surface de l'eau.

— Pour les mouvements de terrain, le code s'appuie sur des relations semi-empiriques permettant de lier les caractéristiques géométriques du glissement et les caractéristiques du tsunami à la génération (amplitude, longueur d'onde, courants). Ces relations ont été déterminées par des analyses dimensionnelles complétées par des essais de laboratoire.

- les glissements en translation (« slide ») qui sont caractérisés par une faible épaisseur et un déplacement sur une longue distance, et qui finissent souvent par se transformer en courant de turbidité ; la déformation de la surface de l'eau et les courants associés sont alors caractérisés sur la base des travaux de [Grilli et Watts, 1999] et [Grilli et Watts, 2005].

- les glissements en rotation (« slump ») qui sont caractérisés par une grande épaisseur et un faible déplacement du fait de frottements importants ; la description de la déformation de la surface de l'eau et des courants associés s'appuie là encore sur les travaux de [Grilli et Watts, 1999] et [Grilli et Watts, 2005].

- les mouvements de terrain subaériens : la génération se base sur les travaux de [Walder *et al.*, 2003] établissant des équations semi-empiriques reliant les caractéristiques du tsunami à la géométrie du glissement et aux caractéristiques du mouvement, selon que les effets prépondérants soient liés à l'impact à la surface de l'eau ou au déplacement sous l'eau.

II.2.2. Le code FUNWAVE

Le code FUNWAVE [Kirby *et al.*, 1998] est un modèle à résolution de phase initialement développé pour la simulation des vagues « classiques ». Pour cela, le modèle résout, sur un maillage régulier, les équations de Boussinesq étendues (non linéaires et faiblement dispersives) selon la méthode de [Wei *et al.*, 1995]. La désactivation des termes dispersifs permet par ailleurs si nécessaire de travailler sous l'hypothèse « d'ondes longues » (NLSWE, pour Non-Linear Shallow-Water Equations, ou équations de Saint-Venant). La possibilité de simuler la propagation avec les équations de Boussinesq s'avère particulièrement intéressante pour le cas de tsunamis d'origine gravitaire, pour lesquels la longueur d'onde limitée peut rendre caduque l'hypothèse « d'ondes longues ».

Les paramètres initiaux du tsunami calculés par TOPICS (déformation de la surface libre, et, dans le cas de mouvements de terrain, courants associés) sont utilisés comme conditions initiales pour FUNWAVE, qui se charge alors de propager les vagues et d'estimer l'inondation au rivage (paramétrisation du déferlement et traitement spécifique des zones couvrantes-découvrantes).

Le modèle d'origine a été légèrement modifié afin d'une part d'optimiser les procédures (pré et post-traitement, lancement, gestion de la mémoire), et d'autre part de permettre la gestion de grilles emboîtées, nécessaires pour affiner la résolution à la côte.

II.3. Submersion à terre : le modèle SURF-WB

Le code SURF-WB [Marche *et al.*, 2007] est un modèle à résolution de phase issu de la dérivation d'un modèle de Saint-Venant visqueux bi-dimensionnel à partir des équations de Navier-Stokes homogènes et incompressibles. Il inclut des termes de diffusion, de friction, de Coriolis ou encore de tension de surface de manière rigoureuse d'un point de vue mathématique. Il prend en compte la friction au sol par l'intermédiaire de coefficients de Manning qui peuvent être spatialisés. Il permet de simuler les écoulements littoraux dans le cas de fortes variations topographiques (dont le bâti) grâce à la mise en place de schémas numériques à capture de choc et bien équilibrés (« well-balanced »). Il converge donc vers un état stationnaire au repos après le passage d'une onde et gère de manière satisfaisante les découvements/recouvrements (sec/mouillé).

Le fait que ce modèle repose sur les équations de Saint-Venant le rend capable de représenter le comportement de vagues déferlées, mais il ne permet pas d'identifier quand le déferlement survient : son domaine d'application reste donc restreint en général aux zones de surf et de swash, ce qui peut s'avérer surtout contraignant pour des vagues « classiques », les tsunamis ne déferlant que rarement.

Un chaînage a été développé entre GEOWAVE et SURF-WB afin de simuler à très haute résolution la submersion causée par un tsunami (SURF-WB utilisant lui aussi des maillages réguliers, une résolution ne dépassant pas quelques mètres est nécessaire pour une bonne représentation des zones urbaines).

III. LE CAS D'ANTIBES

III.1. Situation d'Antibes face au risque Tsunami et l'événement de 1979

La ville d'Antibes est située dans les Alpes-Maritimes (06), à une quinzaine de kilomètres à vol d'oiseau vers le sud-ouest de la ville de Nice, du côté Ouest de la Baie des Anges. La bathymétrie de la Baie des Anges présente la particularité d'avoir un plateau continental particulièrement réduit en raison de la présence du canyon du Var, hormis devant Antibes où il peut atteindre 3 kilomètres de large, pour des profondeurs de l'ordre de 100 m (Figure 2). Vis-à-vis du risque tsunamis, la présence de ce plateau constitue une configuration défavorable dans la mesure où il permet un ralentissement de la vague s'accompagnant d'une amplification de sa hauteur.

Lors des travaux d'extension de l'aéroport de Nice, en 1979, un glissement de terrain entraîna un volume considérable de remblais du chantier vers le large, dans le canyon sous-marin du Var. Ce glissement provoqua la mort de 7 des personnes travaillant sur le chantier et se propagea au large jusqu'à au moins mi-distance de la Corse (distance attestée par la rupture de câbles sous-marins et par des reconnaissances ultérieures). Le déplacement d'un tel volume de matériaux à faible profondeur entraîna un important mouvement d'eau à l'origine d'un tsunami dont les conséquences ont été ressenties dans toute la Baie-des-Anges. Du fait de l'orientation du glissement et de la présence d'un plateau continental, les effets de ce tsunami ont été particulièrement importants au niveau de la ville d'Antibes, située à 10 kilomètres du glissement, où les témoignages font état d'une élévation du niveau de la mer de 3 à 4 m, ayant entraîné un décès supplémentaire.

III.2. Simulation du tsunami de 1979 sur Antibes

III.2.1. Le glissement de l'aéroport de Nice

Le glissement de terrain survenu à Nice en 1979 a été assez largement étudié et discuté depuis sa survenue. Ainsi, par exemple, les travaux du [GIS CURARE, 2006] concluaient à la succession de 2 glissements de terrain consécutifs, présentant des caractéristiques distinctes, mais les simulations de tsunamis menées sur cette base se sont révélées assez peu conformes aux observations (amplitudes, polarités, périodes).

Les travaux les plus récents sur ce glissement de terrain ont été réalisés dans le cadre du projet RATCOM [Silva Jacinto et Meyniel, 2010]. Ils ont notamment permis, en s'appuyant sur des reconnaissances sous-marines, de caractériser plus finement les matériaux mis en jeu et la

dynamique du glissement à travers sa modélisation. Les résultats concluent à un glissement de 10 millions de m³ de sédiments, d'une densité 1.4, qui se serait propagé à travers 3 petits canyons avant de rejoindre le canyon du Var proprement dit (Figure 3). Le modèle a également mis en évidence l'importance des phénomènes de suspension et de dilution des matériaux, puisque les flux sont les plus importants au cours des premières minutes du glissement, puis diminuent considérablement en même temps que l'épaisseur s'accroît et que la concentration diminue (Figure 3), traduisant la transformation en courant de turbidité dont l'effet tsunamigène devient négligeable.

Cette caractérisation du glissement a permis de définir les paramètres nécessaires à TOPICS pour générer le tsunami associé au glissement, à savoir la position, la géométrie et la densité du matériau glissé. Les paramètres retenus pour la modélisation sont synthétisés dans le Tableau 1.

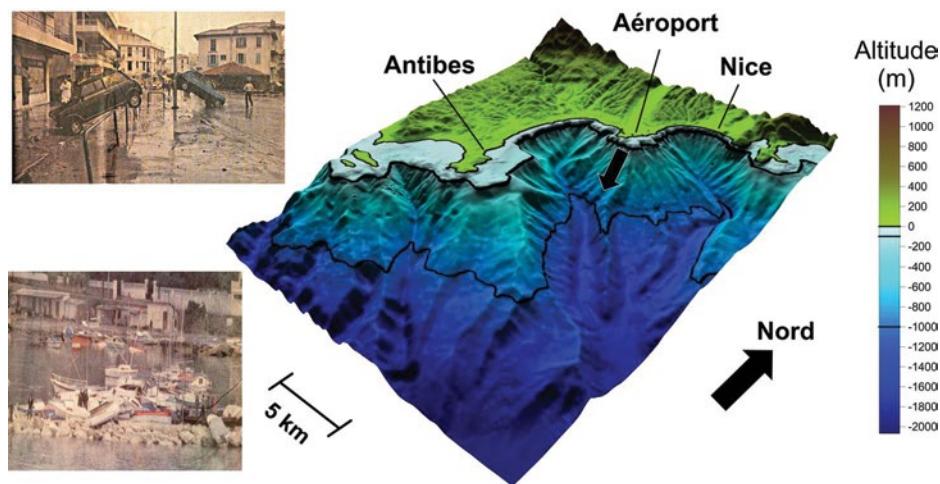


Figure 2 : Bathymétrie de la Baie des Anges, position du glissement de terrain de 1979 (flèche noire) et photographies du Port de La Salis après le tsunami (issues de www.alertes-meteo.com).

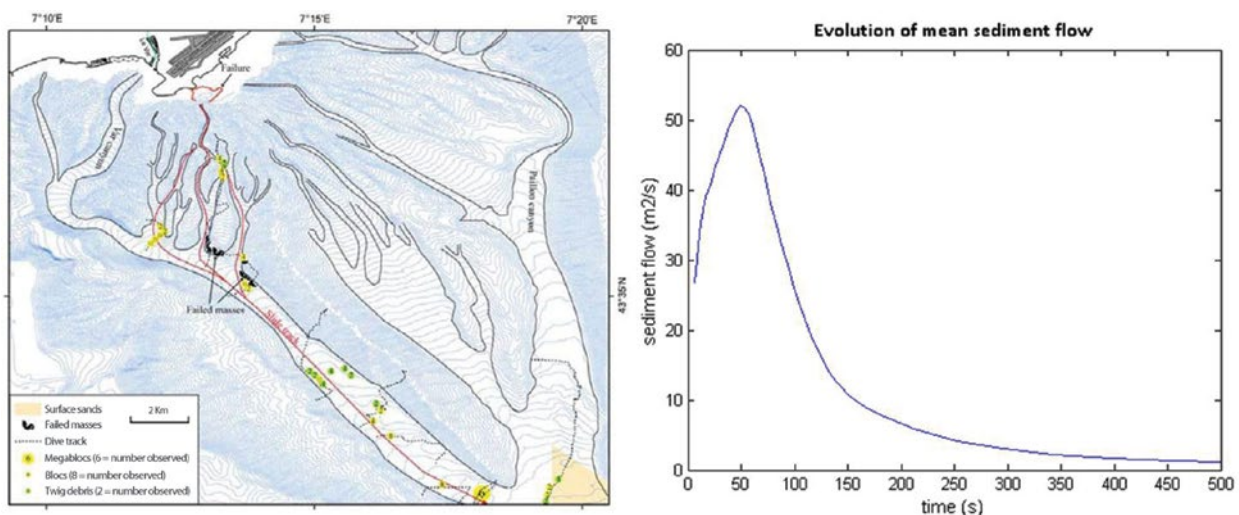


Figure 3 : Observations sous-marines dans le canyon du Var suite au glissement et évolution modélisée du flux de sédiment durant le glissement [Silva Jacinto et Meyniel, 2010].

Tableau 1 : Paramètres retenus pour générer le tsunami avec TOPICS.

Paramètres	Valeurs
Position initiale du centre de gravité (WGS 84)	N 43°38'44.4" E 007°12'55.0"
Direction par rapport au Nord (sens horaire, °)	182,3
Profondeur du glissement (m)	47
Pente moyenne du glissement (°)	10,2
Longueur maximale du volume glissé (m)	900
Largeur maximale du volume glissé (m)	700
Epaisseur maximale du volume glissé (m)	50
Densité du matériau glissé	1,4

III.2.2. Stratégie de modélisation

Le module TOPICS est utilisé pour calculer des conditions initiales (déformation du plan d'eau et courants) qui sont ensuite propagées avec FUNWAVE. L'objectif de l'étude étant de simuler la submersion sur Antibes, il est nécessaire, afin d'optimiser les temps de calcul, de travailler par calculs emboîtés afin d'affiner la résolution sur la zone d'intérêt.

Pour cela, 3 grilles topo-bathymétriques ont été réalisées, de résolutions et d'emprises décroissantes. Les données utilisées pour la réalisation de ces grilles sont issues des bases de données bathymétriques du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (base HISTOLITT) et de l'IFREMER, et d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT)

terrestre à une résolution de 5 mètres du Conseil Général des Alpes-Maritimes. Pour la grille la plus fine, destinée à la simulation de la submersion par le code SURF-WB, les bâtiments ont également été pris en compte par la surimposition d'un sursol généré avec la couche « bâti » de la BDTOPO de l'IGN, de manière à disposer d'un Modèle Numérique d'Élévation (MNE). Des corrections ponctuelles ont également été apportées de manière à intégrer divers obstacles aux écoulements (murs et murets).

Au final, la propagation du tsunami est réalisée par le modèle FUNWAVE sur 2 grilles, nommées Rang 0 et Rang 1, de résolutions respectives 45 m et 15 m, alors que la submersion est simulée avec SURF-WB sur une grille nommée Rang 2, de résolution 3.75 m, intégrant explicitement le bâti dans la topographie (Figure 4).

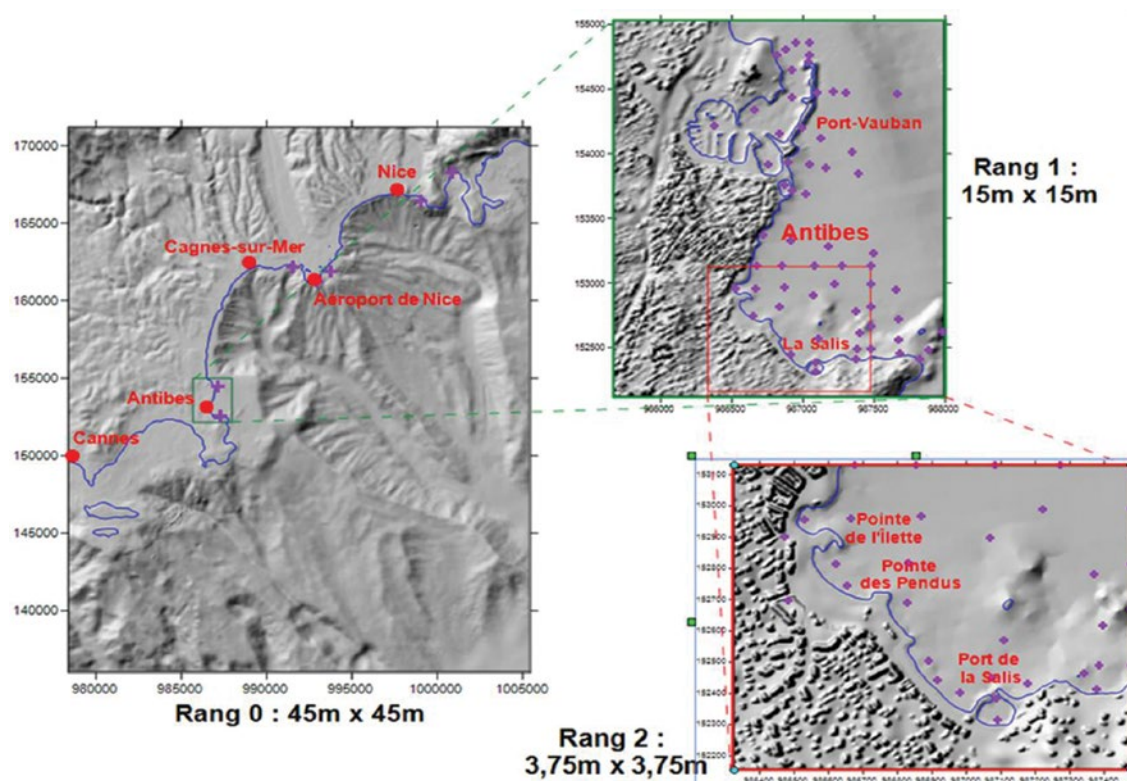


Figure 4 : Emboîtement des 3 grilles de calcul utilisées et position des jauges numériques dans chaque grille (croix mauves).

III.3. Résultats obtenus

Cette partie synthétise les résultats issus de la simulation au Rang 0 et au Rang 2 (le Rang 1, intermédiaire, présentant moins d'intérêt), et s'attarde notamment sur les éléments de validation disponibles.

III.3.1. Résultats au Rang 0

La simulation au Rang 0 reçoit donc comme conditions initiales la déformation et les courants calculés par TOPICS et la propage à travers la Baie des Anges (Figure 5). La déformation calculée par TOPICS correspond à la situation 111 secondes après le début du glissement, et indique un creux de près de 20 m à environ 1,5 km au large de l'aéroport, puis une surélévation d'environ 5 m encore 1,5 km plus au large.

La simulation sur 20 minutes de la propagation des vagues permet de visualiser l'impact à la côte le long de la Baie des Anges. Ceci est synthétisé sur la partie gauche de la Figure 6, qui représente l'élévation maximale du plan au cours de la simulation. On remarque notamment l'amplification devant Antibes liée à la présence du plateau continental, qui conduit à une cote maximale pouvant atteindre 8 m au large du quartier de la Salis.

L'analyse des jauges numériques implantées dans la simulation (positions indiquées par des croix à la Figure 4) permet la comparaison avec les témoignages synthétisés par [Donnadieu, 2010]. Les résultats sur ces jauges sont présentés sur la partie droite de la Figure 6. On peut notamment remarquer le contraste entre les résultats obtenus à Antibes – La Salis par rapport à ceux du Port-Vauban, situé à environ 1 km plus au Nord, pour lequel le plateau continental est

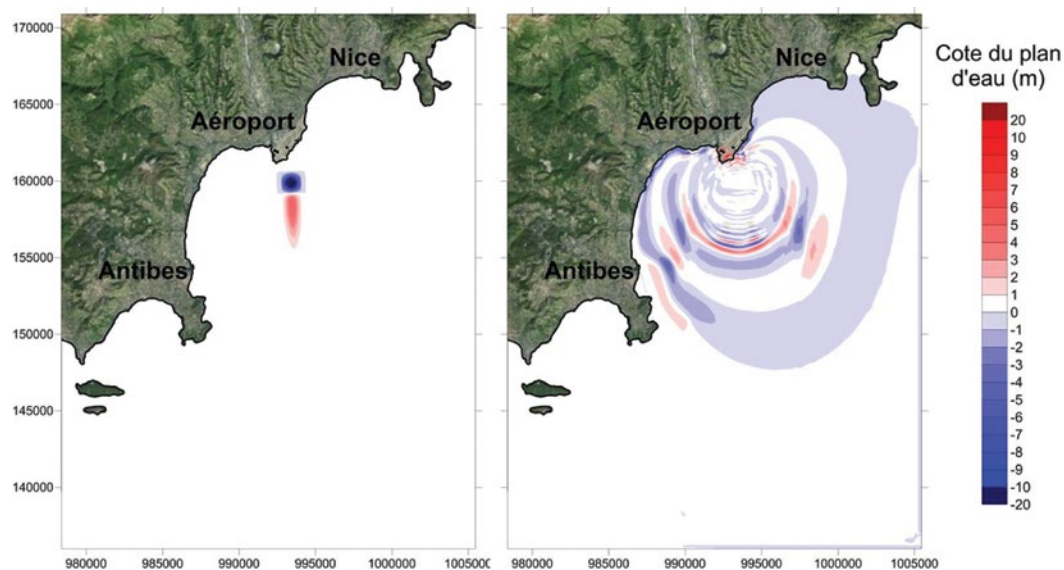


Figure 5 : Aperçu de la déformation initiale calculée par TOPICS (111 sec après le glissement, à gauche) et après quelques minutes de propagation par FUNWAVE (4 min après le glissement, à droite).

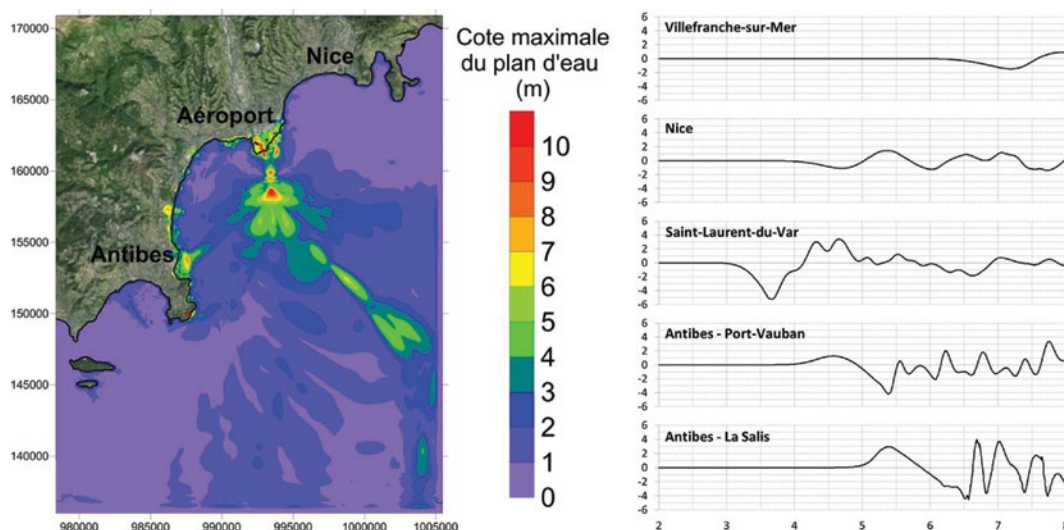


Figure 6 : Résultats au Rang 0 : A gauche : Cote maximale du plan d'eau au cours des 20 minutes simulées ; A droite : Variations du niveau d'eau au niveau des jauges numériques sur les premières minutes de simulation.

sensiblement plus réduit, ce qui conduit à un ralentissement et à une amplification moindres des vagues.

La confrontation de ces résultats aux témoignages est synthétisée au Tableau 2. Cette confrontation demeure très délicate dans la mesure où les témoignages des observateurs dépendent grandement de leur position au moment de l'arrivée du tsunami, et que plusieurs témoignages peuvent indiquer des informations incohérentes. On constatera toutefois que les polarités de la première vague (crête ou creux) sont tout à fait correctes dans la simulation, que les temps d'arrivée restent cohérents avec les témoignages et que les ordres de grandeur de hauteur de la première vague sont respectés, avec toutefois une certaine surestimation dans la simulation à Saint-Laurent et Antibes.

III.3.2. Résultats au Rang 2

La simulation de submersion, menée avec le modèle SURF-WB à une résolution de 3,75 m, a nécessité un soin

particulier pour la représentation des bâtiments, des rues et des obstacles potentiels à l'écoulement (murs et murets). La friction au sol a été représentée par une formulation de Manning, en distinguant uniquement le domaine marin (coefficient de $0,025 \text{ s/m}^{1/3}$, représentatif de fonds relativement propres et réguliers) et le domaine terrestre (coefficient de $0,014 \text{ s/m}^{1/3}$, représentatif du béton ou de l'asphalte puisque les bâtiments sont intégrés au MNE). L'analyse des résultats permet de caractériser à la fois les hauteurs d'eau et les courants (intégrés sur la verticale) instantanés et maximaux, ainsi que leurs évolutions au niveau des jauges numériques.

Les résultats de la simulation montrent que l'essentiel de la submersion est causé par la première vague, qui peut dépasser les 3 m à la côte. Les hauteurs d'eau maximales à terre sont comparées à l'extension maximale de la submersion reconnue par [Sahal et Lemahieux, 2010] à la Figure 7. Ce résultat montre une très grande cohérence

Tableau 2 : Première vague à Saint-Laurent-du-Var (PSL), Nice (PN), Villefranche-sur-Mer (PVi), Antibes – Port-Vauban (PV) et Antibes – La Salis (PAS) : Comparaison entre les observations et les simulations (Boussinesq – Saint-Venant) en termes de temps d'arrivée, de polarité et d'amplitude.

	Instant d'arrivée			Première vague (polarité et amplitude)		
	Observation	Equations de Boussinesq	Equations de Saint-Venant	Observation	Equations de Boussinesq	Equations de Saint-Venant
PSL	1'	Début : 2' 40" Max : 3' 40"	Début : 2' 50" Max : 3' 30"	Creux > 2 m	Creux 5,20 m	Creux 5,20 m
PN	3' Marégraphe : début à 3'	Début : 3' 30" Max : 4' 40"	Début : 3' 50" Max : 4' 20"	Creux 1 m	Creux 1,10 m	Creux 1,70 m
PVi	5' Marégraphe : début à 6'	Début : 5' 50" Max : 7' 10"	Début : 6' Max : 6' 50"	Creux ~ 1 m	Creux 1,40 m	Creux 1,30 m
PV	5'	Début : 3' 30" Max : 4' 30"	Début : 3' 50" Max : 4' 10"	Crête 30 cm	Crête 1,20 m	Crête 3 m
PAS	5'	Début : 4' 30" Max : 5' 20"	Début : 4' 40" Max : 5' 20"	Crête ~ 50 cm	Crête 2,90 m	Crête 3,80 m

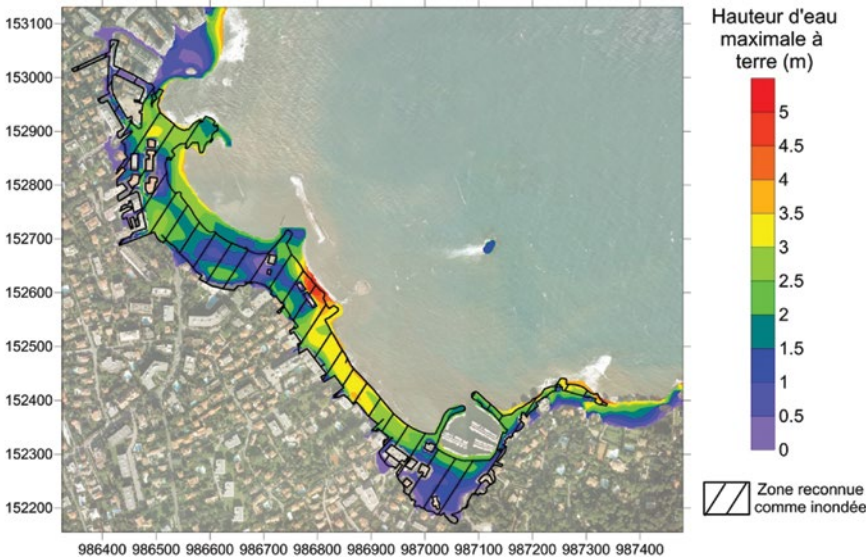


Figure 7 : Hauteurs d'eau maximales à terre lors de la simulation et zone reconnue comme inondée par [Sahal et Lemahieux, 2010].

entre la simulation et les observations, hormis aux extrémités Nord et Est de l'emprise où la submersion est surestimée. Ceci pourrait s'expliquer notamment par la qualité du MNE utilisé (résolution de 5 m, présence d'ouvrages en front de mer...). Ailleurs, la profondeur maximale d'inondation (distance inondée depuis la côte) varie entre une cinquantaine de mètres et 200 m suivant les secteurs, conformément aux observations.

Les hauteurs d'eau simulées peuvent finalement atteindre 1 à 2,5 m, voire plus localement en front de mer (4 à 5 m sous l'effet des bâtiments qui provoquent l'accumulation d'eau par blocage). De même, les courants maximaux à terre durant la simulation dépassent généralement les 5 m/s (voire plus en front de mer), avec parfois des hauteurs d'eau associées importantes.

III.4. Sensibilité de la méthode

Plusieurs tests de sensibilité ont été menés sur ce cas afin d'estimer l'influence des différents paramètres sur les résultats de la simulation.

III.4.1. Influence de la caractérisation du glissement

Les 3 tests menés sur la description du glissement de terrain ont porté sur la direction du glissement, sur le volume glissé et sur la densité du matériau glissé. L'ensemble de ces tests montre une grande sensibilité des résultats de la simulation de submersion à la description du mouvement de terrain. En effet, une légère modification de la direction du glissement en direction d'Antibes (modification de 5° seulement) apporte déjà des différences sensibles en termes de submersion à terre, avec des hauteurs d'eau maximales pouvant augmenter de 40 à 50 cm, voire plus localement. De même, une réduction du volume glissé d'environ 1/3 conduit à une submersion sensiblement plus réduite, avec des hauteurs d'eau maximales réduites de 1,5 à 2 m et des courants maximaux réduits de 1 à 3 m/s suivant les secteurs.

Enfin, la densité du matériau glissé s'avère encore plus fondamentale, puisqu'une simulation menée en supposant une densité de sédiment de 2 (contre 1,4 mesurée par l'Ifremer) produit dès le Rang 0 des écarts très importants : en effet, dès la génération du tsunami par TOPICS, on constate que le creux atteint cette fois plus de 46 m pour une crête de plus de 12 m (contre respectivement près de 20 m

et 5 m avec une densité de 1,4). La propagation du tsunami associé conduit alors à des vagues extrêmes (plus de 20 m sur Antibes). En raison d'instabilités numériques, la simulation n'a alors pas été poursuivie aux Rangs 1 et 2.

III.4.2. Influence de la représentation des obstacles dans le MNE

Deux tests ont été menés en modifiant le MNE utilisé pour la simulation de la submersion. Le premier test a consisté à intégrer les ouvrages maritimes construits postérieurement à l'événement (il s'agit de 2 brise-lames, dont un très réduit, que l'on peut percevoir sur le fond photographique de la Figure 7). La modification des résultats en termes de submersion reste cependant limitée, l'extension de l'inondation n'étant pas fondamentalement modifiée et les hauteurs d'eau maximales n'étant réduites que très localement de quelques dizaines de centimètres.

Le second test a consisté à effectuer la simulation sur un MNT au lieu d'un MNE (donc sans prendre en compte les bâtiments), les coefficients de Manning restant inchangés (donc caractéristiques du béton à terre). Les résultats de la simulation sont alors très sensiblement modifiés, comme l'illustre la Figure 8 (partie gauche) : l'extension de l'inondation est alors beaucoup plus importante et dépasse largement les limites connues de l'inondation, alors que les hauteurs d'eau maximales sont sensiblement réduites (généralement de quelques dizaines de centimètres à 1 m, mais localement de près de 2 m en front de mer). Ceci illustre bien l'effet des obstacles à l'écoulement que constituent les bâtiments, et la nécessité de les prendre en compte pour estimer l'aléa en milieu urbain.

III.4.3. Influence des équations (Boussinesq – NLSWE)

Le dernier test réalisé a consisté à simuler la propagation du tsunami (Rangs 0 et 1) en utilisant les équations de Saint-Venant (NLSWE) au lieu des équations de Boussinesq. La longueur d'onde du tsunami généré étant de l'ordre de 2 km, et les profondeurs traversées dans le canyon du Var pouvant atteindre 800 à 2000 m, l'hypothèse d'ondes longues ne peut être considérée comme strictement vérifiée. Le cas de Nice constitue donc un bon exemple pour illustrer les limites des équations de Saint-Venant pour des tsunamis d'origine gravitaire.

Au Rang 0, indépendamment de l'absence de dispersion fréquentielle avec les équations de Saint-Venant, l'arrivée

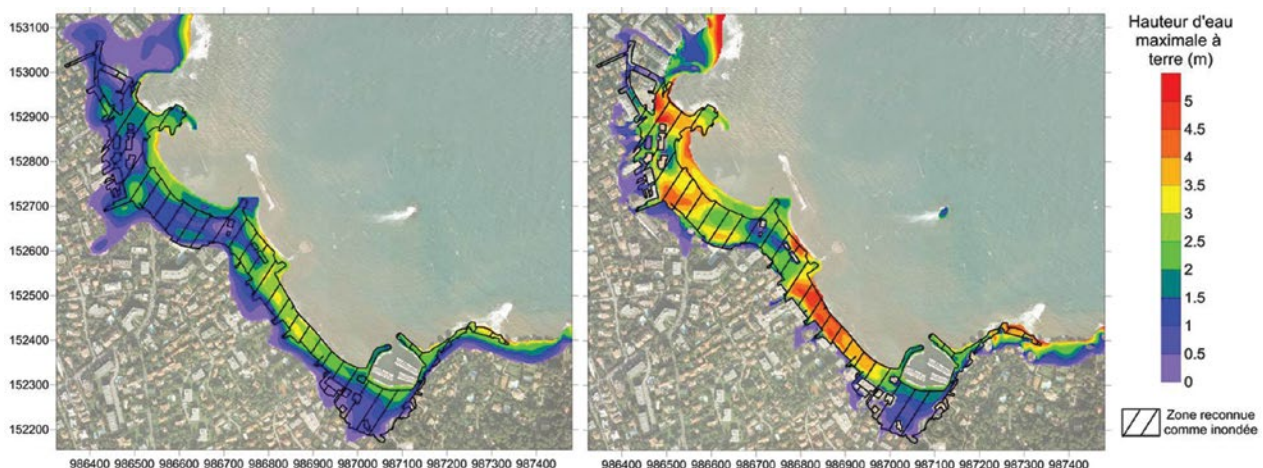


Figure 8 : Hauteurs d'eau maximales au cours des simulations sans bâti (à gauche) et en utilisant les équations de Saint-Venant pour la propagation du tsunami (à droite).

de la première vague peut être comparée avec les observations (Tableau 2). Cette comparaison montre que les résultats sont mieux validés en utilisant les équations de Boussinesq, notamment en ce qui concerne l'amplitude de la première vague sur Antibes.

La simulation a été poursuivie aux Rangs 1 (toujours avec les équations de Saint-Venant) et 2 (même méthode que précédemment) afin de comparer les conséquences du changement d'équations en termes de submersion. Il s'avère au final que si l'étendue de l'inondation est assez peu modifiée dans le Sud de la zone avec les équations de Saint-Venant, elle est sensiblement plus conséquente dans la partie Nord, certaines rues non inondées étant cette fois atteintes par l'eau et certains obstacles ayant pu être franchis (Figure 8, partie droite). Les hauteurs d'eau maximales sont globalement considérablement augmentées (de 1 à 1,5 m, voire 2 m localement), ainsi que les courants maximaux à terre qui sont typiquement augmentés de 1 à 2 m/s.

IV. CONCLUSIONS

La simulation réalisée dans le cadre du présent travail a permis de reconstituer de manière très satisfaisante le tsunami de 1979 sur Antibes, notamment grâce à la caractérisation du glissement de terrain par [Silva Jacinto et Meyniel, 2010]. Il s'agit ainsi du premier modèle à notre connaissance qui permette de retrouver les polarités des premières vagues telle qu'elles ont été observées sur la côte de la Baie des Anges en 1979. La simulation de la submersion par un modèle utilisant des schémas numériques adaptés à la représentation du bâti en milieu urbain (bien équilibré à capture de chocs) a également permis de reconstituer une inondation très fidèle à celle correspondant aux observations en termes d'extension et de run-up, ce qui ne peut être réalisé aussi finement sans prise en compte explicite du bâti et des rues. Ce type de simulations à très haute résolution en milieu urbain peut être utilisé pour une évaluation fine du risque, tant pour les bâtiments que pour les personnes [Monfort *et al.*, 2012].

Les quelques tests de sensibilité menés sur le cas d'Antibes ont toutefois mis en évidence les difficultés liées à la modélisation de tsunamis d'origine gravitaire. Dans l'approche paramétrique utilisée ici, la caractérisation du glissement de terrain sous-marin, qui reste généralement mal connu, peut avoir des répercussions très importantes sur les résultats de modélisation, notamment pour ce qui concerne la densité des sédiments, et dans une moindre mesure le volume déplacé. La seconde difficulté, souvent négligée, repose sur l'inadéquation des équations de Saint-Venant (Non Linear Shallow Water Equations) à la description de tsunamis d'origine gravitaires, du fait de leurs longueurs d'ondes généralement plus modérées que celles des tsunamis d'origine sismique. L'étude de ces phénomènes nécessite donc généralement l'utilisation de modèles adaptés, utilisant par exemple comme ici les équations de Boussinesq.

V. REFERENCES

- DONNADIEU C. (2010) — Modélisation du tsunami généré par le glissement de terrain de Nice, 1979 – Etude de scénarios et effets à la côte. *Rapport CEA RATCOM_SP3_D2-2*
- GIS CURARE (2006) — Axe III - Mouvements du sol et instabilités gravitaires en mer. *Rapport Intermédiaire d'activité*. 87 p
- GRILLI S.T. AND WATTS P. (1999) — Modeling of waves generated by a moving submerged body : Applications to underwater landslides. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. **23** 645-656
- GRILLI S.T. AND WATTS P. (2005) — Tsunami generation by submarine mass failure. Part 1: Modeling, experimental validation and sensitivity analysis. *J. Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*. **131(6)** 283-297
- KIRBY J. T., WEI G., CHEN Q., KENNEDY A. B. AND DALRYMPLE R. A. (1998) — FUNWAVE 1.0, Fully nonlinear Boussinesq wave model. Documentation and users manual. *Report CACR-98-06, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware*
- LE ROY S. ET PEDREROS R. AVEC LA COLLABORATION DE MONFORT-CLIMENT D. (2011) — ALDES : Modélisation numérique du tsunami survenu à Antibes en 1979. *Rapport BRGM/RP-60353-FR*. 80 p. 61 ill
- LE ROY S., MONFORT D. ET PEDREROS R. (2012) — Projet ALDES : Simulations numériques de tsunamis en Méditerranée Occidentale. *Rapport BRGM/RP-61473-FR*. 95 p., 62 ill
- MARCHE F., P. BONNETON P. FABRIE AND N. SEGUIN (2007) — Evaluation of well-balanced bore-capturing schemes for 2D wetting and drying processes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. **53** 867-894
- MONFORT D., LE ROY S., PEDREROS R., TERRIER M. (2012) — Projet ALDES : Scénarios de risque tsunami en Méditerranée Occidentale. *Rapport BRGM/RP-61322-FR*. 83 p., 37 fig., 3 annexes
- OKADA Y. (1985) — Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **75** 1135-1154
- PEDREROS R. ET POISSON B. (2007) — Etude de cas au niveau de la côte méditerranéenne : modélisation numérique des tsunamis. *Rapport BRGM/RP-55760-FR*. 176 p., 123 fig., 27 tabl., 2 ann
- POISSON B. ET PEDREROS R. (2010) — Numerical modelling of historical landslide-generated tsunamis in the French Lesser Antilles. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. **10** 1281-1292
- POISSON B., OLIVEROS C. AND PEDREROS R. (2011) — Is there a best source model of the Sumatra 2004 earthquake for simulating the consecutive tsunami? *Geophysical Journal International*. **185** 1365-1378
- SAHAL A. ET LEMAHIEU A. (2010) — The 1979 Nice airport tsunami : mapping of the flood in Antibes. DOI: 10.1007/s11069-010-9594-6. *Natural Hazards*. **56** 833-840
- SILVA JACINTO R. ET MEYNIEL P. (2010) — RatCom – Réseaux d'alerte aux Tsunamis et submersions Côtières en Méditerranée. Modélisation des écoulements gravitaires sous-marins en Baie-des-Anges en vue de la génération de tsunamis dans le champ proche. *R. int Ifremer Brest / GM / LES / 201-08*
- WALDER J.S., WATTS P., SORESENSEN O.E., AND JANSSEN K. (2003) — Tsunamis generated by subaerial mass flows. *Journal of Geophysical Research*. **108:B5** 2236
- WATTS P., GRILLI S. T., KIRBY J. T., FRYER G. J. AND TAPPIN D. R. (2003) — Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. **3** 391-402
- WEI G., KIRBY J. T., GRILLI S. T., AND SUBRAMANYA R. (1995) — A fully nonlinear Boussinesq model for free surface wave. Part 1: Highly unsteady waves. *J. Fluid Mech.* **294** 71-92