

# Méthode d'évaluation de la vulnérabilité physique, fonctionnelle et économique des réseaux d'eau potable aux glissements de terrain : application à la Martinique

■ B. COLAS<sup>1</sup>, A. NACHBAUR<sup>1</sup>, M. LE ROY<sup>1</sup>, J.-D. RINAUDO<sup>1</sup>, I. BARNERIAS<sup>2</sup>

**Mots-clés :** glissement de terrain, réseau AEP, rupture de canalisation, vulnérabilité physique et fonctionnelle, dommages socio-économiques, Martinique

**Keywords:** landslide, water supply network, water pipeline rupture, physical and functional vulnerability, socio-economic damage, Martinique

## Introduction

L'infrastructure d'alimentation en eau potable (AEP) est fréquemment exposée à des phénomènes naturels aléatoires (événement climatique extrême, séisme, mouvement de terrain) susceptibles de perturber ou d'interrompre son fonctionnement. De nombreux éléments constitutifs de cette infrastructure peuvent être affectés, notamment la ressource exploitée (turbidité de l'eau après des événements climatiques extrêmes, destruction de la prise d'eau ou du forage par une crue), les ouvrages de pompage, de stockage ou de traitement, les réseaux assurant leur alimentation électrique ou les conduites d'adduction. Compte tenu des moyens limités dont ils disposent, les gestionnaires sont amenés à identifier les ouvrages et les tronçons constitutifs de l'infrastructure qui doivent être sécurisés en priorité, en considérant à la fois le niveau d'exposition à l'aléa (c'est-à-dire la probabilité de subir une agression) et la vulnérabilité de chaque élément.

Cet article s'intéresse plus particulièrement à la notion de vulnérabilité, globalement définie comme la sensibilité au phénomène source de désordre.

Celle-ci peut être appréhendée à plusieurs échelles. À l'échelle de chaque élément de l'infrastructure, on caractérise une vulnérabilité physique matérielle rendant compte de la capacité de l'ouvrage à résister à la source de désordre, cette capacité dépendant du contexte géotechnique (stabilité des terrains), de la résistance mécanique des matériaux (canalisation acier soudé *versus* PVC collé) et de leur mise en œuvre (génie civil), etc. À l'échelle du réseau, on caractérise la vulnérabilité fonctionnelle, c'est-à-dire la capacité du réseau à continuer à fonctionner lors d'un désordre. La vulnérabilité fonctionnelle dépend de la redondance du réseau (maillage, possibilité d'inverser les sens de circulation), des délais de réparation en cas de désordre, des capacités de stockage ou de distribution par secteur avec des coupures tournantes par exemple. Enfin, à l'échelle du territoire alimenté par le réseau AEP, la notion de vulnérabilité est abordée à travers une analyse des dommages (humains, économiques) subis par les usagers en cas de désordre affectant l'infrastructure AEP. La vulnérabilité économique dépend de la capacité des usagers du réseau à faire face à une interruption de l'approvisionnement en eau potable et d'éviter d'en subir des dommages économiques ou humains.

Cet article propose une méthode visant à intégrer ces trois dimensions de la vulnérabilité dans une analyse du risque d'interruption de l'alimentation en eau

<sup>1</sup> BRGM – Direction régionale Martinique – Villa Bel Azur – 4, lotissement Miramar – route Pointe-des-Nègres – 97200 Fort-de-France.

<sup>2</sup> Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement de la Martinique – Pointe de Jaham – BP 7212 – 97274 Schoelcher cedex.

potable. Il présente une méthodologie innovante qui est appliquée à une situation de risque de mouvement de terrain aux Antilles. L'article commence par une présentation du contexte et du terrain d'étude à la Martinique, mettant en évidence la dimension économique du risque de rupture de canalisation induit par des mouvements de terrain. Il présente ensuite la méthode développée pour une analyse multidimensionnelle de la vulnérabilité des réseaux d'adduction d'eau potable à l'aléa mouvement de terrain, ainsi que les résultats obtenus dans le cas d'étude. Des perspectives sont proposées en conclusion.

## 1. Contexte et cas d'étude

Les mouvements de terrain représentent l'une des principales sources de risque autres qu'anthropiques de casse des canalisations d'adduction d'eau potable. Lorsqu'ils affectent des canalisations principales, les désordres occasionnés conduisent à une interruption totale du service, affectent un nombre très important d'abonnés et peuvent être longs à résorber. Citons à titre d'exemple le cas où un mouvement de terrain occasionne, en novembre 2012, la rupture de deux canalisations d'eau potable sur environ 150 m sur la commune du Puy-en-Velay. Douze communes, soit 11 000 habitants, se voient privées d'eau pendant quelques jours. À la Réunion, un glissement de terrain a engendré la casse d'une canalisation privant 10 000 abonnés d'eau courante en 2012 et très récemment un important glissement de terrain a généré l'ensevelissement et la rupture de la conduite d'adduction du captage Grand Bras sans grave conséquence majeure, grâce notamment aux interconnexions existantes du réseau d'alimentation. C'est un incident de ce type qui a motivé l'engagement de l'étude présentée dans cet article.

### 1.1. L'événement de mai 2009 à la Martinique

En mai 2009, sur la commune du Lorrain en Martinique, un glissement de terrain a entraîné la rupture d'une canalisation d'adduction d'eau de diamètre 800 mm provenant de l'usine de production d'eau de Vivé (unité de production d'eau potable de la Capot) sur environ 30 m linéaires (figure 1). Cette canalisation d'un débit maximal de 35 000 m<sup>3</sup>/jour alimentait en eau 100 000 personnes, réparties sur 12 communes.



Figure 1. Glissement de Séguineau (mai 2009), casse de canalisation Ø 800 mm

L'approvisionnement est totalement interrompu pour plusieurs jours dans certains secteurs et jusqu'à 3 semaines dans la commune de Trinité et dans certains quartiers de celle du Robert. Cette situation de crise a conduit à engager une réflexion sur la vulnérabilité des réseaux AEP aux phénomènes de glissement de terrain, avec pour objectif la hiérarchisation spatiale du risque à l'échelle départementale.

### 1.2. Typologie des coûts induits par la rupture d'alimentation

L'interruption totale ou partielle de l'alimentation en eau a entraîné différents types de coûts directs et indirects, dont une typologie est proposée ci-dessous :

- le coût associé à la remise en service provisoire, puis définitive, des installations ; ce coût a été évalué sur la base des informations fournies par le conseil général ; il s'agit d'un coût financier, facilement quantifiable ; dans le cadre de cette étude, le conseil général a transmis au BRGM une estimation financière des coûts induits par cette rupture. Il distingue le coût des réparations proprement dites et le coût de l'arrêt des installations (manque à gagner lié à la baisse des ventes d'eau notamment). Le coût est finalement estimé à 2,5 M€ ;

- le coût des actions de gestion de la crise : production et distribution de sachets d'eau potable à la population des communes de La Trinité et de certains quartiers du Robert ; acheminement dans les quartiers de citernes d'eau et distribution aux populations ; installation de cuves d'eau dans les écoles et les maisons de retraite ; alimentation par camion de certains établissements accueillant du public (hôpital de La Trinité) ; etc. Ces coûts ont été supportés

par les municipalités, les syndicats d'eau potable, le département (intervention des pompiers) et par l'État (intervention de l'armée, sécurité civile) ;

- le coût pour les entreprises dont l'activité a été perturbée par l'interruption partielle (tours d'eau) ou totale de la distribution d'eau ; la coupure d'eau a pu entraîner un arrêt total de certaines activités pendant plusieurs jours, voire semaine (hôtel à La Trinité) occasionnant une perte de chiffre d'affaires importante ; dans d'autres cas, elle a conduit à une réduction de l'activité (coiffeurs) ou occasionné des coûts supplémentaires pour les artisans (utilisation d'eau en bouteille ou transport d'eau pour faire fonctionner la restauration) ;

- le coût supporté par les ménages sous forme de temps passé pour obtenir de l'eau ensachée ou s'approvisionner auprès des citernes mobiles dans les quartiers et transporter cette eau dans les logements ; ce coût a été partagé avec les employeurs (réduction des horaires de travail). On peut également considérer que la perte de confort ressentie par les usagers ayant dû vivre plusieurs semaines sans eau représente un coût, même s'il est difficile à évaluer en termes monétaires. Enfin, certains jardins créoles arrosés à l'eau potable ont pu subir des pertes de production.

La crise ne semble pas avoir entraîné de dégradation significative de la situation sanitaire, ni généré de coûts médicaux particuliers. Au-delà des premiers jours, les établissements scolaires ont réussi à fonctionner correctement, permettant aux employés de continuer à travailler. Les entreprises dont l'activité est dépendante de l'approvisionnement en eau (agroalimentaire, énergie, etc.) ont par ailleurs été traitées comme des usagers prioritaires par les distributeurs d'eau et n'ont pas subi les coupures tournantes.

### 1.3. Estimation des coûts indirects : démonstrateur sur la commune de La Trinité

La commune de La Trinité ayant été de loin la plus touchée, elle a été choisie comme démonstrateur pour quantifier les dommages économiques et mesurer l'importance relative des différents coûts, pour *in fine* mettre en évidence les facteurs les plus pénalisants économiquement, et pour améliorer ensuite la gestion du risque. Cette analyse est fondée essentiellement sur les éléments issus d'entretiens individuels.

#### 1.3.1. Coût pour les collectivités et les services de l'État

Sur la commune de La Trinité où l'alimentation dépend intégralement de l'adducteur côtier, la coupure d'eau a été totale. La mairie, le syndicat d'eau (SICSM) et les services de l'État ont mis en place une gestion de crise consistant à assurer (figure 2) :

- la distribution aux habitants de bouteilles d'eau (pendant 3 jours) puis d'eau ensachée une fois arrivées les équipements de la sécurité civile ; l'eau ensachée est produite à la station de la Capot puis transportée par les camions de l'armée ; sa distribution est assurée par l'équipe municipale de La Trinité ;
- la distribution d'eau non potable (transport par camion de pompier) dans les quartiers, en installant des bâches auxquelles les habitants viennent s'approvisionner avec des récipients ;
- l'installation de citernes dans les établissements scolaires (3 000 jeunes scolarisés) et maisons de retraite et leur approvisionnement en eau ;
- l'approvisionnement par camion de l'hôpital de La Trinité (70 à 100 m<sup>3</sup> par jour) qui dispose d'une autonomie de 5 jours grâce à des réservoirs importants ; cette eau, non potable, n'est pas utilisée pour la boisson.



Source : <http://www.infeau.cg972.fr> et BRGM

**Figure 2. Eau ensachée distribuée aux habitants (gauche), distribution d'eau non potable au public (centre) et citerne d'eau non potable installée dans une école (droite)**

En l'absence de comptabilité des dépenses engagées lors de cette crise, nous avons tenté d'en estimer l'ordre de grandeur en nous appuyant sur des informations recueillies lors des entretiens avec les acteurs de cette crise. Les principaux coûts estimés correspondent aux postes suivants : coût du personnel mobilisé (l'ensemble du personnel municipal soit 230 équivalents temps plein (ETP) a été affecté à la gestion de crise au détriment des activités habituelles ainsi que 80 % des 20 ETP de l'encadrement), coût de production et de distribution des bouteilles et sachets d'eau, coût de production et des équipements (achats des bouteilles d'eau, d'ensacheuse, de bâches et des citernes installées dans la commune) et le coût spécifique de l'approvisionnement de l'hôpital par camion.

### 1.3.2. Coût pour les usagers

L'interruption de l'alimentation en eau potable touche les usagers domestiques, mais aussi les activités économiques artisanales, commerciales, touristiques et industrielles. La figure 3 présente le cadre d'analyse qui a été mobilisé pour analyser et tenter d'évaluer les dommages subis par ces différents usagers. Il a servi de support aux quelques entretiens réalisés à La Trinité.

En ce qui concerne les ménages, l'essentiel du dommage est lié au temps passé pour s'approvisionner en eau potable et non potable (obtention de l'information, attente, transport, manutention au domicile notam-

ment dans les immeubles). Ce temps consacré à l'approvisionnement en eau a été estimé à 1 heure par jour et par ménage, pendant 3 semaines. On suppose par ailleurs que 80 % des 5 512 ménages de la zone touchée ont été concernés par cette coupure de 3 semaines, ce qui représente un total de 92 000 heures de travail. Pour valoriser ce temps, on réalise deux hypothèses : une hypothèse haute qui suppose que ce temps a été pris pour moitié sur le temps de travail et pour moitié sur le temps de loisir des ménages ; et une hypothèse basse supposant que ce temps a intégralement été pris en charge par les ménages sur leurs loisirs. La valorisation est réalisée en fonction du salaire moyen de la commune, chargé ou non. À ce coût lié au temps passé s'ajoute un dommage plus difficile à chiffrer, lié à la perte de confort des habitants, notamment concernant l'hygiène.

Quelques activités artisanales et commerciales ont été perturbées. Il s'agit notamment de l'hôtellerie (les clients ont été acheminés vers d'autres établissements), des blanchisseries, des coiffeurs. Cette liste est non exhaustive car reposant sur un nombre restreint d'entretiens. Les artisans liés à la restauration et à l'agroalimentaire (boulangeries, boucheries...) ne semblent pas avoir été très touchés à la faveur d'adaptations (témoignage d'un restaurateur qui allait chaque jour charger 700 litres d'eau à Fort-de-France avec son véhicule).

Les quelques témoignages que nous avons recueillis soulignent que la population a démontré une grande capacité à faire face à cette situation difficile. Sans eau à domicile, certains habitants allaient se laver à la mer. De nombreux ménages (en dehors du bourg) ont fonctionné à partir des récupérateurs d'eau de pluie, habituellement destinée à l'arrosage des jardins. Les artisans sont parvenus à fonctionner presque normalement. Il est probable qu'une crise de la même ampleur survenant en métropole aurait provoqué de plus grands dommages économiques. Ce constat s'explique probablement par le fait que la population martiniquaise est préparée à affronter des situations de crise d'origine climatique ou sismique, entraînant une interruption de l'alimentation électrique, des communications et/ou des transports.

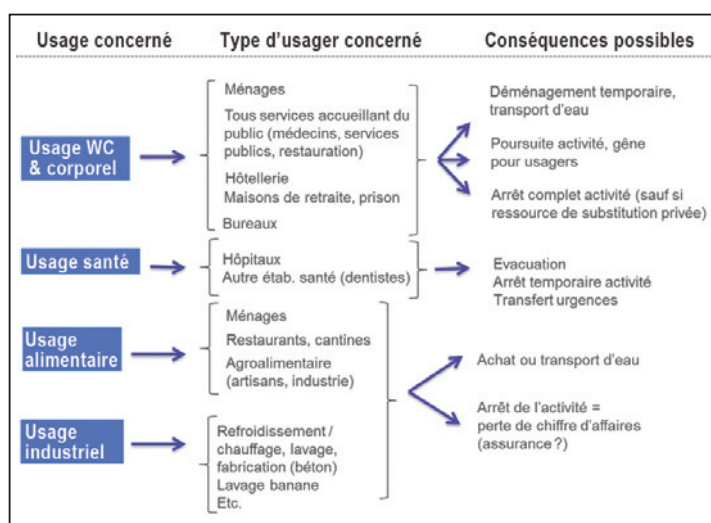


Figure 3. Cadre d'analyse de l'impact de la coupure d'eau sur les différents types d'usagers

### 1.3.3.Synthèse

Le cumul des coûts indirects est compris entre 1,4 et 2,5 M€ selon les hypothèses réalisées pour valoriser le temps passé par la population pour faire face à la crise. Si l'on rapporte ces estimations au nombre d'habitants, le coût serait compris entre 104 et 184 € par habitant (pour les 3 semaines) (figure 4).

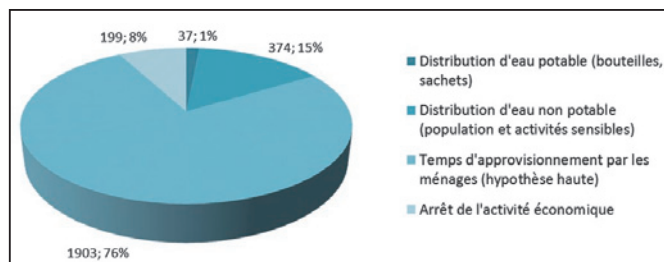


Figure 4. Répartition du coût estimé (k€) par type de dommages (hypothèse haute)

## 2. Vulnérabilité du réseau AEP aux glissements de terrain

### 2.1. Méthodologie

L'analyse du risque résulte de la prise en compte conjointe de l'aléa, de la vulnérabilité du réseau et de l'importance des enjeux concernés. En effet, le risque s'apprécie théoriquement par le croisement de ces trois composantes :

Risque =  $f$  (aléa, vulnérabilité, valeur des enjeux)

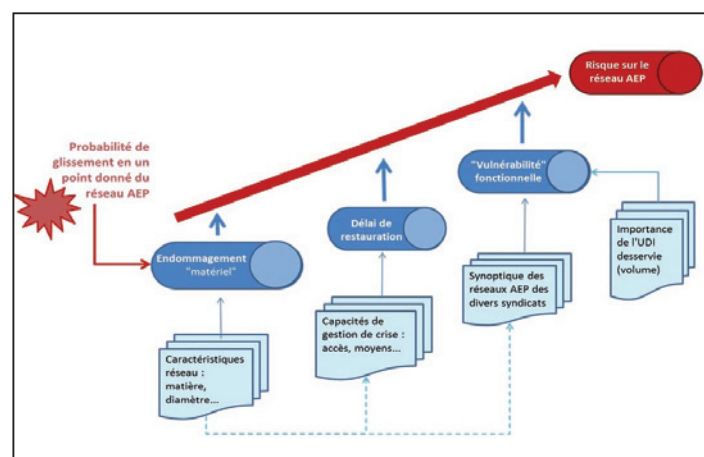
Le risque que l'on cherche à évaluer se traduit à l'échelle de chaque tronçon par une perte de la distribution d'eau potable à la suite de l'endommagement physique du réseau (casse). Le risque pour les personnes, par exemple, est d'autant plus élevé que le nombre d'habitants touchés est élevé et la durée de coupure prolongée. La quantification du risque, objectif ultime de l'analyse, peut ensuite se traduire en matière d'impacts humains (nombre, voire type, de personnes non desservies) ou économiques par exemple (coûts directs et indirects de la non-distribution).

La méthodologie déployée est axée sur la valorisation de la connaissance de l'aléa « glissement de terrain » en Martinique et sur la caractérisation de la vulnérabilité du réseau AEP (figure 5). Trois paramètres influencent, à différents niveaux, la vulnérabilité du réseau AEP et donc l'importance des dommages engendrés par une rupture. Il s'agit de :

– la vulnérabilité physique du réseau, soit la capacité de résistance d'une canalisation avant la rupture. Cette notion, intégrant les critères physiques tels que le matériau constitutif, le type de joint ou le diamètre de conduite notamment, est abordée au travers des échanges avec les syndicats et exploitants du réseau AEP de la Martinique et à partir de retours d'expérience permettant une appréciation qualitative de la vulnérabilité. L'approche quantitative s'est appuyée sur les travaux développés pour le risque sismique, notamment au travers du programme européen RISK-UE ;

– les temps de restaurations ou la capacité de retour à la normale. Ici également la première expertise est fondée sur le retour d'expérience des gestionnaires de réseau pour les cas de casses liées aux glissements de terrain. Dans les faits, l'approche est souvent complexifiée par l'enchaînement des calamités, en particulier dans le cas de crise cyclonique où un effet « domino » difficile à anticiper peut faire dériver grandement les capacités d'intervention des gestionnaires (accès coupés, coupures électriques...). Cette analyse qualitative des remontées de terrain est enrichie des travaux concernant la restauration des conduites en cas de ruptures liées à un séisme et sur les lois probabilistes de distributions des temps de retour à la normale pour les coupures spécifiques de réseaux AEP ;

– la vulnérabilité fonctionnelle du réseau, soit la qualification de l'interdépendance des portions de canalisation pour l'alimentation des réservoirs donc



AEP : alimentation en eau potable ; UDI : unité de distribution.

Figure 5. Schéma global d'évaluation du risque

des populations desservies. Les matrices de dépendances sont élaborées à partir de l'interprétation des synoptiques de chaque réseau en intégrant notamment les interconnexions liées au maillage du réseau ou les solutions alternatives de fonctionnement du réseau (comme l'inversion des flux de transport, par exemple) valorisées en cas de crise.

La démarche se décline comme suit :

- pour une intensité donnée de phénomène et sur la base de la connaissance de la vulnérabilité physique du réseau (matrice d'endommagement physique), la probabilité de rupture est définie ;
- la probabilité d'occurrence du phénomène d'intensité connue en tout point du réseau permet de définir la probabilité de rupture associée à l'aléa glissement de terrain.

Une fois la rupture « réalisée », l'évaluation du délai de perturbation ou temps de restauration (réparation dans les faits) de l'écoulement est menée sur la base des facteurs conditionnant cette restauration (matrice de temps de restauration). La combinaison du temps de restauration à la probabilité de rupture permet de calculer le risque de perte de distribution (exprimé comme une durée) en supposant, dans un premier temps, chaque tronçon d'égale importance dans l'architecture du réseau. Cette approche est menée par simple produit de la probabilité de rupture et du temps de restauration, deux paramètres qui dépendent *a priori* partiellement, mais pas uniquement, de facteurs communs comme le diamètre de conduite, par exemple.

Cela étant, l'importance fonctionnelle du tronçon concerné est ensuite prise en compte. Cette analyse

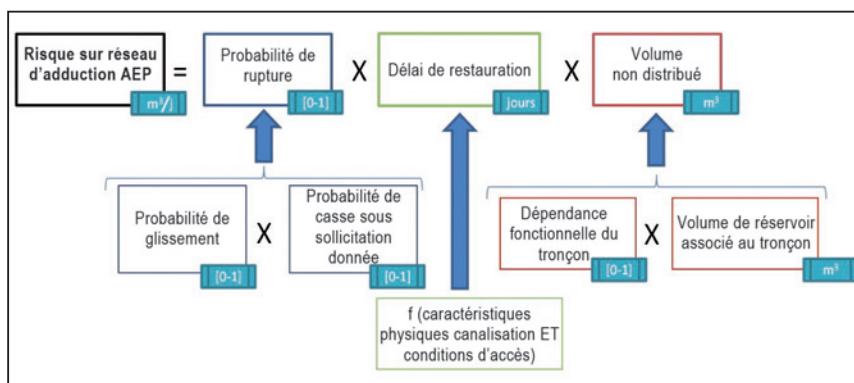
visée à replacer chaque tronçon dans l'organisation générale du réseau d'adduction en ciblant précisément sa participation à la fonction d'acheminement d'eau. Chaque réservoir (nœud aval extrême du réseau d'adduction) est alimenté par un réseau plus ou moins complexe de canalisation. L'analyse de vulnérabilité fonctionnelle telle qu'elle est proposée ici se limite à la pseudo-quantification de la dépendance des unités de distribution vis-à-vis des tronçons situés en amont : dépendance totale (un tronçon et un seul de canalisation alimente un réservoir), partielle (deux tronçons alimentent un réservoir en parallèle et la perte d'alimentation n'est pas totale en cas de rupture d'un des deux tronçons) ou nulle (une solution alternative de substitution garantit la continuité des volumes d'eau acheminés vers le réservoir – cas des régimes forcés, par exemple).

Au final, le risque est exprimé en intégrant la capacité de stockage des réservoirs desservis par les canalisations. L'endommagement lié à l'aléa glissement de terrain est défini comme le produit du volume de chaque réservoir associé au tronçon en intégrant sa vulnérabilité fonctionnelle au temps de restauration lui-même dépendant de la probabilité de rupture. Cette approche peut se mettre en équation et est spatialisée sur l'ensemble du réseau (figure 6).

## 2.2. Caractérisation de l'aléa « glissement de terrain »

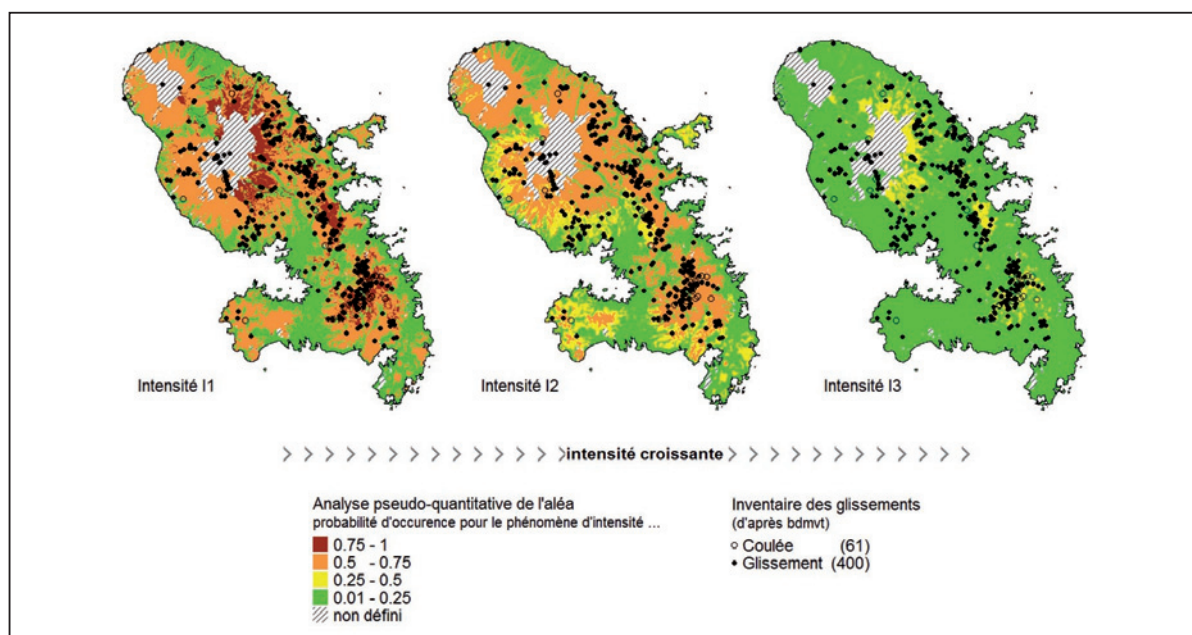
De façon générale, l'aléa est défini comme la probabilité d'apparition d'un phénomène donné, donnée, sur un territoire donné, dans une période de référence donnée. Les 34 communes de Martinique sont couvertes par un plan de prévention des risques naturels (PPRN), applicable depuis 2004 et révisé récemment, en 2013. Ici, l'aléa est défini, pour une période de retour de l'ordre de 100 ans, à partir des descriptions qualitatives des atlas « Mouvements de terrain » (rapports BRGM R40177 à R40207) pour le phénomène « glissement » en discriminant l'intensité des phénomènes, soit le volume de l'événement, suivant trois classes :

- I3 :  $V > 1\,000 - 10\,000\text{ m}^3$  et + ;
- I2 :  $100 \leq V \leq 1\,000\text{ m}^3$  ;
- I1 :  $V < 100\text{ m}^3$ .



AEP : alimentation en eau potable.

Figure 6. Mode d'évaluation du risque



BDMVT : Base de données des mouvements de terrain.

Figure 7. Cartographie pseudo-quantitative de l'aléa « glissement de terrain »

En fonction des descriptions des cartes d'aléa, la distribution relative des probabilités d'occurrence des diverses classes de phénomènes selon le niveau d'aléa global est proposée et spatialisée afin de pouvoir la croiser avec la présence du réseau AEP (figure 7).

### 2.3. Caractérisation du réseau AEP

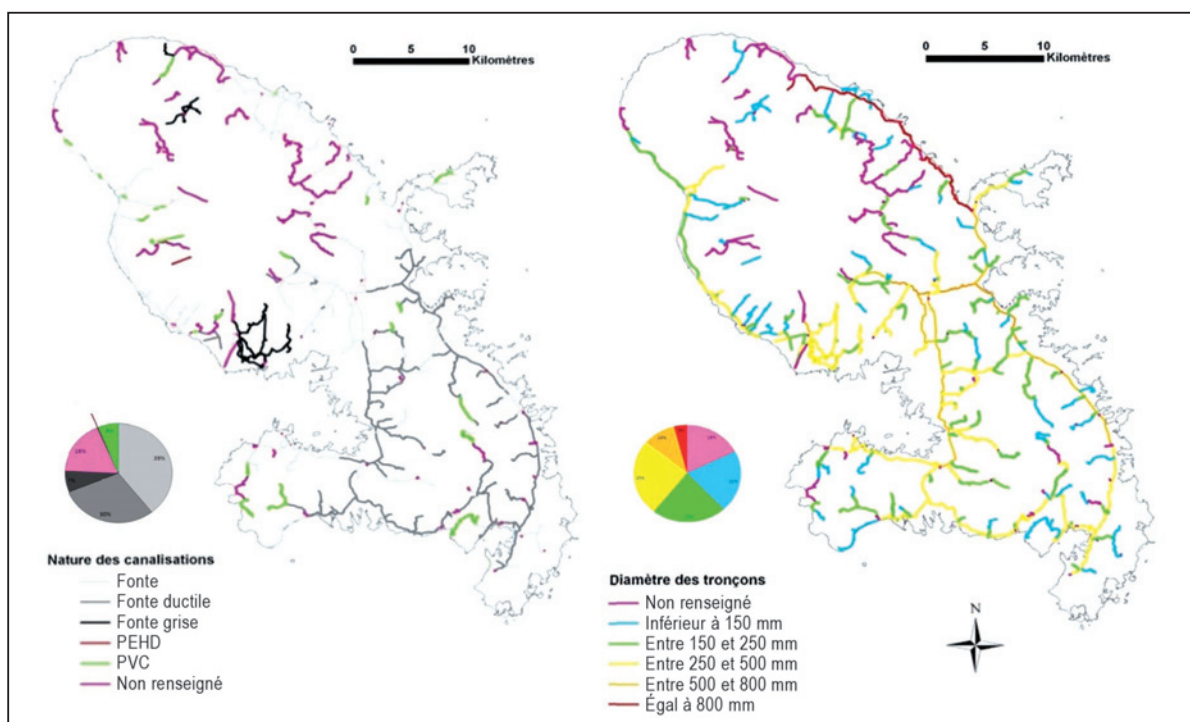
Les eaux superficielles représentent 93 % de la ressource en eau potable. 70 % de l'eau de surface mobilisée provient de quatre rivières seulement : Capot, Lorrain, Blanche et Lézarde, fournissant donc les deux tiers de l'AEP de Martinique [DUMONT *et al.*, 2010 ; COMTE *et al.*, 2009]. L'eau souterraine mobilisée pour l'AEP n'intervient que pour 7 %. Elle provient essentiellement de sources (à plus de 80 %), le reste de quelques rares forages du nord, à Saint-Pierre et Ajoupa-Bouillon (0,5 Mm<sup>3</sup>/an) [DUMONT *et al.*, 2010 ; COMTE *et al.*, 2009].

À l'exception de la commune de Morne-Rouge, les communes de Martinique sont regroupées au sein de syndicats ou de communautés de communes pour assurer la distribution de l'eau potable. Le conseil général est également acteur en tant que collectivité productrice d'eaux brutes et d'eaux traitées via l'usine de Vivé et la prise de la Lézarde. D'après le schéma départemental d'alimentation en eau potable (SDAEP)

[SAFEGE, 2009], le réseau d'eau potable de la Martinique compte : 37 captages d'eau potable, 12 usines de traitement de potabilisation et 298 réservoirs. Les collectivités du nord du département sont, pour l'essentiel, constituées de chaînes de distribution gravitaire, tandis que les communes du sud sont desservies par un réseau mis en charge.

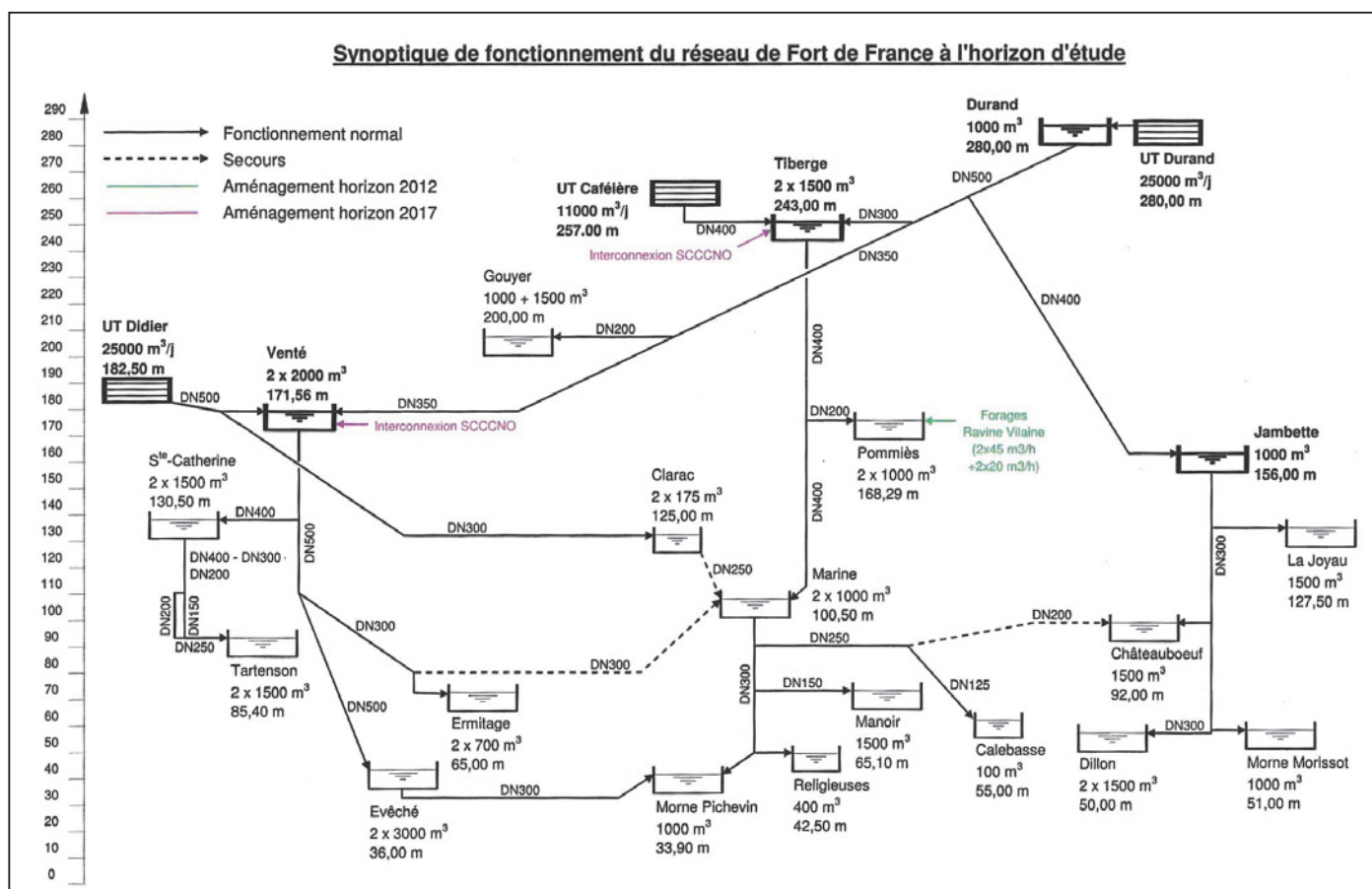
L'intégralité du réseau AEP s'étend sur 3 120 km [SAFEGE, 2009] dont 638 km consacrés à l'adduction. La consultation de l'ensemble des acteurs de la gestion de l'eau potable sur le département a permis de collecter, compiler et harmoniser les données du réseau à l'échelle de l'île, notamment en ce qui concerne la géométrie et le type de conduites. Ce travail a abouti à un système d'information géographique (SIG) renseigné du réseau d'adduction de l'île, résultat en soit de travaux engagés. Globalement, 66 % du linéaire est constitué de PVC et 34 % de fonte (SDAEP). À la marge, il est évoqué 4 km en acier et 11 km en PEHD [SAFEGE, 2009]. En ce qui concerne les diamètres, peu de canalisations ont plus de 500 mm de diamètre (7,5 % du linéaire) et 4 % sont concernés par les Ø 800 mm (figure 8).

Après collecte auprès de chaque syndicat, les synoptiques de tous les réseaux ont pu être consultés



PEHD : polyéthylène haute densité ; PVC : polychlorure de vinyle.

Figure 8. Description physique du réseau d'adduction



Source Odyssi

Figure 9. Exemple de synoptique de réseau (cas de Fort-de-France)

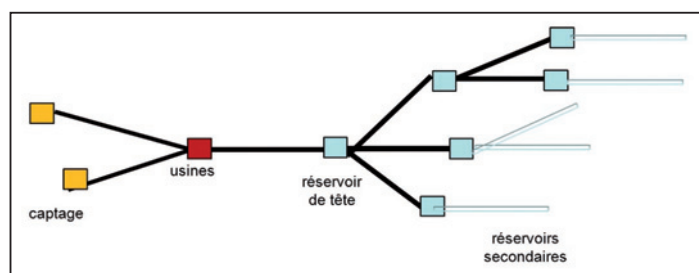


Figure 10. Représentation schématique du réseau pour les besoins de l'étude de risque

(figure 9) avec des dates de mise à jour et des qualités variables. Le SIG harmonisé regroupe l'intégralité du réseau AEP, depuis la source jusqu'à la distribution individuelle. Cependant, l'étude de risque à l'échelle de l'île s'est focalisée sur le réseau d'adduction (figure 10), depuis le captage jusqu'au dernier niveau de réservoir.

### 3. Évaluation du risque

#### 3.1. Endommagement physique

La vulnérabilité physique aux glissements de terrain est la capacité de résistance d'un élément structurel (canalisation, unité de stockage...) à une sollicitation donnée (en l'occurrence : glissement de terrain). L'objectif est donc de hiérarchiser cette capacité de résistance en définissant une matrice d'endommagement (donnant une valeur de l'endommagement selon le niveau d'aléa et les caractéristiques du réseau). Si les échanges avec syndicats et exploitants du réseau ont permis d'identifier les critères principaux de sensibilité à la rupture des canalisations, le calage quantitatif d'une matrice d'endommagement reste difficile à apprécier sans donnée statistique sur les ruptures. Les retours d'expérience dans le domaine sismique sont nombreux et sont valorisés dans le projet.

Les calculs d'endommagement sont exprimés en taux de réparation par unité de longueur de canalisation en fonction du mouvement du sol – secousse tellurique représentée par le *peak ground acceleration* (PGA) – ou en fonction d'une rupture du sol (mouvement en surface représenté par un déplacement permanent). Les analyses sont fondées sur des méthodes empiriques liées au retour d'expérience, pondérées par jugement d'expert ponctuellement appuyé sur des formulations analytiques (modèles RISK-UE 2003,

| Intensité | Matériau    |     |               |       |      |         |
|-----------|-------------|-----|---------------|-------|------|---------|
|           | Fonte grise | PVC | Fonte ductile | ACIER | PEHD | Inconnu |
| I1        | 0,8         | 0,6 | 0,5           | 0,2   | 0,2  | 0,8     |
| I2        | 1           | 0,9 | 0,8           | 0,5   | 0,5  | 1       |
| I3        | 1           | 1   | 1             | 1     | 1    | 1       |

Tableau I. Matrice d'endommagement des conduites

[MONGE, 2003 ; MARTIN 2001 ; O'ROURKE et AYALA, 1993]). La synthèse de ces données permet de proposer une matrice d'endommagement des conduites en fonction du matériau et de l'intensité des glissements de terrain (tableau I) :

On note que les probabilités de casses ne sont jamais nulles y compris pour de faibles mouvements (cela intègre en particulier des facteurs aggravants masqués) et que les probabilités de rupture sont assez élevées au regard de l'intensité de phénomène.

#### 3.2. Temps de restauration

Les échanges avec syndicats et exploitants du réseau ont permis d'identifier les critères principaux régissant les temps de restauration. Globalement, les temps de retour à la normale à la suite des casses liées à des mouvements de terrain n'excèdent *a priori* pas 2 jours, pour la majorité des syndicats. Mais il est souligné par les acteurs que l'enchaînement des « calamités » – coupures électriques, casses multiples impliquant une remise à niveau progressive, accès coupés – peut rendre ce délai très variable. Cela est en particulier vrai dans le cas de crise cyclonique où un effet « domino » difficile à anticiper peut se mettre en œuvre.

La phase de gestion immédiate de la crise démarre par la remontée d'information auprès des gestionnaires (témoignage le plus souvent). Le délai de réaction est globalement considéré comme faible pour la prise de décision de fermeture du réseau. En fonction de l'information initiale, de la période de la journée où le signalement est effectué, de la situation géographique de la zone touchée par rapport au PC de crise et du délai du diagnostic de personnel qualifié, le délai cumulé n'excède pas quelques heures.

Sur cette base s'engage la phase de restauration du service. Selon les gestionnaires, un premier point pouvant être bloquant est la garantie des conditions d'accès. Cela est particulièrement vrai pour la problématique posée puisqu'une instabilité à proximité des réseaux de communication peut engendrer des fermetures d'accès et imposer un diagnostic géotechnique avant toute intervention mécanisée sur site, par exemple. L'autorisation d'accès est le point bloquant principal identifié, comme en témoigne la crise majeure de Séguineau, non encore résolue, 4 ans après. La problématique est directement liée à la propriété foncière de parcelles abritant le réseau et/ou de celle garantissant les accès à tout point du réseau. À ce titre, la discrimination publique/privée est pointée par les acteurs comme prépondérante. Dans cette optique de limiter les démarches concernant les accès, une véritable volonté est mise en avant pour garantir l'existence de servitudes le long des tracés. Le diamètre des canalisations est également apparu comme un critère augmentant le délai des interventions. Les stocks de canalisation des plus gros diamètres ne sont souvent pas en quantité suffisante, ce qui peut occasionner des délais d'acheminement importants, et les travaux de remise en service sont plus complexes.

Cette analyse qualitative des remontées d'information des gestionnaires, essentielle dans l'approche, est enrichie des travaux concernant la restauration des conduites en cas de ruptures liées à un séisme, qui proposent des lois probabilistes de distributions des temps de retour à la normale dans le cas de séismes pour les coupures spécifiques de réseaux

AEP (RISK-UE) (figure 11). L'adaptation de ce type de loi est proposée pour les casses liées aux mouvements de terrain en Martinique.

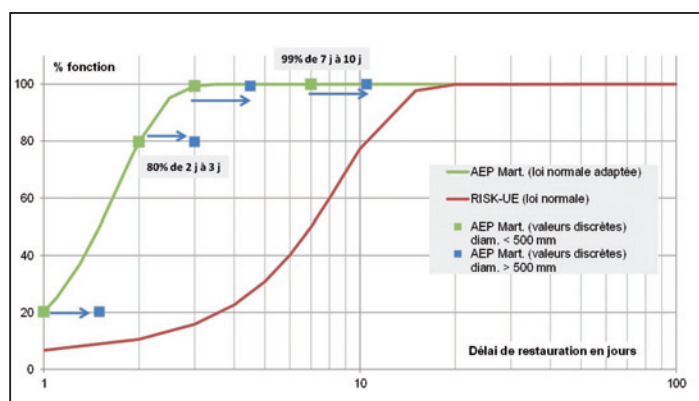
Il faut ici préciser que l'approche simplifiée retenue considère que le temps (2 j) pour lequel la majorité des cas de rupture est réparée est considéré comme équivalent au délai correspondant à une majorité (80 %) de taux de restauration du réseau.

Enfin, pour tenir compte du contexte martiniquais, cette approche a été modulée suivant les conditions d'accès afin d'intégrer dans l'analyse ce critère jugé important par les gestionnaires. Cette pondération se fait en estimant le délai d'intervention sur parcelles privées suivant un facteur de 1 à 3 par rapport aux interventions sans contrainte foncière (facteur intégrant les démarches administratives notamment (tableau II), valeur notamment calée sur le retour d'expérience de Séguineau.

Dans cette matrice on retrouve les constats des gestionnaires de réseaux : de façon générale, les temps de restauration n'excèdent pas 2 jours. Cette valeur correspond ici à la valeur de référence pour 80 % des cas de casse très majoritairement répertoriés sur le réseau de distribution, et sur le domaine public (le long des routes). Les interventions plus longues (> 2 jours) correspondent aux configurations plus exceptionnelles, soulignées par les acteurs, comme l'enchaînement des « calamités » évoquées ci-avant.

### 3.3. « Vulnérabilité » fonctionnelle

Pour évaluer la perte d'usage de l'eau pour les abonnés, qui correspond au dommage associé à la fonction d'adduction, c'est le volume des réservoirs qui est considéré, en prenant pour hypothèse que ce volume



AEP : alimentation en eau potable.

Figure 11. Distribution des temps de restauration proposée

| Diamètre | Propriété privée | Propriété publique | Taux de restauration |
|----------|------------------|--------------------|----------------------|
| Ø < 500  | 3                | 1                  | 20 %                 |
|          | 6                | 2                  | 80 %                 |
|          | 21               | 7                  | 99 %                 |
| Ø > 500  | 4,5              | 1,5                | 20 %                 |
|          | 12               | 3                  | 80 %                 |
|          | 31,5             | 10,5               | 99 %                 |

Tableau II. Matrice de temps de restauration (en jours) selon le type de propriété

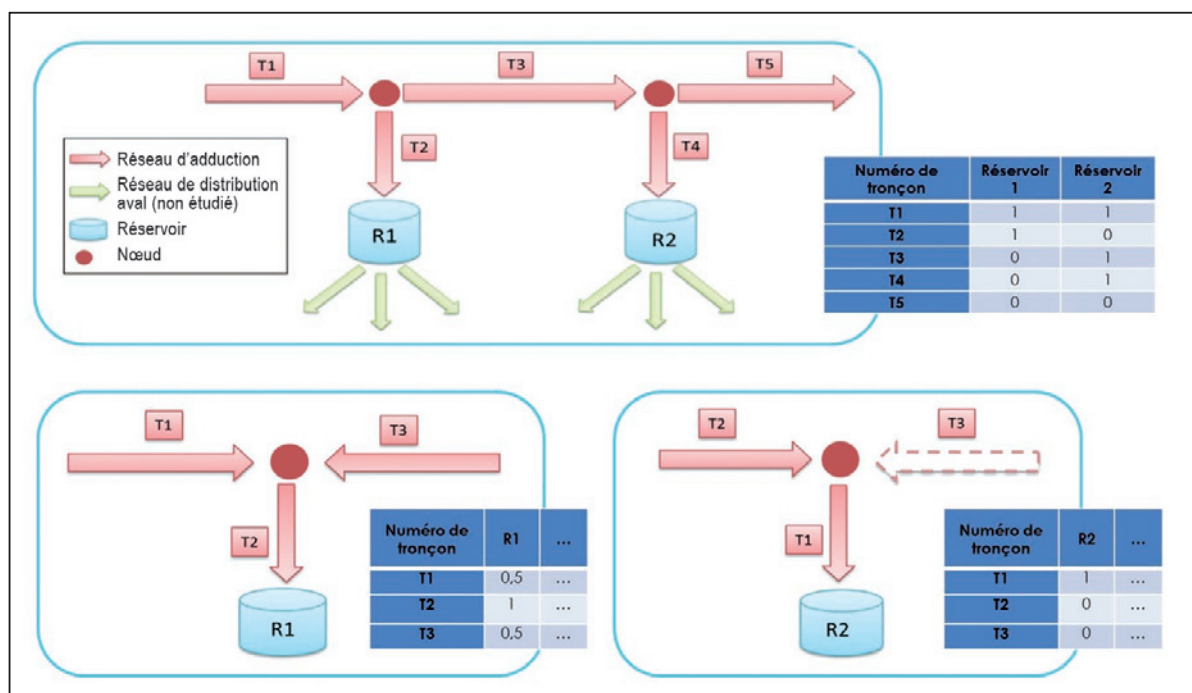


Figure 12. Matrices de dépendance fonctionnelle

est représentatif du nombre de personnes desservies et donc de l'importance du réservoir. Ce choix a notamment été conditionné par les données disponibles.

Chaque réservoir est alimenté par un réseau plus ou moins complexe de canalisation. L'objectif est de définir l'impact qu'une rupture de canalisation en un point donné, sur la capacité de distribution en eau potable au niveau des réservoirs. Cette évaluation constitue un élément essentiel dans la chaîne d'évaluation du risque, puisqu'elle représente le lien fonctionnel des canalisations les uns par rapport aux autres dans l'alimentation des réservoirs. Elle permet de qualifier l'interdépendance des réseaux par rapport aux unités de distribution. Cette matrice d'interdépendance des réservoirs aux canalisations a été élaborée à partir de l'interprétation des synoptiques de chaque réseau (figure 12). Chaque tronçon du réseau AEP a bénéficié d'une évaluation de sa vulnérabilité fonctionnelle en estimant son rôle dans l'alimentation des réservoirs. La base de données cartographique, à l'échelle de la Martinique, de dépendance des réservoirs aux canalisations, est en elle-même un résultat précieux (figure 13).

La « vulnérabilité » fonctionnelle est calculée comme le produit de l'importance fonctionnelle du tronçon

considéré ([0-1]) et du volume du réservoir desservi (directement ou non par le tronçon). Il est important de noter ici que l'interdépendance des tronçons les uns par rapport aux autres n'est pas abordée. Le dommage fonctionnel du réseau est donc assimilé ici à un volume équivalent de réservoirs desservis par chaque tronçon de canalisation. Cette grandeur représente les mètres cubes stockés – et donc dispo-

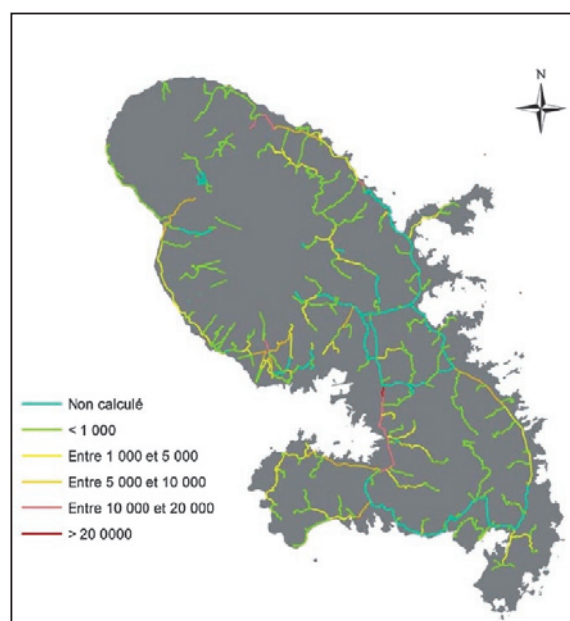


Figure 13. Carte de « vulnérabilité » fonctionnelle du réseau (en m³)

nibles à la distribution – qui dépendent de la canalisation d'adduction.

Ainsi, la vulnérabilité fonctionnelle de certaines portions de canalisation peut être nulle quand il existe une solution de secours ou une alternative pour l'alimentation des réservoirs associés ; la rupture de ces canalisations n'a pas d'impact sur les réservoirs.

## 4. Résultats

L'intégration successive des critères de vulnérabilité ainsi définis conduit à l'élaboration d'une cartographie du risque lié à un dysfonctionnement du réseau AEP à la suite d'un glissement de terrain sur l'ensemble de l'île. L'expression du niveau d'endommagement associé à un événement de type « glissement de terrain » peut s'exprimer sous forme d'un temps de restauration de la fonction « distribution de l'eau potable ». C'est le double critère de « temps de restauration » et de « volume non distribué » qui est retenu pour exprimer le risque au réseau AEP de la Martinique aux glissements de terrains. La donnée est ensuite discriminée afin de faire ressortir les zones les plus exposées.

L'analyse croisée « aléa », « délai de restauration », « importance » des tronçons est déclinée à l'échelle de l'île (figures 14 et 15).

## 5. Valorisation

La carte de risque obtenue par agrégation de ces différents facteurs répond aux objectifs fixés en hiérar-

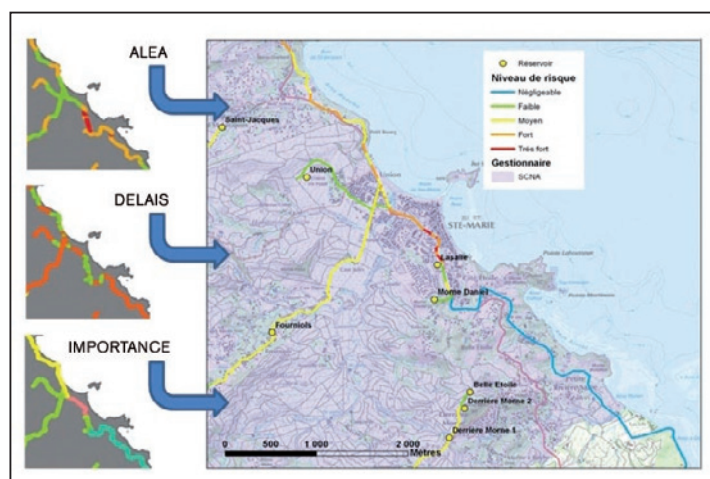


Figure 14. Analyse de risque. Détail, commune de Sainte-Marie

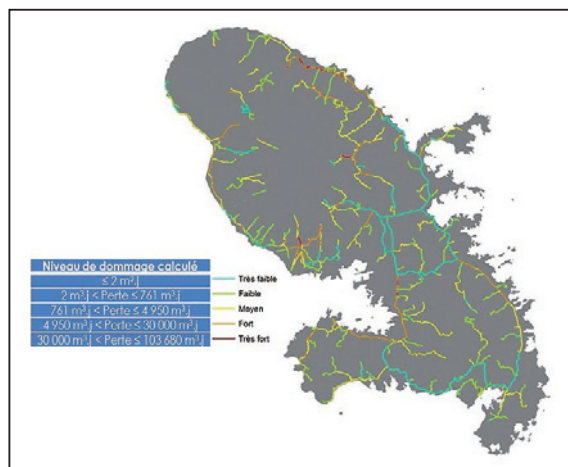


Figure 15. Analyse de risque

chisant les tronçons en tenant compte, à la fois, de l'aléa glissement de terrain, de la vulnérabilité du réseau et de l'importance des enjeux concernés et ce, à l'échelle de la Martinique. Cette carte fait ressortir des tronçons particulièrement vulnérables et donc pouvant nécessiter une sécurisation prioritaire. Le fort niveau de risque est la combinaison de différents facteurs qui réclament chacun des mesures de réduction du risque spécifiques. Trois cas principaux se distinguent sur les tronçons à fort niveau de risque :

- risque essentiellement lié à la vulnérabilité fonctionnelle. Dans ces configurations, les interconnexions ou les forages de secours en eau souterraine permettront de limiter les temps de privation d'eau ;
- risque également lié à la vulnérabilité physique au glissement de terrain. Sur ces tronçons, les mesures de réduction de l'aléa ou de réduction de la vulnérabilité physique des canalisations seraient plutôt à envisager ;
- risque également lié au temps de restauration. La garantie d'accès doit également être une priorité sur ces portions.

## 6. Perspectives

Les points principaux et les perspectives qui ressortent de l'étude et des échanges avec les parties prenantes sont :

- le problème majeur du foncier et l'absence de servitude d'utilité publique ;
- le poids déterminant de la vulnérabilité fonctionnelle et donc la nécessité de développer des solutions

de secours, telles des interconnexions ou des forages d'eau souterraine ;

– l'importance de poursuivre l'évaluation du risque avec la prise en compte d'autres aléas (effets cascade en cas de crise cyclonique notamment et développement de scénario de risque) ;

– l'intérêt d'estimer l'impact économique d'une rupture d'eau, plus largement pour d'autres menaces que les seuls aléas mouvement de terrain (saison sèche dite de carême, par exemple)

La description quantitative de l'impact économique de la rupture de 2009 associée à ce programme ouvre la perspective méthodologique d'intégrer la dimension économique dans l'évaluation de la vulnérabilité des réseaux. En effet, la gravité d'une interruption du service dépend aussi du nombre et de la nature des usagers desservis (type d'entreprise, services d'urgences, scolaires, etc.). Dans ce projet nous avons cherché à caractériser les dommages indirects en cas de coupure prolongée du réseau. Cette approche s'est fondée sur l'analyse des coûts associés à la crise de 2009. Une des pistes de travail retenue est, outre l'évaluation du nombre d'usagers associés à une unité de distribution, d'identifier la nature des activités de ces usagers. Pour la crise de 2009, ce travail a été réalisé sur la base des données

statistiques de l'Insee qui permettent d'estimer le nombre d'usagers concernés par l'interruption, les activités associées (nomenclature NAS 700) et certaines de leurs caractéristiques (effectif moyen d'employés, chiffre d'affaires moyen), ainsi que des caractéristiques de la population (logements, compositions des foyers, revenus, etc.). Cette analyse des coûts indirects d'interruption du service pourrait être effectuée à une échelle plus fine, celle des îlots Insee, permettant d'associer des coûts à chaque tronçon du réseau. La mise en relation précise des données Insee avec la cartographie du réseau constitue un travail important à réaliser en partenariat étroit avec les exploitants et les gestionnaires de réseau. Cette perspective demeure cependant d'un grand intérêt, en particulier au moment de planifier de nouveaux investissements publics.

L'ensemble de ces résultats doit permettre de donner la priorité aux actions à entreprendre à l'échelle de chaque syndicat (renforcement, maillage, gestion des aléas) et ouvre les perspectives sur la prise en compte d'autres aléas susceptibles d'affecter également la distribution d'eau potable notamment ou sur l'extension des méthodes déployées à d'autres réseaux vitaux.

## Bibliographie

APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (1991) : *Seismic vulnerability and impact of disruption of lifelines in the conterminous United States*. ATC-25, Redwood City, CA.

COMTE J.P., avec la collaboration de Barthélemy Y. (2009) : *Système d'information pour la gestion des eaux souterraines de la Martinique : Synthèse et perspectives pour une mise en valeur et une gestion durable des eaux souterraines*. Rapport BRGM/RP-56537-FR, 100 p.

DUMONT J., D'ORNEILLAS C., MARCHANDISE P., WINTER L., SCHMIT P. (2010) : *Audit sur l'eau en Martinique*. Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, France. Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux, France. Conseil général de l'environnement et du développement durable, Novembre 2010, n° 007091-01, 80 p.

LEONE F. (1996) : *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvement de terrain*. Thèse, éd. BRGM, 286 p.

MARTIN C. (2001) : *Évaluation et réduction du risque sismique à Fort-de-France et Pointe-à-Pitre : vulnérabilité des réseaux*. Rapport BRGM RP-50925-FR, 61 p. Programme GEMITIS 1991-2001.

MONGE O. with the collaboration of M. ALEXOUDI (2003) : *RISK-UE. Vulnerability assessment of lifelines and essential facilities (WP06): methodological handbook*. Report GEOTER n° GTR-RSK 0101-152av7 (Appendix 5. Potable water utility system & Appendix 11: Water pipes).

NACHBAUR A., LE ROY M., COLAS B., RINAUDO J.D. (2013) : *Étude de la vulnérabilité du réseau d'alimentation en eau potable de la Martinique au glissement de terrain*. Rapport final. BRGM/RP-62587-FR. 116 p, 69 illustrations, 6 annexes.

O'ROURKE, AYALA G. (1993) : « Pipeline damage due to wave propagation ». *Journal of geotechnical engineering* ; ASCE Vol. 199 ; N° 9, sept 1993.

O'DAY D.K., WEISS R., CHIAVARI S., BLAIR D. (1986) : *Guidance manual: water main evaluation for rehabilitation/replacement*. AWWA Research Foundation, Denver, CO.

SAFEGE (2009) : *Conseil général de la Martinique. Schéma directeur de l'alimentation en eau Potable de la Martinique*. Rapport final.

SEDAN O., TERRIER M. (1999) : *Atlas communaux des risques naturels de la Martinique*. Rapports BRGM R40177 à R40207.

## Résumé

**B. COLAS, A. NACHBAUR, M. LE ROY, J.-D. RINAUDO, I. BARNERIAS**

### **Méthode d'évaluation de la vulnérabilité physique, fonctionnelle et économique des réseaux d'eau potable aux glissements de terrain : application à la Martinique**

En mai 2009, un glissement de terrain a emporté un adducteur d'eau potable sur la commune du Lorrain, privant ainsi une grande partie des communes de la Martinique d'eau potable pendant plusieurs jours, voire semaines, et occasionnant un préjudice économique évalué à plus de 5 M€. Fort de ce retour d'expérience, l'objectif du programme est de mieux apprécier la vulnérabilité du réseau d'adduction en eau de la Martinique aux glissements de terrain.

Outre une cartographie innovante de l'aléa « glissement de terrain » en Martinique intégrant l'intensité des phénomènes, l'analyse de risque intègre différents critères de vulnérabilité du réseau et les fonctions d'endommagement associées. La vulnérabilité physique est appréhendée par la double approche des retours d'expérience en Martinique et sur la valorisation des méthodes développées pour le risque sismique. Les critères principaux régissant les temps de restauration sont évalués avec les syndicats et exploitants du

réseau. Le fonctionnement du réseau est évalué à partir d'une matrice de dépendance des unités de distributions, élaborée à partir de l'interprétation des synoptiques de chaque réseau.

L'analyse du risque résulte de la prise en compte conjointe de l'aléa, de la vulnérabilité du réseau et de l'importance des enjeux concernés. La combinaison des différentes variables, spatialisées à l'échelle de l'île, établit le risque en tout point du réseau avec comme résultat une perte d'eau potentiellement distribuée ( $\text{m}^3/\text{j}$ ) à la suite d'un glissement de terrain. La carte ainsi produite permet de dégager les secteurs sensibles en mettant en évidence le poids relatif des facteurs de responsabilité. Les données acquises ou consolidées dans le cadre du projet sont valorisables pour la déclinaison des risques vis-à-vis d'autres aléas et montrent l'intérêt d'estimer l'impact économique de ces dysfonctionnements afin d'optimiser la priorisation des investissements publics.

## Abstract

**B. COLAS, A. NACHBAUR, M. LE ROY, J.-D. RINAUDO, I. BARNERIAS**

### **Evaluation of the physical, functional and economic vulnerability of drinking water supply networks to landslides: method and application to Martinique**

In May 2009, a landslide swept away a water pipeline in the municipality of Le Lorrain, thus depriving a large part of the Martinique's municipalities of drinking water for several weeks and causing financial damage estimated at more than € 5 million. With this feedback, the aim of the program is to better assess the vulnerability to landslides of the water supply network of the Martinique island.

Besides an innovative hazard landslide mapping integrating the intensity of phenomena, risk analysis includes different criteria of network's vulnerability and damage associated functions. Physical vulnerability is apprehended by the dual approach of past events and valuation methods developed for seismic risk. The main criteria for recovery times are measured with different stakeholders in the water supply. The functional analysis of the

network is evaluated from a dependency matrix of distribution units distributions based on the interpretation of synoptics of each water networks. The risk analysis results from the joint consideration of hazard, vulnerability of the network and the high stakes involved. The combination of different variables, spatial scale of the island, makes the risk at any point in the network with a resulting loss of water potentially distributed ( $\text{m}^3/\text{j}$ ) following a landslide. The resulting map reveals the sensitive sectors, highlighting the relative importance of the responsible factors.

Acquired or consolidated data in the frame of this project should be used to analyse risk induced by other hazards and show the interest of the evaluation of the economic impact of these kind of dysfunctions in order to optimize the prioritization of public investment.