



HAL
open science

La gestion de crise tsunami dans la Caraïbe : contribution géographique aux dispositifs d'alerte et d'évacuation des populations

Matthieu Péroche

► **To cite this version:**

Matthieu Péroche. La gestion de crise tsunami dans la Caraïbe: contribution géographique aux dispositifs d'alerte et d'évacuation des populations. Géographie. UNIVERSITÉ PAUL VALÉRY MONTPELLIER 3 PAUL-VALÉRY, 2016. Français. NNT: . tel-03129123

HAL Id: tel-03129123

<https://hal.science/tel-03129123v1>

Submitted on 2 Feb 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par

UNIVERSITÉ MONTPELLIER 3 – PAUL-VALÉRY

Thèse préparée au sein de l'école doctorale
ED 60 : TERRITOIRES, TEMPS, SOCIÉTÉS ET
DÉVELOPPEMENT

Et de l'unité de recherche
UMR – GOUVERNANCE, RISQUE, ENVIRONNEMENT,
DÉVELOPPEMENT (GRED)

Spécialité :
GÉOGRAPHIE ET AMÉNAGEMENT DE L'ESPACE
(Catégorie CNU n°23)

Présentée par **Matthieu PÉROCHE**

**« La gestion de crise tsunami dans la Caraïbe :
contribution géographique aux dispositifs
d'alerte et d'évacuation des populations »**

Soutenue le 14 octobre 2016 devant le jury composé de :

Mme Virginie DUVAT-MAGNAN, Professeure des Universités, Université de La Rochelle	Rapporteur
Mme Hélène HÉBERT, Ingénieure-chercheuse, CEA DAM/DIF	Examineur
M. Franck LAVIGNE, Professeur des Universités, Université Paris 1	Rapporteur
M. Frédéric LEONE, Professeur des Universités, Université Montpellier 3 - Paul-Valéry	Directeur de thèse
M. Freddy VINET, Professeur des Universités, Université Montpellier 3 - Paul-Valéry	Co-directeur de thèse
M. Patrick TYBURN, Lieutenant-colonel, État-major interministériel de zone Antilles	Examineur
M. Narcisse ZAHIBO, Professeur des Universités, Université des Antilles	Examineur

Résumé : « La gestion de crise tsunami dans la Caraïbe : contribution géographique aux dispositifs d'alerte et d'évacuation des populations »

Le contexte géodynamique du bassin de la Caraïbe, du fait notamment de la présence de zones de subduction et de nombreux édifices volcaniques, est favorable à la génération de tsunamis. La connaissance historique de ce phénomène dans la région, associée à de récents résultats de simulation numérique, confirme ce fort potentiel. Les amplitudes de vagues modélisées à l'approche des côtes avoisinent les 10 m pour certains scénarios. L'aléa tsunami est une menace pour l'ensemble du littoral des territoires du bassin de la Caraïbe. Les enjeux humains, structurels et stratégiques, concentrés massivement sur ce littoral, sont particulièrement exposés à ce phénomène, notamment aux Antilles où le risque associé est très élevé. Aujourd'hui, un système de surveillance et de détection des tsunamis à l'échelle régionale assure la diffusion de messages d'information en cas d'événement. Néanmoins, il n'existe pas de dispositifs pour guider localement les autorités dans leurs prises de décisions pour mettre en sécurité des populations, ou bien ils restent très généralistes, notamment pour les territoires français. Afin d'anticiper ce besoin, nous avons accompagné la planification opérationnelle de la gestion des crises pour les phases d'alerte et d'évacuation temporaire des populations à terre et de la mise en sécurité des navires en mer. Cette démarche, engagée à différentes échelles, repose sur une approche géographique et intégrée de la gestion de crise tsunami, à l'interface des connaissances entre le domaine scientifique et opérationnel. Notre expertise scientifique a débouché sur l'élaboration de documents opérationnels pour le traitement des avis de tsunami dans le domaine terrestre et maritime et a permis d'établir une méthode de planification des évacuations pédestres. La méthode proposée est en cours d'application sur 60 communes littorales dans les Antilles Françaises.

Mots-clés : gestion de crise, tsunami, évacuation, planification opérationnelle, prévention, SIG, Caraïbe, Antilles.

Summary : "Tsunami crisis management in the Caribbean: a geographical contribution to warning and evacuation procedures"

The geo-dynamics of the Caribbean Sea area, particularly due to the presence of subduction zones and numerous volcanic faults is prone to the generation of tsunami's. Historical knowledge of this phenomenon in the region, coupled with recent modeling results, confirms this potential. The amplitudes of the modeled waves approaching the coast came close to 10m in some scenarios. The tsunami is a threat to the entire coastline of the Caribbean Sea. Human, structural and strategic installations, which are focused heavily on the coast, are particularly vulnerable to this phenomenon, especially in the Caribbean where the associated risk is very high. Today, at a regional level, a tsunami warning system is effective. However, there are no plans to guide the local authorities in their decision making to keep their population safe. At best they are very general, notably in the Antilles. So that we can anticipate their needs, we accompanied the operational planning of crisis management for the alert phases and the temporary evacuation of people on land and the security procedures for ships at sea. This initiative, undertaken on different levels, based on a geographical and integrated approach to the management of tsunami crisis, is at the interface of knowledge between scientific and operational domain. Our scientific expertise has led to the development of operational documents for the application of the tsunami warning on land and sea. It has helped to establish a method of pedestrian evacuation planning. The proposed method is already being implemented in 60 coastal municipalities in the French Antilles.

Keywords : crisis management, tsunami, evacuation, operational planning, prevention, GIS, Caribbean, West Indies

Remerciements

Je tiens à remercier en tout premier lieu mon directeur de thèse Frédéric Leone et mon co-directeur Freddy Vinet pour la confiance qu'ils m'ont accordée depuis le début de mon master au sein de l'Université Montpellier 3 jusqu'à aujourd'hui. Je les remercie également pour leur soutien dans mes recherches de financement tout au long de ma première année d'inscription en doctorat et d'avoir accepté de me suivre dans la conduite de cette recherche. Je veux adresser un très grand merci à Frédéric Leone, pour la richesse de ses enseignements, sa présence à mes côtés mais aussi pour toutes les opportunités qu'il m'a permis de saisir.

Je remercie les rapporteurs de cette recherche, Virginie Duvat-Magnan et Franck Lavigne ainsi que les membres du jury, Hélène Hébert, Patrick Tyburn et Narcisse Zahibo pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce travail.

Je souhaite également remercier les membres du comité de sélection de la Fondation de France qui ont accepté de financer mes recherches pour une durée de trois ans en réponse à l'appel à projet « *Quels littoraux pour demain, édition 2012* ». Je remercie Thierry Gissingier et Julie Vallat de la Fondation de France pour leur suivi du projet et l'organisation des rencontres annuelles.

Cette recherche est le fruit de nombreuses collaborations et d'échanges avec plusieurs acteurs institutionnels en Martinique. Aussi, je souhaite exprimer toute ma gratitude :

Au Lieutenant-colonel Philippe Sarron chef d'état-major interministériel de zone Antilles qui, le premier, a manifesté son intérêt pour mes futurs travaux et a soutenu ma démarche. Je remercie vivement le lieutenant-colonel Denis Lopez qui lui a succédé, de m'avoir également fait confiance

Au Lieutenant-colonel Patrick Tyburn chef d'état-major interministériel adjoint de zone Antilles, toujours présent, pour ses précieux conseils et le temps qu'il m'a accordé au cours de longues réunions de validation, mais également pour l'appui financier qu'il a fourni afin de faciliter le déroulement de nos travaux.

A Guillaume Raymond, chef du Service Interministériel de Défense et de Protection Civile de la Préfecture de la Martinique ainsi qu'à toute son équipe pour avoir facilité les relations avec l'ensemble des acteurs de la gestion des risques localement.

A Steve-Michel Symphor, chef du service action sécurité et Marie-Noëlle Raveau, son adjointe de l'ex-Conseil Général de la Martinique pour leur engagement dans le suivi de notre recherche et dans la mise en œuvre, parfois laborieuse, de l'affichage du risque sur le terrain.

A Bernardo Aliaga, secrétaire technique de l'ICG/CARIBE-EWS au sein de l'IOC-UNESCO, pour avoir permis d'initier mes recherches sur le thème de la mise en sécurité des navires notamment via l'encadrement de stagiaires à Paris.

A Edouard Perrier, directeur du CROSS Antilles Guyane et son adjoint Alex Genicot qui ont facilité la compréhension de l'organisation de la chaîne d'alerte dans le domaine maritime, ce qui a permis de déboucher sur un travail collaboratif.

A Frédéric Gedon, Commandant du Grand Port Maritime de La Martinique et ses adjoints Frédéric Hamon et Loïc Siquin qui m'ont accordé leur confiance au cours de mes travaux visant à la mise en place des procédures opérationnelles d'évacuation des navires en cas d'alerte.

A Virginie Waloszek, Déléguée Académique aux Risques Majeurs en Martinique pour son engagement dans la mise en œuvre d'exercices d'évacuations d'établissements scolaires.

Aux membres du projet CARIBSAT, en particulier les responsables du projet Marc Morel et Jean-Raphaël Gros-Désormeaux. Ils m'ont permis d'initier ma recherche sur le thème des tsunamis en Martinique. J'adresse une pensée amicale à Rafaëlle Gutton et Yuji Kato pour les moments partagés dans les débuts de cette aventure aux Antilles.

A M. Patrick Queneherve représentant IRD Martinique-Caraïbe et à son équipe pour leur soutien tout au long de nos travaux notamment dans les aspects logistiques.

A l'ensemble des autres acteurs rencontrés au cours de ces quatre années de recherche, en particulier Valéry Clouard, directrice de l'Observatoire Volcanologique et Sismique de la Martinique, Jean-Noël Degrace Chef de service Météo-France Martinique, ainsi qu'à Aude Nachbaur du Bureau de Recherches Géologiques et Minières pour leurs apports et leurs observations constructives.

Je tiens également à exprimer mes remerciements les plus chaleureux à toutes les personnes que j'ai côtoyées pendant ces quatre années de thèse, et en particulier :

A l'ensemble des étudiants et des stagiaires du master 2 GCRN que j'ai encadré au cours de ces années de recherche et aux cotés desquels j'ai beaucoup appris. Je remercie en particulier Gilles Gustave, Antoine Granjon, Mickael Audel et Lionel Delbe.

A l'ensemble du personnel des services administratifs de l'Université qui ont assuré le bon déroulement des montages financiers, en particulier Anne-Marie Marteau, et pour les nombreux ordres de mission, Sarah Assensi et Quilina Lanfranchi.

A l'équipe du GRED qui m'a accueillie depuis mes années de master et aujourd'hui encore. Je tiens à remercier tout particulièrement Monique Gherardi pour sa disponibilité, sa bienveillance et toutes ses marques d'attention, Hervé Lemartret pour les longues heures de travail passées ensemble derrière les écrans, Stéphanie Defossez, Tony Rey, Jean-Philippe Cherel pour leur soutien indéfectible et Jean-François Girres pour l'opportunité de poursuivre mes recherches dans le cadre du projet MapMuxing.

A l'ensemble des doctorants anciens et actuels avec qui j'ai noué des relations amicales et partagé de très bons moments au GRED. Une pensée particulière pour Bouh Omar Ali à qui j'adresse mes vœux de courage pour la fin de sa thèse, mais également à Annabelle Moatty, Julie Morin, Estuning Mei, et Alexandre Sahal pour qui j'ai une profonde et sincère amitié.

A « ma famille martiniquaise », les Sulter qui ont toujours répondu présents par leur accueil, leur gentillesse et leur soutien sur place.

A Michèle et Jean Lagahé, pour leur hospitalité et leur gentillesse à toute épreuve notamment lors des temps de colocation plus qu'améliorée...

Je veux exprimer mes remerciements à ma famille et à mes amis pour leur patience. Ils m'ont accepté pendant ces quatre années avec, parfois, ma mauvaise humeur, mes inquiétudes et mes doutes. Ils m'ont connu parfois enjoué, souvent soucieux, pour ne pas dire stressé mais surtout absent. Ils se sont contentés de quelques heures par-ci par-là entre deux missions que ce soit en Charente, en Martinique ou dans l'Hérault. Désormais, vous n'aurez plus d'excuse pour ne pas venir nous rendre visite sur cette magnifique île aux fleurs.

Enfin, je souhaite remercier ma Maman, Brigitte et ma compagne, Emilie, pour leur amour inconditionnel, leur soutien, leur aide précieuse notamment au cours des dernières semaines de rédaction au prix de moments que nous n'avons pas pu partager voire qui ont été sacrifiés. Le coût d'une thèse peu s'évaluer en temps, non pas uniquement celui qui lui est consacré mais également celui dont on a parfois privé tous ceux qu'on aime.

Avant-propos

Nos travaux s'inscrivent dans la continuité de plusieurs projets de recherches pluridisciplinaires, portant sur le risque tsunami, auxquels nous avons apporté une contribution :

- Le projet MAREMOTI (MAREgraphie, observations de tsunamis, modélisation et études de vulnérabilité – 2009/2011) financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) qui a été piloté par le CEA/DASE¹ et qui nous a permis de participer à une étude intégrée du risque de tsunami sur la ville d'El Jadida (Maroc) ;
- Le projet PREPARTOI (Prévention et REcherche Pour l'Atténuation du Risque de Tsunami dans l'Océan Indien – 2010/2012) financé par la Fondation MAIF qui nous a permis de reproduire la méthode développée dans le cadre de l'ANR MAREMOTI sur l'île de Mayotte et d'y intégrer des problématiques d'accessibilité notamment des ressources en période post-crise.

Les méthodologies développées par l'UMR GRED au sein de ces projets ont pu être adaptées au contexte martiniquais notamment dans le cadre d'un CDD d'une durée de trois mois au sein du projet CARIBSAT (2009-2013), financé dans le cadre du programme européen INTEREG IV et coordonné par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD – Martinique, UMR ESPACE-DEV). Dès le début de notre étude, notre participation à plusieurs colloques et rencontres avec les acteurs locaux de la gestion des risques en Martinique a permis d'ancrer nos travaux dans un contexte opérationnel de gestion de crise, fondés sur des choix scientifiques.

Cette thèse de recherche action, a été cofinancée par la Fondation de France et l'UMR GRED, pour une durée de trois ans de décembre 2012 à novembre 2015. Elle a également reçu le soutien financier de l'état-major interministériel de zone Antilles (EMIZA) dans le cadre d'une convention de partenariat signée en décembre 2012.

Dans la Caraïbe, le contexte scientifique favorable de part la mise en place d'un système d'alerte régional tsunami et deux projets français portant sur l'étude des tsunamis, a permis à la thèse de s'insérer logiquement sur ces thématiques :

- Le projet TSUAREG (2011 - 2013) « Mise en place de la partie montante de l'alerte aux tsunamis dans l'arc Antillais » dont l'objectif était de finaliser, structurer et coordonner la mise en place du système de détection instrumentale et de transmission d'alerte aux tsunamis dans l'arc des Antilles, en coordination avec les partenaires régionaux ;
- Le projet TSUNAHOULE (2011 - 2013) financé dans le cadre du programme européen INTEREG IV a permis de dresser un état des lieux des banques de scénarios des tsunamis et des cyclones pour les Antilles.

L'UMR GRED poursuit ses travaux également au sein de trois programmes de recherche, auxquels nous sommes associés :

¹ Commissariat à l'Énergie Atomique d'Énergie Atomique/ Département Analyse, Surveillance, Environnement

- ASTARTE (*Assessment, SStrategy AndRisk Reduction for Tsunamis in Europe* – 2013 - 2016) financé par l'Union Européenne et coordonné par l'Institut Portugais de la Mer et de l'Atmosphère (IPMA) qui offre une dimension européenne en appliquant la méthode développée au cours de la thèse sur deux villes : Syracuse (Italie) et Tanger (Maroc) ;
- EXPLOIT (EXPLOItation et Transfert vers les collectivités des Antilles françaises d'une méthode de planification des évacuations en cas d'alerte tsunami (PECAT), 2016 - 2018) financé par la Fondation de France et coordonné par l'UMR GRED, qui vise à couvrir l'ensemble des communes littorales des territoires français des Petites Antilles par la méthode développée au cours de la thèse ;
- MapMuxing (2015 - 2018) financé par l'Agence Nationale de Recherche et coordonné par l'IGN, qui contribue à développer des représentations cartographiques innovantes (multiplexage) notamment pour améliorer la capacité de gestion de crise tsunami aux Antilles Françaises.

Table des matières

Résumé	1
Summary	1
Remerciements	3
Avant-propos	5
Table des matières	7
Liste des figures	13
Liste des tableaux	19
Liste des principales abréviations	21
Introduction	23
Contexte général du risque tsunami dans la Caraïbe	23
Cadre théorique de la gestion opérationnelle	24
Problématiques et objectifs de la recherche	27
Méthodologie générale et échelles spatiales associées	29
Structure du manuscrit	30
Chapitre 1 État des connaissances de l'aléa tsunami dans le bassin de la Caraïbe	33
1.1. Caractéristiques générales du phénomène	34
1.1.1. Description d'un phénomène naturel aux dynamiques complexes	34
1.1.1.1. Définition synthétique	34
1.1.1.2. Principe de propagation des tsunamis	36
1.1.1.3. La submersion par tsunami	37
1.1.1.4. Caractéristiques des effets locaux à la côte	39
1.1.2. Présentation des principaux phénomènes déclencheurs des tsunamis dans le bassin caribéen	41
1.1.2.1. Tsunamis d'origine sismique	41
1.1.2.2. Tsunamis d'origine non sismique	43
1.1.2.3. Synthèse des sources tsunamigènes probables susceptibles d'impacter les Petites Antilles	45
1.2. Confrontation des catalogues historiques de tsunamis (Caraïbe)	49
1.2.1. Intérêts des catalogues historiques	49
1.2.1.1. Les premiers catalogues dédiés à l'aléa tsunami	49
1.2.1.2. Construction des catalogues historiques	49
1.2.2. Méthodes d'investigation employées pour le recueil des données historiques	50
1.2.2.1. L'analyse d'archives manuscrites	50
1.2.2.2. L'analyse de données instrumentales passées	52
1.2.2.3. La recherche de dépôts sédimentaires de paléo-tsunamis	52
1.2.2.4. Les rapports et autres retours d'expériences	53
1.2.3. Confrontation des catalogues historiques pour la Caraïbe	54
1.2.3.1. Présentation des catalogues employés	54
1.2.3.2. Confrontation des catalogues caribéens, leurs enseignements	55
1.2.4. Hétérogénéité des échelles de mesure des tsunamis	60
1.2.4.1. Des échelles de magnitude à perfectionner	60
1.2.4.2. Vers une échelle d'intensité standardisée	61

1.3. Modélisation de l'aléa tsunami et des scénarios de référence en Martinique.....	62
1.3.1. Modélisation numérique des tsunamis, principes généraux.....	62
1.3.1.1. Perspectives opérationnelles	62
1.3.1.2. Exemples de modèles de simulation numérique les plus connus	64
1.3.1.3. La modélisation probabiliste, une méthode efficace d'évaluation du risque tsunami.....	65
1.3.1.4. D'autres approches de construction des zonages d'aléa et leur application dans la Caraïbe	66
1.3.2. Construction des zonages de référence à l'échelle de la Caraïbe et de la Martinique.....	67
1.3.2.1. Choix et hypothèses pour définir la zone à évacuer.....	67
1.3.2.2. Présentation des zones à évacuer à l'échelle de la Martinique et de la Grande Caraïbe.....	72
Chapitre 2 Les composantes du risque tsunami dans la Caraïbe insulaire, cadre général (aléa, enjeux, vulnérabilités, capacités)	77
2.1. Un cadre méthodologique et conceptuel d'évaluation du risque appliqué à la Caraïbe.....	78
2.1.1. Evolution de la notion de risque : d'une approche aléa centrée à une approche intégrée.....	78
2.1.2. Représentation schématique des composantes du risque : élaboration du modèle général AEVC.....	80
2.1.3. L'espace caraïbe : un secteur d'étude aux délimitations variables	83
2.2. Caractérisation multiscalaire du risque tsunami des Etats et Territoires Insulaires de la Caraïbe (ETIC) selon le modèle AEVC.....	86
2.2.1. Cadre général.....	86
2.2.2. Les principales vulnérabilités des petits espaces insulaires.....	87
2.2.2.1. Une vulnérabilité économique hétérogène	88
2.2.2.2. Des niveaux de développement humain contrastés.....	89
2.2.2.3. Une sensibilité variable face aux aléas naturels	90
2.2.3. Un littoral saturé d'enjeux	92
2.2.4. Une gestion délicate de l'occupation du sol.....	93
2.2.5. Une capacité d'adaptation à améliorer par une intégration régionale des ETIC.....	95
2.2.6. Une forte exposition de l'activité touristique	97
2.3. Spatialiser d'éventuelles difficultés d'évacuation des populations littorales en cas d'alerte tsunami à l'échelle de la Caraïbe	100
2.3.1. Présentation des bases de données employées.....	100
2.3.2. Exposition contrastée de enjeux humains en cas d'évacuation : prédominance des villes et grandes aires urbaines littorales	102
Chapitre 3 Anticiper la crise : détecter les tsunamis et organiser l'alerte	107
3.1. Gestion de crise et planification, principes généraux	108
3.1.1. Apports pour définir les crises	108
3.1.1.1. Qu'est-ce qu'une crise ? Le cadre particulier des risques « naturels »	108
3.1.1.2. Les temps de la crise au sein du cycle de la gestion des risques « naturels ».....	110
3.1.1.3. Répartition des compétences institutionnelles pour la gestion de crise tsunami aux Antilles françaises et en Martinique.....	114
3.1.2. Les particularités de la gestion pré-crise tsunamis	116
3.1.2.1. Les tsunamis, des phénomènes difficiles à anticiper.....	116
3.1.2.2. Scénarios identifiés pour la Martinique.....	118

3.2. Détecter les tsunamis et alerter les autorités nationales, présentation de la phase montante de l'alerte.....	120
3.2.1. Déploiement des systèmes d'alerte tsunami régionaux sous l'égide de l'UNESCO	120
3.2.1.1. Historique de la création des systèmes d'alerte.....	120
3.2.1.2. Le rôle essentiel de coordination de l'UNESCO à l'échelle mondiale.....	121
3.2.1.3. Partie montante de l'alerte : fonctionnement général et terminologie	122
3.2.1.4. Structure de l'ICG/CARIBE EWS.....	123
3.2.2. Organisation de la détection des tsunamis dans la Caraïbe.....	124
3.2.2.1. Capteurs employés et principes de fonctionnement	124
3.2.2.2. Déploiement dans la Caraïbe	127
3.2.3. Organisation de la phase montante de l'alerte tsunami	128
3.2.3.1. Rôles des TSP : détection et interprétation des événements au potentiel tsunamigène	128
3.2.3.2. Principe de fonctionnement du PTWC pour la Caraïbe	129
3.2.3.3. Moyens de diffusion des avis employés par le PTWC	133
3.2.3.4. Limites opérationnelles	137
Chapitre 4 Planifier les évacuations préventives face à l'aléa tsunami : enjeux et difficultés.....	139
4.1. Planification des alertes et matrice d'aide à la décision en Martinique	140
4.1.1. Alerter les institutions de gestion de crise régionale et départementale (fin de la chaîne d'alerte montante)	140
4.1.2. Diffusion locale du message d'alerte	141
4.1.2.1. Modalités d'alerte des populations à terre, l'alerte descendante à l'échelle départementale (Martinique).....	141
4.1.2.2. Alerter les populations à terre, l'alerte descendante à l'échelle communale	144
4.1.2.3. Alerter les navires en mer et dans les ports	144
4.1.3. Synthèse et principales limites humaines et matérielles identifiées.....	147
4.1.4. Proposition d'une matrice d'aide à la décision en réponse aux messages diffusés par le PTWC	148
4.2. Proposition de procédures opérationnelles de mise en sécurité des navires en cas d'alerte tsunami	155
4.2.1. Limiter les enjeux exposés aux tsunamis dans les ports	155
4.2.1.1. Les ports, des infrastructures vitales particulièrement exposées à cet aléa	155
4.2.1.2. Les facteurs d'endommagement des navires face aux tsunamis dans les ports	156
4.2.1.3. La nécessité d'une connaissance fine de l'aléa à l'échelle portuaire	158
4.2.2. Proposition d'une matrice d'aide à la décision pour le séquençage de l'évacuation des navires dans le Grand Port Maritime de la Martinique	159
Chapitre 5 Stratégies d'évacuation et réponses locales : contribution et méthode.....	165
5.1. Comment évacuer face aux tsunamis ?	166
5.1.1. Modes de transports couramment employés pour les évacuations dans le monde.....	166
5.1.2. Tsunami : la nécessité d'une évacuation pédestre	170
5.1.2.1. Une évacuation pédestre à privilégier	170
5.1.2.2. L'utilisation des véhicules : un facteur aggravant du risque.....	171
5.1.2.3. Limiter les durées de parcours pour favoriser l'évacuation à pied	172
5.1.3. Anticiper une évacuation multimodale à chaque étape de la période d'urgence	174
5.1.3.1. ... au cours de la phase d'évacuation	174

5.1.3.2. ... au cours de la phase d'urgence.....	175
5.2. Vers où évacuer face aux tsunamis ?.....	176
5.2.1. Les sites refuges verticaux	176
5.2.2. Les sites refuges topographiques.....	179
5.2.3. Conditions de mise en œuvre d'une évacuation pédestre vers des sites refuges horizontaux en Martinique.....	179
5.2.4. Méthodes d'identification et de sélection des sites refuges topographiques temporaires en Martinique.....	180
5.2.4.1. La mise en sécurité immédiate pour un événement à cinétique rapide	180
5.2.4.2. Sélection semi-automatique des Points d'Entrée en Zone Refuge à l'échelle du département.....	181
5.2.4.3. Une sélection multicritère à l'échelle communale	182
Chapitre 6 Optimiser des itinéraires d'évacuation à l'aide d'outils de calculs sur graphe.....	189
6.1. Modélisation des évacuations préventives de masse, ou l'importance d'expérimenter des scénarios	190
6.1.1. Outils de simulation comme supports pour la planification des évacuations	190
6.1.1.1. Le récent recours à la modélisation en géographie	190
6.1.1.2. Classification simplifiée des outils de modélisation des mobilités humaines	190
6.1.1.3. Intérêt des outils de simulation pour la planification des évacuations de masse.....	191
6.1.2. Exemples d'outils d'optimisation et de simulation employés pour la planification des évacuations.....	192
6.1.2.1. ...face aux aléas d'origine naturelle et technologique.....	192
6.1.2.2. ...face à l'aléa tsunami.....	193
6.2. Présentation des outils d'optimisation employés et de leurs paramétrages.....	196
6.2.1. Présentation de l'outil RouteFinder®	196
6.2.1.1. Fonctionnalités des calculs sur graphe fournies par RouteFinder®	196
6.2.1.2. Utilisation de l'outil matrice origine/destination.....	197
6.2.2. Présentation du réseau routier	199
6.2.2.1. Description du graphe des voies de communication à l'échelle de la Martinique.....	199
6.2.2.2. Amélioration du graphe routier à l'échelle communale.....	200
6.2.2.3. Implémentation des vitesses pédestres au graphe routier.....	201
6.2.3. Optimiser et définir les itinéraires d'évacuation des navires.....	205
6.2.3.1. Construction d'un réseau multidirectionnel.....	205
6.2.3.2. Paramétrage du réseau et outil de calculs.....	208
Chapitre 7 Scénariser les volumes de personnes à évacuer	211
7.1. Constitution des bases de données d'enjeux humains exposés selon plusieurs scénarios d'occupation nocturne	212
7.1.1. Présentation de la problématique	212
7.1.2. Bases de données de population disponibles en Martinique.....	213
7.1.2.1. Bases de données nationales.....	213
7.1.2.2. Autres bases de données de population disponibles à l'échelle départementale.....	215
7.1.2.3. Description du scénario nocturne à l'échelle de l'île.....	217
7.1.3. Création d'une base de données de population multi-temporelle pour deux scénarios d'occupation à l'échelle infra-communale (bourgs des communes de Trinité et de Sainte-Anne) ..	219

7.1.3.1. Identification des fonctions du bâti.....	220
7.1.3.2. Implémentation des effectifs pour chaque espace bâti et calculs des CAMC.....	222
7.1.3.3. Description des scénarios de nuit définis selon l'occupation théorique des habitations ..	223
7.1.3.4. Comparaisons des données d'enjeux humains pour les scénarios nocturnes	224
7.1.4. Estimation des enjeux humains sur les plages	227
7.1.4.1. Définition et techniques de comptages	227
7.1.4.2. Numérisation et classification des plages	228
7.1.4.3. Attribution du type de plage en unité homogène de fréquentation.....	229
7.1.4.4. Présentation de la méthode de comptage employée et résultats.....	232
7.1.4.5. Description des scénarios diurnes	236
7.1.5. Estimation des enjeux humains en lien avec l'activité de croisière.....	237
7.1.5.1. Localisation des escales portuaires dans la Grande Caraïbe	238
7.1.5.2. Estimation de la fréquentation annuelle des escales portuaires de croisière maritime	241
7.1.5.3. Localisation des navires de croisière au cours de l'exercice Caribe Wave 2015	243
7.1.5.4. Quantification de la capacité maximale d'individus par navire de croisière à évacuer	245
Chapitre 8 Des résultats exploitables pour la planification des évacuations	249
8.1. Des résultats « généraux » exploitables pour la planification des évacuations	250
8.1.1. Caractériser le risque tsunami des activités de croisière en cas d'évacuation à l'échelle de la Grande Caraïbe	250
8.1.1.1. Evaluation du risque tsunami des escales portuaires de croisière maritime.....	250
8.1.1.2. Evaluation du risque tsunami des navires de croisière à évacuer (scénario <i>Caribe Wave</i> 2015).....	253
8.1.2. Anticiper des scénarios crédibles d'évacuation à terre à l'échelle départementale.....	257
8.1.2.1. Estimations des temps d'évacuation pour rejoindre les PEZR	257
8.1.2.2. Modélisation des évacuations pour un scénario d'occupation nocturne	261
8.1.2.3. Modélisation des évacuations pour des scénarios diurnes.....	267
8.1.2.4. Estimation du volume d'évacués par PEZR à l'échelle locale.....	271
8.1.2.5. Estimation de la charge cumulée de la fréquence de passages associée à chaque tronçon des itinéraires d'évacuation.....	272
8.1.3. Spatialiser la vulnérabilité humaine en Martinique pour mieux se préparer	274
8.1.3.1. Exemple d'évaluation de faisabilité d'une évacuation en fonction de quatre scénarios de tsunami	274
8.1.3.2. Zones critiques et propositions pour optimiser une évacuation pédestre.....	275
8.2. Propositions opérationnelles pour une planification locale des évacuations	281
8.2.1. Confronter les résultats de modélisation à la réalité de terrain pour des plans d'évacuation opérationnels.....	281
8.2.1.1. Des résultats comme supports d'aide à la concertation.....	281
8.2.1.2. Evaluation et validation participative de la méthode	282
8.2.2. Proposer un référentiel cartographique national pour les plans d'évacuation.....	286
8.2.2.1. Des exemples à l'échelle internationale.....	286
8.2.2.2. Adoption d'une charte graphique pour représenter les plans d'évacuation	288
8.2.3. Adopter une signalétique standardisée pour l'affichage du risque	293
8.2.3.1. Les différentes pratiques à l'étranger.....	293
8.2.3.2. Les panneaux standards aux normes ISO proposés par l'UNESCO	294
8.2.3.3. Proposition d'une charte graphique normalisée des panneaux.....	296

Conclusion.....	301
Bibliographie	315
Annexes.....	339
Annexe 1. Cartes de l'amplitude maximale des ondes de tsunami modélisée par le PTWC (modèle RIFT) pour 18 sources potentielles	341
Annexe 2. Plan d'évacuation tsunami de la ville de San Juan (Porto-Rico)	351
Annexe 3. Disponibilité et choix des données topographiques mondiales employées pour délimiter la zone à évacuer à l'échelle de la Grande Caraïbe	353
Annexe 4. Matrice de décision employée par le PTWC pour le choix de l'avis à diffuser aux TWFP des pays et territoires de la Grande Caraïbe, en cas de séisme au potentiel tsunamigène.....	357
Annexe 5. Exemple de messages textes émis par le PTWC	359
Annexe 6. Support graphique d'aide à la décision pour la gestion des avis de tsunami réceptionnés par les NTWC des Antilles françaises.....	365
Annexe 7. Carte de la zone d'évacuation des navires en cas d'alerte tsunami à l'échelle de la Grande Caraïbe.....	367
Annexe 8. Description des étapes cartographiques pour réaliser les calculs d'accessibilité des PEZR et des sites refuges au moyen des logiciels SIG MapInfo et son extension RouteFinder, et ArcGis.....	369
Annexe 9. Classes fonctionnelles des bâtiments diagnostiqués et valeurs d'effectifs ou de densité associées.....	379
Annexe 10. Comptage du trafic routier sur un tronçon majeur d'accès aux plages de la commune de Sainte-Anne.....	381
Annexe 11. Comparaison des résultats de comptages des usagers des plages selon trois méthodes	382
Annexe 12. Présentation des outils employés pour le calcul sur graphe des temps d'évacuation des navires.....	384
Annexe 13. Extraits de la grille d'analyse sémiologique et graphique des plans d'évacuations existants à l'échelle mondiale	391
Annexe 14. Questionnaire d'enquête réalisé pour l'évaluation des « capacités de réponse des navires face aux tsunamis dans le bassin caribéen ».....	397
Annexe 15. Fiche du projet EXPLOIT « EXPLOItation et Transfert vers les collectivités des Antilles françaises d'une méthode de planification des évacuations en cas d'alerte tsunami »	401
Annexe 16. Fiche du projet MAPMUXING.....	403
Annexe 17. Fiche du projet ASTARTE.....	405
Annexe 18. Contribution à l'élaboration de posters pour l'information préventive tsunami	407

Liste des figures

Figure 1 : Représentation schématique des différentes sources potentielles de tsunamis.....	34
Figure 2 : Origine des phénomènes tsunamigènes à l'échelle mondiale depuis 2 000 Av. J.-C. jusqu'à nos jours (source : NGDC, consulté le 06/01/2015)	35
Figure 3 : Répartition des événements historiques par grands bassins océaniques dont la validité historique est reconnue. Les mers adjacentes sont comptabilisées dans le bassin le plus proche géographiquement (Source : NGDC, consulté le 06/11/2015).....	35
Figure 4 : Pourcentage d'événements mortels (a) et proportion de décès associée (b)	36
Figure 5 : Représentation synthétique de la propagation d'un tsunami (modifié d'après Roger, 2011 & IOC-UNESCO, 2013b). N.B. : échelles non respectées.....	37
Figure 6 : Représentation schématique d'une inondation par tsunami avec ou sans déferlement le long du rivage.	38
Figure 7: Représentation simplifiée des trois classes de tsunami : transocéaniques, régionaux, locaux.41	
Figure 8 : Identification des secteurs au potentiel tsunamigène et des sources principales associées en Atlantique (a) et dans la Caraïbe (b).....	47
Figure 9 : Sources des tsunamis historiques répertoriées depuis 1498 ayant impacté la Caraïbe	57
Figure 10 : Incertitudes spatiales des sources historiques des tsunamis ayant touché les côtes caribéennes dans le bassin de la Grande Caraïbe (a), le long de la côte est des Etats-Unis (b), dans le golfe de Cadiz (c) et en Indonésie (éruption du Krakatoa) (d).....	58
Figure 11: Carte des témoignages historiques de run-up en Martinique par commune, complétée d'après Accary et Roger (2010).....	69
Figure 12 : Témoignage historique du séisme du 11 janvier 1839, extrait de Péray (1991)	70
Figure 13 : Carte des amplitudes à la côte modélisées par le PTWC à l'aide du modèle RIFT pour un événement d'origine sismique d'une magnitude $M_w = 8.4$ et d'une profondeur de foyer de 20 km au niveau de la zone de subduction des Petites Antilles au large de la Guadeloupe	71
Figure 14 : Carte de la zone à évacuer et analyse par commune des superficies du territoire concerné par une évacuation	73
Figure 15 : Carte d'exposition des Etats et territoires de la Grande Caraïbe en cas d'évacuation face à une alerte tsunami.....	74
Figure 16 : Les composantes du risque territorialisées, d'après Leone (inédit)	81
Figure 17 : Carte des zones d'étude employées, représentée à l'échelle de la Grande Caraïbe.....	85
Figure 18 : Images satellites de terrains gagnés sur la mer (trois hectares en 14 ans) et occupés illégalement par des habitations de fortune (Port au Prince, Haïti) (source : Google Earth Pro).....	94
Figure 19 : Le modèle AEVC appliqué aux ETIC face à l'aléa tsunami.....	99
Figure 20 : Comparaison des écarts de valeur et de position des données de population disponibles à l'échelle mondiale avec pour référence la base de données de l'INSEE (2007), le cas de l'île de la Martinique	101
Figure 21 : Nombre théorique d'évacués par Etats et territoires de la Caraïbe selon un scénario d'occupation sur 24 h (Landscan, 2008) et selon un scénario nocturne (GRUMP V1, 2000).....	103

Figure 22 : Carte d'exposition de la population en cas d'alerte tsunami à l'échelle de la Caraïbe (scénario sur 24 h)	104
Figure 23 : Carte d'exposition de la population en cas d'alerte tsunami, scénario de nuit.....	105
Figure 24 : Cercle générique de la gestion de risques naturels en France	112
Figure 25 : Les différentes phases de la gestion de crise.....	113
Figure 26 : Prévisibilité temporelle des six principaux aléas qui menacent la région Caraïbe, détaillée en fonction des trois phases de pré-crise (a) et cumulée (b)	117
Figure 27 : Carte des zones de responsabilité des différents ICG et de leur centre d'alerte respectif, d'après Anderson (2016).....	123
Figure 28 : Organisation de l'Intergovernmental Coordination Group for the Tsunami and other Coastal Hazards Warning System for the Caribbean and Adjacent Regions (ICG/CARIBE-EWS)....	124
Figure 29 : Carte des réseaux instrumentaux employés par le PTWC pour la surveillance des tsunamis dans la Grande Caraïbe.....	128
Figure 30 : Photographie de la salle de surveillance et d'analyse des tsunamis du PTWC (a) hébergée dans le bâtiment du Inouye Regional Center de la NOAA (b) situé sur l'île de Ford (Hawaii) (a) (crédit photo : US Navy).....	130
Figure 31 : Zones au potentiel tsunamigène sous surveillance dans le cadre de l'ICG/CARIBE-EWS (d'après IOC-UNESCO, 2015).....	131
Figure 32 : Evolution des délais de réponse du PTWC entre 1993 et 2015 (source : Anderson, 2016)	133
Figure 33 : Miniatures des quatre nouveaux produits graphiques diffusés par le PTWC en cas de message de menace, carte des polygones d'amplitude (a), carte de propagation de l'énergie (b), carte des amplitudes à l'approche des côtes (c), un fichier .kmz à visualiser à l'aide de Google Earth (d) ...	137
Figure 34 : Chaîne de transmission du message du PTWC en cas de sources tsunamigènes proches du CPP de Guadeloupe et en situation dégradée (les temps sont donnés à titre indicatif et représentent une estimation basse des délais possibles).....	141
Figure 35 : Bandeau d'alerte tsunami diffusé par une chaîne de télévision locale ATV au cours de l'exercice Caribe Wave 2015 (a), et moyen hélicoptère utilisé pour avertir les populations présentes sur les plages de Sainte-Anne (b) (crédit photo : préfecture 972).....	143
Figure 36 : Chaîne d'alerte montante et descendante propre à l'aléa tsunami aux Antilles françaises	147
Figure 37 : Proposition d'orientations à destination des autorités en charge de l'alerte descendante - Extrait du support graphique pour l'aide à la décision en cas d'avertissement tsunami du PTWC.....	150
Figure 38 : Traitement des messages de type WECA 43 « Tsunami Information Statement » - Extrait du support graphique pour l'aide à la décision en cas d'avertissement tsunami du PTWC	151
Figure 39 : Matrice de décision pour le traitement des messages de type WECA 41 « Tsunami Threat Message » - Extrait du support graphique pour l'aide à la décision en cas d'avertissement tsunami du PTWC.....	153
Figure 40 : Validation de la cohérence du niveau d'alerte diffusé par les préfecture avec l'amplitude maximale modélisée par le PTWC - Extrait du support graphique pour l'aide à la décision en cas d'avertissement tsunami du PTWC	154

Figure 41 : Photographie du navire de charge « Asia Symphony » déposé à terre sur les quais du port de Kamaishi (préfecture d'Iwate, Japon) à la suite du tsunami du 11 mars 2011 (crédit photo : AFP/Getty Image)	158
Figure 42 : Graphique des probabilités de dommages des navires face à l'aléa tsunami selon plusieurs classes de vitesses de courant. Les points rouges représentent des valeurs relevées au cours de retours d'expérience, d'après Lynett et al. (2014).....	159
Figure 43 : Matrice d'aide à la décision pour la mise en sécurité des navires en cas d'alerte tsunami..	162
Figure 44 : Site refuge vertical au Japon (ville de Shirahama, préfecture de Wakayama) (crédit photo : N. Shuto, date inconnue)	178
Figure 45 : Exemple de relocalisation manuelle de PEZR.....	181
Figure 46 : Schéma méthodologique de création des PEZR à l'échelle départementale.....	182
Figure 47 : Photographies de deux sites refuges potentiels, l'un offrant un bon niveau de sécurité (a) et l'autre un mauvais (b).....	184
Figure 48 : Photographies de deux sites refuges potentiels, l'un offrant un bon niveau d'accessibilité (a) et l'autre un mauvais (b).....	184
Figure 49 : Photographies de deux sites refuges potentiels, l'un offrant un indice de qualité synthétique élevé (a) et l'autre un indice très faible (b).....	185
Figure 50 : Etapes de la sélection des sites refuges à l'échelle communale	187
Figure 51 : Exemple de calcul du plus court chemin à l'aide de RouteFinder® (capture d'écran centrée sur Fort-de-France).....	196
Figure 52 : Détail des paramètres cartographiques possibles pour les calculs d'accessibilité à l'aide de RouteFinder® et MapInfo®. Figuré par un encadré vert, notre protocole pour le calcul optimisé des temps et des parcours d'évacuation.	198
Figure 53 : Capture d'écran de l'interface RouteFinder® de la fonction « matrice origine/destination » (a) et d'un extrait de résultats (b)	199
Figure 54 : Détail des étapes de la construction du graphe multidirectionnel.....	208
Figure 55 : Création des sites de mise en sécurité des navires utiles au modèle de calculs sur graphe.	210
Figure 56 : Emprise des données spatiales proposées par l'INSEE à l'échelle du département de la Martinique - Zonage IRIS - 141 îlots (a) ; Carroyage 1 km - 967 mailles (b) ; Carroyage 200 m - 11 001 mailles (c) ; Zonage rectangulaire- 4 730 entités (d).....	214
Figure 57 : Schéma méthodologique de l'estimation de l'occupation nocturne par la population en résidence principale, située en zone à évacuer à l'échelle départementale	217
Figure 58 – Carte du nombre de personnes situées dans la zone à évacuer par commune (population résidente nocturne).....	218
Figure 59 : Carte de présentation des secteurs d'étude à l'échelle infra-communale.....	220
Figure 60 : Capture d'écran de la couche « BATI_INDIFFERENCIE » de la BD Topo® IGN (2010) d'origine (a.) et après numérisation manuelle par photo-interprétation (a.)	221
Figure 61 : Schéma méthodologique de l'estimation de l'occupation nocturne en période de basse et haute saison des populations situées en zone à évacuer à l'échelle infra-communale.....	223
Figure 62 : Exemple des CAMC par bâtiments habités pour les scénarios nocturnes de basse saison (à gauche) et haute saison (à droite) sur le bourg de la commune de Sainte-Anne	224

Figure 63 : Cartes de fréquentation de population du secteur du bourg de Sainte-Anne selon la base de données IGN/DGFIP (à gauche) et par relevés de terrain (à droite).....	226
Figure 64 : Taux d’occupation mensuel des hôtels homologués du département de la Martinique de 2009 à 2012, source : CMT (2013).....	232
Figure 65 : Carte de localisation des circuits de comptage réalisés et des plages de référence associées	235
Figure 67 : Schéma méthodologique des scénarios d’occupation diurne des plages en période de haute saison à l’échelle départementale.....	236
Figure 66 : Densité théorique pour chaque type de plage en fonction des trois scénarios de comptage	236
Figure 68 : Collection de cartes représentant le nombre d’usagers des plages pour les scénarios en semaine (a), week-end (a) et pour le week-end de Pâques (c).....	237
Figure 69 : Touristes débarquant en navette depuis des navires au mouillage (Georges Town – îles Caymans) (Crédit photo : JM. Sullivan, 2008).....	238
Figure 70 : Capture d’écran du site MarineTraffic.....	240
Figure 71 : Carte de fréquentation des escales portuaires de croisière maritime dans la Grande Caraïbe	243
Figure 72 : Carte des amplitudes maximales modélisées par le PTWC (modèle RIFT) pour l’exercice régional tsunami Caribe Wave 2015 (source : IOC-UNESCO, 2015)	244
Figure 73 : Carte de la capacité d’accueil maximale des navires de croisière situés dans la zone à évacuer au cours de l’exercice Caribe Wave 2015.....	246
Figure 74 : Indice de risque des escales portuaires de croisière maritime en cas d’évacuation d’urgence face à une alerte tsunami.....	252
Figure 75 : Exposition des navires de croisière au moment de l’alerte tsunami fictive émise au cours de l’exercice « Caribe Wave » 2015.....	254
Figure 76. Collection de cartes des temps d’évacuation théoriques pour rejoindre un PEZR à pied...	259
Figure 77 : Courbes d’accessibilité des temps minimaux de sécurisation des personnes situées en zone à évacuer pour rejoindre un PEZR selon trois valeurs de vitesse de déplacement pour un scénario de fréquentation nocturne à l’échelle de la Martinique.....	262
Figure 78 : Courbes d’accessibilité des temps minimaux de sécurisation des personnes situées en zone à évacuer pour rejoindre un PEZR selon trois valeurs de vitesse de déplacement pour un scénario de fréquentation nocturne à l’échelle communale	265
Figure 79 : Courbes d’accessibilité des PEZR au départ des plages de la Martinique pour trois scénarios de fréquentation.....	268
Figure 80 : Histogramme du nombre d’évacués pouvant atteindre ou non un site refuge en moins de 15 min de marche au départ des 20 plages les plus fréquentées pour trois scénarios de fréquentation	270
Figure 81 : Exemple d’aires d’influence des PEZR (bourg de l’Anse à l’Âne, commune des Trois-Îlets)	272
Figure 82 : Carte de la fréquence de passages cumulés par tronçon routier et du nombre théorique d’évacués par PEZR, scénario de basse saison (à gauche) et scénario de haute saison (à droite)	273

Figure 83 : Courbes de faisabilité d'évacuation à l'échelle de la Martinique pour quatre scénarios de tsunami local.....	275
Figure 84. Carte des secteurs les plus critiques pour la conduite d'une évacuation pédestre.	279
Figure 85 : Carte préparatoire à la planification des évacuations à l'échelle communale employée comme support de concertation avec les acteurs locaux	282
Figure 86 : Séance de travail, salle du conseil municipal de la commune de Sainte-Anne (crédit photo : F. Leone, 2014).....	283
Figure 87 : Comité d'experts présents sur le terrain pour la phase de validation de la méthode à Sainte-Anne (Martinique) (crédit photo F. Leone, 2014)	284
Figure 88 : Extrait du référentiel national proposé pour les plans d'évacuation en cas d'alerte tsunami après validation par les autorités locales, (Bourg de Sainte-Anne)	289
Figure 89 : Photographies de la diversité des panneaux d'affichage du risque tsunami et d'itinéraires d'évacuation, à droite île de Stromboli, Italie (crédit photo : M. Péroche, 2011) ; au centre île de Bali, Indonésie (crédit photo : B. Guilbert, 2015) ; à droite île de Honshū, Japon (crédit Photo : A. Moatty, 2015)	294
Figure 90 : Symboles approuvés selon les normes ISO pour l'affichage de l'aléa tsunami et les évacuations. De gauche à droite ISO 20712-1 :2008 – WSW014 ; ISO 20712-1 :2008 – WSE002 et ISO 20712-1 :2008 – WSE003, source : Kong (2009)	294
Figure 91 : Panneau d'affichage du risque tsunami selon les normes américaines (source : www.ioc-unseco.org).....	296
Figure 92 : Panneaux standardisés de la zone d'évacuation avec un plan d'évacuation intégré.....	297
Figure 93 : Panneaux standardisés d'évacuation vers un site refuge topographique.	297
Figure 94 : Proposition d'un nouveau panneau d'évacuation pour repérer les sites refuges tsunami..	298
Figure 95 : Exemple d'aménagement d'un itinéraire d'évacuation proposé pour un établissement scolaire dans le cadre de l'exercice CARIBWAVE 2014 (Collège du Robert 3, commune du Robert)	299
Figure 96 : Plan d'évacuation zonale tsunami accompagné des procédures (île de Java, Indonésie – crédit photo Moatty, 2013)	299
Figure 97 : Schéma synthétique de l'approche intégrée de la planification de l'alerte et des évacuations en cas d'alerte tsunami proposée dans cette thèse	303

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques des secteurs au potentiel tsunamigène et références bibliographiques associées	48
Tableau 2 : Chiffres clés extraits de la compilation des catalogues historiques de la Caraïbe	56
Tableau 3 : Synthèse des 15 événements d'origine potentielle tsunamigène dans la Caraïbe présentant des écarts de précision importants.....	59
Tableau 4 : Liste des dix Etats dans la Grande Caraïbes les plus exposés en cas d'alerte tsunami et d'évacuation du littoral.....	74
Tableau 5 : Synthèse des valeurs quantitatives des bases de données disponibles à l'échelle mondiale comparées à celle de l'INSEE (2007), le cas de l'île de la Martinique.....	101
Tableau 6 : Principales valeurs issues des résultats des scénarios modélisés par le PTWC (modèle RIFT).....	119
Tableau 7 : Gouvernance des différents ICG.....	121
Tableau 8 : Moyens de communication employés par le PTWC pour l'émission des bulletins d'information et des messages de menace, d'après Vanacore et al. (2016)	134
Tableau 9 : Synthèse et comparaison des informations contenues dans les bulletins d'information et de menace émis par le PTWC.....	135
Tableau 10 : Synthèse des principaux modes de déplacement employés pour les évacuations de masse	169
Tableau 11 : Synthèse des conditions de mise œuvre de sites refuges verticaux	178
Tableau 12 : Synthèse des conditions de mise œuvre de sites refuges topographiques	179
Tableau 13 : Critères et paramètres employés pour le calcul des indices de sécurité et d'accessibilité des sites refuges topographiques temporaires.....	186
Tableau 14 : Nature et longueur des voies de communication routières de la Martinique, source : BOTOPO® de l'IGN (2014).....	199
Tableau 15. Exemple d'améliorations de la base de données du réseau routier	200
Tableau 16 : Détail des vitesses de déplacement par tronçons routiers selon la pente	203
Tableau 17 : Coefficient de réduction de la vitesse selon le niveau de service de la voie.....	203
Tableau 18 : Vitesses de déplacement selon la pente et le niveau de service des voies	204
Tableau 19 : Vitesses de déplacement selon la pente et le niveau de service des voies	205
Tableau 20 : Description du graphe multidirectionnel.....	207
Tableau 21 : Description des valeurs de vitesse de navigation appliquées au graphe multidirectionnel	209
Tableau 22 : Comparatif entre la BD Parcellaire et la BD TOPO (IGN, 2010).....	220
Tableau 23 : Comparaison des bases de données disponibles.....	225
Tableau 24 : Typologie des plages martiniquaises et critères d'identification associés	231
Tableau 25 : Statistiques du nombre de navires exposés et de leur capacité d'accueil maximale associée en fonction des classes d'amplitude théoriques modélisées	253
Tableau 26 : Description des navires disposant entre 45 min et 1h30 pour évacuer	256
Tableau 27 : Description des plages présentant des temps d'évacuation supérieurs à 15 min	269

Tableau 28 : Description des plages présentant des distances d'évacuation théoriques supérieures à 800 m	269
Tableau 29 : Statistiques du nombre d'évacués par PEZR à l'échelle départementale	271
Tableau 30. Charte graphique initiée pour la cartographie des plans d'évacuation des communes de Trinité et de Sainte-Anne	292
Tableau 31 : Synthèse des principaux résultats de nos travaux pour la gestion de crise tsunami dans la Caraïbe. Contribution géographique aux dispositifs d'alerte et d'évacuation des populations.	305

Liste des principales abréviations

AEC : Association des Etats de la Caraïbe

AIS : Automatic Identification System

CARICOM : Caribbean Community

CCRIF : Caribbean Catastrophe Risk Insurance Facility

CDEMA : Caribbean Disaster Emergency Management

CDERA : Caribbean Disaster Emergency Response Agency

CENALT : CENtre d'Alerte aux Tsunamis

CEPRI : Centre Européen de Prévention de Risque d'Inondation

CROSS-AG : Centre Régional Opérationnel de Surveillance et de Sauvetage aux Antilles et en Guyane

COM : Collectivité d'Outre-Mer

CTIC : Caribbean Tsunami Information Center

DGSCGC : Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises

DPM : Domaine Publique Maritime

DROM : Département et région d'outre-mer

EM-DAT : Emergency Events Database

EMIZA : Etat Major Interministériel de Zone Antilles

ERP : Etablissements Recevant du Public

ETIC : Etats et Territoires Insulaires Caraïbéens

FEDER : Fonds Européen de Développement Economique Régional

HTDDB/WLD: Historical Tsunami Databases for the World Ocean

ICG/CARIBE-EWS: Intergovernmental Coordination Group for the Tsunami and other Coastal Hazards Warning System for the Caribbean and Adjacent Regions

IDH : Indicateur de Développement Humain

IPGP : Institut de Physique du Globe de Paris

MCN : Marégraphes Côtiers Numériques

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NGDC: National Geophysical Data Center

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

NTHMP: National Tsunami Hazard Mitigation Program

NTWC: National Tsunami Warning Center

OECD : Organisation des Etats de la Caraïbe Orientale

ORSEC : Organisation de Réponse de Sécurité Civile

OVSM : Observatoire Volcanologique et sismologique de la Martinique

PCS : Plan Communal de Sauvegarde

PEID : Petits Etats Insulaires en Développement

PPR : Plan de Prévention des Risques

PSR : Plan de Submersion Rapide

PTOM : Pays et Territoire d'Outre-Mer

PTWC: Pacific Tsunami Warning Center

RETEX : RETour d'EXpérience

RHI : Résorption de l'Habitat Insalubre

RUP : Régions ultrapériphériques

IOC-UNESCO: Intergovernmental Oceanographic Commission of United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

TSP: Tsunami Service Provider

TWFP: Tsunami Warning Focal Point

Introduction

Contexte général du risque tsunami dans la Caraïbe

L'évocation la plus ancienne des effets d'un tsunami dans des récits historiques remonte vers 1600 avant J.-C. C'est la date à laquelle la civilisation minoenne, établie en Méditerranée orientale, fut touchée par des vagues de tsunami suite à l'explosion du volcan Théra situé sur l'île de Santorin (Pararas-Carayannis, 1992). Ce n'est qu'en 1611 que le terme « tsunami » apparaît pour la première fois dans des transcriptions japonaises. Son étymologie provient du japonais « *tsu* » - port et « *nami* » - mer. Elle signifie littéralement « vague portuaire ». Vraisemblablement ce mot faisait déjà parti du vocabulaire employé par les pêcheurs japonais pour signifier une perturbation de la mer suite à des secousses sismiques (Cartwright et Nakamura, 2008). Il entre dans la littérature scientifique tardivement, seulement à partir du début du 20^{ème} siècle, mais il sera plus largement employé suite au tsunami du 1^{er} avril 1946 aux îles Aléoutiennes en Alaska (Mw 8.6 – 167 décès). Plus tard, la couverture médiatique du cataclysme du 26 décembre 2004 dans l'océan Indien a largement vulgarisé le terme de tsunami en communiquant au monde entier les effets destructeurs d'un tel phénomène. La dimension internationale de cette catastrophe, où plus de 226 000 personnes (EM-DAT) ont trouvé la mort², a déclenché une prise de conscience à l'échelle mondiale sur la gravité de ce risque. Suite à cet événement, en janvier 2005, dans le cadre de la conférence mondiale sur la prévention des catastrophes de Hyōgo (Japon) placée sous l'égide de l'Organisation des Nations Unies, la décision est prise d'étendre des systèmes d'alerte à tous les bassins menacés : Océan Indien, Mer Méditerranée et Atlantique, et Caraïbe. Auparavant, seul le Pacifique en était équipé.

L'aléa tsunami a longtemps été ignoré dans le bassin de la Caraïbe. L'absence d'événements régionaux récents, la faible période de récurrence des événements dommageables, opposées à une fréquence plus importante d'autres aléas comme les séismes et les cyclones, sont autant de facteurs qui ont contribué à l'oubli et la méconnaissance de ce risque chez les populations locales, renforçant leur vulnérabilité (Bryant, 2005 ; Courteau, 2007 ; Harbitz *et al.*, 2012 ; IOC-UNESCO, 2013a ; Hayes *et al.*, 2014) : « *Knowledgeable local residents even have a term for it: "El Peligro Olvidado" The Forgotten Danger!* » (Proenza et Maul, 2010). Pourtant, le bassin caribéen présente des caractéristiques géodynamiques propices à une catastrophe régionale en cas de tsunami majeur. D'une part, les sources tsunamigènes potentielles sont nombreuses et variées, réparties sur l'ensemble du bassin. Les tsunamis peuvent être générés par des séismes de subduction, des séismes intra-plaques, du volcanisme actif et des glissements de terrain sous-marins ou subaériens. D'autre part, la configuration en mer semi-fermée et

² Parmi ces 230 000 victimes, 2 307 étaient des étrangers de 46 nationalités différentes pour la plupart en vacances.

la faible dimension du bassin réduisent les temps disponibles pour permettre la mise en sécurité des enjeux exposés. Weissert (1990) in Zahibo *et al.* (2003b) calcule des temps de trajet maximum de 3h12 d'est en ouest du bassin et de 1h30 du nord au sud. Mais la Caraïbe, et plus particulièrement les Antilles, sont également menacées par des télétsunamis. L'étendue des délais qui les caractérisent, généralement supérieurs à sept heures avant l'impact du phénomène, nécessite une planification de crise particulière (Roger *et al.*, 2011). La multiplicité de leurs sources, associée à l'incertitude des conséquences potentielles, complexifient considérablement la planification de crise en cas de tsunami. La menace d'un tsunami est une réalité qu'il n'est plus possible d'ignorer dans le bassin de la Caraïbe. Les nombreux catalogues historiques qui concernent cette région, répertorient plusieurs dizaines d'événements entre 1498 et aujourd'hui. Le nombre de tsunamis ayant impacté les côtes des territoires caribéens renseignés par au moins une valeur de *run-up* est compris entre 21 (Lander *et al.*, 2002) et 44 événements d'après la NGDC. Zahibo et Pelinovsky (2001) en dénombrent 24 qui auraient impacté les Petites Antilles. L'événement le plus récent ayant entraîné des victimes (au moins trois) est celui survenu à la suite du séisme dévastateur de janvier 2010 en Haïti (Fritz *et al.* 2013). L'événement le plus meurtrier est celui de 1946 en République Dominicaine où plus de 1 800 victimes sont dénombrées (NGDC). Sur la même période, le nombre de décès liés aux tsunamis dans le bassin de la Caraïbe est compris entre 2 564 (NGDC) et 15 843 (Harbitz *et al.*, 2012) individus. Proenza et Maul (2010) soulignent la forte probabilité de pertes humaines et économiques pour cette zone, et estiment que le risque de tsunami est tout aussi élevé voire supérieur, à celui présent sur la côte ouest américaine et Hawaii. De plus, Parsons et Geist (2009) expliquent que les catalogues historiques sur les tsunamis et les phénomènes sismiques sont très probablement incomplets, et ne reflètent certainement pas la réalité de la menace pour la région, nous verrons que c'est effectivement le cas.

Cadre théorique de la gestion opérationnelle

La gestion de la plupart des risques naturels est cantonnée à des entités géographiques homogènes soumises à un même phénomène naturel que l'on appelle des bassins de risque. Par exemple, la gestion du risque d'inondation s'organise à l'échelle de bassins versants, celle des risques de submersion marine et d'érosion littorale à l'échelle de cellules sédimentaires, ou encore celle du risque avalancheux par couloirs. Cette relative délimitation de l'enveloppe de risque facilite la communication et la concertation entre les différents acteurs de la gestion de crise, sur un territoire qui répond à une continuité géographique évidente. L'aléa tsunami est particulier. Son ampleur spatiale, de dimension souvent régionale, et les brefs délais disponibles avant son impact nécessitent de mettre en place un raisonnement et une organisation qui dépasse les frontières habituellement définies pour la gestion des aléas plus fréquents.

Avant 2004, seul le bassin Pacifique disposait d'un système d'alerte régional collectif créé sous l'impulsion des Etats-Unis, faisant suite à une série de tsunamis entre 1946 et 1964. D'une manière générale, les scientifiques, les autorités locales et les populations ont négligé cet aléa dans les autres bassins de risque. Seules quelques communautés locales régulièrement impactées par ce phénomène, comme par exemple en Indonésie, ont développé des connaissances empiriques du phénomène et ont

su s'en prémunir, notamment par la reconnaissance des signes annonciateurs du phénomène suivie d'un comportement adapté (Lavigne et Paris, 2011).

La France compte des territoires dans l'ensemble des bassins de risque soumis à l'aléa tsunami. Chacun de ces territoires est confronté à des scénarios variables en termes de délais d'impact, de périodes de retour et d'organisation de l'alerte. Pour autant, nous constatons l'absence de guide méthodologique pour la gestion de l'aléa tsunami en France. *A contrario*, les aléas qui impactent fréquemment le territoire métropolitain disposent d'outils méthodologiques et de doctrines établies sur la base d'événements intérieurs ayant fait l'objet de retours d'expérience comme le Plan de Submersion Rapide (2011) rédigé suite à la tempête Xynthia (28 février 2010) et les inondations du Var (15 juin 2010). Au cours de nos travaux, nous avons pu observer qu'il n'existe pas de réels échanges entre les services de sécurité civile français des différents territoires nationaux menacés par l'aléa tsunami. Néanmoins, des efforts sont menés à l'échelle internationale par l'UNESCO qui regroupe régulièrement les membres des différents *Intergovernmental Coordination Group* (ICG) pour des réunions d'échanges à Paris.

La réduction du risque tsunami repose sur trois piliers couramment employés dans le domaine de la gestion des risques (León et March, 2014) : la construction d'infrastructures lourdes qui visent à limiter les dommages en cas d'occurrence du phénomène, la réglementation de l'occupation du territoire en minimisant les enjeux exposés et enfin la planification de gestion de crise qui s'étend depuis les phases de prévention des risques (conduites à tenir) jusqu'à la phase d'accompagnement immédiat post-événementielle.

En matière de gestion des risques naturels en France, les politiques d'aménagement du territoire s'orientent souvent vers des méthodes structurelles pour diminuer l'intensité de l'aléa et protéger les zones à forts enjeux. Ce constat se vérifie particulièrement pour la gestion des risques littoraux (érosion côtière et submersion marine), pour lesquels il existe un large éventail de moyens de protection lourds (digue, enrochement, brise-lame, épi, etc.). Dans le cas d'un tsunami, les contraintes hydrodynamiques exercées au cours de la submersion impliquent la construction d'aménagements structurels très performants et extrêmement coûteux. Mis à part le Japon, aucun pays n'a déployé de stratégie de protection tsunami par des ouvrages de génie civil, à une si grande échelle. Ce pays particulièrement exposé aux tsunamis a connu plusieurs événements dramatiques au cours de son histoire (1896 : 22 000 morts ; 1933 : 3 000 morts ; 1960 : 142 morts ; 2011 : 20 000 morts). Depuis le tsunami du Chili (1960) ce sont près de 300 km de digues anti-tsunami qui ont été construites au Japon (Shuto et Fujima, 2009 ; Mikami *et al.*, 2014). Cependant, l'événement du 11 mars 2011 a remis en cause l'efficacité de ces constructions. En effet, la destruction du littoral de la région de Tōhoku, un des territoires les mieux protégés par des mesures structurelles, a mis en évidence deux principales limites de l'efficacité de ces ouvrages d'art :

- d'une part, chaque ouvrage de protection est dimensionné pour résister à un événement de référence. Or, le dimensionnement des ouvrages construits, s'est basé sur une période de données historiques bien trop courte pour en déduire des fréquences d'événements extrêmes

(Shuto et Fujima, 2009). Ces connaissances lacunaires n'ont pas permis de prévoir un tel événement, et les ouvrages de défense côtière ont été partiellement détruits³ ou submergés ;

- d'autre part, la présence de ces mesures structurelles a provoqué un sentiment de sécurité exagéré chez certains habitants. Ce fut le cas à Taro (préfecture d'Iwate), où les populations supposées à l'abri derrière des digues parfois hautes de plus de 15 m, ont retardé leur évacuation ou n'ont pas évacué. La proportion de décès dans ces secteurs a été parfois plus importante que dans des secteurs non protégés (Mimura *et al.*, 2011 ; Fraser *et al.*, 2013).

En cas de submersion par tsunami la menace pour les vies humaines est tellement grande, que la seule mesure de protection réellement efficace reste le déplacement des populations vers des zones non exposées. La planification à long terme de l'occupation du sol permet de limiter l'installation des enjeux sur les zones de danger. Néanmoins, elle impose de lourdes contraintes réglementaires et requiert de la part des autorités étatiques une forte volonté politique pour inciter et faire respecter les règles d'urbanisme qui en découlent. Bien que déjà ancrées historiquement dans la culture japonaise⁴, les consignes nationales pour la reconstruction de la côte nord de Tōhoku, suite au tsunami de 2011 ont renforcé la planification de construction des bâtiments stratégiques et des habitations hors de la zone de danger. D'ailleurs, depuis cette catastrophe, le gouvernement japonais a renforcé sa stratégie d'évacuation pour les événements dont la période de retour est supérieure à 100 ans (UNISDR, 2015). Les guides généraux de bonnes pratiques rédigés pour la préparation des sociétés face au risque de tsunami favorisent très largement l'approche sociale de la gestion de l'aléa tsunami (IOC-UNESCO, 2008, 2012 ; Scheer *et al.*, 2011). Ils encouragent à l'amélioration des actions de sensibilisation des populations et la planification locale des évacuations. Ces efforts doivent être accompagnés de deux actions indissociables : la mise en place d'un système précoce d'alerte montante et descendante, et l'information préventive pour l'éducation des populations. L'expérience des japonais dans la lutte contre les risques naturels les a conduits à développer de nombreuses méthodes préventives pour les populations. Ce haut niveau de préparation a largement contribué à limiter le nombre de décès notamment lors du tsunami de Tōhoku (Toyama, 2012). Ce jour-là, près de 602 000 personnes étaient exposées. 582 000 personnes ont évacué et 20 000 sont décédées ou portées disparues (Ishiwatari et Arakida, 2012). Le taux de survie des populations de la zone impactée a donc avoisiné les 96 %. En comparaison, le tsunami du 24 décembre 2004 a engendré la mort de près de 230 000 personnes dans 14 pays riverains de l'océan Indien. C'est l'Indonésie qui a payé le plus lourd tribut avec 178 000 victimes dont plus de 90 000 dans la seule agglomération de Banda-Aceh (Lavigne et Paris, 2011). La différence du nombre de victimes entre les événements de 2004 et 2011 met en exergue l'importance de la préparation. Ce même constat peut être effectué pour les événements similaires du Japon et de la Papouasie Nouvelles Guinée⁵ ou encore ceux du Chili⁶. En 2004, l'océan Indien est dépourvu de

³ La longueur de digues anti-tsunami ayant été détruites est estimée à 8 500 m (Yagyū, 2011 *in* Fraser *et al.*, 2013)

⁴ Plusieurs villages situés sur la côte de Sanriku ont été reconstruits de manière spontanée et autofinancée sur les hauteurs suite au tsunami du 15 juin 1896 (22 000 morts) (Shuto et Fijima, 2009).

⁵ En 1993 au Japon, un tsunami anéantit environ 15 % de la population exposée sur l'île de Okushiri, tandis qu'un événement semblable en 1998 tue près de 40 % de la population exposée en Papouasie Nouvelle Guinée, faute de non reconnaissance des signes annonciateurs (Bernard *et al.*, 2010).

système d'alerte tsunami, sans aucune planification d'évacuation organisée en Indonésie. Les populations de la région de Banda-Aceh ne possédaient aucune connaissance du phénomène. Planifier une évacuation et préparer les populations nécessitent un faible investissement financier par rapport à la mise en place de mesures structurelles. Cette solution aurait certainement pu sauver de nombreuses vies humaines. La simple reconnaissance des signes annonciateurs d'un tsunami doit permettre aux populations de débiter l'évacuation spontanée des zones basses littorales sans même attendre l'éventuelle alerte officielle. La planification préalable de l'évacuation par la signalisation sur le terrain des zones à risques, des itinéraires et des sites refuges, apparaît donc comme indispensable pour organiser un processus d'évacuation efficace et sensibiliser les populations.

L'évacuation à pied des populations situées en territoire exposé est la seule parade efficace, qu'elle soit planifiée ou spontanée (Scheer *et al.*, 2012). Bien que ce mode de gestion soit très adapté à la cinétique rapide des tsunamis, il ne correspond pas à la culture de crise de certains Etats de la Caraïbe. En France par exemple, cette pratique est peu employée face aux aléas naturels, où la tradition est au confinement (Leone *et al.*, 2010), comme en témoignent les récents guides d'évacuation de masse publiés par la DGSCGC (2014) et le CEPRI (2014).

Forte des apprentissages acquis suite à ces dernières catastrophes, la préparation à la gestion de crise tsunami doit incontestablement se détourner d'un cheminement trop linéaire imposé habituellement par la seule étude de l'aléa et les connaissances scientifiques associées. Elle doit également dépasser l'aspect financier engendré par le déploiement des moyens de détection et d'alerte tsunami, pour débiter ses actions le plus tôt possible. Il est essentiel dans ce contexte de privilégier l'accompagnement des autorités et des communautés locales dans la conception de plans d'évacuation, pour la mise en sécurité rapide des populations littorales, et ce sans attendre les études de danger très fines, coûteuses, longues, pas toujours généralisables et trop sujettes à caution.

Problématiques et objectifs de la recherche

La mise en place d'un système régional de surveillance de l'aléa tsunami constitue le fondement de l'architecture d'un dispositif d'alerte efficace. Par ailleurs, il convient de répondre localement aux avis de tsunami et à l'occurrence d'un tsunami de manière adaptée pour assurer la sécurité des populations (Courteau, 2007). A travers ce travail de thèse nous apportons plusieurs réponses à cette dernière étape cruciale, couramment appelée le « dernier kilomètre » du dispositif d'alerte. Car, si le mécanisme d'alerte fonctionne à l'échelle régionale et nationale, « *il reste à s'assurer que les personnes proches de la source d'un tsunami réagissent dans un délai très court et que les populations vivant dans des zones éloignées et isolées soient prévenues à temps des risques de submersion* »⁷.

⁶ Son efficacité a été démontrée lors du récent tsunami du 16 septembre 2015 au Chili (Mw 8.3) au cours duquel près d'un million de personnes ont évacué avec succès. Bien que les effets du tsunami aient été plus localisés le long d'une côte moins densément peuplée que lors du tsunami de 2010 (Mw 8.8), seuls huit décès liés au tsunami sont à déplorer contre 156 en 2010. Entre ces deux dates un travail important a été initié sur la prévention et la préparation aux évacuations (Contreras-López, 2016).

⁷ www.unesco.org/70years/50_ans_alerte_tsunami_pacifique

Le cadre général exposé précédemment fait état d'un manque de documents opérationnels pour la planification de la gestion de crise tsunami, aléa lui-même pris en compte seulement très récemment dans le bassin Caraïbe. Ce sujet de thèse répond donc à plusieurs attentes en matière de travaux scientifiques et opérationnels, pour aider les acteurs de la gestion des risques à se préparer et à débiter des campagnes de prévention efficaces. Trois objectifs principaux ont orienté notre démarche de recherche.

Le premier objectif était de fournir un cadre d'expertise scientifique pour accompagner les autorités locales françaises des territoires des Petites Antilles dans la planification de la réponse opérationnelle face à la menace tsunami. La réception d'un avis de tsunami par les autorités projette les services de gestion de crise dans une phase d'urgence qui nécessite le déploiement extrêmement rapide des réponses opérationnelles pour éviter la crise et réduire le risque de catastrophe. Nous avons proposé de construire des documents synthétiques sous la forme de matrices comme supports d'aide à la décision, et ainsi permettre une décision réflexe des acteurs de la gestion de crise, en fonction de la menace pour le territoire exposé. Au préalable, nous avons réalisé une synthèse des différents scénarios de crise tsunami pouvant survenir dans la Caraïbe et impacter l'île de la Martinique, sur la base des connaissances scientifiques actuelles. Puis en cohérence avec les messages du PTWC⁸, nous avons établi les actions à tenir en fonction des différents niveaux de menaces. Au regard des scénarios potentiels, l'évacuation massive de la population ainsi que la mise en sécurité des navires au large, sont les deux réponses prioritaires auxquelles nous avons tâché de répondre dans cette thèse, ce qui conduit naturellement au second objectif.

- *Questionnements de recherche à visée opérationnelle - premier objectif :*
 1. *Quels sont les scénarios tsunami qui menacent les territoires français des Petites Antilles et plus particulièrement la Martinique ?*
 2. *Quels sont les critères de prises de décision pour alerter les populations ?*
 3. *Quels sont les seuils critiques pour ordonner une évacuation massive ?*
 4. *Comment intégrer les mesures de mise en sécurité des navires exposés au phénomène ?*

Le second objectif a permis d'étudier la possibilité d'une évacuation en fonction des scénarios de tsunamis probables pouvant impacter les enjeux exposés. Nous avons employé des logiciels de géomodélisation pour plusieurs scénarios d'évacuation et pour spatialiser les territoires vulnérables où l'évacuation est difficile. Ce travail a été conduit à l'échelle de l'île de la Martinique pour le domaine terrestre, et à l'échelle du bassin de la Caraïbe pour les navires de croisière. Les résultats ont pour vocation d'apporter des outils concrets pour aider la prise de décision ainsi que proposer des aménagements visant à diminuer les temps d'évacuation. Les autorités locales, souvent isolées du monde de la recherche sont demandeuses de ces informations capitales. Le travail réalisé sur les navires a une visée davantage exploratoire. Ce sujet novateur et peu traité à l'échelle internationale, permet d'ores et déjà d'attirer l'attention sur une problématique trop souvent en marge des préoccupations de la plupart des professionnels du milieu maritime notamment les autorités portuaires et les armateurs.

⁸ Le *Pacifique Tsunami Warning Center* (PTWC) situé à Hawaïi, endosse le rôle par intérim de *Tsunami Service Provider* (TSP) pour l'ICG/CARIBE-EWS.

- *Questionnements de recherche à visée opérationnelle - second objectif :*
 5. *Vers où et comment évacuer en cas d'alerte tsunami ?*
 6. *L'évacuation à pied vers des sites refuges horizontaux (reliefs) est-elle envisageable pour tous les scénarios tsunami en Martinique ?*
 7. *Quels sont les secteurs les plus éloignés des sites refuges, les « hotspots » de risque ?*
 8. *Quel type d'aménagement faut-il privilégier pour améliorer l'évacuation du littoral ?*
 9. *Quelles sont les escales des navires de croisières les plus éloignées d'une zone de sécurité ?*

Le troisième objectif s'attachait à développer, mettre en œuvre, et valider une méthode d'aide à la planification des évacuations facilement transférable, à l'échelle communale face à l'aléa tsunami. Une méthodologie standardisée est la seule manière de garantir des résultats uniformes et cohérents sur l'ensemble des territoires français des Petites Antilles. Il s'agit d'un critère essentiel pour améliorer l'efficacité de la prévention et la coordination des moyens de secours pour une évacuation rapide des populations à l'échelle zonale. La méthode proposée au sein de nos travaux intègre une phase participative sur le terrain, qui permet non seulement d'apporter des connaissances empiriques mais également de favoriser son appropriation par les acteurs locaux. Pour parfaire notre réflexion autour de la conception des plans d'évacuation, nous avons adapté la signalétique tsunami internationale au contexte local et nous avons mis en œuvre des exercices d'évacuation pour évaluer leur degré d'opérationnalité.

- *Questionnements de recherche à visée opérationnelle - troisième objectif :*
 10. *Comment construire un plan d'évacuation ?*
 11. *Comment s'assurer du transfert de connaissances entre expertise scientifique et connaissance locale ?*
 12. *Comment aider les communes en termes d'aménagements pour améliorer les capacités locales d'évacuation ?*

Méthodologie générale et échelles spatiales associées

Nos travaux s'inscrivent dans le cadre de la mise en place du système de surveillance et de détection des tsunamis à l'échelle du bassin caribéen (ICG/CARIBE-EWS). C'est le PTWC qui est en charge de diffuser un message d'information ou de menace auprès de l'ensemble des points focaux de chaque territoire menacé (phase d'alerte montante). Une fois informées, les autorités nationales compétentes en matière d'alerte, les NTWC⁹, doivent prendre les dispositions nécessaires, et alerter du danger ou non les populations exposées (phase d'alerte descendante). Notre contribution au dispositif d'alerte se place à cette interface. Elle prend la forme principale de matrices d'aide à la décision et de logigrammes. Au préalable, ces documents graphiques ont été conçus sur la base de recherches des connaissances scientifiques et la synthèse des sources potentielles de tsunamis à l'échelle de la Grande Caraïbe (mer des Antilles et golfe du Mexique). Cette synthèse dépasse même ce stricte cadre par l'intégration des sources potentielles localisées en Atlantique. Ces résultats ont été validés à l'échelle régionale pour les territoires français des Antilles, dans le cadre de la convention de partenariat passée entre l'EMIZA et l'UMR GRED, et servent désormais de support pour une adaptation départementale

⁹ National Tsunami Warning Centers

(disposition spécifique ORSEC Tsunami). A ce travail s'ajoute une réflexion croisée sur l'alerte et la mise en sécurité des navires à l'échelle de la Grande Caraïbe en collaboration avec le CROSS AG¹⁰ et le GPMLM¹¹.

Nous avons également élaboré une méthode de géo-simulation d'évacuation à l'aide de SIG sur la base de calculs d'accessibilité sur graphe. Cette méthode a été appliquée à terre selon deux échelles spatiales, l'une départementale (île de la Martinique) et l'autre communale (communes de Trinité et de Sainte-Anne¹²). En mer, cette méthode a été appliquée à l'ensemble des ports et des navires de croisière localisés dans la Grande Caraïbe. Cette méthode se compose de quatre grandes étapes.

La première vise à construire des bases de données utilisées en entrée du modèle pour les calculs sur graphe. Il s'agit de spatialiser et de quantifier les enjeux humains exposés selon différents scénarios de fréquentation. Des méthodes statistiques d'allocation spatiale, des relevés sur le terrain, des comptages et la recherche de bases de données ont permis d'établir plusieurs scénarios spatio-temporels d'enjeux humains tant à terre (Martinique, Trinité et Sainte-Anne) qu'en mer, pour les navires de croisière. Le graphe routier et le graphe des voies de navigation maritime sont respectivement issus de bases de données existantes améliorées (BD Topo, IGN) et de la construction d'un réseau multidirectionnel. Les points d'arrivée des sites de mise en sécurité de notre modèle, sont définis selon plusieurs méthodes cartographiques de géotraitement et complétés aux échelles communales par des relevés de terrain systématiques. La seconde étape vise à calculer les temps, les distances et les itinéraires d'évacuation optimisés pour les domaines terrestres et maritimes à l'aide de différents outils SIG de calculs sur graphe. La troisième étape consiste à représenter sous la forme graphique et cartographique les résultats bruts issus de l'étape précédente pour permettre leur analyse. La quatrième et dernière étape a été appliquée uniquement au domaine terrestre aux échelles communales. La précision et le niveau de détail des bases de données employées en entrée du modèle à cette échelle, ont permis d'aboutir à des résultats opérationnels pour la construction de plans d'évacuation.

Structure du manuscrit

Le premier chapitre est consacré à la description physique de l'aléa tsunami et à la caractérisation des sources potentielles pour le bassin de la Caraïbe, à travers un état de l'art bibliographique des études scientifiques du domaine. Nous poursuivons par une analyse critique des principaux catalogues historiques qui référencent les événements connus. Sur la base de ces connaissances historiques et des résultats de simulations numériques réalisées par plusieurs équipes scientifiques, nous avons défini puis cartographié la zone à évacuer en cas de tsunami, à l'échelle du bassin de la Caraïbe et de la Martinique.

¹⁰ Centre Régional Opérationnel de Surveillance et de Sauvetage aux Antilles et en Guyane

¹¹ Grand Port Maritime de La Martinique

¹² Ces deux communes pilotes ont été retenues car elles possèdent des caractéristiques contraignantes. La commune de Saint-Anne concentre de forts enjeux touristiques et une topographie plane. Concernant la commune de Trinité, plusieurs modèles de simulations numériques de tsunami (Pedreros *et al.*, 2007 ; Accary et Rogers, 2010) révèlent des amplifications des hauteurs d'eau à la côte dans le fond de la baie de Trinité, là où se situe le bourg de la commune.

Dans le chapitre 2, nous avons défini plusieurs facteurs de risque des sociétés insulaires caribéennes face à l'aléa tsunami selon une approche analytique, en appliquant le concept de diagnostique de risque. Cette analyse prend la forme d'un schéma bilan synthétique. En fin de chapitre, nous nous sommes attachés à quantifier et spatialiser les enjeux humains situés dans une zone théorique à évacuer en cas de tsunamis à l'échelle de la Caraïbe. Cette information est uniquement construite à partir de bases de données cartographiques mondiales.

Dans le chapitre 3, nous avons étudié les temps de la crise appliqués à l'aléa tsunami afin de mettre en perspective les difficultés éventuelles liées aux différents scénarios pouvant impacter la Martinique. L'organisation de la réponse de la sécurité civile en France et l'éventail de documents opérationnels associés y sont examinés. Enfin, la structure du système d'alerte tsunami mis en place dans la Caraïbe, et le principe de l'alerte montante sont analysés.

Dans le chapitre 4, nous avons développé la phase descendante de l'alerte tsunami. Nous y détaillons nos propositions pour la gestion des avis de tsunamis sur la base des premiers messages diffusés par le PTWC à terre, à l'échelle de la zone de défense et de sécurité Antilles. Pour le domaine maritime, la réflexion a été menée en concertation avec les autorités portuaires GPMLM. Le plus haut niveau d'alerte que nous avons proposé, exige que la population de l'ensemble du littoral de la Martinique évacue vers les hauteurs. Nous proposons donc de décrire ce processus complexe et de caractériser l'importance de certains facteurs comportementaux dans la réussite des évacuations.

Dans le chapitre 5, nous avons étudié les différentes stratégies d'évacuation face à l'aléa tsunami qui nous ont permis de définir et de justifier nos hypothèses concernant les modes de déplacement et les espaces de mise en sécurité à privilégier, pour le cas particulier de la Martinique. Ce chapitre expose également la méthode d'évaluation multicritère qui a permis de renseigner la qualité des sites refuges retenus pour les deux communes pilotes de Martinique (Trinité et Sainte-Anne).

Dans le chapitre 6, nous avons construit les graphes routiers et de navigations maritimes employés pour les calculs d'évacuation. Nous détaillons également leurs différents paramétrages de vitesse ainsi que les logiciels et outils employés pour les calculs d'accessibilité. Ces graphes sont paramétrés par des vitesses de déplacement variables pour affiner les résultats de calculs des évacuations. L'intérêt des graphes est de définir des itinéraires optimisés dans le but d'évacuer un maximum de personnes en un minimum de temps vers un site refuge.

Dans le chapitre 7, après avoir fait un état des lieux de l'ensemble des données exploitables, nous développons les méthodes de quantification spatio-temporelle des enjeux humains exposés à l'aléa tsunami selon différents scénarios. On peut dès lors établir des cartes de vulnérabilité de la population lors d'une évacuation et estimer des volumes théoriques de personnes à évacuer. Ces cartes permettent de calibrer un nombre de personnes pour apporter une réponse en terme de quantification des enjeux humains tant sur les réseaux routiers que sur les sites refuges. *A contrario*, un volume de personnes dans l'incapacité de rejoindre un site refuge peut également être défini face aux scénarios d'aléa.

Enfin dans le chapitre 8, nous présentons les résultats des calculs d'accessibilité et d'évacuation vers les sites refuges tsunami pour les domaines terrestres et maritimes. Pour ce dernier nous soulignons le caractère exploratoire de l'approche, car la capacité d'un navire à évacuer et le temps nécessaire associé dépendent de nombreuses variables qui ne peuvent être prises en compte à l'échelle du bassin (disponibilité des pilotes, type de motorisation, etc.). Par contre, les données à l'échelle de l'île de la Martinique, permettent de réaliser une première analyse des secteurs les plus vulnérables en termes de difficultés d'évacuation, déclinée selon plusieurs scénarios, malgré des limites méthodologiques détaillées en conclusion. A terme, les traitements cartographiques des résultats des calculs sur graphe vont permettre de proposer des mesures d'aménagement pour améliorer les temps d'évacuation. Le caractère opérationnel de nos travaux se concrétise *in fine* par la phase de validation participative de la méthode sur le terrain, ainsi que par l'adoption de la charte graphique (plan d'évacuation et signalétique) standardisée, validée par les autorités régionales.

Chapitre 1 État des connaissances de l'aléa tsunami dans le bassin de la Caraïbe

L'évaluation du risque tsunami demande une connaissance fine de la composante physique qui le définit. La multiplicité des sources de déclenchement et la complexité des paramètres physiques de génération rendent cet aléa particulièrement difficile à modéliser. Établir sa caractérisation requiert une analyse approfondie du contexte géodynamique local et des événements passés, les deux étant étroitement liés. Contrairement à d'autres bassins océaniques exposés à l'aléa tsunami, ces connaissances sont encore limitées dans la Caraïbe. Néanmoins, la compilation de résultats des recherches scientifiques nous permet de spatialiser et de caractériser de manière synthétique l'ensemble des sources exerçant une menace sur le bassin caribéen. L'examen détaillé de plusieurs catalogues historiques met en évidence ce manque de connaissance. En effet, prendre en compte les témoignages d'événements passés nécessite un réexamen des sources primaires d'informations mais également des prospections géologiques pour la recherche de paléo-tsunamis, et d'étendre la période de connaissance. Aujourd'hui, l'absence de modélisation et donc de scénarios crédibles de tsunami, partagés par les scientifiques spécialistes du domaine, empêche de caractériser de manière exhaustive l'aléa tsunami. Il s'agit pourtant d'un levier essentiel pour initier les démarches de politiques de mitigation et de préparation à la gestion de crise. Au regard des connaissances actuelles et en accord avec les autorités compétentes, nous proposons un zonage qui correspond au territoire à évacuer en cas d'alerte tsunami en Martinique, établi sur la base des connaissances contemporaines. Ce zonage sera certainement amené à évoluer et à s'affiner au fur et à mesure de l'avancée des connaissances scientifiques, mais il offre déjà une base de travail solide, en concordance avec les valeurs suggérées par les instances internationales.

1.1. Caractéristiques générales du phénomène

1.1.1. Description d'un phénomène naturel aux dynamiques complexes

1.1.1.1. Définition synthétique

Au plan international, le terme « tsunami » est employé pour désigner des trains d'ondes gravitaires de très longue période se déplaçant dans un milieu aquatique. Chaque train d'ondes se forme par l'agitation brutale d'un grand volume d'eau suite à des mouvements verticaux et/ou horizontaux de matière solide. Il s'agit d'un phénomène associé pouvant être généré par de nombreux événements initiateurs (figure 1).

Le glossaire sur les tsunamis propose la définition suivante : « Série d'ondes de longueur et de période extrêmement grandes, généralement provoquées par des perturbations liées au déclenchement de séismes sous le fond de la mer ou à proximité, également appelées vagues sismiques et, improprement, raz-de-marée. Une éruption volcanique, un glissement de terrain sous-marin ou un éboulement côtier peuvent aussi provoquer un tsunami, de même que la chute d'une grosse météorite dans la mer » (UNESCO, 2013b).

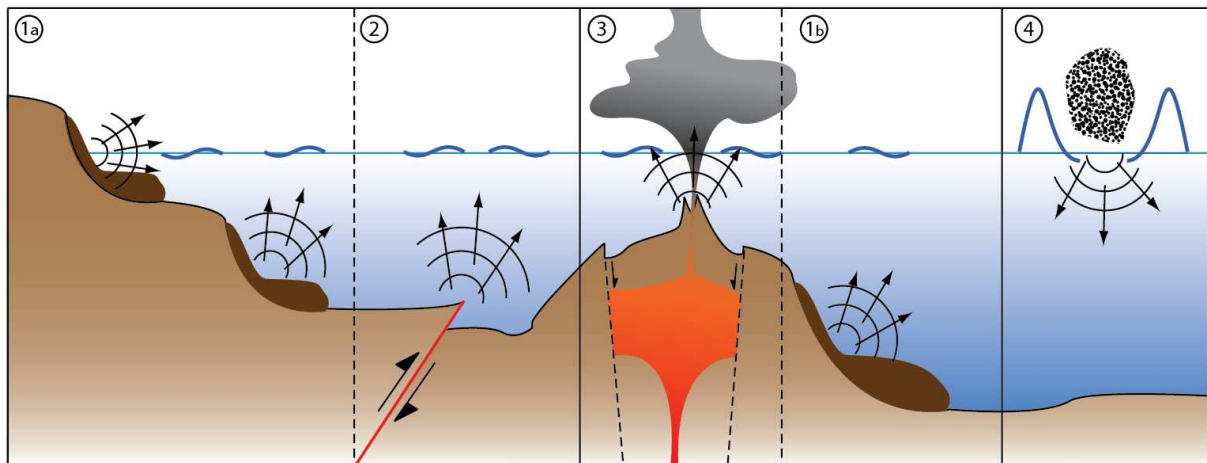


Figure 1 : Représentation schématique des différentes sources potentielles de tsunamis

On distingue trois sources de tsunamis d'origine géodynamique : les glissements de terrain sous-marins ou subaériens associés ou non à une activité volcanique (avalanche de débris, coulée pyroclastique, effondrement de flanc) ou sismique (vignette 1a et 1b) ; des séismes dont l'épicentre est situé en mer ou à proximité du littoral (vignette 2) ; des éruptions sous-marines et un ou des effondrements de la caldera associée (vignette 3). L'impact d'une météorite représente une source de tsunami extraterrestre (vignette 4).

Les tsunamis générés par un séisme sont de loin les plus fréquents (figure 2). Ils représentent plus de 80 % des événements du catalogue historique mondial de la NGDC/WDS (consulté en ligne le 06/01/2015). Les tsunamis d'origine volcanique représentent 6 % de la série, et ceux engendrés par des mouvements gravitaires, seulement 4 %.

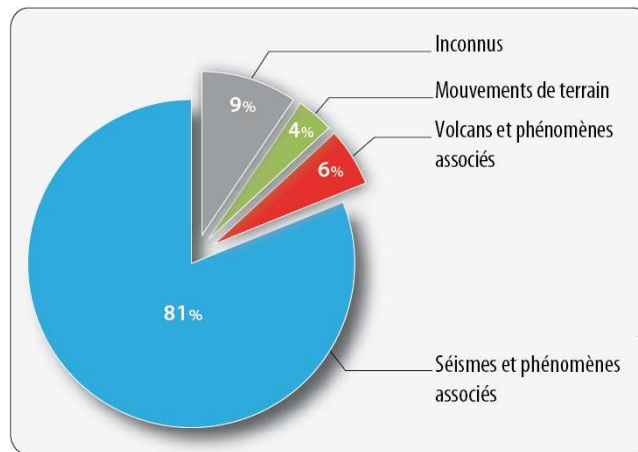


Figure 2 : Origine des phénomènes tsunamigènes à l'échelle mondiale depuis 2 000 Av. J.-C. jusqu'à nos jours (source : NGDC, consulté le 06/01/2015)

Chaque bassin océanique est plus ou moins susceptible d'être impacté par des tsunamis en fonction de son contexte géodynamique. L'océan Pacifique bordé par de nombreuses zones de subduction, communément appelées « ceinture de feu », concentre près de 80 % des tsunamis connus, et dont la validité historique est vérifiée (NGDC). En seconde position, la mer Méditerranée et ses mers adjacentes regroupent près de 10 % des cas (figure 3). Le bassin Caraïbe est également soumis à l'aléa tsunami, plusieurs événements historiques témoignent de cette activité. Selon O'loughlin et Lander (2003), le bassin caribéen aurait connu 127 tsunamis entre 1498 et 1998, dont certains d'entre eux aux conséquences catastrophiques.

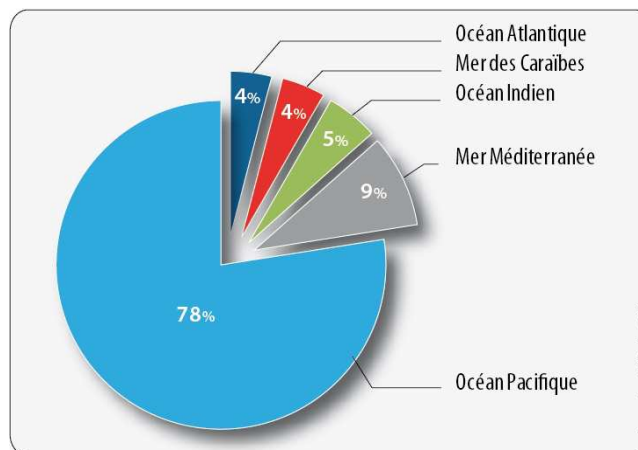


Figure 3 : Répartition des événements historiques par grands bassins océaniques dont la validité historique est reconnue. Les mers adjacentes sont comptabilisées dans le bassin le plus proche géographiquement (Source : NGDC, consulté le 06/11/2015)

Le nombre de décès provoqués par des tsunamis est, dans l'ensemble, proportionnel au nombre d'événements (figure 4). Le nombre moyen de victimes par événement apparaît légèrement plus élevé pour ceux d'origine volcanique et leurs phénomènes associés. Deux catastrophes majeures sont la cause de cette prééminence : l'éruption du Krakatoa (Indonésie) en 1883, qui a fait environ 35 000 morts et l'éruption du mont Uzen (Japon) en 1792 pour laquelle on comptabilise environ 15 000 morts. De nombreux événements aux caractéristiques imprécises et ayant occasionné un grand

nombre de décès restent à ce jour peu documentés. Par exemple le tsunami de mai 1874 au Bangladesh aurait tué plusieurs centaines de milliers de personnes (2 000 d'après la NGDC), il n'existe pourtant aucune trace écrite (Rastogi et Jaiswal, 2006). Ce constat suscite un questionnement quant à la fiabilité des bases de données historiques et à l'interprétation des témoignages qui en est faite (partie 1.2.2.).

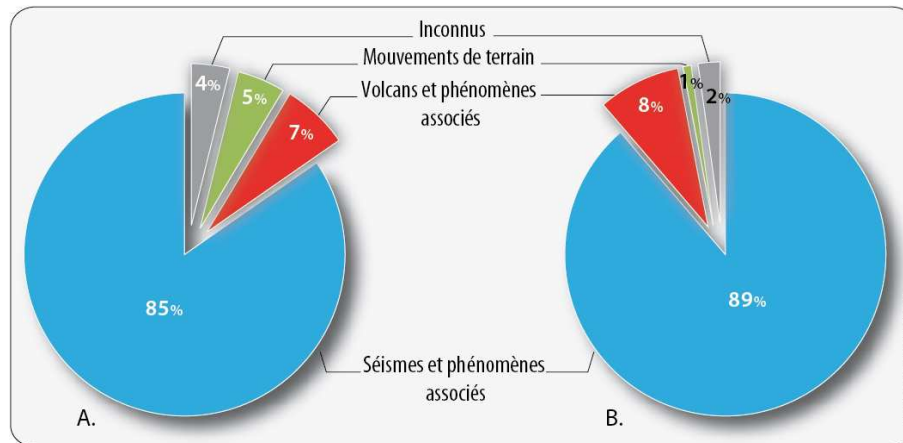


Figure 4 : Pourcentage d'événements mortels (a) et proportion de décès associée (b)

En effet, seulement 10 % des tsunamis sont à l'origine de pertes humaines. Selon la base de données de la NOAA, le nombre de victimes s'élève à près de 500 000 morts dont environ la moitié est due au tsunami du 26 décembre 2004. Du fait de l'ancienneté de nombreux événements, de l'absence de mesures scientifiques voire de traces écrites, 22 % des événements tsunamigènes répertoriés par la base de données américaines sont improbables voire inventés. C'est uniquement à partir du 20^{ème} siècle que les données disponibles sont relativement homogènes et bien réparties dans le temps et l'espace (Sahal, 2011).

1.1.1.2. Principe de propagation des tsunamis

Une fois générée, l'onde de tsunami se propage à l'ensemble de la colonne d'eau, dans toutes les directions depuis sa source. Au large, l'amplitude initiale de l'oscillation en surface ne dépasse pas quelques dizaines de centimètres (figure 5). Le phénomène est alors imperceptible pour les navires en mer. Sa période varie de plusieurs minutes à plusieurs dizaines de minutes en fonction de la source génératrice, et sa longueur d'onde peut dépasser 200 km (Lavigne et Paris, 2011). En fonction de l'énergie initiale libérée et de la profondeur de la colonne d'eau, un tsunami peut parcourir de très grandes distances à une vitesse dépassant 900 km/h. En champ lointain, la bathymétrie influence peu l'amplitude (Okal et Synolakis, 2008).

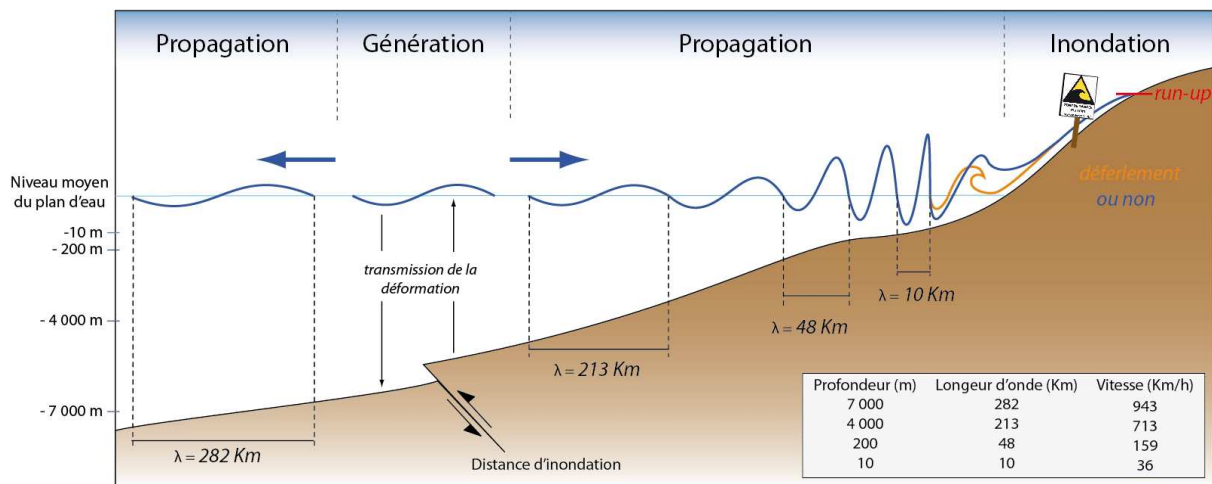


Figure 5 : Représentation synthétique de la propagation d'un tsunami (modifié d'après Roger, 2011 & IOC-UNESCO, 2013b). N.B. : échelles non respectées.

En eau peu profonde, on observe que la vitesse de propagation de l'onde diminue avec la rugosité de fond. Il se produit alors un transfert entre l'énergie cinétique qui diminue au profit de l'énergie potentielle (Lavigne et al, 2009), d'où une diminution de la longueur d'onde et une augmentation très forte de l'amplitude des vagues à l'approche de la côte (figure 5). Celles-ci peuvent atteindre plusieurs mètres voire plusieurs dizaines de mètres comme à Banda Aceh en 2004 (35 m) (*ibid.*). Cet effet lié à la remontée du fond marin est nommé en anglais le «*shoaling effect*».

Plusieurs autres facteurs influencent l'amplitude des vagues comme la bathymétrie locale, la morphologie littorale ou bien encore le niveau de la mer. Ces facteurs ont une répercussion sur la puissance d'impact du tsunami et les paramètres d'inondation.

1.1.1.3. La submersion par tsunami

Les scientifiques caractérisent la submersion par tsunami au moyen de trois paramètres relevés à terre. Il s'agit de la profondeur du tsunami après déferlement, de la distance de pénétration à l'intérieur des terres et de la hauteur de *run-up* (figure 6). Cette dernière valeur correspond : «*à l'altitude maximale atteinte par le tsunami sur les versants côtiers (à l'exception des falaises à pentes très fortes), où le run-up est toujours égal ou supérieur à la hauteur de la vague*» (Lavigne et Paris, 2011). Comme pour les inondations, cette valeur est mesurée sur le terrain au vu des traces laissées dans le paysage : végétation arrachée, débris déposés sur les hauteurs, marques d'inondation. Lors du tsunami du Japon, la hauteur de *run-up* maximale atteinte était supérieure à 40 m (Onagawa, Préfecture de Miyagi) (Lekkas *et al.*, 2011). Le record historique de hauteur d'un *run-up* connue pour un événement d'origine sismique est de 51 m (Labuhan, Province de Bandah Aceh). Il a été atteint lors du tsunami du 26 décembre 2004 en Indonésie (Lavigne et Paris, 2011).

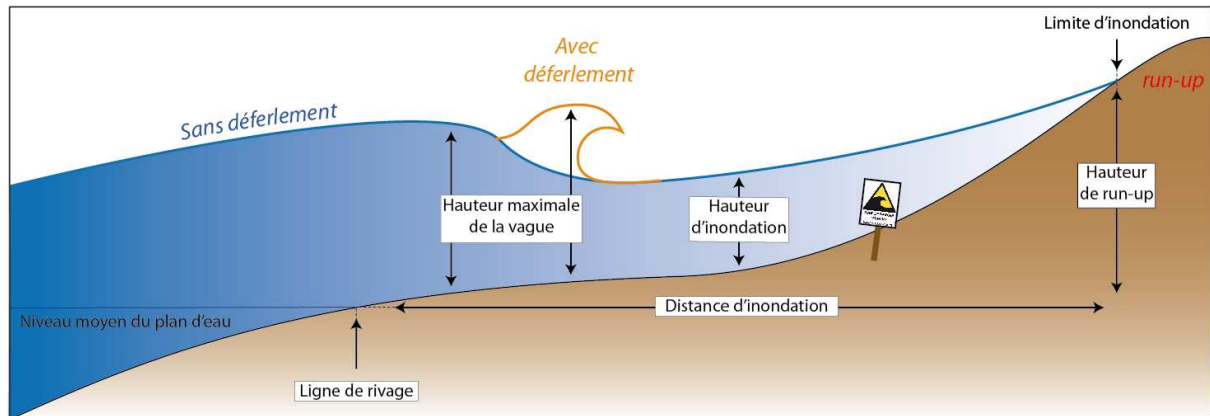


Figure 6 : Représentation schématique d'une inondation par tsunami avec ou sans déferlement le long du rivage.

Les vagues de tsunami déferlent généralement au large sur le plateau continental ou à proximité du rivage, très rarement à terre. En Indonésie néanmoins, lors du tsunami du 26 décembre 2006, la deuxième vague de tsunami a déferlé entre 1.5 et 3 km à l'intérieur des terres (Lavigne et Paris, 2011). A proximité de la côte, le tsunami se caractérise par une succession de vagues qui submergent les zones basses du littoral. La première d'entre elles n'est pas forcément la plus destructrice et leur ordre peut varier pour un même événement en fonction des côtes impactées. Par exemple, lors du tsunami de 2011 au Japon, dans la région de Miyagi (préfecture de Miyagi) la première vague a été la plus dévastatrice tandis que plus au sud, à Chiba (préfecture de Chiba), la troisième a été la plus violente (Lekkas *et al.*, 2011).

De nombreux retours d'expérience permettent aux scientifiques de mettre en évidence les facteurs qui influencent les hauteurs d'inondation et de *run-up* à terre lors d'un tsunami. Certains facteurs sont largement admis et partagés par les communautés scientifiques, d'autres restent ouverts aux discussions, notamment à propos de la présence ou non d'une barrière de corail. Nous présentons ci-dessous une liste des principaux facteurs qui augmentent les amplitudes de vagues à la côte. Elle est issue des travaux de Lekkas *et al.* (2011) et complétée par plusieurs autres lectures (Lavigne et al, 2007 ; Horrillo *et al.*, 2008 ; Levin et Nosov, 2008 ; Pattiaratchi et Wijeratne, 2009 ; Aranguiz, 2012 ; Kim *et al.*, 2014) :

- l'orientation perpendiculaire des côtes par rapport au vecteur de propagation principale des ondes de tsunami ;
- la faible distance des côtes par rapport à la source. L'énergie du tsunami se dissipe tout au long de son parcours ;
- la bathymétrie plus ou moins marquée à l'approche des côtes (présence de canyons sous-marins, faible pente du plateau continental) ;
- l'absence de barrières naturelle ou anthropique (protection anti-tsunamis, champ de dunes, barrière de corail, mangrove) ;
- la réflexion, la diffraction ou la réfraction du train d'ondes sur des îles au cours des trajets et en fonction de la morphologie côtière locale ;

- la topographie littorale basse favorise de plus grandes distances de pénétration à l'intérieur des terres ;
- les côtes découpées, formées de petites baies ouvertes favorisent des profondeurs d'inondation plus importantes ;
- la présence d'estuaires contribue à la remontée des vagues de tsunamis sous la forme de mascarets s'enfonçant plus profondément et plus rapidement dans les terres ;
- l'éventuel phénomène de subsidence lié au séisme peut abaisser de manière significative l'altitude des côtes ;
- la faible rugosité du sol et la nature de son occupation (marais, villes, rizières, etc.) ;
- le phénomène de résonance peut amplifier localement l'amplitude des vagues et ce parfois plusieurs heures après les premiers phénomènes perçus, en fonction de la configuration côtière et en interaction avec la période de l'onde de tsunami.

Outre l'inondation, le courant de retour ou *backwash* qui succède à la période d'inondation, provoque également de très forts dommages. Au cours du retrait de la mer, la force d'arrachement peut être tout aussi dommageable que la submersion. Sa puissance dépend de la topographie et de la configuration du site. Ce courant est très dangereux car il charrie un très grand nombre de débris souvent mortels pour les individus et destructeurs pour les bâtiments déjà fragilisés.

1.1.1.4. Caractéristiques des effets locaux à la côte

Les effets dommageables d'un tsunami au cours de la submersion sont liés à trois principaux paramètres : la hauteur d'eau, la vitesse du flux et la charge solide transportée. Plus la profondeur d'inondation dans les terres est élevée, plus la vitesse d'écoulement est rapide (Fritz *et al.*, 2006). Les valeurs habituellement retenues sont supérieures à 10 m/s (Shuto, 1993 ; Tsutsumi *et al.*, 2000). Au cours du tsunami du Japon, la vitesse mesurée du front de tsunami était de 8 m/s dans la plaine de Sendai (Hayashi et Koshimura, 2013) et de 11 m/s au cours du retrait de la mer dans le chenal du port de la ville de Kesenuma (préfecture de Miyagi) (Fritz *et al.*, 2012). Les valeurs de vitesse observées et simulées à Lhok Nga (province de Banda Aceh) étaient de 10 m/s (Lavigne et Paris, 2011). Ces paramètres sont couramment employés pour réaliser l'évaluation *a priori* et *a posteriori* de la vulnérabilité du bâti comme en témoignent les nombreuses courbes de fragilité disponibles dans la littérature scientifique (Koshimura *et al.*, 2009 ; Leone *et al.*, 2011 ; Suppasri *et al.*, 2011, 2013 ; Mas *et al.*, 2012a ; Charvet *et al.*, 2014).

Au cours de la submersion, la vitesse de propagation du front du tsunami, la force des courants et la direction des flux varient en fonction de l'exposition de la côte par rapport à la source et aux effets de site locaux (Lavigne et Paris, 2011). Plusieurs techniques aux protocoles complexes ont été employées pour mesurer ces valeurs de vitesse au cours d'événements passés. Fritz *et al.* (2006, 2012) ont procédé à l'analyse de vidéos (films amateurs ou caméras de vidéo-surveillance), tandis que (Nanayama et Shigeno, 2006) se sont basés sur l'analyse de dépôts sédimentaires. Enfin, l'étude menée par Tsutsumi *et al.* (2000) s'appuie sur des calculs qui prennent en compte des forces hydrauliques estimées.

Au Japon, lors du tsunami du 11 mars 2011, les mesures de vitesse des courants ont révélé des valeurs de 11 m/s dans le chenal de navigation de la ville de Kesenuma (Préfecture de Miyagi) au cours du retrait du tsunami (Fritz *et al.*, 2012). A cette valeur remarquable s'ajoutent des variations d'une extrême rapidité : au cours de l'inondation la hauteur de submersion a augmenté d'1 m/min et au cours du retrait du tsunami les valeurs de vitesse du flux ont augmenté de 3 m/s à 11 m/s en moins de deux minutes. En Indonésie, le 26 décembre 2004, les vitesses d'écoulement étaient comprises entre 2 et 5 m/s. Ces valeurs de vitesse sont particulièrement élevées, elles dépassent de loin n'importe quel autre type d'aléa (inondation, submersion marine) ce qui leur confère un fort potentiel d'endommagement. Sur le front de mer à Kamala Beach (île de Phuket, Thaïlande) des forces de pression de près de 7 t/m² ont été mesurées pour une hauteur de vague de 3 m (Srivichai *et al.*, 2005 in Leone *et al.*, 2007).

Hormis les dommages causés aux enjeux structurels et/ou humains par un tsunami, ses effets environnementaux sont préjudiciables sur le long terme. En effet, la capacité de transport des courants de flux et de reflux modifie en profondeur la géomorphologie littorale par des phénomènes d'érosion et/ou de sédimentation. La puissance d'impact de la submersion décape littéralement les zones de transit du tsunami. La végétation est totalement arrachée. En fonction de la topographie littorale ou des effets de subsidence, les terrains dont l'altitude est inférieure au niveau de la mer sont inondés à plus ou moins long terme par de l'eau saumâtre. On peut également constater un recul du biseau salé à l'intérieur des terres, rendant les nappes phréatiques impropres à la consommation ou à l'agriculture. D'ailleurs, ces traces d'altération géomorphologique, quand elles sont encore reconnaissables, font parties des méthodes d'investigation utiles au recensement des événements passés (Scheffers et Kelletat, 2003).

Encadré 1. Classification des types de tsunamis

On distingue généralement les tsunamis en trois classes en fonction de la distance des effets remarquables à la côte par rapport à la source du phénomène (figure 7). Ils sont qualifiés de tsunamis locaux (1) lorsque les effets à la côte ne dépassent pas les 100 km. Les tsunamis locaux dévastateurs sont liés presque uniquement à des phénomènes gravitaires induits ou non par un séisme. Ce type de tsunamis a été étudié par Okal et Synolakis (2004) dans leurs travaux de modélisation de la catastrophe de 1998 en Papouasie Nouvelle Guinée. On parle de tsunamis régionaux (2) lorsque les effets sont ressentis entre 100 et 1 000 km et de télétsunamis ou tsunamis transocéaniques (3) lorsque qu'ils dépassent les 1 000 km. Ces derniers sont des phénomènes catastrophiques tant par leurs effets dévastateurs à proximité de la source génératrice que par leur extension spatiale. Bien que l'intensité des télétsunamis diminue avec la distance, des effets locaux à la côte peuvent être significatifs en fonction des conditions locales de bathymétrie et de topographie.

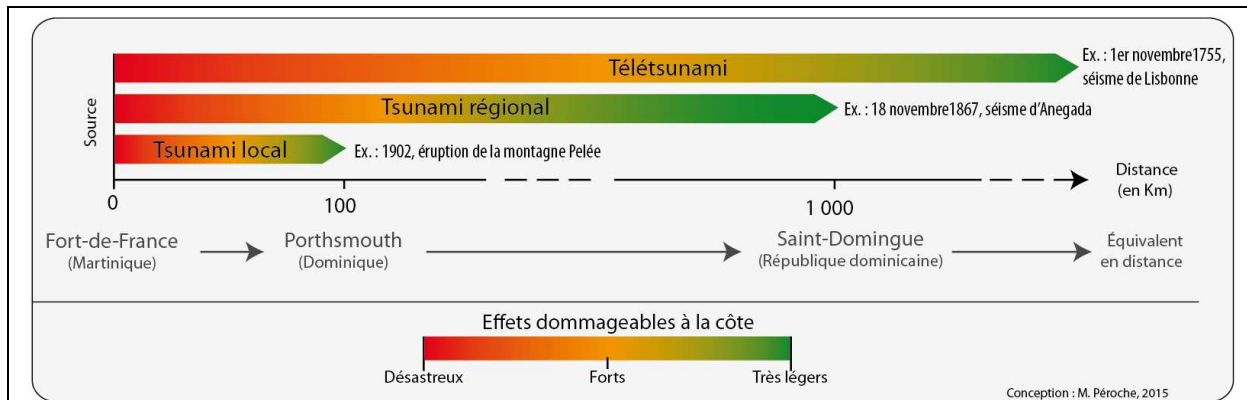


Figure 7: Représentation simplifiée des trois classes de tsunami : transocéaniques, régionaux, locaux.

A titre d'exemple Murty et al. (2005) proposent une classification plus détaillée des télétsunamis. Il distingue : (1) les tsunamis globaux « global tsunami » dont les effets, même de très faible amplitude, sont enregistrés par des marégraphes et des tsunamimètres à travers plusieurs océans ; (2) les tsunamis à l'échelle des océans « ocean-wide tsunami » dont les effets peuvent être enregistrés dans tout le bassin mais dont les dommages sont principalement confinés dans la zone proche de l'épicentre ; (3) les tsunamis transocéaniques « trans-oceanic tsunami » dont la série d'ondes se propage à tout le bassin et engendre des dommages très éloignés de l'épicentre.

1.1.2. Présentation des principaux phénomènes déclencheurs des tsunamis dans le bassin caribéen

1.1.2.1. Tsunamis d'origine sismique

- Cadre théorique

Le processus de convection mantellique entraîne un mouvement perpétuel et inexorable des plaques tectoniques. Toutefois, aux limites de ces plaques, les failles offrent une résistance mécanique à ce déplacement. Les séismes se produisent lorsque le seuil des contraintes exercées sur un plan de faille est franchi. Cette rupture libère de l'énergie qui se propage dans l'écorce terrestre sous la forme de plusieurs trains d'ondes sismiques dont les plus connues sont les ondes de volume (P et S) et les ondes de surface (Love et Rayleigh). En fonction de la profondeur de l'hypocentre et de sa magnitude, un séisme peut entraîner la déformation du sol en surface (toit de faille). Lorsque cette déformation a lieu en mer, ou à proximité des côtes, l'énergie libérée est transmise à la colonne d'eau sus-jacente et peut provoquer un tsunami (Roger, 2011).

Les tsunamis sont essentiellement générés par des séismes de limites de plaques tectoniques et plus particulièrement au niveau des zones de subduction (Bryant, 2008 ; Arcas et Segur, 2012). Il s'agit des régions où la fréquence des événements sismiques est la plus importante (McCaffrey, 2008). Elles regroupent à elles seules près de 90 % des séismes mondiaux. De plus, les caractéristiques des failles de zones de subduction (faille inverse et faille normale), ainsi que leur plan de pendage moyen (avoisinant les $25^\circ \pm 9^\circ$) s'avèrent être des paramètres favorables au déclenchement de tsunamis majeurs (Bryant, 2008).

Une première lecture de documents généraux sur les tsunamis permet d'identifier les trois principaux facteurs déterminants couramment retenus pour définir un séisme au potentiel tsunamigène :

- un épicentre situé en mer ou à proximité immédiate du littoral ;
- une magnitude de moment (M_w) généralement supérieure à 6 ou 6.5 ;
- une profondeur au foyer inférieure à une profondeur de 100 km.

Un deuxième niveau de lecture montre qu'il n'est pas possible de définir le potentiel tsunamigène des séismes par ces trois seuls critères. Plusieurs autres mécanismes au foyer définissent le type de mouvement au cours du séisme et caractérisent son potentiel énergétique. Il s'agit de :

- la surface de rupture du plan de faille ;
- l'azimut par rapport au nord ;
- l'angle de pendage du plan de faille ;
- l'angle du glissement par rapport à l'horizontal.

Un troisième et dernier niveau de lecture révèle des interactions bien plus complexes entre les différents milieux susceptibles d'intervenir dans la formation d'un tsunami. Plusieurs études ont été menées pour déterminer les liens qui existent entre les paramètres du séisme et le phénomène tsunamigène. Sahal (2011) met en évidence une certaine relation entre la magnitude du séisme et les hauteurs d'eau mesurées à la côte à partir du catalogue historique de la NGDC/NOAA. Néanmoins, des comparaisons ont été réalisées entre des séismes aux caractéristiques semblables et aux effets pourtant distincts comme celui de Sanriku au Japon en 1896 et celui de 1946 aux îles Aléouthiennes (Abe, 1973 ; Kanamori, 1972), mais aussi avec des tsunamis anormalement puissants en comparaison de la magnitude du séisme d'origine comme celui de 1992 au Nicaragua (Satake *et al.*, 1993 ; Satake, 1994), ou bien encore celui de 2010 en Indonésie (Hill *et al.*, 2012). De l'ensemble de ces travaux, il ressort que certains séismes présentent une durée de rupture anormalement longue et une vitesse de rupture anormalement lente, ce qui libère une très forte énergie (Bryant, 2008 ; Duputel, 2011). On parle alors de « séisme tsunamigène » (Kanamori, 1972 ; Okal, 1988 ; Polet et Kanamori, 2000). Bilek et Lay (2002) mettent en évidence l'importance du type de matériaux, de l'épaisseur des couches mais également des conditions de friction à l'interface de la zone de subduction comme autres déterminants de la magnitude des tsunamis.

- Contexte caribéen

Le bassin de la Grande Caraïbe se compose de cinq plaques tectoniques. Toutes s'articulent autour de la plaque Caraïbe qui englobe la majeure partie de la mer éponyme. Différentes formes de contraintes tectoniques s'exercent à leurs frontières. Elles constituent le siège d'une activité sismique parfois intense pouvant générer des tsunamis.

La plaque centrale de la Caraïbe coulisse en continu à une vitesse d'environ 2 cm/an en direction de l'est par rapport aux plaques d'Amérique du nord et du sud (Macdonald et Holcombe, 1978). À l'ouest, les plaques Cocos et Nazca plongent sous l'Amérique centrale dans le Pacifique le long d'une zone de subduction qui s'étire, *quasi* en continu, du golf de Californie jusqu'en Amérique centrale. Bien sûr, séparée de l'isthme de l'Amérique centrale, cette limite de plaque ne peut pas générer un tsunami dans la mer des Caraïbes.

La zone de subduction entre la plaque Nord américaine et la plaque Caraïbe est située à l'ouest de l'arc des Petites Antilles. Il s'agit de la zone au potentiel sismique et tsunamigène le plus fort pour la région. C'est au nord de ce secteur, entre la Guadeloupe et Antigua, que le séisme historique à la magnitude la plus élevée, estimée entre 7.5 et 8 selon les auteurs, a eu lieu en 1843 (Bernard et Lambert, 1988 *in* Harbitz et al., 2012). Les limites nord et sud sont également le siège d'une activité sismique fréquente liée à la présence de failles de type décrochant senestre au nord (faille septentrionale et faille d'Enriquillo Plantain-Garden) et décrochant dextre au sud (faille principale d'El Pilar). A la nature complexe de ces failles s'associent parfois des composantes verticales capables de générer des tsunamis. Le séisme de 2010 en Haïti en est l'exemple le plus récent (Fritz *et al.*, 2013).

L'aléa tsunami lié aux séismes ne se limite pas aux failles qui bordent la plaque Caraïbe. Des réseaux de failles intra-plaques situés à faible profondeur présentent des caractéristiques favorables aux tsunamis. Le dernier cas recensé est celui du tremblement de terre du 21 novembre 2004 ($M_w=6.3$) situé dans le passage de la Dominique, séparant la Guadeloupe de la Dominique (Zahibo *et al.*, 2005 ; Le Friant *et al.*, 2008 ; Feuillet *et al.*, 2011). L'événement a généré un tsunami faible avec des amplitudes comprises entre - 80 cm et + 70 cm sur les îles voisines (Zahibo *et al.*, 2005 ; Le Friant *et al.*, 2008). La dangerosité de ce type d'événement (tsunamis locaux) est d'autant plus élevée que les sources potentielles sont situées à proximité des îles des Petites Antilles (ten Brink *et al.*, 2011 ; Lacassin *et al.*, 2013). Certains auteurs, notamment Gutscher et Westbrook (2009) constatent l'absence d'événements sismiques significatifs dans le segment sud de la zone de subduction des Petites Antilles. Cette portion de failles qui semble « verrouillée », conduit les auteurs à supposer d'un événement sismique potentiel de grande ampleur dans ce secteur. Une mission océanographique en cours, sous la direction de Boris Marcaillou (Professeur à l'Université de Nice) vise à étudier le potentiel sismogène des Petites Antilles. L'analyse préliminaire d'une récente récolte de données au nord de l'Arc des Petites Antilles à proximité de l'île de Saint-Martin montre une zone de calme sismique qui témoigne également d'une accumulation d'énergie. McCann (2006) quant à lui observe que les modifications des jeux tectoniques dans ce secteur, associées à l'augmentation du volume du prisme d'accrétion, sont favorables aux séismes tsunamigènes. En effet, les séismes qui se forment dans des sédiments plus élastiques et qui affichent un temps de rupture plus long, présentent deux paramètres susceptibles de générer un séisme tsunamigène (Kanamori, 1972).

1.1.2.2. Tsunamis d'origine non sismique

- Cadre théorique

Les sources de tsunamis à composante principale non sismique sont nombreuses. Leurs mécanismes de déclenchement ainsi que les paramètres de génération du tsunami sont très complexes, ce qui rend ces sources difficiles à déterminer et à modéliser avec précision (Lovholt *et al.*, 2008). On distingue deux grandes catégories : les tsunamis générés par des mouvements gravitaires et ceux générés par des éruptions volcaniques. Il existe une troisième catégorie, les tsunamis générés par les chutes de météorites, que nous n'aborderons pas ici. En effet, bien qu'il s'agisse de phénomènes au potentiel dévastateur, ils n'en restent pas moins des phénomènes rares aux caractéristiques bien

particulières qui diffèrent des mécanismes classiques (Ward et Asphaug, 2000 ; Wünnemann et Weiss, 2015).

Les tsunamis d'origine gravitaire sont générés par des phénomènes subaériens ou sous-marins. Dans le premier cas, la chute d'une masse solide provoque le déplacement d'un grand volume d'eau en pénétrant dans une zone de réception immergée de plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Ainsi l'écroulement de falaises, la déstabilisation de flancs de volcan ou encore des avalanches de débris volcaniques peuvent être à l'origine de tsunamis. Dans le second cas, au cours du déplacement d'une masse le long d'une pente sous-marine, l'énergie cinétique est transmise à la colonne d'eau sus-jacente. Les zones les plus propices aux glissements sous-marins sont les fjords, les deltas actifs sur les marges continentales, les canyons sous-marins, les têtes de pentes continentales ainsi que les îles volcaniques (Hampton *et al.*, 1996). Dans les deux cas, la masse mobilisée doit être suffisamment importante, supérieure à plusieurs centaines de milliers de m³ (Marçot *et al.*, 2007). Les principaux facteurs déclencheurs sont la sismicité locale, le volcanisme, la formation de pression interstitielle, la circulation de fluides (hydrate de gaz, eau), l'augmentation de la masse mobilisable aux limites de charge, ou encore une augmentation de déclivité (Lee, 2009). Le 30 décembre 2002 en Méditerranée, suite à une intense activité volcanique du Stromboli, deux tsunamis ont été générés par deux effondrements au cours d'un même épisode, à sept minutes d'intervalles. Le premier a été généré par un mouvement de terrain principalement sous-marin et le deuxième par un glissement de type subaérien. Les deux phénomènes cumulés ont déplacé entre 2 et 3 fois 10⁷ m³ de matériaux (Tinti *et al.*, 2006). Parfois ces mécanismes déclencheurs peuvent être également d'origine anthropique, comme celui provoqué par le glissement sous-marin du remblai de l'extension de l'aéroport de Nice qui s'est produit le 16 octobre 1979 (Sahal et Lemahieu, 2010). D'autres aléas aux mécanismes propres à l'activité volcanique peuvent générer des tsunamis comme les séismes volcano-tectoniques, les explosions sous-marines, les coulées pyroclastiques, l'effondrement de calderas ou encore les ondes de chocs (Paris, 2015). Ces événements dévastateurs résultent principalement du type de volcanisme, de la localisation de l'édifice volcanique par rapport au plan d'eau, de l'intensité de la phase éruptive et de la chronologie des phénomènes. Ces différents modes d'action peuvent être successifs voire combinés aux cours d'événements majeurs. Il s'agit de phénomènes très rares mais qui sont à l'origine de grandes catastrophes.

L'impact des phénomènes d'origine non sismique est généralement localisé à quelques dizaines de kilomètres de la source. Les effets décroissent très rapidement avec la distance au regard de la faible longueur d'onde du tsunami. Néanmoins, à proximité de la source l'intensité du phénomène peut être catastrophique (Bardet *et al.*, 2003 ; Okal et Synolakis, 2003 ; Di Risio *et al.*, 2011).

- Contexte caribéen

Historiquement dans cette région, les tsunamis d'origine gravitaire sont largement associés au contexte volcanique de la région. L'arc insulaire des Petites Antilles se compose de nombreuses îles volcaniques. Une douzaine d'édifices sont actifs et plusieurs d'entre eux ont connu des phases éruptives au cours du dernier siècle (Boudon *et al.*, 2003). De nombreuses déstabilisations de flancs de volcans ont été mises en évidence suite à plusieurs campagnes océanographiques menées par l'Institut

de Physique du Globe de Paris (IPGP) et le CNRS. Il s'agit d'un événement normal de développement des édifices volcaniques. Boudon *et al.* (2003) en dénombrent une trentaine, quinze d'entre eux se seraient produits il y a moins de 30 000 ans. Leur volume et leur extension sont très variables et certains d'entre eux ont provoqué des tsunamis locaux. Les derniers en date sont ceux consécutifs à l'effondrement du dôme de lave lors des éruptions du volcan de la Soufrière de Montserrat le 12 juillet 2003 et le 20 mai 2006. Les effets à la côte ont été observés sur les îles de Montserrat et de Guadeloupe, distantes de 55 km (Pelinovsky *et al.*, 2004 ; Nikolkina *et al.*, 2010).

L'apparition d'un tsunami est étroitement liée aux processus éruptifs des volcans. Les édifices de l'arc antillais se distinguent par des comportements éruptifs aux caractéristiques variées en fonction de leur environnement structural lithologique et géothermal. Ainsi, plusieurs auteurs admettent que concernant les volcans du nord de l'arc des Petites Antilles, les tsunamis générés sont de plus faible intensité que pour ceux du sud, mais leur fréquence est plus grande. *A contrario*, les déstabilisations de flancs des volcans du sud de l'arc « *mettent en jeu des volumes beaucoup plus importants pouvant aller de plusieurs km³ à plusieurs dizaines de km³* » (Boudon *et al.*, 2003).

Dans une moindre mesure, les côtes caribéennes sont menacées par des tsunamis provoqués par des glissements sous-marins dont la source serait localisée le long de la marge du plateau continental. Les tsunamis générés par des glissements sous-marins de grandes ampleurs sont surtout localisés en bordure du plateau continental du golfe du Mexique et menacent directement les côtes de l'Amérique du nord (Ten Brink *et al.*, 2006a, 2006b ; Ten Brink *et al.*, 2008). Même si la probabilité est faible dans la zone caraïbe, on ne peut pas exclure complètement ce type de phénomène notamment au nord de l'île de Porto Rico (Ten Brink *et al.*, 2006a).

1.1.2.3. Synthèse des sources tsunamigènes probables susceptibles d'impacter les Petites Antilles

Nous proposons une synthèse des différents secteurs géographiques de sources potentielles de tsunamis pour les territoires de la Grande Caraïbe. Cette synthèse prend la forme d'une cartographie à petite échelle (figure 8) qui couvre l'océan Atlantique, assortie d'un tableau détaillé (tableau 1). Ce dernier renseigne plusieurs critères de chaque source tels que : l'origine principale du tsunami, son potentiel tsunamigène, l'événement majeur de référence connu, la période de retour et les publications scientifiques associées (figure 8). Ce travail repose sur une recherche bibliographique conséquente qui a permis de relever 24 secteurs, à la manière des travaux du BRGM (Terrier *et al.*, 2007) et de McCann (2006). Ainsi, lorsqu'on se positionne au niveau des îles des Petites Antilles, nous observons 8 secteurs de sources lointaines, 4 de sources régionales et 12 de sources locales.

Dans leur ensemble, les différentes sources de tsunamis de l'océan Atlantique ne constituent pas une menace importante pour la Caraïbe (Murty *et al.*, 2005). En effet, le golfe de Cadiz, de par son activité sismique et les îles des Canaries du fait de l'instabilité des flancs du volcan sont les deux seuls secteurs éloignés qui présentent une faible probabilité d'impact sur les côtes des Petites Antilles. Malgré le scénario catastrophe de « méga-tsunami » annoncé par la BBC, et largement relayé dans les médias, « *le risque actuel de déstabilisations massives et de tsunami est très réduit aux îles Canaries. Les îles*

occidentales de La Palma et El Hierro, où se sont produites 65 % des déstabilisations quaternaires, ne montrent aucune évidence de déstabilisation latente » (Paris et al., 2003).

A l'échelle de la mer des Caraïbes, ce sont principalement des sources d'origine sismique qui menacent les Petites Antilles. Au vu de l'activité tellurique importante, du type de jeux de failles et de la proximité des failles par rapport aux côtes les plus proches, les chercheurs s'accordent sur des probabilités d'occurrence plus élevées sur la partie nord de la zone de subduction (secteurs 13, 14, 15 et 16) (Feuillet *et al.*, 2002 ; Ten Brink *et al.*, 2011). Même si le dernier événement majeur dans les parties sud de la zone de subduction (secteurs 16 et 17) est très ancien, Gutsher et Westbrook (2009) rappellent que l'accumulation de contraintes y est constante et que l'absence de séismes de faible magnitude sont deux facteurs aggravant la probabilité d'un séisme tsunamigène. Les secteurs sismiques nord et sud du bassin menacent dans une moindre mesure les îles des Petites Antilles. Les résultats de plusieurs simulations numériques de tsunami issus des travaux du PTWC¹³ font apparaître que la directivité de l'onde des tsunamis associée à l'orientation des failles principales épargne les côtes de l'arc antillais des effets les plus importants (*cf.* annexe 1). Des phénomènes d'origine non sismique sont également à craindre du fait du contexte volcanique de la zone. Les déstabilisations de flancs « *représentent un risque non négligeable à l'échelle de l'arc antillais par l'ampleur des tsunamis qu'elles peuvent générer* » (Le Friant *et al.*, 2002) ainsi que les nuées ardentes comme celles qui ont frappé le nord de l'île de la Martinique au cours de l'éruption de la montagne Pelée (Le Friant *et al.*, 2003 a et b).

¹³ Le PTWC a fourni aux Etats membres de l'ICG/CARIBE-EWS une série de résultats de simulations numériques de tsunami pour 18 sources potentielles modélisées l'aide du modèle RIFT, détaillés au chapitre 3.

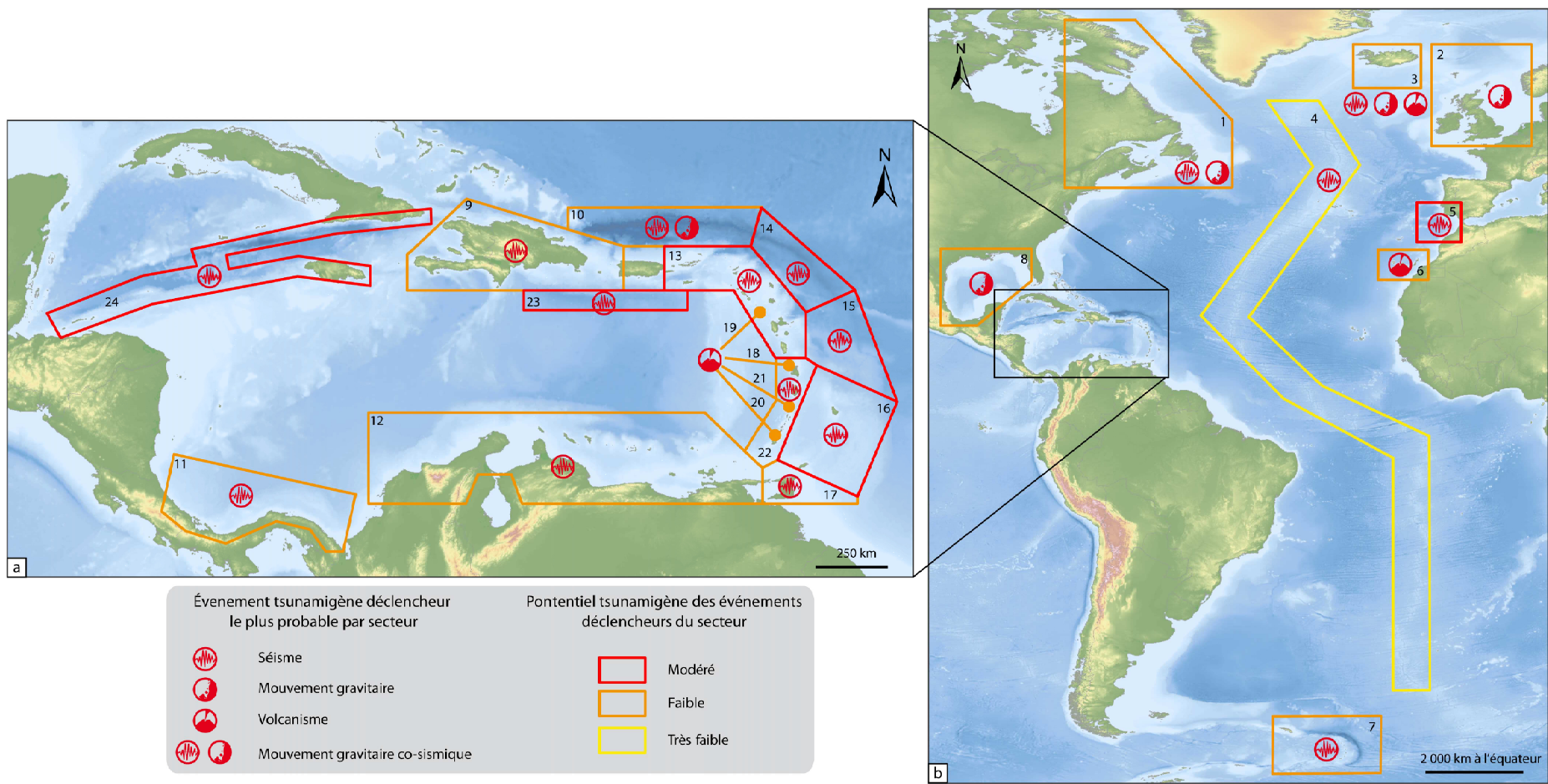


Figure 8 : Identification des secteurs au potentiel tsunamigène et des sources principales associées en Atlantique (a) et dans la Caraïbe (b)

Tableau 1 : Principales caractéristiques des secteurs au potentiel tsunamigène et références bibliographiques associées

N°	Nom de la zone	Phénomène principal				Potentialité tsunamigène	Nombre d'événements ayant impactés les îles des P. A.	Événement majeur connu		Caractéristique			Probabilité d'impacter les îles des P.A.	Période de Retour d'un séisme au potentiel tsunamigène	Référence	
		S	V	GdT	GdT Co.			Mois	Année	Type	Magnitude	Volume				
Source distante par rapport à l'arc des Petites Antilles	1	Marge nord-est américain	X	X	X	Faible	0	Nov.	1829	GdT Co	M = 7.2	225 km ³	Nul	n.c.	Fine et al., 2005 Jaris, 2013 Zahbo, 2001 McAdoo et al., 2000	
	2	Marge nord-ouest de l'Europe continentale			X	Faible	0	n.p.	7 000-5 000 Av.J.C.	GdT Co	n.p.	2 400 km ³	Nul	n.c.	Bondevik et al., 2006 Harbitz, 1992 Jansen et al., 1987 Tinti (coord.), 2009 Latter, 1981	
	3	Côte sud islandaise	X	X		Faible	0	Acut	1896	S	M = 6.9	n.p.	Nul	n.c.	Terner et al., 2007 Tinti (coord.), 2009 ten Brink et al., 2006	
	4	Dorsale médio atlantique	X		X	Très faible	0	Oct.	1522 (Açore)	GdT Co	Aucun	0.00675 km ³	Nul	n.c.	Roger et al., 2010, 2011 Sclares et Arroyo, 2004 Baptista, 2005 Barkan et al., 2009	
	5	Golfe de Cadix / Gibraltar	X			Modéré	2	Nov.	1755	S	M = 8.5	n.p.	Faible	Entre 3 600 et 10 000 ans (Maliss et al., 2013)	Ward et Day, 2001 Abadie et al., 2012 Gisler et al., 2006 Lovholt et al., 2008 Paris et al., 2005	
	6	Canaries		X	X	Faible	0	n.p.	Pleioceane	GdT	n.p.	120 km ³	Faible	> 160 ky (Lucinda et al., 2014)	Pararas-Carayannis, 2004 Pérez-Torredo et al., 2006 Okal et Harnady, 2009 Leat et al., 2013 Dragani et al., 2009 Burbidge et al., 2009	
	7	Zone de subduction des îles Sandwich	X			Faible	0	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Nul	n.c.	Dolan et Mann, 1998 Lander et al., 2002 Zahbo et Palinosky, 2001 LaForge et al., 2005 Gallier et al., 2015 ten Brink et al., 2011	
Source régionale par rapport à l'arc des Petites Antilles	8	Talus continental du Golfe du Mexique			X	X	Faible	0	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Nul	n.c.	ten Brink et al., 2009 ten Brink et al., 2008 McAdoo et al., 2000	
	9	Intra plaque Hispaniola et passage de Mona	X				Faible	1	Mai	1842	S	M > 8	n.p.	Faible	~ 300 ans	ten Brink et al., 2011 Grilli et al., 2010 Grilli et al., 2009 LaForge et al., 2005 ten Brink et al., 2006
	10	Fosse de Porto Rico	X		X		Faible	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Moyenne	S, M = 8 ~ 300 - 1 000 ans S, M = 9 ~ 3 000 - 7 000 ans (Geist and Parsons, 2009) GdT Co. ~ 100 à 500 ky (ten Brink et al., 2005)	ten Brink et al., 2011 Grilli et al., 2010 Grilli et al., 2009 LaForge et al., 2005 ten Brink et al., 2006	
	11	Chevauchement nord Panama	X				Faible	1	Avr.	1691	S	M = 7.6	n.p.	Faible	n.c.	Zahbo et Palinosky, 2001 Terner et al., 2007
	12	Ride Curaçao, Nord Venezuela	X				Faible	1	Juil.	1697	S	M = 6.8	n.p.	Moyen	n.c.	Zahbo et Palinosky, 2001 Terner et al., 2007 Audebrand, 2007 Audebrand, 2006
Source locale par rapport à l'arc des Petites Antilles	13	Passage d'Anegada Failles intraplaques	X				Modéré	3	Nov.	1667	S	M = 7.5	n.p.	Fort	~ 75 - 100 ans (ten Brink et al., 2011)	Lander et al., 2002 Zahbo et Palinosky, 2001 Terner et al., 2007 Barkan et ten Brink, 2010 Zahbo et al., 2003b Fauiller et al., 2011 LaForge et al., 2005
	14	Marge nord du front de subduction	X				Modéré	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.p.	Fort	n.c.	Zahbo et Palinosky, 2001 Terner et al., 2007 Lander et al., 2002 McCann, 2006	
	15	Marge ouest du front de subduction Ride de Tiburon et de Ste Lucie	X				Modéré	n.c.	Dec.	1669	S	M = 7.0	n.p.	Fort	M = 6 - 8.2 - 80 - 400 ans (Hayes et al., 2014)	Zahbo et Palinosky, 2001 Terner et al., 2007 Lander et al., 2002 McCann, 2006
	16	Prisme d'accrétion de la Barbade	X				Modéré	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Fort	n.c.	McCann, 2006	
	17	Marge est vénézuélienne	X		X		Faible	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Fort	n.c.	Terner et al., 2007 Moscardelli et al., 2006 2009, 2010	
	18	Montagne Pelée (Martinique)	X	X			Faible	2	Mai	1502	V	n.p.	n.c.	Fort	n.c.	Pararas-Carayannis, 2004 Zahbo et Palinosky, 2001 Polsson et Pederos, 2010 Le Friant et al., 2003
	19	Soufrière Hills (Montserrat)	X	X			Faible	3	Dec.	1697	V	n.p.	0.04 - 0.06 km ³	Fort	n.c.	Heinrich et al., 2001 Pelinovsky et al., 2004 Pararas-Carayannis, 2005 Bouillon et al., 2007
Source locale par rapport à l'arc des Petites Antilles	20	Kick'em Jenny	X	X			Faible	2	Juil.	1839	V	n.p.	n.c.	Fort	n.c.	Pararas-Carayannis, 2006 Lindsay et al., 2005
	21	La Soufrière (St. Vincent)	X	X			Faible	1	Mai	1502	V	n.p.	n.c.	Fort	n.c.	Pararas-Carayannis, 2007
	22	Faille intra plaque d'arrière arc des Petites Antilles	X				Faible	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.p.	Fort	n.c.	ten Brink et al., 2011 Gutsche et al., 2013	
	23	Fosse de Muertos	X				Modéré	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.p.	Fort	n.c.	ten Brink et al., 2011 ten Brink et al., 2009 McCann, 2006	
	24	Complexes de la fosse des Caïmans	X				Faible	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.p.	Faible	n.c.	Terner et al., 2007 McCann, 2006	

S : Séisme
V : Volcanisme
GdT : Glissement de terrain
GdT Co. : Glissement de terrain co-sismique
n.c. : non connu
n.p. : non pertinent

1.2. Confrontation des catalogues historiques de tsunamis (Caraïbe)

1.2.1. Intérêts des catalogues historiques

1.2.1.1. Les premiers catalogues dédiés à l'aléa tsunami

La connaissance des événements historiques est indispensable à l'évaluation des risques présents et futurs. Il s'agit d'une étape préliminaire fondamentale, notamment pour estimer des périodes de retour, modéliser le phénomène ou encore déterminer des degrés d'exposition (Leone *et al.*, 2010). Leur compilation prend généralement la forme de catalogues (numériques) qui répertorient chacun des événements passés connus pour un aléa donné. Il s'agit de séries statistiques renseignées selon des paramètres quantitatifs et qualitatifs (intensité, magnitude, localisation, impact) sur des phénomènes survenus au cours de la plus longue période d'activité possible.

Les premiers catalogues dédiés à l'aléa tsunami ont été publiés au milieu du 20^{ème} siècle par des chercheurs japonais. L'un des plus anciens est celui d'Imamura édité en 1942 (Imamura, 1942). Auparavant, les tsunamis étaient englobés dans les catalogues recensant les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, ou encore les catastrophes naturelles diverses, et généralement décrits comme un phénomène secondaire (Tinti et Maramai, 1996). Ces catalogues intègrent désormais des paramètres généraux communs (nombre de décès, montant des dommages), des paramètres sur l'élément déclencheur (source, intensité), des paramètres spécifiques au phénomène (hauteur de *run-up*, distance de pénétration dans les terres, intensité, magnitude) et renseignent également sur le niveau de fiabilité du témoignage. Ils permettent de définir des sources probables pour la modélisation des tsunamis dans chacun des bassins exposés. Les principaux paramètres déclencheurs référencés dans les catalogues sont alors enrichis par une connaissance précise et actualisée de la géologie et de la géophysique de la source génératrice. Les témoignages historiques des effets à la côte sont indispensables pour contraindre les paramètres de modélisation et corroborer ou non les résultats des modèles (Roger, 2011 ; Omira *et al.*, 2012).

1.2.1.2. Construction des catalogues historiques

Les catalogues sont classés en fonction de l'échelle géographique de couverture des données : nationaux pour les événements ayant impacté un Etat, régionaux pour les événements se déroulant dans un même bassin océanique ou une même unité hydrographique, et mondiaux. Généralement, les catalogues des deux premiers niveaux se complètent entre eux, compte tenu de la dimension spatiale d'un tsunami. Ce sont leurs données qui alimentent les catalogues à couverture mondiale. Aujourd'hui, chaque bassin océanique soumis à l'aléa tsunami est couvert par de nombreux catalogues régionaux et nationaux : italien (Tinti *et al.*, 2004), français (Lambert et Terrier, 2011), européen (Tinti *et al.*, 2001), méditerranéen (Maramai *et al.*, 2014), caribéen (O'loughlin et Lander, 2003), océan Indien (Rastogi et Jaiswal, 2006), océan Pacifique (Iida *et al.*, 1967). Ces inventaires se sont développés au fur et à mesure des besoins en termes de connaissances et de modélisation de l'aléa, notamment dans le cadre de la mise en place des systèmes d'alerte précoces aux tsunamis. Ces catalogues de tsunamis sont réalisés *quasi* exclusivement par des chercheurs.

Deux bases de données mondiales sont accessibles à la consultation sur Internet. L'une est américaine, l'autre russe. La première, la « *Global Historical Tsunami Database* » est hébergée sur le site de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). La seconde, la « *Historical Tsunami Databases for the World Ocean* (HTDDB/WLD) » est mise en ligne par un laboratoire de recherche russe, le *Navosibirsk Tsunami Laboratory* (NTL). Les premiers événements référencés dans ces deux bases de données sont survenus aux alentours de 1600 av. J.-C (éruption du volcan Théra situé sur l'île de Santorin). Il s'agit des traces les plus anciennes de tsunami. Ces deux bases de données contiennent plus de 2 250 événements historiques. Elles sont consultables selon deux modes d'entrées différents : soit en recherchant la source du phénomène, soit en recherchant les témoignages à la côte. L'une comme l'autre présentent approximativement les mêmes informations. Dans la base de données russe, on note seulement l'absence de valeurs chiffrées concernant l'impact des tsunamis. Un seul code renseigne le degré de gravité des dommages (aucun, faible, moyen, fort). L'intérêt de ces deux catalogues réside notamment dans le fait qu'ils sont mis à jour régulièrement et intègrent donc les derniers événements enregistrés.

La conception de ces catalogues repose exclusivement sur la recherche de témoignages historiques. Ils peuvent être de nature très différente : sédimentaire, orale, manuscrite. Des travaux d'investigation très importants sont menés afin de fiabiliser au maximum l'information. Un grand nombre de catalogues de tsunamis ont été rassemblés par des chercheurs, mais ils ont besoin d'être affinés et mis à jour pour prétendre à un niveau de fiabilité correct (Sahal, 2011). En effet, les rapports de tsunamis sont rares et concernent une minorité d'événements. Par exemple en Méditerranée, les hauteurs de *run-up* sont disponibles seulement pour quelques événements (IOC-UNESCO, 2007). Un important travail de recherche d'informations historiques, de sources primaires (récits, dépôts sédimentaires, marégrammes) ou secondaires (témoignages rapportés) est à poursuivre pour vérifier et étayer les données déjà disponibles (Sahal, 2011), en dépit des difficultés que cela peut présenter. En fonction de la période historique investie par les chercheurs et de la localisation de leurs prospections, il existe plusieurs méthodes pour recueillir les témoignages historiques en matière d'événements tsunamigènes.

1.2.2. Méthodes d'investigation employées pour le recueil des données historiques

1.2.2.1. L'analyse d'archives manuscrites

L'analyse d'archives historiques permet de collecter des témoignages de dommages plus ou moins bien spatialisés et situés dans le temps. Le recueil d'informations historiques est réalisé principalement à partir des archives manuscrites (journaux, correspondances, mémoires, récits de voyageurs, chroniques). Au travers de l'étude de catalogues historiques, Sahal (2011) observe que la récurrence des tsunamis répertoriés augmente largement à partir des années 1840-1850, période à partir de laquelle de nombreux périodiques sont publiés. Il s'agit là d'une source d'information primaire particulièrement importante. Elle peut être complétée par les journaux de bord des capitaineries et des navires, qui s'avèrent être des documents très intéressants pour l'étude des tsunamis. L'interprétation

de ces informations demande un travail consciencieux de lecture, de conceptualisation et de recoupements des témoignages.

Tout d'abord, la multiplicité des termes utilisés pour signifier un tsunami peut entraîner des confusions dans la recherche des événements passés. En japonais, les tsunamis peuvent être nommés « onami », « shikai namisu », « takanami », « takashio », « kaisho ». En anglais on retrouve les termes de « *tidal wave* » ou encore de « *seismic sea wave* » (Cartwright et Nakamura, 2008). Le terme de tsunami n'a été que récemment emprunté au lexique japonais et admis communément à l'échelle internationale. En France par exemple, le terme de raz de marée a longtemps été employé. Pourtant ce terme recouvre également les événements météo-marins tels que les fortes houles, les rissagas ou encore les météo-tsunamis. L'hétérogénéité des vocables employés accroît d'autant plus le risque de confusion (Haslett *et al.*, 2009 ; Ambraseys et Synolakis, 2010 ; Roger, 2011). Dans le bassin de la Caraïbe, plusieurs auteurs établissent une corrélation entre l'augmentation des séismes et le passage des cyclones (O'loughlin et Lander, 2003), ce qui accroît le risque d'amalgame.

L'analyse de sources historiques exige de nombreuses précautions de la part du chercheur. Il doit rester vigilant pour remettre dans son contexte le contenu des documents et ne pas appliquer le filtre d'une lecture contemporaine soumise au prisme culturel « moderne » du chercheur (Chouquer, 2008 in De Richemond, sous presse). Un travail mené en collaboration avec des historiens des risques naturels semble indispensable pour mettre en perspective les éléments chiffrés ou chiffrables avec des informations parfois indirectes « *utiles à l'interprétation des témoignages et des chiffres rapportés* » (De Richemond, sous presse). Pourtant, la majorité des catalogues historiques de tsunamis sont réalisés par des équipes issues de formations scientifique et technique (géosciences) pour qui « *des données chiffrées peuvent facilement être perçues comme relevant d'une objectivité scientifique manifestée par le recours à une forme numérique de l'information* » (*ibid.*). Dans une ré-analyse critique de documents historiques concernant les impacts à la côte du tsunami de 1755 sur une citadelle de la côte marocaine (El Jadida), De Richemond (*ibid.*) met en exergue les risques d'anachronisme dans les études historiques. Ainsi, des valeurs de *run-up* initialement définies à 24 m par des témoignages directs ont été réévaluées à seulement quelques mètres par l'auteur. Au Japon, certains événements pourtant bien documentés demeurent encore sources de discussions, et leur exactitude reste à prouver (Synolakis, 1995). C'est pourquoi plusieurs étapes dans les recherches historiques doivent être respectées (Lambert et Terrier, 2011 ; De Richemond, sous presse) :

- Rechercher les sources primaires de témoignages historiques ;
- Étendre les recherches documentaires aux territoires proches de la source tsunamigène supposée ;
- Traduire les textes et/ou convertir les unités de mesure en fonction des unités en vigueur à l'époque du témoignage et dans la nationalité de l'auteur ;
- Interpréter des hauteurs d'eau par rapport à des repères visuels ou à des niveaux de dommages énoncés dans les témoignages en tenant compte des évolutions paysagères et/ou topographiques;

- Confronter des témoignages sur un même événement pour estimer leur niveau de fiabilité ;
- Rechercher la cause de l'événement ;
- Conserver un esprit critique et faire preuve de précaution dans l'interprétation des indications données ;
- Connaître le contexte historique du témoignage par les sources écrites ou orales.

1.2.2.2. L'analyse de données instrumentales passées

Les enregistrements marégraphiques représentent l'une des sources de données actuelles les plus fiables pour la recherche d'événements tsunamigènes. Le marégraphe mesure les variations du niveau de la mer en un point donné à la côte en fonction d'un référentiel précis. A l'origine, il est destiné à l'étude du phénomène de marée. En France, la première mise au point de cet instrument est attribuée à un ingénieur hydrographe, Chazallon en 1842 (Pouvreau, 2008). Il permet d'obtenir un enregistrement sur papier d'une courbe de marée selon les hauteurs d'eau et le temps, appelé marégramme. Cet outil d'automatisation des observations sera déployé pendant la fin du 19^{ème} siècle à travers le monde, principalement dans l'hémisphère nord (Letetrel, 2010). Les Marégraphes Côtiers Mécaniques (MCM) seront remplacés à partir des années quatre-vingt par des Marégraphes Côtiers Numériques (MCN). Depuis l'arrivée du format numérique, la qualité des données récoltées a considérablement augmenté (Pouvreau, 2008) et les données sont parfois consultables en ligne¹⁴.

La recherche de témoignages de tsunamis à partir des marégrammes papier s'avère délicate. Il n'y a pas forcément de centralisation entre les pays et ils ne sont pas toujours numérisés, donc pas consultables à distance. Enfin, si des valeurs d'amplitudes anormales sont repérées, elles doivent être ajustées en fonction des conditions de l'époque (atmosphérique, nivellement, emplacement, etc.). Aujourd'hui, il est possible de compter sur des réseaux de marégraphes dont les données sont consultables en temps *quasi-réel* ou stockées sur des serveurs. Depuis 2003, des capteurs de pression placés au large des côtes ou en pleine mer, appelés tsunamimètres ont été ajoutés à ce réseau de marégraphes. Ces capteurs permettent également de compiler des événements de très faible amplitude, notamment.

1.2.2.3. La recherche de dépôts sédimentaires de paléo-tsunamis

Les sources d'informations que nous venons de détailler offrent des témoignages de tsunamis plus ou moins fiables, sur une période de 400 à 500 ans environ. Elles n'ouvrent qu'une étroite fenêtre sur les événements historiques passés car seuls quelques rares écrits permettent de remonter au-delà de cette période. Du fait de leur manque de fiabilité, les sources d'informations historiques ne permettent pas de restituer la réalité géologique de la région. Ainsi, le potentiel tsunamigène d'une

¹⁴ Exemple en France des données marégraphiques du Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL) disponibles à l'adresse suivante : <http://www.sonel.org/-Maregraphes-.html>, et à l'échelle mondiale des données collectées par l'IOC-UNESCO auprès de 151 organismes et disponible à l'adresse suivante : <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/map.php>

source et/ou le risque de récurrence d'événements majeurs sont fréquemment sous-estimés (Scheffers et Kelletat, 2003).

A l'approche des côtes, et en fonction de son intensité locale, l'onde de tsunami se charge et transporte une plus ou moins grande quantité de matériaux solides. Au cours de la submersion, puis du retrait des vagues, ces sédiments sont déposés à terre. En fonction de la topographie du terrain et du type d'occupation du sol contemporain à l'événement, ces sédiments peuvent se retrouver piégés. Les dépôts ainsi formés représentent des marqueurs sédimentaires qui une fois analysés et datés, alimentent les connaissances historiques sur l'aléa. Les scientifiques recherchent deux formes de dépôts. Soit des dépôts fins de type sableux qui peuvent être retrouvés jusqu'à plusieurs kilomètres du trait de côte ; soit des dépôts grossiers comme des éléments arrachés au plancher océanique ou des fractions de barrière de coraux qui peuvent atteindre plusieurs tonnes. L'une des principales difficultés dans ce procédé est d'interpréter ces dépôts, de les dater et de les attribuer ou non à un tsunami (Scheffers et Kelletat, 2003 ; Morton *et al.*, 2007). C'est particulièrement vrai pour la Caraïbe qui est soumise à l'aléa cyclonique et dont la force de submersion peut également générer des dépôts importants (Spiske et Halley, 2014). Plusieurs prospections de paléo-dépôts de tsunamis sur les îles des Antilles (Hearty, 1997 ; Moya, 1999 ; Scheffers, 2002 ; Scheffers *et al.*, 2005 ; Scheffers et Kelletat, 2006 ; Atwater *et al.*, 2012 ; Reinhardt *et al.*, 2012 ; Spiske et Halley, 2014) et au Venezuela (Scheffers *et al.*, 2005) ont mis en évidence des tsunamis majeurs au cours du quaternaire dont les amplitudes auraient largement dépassé les 10 m.

1.2.2.4. Les rapports et autres retours d'expériences

La sophistication des moyens de détection et le déploiement de l'instrumentation à l'échelle mondiale permettent aujourd'hui de mesurer les tsunamis sur l'ensemble des côtes habitées. Suite aux événements de 2004 (Indonésie) puis de 2011 (Japon), l'intérêt pour ce domaine s'est développé. Des diagnostics de terrain et/ou des retours d'expériences ont été effectués par la communauté scientifique après chaque événement significatif ou catastrophe. Ces diagnostics sont généralement réalisés très rapidement après l'événement à partir d'imageries satellites puis à terre, au moyen de retours d'expérience indispensables pour déterminer les interactions entre l'intensité du tsunami et les paramètres géomorphologiques à l'approche des côtes (Leone *et al.*, 2011). Les études de terrain permettent de décrire la chronologie de l'événement, puis d'en mesurer les paramètres physiques. L'étude pluridisciplinaire « Tsunarisque » menée après 2005 en Indonésie, est un exemple de complémentarité entre deux approches, l'une de type RETEX et l'autre de modélisation (Lavigne et Paris, 2011). On constate ainsi une forte corrélation entre les disciplines de modélisation et les recherches historiques. Les sources historiques sont discutées par les scientifiques. Certains d'entre eux contribuent à la rédaction de catalogues régionaux ou locaux comme dans la Caraïbe (Roger *et al.*, 2011; Harbitz *et al.*, 2012), sur la côte atlantique (Omira *et al.*, 2010) ou encore en Méditerranée (Yalçiner *et al.*, 2004 ; Salamon *et al.*, 2007 ; Sahal *et al.*, 2009). On note également que les investigations post-crise sur le terrain sont de plus en plus détaillées et souvent menées par des équipes pluridisciplinaires. Elles permettent ainsi une meilleure comparaison avec les résultats de modélisations, comme pour le tsunami de 2004 en Indonésie (Hébert *et al.*, 2011) ou celui du Japon en 2011 (Hayashi et Koshimura, 2013). Ainsi, des méthodes novatrices sont mises en place pour

déterminer avec précision la direction des flux d'inondation par l'étude de l'orientation au sol des débris (Grancher, 2011), la zone de déferlement avec l'étude des dommages sur le bâti (Leone *et al.*, 2011b), les vitesses d'écoulement par l'analyse de vidéos amateurs géolocalisées (Fritz *et al.*, 2006 ; Fritz *et al.*, 2012) ou bien encore l'observation de dépôts sédimentaires. Ces informations sont indispensables pour calibrer les codes de simulation nécessaires à la modélisation des tsunamis (Hébert *et al.*, 2011) et faire progresser leur fiabilité en confrontant leurs résultats avec les observations de terrain.

La constitution des catalogues est facilitée par l'instrumentation scientifique déployée dès la fin du 19^{ème} siècle. Elle permet leurs mises en réseau à l'échelle régionale voire mondiale (à la fin du 20^{ème} siècle) et un accès aux données à distance et en temps réel (au début du 21^{ème} siècle). Le progrès constant de la fiabilité des appareils de mesure (précision, transmission des données, alimentation énergétique) permet de limiter les problèmes d'interprétation (Roger, 2011). C'est ainsi que petit à petit, les catalogues relatifs aux tsunamis se sont standardisés.

1.2.3. Confrontation des catalogues historiques pour la Caraïbe

1.2.3.1. Présentation des catalogues employés

Au fil de nos lectures et discussions sur le risque tsunami dans la Caraïbe, nous avons pu constater une forte variation de certains chiffres clés avancés, comme le nombre d'événements et de victimes. La plupart des auteurs citent des informations contenues dans les catalogues historiques mondiaux et obtiennent des résultats hétérogènes en fonction des requêtes effectuées et du catalogue employé. Selon von Hillebrandt-Andrade (2013), présidente de l'ICG/CARIBE-EWS, 75 tsunamis auraient provoqué la mort de 4 484 personnes au cours de ces 500 dernières années. Il s'agit en effet des valeurs données par le catalogue de la NGDC pour les événements dont le code de validité est supérieur à un. Il s'agit des valeurs les plus couramment citées, que l'on retrouve notamment dans l'ensemble des documents rédigés par l'ICG/CARIBE-EWS ainsi que dans certains articles scientifiques (McNamara *et al.*, 2015). Nous avons confronté les informations contenues au sein de catalogues de tsunamis disponibles sur la Grande Caraïbe pour mettre en exergue les incertitudes sur les connaissances historiques de ce phénomène et de proposer de nouvelles valeurs de référence. Pour ce faire, l'ensemble des événements de cinq catalogues qui couvrent la région de la Grande Caraïbe a été compilé dans un tableau. Il s'agit de catalogues mondiaux, l'un américain, de la NGDC et l'autre russe, de HDTB/WLD, disponibles au téléchargement sur Internet. Nous avons également consulté trois autres catalogues régionaux, celui de Lander *et al.* (2002), O 'Loughlin et Lander (2003) et Harbitz *et al.* (2012). Nous avons retenu le maximum d'informations communes à chacun d'entre eux :

- la date (année/mois/jour) de l'événement à l'origine du tsunami ;
- la cause géologique principale à l'origine du tsunami ;
- les coordonnées géographiques de la source ;
- la magnitude du séisme lorsqu'il s'agit d'un événement d'origine sismique ;

- le code de validité de l'événement ;
- la hauteur de *run-up* ;
- le nombre de victimes.

Concernant ces trois derniers éléments de comparaison disponibles, une mise en garde particulière s'impose. Le code de validité nous informe sur la crédibilité d'occurrence du phénomène au regard de la fiabilité des témoignages historiques (authenticité, sources, interprétation). Il tient compte du nombre de témoignages pour un même événement, leur recoupement et leur concordance avec d'éventuelles mesures sismiques ou marégraphiques. Ce code est essentiel notamment pour caractériser la fiabilité des tsunamis de la période pré-instrumentale. Néanmoins, il n'est pas harmonisé à l'échelle internationale et des variations dans l'interprétation des différentes classes sont susceptibles d'entraîner une codification différente pour un même événement. D'une manière générale, les auteurs considèrent les tsunamis répertoriés dans les classes de validité inférieures ou égales à deux comme peu probables, et les événements au code de validité supérieur ou égal à trois comme très probables. Par ailleurs, la plupart des catalogues historiques de tsunamis intègrent les témoignages de valeurs de *run-up*. Pourtant, les valeurs retrouvées dans les textes d'origine ne s'accordent pas forcément avec la définition du terme de *run-up* mais sont employées comme tel. En effet, O'Loughlin *et al.* (2003) constatent qu'il est parfois très difficile de distinguer au sein des témoignages historiques les données qui correspondent à la hauteur de vagues, de celles relatives à l'amplitude, voire même parfois à la distance de pénétration dans les terres. Les valeurs reportées dans les catalogues telles qu'elles sont mentionnées dans les documents de source primaire ne sont donc pas toujours fiables puisqu'elles ne sont pas explicitées au regard de la définition de « *run-up* ». Enfin, le nombre de victimes directement liées à l'aléa tsunami est également un élément sujet à controverse O'Loughlin *et al.* (2003). Dans la Caraïbe, on constate une grande proximité entre les sources tsunamigènes et les territoires exposés. Néanmoins dans ces catalogues on ne distingue pas le nombre de morts causés par les séismes de ceux causés par les tsunamis. De plus les décès parmi les esclaves, les indigènes et les serviteurs ne figurent pas non plus dans les relevés (O'loughlin et Lander, 2003).

1.2.3.2. Confrontation des catalogues caribéens, leurs enseignements

La base de données qui comporte le plus d'événements est celle d'O'loughlin et Lander (2003), avec 121 entrées, puis celle de la HDTB, avec 119 entrées. Les catalogues régionaux de Lander (2002) et Harbitz *et al.* (2012) compilent un nombre plus limité d'événements avec respectivement 84 et 85 entrées (tableau 2). Tous catalogues et tous niveaux de validité confondus, nous avons recensé un total de 171 événements ayant pu provoquer un tsunami ressenti sur les côtes de la Caraïbe. 15 d'entre eux auraient occasionné la mort de 16 408 personnes selon le maximum de chaque catalogue.

Tableau 2 : Chiffres clés extraits de la compilation des catalogues historiques de la Caraïbe

	NGDC	HDTB	Lander (2002)	Harbitz <i>et al.</i> (2012)	O'loughlin et Lander (2003)
Nombre d'événements	105	119	84	85	121
Événement le plus ancien	1498	1498	1498	1498	1498
Événement le plus récent	2010	2010	1997	2006	1997
Nombre d'événements meurtriers	8	N.C.	8	14	9
Nombre total maximal de victimes	2 564	N.C.	9 172	15 843	9 665
Événement le plus meurtrier	1692 (2 000 pers.)	N.C.	1842 (5 000 pers.)	1843 (5 000 pers.)	1842 (5 000 pers.)
Nombre d'événements renseignés par au moins une valeur de <i>run-up</i>	44	35	21	39	29
Nombre d'événements dont le code de validité est supérieur ou égal à 4	37	37	8	35	53
Nombre d'événements dont le code de validité est supérieur ou égal à 3	17	31	27	21	8

- Un bilan humain très variable

Il apparaît que les chiffres relatifs aux pertes humaines sont très hétérogènes suivant les catalogues. Ils varient du simple au triple, soit 4 436 décès (NGDC) ou 15 843 (Harbitz *et al.*, 2012). En effet, Harbitz *et al.* (2012) comptabilisent un nombre d'événements bien plus élevé ayant provoqué des décès. L'auteur dénombre 5 000 morts pour l'événement du 8 février 1843, 500 morts pour celui du 31 janvier 1906 et 1 000 morts pour l'événement du 14 janvier 1907. Ces mêmes événements figurent dans les autres catalogues, mais aucun décès n'y est associé. En réalité, les valeurs fournies par Harbitz *et al.* (2012) sont imputables aux séismes et non aux tsunamis. Lander (2002) quant à lui, attribue 500 morts pour un séisme dont l'épicentre est localisé dans l'océan Pacifique (30/01/1906). L'événement le plus meurtrier dont les effets sont uniquement liés à un tsunami s'avère être celui du 4 août 1946 à Samana en République Dominicaine avec 1 790 morts. Cette valeur est partagée par tous les catalogues.

- Des sources génératrices bien définies

Dans les différents catalogues, la nature de la source des événements est assez bien identifiée. Pour quelques cas de tsunamis, la cause demeure inconnue pour seulement trois d'entre eux et n'est donc pas renseignée. Après examen, les tsunamis d'origine sismique apparaissent largement majoritaires puisqu'ils représentent 87 % des événements, tous types de catalogues confondus. Les tsunamis d'origine volcanique et leurs aléas associés constituent seulement 8 % des entrées. Les tsunamis d'origine gravitaire déclenchés ou non par un séisme représentent la plus faible proportion de sources de tsunami avec seulement 2 % (figure 9).

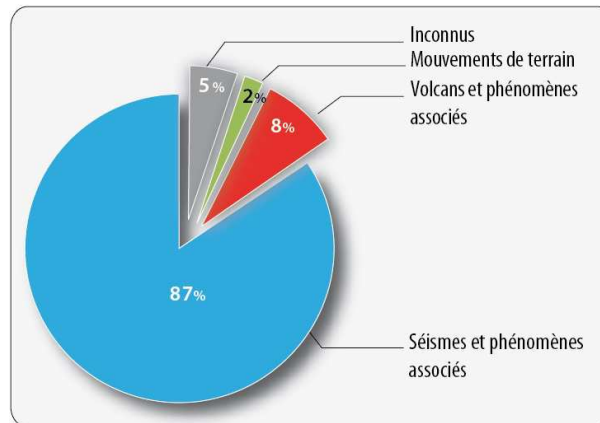
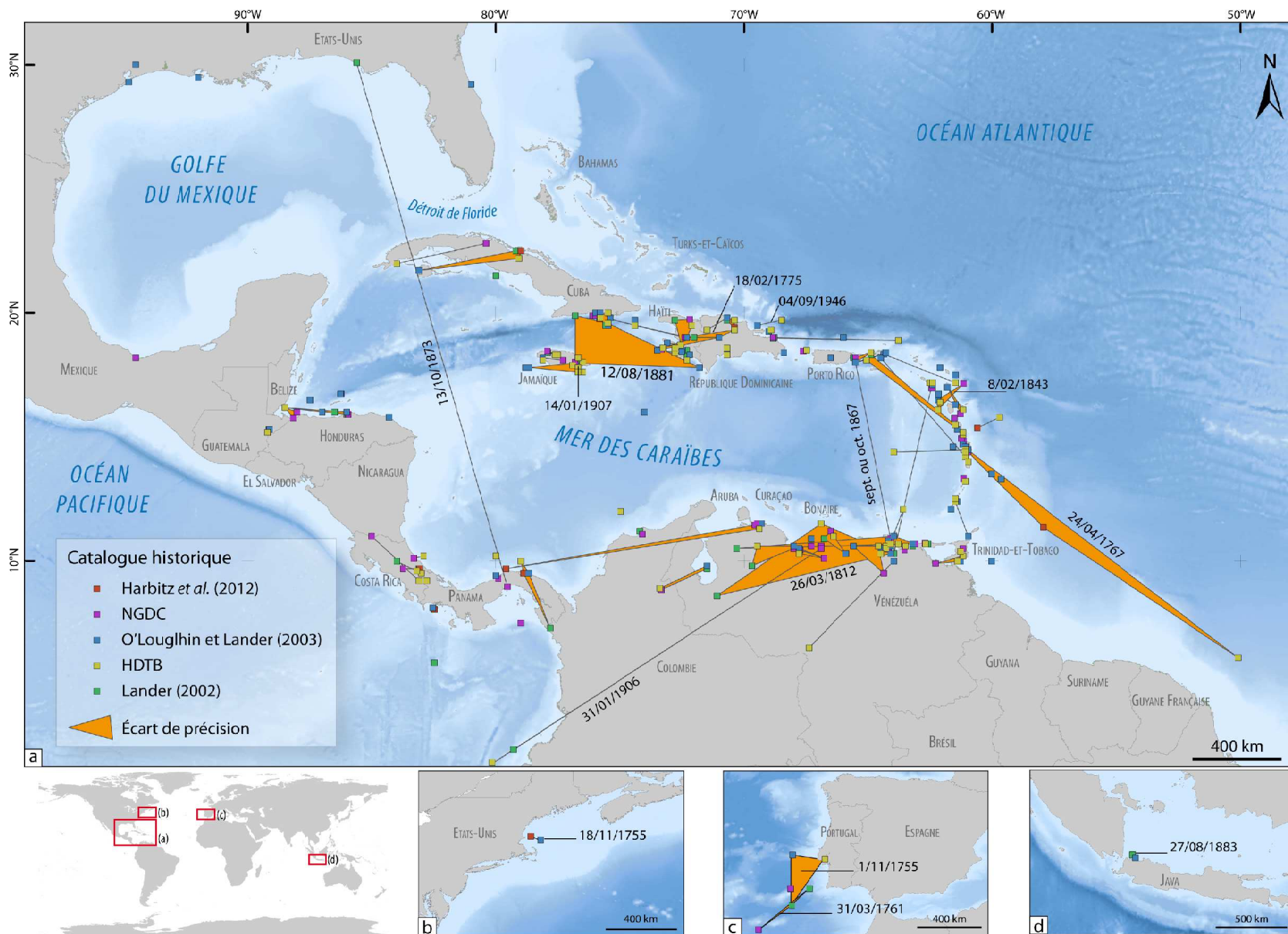


Figure 9 : Sources des tsunamis historiques répertoriées depuis 1498 ayant impacté la Caraïbe

- Des localisations parfois approximatives

A travers ces cinq catalogues, 499 sources tsunamigènes sont renseignées par des coordonnées géographiques et seulement 8 événements ne sont pas localisables. La représentation cartographique des informations de localisation contenues dans les différents catalogues révèle de nombreuses imprécisions, voire des incohérences quant à la position de la source des tsunamis. Nous représentons cette incertitude sous la forme d'un polygone de couleur orange dont les extrémités relient les événements d'une même date et contenus dans au moins deux catalogues (figure 10). La longueur de leur périmètre offre alors le moyen de quantifier cette incertitude. On remarque aisément que la position de certaines sources tsunamigènes peut varier de plusieurs centaines voire milliers de kilomètres. Avant tout, ce travail cartographique met en exergue des erreurs d'intégration des données dans les catalogues, liées principalement à des erreurs de retranscription ou d'inattention des auteurs. L'événement de 13 octobre 1873 en est un exemple. Il laisse nettement apparaître une grande marge d'incertitude qui se traduit par un écart de localisation de 5 208 km entre les catalogues de la NGDC et de Lander. C'est probablement la conséquence d'erreurs faites par Lander lors de l'intégration des données dans le catalogue. En effet, à l'intérieur même du texte descriptif de l'événement, l'auteur évoque un séisme ressenti dans la ville de Panama, ce qui de toute évidence ne correspond pas à la localisation donnée. Plusieurs autres erreurs de ce type ont été constatées comme pour l'événement du 18 février 1775 dans l'ouvrage de O'loughlin et Lander (2003) (70°O au lieu de 70°E), ou encore pour l'événement de 1868 dans le catalogue de Lander (2002) (18°N au lieu de 10°N). Une autre erreur a été remarquée pour un événement qui aurait eu lieu en septembre ou octobre 1867. D'après le catalogue de Lander (2002), la localisation de la source est située à proximité des îles Vierges, tandis que l'USGS la détermine *a priori* à l'endroit de l'observation du phénomène, soit à proximité de l'île de Margarita. En réalité, cet événement semble plutôt correspondre avec le passage d'un cyclone ou alors correspondrait à des témoignages du tsunami avéré du 18 novembre 1867 dans le passage d'Anegada (îles Vierges Américaines). Cette exemple révèle une combinaison d'erreurs qui rend l'information difficilement exploitable : la source du témoignage semble peu fiable, l'événement serait concomitant avec le passage d'un cyclone, et l'un des deux catalogues qui fait référence à ce tsunami potentiel indique comme localisation de la source ce qui semblerait plutôt comme étant la localisation du témoignage de l'impact du tsunami.



Conception : ©Péroche. M. 2015

Figure 10 : Incertitudes spatiales des sources historiques des tsunamis ayant touché les côtes caribéennes dans le bassin de la Grande Caraïbe (a), le long de la côte est des Etats-Unis (b), dans le golfe de Cadiz (c) et en Indonésie (éruption du Krakatoa) (d)

Plusieurs événements dont les sources sont localisées dans le Pacifique posent la question de leur présence dans un catalogue tsunami de la région Caraïbe. Par exemple, l'événement du 31 janvier 1906 où un séisme de forte magnitude $M_s > 8.2$ sur la côte pacifique aurait généré un tsunami local sur la côte nord-ouest du Venezuela d'après les deux catalogues mondiaux de la NGDC et de la HDTB (O'loughlin et Lander, 2003). Cependant et si l'on se fie aux études menées par O'loughlin et Lander, (*ibid.*), il s'agirait d'une confusion avec un autre séisme local. Les événements dont l'origine est située largement à l'intérieur des terres notamment dans l'isthme d'Amérique centrale et les Etats d'Amérique du sud interrogent également la fiabilité de certains témoignages.

Hormis ces erreurs qui peuvent être corrigées, certains polygones sont très étendus et montrent des écarts d'imprécision importants malgré des codes de validité élevée (V3 et V4), des événements ayant entraîné des décès ou encore des événements avec des témoignages d'effets à la côte (tableau 3). Ces événements représentent presque les $\frac{3}{4}$ des 15 valeurs dont les périmètres sont les plus élevés. Ce constat pose alors la question de la fiabilité quant aux secteurs employés comme origine pour la modélisation numérique dans les recherches scientifiques actuelles et des résultats qui en découlent. En effet, les paramètres initiaux de génération d'un tsunami jouent un rôle très important sur les effets à la côte.

Tableau 3 : Synthèse des 15 événements d'origine potentielle tsunamigène dans la Caraïbe présentant des écarts de précision importants

Année	Mois	Jour	Longueur du périmètre du polygone d'incertitude (en km)	Source	Code de validité maximum	Décès associés	Run-up connu associé
1873	10	13	5208	Inconnu	1	Non	Non
1906	1	31	3302	Sismique	4	Oui	Non
1868	8	13	2422	Sismique	4	Non	Oui
1907	1	14	2315	Sismique	4	Oui	Oui
1955	1	18	2310	Sismique	4	Non	Oui
1867	9	Inconnu	1663	Sismique	1	Oui	Non
1812	3	26	1635	Sismique	4	Non	Non
1802	3	19	1622	Sismique	3	Non	Non
1881	8	12	1393	Sismique	4	Non	Oui
1874	3	11	1080	Sismique	4	Non	Non
1767	4	24	993	Sismique	3	Non	Oui
1761	3	31	957	Sismique	4	Non	Oui
1939	8	15	954	Sismique	2	Non	Non
1755	11	1	895	Sismique	4	Non	Oui
1775	2	11	851	Sismique	4	Non	Non

Parmi les 171 événements compilés, 60 d'entre eux sont représentés dans un seul catalogue, ils ne disposent donc pas d'un polygone d'incertitude. On note que 60 autres événements ont un polygone d'incertitude de moins de 100 km de périmètre. Il regroupe l'ensemble des événements dont ceux d'origine non sismique.

La qualité et l'exhaustivité des témoignages historiques pour la constitution des catalogues est primordiale. La période couverte par des archives historiques manuscrites est très réduite dans le bassin de la Caraïbe. Les premiers écrits correspondent à la date de la découverte du Nouveau Monde et l'arrivée des premiers colons. Il semble difficile, voire impossible, sans un travail de recherches des sources primaires des témoignages des tsunamis, de proposer des valeurs de référence partagées par les scientifiques. Leur confrontation met en exergue le manque de fiabilité des sources historiques notamment celles antérieures au 20^{ème} siècle. Finalement, nous observons que tous catalogues confondus plus de 96 événements sont renseignés par un code de validité supérieur ou égal à trois (dont 73 ont un code égal à quatre). Ainsi, plus de la moitié des événements sont jugés comme improbables ou douteux, et les autres comme probables et certains. Le nombre de décès associés à la sélection des événements dont le code de validité est supérieur ou égal à quatre est au minimum de 4 267 morts et au maximum de 16 379 morts.

Il semble évident qu'un travail de recherches historiques complété par des recherches de paléotsunamis devrait être conduit dans le bassin de la Grande Caraïbe. Il permettrait d'améliorer la connaissance scientifique pour conduire à des modèles de simulation crédibles et exhaustifs sur l'ensemble du bassin et ainsi de pouvoir mener des études de risque fiables. L'un des problèmes majeurs rencontrés au cours de cette approche comparative est l'absence d'intégration systématique d'échelle de magnitude et/ou d'intensité de tsunami.

1.2.4. Hétérogénéité des échelles de mesure des tsunamis

1.2.4.1. Des échelles de magnitude à perfectionner

Les échelles de magnitude permettent de définir un aléa au moyen de « *paramètres physiques généralement indépendants et mesurables* » (Leone *et al.*, 2010). Il peut s'agir de paramètres énergétiques, cinématiques ou encore géométriques. Une échelle de magnitude permet de comparer des événements entre eux, de manière formalisée et partagée au plan international. Pour les tsunamis, il existe plusieurs échelles de magnitude principalement basées sur des données de hauteurs de vagues à la côte et l'introduction d'une fonction logarithmique (Papadopoulos et Imamura, 2001).

La première échelle définie comme étant celle de magnitude apparaît dans la littérature japonaise. Elle a été élaborée par Imamura (1942) lors de la construction de l'un des premiers catalogues historiques. En 1963, Lida rajoute un degré à l'échelle de magnitude d'Imamura. Elle compte six degrés, de moins un à quatre. Cette échelle représente la première échelle de magnitude tsunami qui sera reprise au niveau international (Papadopoulos et Imamura, 2001). La magnitude notée m est calculée selon l'équation (2), avec H_{max} (en m) qui représente la hauteur maximale de *run-up* observée :

$$m = \log 2 H_{max} \quad (1)$$

La limite principale de cette formule est qu'elle se base sur une valeur unique, et qu'elle ne prend pas en compte l'extension spatiale du tsunami (Gusiakov, 2009). Soloviev (1970) a développé une autre

version en introduisant la hauteur moyenne H des vagues le long des côtes les plus proches de l'événement (Soloviev-Imamura). Improprement définie par l'auteur comme une mesure d'intensité du tsunami, Soloviev propose alors « l'intensité » notée i_s , selon l'équation (2) avec H (en m) qui représente la hauteur moyenne des vagues de tsunami observée le long des côtes impactés :

$$i_s = \log 2 \sqrt{2}(H) \quad (2)$$

L'échelle d'Imamura-Lida qui restera la plus utilisée pour caractériser un tsunami a été plusieurs fois modifiée, notamment au fil du développement des mesures instrumentales des événements (marégraphes) (Abe, 1979 ; Wanatabe, 1983). Il en existe d'autres plus spécifiques pour des tsunamis en champ lointain (Hatori, 1979). Certaines échelles combinent des données de magnitude avec des observations d'intensité, des hauteurs de vagues ou des niveaux de dommages constatés (Shuto, 1993).

L'ensemble de ces échelles présente une faiblesse commune : elles se basent toutes sur des hauteurs de vagues mesurées à la côte. Or, cette valeur est particulièrement sensible aux effets locaux, ce qui pose un vrai problème de standardisation de l'information. Une solution serait d'utiliser des valeurs instrumentales sur le champ de propagation du tsunami (Yalçiner *et al.*, 2003), faut-il encore que le parcours de l'onde de tsunami passe sur de tels instruments.

1.2.4.2. Vers une échelle d'intensité standardisée

La première échelle d'intensité de tsunami a été proposée par Sieberg en 1923 (Sieberg et Gutenberg, 1923). Elle se compose de six classes définies au moyen des effets macroscopiques à la côte dus à l'action du tsunami, à la manière des échelles d'intensité sismique de type MS4. Plus tard, (Ambraseys, 1962) a publié une nouvelle échelle d'intensité tsunami modifiée d'après le modèle de Sieberg, appelée « Sieberg-Ambraseys ». Le nombre de classes est resté inchangé mais son faible nombre ainsi que le manque de description des dommages occasionnés par le tsunami constituent une limite importante pour ces deux échelles. Elles ne permettent pas de caractériser les phénomènes à l'échelle mondiale, et ne répondent donc pas à leur fonction première : harmoniser et comparer les événements tsunamigènes au sein de catalogues internationaux standardisés. Il s'agissait pourtant d'une volonté de la Commission sismologique européenne dans les années soixante de laisser une plus grande latitude de jugement aux enquêteurs sur le terrain (Ambraseys et Synolakis, 2010).

En 2001, Papadopoulos et Imamura proposent une échelle d'intensité détaillée à 12 degrés, largement renseignée de critères macroscopiques (Papadopoulos et Imamura, 2001). Elle est volontairement inspirée des échelles sismiques éprouvées EMS 92 et EMS 98 et se fonde sur l'étude des catastrophes qui se sont déroulées sur le pourtour de l'océan Pacifique. Cette échelle d'intensité ne tient compte d'aucun paramètre physique de l'aléa et permet même de renseigner les événements aux conséquences les plus faibles. Pourtant, certains scientifiques à la vision très ingénieuriste réfutent l'idée de pouvoir caractériser l'intensité de la magnitude d'un tsunami par des relevés de terrain à une échelle régionale, ou à celle d'un bassin océanique (Ambraseys et Synolakis, 2010).

Dans le cadre d'un retour d'expérience mené sur le tsunami de décembre 2004 en Indonésie, Leone *et al.*, (2011b) ont proposé une échelle de magnitude basée sur la reconnaissance de dommages macroscopiques sur le bâti. Ce type d'approche pourtant relativement courant suite à des séismes a constitué une première en ce qui concerne les tsunamis. Un diagnostic visuel systématique des bâtis a été mené dans une zone d'étude couvrant la partie nord-ouest de l'agglomération de Banda Aceh au nord de Sumatra (Indonésie). Il s'agissait d'un secteur de 7 km² représentatif de la diversité du bâti et des modalités d'endommagement. Ce diagnostic visuel a permis de comprendre les modalités d'endommagement propres aux tsunamis. Le protocole d'analyse faisait appel à la mise en place d'une typologie simplifiée du bâti et d'une typologie des modes et des niveaux d'endommagement du bâti, observables sur le terrain. Il a abouti à la réalisation d'une échelle d'intensité «macro-tsunami». Plus récemment, suite au tsunami du Japon en mars 2011, Lekkas *et al.*, (2013) ont poursuivi les efforts de Papadopoulos et Imamura (2001) en intégrant de manière plus affirmée des descriptions de dommages corporels et des dégradations sur les objets mobiles, les infrastructures, l'environnement ou encore le bâti. La classification en 12 classes reste conforme à l'échelle EMS 92 et 98, elle est largement employée à travers le monde.

1.3. Modélisation de l'aléa tsunami et des scénarios de référence en Martinique

1.3.1. Modélisation numérique des tsunamis, principes généraux

1.3.1.1. Perspectives opérationnelles

Depuis les années quatre-vingt, les avancées scientifiques et techniques en modélisation numérique des tsunamis ont permis de mieux comprendre le phénomène et ses processus d'interaction entre les milieux telluriques et océaniques (Bardet *et al.*, 2003 ; Lavigne et Paris, 2011). Ces progrès ont été possibles grâce à l'augmentation des capacités de calculs, à l'évolution des codages informatiques et à une plus grande qualité et disponibilité des données physiques de bathymétrie et de mesures des tsunamis (marégraphe, DART). Il s'agit ici d'un enjeu important. Contrairement à d'autres aléas naturels comme les inondations ou les mouvements de terrain, on ne dispose pas assez de modèles empiriques. La faible récurrence, le manque de témoignages historiques ou géologiques du phénomène engendre une méconnaissance de l'aléa tsunami sur certains littoraux. Les techniques de modélisation comblent ces lacunes et fournissent des données quantitatives utiles à l'évaluation du risque (Hébert *et al.*, 2011). Le recours à la modélisation numérique des tsunamis est donc indispensable pour estimer l'impact d'un événement donné sur les côtes. Ces techniques sont de plusieurs types : analogique, numérique statique et numérique dynamique (Roger, 2011). La dernière est la plus employée pour le zonage de l'aléa. Elle permet de simuler en deux ou trois dimensions le phénomène au moyen d'équations complexes hydrodynamiques et mécaniques (Allgeyer, 2012). Les données des modèles relatives aux milieux sont des données d'altitude (bathymétrie et topographie). Elles sont généralement intégrées au modèle sous la forme de grilles imbriquées dont la résolution augmente à l'approche des côtes (densité de maillage variable).

Chaque modèle permet de calculer des temps de parcours de l'onde de tsunami (Tsunami Travel Time ou TTT), les surélévations du niveau marin ainsi que les champs de vitesse sur toute la durée du phénomène (Allgeyer, 2012). La plupart d'entre eux intègrent la modélisation de l'inondation voire pour certains le déferlement. La résolution spatiale des résultats dépend des ressources informatiques disponibles et de la qualité des données géographiques en entrée. La phase de validation des modèles est primordiale. Parfois, les résultats des modèles numériques sont confrontés à des expériences en laboratoire (modélisation analogique) pour valider ou améliorer des codes de simulation. Plus rarement, les résultats sont confrontés à des données de tsunamis historiques ou à des retours d'expérience pour les événements plus récents (Roger, 2011). Les TTT sont confrontés à la chronologie de l'arrivée des vagues. La polarité de l'arrivée du train d'ondes, du retrait (polarité négative) ou de la submersion (polarité positive) est également discutée. Elle permet une première évaluation des conditions initiales du modèle (Roger, 2011). Enfin, les hauteurs d'eau sont comparées avec celles recueillies dans les témoignages et les *run-up* relevés sur le terrain ou bien encore avec les mesures des marégraphes ou des tsunamimètres.

La modélisation des tsunamis requiert plusieurs lois mathématiques pour chacune des trois phases du phénomène (génération, propagation, submersion), ce qui en constitue la difficulté majeure. En effet, il n'existe pas de codes de calculs globaux pour décrire ces trois phases sans approximation mathématique simplifiant les calculs (Dias, 2011). Ainsi, plusieurs théories sont appliquées pour la mise en équation du modèle comme celles de Saint-Venant, Boussinesq, Korteweg et de Vries, Navier-Stokes Euler, Bernoulli et D'Alembert (Roger, 2011 ; Allgeyer, 2012 ; Arcas et Segur, 2012). Roger (2011) distingue six principales méthodes de modélisation numérique dynamique, les deux les plus usitées sont les modèles des différences et des éléments finis. Chaque modèle est lui-même subdivisé en plusieurs types en fonction des approximations introduites. Nous détaillerons ici les principales limites de chacune des phases.

- La simulation de la génération du tsunami est particulièrement complexe. C'est la phase la moins étudiée par les scientifiques et pourtant c'est celle qui détermine en grande partie les résultats de la modélisation (Dutykh et Dias, 2009). Il s'agit d'intégrer aux modèles les paramètres physiques de l'élément déclencheur et donc de mêler des notions de mécanique des solides, de sismologie et de mécanique des fluides. Ainsi, certains codes sont simplifiés à l'extrême, utilisant la génération passive dans laquelle les aspects dynamiques de la rupture du plancher sont absents. D'autres, au contraire, intègrent la génération dynamique où les ondes de tsunamis sont générées par un mouvement de fond (Dutykh, 2007).
- La simulation de la propagation des tsunamis au large est sans aucun doute l'aspect le mieux maîtrisé par les modélisateurs. Il s'agit d'un processus hydrodynamique bien intégré aux modèles. La majorité d'entre eux associent l'hypothèse des ondes longues en eau peu profonde à un comportement linéaire de la propagation. L'avantage de cette méthode est de minimiser les temps de calculs.
- La simulation de l'inondation voire du déferlement et des *run-up* constitue la seconde phase la plus difficile à modéliser. A l'approche des côtes, les ondes de tsunamis sont modifiées par la bathymétrie locale et la morphologie côtière. Pour ce domaine précis, il est difficile de prendre

en compte l'interaction entre les séries de vagues, les effets de réflexion sur la côte et les effets de résonance. A terre, tenir compte du phénomène de dissipation d'énergie qui varie en fonction du niveau de rugosité du sol (irrégularités topographiques, bâtiments, couvert végétal, surfaces en eau) est source de difficultés. Plusieurs modèles de simulation intègrent la formule de Manning et ses coefficients de rugosité dérivés.

1.3.1.2. Exemples de modèles de simulation numérique les plus connus

Parmi la communauté scientifique internationale, différents modèles de simulation numérique de tsunamis sont employés. La plupart d'entre eux intègrent des équations d'ondes longues (*shallow water equations*) selon les méthodes aux différences finies (Arcas et Segur, 2012). Ces calculs restituent de manière correcte la propagation du tsunami en haute mer. Par contre, la fiabilité des résultats s'avère décevante à l'approche des côtes, là où la bathymétrie joue un rôle prépondérant dans l'amplitude. Tous les modèles n'intègrent pas non plus des modules capables de modéliser l'inondation à terre. L'outil de modélisation le plus employé mondialement dans le domaine scientifique a été développé par V. Titov (Pacific Marine Environmental Laboratory) et C. Synolakis (University of Southern California)¹⁵ : il s'agit du modèle MOST (Method Of Splitting Tsunami) (Titov et Gonzalez, 1997). Il est constitué d'un ensemble de codes de calcul qui permettent de simuler la génération, la propagation et l'inondation du tsunami. Ce modèle a pour vocation d'être employé à des fins de prévisions en temps réel, à partir de bases de données de scénarios pré-calculés. Il permet également de conduire des études de simulations de scénarios pour la cartographie de l'enveloppe de submersion (inondation) à terre. Son emploi sur de nombreux territoires américains, et la conception d'un programme nommé ComMIT, qui offre aux utilisateurs non initiés la possibilité de modéliser des tsunamis à l'aide de scénarios pré-calculés MOST, ont beaucoup contribué à sa large diffusion. Il existe plusieurs autres modèles employés à travers le monde pour la modélisation des tsunamis. On peut citer notamment le modèle Tsunami-N2 développé par l'université de Tohoku (Japon) nommé MIKE21 Flow Model FM (Gayer *et al.*, 2010), le modèle ComCOT (Philip *et al.*, 1998) et ses différentes versions (Omira *et al.*, 2010). En France, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) utilise le modèle GEOWAVE (code FUNWAVE) et le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives (CEA) a développé son propre code de modélisation. Ce dernier modèle de simulation numérique a été employé pour définir l'exposition des îles de la Polynésie française en fonction de plusieurs sources situées sur le pourtour du Pacifique (Sladen *et al.*, 2007). Récemment dans la Caraïbe, une version du code du modèle du CEA a été utilisé par l'équipe d'accueil LARGE (Université des Antilles) dans le cadre du programme de recherche Tsunahoule.

Il existe une littérature scientifique assez riche sur les comparaisons de modèles et sur le choix des lois et des équations employées (Roger, 2011 ; Allgeyer, 2012), mais aussi sur l'étude critique des résultats des modèles par rapport à des événements connus (Borrero *et al.*, 2009). Cependant, une importante lacune subsiste encore, il s'agit de la modélisation des mouvements de terrain. En effet, les mécanismes de génération du tsunami sont nombreux et nécessitent la mobilisation d'experts de plusieurs

¹⁵ <http://nctr.pmel.noaa.gov/model.html>

domaines scientifiques (Bardet *et al.*, 2003). En ce qui concerne les Antilles, seuls d'anciens travaux sur l'édifice volcanique de Montserrat sont disponibles (Heinrich *et al.*, 1998 ; Heinrich *et al.*, 1999)

1.3.1.3. La modélisation probabiliste, une méthode efficace d'évaluation du risque tsunami

L'aléa tsunami peut être évalué selon deux principales méthodes : l'une probabiliste et l'autre déterministe. Cette dernière revient à définir les paramètres physiques de l'événement maximum crédible pouvant survenir, et à le considérer comme le scénario le plus pénalisant. Cette méthode est généralement employée sur la base de connaissances historiques et empiriques d'un événement majeur assumé comme maximisant. On modélise alors ce scénario pour déterminer l'enveloppe d'inondation maximale crédible. L'évaluation probabiliste de l'aléa tsunami repose sur la modélisation de nombreux scénarios connus et/ou extrapolés établis selon plusieurs valeurs de périodes de retour. On évalue ensuite la probabilité que le phénomène atteigne ou dépasse certains seuils et caractéristiques physiques (amplitude à la côte, hauteur d'inondation, distance d'inondation, hauteur de *run-up*). Les résultats maximisant de chacun des scénarios sont généralement compilés pour obtenir une seule couche d'informations représentant l'enveloppe d'inondation maximale le long de la côte étudiée.

Au regard des connaissances historiques souvent lacunaires, la méthode probabiliste est plus fréquemment employée. Elle se décompose en trois étapes successives (Ten Brink *et al.*, 2008) :

- la définition des paramètres de l'ensemble des sources potentielles et leur probabilité d'occurrence ;
- la modélisation des paramètres hydrodynamiques de l'ensemble des sources préalablement identifiées ;
- l'agrégation de l'ensemble des résultats maximisants.

Cette méthode offre une vision globale de l'aléa tsunami pour les portions de littoral exposées. Elle garantit une cartographie de l'aléa qui prend en compte un maximum d'éventualités soumises à des effets d'intensité diverse. En effet, il est possible de proposer des scénarios pour lesquels aucune donnée historique n'est connue. Un standard méthodologique a été créé par les américains nommé *Probabilistic Tsunami Hazard Analysis* (Geist et Parsons, 2006 ; Gonzalez *et al.* 2009, Geist et Parsons 2009). Cette méthode est directement dérivée des *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) employées à l'échelle internationale au sein du *Global Seismic Hazard Assessment Program* (GSHAP)¹⁶. Elle prend en compte aussi bien les tsunamis d'origine sismique que gravitaire. Cette méthode a été appliquée sur les côtes californiennes et les résultats ont fourni la base d'une évaluation du risque très complète, faisant appel à plusieurs équipes de chercheurs pluridisciplinaires (programme SFFAR). Elle a également été déployée pour définir la probabilité de risque de tsunami pour la côte atlantique des Etats-Unis (Ten Brink *et al.*, 2008 ; Geist et Parson, 2009). Ces méthodes sont largement appliquées à travers le monde, notamment en Indonésie (Horspool *et al.*, 2014), en Australie (Burbidge *et al.*, 2008) en Inde (Burbidge *et al.*, 2009) en Méditerranée (Sørensen *et al.*, 2011), ou encore au Japon (Sakai *et al.*, 2006 ; Satake, 2012).

¹⁶ www.gfz-potsdam.de/GSHAP

1.3.1.4. D'autres approches de construction des zonages d'aléa et leur application dans la Caraïbe

Plusieurs approches permettent de délimiter la zone de danger en cas de tsunami. Elles sont employées en fonction de la connaissance historique du phénomène pour le bassin de risque concerné, des données scientifiques à disposition (bathymétrie, topographie) ainsi que des moyens techniques et humains disponibles. Nous en distinguons quatre principales :

- Par projection simple d'une amplitude maximale théorique

C'est la technique la plus simple qui puisse être employée. La zone de danger est délimitée par une tranche hypsométrique dont l'altitude maximum représente le seuil théorique qui ne sera jamais atteint par un tsunami. L'IOC-UNESCO conseille la mise en œuvre de cette méthode, lorsqu'aucune autre donnée n'est disponible sur le territoire (IOC-UNESCO, 2009). Elle permet aux autorités locales de débiter des travaux préliminaires de planification de gestion de crise, d'évaluation de l'exposition des enjeux et la conception de plans d'évacuation. L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle surestime beaucoup trop les distances de pénétration à l'intérieur des terres. Cet aspect peut être sensiblement amélioré en limitant la profondeur d'inondation en fonction de la distance par rapport à la côte (Saunders *et al.*, 2011).

- Par la connaissance historique

L'enveloppe de submersion par tsunami peut être délimitée en fonction d'un événement de référence historique connu. Cette méthode est couramment mise en œuvre pour la cartographie des aléas naturels, dont la récurrence sur un même territoire est forte, et pour lesquels de nombreux témoignages historiques sont disponibles. A notre connaissance, seules quelques villes japonaises disposaient encore récemment d'une cartographie d'aléas de ce type (Fraser *et al.*, 2012). Mais le tsunami du 11 mars 2011 a remis en question cette méthode en montrant que le scénario historique maximisant connu ne représente pas le pire scénario possible pour un secteur donné.

- Par modélisation numérique de la submersion

La modélisation de l'enveloppe de submersion par simulation numérique est la plus élaborée. Elle permet de simuler en deux ou trois dimensions les trois phases du phénomène (génération – propagation – submersion) au moyen d'équations complexes hydrodynamiques et mécaniques (Allgeyer, 2012). Elle implique une connaissance fine de toutes les sources de tsunamis possibles (locale, régionale, lointaine) et de leurs paramètres physiques associés. Cette méthode nécessite des données bathymétriques et topographiques continues de haute résolution. L'élaboration d'un tel zonage représente un coût financier élevé compte tenu des moyens technologiques nécessaires.

- Par projection à terre d'amplitudes maximales théoriques modélisées

Cette approche nécessite de connaître l'amplitude maximale en tout point de la côte en fonction de tsunamis préalablement modélisés. Une fois ces valeurs connues, elles sont projetées à terre en tenant compte de la topographie. Les secteurs dont l'altitude est inférieure à cette amplitude sont considérés comme submersibles.

Les deux dernières approches sont généralement établies à partir d'une combinaison de séries de simulations selon une méthode probabiliste. L'enveloppe finale de la zone de danger représente la valeur maximale de pénétration en chaque point de la zone d'étude : il s'agit du scénario maximisant. Seuls les résultats de ces scénarios fournissent les distances de pénétration à l'intérieur des terres, les vitesses des courants, les temps d'arrivée théorique des ondes de tsunami et le nombre de vagues.

A notre connaissance dans la Caraïbe, seuls les territoires américains de Porto-Rico et des îles Vierges Américaines possèdent une cartographie d'inondation par tsunami établie par simulations numériques sur l'ensemble de leurs littoraux. Ces études ont été réalisées dans le cadre du NTHMP. Cette cartographie est représentée aujourd'hui sur les plans officiels d'évacuation (cf. annexe 2) pour délimiter les zones à évacuer en cas d'alerte. Concernant les territoires insulaires français de la Caraïbe, seule la Martinique possède depuis 2014 un zonage de l'aléa tsunami construit selon la méthode de projection à terre des amplitudes maximales théoriques. Il a été réalisé par le BRGM d'après les résultats des travaux menés par Pedreros *et al.*, (2007). Le nombre de sources employées est restreint, les scénarios peu crédibles et les données de bathymétrie en entrée du modèle étaient de mauvaise résolution. Ce zonage est sujet à controverses (Courteau, 2007). Il sert pourtant de zonage réglementaire pour les Plans de Prévention des Risques (PPR) actuels. A Anguilla, le zonage a été réalisé selon les valeurs standards de mise en sécurité données par le NTHMP, à savoir une hauteur d'évacuation de 100 pieds soit environ 30 m, et une distance maximale de pénétration à l'intérieur des terres de deux miles, soit près de 3 kilomètres. En République Dominicaine, le zonage disponible sur internet¹⁷ semble être défini pour une hauteur de 20 m avec une limite de pénétration maximale apparente de 2 km.

1.3.2. Construction des zonages de référence à l'échelle de la Caraïbe et de la Martinique

1.3.2.1. Choix et hypothèses pour définir la zone à évacuer

Les instances internationales et nationales demandent en priorité à ce que les dispositifs de mise en sécurité de la population reposent sur des connaissances scientifiques établies à partir de modélisation de l'aléa tsunami. Toutefois, la disponibilité de cette information est dépendante des équipes de recherche, des moyens financiers, humains, et matériels mais également de la connaissance de l'aléa. Néanmoins, malgré de telles expertises, l'aléa peut être sous-évalué si les connaissances sur les sources tsunamigènes sont lacunaires et que l'ensemble des scénarios n'ont pas été envisagés. Le tsunami catastrophique du 11 mars 2011 illustre parfaitement ce cas de figure. Le Japon est l'une, voire la nation la mieux préparée face à l'aléa tsunami. Les mesures de protection structurelles qui protègent les littoraux de cet Etat face aux tsunamis ont été dimensionnés sur la base d'une connaissance de l'aléa modélisé par simulation numérique. Pourtant, l'événement du 11 mars 2011 a largement dépassé les valeurs maximales modélisées détruisant et submergeant plusieurs des ouvrages de génie civil (Fraser *et al.*, 2013). Au commencement de nos travaux de recherche, aucun zonage de submersion par tsunami n'était disponible en Martinique. Nous avons alors proposé de délimiter la zone à évacuer

¹⁷ <http://globalmatrixeng.com/>

selon la méthode de projection simple d'une amplitude maximale théorique. L'altitude quant à elle a été choisie en fonction des connaissances historiques et scientifiques de l'aléa tsunami sur le département.

- Référence de catalogue connu

Un catalogue historique des tsunamis ayant impacté les côtes de la Martinique a été réalisé par Accary et Roger (2010). Les auteurs ont employé les catalogues régionaux et mondiaux existants et mené des recherches d'archives complémentaires. Un travail minutieux a permis d'écarter un certain nombre d'événements dont la fiabilité des témoignages, ou encore la description des effets ne permettait pas de certifier l'impact d'un tsunami en Martinique. D'après leurs résultats, 28 événements auraient impacté ce territoire depuis sa découverte en 1502. Des observations de tsunamis ont été évoquées pour 11 communes de la Martinique (figure 11). Les événements les plus cités sont ceux consécutifs à l'éruption de 1902 (témoignages sur neuf communes pour un total de 28 occurrences) et du télé-tsunami de 1755 (témoignages sur quatre communes). Les valeurs de *run-up* les plus importantes ont été atteintes par des tsunamis locaux d'origine volcanique au cours de l'éruption de la montagne Pelée en 1902. Elles sont comprises entre trois et huit mètres. La hauteur maximale atteinte pour un tsunami lointain d'origine sismique était de 12 pieds, soit environ 3.5 m, mesure relevée sur la commune de Trinité. Cette valeur est donnée pour le tsunami transocéanique généré par le séisme de Lisbonne en 1755. Les valeurs de *run-up* pour les événements régionaux sont en moyenne d'un mètre (8 février 1843 : *run-up* = 0.7 m ; 18 novembre 1867 : *run-up* = 1.2 m).

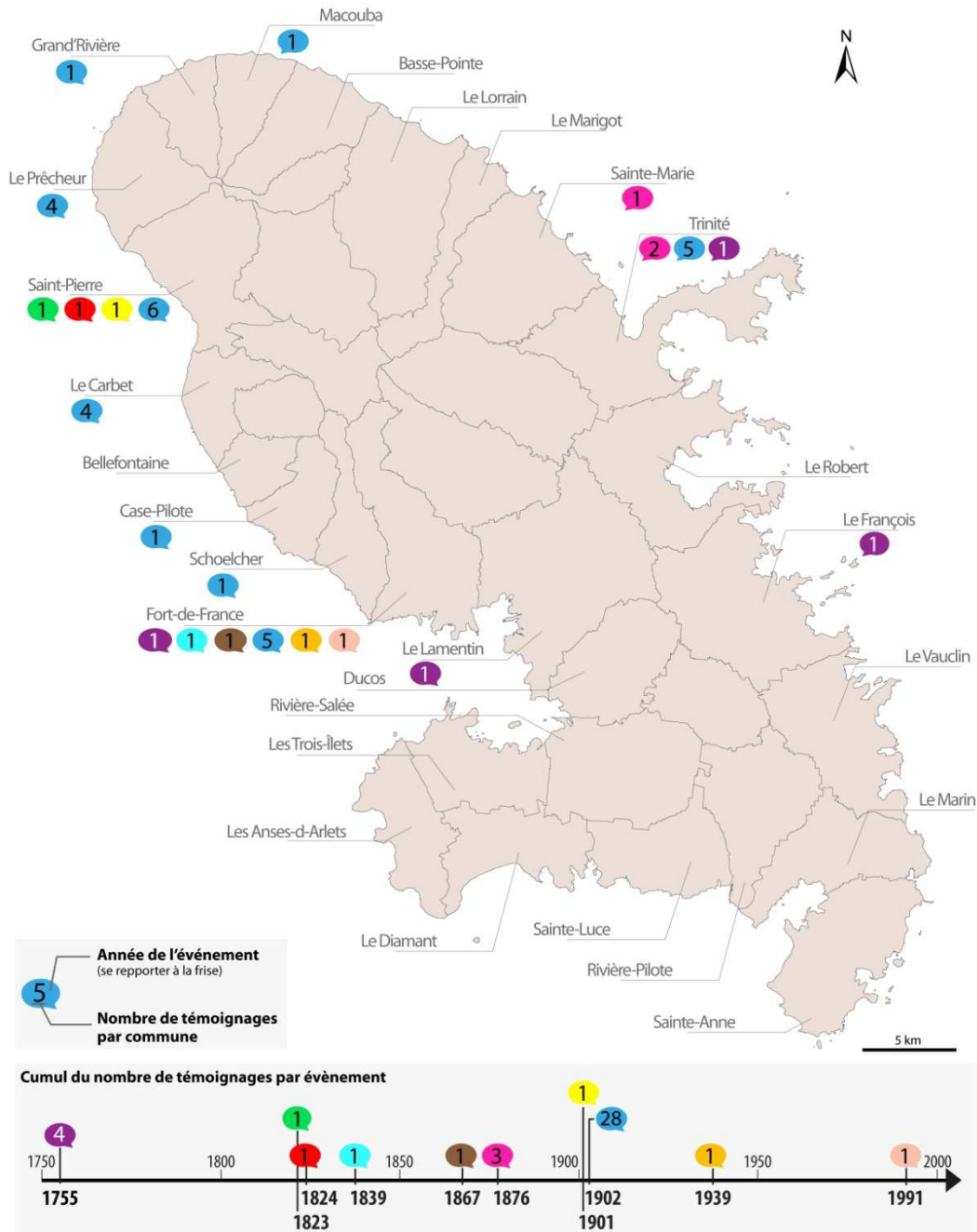


Figure 11: Carte des témoignages historiques de run-up en Martinique par commune, complétée d'après Accary et Roger (2010).

Cette compilation tient compte uniquement des témoignages historiques issus de documents manuscrits. Confrontés aux limites déjà exposées précédemment, ils ne prennent pas en considération des événements sur des temps plus longs qui ont pourtant impacté la Martinique comme le glissement de flanc de la montagne Pelée (Le Friant *et al.*, 2003a,b) ou encore le long de l'arc des Petites Antilles (Deplus *et al.*, 2001 ; Le Friant *et al.*, 2015). De plus, des recherches d'archives plus approfondies permettraient certainement de retrouver plusieurs autres témoignages et de corroborer certains événements qui ne sont pas pris en compte aujourd'hui par les scientifiques. C'est dans ce sens que

nous suggérons d'ajouter au catalogue d'Acarry et Roger (2010) le témoignage relaté dans une chronique du séisme du 11 janvier 1839, le plus dévastateur en Martinique (Leone, 2007), et qui fait référence à un retrait de la mer anormal à Fort-de-France (figure 12) (Péray, 1991). Cet exemple démontre qu'il est important de poursuivre les recherches de témoignages historiques. Ce type de recherches pourrait être réalisé notamment au Centre des Archives d'Outre-Mer (CAOM) à Aix en Provence ainsi qu'à l'étranger. Elles contribueraient très probablement à enrichir nos connaissances sur les phénomènes ayant touché la Martinique.

Je reviens à ce qui s'opéra au moment du tremblement de terre.

*La ville de Saint-Pierre, bâtie au pied d'un énorme rocher, est une belle cité de trente mille âmes qui n'éprouva que quelques lézardes et où personne ne périt. **Notre malheureuse Fort-de France avait été bâtie sur un ancien marais.** Il n'y avait ni pilotis, ni fondements en pierre assez profonds, ce qui fut la cause de l'écroulement de la plupart des constructions.⁴*

Si le tremblement de terre s'était manifesté deux heures plus tard, les charbons étant allumés pour faire le café, en moins d'une demi-heure, tous les décombres étaient en feu et, comme à Pointe-à-Pitre en 1843, tous les blessés qu'on ne pouvait tirer tout de suite étaient brûlés à vifs. Plus terrible encore, la mer bouleversée se présenta dans une position déversant sur toute la ville et eut le temps de gagner dix à quinze mètres sur elle, mais, fort heureusement, le mouvement se fit en sens inverse plus promptement que par la parole. Quelques secondes de plus dans son premier mouvement et la mer atteignait le pied de la montagne à une distance de six ou sept cents mètres. Tous les échappés de l'écroulement de la ville périssaient noyés.

Figure 12 : Témoignage historique du séisme du 11 janvier 1839, extrait de Péray (1991)

- Référence par modélisation numérique

Différentes études scientifiques qui visent à modéliser l'aléa tsunami permettent d'estimer des valeurs d'amplitude maximale de tsunami attendues pour la Martinique. La première en date est celle menée par le BRGM en 2007. Cet organisme a été chargé de réaliser une étude préliminaire portant sur l'aléa tsunami aux Antilles dans le cadre du Plan Séisme 1 avec pour objectif principal :

- Identifier les sources tsunamigéniques susceptibles d'affecter le littoral antillais français. Ces sources peuvent être d'origine sismique (Terrier, 2007) ou liées à des mouvements de terrain d'origine volcanique (Poisson et Pedreros, 2007).
- Procéder à des simulations numériques afin de caractériser chaque scénario : choix du mouvement générateur, propagation du tsunami en mer et impacts sur les côtes martiniquaises et guadeloupéennes (Pedreros *et al.*, 2007).

L'étude propose des temps d'arrivée pour plusieurs scénarios de tsunami d'origines locale et régionale en Martinique et en Guadeloupe. Ces simulations décrivent la propagation des tsunamis en termes : d'amplitude maximale des vagues, de nombre de vagues et de délais d'arrivée. Parmi les 13 modélisations effectuées, 10 scénarios proposés ont pour origine un séisme local et 3 un mouvement de terrain aérien provoqué par une crise volcanique. Trois de ces scénarios correspondent à des

événements historiques connus. Ils ont permis de calibrer et de valider les paramètres du modèle en confrontant les résultats des simulations avec les hauteurs d'eau et les temps d'arrivée relatés dans les témoignages historiques. Tous scénarios confondus, l'amplitude maximale des vagues à l'approche des côtes pour la Martinique est de quatre mètres (commune de Trinité). Elle ne serait que de trois mètres pour un scénario gravitaire d'origine volcanique (commune de Saint-Pierre).

La seconde source de données provient d'une compilation 18 scénarios de tsunami modélisés en décembre 2015 par le PTWC dans le bassin caribéen (cf. annexe 1). Ils ont été réalisés dans le cadre de la mise en place du système d'alerte tsunami régional et tiennent compte uniquement de scénarios d'origine sismique. La valeur maximale de hauteur d'eau modélisée à la côte sur l'île de Martinique est de 6.1 m pour un événement local situé au niveau de la zone de subduction au large de la Guadeloupe (M_w 8.4) (figure 13).

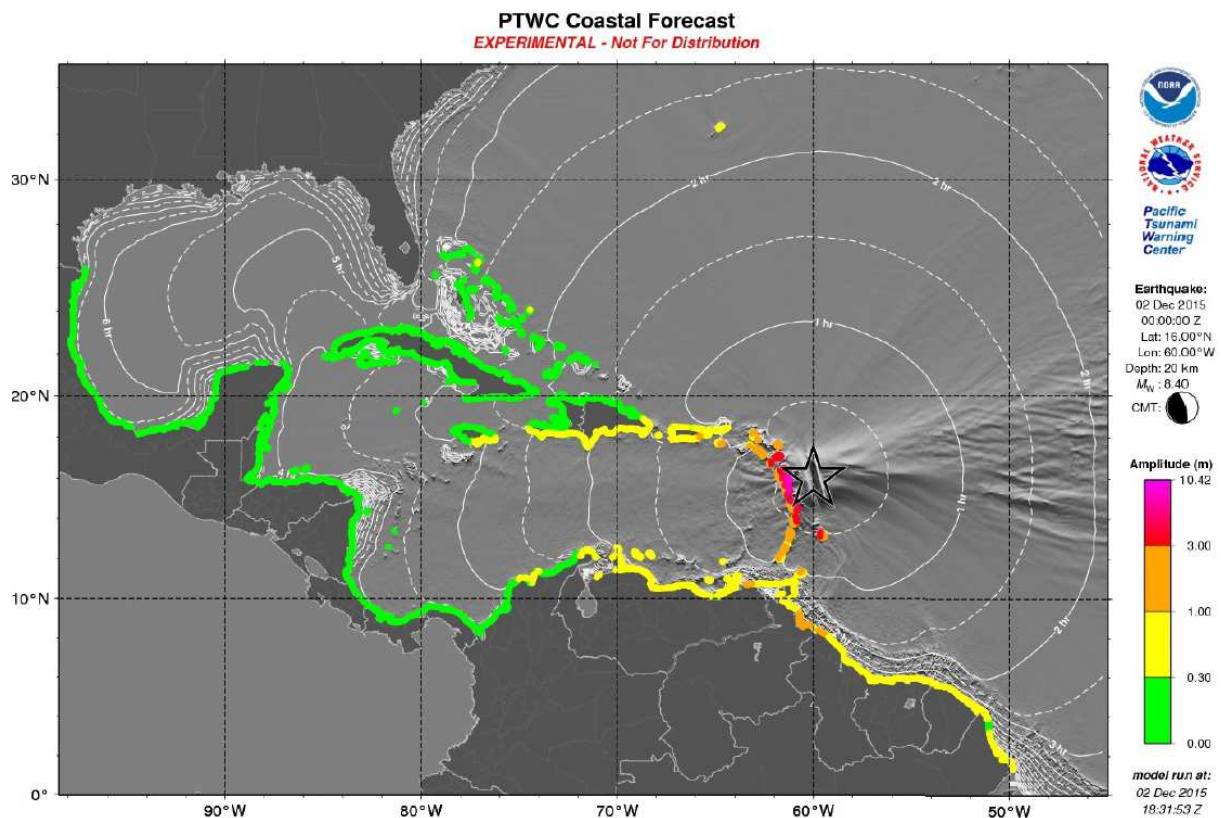


Figure 13 : Carte des amplitudes à la côte modélisées par le PTWC à l'aide du modèle RIFT pour un événement d'origine sismique d'une magnitude $M_w = 8.4$ et d'une profondeur de foyer de 20 km au niveau de la zone de subduction des Petites Antilles au large de la Guadeloupe

En accord avec les autorités locales (EMIZA et SIDPC Martinique), nous avons choisi de définir la zone d'évacuation en fonction d'une d'altitude de référence unique pour l'ensemble du département. Nous avons fait l'hypothèse d'une hauteur maximale d'inondation inférieure ou égale à 10 m pour un événement d'origine sismique. Cette valeur englobe toutes les valeurs historiques connues ainsi que celle des différents résultats des modèles de simulation numérique disponibles. Cette altitude correspond également à la valeur par défaut couramment employée dans les études de vulnérabilités (Scheer *et al.*, 2012). Cette tranche d'altitude (0-10 m) représente notre zone à évacuer et en aucun cas

une zone de danger. Le risque de surévaluation est important par rapport à des résultats de simulation numérique obtenus sur des territoires urbanisés où la rugosité du sol joue un rôle important dans l'atténuation des distances de pénétration dans les terres. Il conviendra donc d'affiner ce zonage par l'introduction des futurs résultats scientifiques de modélisation. Pour autant, notre hypothèse offre un avantage certain en termes de gestion opérationnelle des évacuations, en simplifiant les messages d'information à la population, et sans faire de distinctions entre les côtes du département.

A l'échelle de la Martinique, la cartographie de la zone à évacuer a été réalisée à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) disponible pour le département au pas d'un mètre (Litto3D®, 2011, IGN-SHOM). Sa précision verticale est de l'ordre de 50 cm à 95 %. Nous avons extrait l'isohypse 10 m à l'aide l'extension Spatial Analyst® du logiciel de cartographie Arcgis® 10.2. La zone à évacuer a ainsi été définie comme l'espace géographique littoral situé entre la limite de basse mer (BD TOPO®, 2011, IGN) et notre altitude de référence retenue de 10 m. Le même principe de zonage a été appliqué à l'échelle de la Grande Caraïbe toujours selon une altitude de 10 m afin de rester cohérent avec nos hypothèses de départ. Néanmoins, la méthode cartographique a nécessité au préalable d'identifier les données mondiales disponibles et d'en choisir les plus fiables pour notre étude (cf. annexe 3). Nous avons finalement retenu les données altimétriques SRTM3 V4.1 (2009). Nous avons également été contraint de définir une limite haute de l'extension du zonage à l'intérieur des terres tant les distances de pénétration étaient importantes notamment pour les Etats continentaux. Nous avons retenu une valeur maximale de cinq kilomètres au regard des deux derniers événements majeurs. En effet, les distances de pénétration ont atteint 3.5 km à Banda Aceh (Indonésie) (Lavigne et Paris, 2011), et six kilomètres au maximum dans la plaine de Sendai (Japon) (Mimura *et al.*, 2011). Sachant qu'au Japon, les relevés de hauteurs de *run-up* décroissent de manière exponentielle jusqu'à cinq kilomètres (Mori *et al.*, 2011).

1.3.2.2. Présentation des zones à évacuer à l'échelle de la Martinique et de la Grande Caraïbe

En Martinique, la zone à évacuer représente une superficie de 115 km², soit un peu plus de 10 % de la surface totale de l'île. L'analyse des superficies communales affectées par la zone d'évacuation (figure 14) montre clairement trois communes particulièrement impactées par ce zonage. Il s'agit des communes du Lamentin (23km² - 34 %), Ducos (8.8 km² - 28 %) et Rivière-Salée (11,7 km² - 27 %). Elles sont situées sur la plaine alluviale des fleuves du Lamentin et de la Lézarde, en fond de baie de Fort-de-France. Cela s'explique d'une part, par la topographie très plane du secteur, et d'autre part, par le fait que le niveau de basse mer retenu pour l'étude inclut de fait la mangrove de Génipa. On constate que la presqu'île de Sainte-Anne (12 km² - 27 %) est également très concernée en cas d'évacuation. En effet, à l'exception du piton Crève-cœur, le sud de la presqu'île est relativement plat. Il comprend l'étang des Salines bordé d'anciens marais salants, aux aspects de « steppe désertique » (savane des Pétrifications). En revanche, les communes du nord de l'île, depuis Schœlcher, sur la côte Caraïbe à Sainte-Marie, sur la côte Atlantique, présentent les superficies communales affectées les plus faibles (inférieures à 5 % de la superficie totale communale). Le littoral y est très découpé et présente une alternance forte entre des côtes rocheuses et des côtes sableuses en fond de baie. Les quatre communes atlantiques depuis Trinité jusqu'au Vauclin présentent une valeur moyenne de 16 % de la surface communale à évacuer. Seuls sept communes sur les 34 que compte la Martinique ne possèdent pas de

bordures littorales et ne sont donc pas concernées par une évacuation (Ajoupa-Bouillon, Morne-Rouge, Fonds Saint-Denis, Morne Vert, Gros-Morne, Saint Joseph et Saint-Esprit).

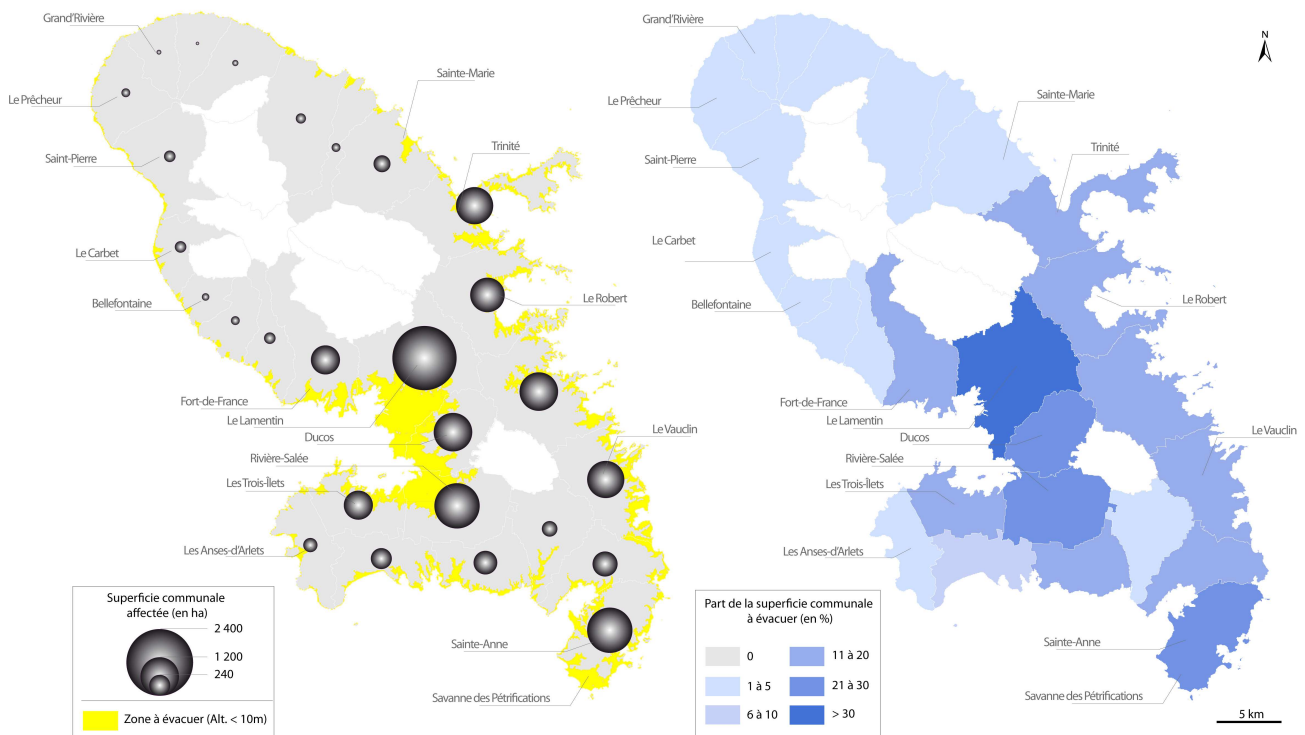


Figure 14 : Carte de la zone à évacuer et analyse par commune des superficies du territoire concerné par une évacuation

Le zonage d'évacuation à l'échelle du bassin de la Grande Caraïbe représente une superficie d'environ 122 000 km², soit à titre d'exemple un peu moins que la superficie totale cumulée du Nicaragua. En valeur absolue, ce sont les pays continentaux du bassin caribéen qui possèdent la surface de territoire à évacuer la plus importante. On retrouve en tête les Etats-Unis avec une superficie de près de 40 000 km², l'île de Cuba avec 17 000 km² puis le Mexique avec 16 000 km². Ces fortes valeurs s'expliquent par la présence de vastes plaines littorales, des lagunes, des cordons littoraux ou encore des zones de mangrove. Ces valeurs sont difficiles à appréhender et à exploiter sous cette forme brute. Ainsi, pour en réaliser une représentation cartographique et permettre ainsi d'estimer d'éventuelles difficultés d'évacuation à l'échelle des Etats et des territoires de la Grande Caraïbe nous avons calculé la part de la zone à évacuer par rapport à la surface de la bande côtière de cinq km à l'intérieur des terres (figure 15). Cette méthode permet de définir un dénominateur commun entre les territoires permettant ainsi de les comparer. Plus les valeurs de pourcentage sont élevées, plus la proportion de littoral à évacuer est conséquente (tableau 4).

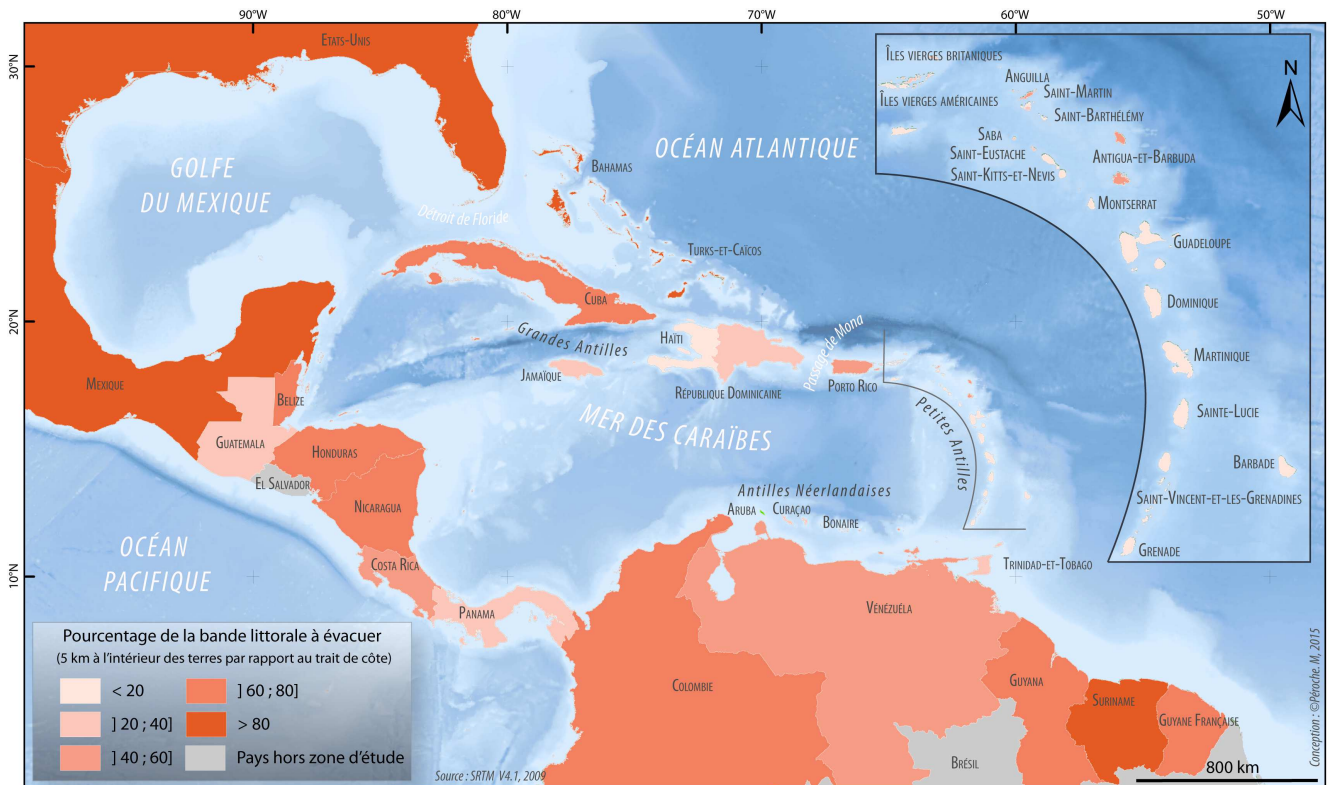


Figure 15 : Carte d'exposition des Etats et territoires de la Grande Caraïbe en cas d'évacuation face à une alerte tsunami

Tableau 4 : Liste des dix Etats dans la Grande Caraïbes les plus exposés en cas d'alerte tsunami et d'évacuation du littoral

Pays	Superficie de la zone à évacuer (en km ²)	Superficie de la bande côtière (en km ²)	Pourcentage de bande littorale à évacuer
Bahamas	11644	12110	96
États-Unis	39785	41883	95
Turk-et-Caïques	575	617	93
Île Caïmans	270	303	89
Mexique	15896	17789	89
Suriname	1894	2193	86
Belize	2207	2636	84
Nicaragua	2175	2729	80
Guyana	2544	3280	78
Cuba	17334	24236	72

Ce sont les Bahamas qui sont à la tête du classement, suivies de près par les Etats-Unis et les îles Turques-et-Caïques avec respectivement 96 %, 95 % et 93 % de leur bande littorale de moins de 5 km du rivage définie comme zone à évacuer selon nos hypothèses. On remarque aisément que les espaces insulaires de la Caraïbe les plus vulnérables en termes d'évacuation sont les îles basses coralliennes. Elles présentent les valeurs les plus fortes. A l'inverse les îles volcaniques présentent des pourcentages beaucoup plus faibles inférieurs pour la plupart à 20 %. Ainsi, les Bahamas disposent du plus fort pourcentage de zones à évacuer avec 96 % du littoral, suivies par les Etats-Unis (95 %) et les îles Turques-et-Caïques (93 %). Les îles des Petites Antilles au relief marqué présentent des valeurs très

faibles comme en Dominique (2 %), Montserrat (5 %) et Saint-Vincent et les Grenadines (6 %). Les valeurs sont très largement dépendantes de la structure géomorphologique de l'île.

Dans ce chapitre, nous avons identifié les sources au potentiel tsunamigène qui sont susceptibles d'impacter le bassin de la Caraïbe. L'analyse des catalogues historiques a montré que l'état des connaissances en matière de tsunami, circonscrit à une période d'environ 500 ans d'histoire, présente encore de nombreuses incertitudes quant à leur spatialisation voire à leur validité. En dépit de ces limites, les témoignages de tsunamis historiques associés à des résultats de simulation numérique nous ont permis de définir notre hypothèse de délimitation de la zone à évacuer. C'est à partir de ces éléments que nous pourrions déterminer l'exposition des enjeux humains en cas d'évacuation en y associant une étude des facteurs généraux de risque tsunami des états de la Caraïbe.

Chapitre 2 Les composantes du risque tsunami dans la Caraïbe insulaire, cadre général (aléa, enjeux, vulnérabilités, capacités)

Les Etats et les territoires insulaires de la Caraïbe sont soumis à l'ensemble des aléas météorologiques et géodynamiques, hormis l'aléa chute de neige et avalanche. Au cours de ces vingt dernières années, l'EM-DAT a comptabilisé 280 événements majeurs ayant entraîné la mort de près de 230 000 personnes et affecté au moins cent fois plus d'individus sur ces territoires. C'est l'aléa sismique qui a provoqué le nombre de morts le plus important, avec 222 300 victimes dont plus de 200 000 suite à la catastrophe de janvier 2010 en Haïti. Les cyclones et les tempêtes tropicales (9 événements par an en moyenne) ont généré en vingt ans plus de 29 milliards de dollars de dommages et affecté près de 16 millions d'individus (6 000 décès).

L'exposition des enjeux, la préparation à la gestion de crise, la prévention, le niveau de développement économique, la capacité de résilience sont autant de facteurs qui influent sur le nombre de décès lors de catastrophes naturelles. De nombreuses études examinent et révèlent les défaillances des sociétés face aux principaux aléas évoqués ci-dessus. Toutefois, compte tenu de la faible période de retour de l'aléa tsunami et de l'absence d'événements récents majeurs à l'échelle du bassin, peu de recherches sont effectuées sur ce risque pourtant présent. Le chapitre suivant vise la présentation des principaux facteurs de risque en proposant un cadre conceptuel de diagnostic territorial du risque tsunami. Ce travail est appliqué ici aux espaces insulaires de la Caraïbe et à l'île de la Martinique. Il s'agit à la fois de fournir des clés de compréhension concernant la dimension spatiale des enjeux humains, et de proposer des leviers de prévention parmi lesquels figure notamment l'évacuation préventive des populations littorales.

2.1. Un cadre méthodologique et conceptuel d'évaluation du risque appliqué à la Caraïbe

2.1.1. Evolution de la notion de risque : d'une approche aléa centrée à une approche intégrée

La notion de risque est employée aujourd'hui dans de nombreux domaines comme dans le monde du travail (risque psychosocial), de la finance (risque de marché), des grandes entreprises (risque technique), des systèmes d'information (risque informatique) ou encore de l'industrie (risque industriel). Ce terme est relayé quotidiennement par les médias, dans une société où notre rapport au risque et son acceptation évolue au regard des enjeux pour lesquels les mesures de prévention habituelles semblent inopérantes (Kermisch, 2011). Le terme de risque est par essence pluridisciplinaire, il est difficile à appréhender de part sa polysémie (Vinet, 2007). Il s'agit d'un concept qui englobe un champ sémantique très vaste, où de nombreuses analogies peuvent être mises en exergue. Trois idées lui sont communes et transversales : le risque est régi par une probabilité d'occurrence d'un phénomène dommageable (aléa, menace, danger, nuisance, etc.), ce phénomène a des impacts sur des enjeux (systèmes, cibles) aux vulnérabilités (susceptibilité, sensibilité, défaut, faille, défaillance) plus ou moins élevées. Enfin, les enjeux disposent de capacités (contremesures, mesures de mitigation, alternatives), pour limiter les dommages (sinistres, préjudices, endommagements, dysfonctionnements).

En géographie, l'évolution de la notion de risque naturel débute à partir des années 1980 avec l'introduction de la notion de vulnérabilité par Wisner *et al.* (1976). Presque 20 ans plus tard, elle est utilisée par Blaikie *et al.* (1994) comme concept clef de la gestion des risques (Reghezza, 2006). Cette évolution a permis de passer d'une vision aléa-centrée, orientée sur l'étude des phénomènes physiques et aux réponses structurelles technocentrées, à une analyse des vulnérabilités en tant que système qui conditionne un niveau d'endommagement. « *Les risques naturels résultent du croisement [spatial et temporel] entre la probabilité qu'un phénomène naturel se réalise et les dommages possibles que ce phénomène pourrait entraîner sur des biens ou des personnes dans une zone donnée.* » (Leone *et al.*, 2010).

Au cours de ces deux dernières décennies, on assiste au renforcement du paradigme sociétal de la notion de risque dans le sens où :

- le risque est associé aux représentations individuelles et/ou collectives du danger qui évoluent selon les époques, les lieux, les cultures (De Richemond et Reghezza, 2010). Elles « *conditionnent l'interprétation d'un phénomène et donc le comportement immédiat face à ses effets. Elles interviennent dans la définition des seuils d'acceptabilité, dans la capacité des individus à évaluer le risque* » (Veyret-Mekdjian, 2001) ;
- le risque est produit par la société elle-même (Duvat et Magnan, 2014). « *L'homme participe au processus de production du risque soit en s'exposant (volontairement ou non) aux*

phénomènes naturels, soit en ne prenant pas les mesures de protection ou de prévention nécessaires » (Leone *et al.*, 2010).

Ainsi, le risque est défini avant tout comme une construction sociale (Reghezza, 2006), et son caractère « naturel » est sans cesse questionné (Pigeon, 2002). Un courant qualifié de « radical » par Gaillard (2006) enrichit la réflexion portée sur les risques en géographie, avec l'idée que ces derniers sont corrélés à des situations de (sur)vie au quotidien ainsi qu'à des causes socioéconomiques profondes qui échappent au contrôle des individus.

L'analyse des risques se détache petit à petit de la vision binaire et segmentée du couple aléa/enjeux, au profit d'une analyse spatiale et territoriale du risque plus complexe, moins « *simplificatrice* » et moins « *réductrice* » (Pigeon, 2010). Reghezza (2006) propose de détailler le risque en trois niveaux, chacun pouvant être analysé en termes de vulnérabilités :

- le niveau matériel : l'enjeu exposé est endommagé physiquement par l'aléa ;
- le niveau structurel : les enjeux endommagés, en interaction ou en réseau, diffusent par des effets dominos des perturbations hors de la zone d'impact initiale (notion de risque indirect) ;
- le niveau fonctionnel : les dommages génèrent des dysfonctionnements à l'échelle d'un territoire qui dépassent l'enveloppe même de l'aléa.

Au fil de ces dernières années, un nouveau paradigme est apparu dans l'étude des risques, notamment dans la manière d'en appréhender la gestion : le concept de résilience. Ce terme, à la définition aujourd'hui encore débattue, a connu une forte médiatisation à l'occasion de la parution des actes du colloque « *The resilient city : trauma recovery and remembrance* », publiés l'année de l'ouragan Katrina à La Nouvelle-Orléans (Vale et Campanella, 2005, in Le Blanc et Zwarterook, 2013). Emprunté aux sciences sociales, ce concept est aujourd'hui largement étudié par de nombreux géographes français (Dauphiné et Provitolo, 2007 ; Hernandez, 2010 ; Provitolo et Reghezza-Zitt, 2015). Il désigne « *la capacité d'un système social (par exemple une organisation, une ville ou une société) à s'adapter de manière proactive et à se remettre de perturbations perçues au sein du système comme non ordinaires et non attendues.* » (Comfort *et al.*, 2010 in Le Blanc et Zwarterook, 2013). Ainsi, pour un même événement ou pour deux événements d'intensité similaire, des individus ou des groupes d'individus possèdent des aptitudes plus ou moins développées pour faire face et surmonter la catastrophe. La capacité de résilience est couramment opposée à l'évaluation des vulnérabilités qui vise à révéler le potentiel d'endommagement d'infrastructures et les défaillances organisationnelles. Pour autant, cette simple opposition est réductrice car un territoire, une société ou encore des individus peuvent développer des capacités de résilience tout en conservant une certaine vulnérabilité face aux aléas.

L'étude des risques s'envisage alors *via* l'évaluation intégrée de ces différentes composantes sur un territoire et une période déterminés. Cette entrée largement plébiscitée par l'ensemble de la communauté scientifique ouvre de nouvelles discussions sur la mise en place de méthodes d'évaluation des risques avec des applications plus ou moins opérationnelles.

L'une de ces méthodes d'évaluation est dite analytique. Elle vise à rechercher les relations de causes à effets sur des enjeux face à un ou plusieurs aléas donnés. Cette démarche a longtemps été appliquée à

l'évaluation des facteurs de vulnérabilité selon des méthodes d'analyse intégrée. Elle permet de les hiérarchiser par nature d'enjeux exposés et de les dénombrer de manière quantitative ou semi-quantitative. L'endommagement subi (étude *a posteriori*), ou potentiel, (étude *a priori*), y est défini comme un indicateur ou un marqueur de vulnérabilité. Leone (2007) distingue différentes formes de vulnérabilités, toutes sont en interaction les unes par rapport aux autres et mesurables au moyen de critères et d'indicateurs (physique, corporel, humain ou social, organisationnel, environnemental, fonctionnel).

L'autre, dite systémique, vise à étudier les risques naturels selon une approche holistique des territoires. Elle rend compte de l'interdépendance entre les facteurs qui produisent le risque et les dynamiques internes et externes du système. Cette approche est développée et prend tout son sens notamment à travers l'étude de systèmes complexes comme les milieux urbains et les réseaux de communication (Gleyze et Reghezza, 2007 ; Lhomme, 2012). La mise en place d'une telle démarche s'appuie sur l'étude des coévolutions temporelles aussi bien au niveau institutionnel et social (politiques publiques, culturelles, économiques etc.) que phénoménologiques. Elle requiert également de s'intéresser à la mémoire et au vécu des sociétés (individuelles et/ou collectives) directement impactées. Enfin, ces coévolutions doivent être prises en compte à des échelles imbriquées du local à l'international (Gall *et al.*, 2015). Au vu de la multitude des facteurs qui interagissent, cette approche est très complexe à mettre en œuvre et nécessite la collaboration d'équipes pluridisciplinaires afin de prétendre à ce niveau d'analyse. En définitive, pour une véritable évaluation systémique du risque, il conviendrait de procéder à un décloisonnement total entre les disciplines. « *Ainsi, même si l'interdisciplinarité est prônée par toutes les instances dirigeantes, elle se borne bien souvent à une juxtaposition de regards disciplinaires* » (Ruin, 2007). Vinet (2007) rappelle qu'« *il est désormais admis que le risque est bien plus complexe à appréhender que la simple occurrence des impacts d'un phénomène naturel sur un « support anthropique* », et qu'« *on ne peut s'abstraire d'une approche globale et intégrée du risque si l'on veut en diagnostiquer les causes et en réduire les effets. Cependant, ces idées-forces ont parfois peine à se traduire dans la réalité* ».

2.1.2. Représentation schématique des composantes du risque : élaboration du modèle général AEVC

Le risque se définit communément par la concomitance entre un aléa naturel qui impacte des enjeux caractérisés par une certaine propension à subir des dommages et leur vulnérabilité. Il est représenté sous une forme mathématique, selon l'équation (1) suivante,

$$R = A \times (E \times V), \quad (1)$$

où R désigne le risque, A désigne l'aléa, E désigne les enjeux et V qui représente les vulnérabilités. L'équation (1) a été formulée en premier lieu par Blaikie *et al.* (1994), en pleine « Décennie Internationale pour la Réduction des Catastrophes Naturelles ». Elle a été rapidement acceptée et approuvée par la communauté internationale. Entre la fin des années 1990 et le début des années 2000, au fil d'études conduites par un certain nombre d'auteurs, la notion de vulnérabilité est enrichie par

celle de capacité (Blaikie *et al.*, 2014). Wisner *et al.*, (2004) proposent ainsi une nouvelle équation (2) sous la forme :

$$R = A \times \left[\left(\frac{V}{Cr} \right) - M \right], \quad (2)$$

avec Cr qui désigne les capacités personnelles de résistance à la crise et M pour les mesures de mitigation prises aux échelles régionales (Wisner *et al.* 2012). Nous nous sommes inspirés de ces différentes approches afin de proposer l'équation (3) suivante, adaptée à une évaluation analytique voire quantitative du risque sur un espace donné :

$$R = A [E \times (V - C)] , \quad (3)$$

avec C qui désigne la capacités de résilience des enjeux directs et indirects exposés. Cette équation est traduite par un schéma conceptuel dérivé du modèle « *Pressure and Release* » plus connu sous l'acronyme « PAR » de Blaikie *et al.* (1994) et proposé par Leone (inédit) (figure 16). Il offre à la fois une vision compartimentée mais synthétique des risques directs et indirects, applicable à des échelles territoriales variables. Il tiendra lieu de cadre d'analyse générale du risque tsunami sur nos zones d'étude régionale et locale.

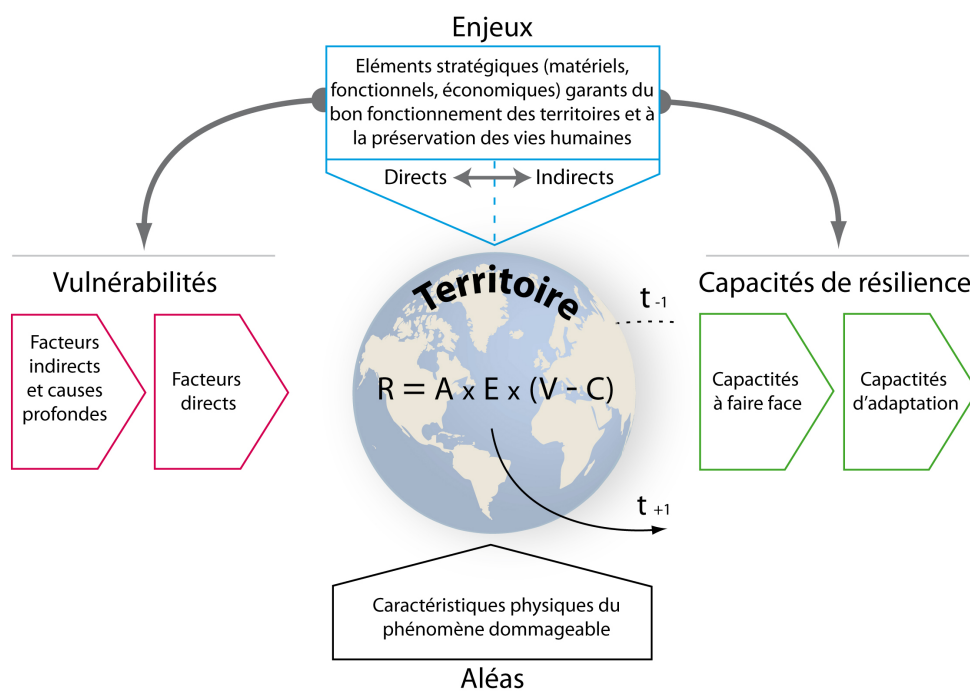


Figure 16 : Les composantes du risque territorialisées, d'après Leone (inédit)

Sur ce schéma, nous avons intégré une composante souvent absente des représentations « mathématiques », elle matérialise l'évolution dans le temps des « trajectoires de risque ». Cette variable conditionne l'ensemble des composantes dans le sens où le risque est avant tout une construction sociale. Le territoire, au centre de l'analyse des risques, est le domaine d'interactions dynamiques entre une société et son environnement. L'aléa représente la composante naturelle environnementale aux effets dommageables sur les enjeux façonnés par les sociétés. Il est le déterminant principal de l'extension spatiale des perturbations. Néanmoins, les enjeux directement exposés peuvent entraîner des

perturbations au-delà de la zone d'impact par effets dominos (enjeux indirects). L'analyse des risques par une entrée centrée sur les enjeux revient à caractériser leurs vulnérabilités ainsi que leur plus ou moins grande capacité de résilience.

- L'aléa caractérise les phénomènes d'origine naturelle susceptibles d'entraîner des dommages. Ils « sont traditionnellement définis par la combinaison d'une magnitude (composante énergétique ou puissance), d'une probabilité d'occurrence (composante temporelle), d'une aire d'impact (composante spatiale), et d'une durée d'action » (Leone *et al.*, 2010).
- Les enjeux désignent tous les éléments matériels ou humains soumis à un aléa. Ils sont généralement caractérisés selon une quantité de pertes potentielles (physique et/ou économique), hiérarchisées selon leur importance ou encore étudiées en fonction de leur mobilité (études de fréquentation). Les enjeux directs sont ceux exposés au phénomène de par une coïncidence spatiale et temporelle. Les enjeux indirects désignent ceux dont le bon fonctionnement n'est plus assuré à cause de dégradations et de perte de liens fonctionnels. Ils sont difficiles à déterminer sans une connaissance profonde des territoires et des liens physiques (réseau de transport, communication, énergétique) et organisationnels qui les unissent. Les effets dominos et les réactions en chaîne peuvent aggraver une situation de crise déjà existante, voire en générer une nouvelle (sur-crise).
- La vulnérabilité est un terme polysémique issu des nombreux facteurs qui la produisent, aussi bien matériels (approche technique) qu'immatériels (approche psycho-sociale). Les géographes spécialisés dans la gestion des risques définissent le terme de vulnérabilité comme « *une propension à l'endommagement ou au dysfonctionnement de différents éléments exposés (biens, personnes, activités, fonctions, systèmes) constitutifs d'un territoire et d'une société donnés* » (Leone et Vinet, 2006). Les causes de la vulnérabilité sont subdivisées en deux composantes étroitement liées. La première s'intéresse aux facteurs indirects et aux causes profondes de vulnérabilité. Ces dernières reposent sur la construction historique et sociale d'un territoire. Cette thématique, chère aux courants de la géographie « radicale », interroge les conditions socio-économiques et les idéologies politiques qui peuvent constituer de graves éléments de faiblesse sous-jacente dont les catastrophes naturelles ne font que révéler l'ampleur (Wisner *et al.*, 2012). Cette composante de la vulnérabilité en alimente une seconde qualifiée de cause directe. Plusieurs facteurs de vulnérabilité « structurelle », « géographique » et « conjoncturelle » sont identifiables, qu'ils soient d'ordre physique ou social (D'Ercole *et al.* 1994).

L'introduction de la notion de résilience met en exergue les capacités d'un individu, groupe d'individus, d'une société, ou d'un système territorial par exemple, à surmonter une catastrophe. Notre approche analytique, à l'image de l'étude des facteurs de vulnérabilité, nous oblige non pas à étudier le concept de résilience en tant que processus d'une dynamique, mais bien à en évaluer les propriétés comme l'explique Le Blanc et Zwarterook (2013). Nous distinguerons alors deux propriétés contenues dans la notion de résilience : la capacité à faire face à une crise et les capacités d'adaptations post-crise. La première définit l'ensemble des éléments mis en place pour limiter les dommages et

réduire les temps de récupération du système en période de post-crise. On parle également de dimension réactive à court terme. La capacité à faire face se traduira, par exemple, dans la recherche de continuité de fonctionnement des réseaux suite à des dommages structurels par la redondance de ceux-ci (Lhomme, 2012). La seconde définit les éléments mis en place pour diminuer durablement la vulnérabilité d'une société, d'un système. On parle alors de dimension proactive à long terme, une approche largement promue par les Nations Unies (Quenault, 2015). C'est dans cette dernière perspective que nous avons mené nos travaux dans l'espace caribéen.

2.1.3. L'espace caraïbe : un secteur d'étude aux délimitations variables

Les Caraïbes, la Caraïbe, l'espace caraïbe ou encore l'espace des Caraïbes sont autant de dénominations françaises utilisées pour un même espace. Cette pluralité nominative montre à quel point il est difficile de définir cette zone complexe. Certains grands faits historiques survenus au milieu du 15^{ème} siècle ont évidemment marqué la construction de ces territoires, comme le fort héritage colonialiste exercé par les pays européens, l'extermination des Amérindiens et la déportation de plusieurs millions d'esclaves d'Africains. Rappelons également que le terme de « Caraïbe » est lui-même exonyme à la région, il provient du nom donné aux peuples autochtones par les colons, « *Karib* » (Cruse, 2012). Certains auteurs parlent d'un espace pluriel à « *géométrie variable* » (Cruze, *ibid.*) où règne « *de la diversité, voire de la division* » (Bégot *et al.*, 2001). Desse (2013) s'interroge d'ailleurs sur « *l'hypothétique unité de la Caraïbe* ». Il existe de nombreuses définitions qui renvoient à cet espace. Elles varient en fonction des auteurs et du regard qu'on lui porte : historique, économique, culturel, géographique, géologique, ce qui rend complexe la délimitation de ce territoire. A cela s'ajoute l'hétérogénéité linguistique et les nombreuses références identitaires existantes comme nous le rappellent Cruze et Saffache (2013) dans un article du Monde diplomatique : « *Comment parler de bloc régional, quand les lignes de fractures sont si nombreuses : langues différentes au sein d'un même territoire et entre les territoires, origines diverses des populations, statuts politiques différents... Pire, les Hispanophones des îles de la Caraïbe ne se considèrent que rarement comme « caribéens » (leur identité première étant « Latinos ») [...] il en est de même pour bon nombre d'habitants des îles qui sont toujours rattachées à la France.* » Pourtant d'un point de vue économique, après avoir longtemps été sous l'hégémonie américaine comme l'explique Burac (1994), les Etats de la Caraïbe tentent depuis près d'un demi-siècle de construire des accords et de structurer des coopérations (OECD, CARICOM, AEC, ALBA). Ces organisations, qu'elles soient d'ordre économique, judiciaire ou environnemental permettent de faire face aux nombreux défis auxquels ces territoires sont confrontés. Elles visent également à promouvoir le développement et d'assurer la protection des ressources à l'échelle internationale.

Comme nous venons de le voir, c'est un espace toujours en construction qui varie en fonction de l'angle de vue et de l'approche utilisée pour lui donner corps. Pour délimiter notre zone d'étude nous considérons exclusivement l'aspect géographique de l'espace « caraïbe ». Néanmoins, l'approche multiscalaire que nous souhaitons développer dans cette recherche nécessite de réaliser différents zooms pour restituer la pluralité du territoire, de la plus petite à la plus grande échelle (figure 17). Au plus vaste, notre étude prend en compte l'ensemble du bassin de la Caraïbe délimité par la mer des Caraïbes et le golfe du Mexique. Cette région étendue prend place entre 38 Etats et territoires riverains,

depuis les Etats-Unis d'Amérique au nord jusqu'aux Guyanes au sud en intégrant l'ensemble des Etats et Territoires Insulaires Caribéens (ETIC)¹⁸. Qu'elle soit anglo-saxonne, hispanique ou française, aucune définition de l'espace caribéen ne considère les Etats-Unis, et il n'existe pas de terminologie partagée pour désigner cet espace. Seul Lasserre (1974) rappelle dans l'avant-propos de « les Amériques du Centre » qu'« *il ne faudra jamais perdre de vue que les Etats-Unis pèsent de tout leur poids sur cette Méditerranée américaine ; [...]* ». Cette situation se confirme dans notre objet d'étude par la place qu'ils occupent dans le système d'alerte du tsunami et par le poids de l'économie du secteur de la croisière. Quoi qu'il en soit, notre zone d'étude est circonscrite à ce que l'on dénommera la Grande Caraïbe, intégrant l'ensemble des Etats américains qui bordent le golfe du Mexique. Cette échelle s'avère pertinente dans le cadre de notre recherche notamment pour étudier le déploiement du système d'alerte précoce au tsunami qui ne peut s'envisager qu'en initiant une démarche complémentaire entre les deux bassins (chapitre 3). Elle sera également utilisée pour l'analyse de l'exposition des navires à passagers totalement indissociable des ports américains et tout particulièrement de ceux de la Floride (chapitre 7 et 8).

La construction du modèle AEVC portera uniquement sur ce que nous appelons les ETIC. Ces ETIC correspondent à l'archipel de la Caraïbe et représentent la Caraïbe insulaire. L'archipel s'étire sur près de 4000 kilomètres (Desse, 2013), il se scinde entre les Grandes Antilles composées des îles de Cuba, Hispaniola, de Porto Rico, de la Jamaïque, et les Petites Antilles qui s'étendent des Bahamas aux îles néerlandaises d'Aruba, Curaçao et de Bonaire situées au large des côtes vénézuéliennes. Desse (2013) rappelle que « *la diversité des histoires politiques, des alliances, les ancrages aux Etats-Unis ou à l'Union Européenne composent une mosaïque insulaire où chaque territoire connaît une évolution originale* ». Gamblin (2005) explique que « *La Caraïbe insulaire est l'ensemble culturel le plus composite, chaque île formant un microcosme original forgé par les particularités historiques des apports de main d'œuvre au service des minorités européennes* ». Cette approche permet d'interroger les difficultés spécifiques rencontrées par des territoires insulaires en limitant les effets liés à la différence d'échelle et de niveau de développement des Etats continentaux. Cette entrée correspond mieux à notre approche au vu du contexte sismotectonique qui entoure cet espace et compte tenu de la plus forte probabilité d'occurrence d'un phénomène tsunamigène.

¹⁸ Certains auteurs parlent également des Antilles seulement en France ce terme est rentré dans le langage courant et désigne fréquemment les seules Antilles françaises.

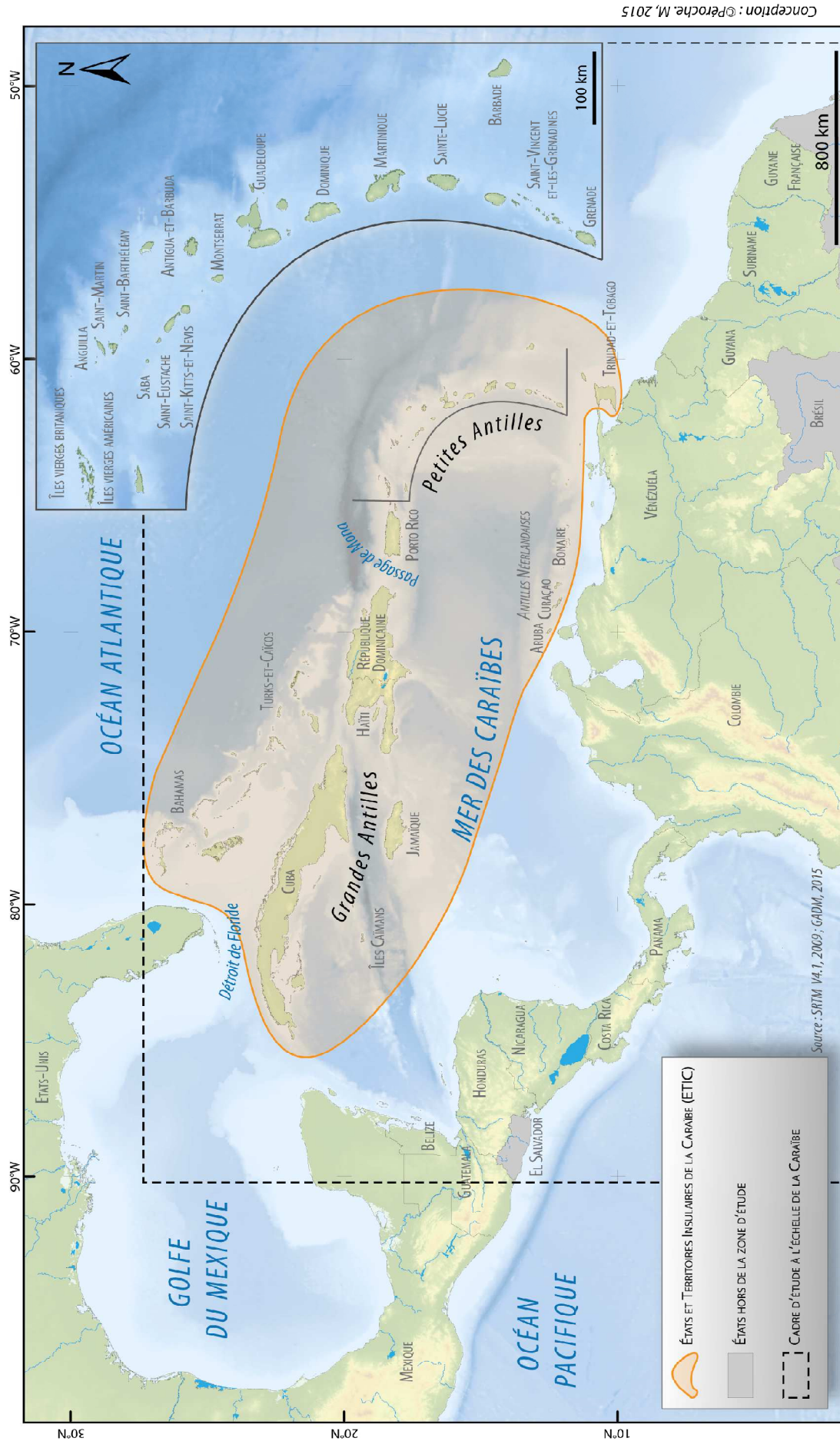


Figure 17 : Carte des zones d'étude employées, représentée à l'échelle de la Grande Caraïbe

2.2. Caractérisation multiscalaire du risque tsunami des Etats et Territoires Insulaires de la Caraïbe (ETIC) selon le modèle AEVC

2.2.1. Cadre général

A l'échelle macro-étatique, la grande hétérogénéité des ETIC de la Caraïbe rend l'identification des différentes composantes territoriales du risque tsunami particulièrement délicate. Chaque ETIC se caractérise par un système politique et économique qui lui est propre. Ils sont parfois rattachés à un pays souverain et disposent de plus ou moins d'autonomie. Plus d'un tiers des territoires insulaires de la Caraïbe dépendent de trois Etats Européens (Royaume-Uni, France, Pays-Bas) et des Etats-Unis. Leur surface, leur démographie et leur niveau de développement varient considérablement d'une île à une autre. Ces territoires disposent néanmoins de deux dénominateurs communs ; un contexte d'insularité et une exposition forte aux effets d'un tsunami. Sur les 171 événements répertoriés dans les bases de données historiques (chapitre 1), 60 % des événements connus se sont déroulés à moins de 100 km des ETIC. D'après la base de données des *run-up* historiques de la NGDC¹⁹, seules les îles d'Aruba, des Bahamas, des Caïmans et de Turques-et-Caïques sont dépourvues de témoignages historiques sur les tsunamis. L'absence de tsunamis récents à l'échelle de la grande Caraïbe ne permet pas d'évaluer des facteurs de risque par une approche rétrospective de type RETEX propre à cet aléa. Pour autant, il est possible d'identifier des facteurs génériques qui composent le modèle AEVC même si cet ensemble insulaire se caractérise par de très forts particularismes.

Au cœur des Petites Antilles, la Martinique et la Guadeloupe se distinguent des autres territoires de la Caraïbe insulaire en tant que département et région d'outre-mer (DROM) français²⁰ et bénéficient du statut de régions ultrapériphériques (RUP) auprès de l'Union européenne. Les îles du Nord (Saint-Martin et Saint Barthélémy) disposent du statut de collectivité d'outre-mer (COM) française et ont acquis une autonomie plus importante au regard des lois européennes depuis le 1^{er} janvier 2012 en tant que pays et territoire d'outre-mer (PTOM). Dans notre approche multiscalaire, nous nous intéressons plus particulièrement à notre terrain d'étude, la Martinique. Depuis sa découverte en 1496, ce département aurait connu 28 tsunamis (Accary et Roger, 2010), mais seulement un peu plus d'une dizaine sont confirmés par des témoignages historiques (chapitre 1). Selon l'emprise spatiale du zonage d'aléa tsunami figurant dans le PPR qui couvre les 27 communes littorales de la Martinique, approximativement 15 000 personnes sont exposées à ce risque en cas d'événement majeur (INSEE, 2013) et près de 66 000 résidents seraient à évacuer selon nos hypothèses de recherche et les bases de données employées (chapitre 1 et 7). Toujours selon le zonage du PPR, plusieurs bâtiments stratégiques et Etablissements Recevant du Public (ERP) seraient affectés par ce phénomène. On y retrouve des structures d'importance vitale, comme la principale centrale thermoélectrique de l'île, les infrastructures portuaires et aéroportuaires, plusieurs centres de commandement et de secours mais

¹⁹ [Consultée en novembre 2015]

²⁰ Au 1^{er} janvier 2016, la Martinique et la Guadeloupe ont acquis le statut de collectivité unique. Ces collectivités territoriales réunissent désormais les compétences du conseil départemental et régional.

également de nombreux réseaux (télécommunication, viaire, adduction, pipeline), ou bien encore des usines classées SEVESO²¹.

Nous avons identifié les principaux facteurs de risque des ETIC selon les typologies génériques proposées par d'Ercole (1994) et Leone (2007) et complétées par celles plus spécifiques aux espaces insulaires (Pelling et Uitto, 2001 ; Briguglio, 2003). Nous avons employé comme supports de recherche plusieurs travaux visant à caractériser la vulnérabilité des Etats insulaires à l'aide d'indicateurs généraux (Atkins *et al.*, 2000 ; Briguglio et Galea, 2003) ou spécifiques à la région (ECLAC, 2011). Tous considèrent les aléas naturels comme un choc exogène brutal capable de déstabiliser les territoires qui présentent à la fois une certaine vulnérabilité et capacité de résilience. A l'échelle de la Martinique nous avons utilisé des informations fournies suite à des évaluations réalisées à l'initiative des pouvoirs publics (Cour des comptes, 2011 ; Bourgeois *et al.*, 2015) mais aussi issues de travaux de recherches antérieures.

2.2.2. Les principales vulnérabilités des petits espaces insulaires

L'étude des espaces insulaires constituerait une branche, ou sous branche de la géographie, voire selon certains auteurs une science à part entière nommée : la « nissonologie » (Moles, 1982) ou « nissologie » (McCall, 1994 ; Depraeter, 2008). Les spécificités insulaires y sont interrogées même s'il existe un flou épistémologique autour de cet objet d'étude (Taglioni, 2003). En effet, plusieurs définitions sont avancées, elles varient en fonction du point de vue des auteurs, des organismes ou encore de l'objet d'étude qui y est associé ; elle est également évolutive dans le temps (Taglioni, 2006). En 1958, l'ONU définit l'île comme « *une étendue naturelle de terre entourée d'eau qui reste découverte à marée haute* », cette définition très vaste n'entrera en vigueur qu'en novembre 1996. Selon Taglioni (2006) deux critères sont à prendre en compte pour définir les petits espaces insulaires : la superficie du territoire et sa taille de population. Nous retenons donc comme définition « *des terres entourées d'eau de tous côtés, d'un seul tenant, dont la superficie est inférieure à 11 000 km² et la population inférieure à 1,5 millions d'habitants*²² » (*ibid.*). Mais dans le cadre de notre terrain d'étude cette caractérisation s'avère trop restrictive car plusieurs îles des grandes Antilles dépassent ces seuils théoriques. Nous avons donc fait le choix d'intégrer les îles des Grandes Antilles parmi ces espaces, non pas du fait de leur unité physique et de leur démographie mais pour leur similitude en termes de développement socioéconomique (AFD, 2013).

La Caraïbe insulaire compte 30 îles dont 9 États indépendants et 21 territoires sous tutelles ou rattachés à une métropole. Au sein de cet ensemble, 16 d'entre eux²³ sont définis en tant que Petits Etats Insulaires en Développement (PEID) ou *Small Island Developing States* (SIDS) en anglais.

²¹ Sites industriels présentant des risques d'accidents majeurs

²² « La limite de 1,5 million est celle retenue par la Banque mondiale pour définir les petits États, sous-entendu les petites économies. La limite de 11 000 km² permet d'inclure l'archipel des Fidji et sa plus grande île qui est Viti Levu (10 531 km²). La limite inférieure de l'île, en deçà de quoi l'on entre dans la catégorie de l'îlot et de l'îlet, sera subordonnée au fait qu'elle soit ou non habitée » (Taglioni, 2006).

²³ Antigua-et-Barbuda, Bahamas, Barbade, Belize, Cuba, Dominique, Grenade, Guyana, Haïti, Jamaïque, République Dominicaine, Sainte-Lucie, Saint-Kitts-et-Nevis, Saint-Vincent-et-les Grenadines, Suriname, Trinité-et-Tobago.

Ils se caractérisent « par une vulnérabilité marquée, c'est-à-dire à la fois par une plus grande exposition aux différents chocs exogènes mais également par une plus faible capacité d'absorption de ces chocs, ce qui menace chroniquement la durabilité de leur croissance » (AFD, 2013). A partir de cette typologie, les PEID sont reconnus comme un groupe à part entière pour la première fois par les Nations Unies lors de la Conférence mondiale sur l'environnement et le développement qui s'est tenue à Rio de Janeiro en juin 1992²⁴. Ils représentent donc 53 % des îles de la Caraïbe. Ainsi, les ETIC qui comprennent ces 16 PEID présentent à la fois des caractéristiques communes en termes de vulnérabilité, en particulier face aux aléas naturels mais sont pluriels dans leur développement socio-économique et leur forme politique.

2.2.2.1. Une vulnérabilité économique hétérogène

A des degrés différents, plusieurs variables caractérisent la vulnérabilité des ETIC : une faible diversification de leur économie, la concentration des exportations sur un petit nombre de secteurs, un accès restreint aux capitaux étrangers, un marché intérieur réduit. Nous relevons notamment deux contraintes majeures : des ressources naturelles locales faibles qui obligent à une plus grande part d'importation, des possibilités de substitution des importations limitées et donc une forte dépendance aux commerces extérieurs étant donné la faiblesse du marché intérieur. Ces contraintes sont plus ou moins renforcées en fonction de leur isolement géographique et corollairement de leur dépendance vis-à-vis des liaisons aériennes et maritimes.

L'importance et la nature des enjeux exposés aux tsunamis sont variables pour chacun d'eux, en fonction du type de développement économique engagé. Historiquement centrée sur une culture de plantation, leur principale économie était ou est encore largement tournée vers les exportations agricoles. Que ce soit une économie à dominante primaire ou tertiaire, les activités qui la composent risquent d'être fortement impactées en cas de tsunami. Le secteur agricole est soumis à l'aléa tsunami par des effets indirects. En effet, même si l'agriculture de plantation (banane et canne à sucre) se concentre principalement à l'intérieur des terres sur les hauteurs, hors d'atteinte des tsunamis, ce sont les infrastructures portuaires et aéroportuaires qui en l'absence de mesures de mitigation risquent de subir des dommages importants, perturbant durablement le trafic. Les activités liées au tourisme quant à elles occupent désormais une part importante voire essentielle dans certaines économies nationales. Ce secteur peut représenter jusqu'à 70 % des revenus économiques des ETIC comme pour Antigua et Barbuda (Lewsey *et al.*, 2004). Ainsi, l'économie touristique sera elle aussi perturbée en profondeur autant par des dommages directs (installations hôtelières) qu'indirects (destruction des terminaux à passagers dans les ports, dégradation environnementale, image idyllique dégradée).

On sait que les pertes économiques liées aux aléas naturels sont proportionnellement très élevées par rapport à la dimension économique nationale des espaces insulaires. Plus la superficie d'un Etat est faible et/ou sa population petite, plus grands sont les effets macro-économiques et durables d'une catastrophe dans le temps (Charvériat, 2000). L'UNISDR (2015) rappelle dans son rapport annuel que : « *For small island developing states (SIDS), future disaster losses represent an existential threat. For*

²⁴ Source : www.un.org/fr/events/islands2014/smallislands.shtml

example, compared to Europe and Central Asia, SIDS are expected to lose on average 20 times more of their capital stock each year in disasters. The expected annual losses in SIDS are equivalent to almost 20 per cent of their total social expenditure, compared to only 1.19 per cent in North America and less than 1 per cent in Europe and Central Asia.” C’est bien la capacité de résilience à moyen et long terme de certaines sociétés insulaires caribéennes qui est questionnée, compte tenu entre autres de leur situation économique. Toutefois, elle est à pondérer notamment en fonction des liens historiques et des statuts territoriaux particuliers qu’elles occupent. Certains territoires entretiennent des relations privilégiées avec les anciennes ou les actuelles tutelles politiques. Par exemple, la Martinique en tant que département et région d’outre-mer français bénéficie du soutien métropolitain en matière de forces armées et de sécurité mais également de renforts médicaux. Ces ressources sont primordiales pour assurer un retour rapide à la normale du fonctionnement économique et social de l’île. Ces aides structurelles acquises de par l’histoire politique sont à distinguer des rémittences. En effet, au cours de l’Histoire plusieurs vagues de migration vers l’Amérique centrale, l’Amérique du nord et l’Europe ont eu lieu (Samuel, 1996). La République Dominicaine, La Jamaïque et Haïti sont par ordre décroissant les Etats qui ont le plus connu cette immigration. Dans le cas d’Haïti par exemple, cela a généré une rente qui participe à hauteur de 19 % environ au PNB. Ainsi, suite au séisme d’Haïti en 2010, une très forte augmentation des rémittences a été observée (Madonado et Hayem, 2015). Elles ont permis de relever plus rapidement l’économie du pays suite à la catastrophe et ont contribué à l’accroissement des capacités de résilience, même si Haïti demeure encore le pays le plus pauvre de cette région et présente l’IDH le plus bas.

2.2.2.2. Des niveaux de développement humain contrastés

En 2013, la sous-région Amérique Latine et Caraïbe possède la valeur d’indice de développement humain le plus élevé au regard des cinq autres grandes régions du monde²⁵ (UNDP, 2014). Cet Indicateur de Développement Humain (IDH) tente de mesurer le niveau de développement d’une population sans tenir compte exclusivement du PIB/habitant. Il est donc calculé à partir de trois types de données : la longévité ou l’espérance de vie à la naissance, l’alphabétisation, l’accès aux ressources nécessaires pour jouir d’un niveau de vie convenable²⁶. Au sein des ETIC et des PEID en particulier, derrière ces chiffres qui sont des valeurs synthétiques se cachent de fortes disparités. En effet, certains Etats ont un niveau de développement bas, voire très bas comme en Haïti où le pourcentage de population vivant sous le seuil de pauvreté est très élevé, dépassant les 40 % avec un IDH de 0.483 le situant au 160^{ème} rang du classement mondial et dernier des PEID, alors que les Bahamas culminent avec un IDH de 0.790. L’analyse de la distribution socio-géographique des victimes mondiales révèle que le niveau de pauvreté est la première cause profonde de vulnérabilité (Leone et Vinet, 2006). Cela s’avère particulièrement vrai dans la Caraïbe où « *il semble y avoir entre les îles riches françaises et américaines et le reste la Caraïbe une fracture semblable à celle qui existe entre le Nord et le Sud de la planète* » (Dehoorne et Joseph, 2004). La représentation spatiale de cette disparité est complétée par l’analyse des catastrophes entre 1972 et 2001 dans le bassin de la Caraïbe réalisée par D’Ercole (2003). Elle nous éclaire sur la relation qu’il existe entre leur degré d’impact et le niveau de développement des

²⁵ Etats Arabes, Asie de l’Est et du Pacifique, Europe et Asie Centrale, Asie du Sud et Afrique Sub-saharienne.

²⁶ http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_1990_fr_complet_nostats

Etats. « *Cette relation dans l'ensemble forte, est très étroite pour près de la moitié des pays de la région (16 sur 34)* », l'exemple le plus flagrant étant Haïti. Mais pour les autres, apparaissent des distorsions dans cette relation du fait de nombreux facteurs tels que la fréquence ou la puissance dévastatrice des événements mais aussi le degré de préparation face aux risques naturels (plan de prévention, qualité du bâti, etc.)

La Martinique, quant à elle figure dans la catégorie majoritaire où il existe une relation étroite entre l'impact des catastrophes et le niveau de développement. Elle bénéficie du cadre législatif national français en matière de droit social et de protection des personnes. L'ensemble des lois de la métropole et des directives européennes relatives à la prévention des catastrophes s'y appliquent. Cette réglementation, gage de sécurité, assure un niveau de développement économique et social élevé à la population martiniquaise, comparé à d'autres ETIC. Mais l'éloignement, le contexte historique et culturel sont autant d'éléments qui freinent la mise en œuvre locale de ce corpus juridique. A cela, s'ajoute parfois la faible prise en compte des DROM par les administrations centrales de l'Etat (Bourgeois *et al.*, 2015). Pourtant, ces territoires connaissent les risques naturels les plus nombreux et les plus dangereux (Cour des comptes, 2011) et notamment l'aléa tsunami. Même si l'île de la Martinique est également affectée par des difficultés sociales accrues par rapport à la situation en métropole, elle n'en demeure pas moins une région monodépartementale française. A ce titre, elle dispose de moyens élargis tels que par exemple, la conduite de recherches scientifiques comme celle menée dans cette étude.

2.2.2.3. Une sensibilité variable face aux aléas naturels

En termes de risques naturels, le bassin de la Grande Caraïbe est une zone globalement très affectée tant dans la fréquence des événements que dans leur ampleur. Pour la période qui s'étend de 1972 à 2001, D'Ercole (2003) constate de grandes disparités du point de vue des espaces : « *en Amérique centrale ont été recensés le plus grand nombre d'événements et de morts alors que les Etats-Unis et bien des îles des petites Antilles ont subi de nombreux événements mais ont peu de victimes* ». Certaines catastrophes ont touché tout ou partie d'un état, tel qu'Haïti (séisme de magnitude Mw 7.3 le 12 janvier 2010) ou encore la Guadeloupe (cyclone tropical Hugo en 1989, catégorie 5 sur l'échelle de Saffir-Simpson). Tous doivent faire face à des dégâts matériels importants mais les pertes subies au cours de ces événements impactent inégalement les états. En effet, toutes les sociétés n'entretiennent pas le même rapport face aux risques naturels, et de ce fait ne s'y préparent pas de la même manière. Ce qui est un drame pour l'un est vécu comme une fatalité pour l'autre. C'est ainsi que « *certaines intègrent, non sans difficulté, les risques majeurs dans leurs outils de planification en termes de plans de prévention (ex les Antilles françaises, la Colombie ou Cuba) d'autres subissent les effets de phénomènes (Haïti, les Antilles anglaises en général, l'Amérique centrale)* » (Dehoorne et Joseph, 2004).

En France, les PPR sont des documents de référence en matière de gestion des risques naturels. Concernant le département de la Martinique, un PPR tsunami a été établi en 2014. Cette récente intégration de l'aléa tsunami en tant que risque à part entière est matérialisée par un zonage défini suite aux travaux initiés par le BRGM en 2007 (chapitre 1). Malgré cela, les caractéristiques de cet aléa au sein du bassin caraïbe, restent peu détaillées. C'est d'ailleurs ce que rappelle Courteau (2007) dans

son rapport : « *L'étude du BRGM sur l'exposition des côtes françaises en Méditerranée et aux Antilles constitue un premier pas. Toutefois, selon les informations obtenues par votre rapporteur, les zones retenues et les séismes qui y ont été associés ne recueillent pas l'unanimité dans la communauté scientifique. Les travaux de recherche visant à préciser les zones exposées au risque de tsunami doivent donc être poursuivis* ». Dans cet extrait du rapport, c'est le manque de connaissances fiables des scénarios d'impact concernant l'aléa tsunami dans le bassin caraïbe qui est souligné. De plus, en Martinique on observe une forte inertie dans la mise en œuvre de la réglementation en général, et de la politique de prévention du risque de submersion rapide, en particulier. Les PPR approuvés sont peu respectés, les contrôles des permis de construire sont peu nombreux et la construction illégale notamment en zone littorale perdure (Cour des comptes, 2011 ; Bourgeois *et al.*, 2015). Cette situation concerne l'ensemble des départements d'Outre-Mer français, elle s'explique la plupart du temps par l'instabilité administrative due à ce que l'on appelle le « *turn over* » des hauts fonctionnaires (*cf.* encadré 2) ainsi qu'à un manque de moyens humains pour la mise en œuvre du contrôle de l'égalité des décisions d'urbanisme (Bourgeois *et al.*, 2015).

On constate aujourd'hui une forte implication de la part des institutions locales notamment martiniquaises dans le cadre de la mise en place du système d'alerte précoce tsunami dans la Caraïbe. Les fréquentes réunions de l'ICG/CARIBE-EWS auxquelles participent une délégation française constituée le plus souvent d'organismes comme l'EMIZA, l'OVSM, le Conseil Général et le Conseil Régional montrent la volonté d'instaurer un dialogue durable entre opérationnels, scientifiques et élus dans le but d'améliorer la gestion de cet aléa. Il est vrai que l'exiguïté des territoires offre un degré d'interconnaissance favorable entre l'ensemble de ces acteurs facilitant la concertation et la mise en œuvre d'actions communes comme la recherche de financements ou encore la préparation aux exercices régionaux de gestion de crise tsunami « *Caribe Wave* ». Ces efforts et ces avancées peuvent néanmoins être freinés en l'absence de moyens financiers qui émanent généralement de fonds nationaux et européens. A titre d'exemple, les budgets et les équipements alloués aux centres de secours de Martinique sont insuffisants, voire inexistantes. Aujourd'hui, la capacité de prise en charge des victimes au sein des établissements de santé serait limitée à 10 voire à 20 urgences absolues et entre 30 et 40 urgences relatives en 6 heures (ARS, 2011). De plus, à cette insuffisance de prise en charge des victimes s'ajoute l'incertitude, quant à la capacité des principaux établissements de santé, à résister à un séisme (*ibid.*).

Encadré 2. La prévention des risques naturels, une action institutionnelle dont la pérennité peut être mise à mal par le turn-over des fonctionnaires dans les DROM-COM

Le millefeuille institutionnel que constitue l'administration française se retrouve exacerbé à l'échelle insulaire. Cette région monodépartementale concentre des services aux effectifs réduits dont le bon fonctionnement repose souvent sur le chef de service. La durée d'une mutation d'un agent de l'Etat est de deux fois deux ans, si ce dernier souhaite renouveler son contrat. Ces quatre années suffisent à peine à construire des relations de confiance solides, gage d'une collaboration effective, et à intégrer l'ensemble des problématiques liées à ce territoire si particulier. Même si ces changements successifs peuvent avoir un certain avantage, il n'en demeure pas moins un inconvénient tant le

réapprentissage des dossiers est long. C'est une problématique profonde qui joue un rôle déterminant sur les actions à mener sur le territoire.

La version numérique du journal local « Le Quotidien », de l'île de la Réunion, propose un courrier de lecteur en date du 20 septembre 2010 qui reporte avec justesse les méfaits du « turn-over » : « Lorsqu'une situation se fige, la créativité l'abandonne, mais quand une situation change tout le temps sans répit, nous entrons dans un tournis sans fin et au final improductif. Il n'y a pas que les cyclones et la lave volcanique qui sont dévastateurs [...]. Dans l'analyse succincte qui va être énoncée, ce ne sont pas des hommes ou des femmes précis qui sont visés, mais un système d'entropie négatif qui génère trop souvent de l'improductivité. La première année, le nouveau dirigeant ou fonctionnaire arrive et s'installe. La seconde, il découvre le système de fonctionnement. La troisième année, il le comprend... et bien souvent critique à demi-mot son prédécesseur. Et lorsqu'arrive le temps de la productivité, il se prépare à partir... Ce qui fait que dans notre île lointaine, le « turnover » des fonctionnaires, dont certains sont pourtant méritants, nous oblige à chaque fois à refaire le monde et à réexpliquer le fonctionnement général et particulier. C'est parfois un bien mais le plus souvent, un handicap ».

2.2.3. Un littoral saturé d'enjeux

Entre 1950 et 2002, la population des ETIC a augmenté de 125 %, soit un taux moyen d'accroissement annuel de 1,6 % (INSEE, 2004). Aujourd'hui, les ETIC concentrent 15 % de la population de la grande Caraïbe sur seulement 4,5 % de cet espace. La densité moyenne y est d'environ 200 habitants/km² (Guzman *et al.*, 2007). Elle est parfois très élevée sur certaines îles, comme à la Barbade avec 661 habitants/km² ou encore à Porto-Rico avec 415 habitants/km². *A contrario*, les îles Turques-et-Caïques ainsi que les Bahamas ne dépassent pas les 40 habitants/km² ²⁷.

Historiquement dans les ETIC, les zones les plus peuplées se concentrent en bordure littorale et à proximité des grands ports maritimes. La pression foncière est considérable sur les espaces littoraux qui présentent une meilleure attractivité économique en général et touristique en particulier. Elle y est exacerbée dans les ETIC de faibles superficies du fait des besoins en termes de développement *soutenu* « par les avantages fiscaux [...] devenus dans les années 1980, le principal facteur de stimulation de la croissance économique » (Duvat, 2008). Ainsi, le développement urbain, touristique, commercial le long des côtes, sur les mangroves ou la mer se fait au prix de dégradations environnementales importantes (Lewsey *et al.*, 2004). La croissance démographique associée à une urbanisation littorale, participe amplement à l'augmentation de la quantité d'enjeux humains exposés à l'aléa tsunami.

S'ajoute également un facteur démographique, puisque la plupart des Etats sont en cours ou en fin de transition démographique, comme l'île de Cuba ou la République Dominicaine. Ces Etats, en phase post-transitionnelle, subissent les effets du vieillissement de la population avec un pourcentage de population âgée de plus de 65 ans. Ce phénomène va s'accroître d'ici à 2020 compte tenu du recul de la fécondité pour certains ETIC (Guzman *et al.*, 2007). Seule Haïti débute sa transition démographique. Or, on sait que la distribution du nombre de victimes est largement supérieure pour les populations âgées de plus de 60 ans (Goto *et al.*, 2012 ; Murakami *et al.*, 2012). En Martinique, le phénomène de dépendance, d'incapacité ou de limitation fonctionnelle dans les déplacements et le

²⁷ Source : Département de l'économie et des affaires sociales des Nations Unies – 2015 Revision of World Population Prospects - <http://esa.un.org/unpd/wpp/>, consulté en ligne en février 2016

vieillesse de la population peuvent représenter de réelles difficultés en cas d'évacuation si cette contrainte n'est pas prise en compte par les acteurs de la gestion de crise. En effet, « *le vieillissement de la population va s'accroître puisqu'il y aura, en 2040, 169 000 personnes de 60 ans et plus dont 52 000 de plus de 80 ans soit 12% de la population totale* » (Henry, 2012).

2.2.4. Une gestion délicate de l'occupation du sol

L'exode rural qui a débuté dans la Caraïbe depuis les années 1950 a entraîné l'urbanisation rapide de grandes agglomérations de la Caraïbe comme Port-au-Prince (Haïti), Saint Domingue (République dominicaine) ou encore Fort-de-France, jusqu'à une sururbanisation (Gravel, 2009). L'habitat de fortune s'y développe sur des zones particulièrement exposées aux aléas naturels comme sur de fortes pentes (glissement de terrain, associé ou non à de la sismicité) et sur les littoraux (submersion marine) et favorisant l'exclusion sociale des habitants. Cet habitat construit à la périphérie proche des grandes villes est qualifié par Letchimy et Bazadas (1992) de « mangrove urbaine » en référence à leur situation littorale mais également au développement d'un tissu social particulier basé sur l'entraide. Ces constructions particulièrement exposées à l'aléa tsunami sont également très vulnérables car construites sans plans d'architecte et de manière illégale avec des matériaux de faible résistance²⁸. Leur vulnérabilité individuelle est accrue par l'absence d'assurance personnelle (Cruse, 2010).

Dans le cas des Etats les plus pauvres (PEID), le phénomène de paupérisation se traduit sur le terrain par des discriminations spatiales, souvent visibles dans le paysage urbain. Les habitants les plus pauvres s'installent de manière anarchique sur des espaces à risque comme dans les mangroves, sur les fortes pentes ou sur des terrains gagnés sur la mer (figure 18). Ces personnes vivent dans des conditions d'une extrême précarité en marge de toute organisation socio-politique. Au cœur de certaines entités caribéennes dont le niveau de développement est faible, il est fréquent que « *les pauvres non-solvables, les sans-droits se concentrent au sein des zones insalubres, des friches urbaines, en périphérie des zones marginales, naturellement vulnérables [...] caractérisées par ses habitats précaires et hétéroclites, composés de matériaux de récupération* » (Dehoorne et Joseph, 2004). Il s'agit là de questions juridiques et politiques qui, si elles ne font pas l'objet d'une prise en compte et d'une réglementation rigoureuse, s'avèrent être des facteurs indirects mais majeurs dans l'amplification des risques.

²⁸ Ils proviennent parfois de l'extraction sauvage de matériaux de construction directement prélevés le long du littoral. En plus d'exacerber l'érosion littorale et le recul du trait de côte, ces matériaux, sans traitements spécifiques, sont de mauvaise qualité pour la construction, exacerbant leur vulnérabilité structurelle.



Figure 18 : Images satellites de terrains gagnés sur la mer (trois hectares en 14 ans) et occupés illégalement par des habitations de fortune (Port au Prince, Haïti) (source : Google Earth Pro)

Mais cette situation ne concerne pas exclusivement les « ghettos ». En effet, l'habitat se concentre principalement dans les plaines et villes littorales²⁹. Cette littoralisation engendre une exposition directe de l'habitat mais aussi des infrastructures face au tsunami. A titre d'exemple, de nombreux aéroports sont installés en bordure littorale sur le pourtour du bassin caribéen. Leur exposition directe face à l'aléa tsunami peut entraîner de graves répercussions au-delà de la simple zone exposée (risque indirect). Les Petits Etats Insulaires sont majoritairement isolés, c'est une évidence, mais en cas de crise cela devient une des caractéristiques majeures de leur vulnérabilité (Cours des comptes, 2011). De fait, les liaisons avec l'extérieur sont une priorité mais les liaisons internes sont également importantes. Or la vulnérabilité dans la structure du maillage territorial (centre de secours, hôpitaux, réseau de transport, réseau de communication) est souvent élevée. De nombreux problèmes d'accessibilité existent notamment sur les axes routiers alors que le parc automobile ne cesse d'augmenter. Généralement les grands axes routiers sont de bonne qualité mais ils sont peu nombreux et souvent encombrés. Il est difficile de prévoir des itinéraires *bis* pour palier des dysfonctionnements éventuels, au vu de l'état souvent précaire du réseau routier secondaire. Dans la plupart de ces territoires, on peut également noter l'absence de redondance des réseaux vitaux (électriques, fibre internet, etc.). En cas de coupures de ces réseaux leur isolement serait accru. La problématique de la qualité de la connexité propre à chaque île et inter île, est tangible dans la majorité des ETIC, dont la Martinique.

A propos de l'habitat en Martinique, on retrouve également des situations détériorées. Les difficultés économiques locales ont été compensées par des politiques fiscales particulières comme dans un certain nombre d'ETIC. En facilitant notamment la construction sur le littoral, sous prétexte de soutenir l'économie de l'île, on assiste à un développement anarchique des bâtiments. Le littoral martiniquais est un espace qui connaît encore aujourd'hui de fortes pressions urbanistiques (Desse, 2013). On voit alors fleurir les constructions d'habitation sans titre de propriété sur le Domaine Public Maritime (DPM). Néanmoins, des programmes de régularisation voient le jour pour pallier ces importants problèmes de gestion de l'occupation du sol, et obtiennent actuellement des résultats

²⁹ Les îles de petites tailles s'organisent majoritairement autour de capitales ports. Les îles de moyenne et grande taille voient leur réseau urbain s'étoffer autour de villes portuaires secondaires de moyenne importance.

plutôt encourageants pour l'avenir. Il existe notamment un financement pour la relocalisation dans le cas des habitations construites en « zone de menace grave pour les vies humaines » auquel s'ajoutent les opérations de Résorption de l'Habitat Insalubre (RHI) et les indemnités versées directement aux particuliers mises en place au titre de l'Article 6 de la Loi Letchimy. Nous avons vu cependant qu'il existe un document, le PPR, qui régit par un zonage réglementaire les constructions en zones à risques. Dans la cartographie réglementaire, l'aléa tsunami est matérialisé par des zones jaunes. Les prescriptions qui s'y appliquent sont les suivantes : « *Pour tous travaux ou aménagements (réhabilitation, extension, reconstructions et changement de destination d'un bâtiment, construction nouvelle), sur des constructions individuelles ou des bâtiments recevant du public et des logements collectifs :*

- *l'obligation de créer un étage ou un toit refuge en tant que zone d'attente de secours, hors d'eau ;*
- *l'obligation de créer un accès direct entre toutes parties inondables et le niveau refuge ;*
- *les sous-sols et les caves sont interdits et il est recommandé de minimiser les ouvertures en façade directement exposées aux vagues. » (DEAL Martinique, 2015)*

Il s'agit là de mesures habituellement prescrites face à l'aléa inondation et submersion par vagues de tempête. Elles ne comprennent aucune mesure réglementaire restrictive en termes de résistances des bâtiments spécifiques aux forces d'impact d'un tsunami (chapitre 5) et pire encore, elles laissent entendre que l'accès à un étage représente un site refuge en cas de tsunami. Or dans le cadre de notre hypothèse d'évacuation (zone à évacuer comprise entre 0 et 10 m d'altitude) et en application du guide des évacuations verticales de la FEMA (FEMA, 2008), une évacuation verticale en Martinique devrait s'effectuer au moins au 5^{ème} étage des bâtiments.

2.2.5. Une capacité d'adaptation à améliorer par une intégration régionale des ETIC

De nombreuses structures de coopération régionale ont été créées depuis les années 1970 tel que le CARICOM, acronyme de *Caribbean Community*. Leur dimension à l'échelle du bassin caribéen est pertinente notamment face à l'aléa tsunami, car en cohérence avec l'emprise spatiale du phénomène. Dans plusieurs de ces organisations figure un volet environnemental qui intègre la gestion des risques naturels, c'est le cas également de l'Organisation des Etats de la Caraïbe Orientale (OECS) et l'Association des Etats de la Caraïbe (AEC). La CDERA (*Caribbean Disaster Emergency Response Agency*) a été créée par le CARICOM en 1991 puis transformée en CDEMA (*Caribbean Disaster Emergency Management*) en 2009. Il s'agit d'une organisation entièrement destinée au transfert de connaissances et au partage d'informations sur les risques naturels qui œuvre pour faciliter la coordination de gestion de crise. Le FEDER quant à lui finance le déploiement de certains équipements utiles à la détection et à l'observation des tsunamis dans la région. En 2007, sous l'égide de la Banque Mondiale, la réassurance par le *Caribbean Catastrophe Risk Insurance Facility* (CCRIF) a été créée, toujours dans le cadre de la CARICOM. Ce fond d'assurance intervient financièrement pour limiter l'impact économique suite à des catastrophes naturelles. Ces indemnités permettent d'éponger en partie les pertes financières consécutives aux catastrophes naturelles.

Le regroupement d'Etats pour la création d'organisations de coopération apporte une capacité de résilience accrue au niveau régional permettant de mieux absorber les conséquences des catastrophes naturelles. C'est dans cet objectif, entre autres, que la Martinique est devenue membre associé de l'OECD depuis février 2015. En effet, les domaines d'activités prioritaires de cette organisation sont le commerce, le transport, le développement durable et notamment la gestion des catastrophes naturelles. En parallèle de ces regroupements régionaux, certains Etats développent des stratégies nationales qui identifient des chantiers de développement avec également un volet environnemental pour la prévention des catastrophes : République dominicaine, Trinité et Tobago, Jamaïque Saint Vincent et les Grenadine (AFD, 2013). La Martinique en tant que territoire français a accès à des sources de financements européens (INTERREG et FEDER). Ces leviers financiers doivent permettre de conduire des programmes de recherche et de financer des investissements. Au cours de ces dernières années, plusieurs projets en lien plus ou moins étroits avec l'aléa tsunami ont vu le jour. Il s'agit des programmes INTERREG CARIBSAT et TSUAREG qui sont développés en partenariat avec d'autres territoires insulaires de la Caraïbe.

La menace tsunami dans le bassin caribéen est très récemment prise en compte aussi bien par les autorités que par les populations. Courteau (2007) en fait d'ailleurs état dans son rapport, il confirme que : *« la prise en compte du risque de tsunami par les autorités de la protection civile est très récente. Certes, il s'agit d'un risque connu, mais compte tenu des difficultés déjà rencontrées pour gérer les risques les plus présents dans la conscience collective (cyclones, séismes, volcans), l'aléa tsunami n'était pas considéré jusqu'à présent comme une priorité »*. En 2005, l'idée de mettre en place un dispositif d'alerte tsunami dans chaque bassin de risque raisonne comme une nécessité évidente et s'impose au niveau mondial à la suite du tsunami du 26 décembre 2004 dans l'Océan Indien. Ces systèmes d'alerte seront déployés sous l'égide de l'UNESCO à l'ensemble des bassins de risque concernés. Malgré une certaine latence de la part des Etats caribéens, la mise en place d'un système d'alerte précoce tsunami dans le bassin voit le jour en 2006. Il offre à tous les ETIC la possibilité de recevoir des messages d'alerte diffusés par le PTWC. Dans les ETIC, les temps disponibles pour l'alerte aux populations en cas de tsunami sont très courts. L'alerte descendante doit donc se faire au moyen de systèmes automatisés performants. Il est de la responsabilité de chaque Etat de mettre en œuvre la chaîne descendante de l'alerte à destination des populations. Néanmoins, le *Caribbean Tsunami Information Center* (CTIC) travaille sur les éléments de prévention de manière à harmoniser l'information à l'échelle du bassin. Cela permettrait par exemple, de mettre en place une concertation commune pour établir un affichage harmonisé du risque sur le terrain et/ou concevoir des plaquettes d'information graphiquement uniformisées et traduites en plusieurs langues (chapitre 3).

Les connaissances scientifiques sur les sources tsunamigènes et leur impact potentiel sur les côtes sont encore limités sur le bassin et sont sujet à débats. Ainsi, seuls quelques Etats insulaires disposent d'une cartographie des zonages d'inondation théorique en cas de tsunami comme à Porto-Rico. Il s'agit pourtant de documents indispensables qui contribuent à sensibiliser les autorités locales autant que les populations. Sans une connaissance plus approfondie sur le phénomène dans la région et sur ses conséquences probables, il semble encore difficile de faire accepter une planification d'aménagement qui tienne compte de cet aléa tant les contraintes réglementaires seraient importantes. Dans l'attente d'une connaissance plus fine de l'aléa, la limitation des enjeux en zone littorale doit se calquer sur des

règlements déjà existants, propres à d'autres problématiques littorales comme celles liées aux houles cycloniques ou au changement climatique. En France, le Plan de Submersion Rapide (PSR) est un document élaboré en vue d'assurer la sécurité des personnes dans les zones exposées aux phénomènes brutaux des submersions rapides. Il a été mis en place à la suite des événements tragiques survenus lors de la tempête Xynthia en 2010 et des inondations dans le Var en 2011. Cependant, ce plan a été très peu mobilisé dans les départements d'Outre-mer où l'aléa tsunami n'est pas intégré au risque de submersion rapide (Henry, 2012).

2.2.6. Une forte exposition de l'activité touristique

Le tourisme est un secteur d'activité économique incontournable de la Caraïbe (Dehoorne et al, 2009). Le nombre d'emplois directs et indirects créé par cette activité dans la région en 2014 est estimé à plus de 2.2 millions d'emplois et produit une richesse de 51.9 milliards de US\$ soit 14.6% du PIB régional (WTTC, 2015). Il représente une manne financière importante puisque s'y concentre 11.4 % du marché touristique mondial (CTO, 2015) que les ETIC captent avec plus ou moins de facilité en fonction de leur isolement par rapport aux marchés émetteurs (Dehoorne et Tafani, 2012). En 2015, le nombre d'arrivées dans la région a augmenté de 7 %, soit 3 % de plus qu'au niveau mondial (*ibid.*). Voici quelques exemples qui permettent d'illustrer cette croissance : Haïti + 11 % ; Barbade et Aruba + 15 % chacun ; Cuba + 17 % (*ibid.*). Cet engouement pour la Caraïbe se retrouve dans deux types de tourisme, le tourisme dit de séjour et celui de croisière. D'après les statistiques les plus récentes données par la *Caribbean Tourism Organisation* les ETIC ont accueilli 26.3 millions de touristes de séjour en 2014³⁰. Ces espaces insulaires sont particulièrement convoités pour leur littoral. Les besoins en termes d'accueil des visiteurs générés par ce tourisme de masse, ont pour conséquence la prolifération d'infrastructures hôtelières qui se concentrent majoritairement au plus proche du rivage des plages (Dehoorne et Tafani, 2012) et sont « *créés ex-nihilo, dans l'urgence des préoccupations économiques à court terme* » (Dehoorne et Joseph, 2004). A titre d'exemple, Magnan (2008) estime que la capacité d'accueil de l'hébergement touristique dans l'île d'Anguilla est « *localisée à près de 90 % à moins de 500 du rivage* », et que la distribution de l'hébergement touristique se calque principalement sur la présence de plages sableuses. Il s'agit pourtant des espaces les plus exposés en cas de tsunami. La probabilité de pertes humaines et structurelles y est très importante comme l'a révélé notamment le tsunami de 2004 dans l'Océan Indien (Calgaro et Lloyd, 2008). La problématique de l'exposition de l'activité touristique face à l'aléa tsunami se complexifie également compte tenu du développement sans précédent du tourisme de croisière. En 2014, la Caraïbe a accueilli approximativement 14.36 millions de croisiéristes (CLIA, 2015). Le fort trafic de paquebots dans certaines escales portuaires de croisière maritime, associé au gigantisme de ces bâtiments dont les capacités d'accueil sont toujours plus élevées, laissent craindre des difficultés majeures dans la conduite d'évacuations en cas d'alerte tsunami (chapitre 8). En effet, le grand nombre de passagers qui accostent sur une journée notamment au regard de la population locale (Wong, 2015) pose le problème de la prise en charge de ces populations. A titre d'exemple, pour les îles Vierges britanniques et américaines, les îles Caïmans et les îles Turques-et-Caïques, le nombre de touristes et de croisiéristes accueillis en 2013 représentait entre 24 et 33 fois leur population (IEDOM, 2015). Globalement, le tourisme de séjour connaît une très forte

³⁰ <http://www.onecaribbean.org/>

saisonnalité qui marque profondément la fréquentation des îles. Selon les statistiques analysées par l'IEDOM (2015) cette saisonnalité est comparable pour l'ensemble des destinations touristiques de la Caraïbe : la haute saison s'étend de décembre à avril et la basse saison de mai à novembre. Cet effet est encore plus marqué pour le tourisme de croisière. En effet, la fréquentation de nombreuses destinations des Petites Antilles est quasi nulle pour la période de basse saison en raison de l'activité cyclonique dans le secteur.

Nous proposons une synthèse des différentes composantes du risque territorialisées face à l'aléa tsunami qui ont été abordées dans cette partie au travers du modèle AEVC élaboré pour les ETIC de manière générale (figure 19). En aucun cas, il ne peut être généralisable dans son intégralité à l'ensemble des Etat et territoires qui composent la Caraïbe.

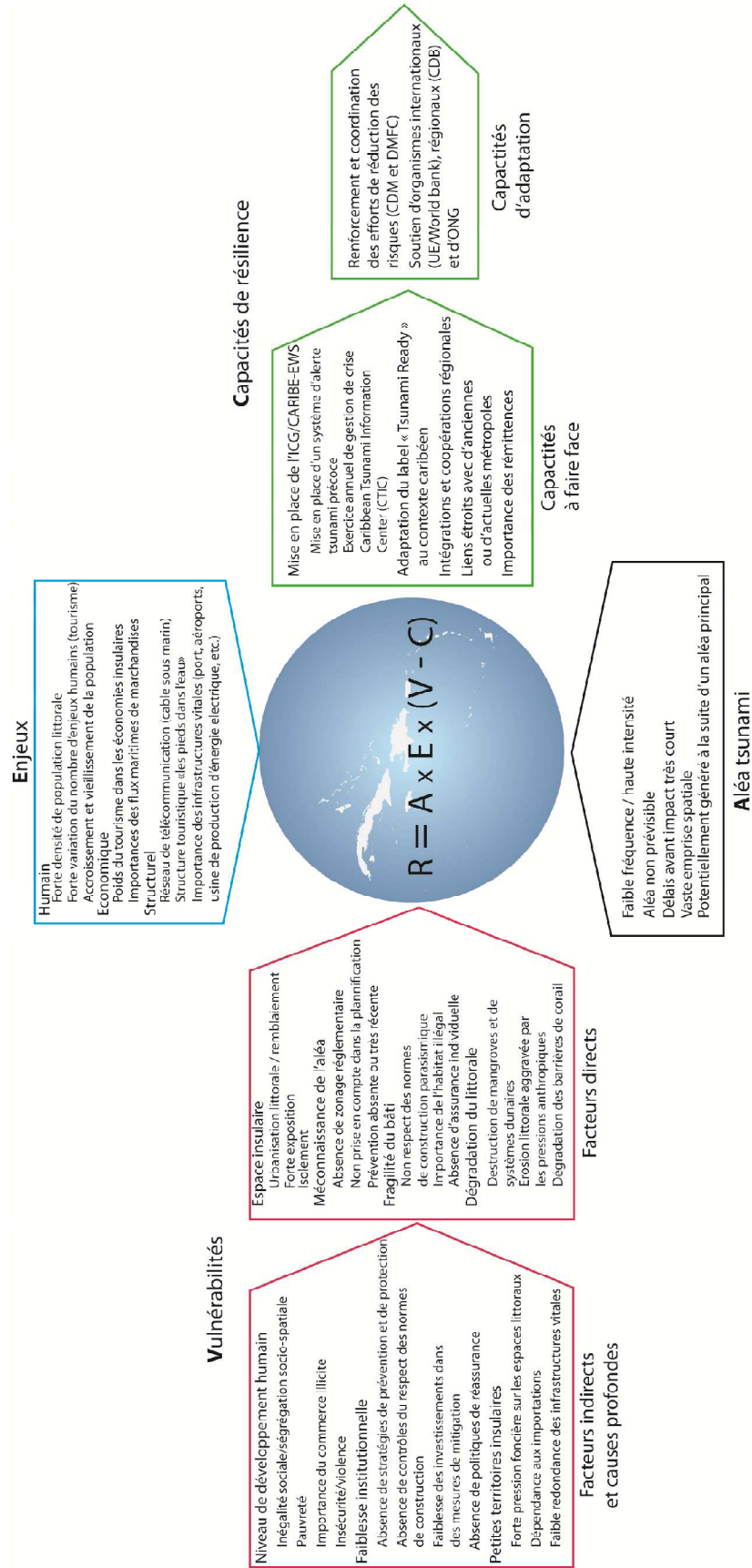


Figure 19 : Le modèle AEVIC appliqué aux ETIC face à l'aléa tsunami

2.3. Spatialiser d'éventuelles difficultés d'évacuation des populations littorales en cas d'alerte tsunami à l'échelle de la Caraïbe

2.3.1. Présentation des bases de données employées

L'accès à des données sociodémographiques spatialisées et actualisées est indispensable à la gestion des risques naturels. En période de pré-crise, elles permettent d'évaluer l'exposition des enjeux humains, voire leur vulnérabilité, et éventuellement de planifier des évacuations si la menace le justifie. Au cours de la crise, ces données peuvent fournir une estimation du niveau d'impact de l'aléa et ainsi servir à prioriser l'action des secours. L'un des exemples le plus connu au niveau mondial est celui des bulletins fournis gratuitement en temps quasi réel par le système PAGER³¹. Suite à un séisme de forte magnitude, il est en capacité de déterminer de manière automatisée la quantité de population exposée pour chaque courbe d'isoséistes (Wald *et al.*, 2011). En post-crise elles serviront à évaluer le nombre de personnes sans logement afin d'accompagner au mieux les processus de relogement temporaire et de reconstruction (Freire, 2010). Il existe plusieurs méthodes d'estimation et de caractérisation de la population : les recensements, les enquêtes, les projections, la désagrégation d'informations nationales ou infranationales ou encore des techniques combinées à des analyses spatiales (NRC, 2007). A l'échelle régionale, les données de population sont disponibles sous deux formes, soit agrégées aux limites administratives, soit agrégées sur des mailles régulières aux résolutions variables. Nous emploierons uniquement le deuxième type d'information. Il offre l'avantage de spatialiser de manière plus précise les enjeux humains toutefois, il ne permet pas de conserver les informations sociodémographiques. Certains auteurs les réappliquent à l'aide de données nationales et infranationales lorsque celles-ci sont disponibles, comme l'âge ou le sexe (Cai *et al.*, 2006). Il n'est pas possible d'accomplir cette même démarche à l'échelle de la Caraïbe tant le nombre d'Etats et de territoires est important et les sources d'informations disparates.

Nous proposons d'évaluer la quantité d'enjeux humains situés dans la zone d'évacuation tsunami théorique que nous supposons équivalente pour l'ensemble du bassin caribéen (altitude inférieure à 10 m et distance à la côte inférieure à 5 km). Deux bases de données mondiales ont été employées, toutes deux distribuées par des agences américaines au format raster. Leur résolution est approximativement équivalente à 1 km à l'équateur (30 second d'arc) et leur couverture mondiale garantit une certaine uniformité des résultats. Il s'agit des données LandScanTM, payantes depuis 2008 et celles du « Global Rural-Urban Mapping Project » (GRUMP).

- LandScanTM propose des données de population issues d'une modélisation spatiale cartographique nommée dasymétrique. Des données de recensement sont réaffectées sur le carroyage en tenant compte de plusieurs couches d'informations géographiques : l'occupation du sol, la pente ou encore les réseaux. Bien que LandScanTM propose des données réactualisées chaque année, ces données représentent une moyenne de la fréquentation des territoires sur 24h en intégrant également les mouvements collectifs et individuels (Bright *et al.*, 2009).

³¹ Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response (PAGER)

- GRUMP V1 est une base de données construite à partir des données « *Gridded Population of the World* » (GPW) de la SEDAC³². Il s'agit d'une relocalisation et d'une réaffectation des données de recensements subnationaux à partir d'images satellites nocturnes. Elles représentent la population urbaine et rurale selon une distribution nocturne.

La comparaison de la qualité des données de population entre ces deux bases de données mondiales est difficilement réalisable. D'une part, leur mode de construction et les valeurs qu'elles représentent diffèrent l'une de l'autre. D'autre part, leur vaste couverture géographique impliquerait la mise en place d'un protocole de validation long et complexe. Néanmoins localement, les données infra communales diffusées par l'INSEE sur des mailles de dimension équivalente nous servent de référence et permettent de commenter les marges d'erreur générées par l'emploi de ces deux bases de données mondiales (figure 20 et tableau 5).

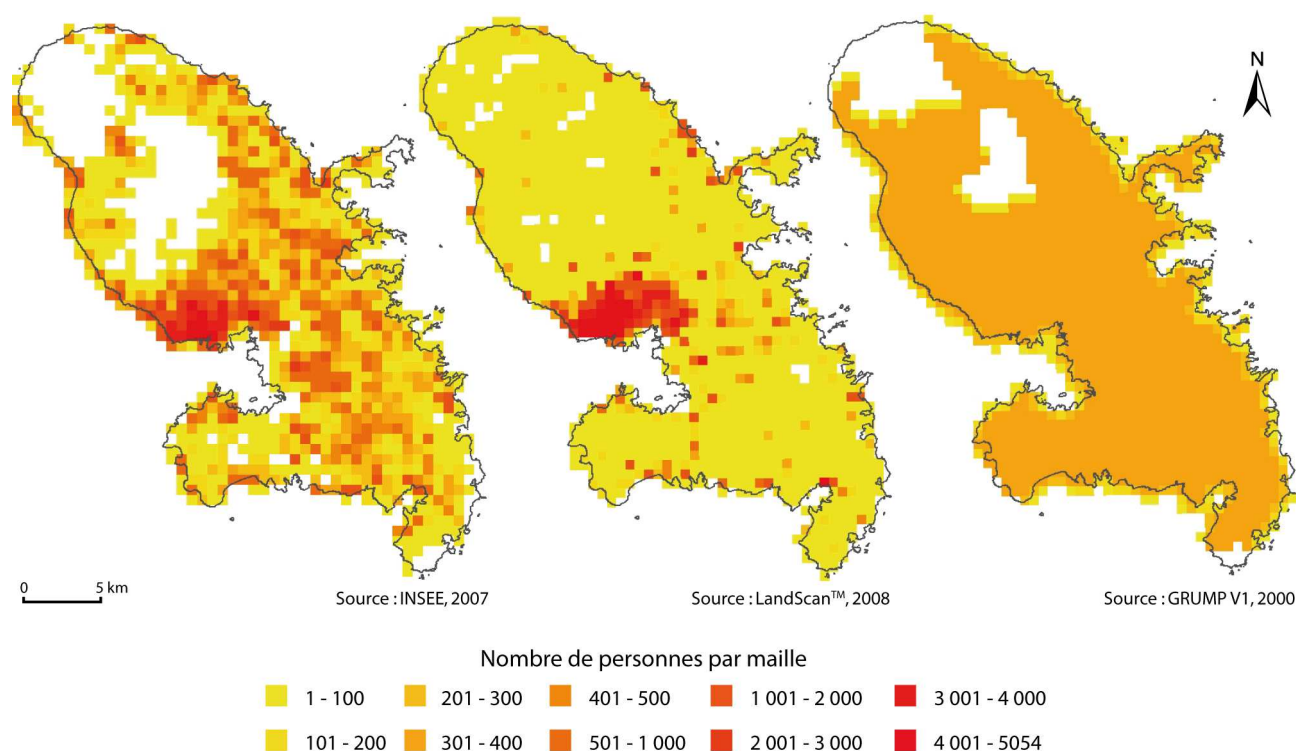


Figure 20 : Comparaison des écarts de valeur et de position des données de population disponibles à l'échelle mondiale avec pour référence la base de données de l'INSEE (2007), le cas de l'île de la Martinique

Tableau 5 : Synthèse des valeurs quantitatives des bases de données disponibles à l'échelle mondiale comparées à celle de l'INSEE (2007), le cas de l'île de la Martinique

Base de données	Année	Population en Martinique	Nombre de mailles	Ecart type
INSEE	2007	371652	976	635
GRUMP V1	2000	386 081	1 366	86
LandScan	2008	405 841	1 363	416

³² Socioeconomic Data and Applications Center

La position de l'occupation humaine nocturne est relativement bien restituée par la base de données GRUMP V1. Les espaces montagneux (volcan de la Montagne Pelée et Pitons du Carbet) ainsi que l'extrême sud de l'île sont inoccupés. Par contre, la répartition spatiale de la quantité de population établie par le GRUMP est très fortement lissée sur l'ensemble des zones peuplées. Une valeur moyenne comprise entre 301 et 400 habitants est appliquée à la majorité des mailles et l'écart type des valeurs est seulement de 86 (tableau 5). Mais globalement, la quantité totale de population donnée par le GRUMP est très proche de celle fournie officiellement par l'INSEE, ce qui s'explique par le mode de construction de cette base réalisée à partir de données statistiques nationales.

Les données LandScan™ ne sont pas comparables aux statistiques INSEE dans le sens où elles représentent une occupation moyenne sur 24 h. On note tout de même certaines tendances qui laissent présumer de leur fiabilité. Tout d'abord, la localisation spatiale des espaces occupés est plus étendue à l'ensemble de l'île, ce qui rend compte d'une plus grande mobilité des individus (exemple des randonneurs sur les sentiers, des baigneurs sur les plages du littoral, des travailleurs agricoles). On constate également que ces données renforcent le poids de la population sur les centres urbains, ce qui correspond tout à fait aux principaux bassins d'activité et d'emploi en Martinique. La conurbation de Fort-de-France est très bien représentée ainsi que les bourgs de chacune des communes. Enfin, les données relatives aux populations fournies par LandScan™ sont supérieures à celles de l'INSEE et du GRUMP. Elles reflètent mieux la quantité d'individus en transit sur le territoire, notamment celle des touristes.

Il n'est pas possible de généraliser ces observations à l'ensemble du territoire couvert par notre étude mais aucune incohérence avec le descriptif de ces bases de données n'a été observée. Ainsi, nous retiendrons ces deux jeux de données pour notre indicateur, dans le sens où ils sont très complémentaires l'un représentant un scénario d'occupation en période nocturne et l'autre sur une période de 24 h.

2.3.2. Exposition contrastée de enjeux humains en cas d'évacuation : prédominance des villes et grandes aires urbaines littorales

Le traitement des données de populations mondiales nous permet de quantifier le nombre théorique de personnes devant être évacuées en cas d'alerte tsunami pour l'ensemble des territoires du bassin caribéen selon deux scénarios d'occupation. Au total, pour un scénario de fréquentation sur 24 h, on compte 14 463 766 individus présents dans la zone à évacuer et 9 157 134 individus pour un scénario nocturne. Les trois territoires qui concentrent les plus grandes valeurs en termes de nombre de personnes à évacuer, pour une répartition de la population sur 24 h, se composent du sud de la Floride (2 493 385 individus), du Venezuela (2 458 210 individus) et de la Colombie (1 472 785 individus) (figure 21). S'ensuivent les îles des Grandes Antilles (Cuba, Haïti, République-Dominicaine, Porto-Rico et Jamaïque) avec une moyenne de près d'un million d'individus à évacuer sur une période de 24 h. Ces valeurs très élevées s'expliquent notamment par l'implantation de vastes capitales-ports qui concentrent un grand nombre d'enjeux humains mais aussi une majeure partie de l'activité économique en journée. Ainsi, les valeurs relatives à ces mêmes territoires pour un scénario nocturne diminuent fortement. Seules les îles de Cuba et de Porto-Rico possèdent approximativement le même nombre théorique de population à évacuer. Aux Petites Antilles, ces valeurs sont plus faibles. Les

moyennes pour un scénario sur 24 h sont proches de 55 600 individus et pour les scénarios de nuit de 36 900 individus. Parmi ces territoires, trois îles se distinguent par des valeurs plus élevées quel que soit le scénario, il s'agit de la Guadeloupe, la Martinique et de Trinidad et Tobago. Comparativement à leur superficie, les autres pays continentaux de l'Amérique Centrale et les Guyanes présentent des valeurs bien plus faibles qui varient fortement en fonction des scénarios de fréquentation. Ces premières informations sont très globales. Elles offrent une première estimation des valeurs minimales et maximales du nombre d'évacués pour chaque territoire mais elles ne permettent pas de spatialiser les éventuelles difficultés dans le cas d'une évacuation de masse en cas d'alerte tsunami.

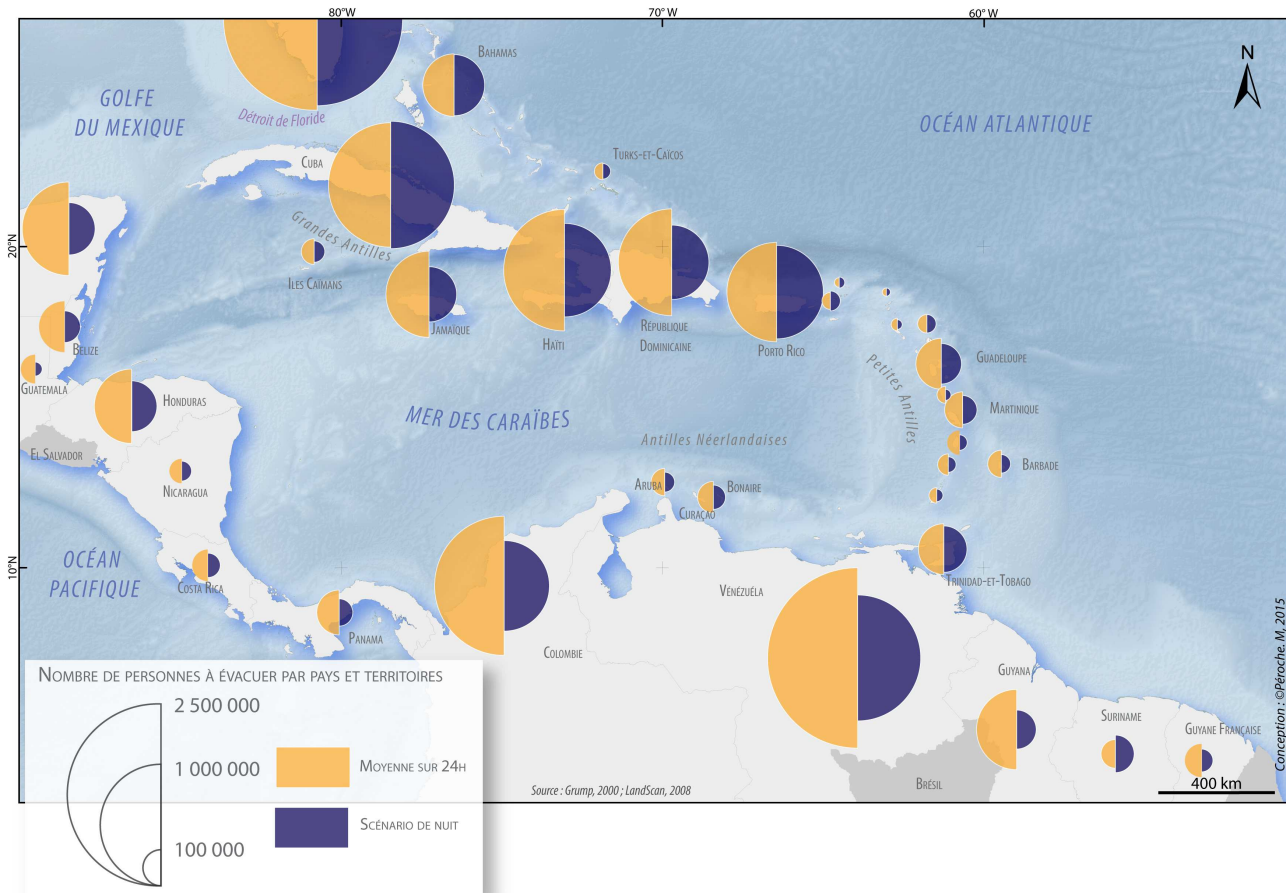


Figure 21 : Nombre théorique d'évacués par Etats et territoires de la Caraïbe selon un scénario d'occupation sur 24 h (Landscan, 2008) et selon un scénario nocturne (GRUMP V1, 2000)

Nous proposons d'affiner notre méthode d'analyse en reportant les valeurs de ces deux bases de données de résolution d'un kilomètre sur un carroyage constitué de mailles carrées de 5 km de côté. Sur ce même carroyage, nous avons calculé le pourcentage que représente la surface de la zone à évacuer par maille. Plus ce pourcentage est élevé et plus l'évacuation est difficile car les distances et le temps nécessaire pour rejoindre un site refuge topographique sont longs. Un indicateur d'exposition est calculé en multipliant les valeurs de fréquentation par le pourcentage de surface à évacuer. Cet indicateur, reporté entre zéro et un représente finement les difficultés potentielles lors de la conduite d'une évacuation pour l'ensemble de la Caraïbe à une échelle infranationale. Plus la valeur de l'indice est élevée et plus la quantité de personnes à évacuer sur de longues distances est importante. Deux cartes ont été réalisées selon les deux scénarios de fréquentation disponibles (figure 22 et 23).



Figure 22 : Carte d'exposition de la population en cas d'alerte tsunami à l'échelle de la Caraïbe (scénario sur 24 h)

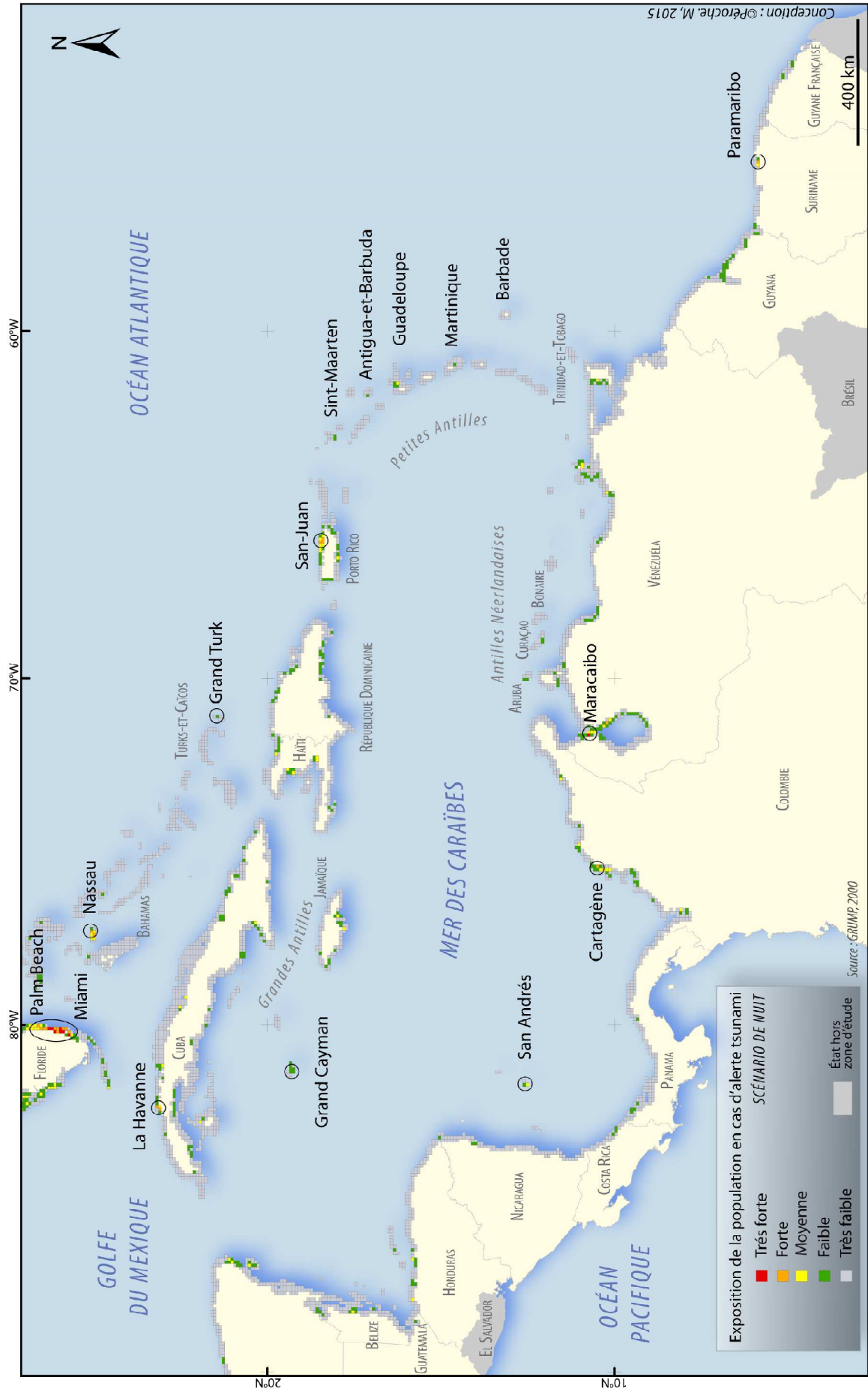


Figure 23 : Carte d'exposition de la population en cas d'alerte tsunami, scénario de nuit

Cette représentation spatialisée révèle que quel que soit le scénario de fréquentation, les difficultés d'une évacuation sont faibles pour la grande majorité des littoraux de la Caraïbe (87 % des mailles occupées selon le scénario nocturne et 90 % des mailles occupées selon le scénario sur 24 h). Seuls quelques secteurs présentent des indices d'exposition « fort » à « très fort ». Leur localisation varie très peu en fonction des deux scénarios de fréquentation. On constate que ces secteurs correspondent à de grandes aires urbaines métropolitaines ou alors à des villes littorales plus ou moins étendues dont la topographie est très plane. Ainsi sur le pourtour de la Floride et principalement sur la conurbation qui s'étend en façade atlantique depuis Miami au sud jusqu'à Palm Beach plus au nord, ce territoire ressort comme particulièrement exposé en cas d'évacuation. Ailleurs, cet indice est également « fort » à « très fort » pour les villes de Cancun et Chetumal (Mexique), de Carthagène, Santa Marta et Riohacha (Colombie), de Maracaibo, Barcelone et Cumana (Venezuela), de Georgetown (Guyana), de San-Juan (Porto-Rico), de Saint-Domingue (République Dominicaine), des Gonaïves (Haïti), de Kingston (Jamaïque), et enfin sur l'île de Nassau (Bahamas). D'une manière générale, l'exposition de la population est plus élevée pour le scénario d'occupation sur la période de 24 h. Seules quelques villes comme celles de Maracaibo (Venezuela), de San-Juan (Porto-Rico), de la Havanne (Cuba), de Paramaribo (Suriname) ainsi qu'en Floride ont un indice d'exposition plus élevé pour un scénario nocturne. D'une manière générale, les îles qui composent l'arc des Petites Antilles affichent des indices de risque faible. Seules les îles françaises, néerlandaises, la Barbade, Antigua et Trinidad et Tobago présentent quelques mailles à l'indice élevé. Elles sont toutes situées au niveau des grandes villes portuaires et des capitales, les principaux centres économiques vitaux de ces îles. Sur le reste du bassin caribéen, quatre secteurs nous interpellent. Il s'agit des îles de Nassau (Bahamas), de Grand Cayman (îles Cayman), de San Andrés (Colombie) et de Grand Turk (îles Turques-et-Caïques). Chacune d'elles se caractérise par des mailles de risque défini au minimum comme élevé et pour la quasi-totalité de leur territoire. En effet, il s'agit de petites îles basses coralliennes. Leur taille réduite associée et une faible altimétrie constituent deux facteurs de risque majeur en cas de tsunami. Ces îles risquent d'être submergées profondément à l'intérieur des terres, causant des dommages humains, économiques et environnementaux importants. La question de l'évacuation dépasse alors la simple perspective de la mise en sécurité temporaire des populations (vers où évacuer ?) mais interroge surtout la problématique de celle du relogement suite à une catastrophe (où et comment reloger les sinistrés ?). La question des déplacements de population a été au cœur de la gestion post-crise aux Maldives suite au tsunami du 26 décembre 2004 dans l'Océan Indien où plus de 4 % des habitants ont été obligés de quitter certaines des îles de l'archipel parmi les plus endommagées (Magnan, 2006).

Dans ce chapitre, au travers des déterminants du modèle AEVC, nous avons cherché à rendre compte de l'hétérogénéité des états et territoires insulaires de la Caraïbe face au risque tsunami. Ils se caractérisent par des vulnérabilités contrastées parfois très marquées pour certains d'entre eux, tel qu'Haïti. Individuellement, leur capacité à faire face semble limitée voire inexistante. Afin de remédier à cette situation, depuis 2006, les états de la Grande Caraïbe s'organisent sous l'égide de l'UNESCO pour la mise en place d'un système d'alerte précoce aux tsunamis dont nous allons détailler le fonctionnement général et après avoir l'organisation.

Chapitre 3 Anticiper la crise : détecter les tsunamis et organiser l'alerte

Pour appréhender la gestion de l'aléa tsunami il est fondamental de prendre en compte deux caractéristiques majeures de ce phénomène : une cinétique de propagation très rapide et un impact sur une étendue spatiale potentiellement très vaste. Aucun autre aléa naturel ne possède ces spécificités, propices à la crise. De ce fait, il est absolument nécessaire de mettre en œuvre des systèmes et des structures opérationnels pour la détection et l'alerte précoce des populations face à cette menace. La faible dimension du bassin Caraïbéen, sa configuration en mer semi-fermée, la multiplicité des sources potentielles de tsunamis et la diversité de leur origine imposent aux Etats riverains du bassin de faire preuve d'une coordination efficace dans le partage des informations en temps réel et dans la mise en œuvre du système de surveillance. Au fil de nos travaux, nous verrons que la réflexion s'avère pertinente à l'échelle régionale du bassin de risque. Ce n'est que depuis 2005, suite au tsunami dévastateur dans l'Océan Indien du 26 décembre 2004, que l'IOC-UNESCO se charge de coordonner le déploiement de systèmes d'alerte pour la Grande Caraïbe. En avril de la même année, il célébrait le cinquantième anniversaire de la création du premier Système d'alerte précoce aux tsunamis dans le Pacifique. L'UNESCO et ses Etats membres répondent à la menace internationale que représentent les tsunamis par une organisation de gestion des risques « end-to-end », c'est-à-dire depuis la détection des phénomènes jusqu'à la prévention des communautés exposées face au risque de tsunami. Cette dernière partie est en cours d'achèvement.

3.1. Gestion de crise et planification, principes généraux

3.1.1. Apports pour définir les crises

3.1.1.1. Qu'est-ce qu'une crise ? Le cadre particulier des risques « naturels »

Les premiers travaux de recherche sur les crises selon une approche sociale ont été menés par des sociologues américains à partir des années 60, notamment par Enrico Quarantelli et Russel Dynes au sein du *Disaster Research Center* de l'université de Delaware (Etats-Unis) (Lagadec, 1991). Ces recherches ont été conduites, en pleine période de Guerre Froide, donc empruntées d'un contexte militaire fort, mais elles concernaient également l'étude de plusieurs catastrophes naturelles ayant impacté le nord des Etats Unis. Dans les années 70 à 90, l'intérêt des sciences sociales pour le concept de « crise » s'est développé et les recherches académiques associées se sont multipliées. On retient notamment l'étude de plusieurs catastrophes technologiques comme celle de Seveso (Italie, 10 juillet 1976), *Three Mile Island* (Etats-Unis, 28 mars 1979), Bhopal (Inde, 3 décembre 1984), ou bien encore Tchernobyl (Ukraine, 26 avril 1986) (Robert, 2012). Le champ sémantique autour de la notion de crise s'est élargi et a connu des évolutions significatives, notamment ces deux dernières décennies. En effet, l'interdépendance des systèmes, leur complexité de plus en plus grande et l'effacement des frontières interrogent de nouvelles questions scientifiques, techniques, économiques, d'information (médias), et politiques autour de la notion de crise (Lagadec et Guilhou, 2006).

Lagadec (1991) propose une définition de la crise dans un ouvrage intitulé « La gestion des crises – outils de réflexion à l'usage des décideurs », sur plusieurs chapitres soit près de 150 pages. Ici, nous porterons notre attention sur quelques fondamentaux de la crise dans le cadre particulier de la gestion des risques naturels. Cette dernière se distingue par une gestion événementielle de la crise et non comme un processus de déstabilisation sur du long terme, comme c'est le cas pour des crises sanitaires, sociales ou encore financières (Roux-Dufort, 2005). Pour autant, nous n'écartons pas la dimension processuelle enracinée dans le fonctionnement quotidien des organisations qui est défini par une somme de fragilités latentes et ignorées par les autorités rendant une crise possible (Turner 1976 ; Pündrich *et al.*, 2009 ; Roux-Dufort, 2010). L'occurrence d'un aléa naturel (un phénomène rare, soudain et de forte intensité) représente l'élément déclencheur, la « *pierre angulaire* » (Roux-Dufort, *ibid.*) d'une situation de crise, du fait d'une perturbation plus ou moins importante, entraînant une désorganisation du système socio-territorial ainsi que « *dans les représentations, les modèles d'interprétation et d'action* » habituellement employés (Lagadec, 2003). Les situations de crise face à un événement naturel se caractérisent par plusieurs composantes répertoriées et décrites par de nombreux auteurs spécialistes du domaine. Nous avons retenu six points majeurs pour définir une situation de crise :

1. Elle résulte d'une disproportion entre les difficultés rencontrées, qu'elles soient d'ordre social, économique ou environnemental, et les capacités habituelles de réponse face à l'événement. Dans les situations les plus graves, il convient parfois à un Etat ou à un territoire d'avoir recours à l'aide extérieure pour y faire face (Dubois-Maury et Chaline, 2002 ; Portal *et al.*, 2009).

2. Elle remet en cause des certitudes et entraîne la perte de la maîtrise des cadres de référence habituels. C'est une période qui nécessite de la créativité et la prise de décisions cruciales pour faire face à des événements inédits (Rosenthal 1989 *in* Lagadec et Guilhou, 2002 ; Gilbert, 1992 *in* Morin, 2012).
3. C'est un processus dynamique au cours duquel les référentiels habituels sont distordus par la contraction du temps et la dilatation de l'espace. Les temps de prise de décisions et d'actions peuvent être plus lents que la vitesse des événements, qui eux-mêmes peuvent s'étendre sur de nouveaux territoires (Roux-Dufort, 2005).
4. Elle génère une accélération des échanges d'informations et des interactions entre les acteurs. Elle nécessite alors de faire preuve d'une conduite managériale robuste pour garantir des prises de décision efficaces, la remontée d'information du terrain rapide et fiable, la bonne coordination des moyens et de définir les stratégies communication adéquates (Lagadec, 2003).
5. Elle est associée à une construction en termes de représentations sociales des risques par les acteurs institutionnels en charge de leur gestion. Elle est révélatrice d'un système de défaillances et d'un terrain propice à la crise (Turner, 1976 ; Morin, 1976 ; Lagadec et Guilhou, 2002 ; Roux-Dufort, 2010).
6. Elle entraîne des changements profonds suite à l'événement tant sur le plan social que dans la conduite opérationnelle. L'apprentissage post-crise peut générer des transformations bénéfiques et servir de base pour un renouveau (Roux-Dufour, 2010).

Les situations de crise en lien avec un aléa naturel correspondent généralement à la concrétisation du risque par la conjonction spatiale et temporelle entre des enjeux directs ou indirects, et ce phénomène. Il existe plusieurs seuils statistiques relatifs à l'endommagement. Ils sont couramment employés pour définir les différents niveaux de gravité de l'impact. Ils se basent sur la sévérité des dommages : nombre de décès, nombre de réfugiés, coup financier total ou encore la dimension des moyens engagés (Guha-Sapir et al, 2012 ; Dauphiné et Provitolo, 2013). D'une manière générale, les échelles de gravité ne sont guère appropriées, notamment parce qu'elles ne prennent pas en compte les ressources disponibles post-crise ou au contraire les conditions de vulnérabilité préexistante face à l'événement en jeu (Gonzalez *et al.*, 2016). Wirasinghe *et al.*, (2013) proposent de qualifier l'ampleur des conséquences liées à un événement par les termes suivants (triés par ordre croissant de gravité) : urgence / désastre / catastrophe / calamité/ cataclysme. L'échelle de gravité employée en France par le ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer³³ désigne par le terme de catastrophe un événement dont le bilan humain est compris entre 100 à 999 morts et pour un coût de 300 millions à 3 milliards d'euros de dommages matériels. Au-delà de ces chiffres, on privilégie le terme de catastrophe majeure. Pour revenir à une définition qualitative de la catastrophe, selon l'UNISDR, lorsqu'une crise a pour conséquence une catastrophe, il s'agit d'une « *rupture grave du fonctionnement d'une communauté ou d'une société impliquant d'importants impacts et pertes humaines, matérielles, économiques ou environnementales que la communauté ou la société affectée ne peut surmonter avec ses seules ressources* » (UNISDR, 2009). Néanmoins, il n'existe pas nécessairement de liens systématiques entre la gravité de la perturbation et les dynamiques de crise (Gilbert, 1992 ; Robert 2012,). Toute

³³ Disponible sur le site internet : www.prim.net

situation de crise dans le domaine des risques naturels n'a pas pour effet une catastrophe en des termes statistiques. Ces éléments statistiques désignent des perturbations alors que la notion de crise désigne davantage un « état » ou une « situation » (Robert, 2012). L'un des exemples le plus révélateur est la crise volcanique qui a frappé la Guadeloupe en 1976. Aucun dommage direct n'a été à déplorer. Néanmoins, sur fond d'une polémique et de désaccord scientifique entre deux experts, l'évacuation massive de 76 031 personnes a été ordonnée mi-août 1976. Elle durera officiellement 3 mois et demi et plongera l'île dans une tension sociale importante entraînant de lourdes pertes économiques dans le secteur agricole et touristique (Morin, 2012). Cet événement a également mis en exergue la prépondérance du rôle des médias et de la communication dans la conduite de crise. C'est d'autant plus vrai aujourd'hui que le déroulé d'une chaîne d'alerte traditionnelle, comme celle établie pour les tsunamis aux Antilles françaises, peut être largement perturbé par des informations non maîtrisées par les autorités et circulant très rapidement au sein de la population au moyen notamment des réseaux sociaux. A titre d'exemple, le 23 juillet 2015, un volcan sous-marin situé au nord de l'île de Grenade et éloigné de plus de 300 km au nord de la Martinique, le Kick'em-Jenny entre en phase éruptive. Le Centre de Recherche Sismique de l'Université West Indies de Trinité et Tobago en charge de sa surveillance annonce avoir relevé le niveau de surveillance à la Société Orange. A partir de cette information partielle, des rumeurs de risque de tsunami circulent dans la Caraïbe sur les réseaux sociaux notamment par l'intermédiaire de ressortissants des pays et territoires anglophones. Tandis que le SRC diffuse le jour même à 18h33 un message sur Facebook pour faire taire les rumeurs quant à une alerte tsunami. Il faudra attendre plus de 24h pour qu'un communiqué de presse de la préfecture confirme que tout risque de tsunami est écarté. Cette durée aura laissé le temps aux médias locaux et notamment au quotidien « France-Antilles » de s'emparer de l'affaire en titrant « *Beaucoup de vagues autour du Kick 'em Jenny* »³⁴ faisant état de l'échec de la communication de la part des autorités en direction du grand public : « *Si un tel déferlement d'informations et de contre-informations est possible, c'est bien parce que la communication des autorités, envers la population, est encore défaillante sur ces sujets. Elles y travaillent sérieusement mais le chantier n'en est qu'à ses balbutiements. Les rumeurs et idées reçues vont beaucoup plus vite!* » .

3.1.1.2. Les temps de la crise au sein du cycle de la gestion des risques « naturels »

Le cycle de la gestion des risques est souvent représenté sous la forme d'un cercle générique. Chaque phase qui le caractérise se déroule par rapport à l'occurrence du phénomène (figure 24). A chacune d'elles correspondent des actions et des mesures de mitigation visant dans leur ensemble à réduire les risques sur un territoire donné. Ce cercle est divisé en quatre grandes phases. La première, en situation normale, vise à réduire les vulnérabilités territoriales par l'évaluation et la prévention des risques ainsi que par la préparation à la gestion de crise. C'est cette dernière étape de la première phase que nous développons tout au long de nos recherches. Elle permet d'anticiper et de planifier les actions à mener en cas de crise au travers notamment de la rédaction de plans de secours et de conduite d'exercices préparatoires. La prévision quant à elle concerne la mise en place des moyens techniques et humains nécessaires pour la surveillance des phénomènes physiques. L'adoption d'un comportement

³⁴ Article paru en ligne le 24 juillet 2015 (source : <http://www.martinique.franceantilles.fr/actualite/environnement/beaucoup-de-vagues-autour-du-kick-em-jenny-316511.php>)

de veille est la première phase de la gestion pré-crise. Cette étape décisive permet d'informer les autorités sur l'éventualité d'une menace pour un territoire. En fonction de la gravité de la prévision, les autorités décident ou non d'activer les plans de secours, on passe alors à la réponse institutionnelle. En fonction de la prévisibilité de l'aléa, l'entrée en crise est plus ou moins brutale et le temps disponible pour déployer les mesures de sauvegarde est plus ou moins court. Les mesures de protection varient d'un aléa à un autre (confinement, évacuation), en fonction de son intensité mais également en fonction des différentes cultures en matière de gestion de crise et selon les Etats. Parfois les mesures de sauvegarde peuvent limiter l'impact du phénomène dommageable ou permettre de retirer les enjeux exposés, ainsi la crise est évitée. Si tel n'est pas le cas, s'ensuit la phase d'urgence une fois le phénomène terminé, ou du moins éloigné³⁵ pour éviter de mettre en danger les équipes de secours. Il s'agit d'estimer et de hiérarchiser rapidement les dommages, de prioriser les actions de recherche et de secours aux victimes et de surveiller l'éventualité d'une sur-crise. En parallèle, la mise en place d'hébergements temporaires pour les rescapés et le rétablissement des fonctions vitales sont associés à la phase dite de réhabilitation immédiate. Une fois sorti de l'étape critique de la gestion de crise, des retours d'expérience et des expertises sont menés pour évaluer les défaillances structurelles et décisionnelles qui ont engendré l'accident voire la catastrophe. Ces études sont conduites par les institutions elles-mêmes ou des bureaux d'étude. La rapidité du retour à la normale est conditionnée par la durée d'impact de l'événement, l'ampleur des dommages ainsi que par l'organisation des aides et la performance du système d'indemnisation. Il est proposé de sortir du cercle des risques par un retour à la « normale » qui tienne compte de l'acquisition de nouvelles compétences au travers d'une dynamique positive suite à la crise. Très souvent, ce sont les retours d'expérience qui initient une démarche de restructuration des systèmes en vue d'une amélioration. Il s'agit d'une forme de rétroaction positive. D'ailleurs, la plupart des grandes catastrophes ont généré la prise de mesures immédiates pour éviter qu'elles ne se répètent.

³⁵ Sauf dans le cas d'événements au temps d'impact long (crue lente, éruption volcanique, sécheresse...)

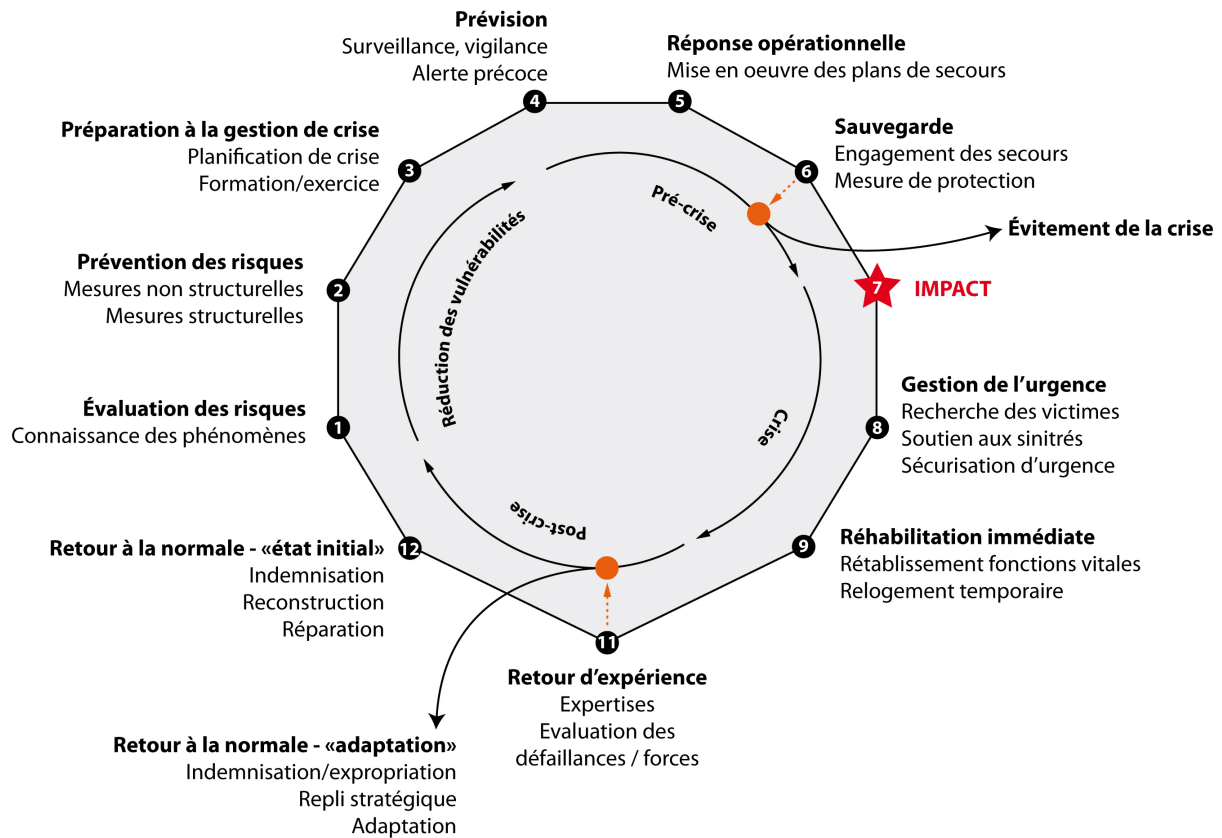


Figure 24 : Cercle générique de la gestion de risques naturels en France

La gestion de crise dans le domaine des risques naturels admet l'aléa comme le facteur déclenchant de la dynamique de crise. C'est l'élément le plus visible du processus de déstabilisation : « [...] en fournissant un moyen d'accès à la crise par ses manifestations extérieures, elle a l'avantage d'être directement opérationnelle dans la mesure où elle incite à développer des réflexes et des moyens de réduction des conséquences de l'événement. Il est incontestable que la crise vue comme un événement fournit une prise claire pour l'action » (Roux-Dufort, 2005). En effet, la conduite opérationnelle d'une situation de crise nécessite d'appliquer progressivement des dispositifs et des plans préétablis pour permettre une réponse opérationnelle adaptée à l'intensité de l'événement. Cette étape est réalisée au préalable, en période hors crise et en situation normale (figure 25). La planification de gestion de crise, encadrée par les autorités, se fait de manière concertée en réunissant les experts scientifiques spécialistes du domaine ainsi que les acteurs institutionnels concernés par la problématique. En France, ces travaux sont conduits dans le cadre de la conception des dispositifs ORSEC départementaux et zonaux. Ils intègrent de nombreuses institutions et entreprises chargées de prévoir leur propre organisation en cas de situation de crise. Les plans ORSEC se déclinent également à l'échelle communale par les Plans Communaux de Sauvegarde (PCS).

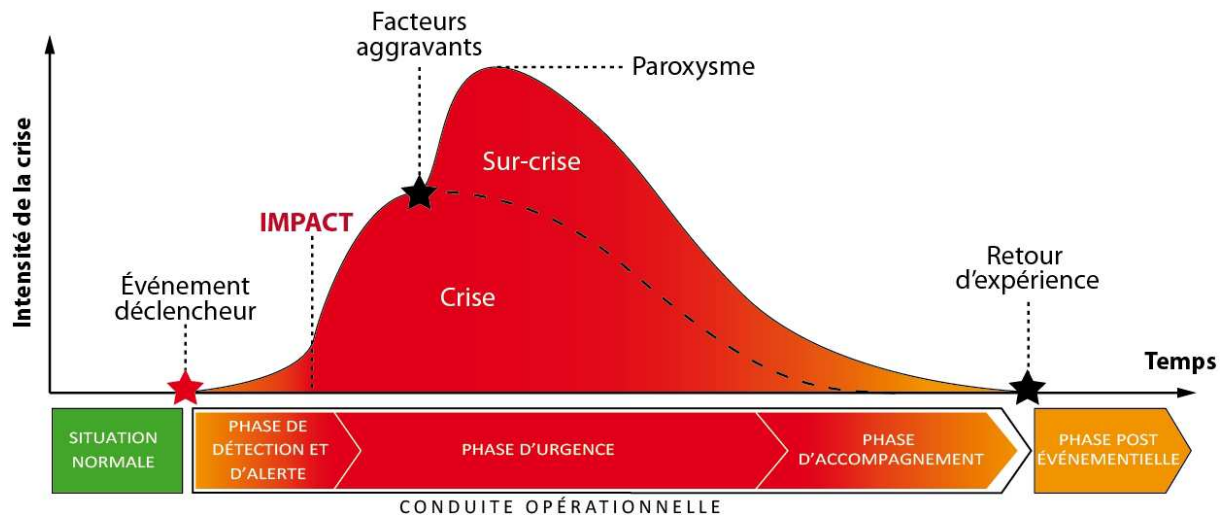


Figure 25 : Les différentes phases de la gestion de crise

En situation normale, les autorités de la sécurité civile et préfectorale sont en contact permanent avec les services en charge de la veille et de la détection des phénomènes dommageables. Ces services fournissent en général des informations relatives au niveau de vigilance. Il convient aux autorités de les traduire et de les diffuser en termes opérationnels au cours de la phase de déclenchement de la crise potentielle. En fonction des paramètres physiques de l'aléa fournis par le prévisionniste ou bien de l'ampleur de l'impact, la phase d'urgence s'accompagne par la montée en puissance de la réponse institutionnelle et la coordination des stratégies de protection et de secours. Au cours de cette phase, des facteurs aggravants peuvent conduire à une sur-crise. Il s'agit la plupart du temps d'événements ignorés des autorités et dont les conséquences entraînent une suite de défaillances qui perturbent le déroulé du temps de la crise en augmentant son intensité. Certains événements peuvent même déstabiliser en profondeur et sur le long terme des logiques de gouvernance, on parle alors de crise « hors-cadre »³⁶ (Lagadec et Guilhou, 2006). La phase d'accompagnement marque la sortie de crise. Elle a pour objectif d'aider et de soutenir les collectivités et les sinistrés dans l'aspect logistique et/ou administratif (DGSCGC, 2009). En phase post-événementielle, des retours d'expériences sont menés à chaud à chaque fin de crise pour permettre un apprentissage à partir des erreurs et des forces qui ont marqué la conduite de crise. Le principe est d'apprendre pour adapter et améliorer les futurs plans. Evidemment, la durée de ces différentes phases est très variable en fonction du type de phénomène, de son intensité et des capacités à y faire face. Des problématiques telles que la gestion des déchets, le relogement des sinistrés ou encore la reconstruction sont des tâches particulièrement longues et fastidieuses. Dans les faits, leur déroulé dans le temps n'est pas linéaire tel que représenté sur la figure mais bien plus chaotique.

³⁶ Crises qui n'entrent plus dans les scénarios préétablis, ni dans les scripts opérationnels traditionnels. L'accident nucléaire de Fukushima consécutif au tsunami du 11 mars 2011 est un exemple de catastrophe industrielle majeure qui a conduit à une crise hors-cadre prenant au dépourvu les gestionnaires et nécessitant une remise en question des modes de gouvernance (Robert, 2012)

3.1.1.3. Répartition des compétences institutionnelles pour la gestion de crise tsunami aux Antilles françaises et en Martinique

En France, la sécurité civile constitue l'une des missions régaliennes de l'Etat qui veille notamment à la cohérence territoriale des actions de planification de gestion de crise. L'intégralité de l'organisation de la sécurité civile a été modernisée récemment par la loi n°2004-811 du 13 août 2004. Elle repose sur la chaîne de commandement et de planification ORSEC : Organisation de la Réponse de Sécurité Civile. Il s'agit d'une organisation pyramidale depuis l'échelon national jusqu'au niveau communal dont le dispositif ORSEC constitue le cadre coordonnateur de l'ensemble des acteurs susceptibles d'être sollicités en situation d'urgence.

Le nouveau dispositif opérationnel ORSEC (troisième génération) est scindé en dispositions générales (description de la compétence des acteurs, de la chaîne de commandement, etc.) et spécifiques pour répondre à des risques particuliers. Les dispositions spécifiques sont organisées en modules autonomes mobilisables selon les besoins. Cette structure permet une montée en puissance progressive en fonction de l'ampleur de l'événement. Elle offre également une plus grande adaptabilité. Ce plan est structuré à partir d'actes réflexes. Il s'agit de documents « prêts à l'emploi » qui visent à anticiper sur l'événement par des mesures standard avant la crise, et d'une cellule de décision ou de crise qui élabore la stratégie et les modes d'actions spécifiques avant, pendant et après la crise. « *Ils s'inscrivent tous dans une seule organisation homogène, ORSEC, dont ils sont des composantes* » (DGSCGC, 2006). Ce document est complété par une déclinaison de nombreux plans de gestion de crise établis en fonction de chaque personne publique ou privée recensée dans le plan ORSEC, afin qu'elle puisse préparer sa propre organisation de gestion de l'événement (*ibid.*).

L'échelon opérationnel le plus fin et qui offre une réponse de proximité à la crise correspond aux territoires communaux. Le maire dispose de la compétence de police générale et assure la Direction des Opérations de Secours (DOS) dans la limite de sa commune en s'appuyant au besoin sur la mise en place d'un Poste de Commandement Communal (PCC). Face à la menace tsunami, qui dépasse nécessairement la capacité locale, c'est le préfet qui prend la direction des opérations de secours. D'ailleurs, l'alerte est coordonnée à l'échelle départementale. Néanmoins, « *le maire assume toujours, sur le territoire de sa commune, la responsabilité de la mise en œuvre des mesures de sauvegarde vis-à-vis de ses administrés (alerte, évacuation ...) ou des missions que le préfet peut être amené à lui confier (accueil de personnes évacuées...)* »³⁷. Dans le cadre de son PCS au titre de la prévention, le maire doit prévoir l'accès à des itinéraires d'évacuation, et en pré-crise s'assurer de la bonne réception de l'alerte puis de sa transmission auprès de la population. Dans la phase d'accompagnement, il appartient de lister les structures d'accueil préalablement recensées hors de la zone à évacuer. Aujourd'hui, à notre connaissance aucune commune en Martinique n'est dotée d'un PCS comportant un volet tsunami complet.

³⁷ <http://www.mementodumaire.net/dispositions-generales-2/vigilance-alerte-et-secours/dgv1-organisation-de-la-securite-civile/#a4>

Le plan ORSEC départemental représente l'échelon opérationnel le plus important en matière de gestion de crise immédiate. Le préfet de département en tant que représentant de l'Etat joue un rôle prépondérant dans cette organisation. En effet, « *dans l'exercice de ses pouvoirs de police, le préfet mobilise l'ensemble des moyens publics et privés (police, gendarmerie, sapeurs-pompiers, SAMU, conseil général, opérateurs etc.) pour la mise en œuvre des mesures directes et indirectes nécessaires à la protection générale des personnes, des biens et de l'environnement contre les accidents, les sinistres, les catastrophes ou tout autre événement présentant un risque immédiat ou imminent* »³⁸. En Martinique, c'est le préfet ou le directeur de cabinet et lui seul qui prendra la décision du niveau d'alerte et des mesures associées préalablement rédigées dans le dispositif spécifique tsunami ORSEC. C'est au titre de Directeur des Opérations de Secours (DOS) qu'il peut activer le Centre Opérationnel Départemental (COD). Celui-ci s'appuiera sur le terrain sur un ou plusieurs Postes de Commandement Opérationnel (PCO) et des Postes Médicaux Avancés (PMA). Le dispositif spécifique ORSEC Tsunami est en cours de rédaction par le Service Interministériel de Défense et de Protection Civile (SIDPC). Nous avons participé récemment à son évaluation et le document devrait être validé à fin 2016.

La continuité des dispositifs est assurée à l'échelle des zones de défense par le plan ORSEC de zone. La France en compte sept sur le territoire métropolitain et cinq en outre-mer dont deux dans la Caraïbe. La première couvre les territoires français des Antilles (Martinique, Guadeloupe Saint-Barthélemy et Saint-Martin) et la seconde la Guyane. Ce plan « *recense l'ensemble des moyens publics et privés susceptibles d'être mis en œuvre en cas de catastrophe affectant au moins deux départements de la zone de défense et de sécurité ou rendant nécessaire la mise en œuvre de moyens dépassant le cadre départemental. Il fixe les conditions de la coordination des opérations de secours, de l'attribution des moyens et de leur emploi par l'autorité compétente pour diriger les secours* ». La zone de défense et de sécurité Antilles est placée sous l'autorité du préfet de Zone, représentée par le préfet de Martinique. Le plan ORSEC de zone, en cours de validation, intègre d'ores-et-déjà plusieurs de nos travaux réalisés en partenariat avec l'EMIZA (chapitre 4)³⁹. En cas d'avis de tsunami, l'EMIZA assure la redondance de la transmission du message du PTWC localement et informe les autorités nationales (COGIC)⁴⁰ par tous les éléments utiles à la compréhension de la situation. La cellule de crise peut être activée, le Centre Opérationnel de Zone (COZ) assure notamment le monitoring de l'événement⁴¹. Suivant l'étendue des côtes impactées et l'intensité des dommages consécutifs au tsunami, les préfets de département par l'intermédiaire de leur SIDPC peuvent solliciter des moyens de renfort civilo-militaire auprès du préfet de Zone qui est en charge de les coordonner. L'EMIZA joue également un rôle important dans le bassin de la Caraïbe dans le cadre du réseau diplomatique français et peut être amené à gérer la mobilisation de secours dans des relations transfrontalières.

³⁸<http://www.mementodumaire.net/dispositions-generales-2/vigilance-alerte-et-secours/dgv1-organisation-de-la-securite-civile/#a4>

³⁹ Le préfet de zone de défense et de sécurité dispose d'un état-major interministériel de zone de défense et de sécurité qui, en liaison avec les préfets de département, prépare et met en œuvre les mesures concourant à la sécurité nationale, notamment en matière de sécurité civile et de gestion de crise (Code de la sécurité intérieure, art. R122-17, <https://www.legifrance.gouv.fr>)

⁴⁰ Centre Opérationnel de Gestion Interministériel de Crise situé à Paris.

⁴¹ L'IOC-UNESCO met à disposition des Etats et territoires membres deux logiciels qui permettent le suivi en temps réel des séismes et qui comprend également les messages émis par le PTWC (Real Time Earthquake Display, développé par USGS) ainsi que l'affichage des données du niveau de la mer (Tide Tool) développé et soutenu par le PTWC.

Le dispositif ORSEC se décline également en mer à travers le plan ORSEC Maritime. Il permet d'assurer la cohérence, la complémentarité et l'appui réciproque de la réponse opérationnelle entre le domaine maritime et terrestre (DGSCGC, 2006). Ce document se compose de dispositions générales qui déterminent l'organisation des secours et les cadres d'interventions en mer en matière de sécurité civile ainsi que des dispositions spécifiques face à des menaces particulières comme les pollutions en mer (POLMAR mer). Le périmètre d'application géographique du dispositif ORSEC Maritime aux Antilles est variable en fonction de la nature des missions qui sont menées. Il n'existe actuellement pas de dispositions spécifiques tsunami dans l'ORSEC maritime. Seul un paragraphe rappelle que le CROSS-AG assure la diffusion de l'alerte et des consignes de mise en sécurité vers les capitaineries des ports français et les usagers de la mer, au moyen de messages vocaux pré-formatés par VHF. Il alerte également les autorités maritimes des autres territoires de sa zone de compétence. Néanmoins, trois dispositions spécifiques peuvent être déployées dans le cas de navires en difficulté à la suite d'un tsunami : l'Assistance aux Navires En Difficulté (ANED), la recherche et le sauvetage (SAR) qui devrait prochainement évoluer en organisation spécifique Sauvetage Maritime de Grande Ampleur (SMGA) et la lutte contre les POLLutions MARitimes (POLMAR).

3.1.2. Les particularités de la gestion pré-crise tsunamis

3.1.2.1. Les tsunamis, des phénomènes difficiles à anticiper

La gestion post-crise d'un aléa naturel est conditionnée par son délai de prévisibilité ainsi que par le niveau de fiabilité des informations relatives à son intensité et à son extension spatiale. Le premier élément dicte le temps disponible pour une réponse institutionnelle et/ou de la part des populations tandis que le second détermine le contenu des messages transmis par les autorités vers les populations et l'adaptation de la réponse de la part des secours. Ces deux paramètres sont contraints par :

- les caractéristiques physiques du phénomène ;
- les capacités d'instrumentation et de détection ;
- les moyens techniques et humains disponibles pour le suivi de l'évolution du phénomène ;
- l'état actuel des connaissances scientifiques ;
- la coordination inter services et inter pays.

Nous proposons de représenter 3 phases post-crise pour 6 aléas qui menacent la plupart des Etats et territoires des Petites-Antilles. Elles figurent sous la forme d'une barre représentant la durée de chacune de leurs phases en fonction d'une longueur différente entre chaque classe de temps théorique (figure 26a). Une fois cumulée (figure 26b), la représentation sous forme d'histogramme permet la comparaison de ces phénomènes entre eux. La durée de l'événement déclencheur représente la période d'initiation du phénomène naturel. C'est le laps de temps pendant lequel des signaux avant-coureurs peuvent être détectés par les organismes en charge de la veille instrumentale. Le délai de prévisibilité correspond à la capacité du centre de veille à détecter ces signaux, à les interpréter, à proposer des scénarios prédictifs et à les traduire en niveau de vigilance ou d'alerte. Le délai avant l'impact

correspond au temps entre le moment où les autorités sont informées de la menace potentielle et son impact sur le territoire. Il détermine le temps disponible pour prendre des décisions et apporter des réponses opérationnelles.

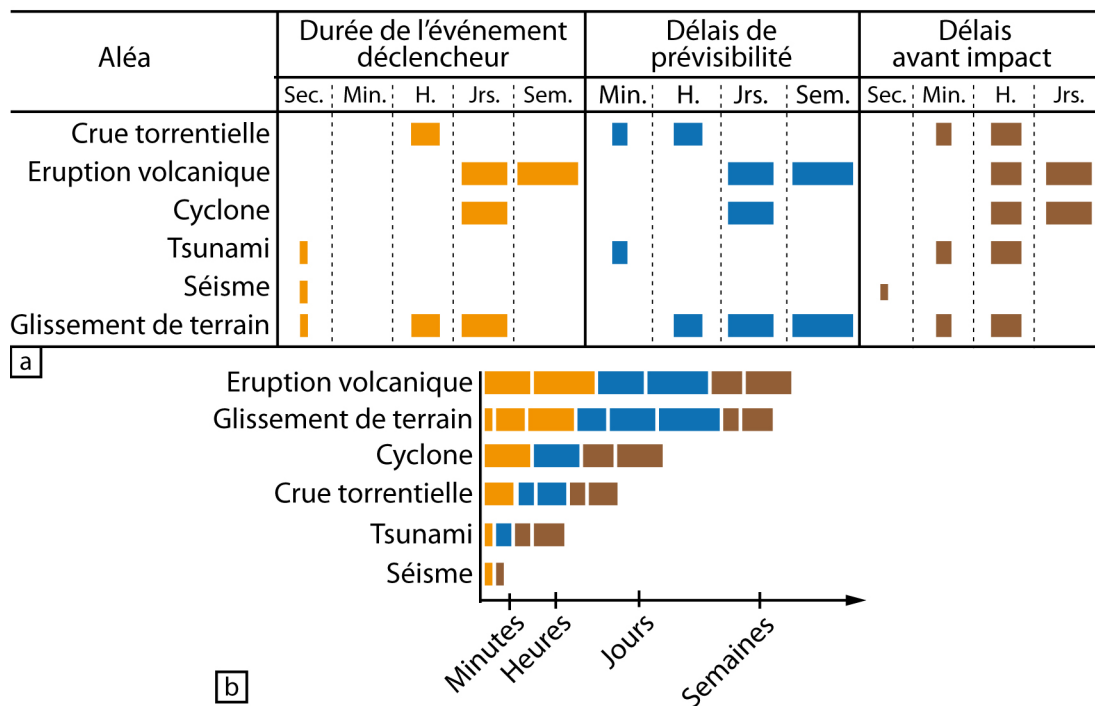


Figure 26 : Prévisibilité temporelle des six principaux aléas qui menacent la région Caraïbe, détaillée en fonction des trois phases de pré-crise (a) et cumulée (b)

En fonction des aléas naturels identifiés, les autorités locales disposent de plus ou moins de temps pour activer les dispositifs de gestion de crise et prendre les mesures de sauvegarde cohérentes au vu de la situation annoncée par les prévisionnistes. Cette procédure est conditionnée par le délai de prévisibilité de l'aléa et de la période de temps avant son impact. Extrêmement variable dans sa forme et sa durée, cela va de l'impossible prévisibilité des séismes jusqu'à des situations de crise qui peuvent s'étaler sur plusieurs mois voire années dans le cas des éruptions volcaniques. Les organismes de surveillance des phénomènes cycloniques et des tsunamis à l'échelle mondiale offrent à chaque Etat concerné une capacité de veille permanente. Les crues torrentielles, les glissements de masse et les éruptions volcaniques, aux effets directs et plus localisés, exigent la mise en place de systèmes de veille à l'échelle nationale.

Malgré les avancées scientifiques dans le domaine de la sismologie, l'aléa sismique demeure le moins prévisible. Plusieurs méthodes, principalement statistiques, autorisent l'estimation des probabilités d'occurrence à partir de bibliothèques de données historiques, d'une connaissance approfondie des contraintes aux limites de plaques tectoniques, de la micro-sismicité ou encore des données géodésiques (Bird et Liu, 2007 ; Kagan *et al.*, 2007 ; Shen *et al.*, 2007 ; Ward, 2007 ; Morales-Esteban *et al.*, 2010 ; Tiampo et Shcherbakov, 2012). Ces estimations permettent d'établir des « prédictions » sismiques à plus ou moins long terme, entre 1 à 10 ans environ, ainsi que de cartographier une probabilité de dépassement d'une intensité sismique ou d'une accélération maximale du sol (PGA)

pour une période de temps donnée. Certains chercheurs, italiens notamment, proposent aujourd'hui des méthodes de prévision à court terme, de quelques jours à une semaine, sur la base de l'analyse en temps réel des premiers séismes d'une séquence plus importante (Murru *et al.*, 2009 ; Falcone *et al.*, 2010). Leur vocation opérationnelle n'est pas encore garantie. Actuellement, seuls quelques pays comme le Japon sont dotés de systèmes d'alerte précoce basés sur la détection des ondes P, les plus rapides. Ainsi, il est possible de disposer de quelques dizaines de secondes pour déployer des mesures de sauvegarde, toutes automatisées.

A l'extrême inverse de l'aléa sismique, l'entrée en phase éruptive d'un volcan est facilement identifiable. Les principales activités sous surveillance instrumentale sont d'ordre géophysique, comme la micro sismicité, les déformations de surface ou géochimiques tout comme les suivis de la composition chimique des gaz. Par contre, compte tenu du caractère dynamique de l'aléa volcanique aussi bien sur des temps courts que géologiques, et de sa sensibilité aux effets externes, la crise éruptive est difficilement prévisible de manière fiable (Sparks, 2003). Thouret (2002) met aussi en exergue l'inégale prévisibilité des phénomènes associés aux éruptions volcaniques tant dans leur mode de déclenchement, que dans leur zone d'action et leurs différents paramètres physiques (vitesse, débit, température, densité, etc.). Ils sont fonction du type de volcanisme en action. Néanmoins, la majorité des crises éruptives sont précédées de signes avant-coureurs. Ces signes peuvent survenir plusieurs mois avant l'éruption principale, ils participent ainsi à la mise en état de veille active de la part des scientifiques et des autorités locales.

L'aléa tsunami d'origine sismique est un phénomène soudain et rapide. Proportionnellement, les délais d'impact varient beaucoup, de quelques minutes pour les événements proches à plusieurs heures pour les événements lointains. Les temps de la crise présentent donc un caractère très variable. En Martinique au regard des nombreuses sources de tsunami dans la Caraïbe et de la nature potentielle de leurs effets, la gestion de l'aléa tsunami est particulièrement complexe. Aussi, un message de menace du PTWC ou un séisme ressenti sur l'île peuvent être des éléments déclencheurs d'une mise en alerte des autorités et de la population. Par contre, un séisme majeur proche peut déclencher une entrée brutale en situation de crise et l'aléa tsunami provoquer une sur-crise. La gestion de crise revient alors à anticiper en élaborant de multiples scénarios de crise et à prévoir les meilleures réponses associées.

3.1.2.2. Scénarios identifiés pour la Martinique

La planification de gestion de crise repose avant toute chose sur la connaissance des phénomènes naturels et de leurs dommages potentiels sur des enjeux exposés. Pour chacun des scénarios établis, des mesures opérationnelles de sauvegarde sont alors envisagées et planifiées. En Martinique de tels scénarios de risque ont largement été développés face à l'aléa sismique notamment dans le cadre des programmes Gemitis/Antilles, du Plan Séisme Antilles. Il n'en existe pas face à l'aléa tsunami. Seules des modélisations d'aléa ont été proposées par le BRGM en 2007 (Predreros *et al.*, 2007) pour quatre sources sismiques proches et trois sources d'origine gravitaire proches également mais elles ne représentent pas la réalité de la menace dans le bassin (chapitre 1). Récemment, le PTWC a fourni sous la forme d'un catalogue les résultats de simulation pour 14 scénarios de séisme tsunamigène d'une magnitude égale à Mw 8.4 pour une profondeur de 20 km répartis sur le pourtour de la plaque

Caraïbe (cf. annexe 1). Quatre autres, plus éloignés en Atlantique, ont été modélisés selon des paramètres de génération variables. Ces scénarios ont été modélisés à l'aide de modèle RIFT (*Rapide Inclusive Forecasting for Tsunamis*), celui-là même qui est employé aujourd'hui en temps réel par le PTWC.

Sur les 18 scénarios proposés par le PTWC, 12 pourraient générer des amplitudes à l'approche des côtes supérieures à 0.3 m (tableau 6). Deux scénarios en champ proche, au niveau de la zone de subduction, pour lesquels les valeurs modélisées sont supérieures à trois mètres et trois scénarios pour des amplitudes comprises entre un et trois mètres. La variation maximale des délais post-impacts fournie par les scénarios RIFT est de 6 h 58 min avec un maximum de 7 h 25 min avant impact pour un événement dont la source est localisée dans le golfe de Cadiz et un minimum de 27 min pour un événement dont la source se situe au niveau de la zone de subduction au large de la Dominique. On constate également que malgré des estimations de temps d'arrivée très proches pour certains scénarios (exemple des 5, 12, 13 et 14) les valeurs d'amplitudes peuvent varier de manière importante. Ce phénomène est lié notamment aux effets de directivité de l'énergie en fonction de l'orientation des failles principales des zones sources (cf. annexe1). L'ensemble de ces éléments vont nous permettre de construire une matrice d'aide à la décision pour la gestion des messages émis par le PTWC.

Tableau 6 : Principales valeurs issues des résultats des scénarios modélisés par le PTWC (modèle RIFT)

Scénario RIFT	Temps d'arrivée	Valeur d'amplitude maximale modélisée pour la Martinique	Classe d'amplitude correspondante donnée par le PTWC
1	43	2	1-3
2	27	6.1	> 3
3	47	3.4	> 3
4	42	0.87	0.3-1
5	1h26	1.6	1-3
6	2h21	0.63	0.3-1
7	2h59	0.75	0.3-1
8	3h20	0.3	< 0.3
9	Approx. 4h	0.18	< 0.3
10	Approx. 3h15	0.27	< 0.3
11	Approx.2h30	0.29	< 0.3
12	1h30	0.29	0.3-1
13	1h11	0.8	0.3-1
14	1h22	1.8	1-3
15	Approx.13h	Non fournie	< 0.3
16	2h25	0.31	0.3-1
17	7h25	1.3	0.3-1
18	7h25	2	1-3

Les valeurs d'amplitude modélisée à la côte sont calculées sur 41 points répartis sur le pourtour du littoral martiniquais.

3.2. Détecter les tsunamis et alerter les autorités nationales, présentation de la phase montante de l'alerte

3.2.1. Déploiement des systèmes d'alerte tsunami régionaux sous l'égide de l'UNESCO

3.2.1.1. Historique de la création des systèmes d'alerte

La mise en place de systèmes précoces de détection et d'alerte s'est révélée indispensable au milieu du siècle dernier à la suite de plusieurs tsunamis catastrophiques survenus dans le Pacifique. Entre 1946 et 1964, quatre tsunamis d'ampleur transocéanique ont touché le bassin Pacifique, faisant plusieurs centaines de morts. Les événements du 1^{er} avril 1946 (Alaska – Mw 8.6 – 167 morts) et du 4 novembre 1952 (Russie – Mw 9 – 4 000 morts⁴²) sont à l'origine de la création de deux centres d'alerte nationaux, l'un aux Etats-Unis (Etat d'Hawaii) et l'autre au Japon. Le 22 mai 1960, un séisme de magnitude Mw 9.5 situé à proximité du Chili a généré un tsunami lui aussi transocéanique. Plus de 2 200 décès sont comptabilisés. Cette même année, les Nations Unies créent l'*Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC)*⁴³. Cette commission est chargée de coordonner les programmes internationaux de recherches scientifiques océanographiques de ses Etats membres (147 au 24 juin 2015)⁴⁴ pour faire face à ces événements. Dans son objectif premier, elle intègre la réduction des risques par la promotion de « *la coopération internationale et la coordination des programmes dans les domaines de la recherche marine, les services, les systèmes d'observation, la gestion de l'information et des données, l'atténuation des risques et le développement des capacités, dans le but de mieux comprendre et de gérer efficacement les ressources de l'océan et des zones côtières* ». Ainsi, en 1962, lors de la seconde session de réunion de l'IOC et au vu des derniers événements dans le Pacifique, la commission encourage et recommande aux Etats membres de cette région de coopérer avec les Etats-Unis pour développer un système d'alerte aux tsunamis (Roll, 1979). Enfin, le dernier tsunami de cette série, celui du 28 mars 1964 (Alaska – Mw 9.2 – 124 morts) a contribué à accélérer le processus. En 1965, l'IOC crée le premier Groupe International de Coordination en charge d'étendre le système d'alerte du Pacifique (ICG/ITSU)⁴⁵. Le centre d'alerte d'Honolulu devient alors officiellement le centre d'alerte pour le bassin Pacifique : *Pacific Tsunami Warning Center (PTWC)*. En parallèle, l'IOC formalise l'existence de l'*International Tsunami Information Center (ITIC)*⁴⁶ basé à Honolulu (Hawaii). Il s'agit d'un centre de ressources techniques en appui aux ICG. Il œuvre pour accompagner les Etats membres à organiser et améliorer leurs capacités de gestion de crise face aux tsunamis. Ses activités s'articulent autour de quatre axes majeurs⁴⁷ :

- le suivi scientifique et technique des activités internationales dans le domaine de la détection, de l'alerte et de la dissémination des messages ;

⁴² NGDC/WDS Global Historical Tsunami Database, consulté le 02/12/2015

⁴³ Commission Océanographique Intergouvernementale (COI)

⁴⁴ www.ioc-unesco.org

⁴⁵ International Coordination Group for the Tsunami Warning System in the Pacific, renommé depuis 2005 Intergovernmental Coordination Group for the Pacific Tsunami Warning and Mitigation System (ICG/PTWS).

⁴⁶ Centre international d'informations sur les tsunamis

⁴⁷ www.itic.ioc-Unesco.org/

- l'accompagnement des Etats dans leur démarche d'intégration à l'ICG ;
- l'aide pour la mise en place de systèmes d'alerte et pour la préparation à la gestion de crise des Etats membres ;
- la rédaction de documents pédagogiques pour la prévention du risque de tsunami.

Depuis plus de 50 ans, l'ICG/PTWS n'a de cesse d'améliorer ses capacités techniques de détection et d'alerte. Tragiquement, son déploiement se révélera nécessaire sur les autres bassins au début des années 2000, suite au décès de près de 235 000 personnes (tsunami du 26 décembre 2004 - Indonésie).

3.2.1.2. Le rôle essentiel de coordination de l'UNESCO à l'échelle mondiale

Un mois à peine après la catastrophe du 26 décembre 2004, au cours de la session extraordinaire consacrée au risque de tsunami de la conférence de Kobé⁴⁸, l'IOC est mandaté pour coordonner le déploiement des systèmes d'alerte similaires à celui du Pacifique dans les autres bassins océaniques soumis à l'aléa tsunami (tableau 7). Cette décision a été adoptée par l'IOC en juin 2005 lors de sa 23^{ème} assemblée générale. Elle fait partie intégrante des objectifs à poursuivre dans la stratégie de développement à moyen terme de l'IOC (IOC-UNESCO, 2014b). Forte de ses quarante années d'expérience dans le Pacifique, l'UNESCO a créé trois nouveaux ICG depuis 2005 :

- ICG/CARIBE EWS : *Intergovernmental Coordination Group for Tsunami and Other Coastal Hazards Warning System in the Caribbean and Adjacent Regions* ;
- ICG/IOTWS : *Intergovernmental Coordination Group for the Indian Ocean Tsunami Warning and Mitigation System* ;
- ICG/NEAMTWS : *Intergovernmental Coordination Group of the Tsunami Warning and Mitigation System in the North-eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas*.

Tableau 7 : Gouvernance des différents ICG

ICG	CARIBE-EWS	IOTWS	NEAMTWS	PTWS
Président	Mme von Hillebrandt-Andrade	M. Sopaheluwakan	M. Yalciner	Ms. Nelson
Secrétaire technique UNESCO	M. Aliaga	M. Elliott	M. Santoro	M. Aliaga
Nombre d'Etats membres	32	28	39	31
Nombre de centres d'alerte régionaux	2	3	4	3
Centres d'information tsunami rattachés	CTIC http://itic.ioc-unesco.org/	IOTIC http://iotic.ioc-unesco.org/	NEAMTIC http://neamtic.ioc-unesco.org/	ITIC http://iocaribe.ioc-unesco.org/

⁴⁸ Conférence mondiale sur la prévention des catastrophes qui s'est tenue dans la ville de Kobé (Japon) du 18 au 22 janvier 2005. Plusieurs résolutions ont été adoptées visant à la réduction des pertes socioéconomiques et en vies humaines, et des atteintes environnementales liées aux aléas naturels.

Chaque ICG est structuré en plusieurs groupes de travail qui traitent globalement des quatre axes suivants : le système de détection, la connaissance scientifique de l'aléa, la chaîne de transmission de l'alerte et la préparation à la gestion de crise. Ces groupes sont constitués de professionnels bénévoles issus des métiers de la gestion des catastrophes naturelles des pays membres. Des réunions plénières sont organisées une fois par an ou tous les deux ans et réunissent les scientifiques ainsi que les représentants des gouvernements appelés les *Tsunami National Contact* (TNC). Ces réunions sont l'occasion de concevoir des plans d'actions à moyen terme, de coordonner les actions nationales entre elles ou encore de rédiger le Guide Opérationnel à long terme (anciennement appelé Plan de communication). Ce document structure les actions à mener pour la mise en place du système d'alerte et permet de coordonner les objectifs de dissémination des messages à tous les Etats de la région concernée selon des procédures standardisées (IOC-UNESCO, 2009).

Cette mission est prise en charge par l'UNESCO/IOC. Le statut neutre de cette organisation internationale garantit le déploiement des systèmes d'alerte précoce régionaux. Dans chaque bassin, des crises géopolitiques latentes et des revendications territoriales peuvent bloquer n'importe quelles initiatives prises par l'un ou l'autre des Etats⁴⁹. L'IOC permet de faire travailler ensemble des équipes scientifiques et des institutions de nombreux pays tout en dépassant les tensions existantes, seul gage de réussite face à un aléa d'envergure internationale.

3.2.1.3. Partie montante de l'alerte : fonctionnement général et terminologie

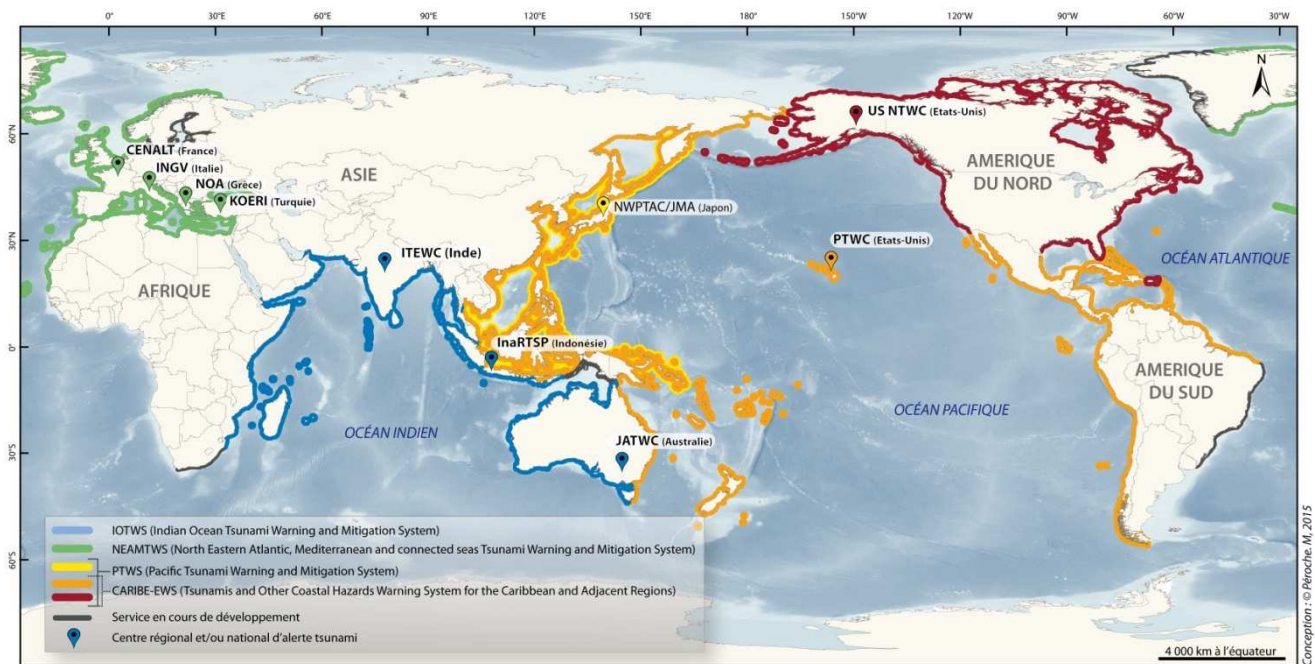
Les ICG coordonnent l'architecture générale du réseau et veillent au respect des standards de communication pour l'échange des données. Il s'agit des deux conditions essentielles aux premiers maillons du déploiement d'un système d'alerte précoce. Par exemple, les experts scientifiques de l'ICG concerné peuvent inciter un Etat à renforcer son réseau marégraphique et proposer un site d'implantation privilégié au vu des connaissances sur l'aléa sismique, ce qui permet in fine de combler les lacunes d'information dans le réseau international. En effet, la capacité financière des ICG est très restreinte, elle se limite à prendre en charge des frais de fonctionnement (préparation de réunions, déplacements des membres, etc.). Ils ne disposent d'aucun fond pour engager des investissements dans le déploiement d'instruments, ni pour en assurer l'entretien. Dans la Caraïbe, les données instrumentales de mesure et de détection des tsunamis sont mises en commun gracieusement par l'ensemble des Etats membres. Ces données sont collectées en temps réel par les *Tsunami Service Provider* (TSP)⁵⁰ régionaux de chaque bassin. Leur rôle est de les analyser en continu et d'émettre des messages publics lors d'un événement susceptible d'engendrer un tsunami. Les messages sont ensuite transmis aux *Tsunami Warning Focal Point* (TWFP) des Etats membres par plusieurs systèmes de communication. Ces dernières années, les TSPR⁵¹ se sont multipliés à travers les différents bassins et couvrent l'ensemble des littoraux exposés à l'aléa tsunami à l'échelle mondiale (figure 27).

⁴⁹ Par exemple dans la Caraïbe, si l'on retient uniquement des tensions liées à la délimitation des espaces maritimes suite à la signature du traité sur le droit de la mer (1984), on compte la revendication pour l'île de Navasse par Haïti aux Etats-Unis, pour l'archipel de San Andrés et Providencia par le Nicaragua à la Colombie ou encore le partage des frontières maritimes entre le Belize et le Guatemala.

⁵⁰ Fournisseur de services aux tsunamis. Cette dénomination remplace depuis 2016 les anciens Tsunamis Warning Center.

⁵¹ Fournisseur de services régionaux aux tsunamis

Figure 27 : Carte des zones de responsabilité des différents ICG et de leur centre d'alerte respectif, d'après Anderson



Sources : d'après IOC/UNESCO, 2015

(2016)

3.2.1.4. Structure de l'ICG/CARIBE EWS

L'ICG/CARIBE EWS a été créé en 2005. Il est composé de 32 Etats membres, 16 territoires, 3 Etats observateurs ainsi que de plusieurs organismes observateurs. Un président et trois vice-présidents sont à la tête de cette organisation et sont élus pour une période de deux ans. La première réunion plénière s'est tenue en 2006, depuis elle se déroule chaque année (figure 28).

Il existe quatre groupes de travail, pour la mise en place des réseaux de surveillance et de détection des tsunamis, l'évaluation de l'aléa et l'amélioration des connaissances scientifiques, la diffusion des alertes, la préparation à la gestion de crise. Pour ce qui concerne les missions de réduction du risque de tsunami à l'échelle régionale de l'ICG/CARIBE-EWS, il est assisté par le *Caribbean Tsunami Information Center* (CTIC) en partenariat avec le gouvernement de la Barbade en tant qu'organe subsidiaire.

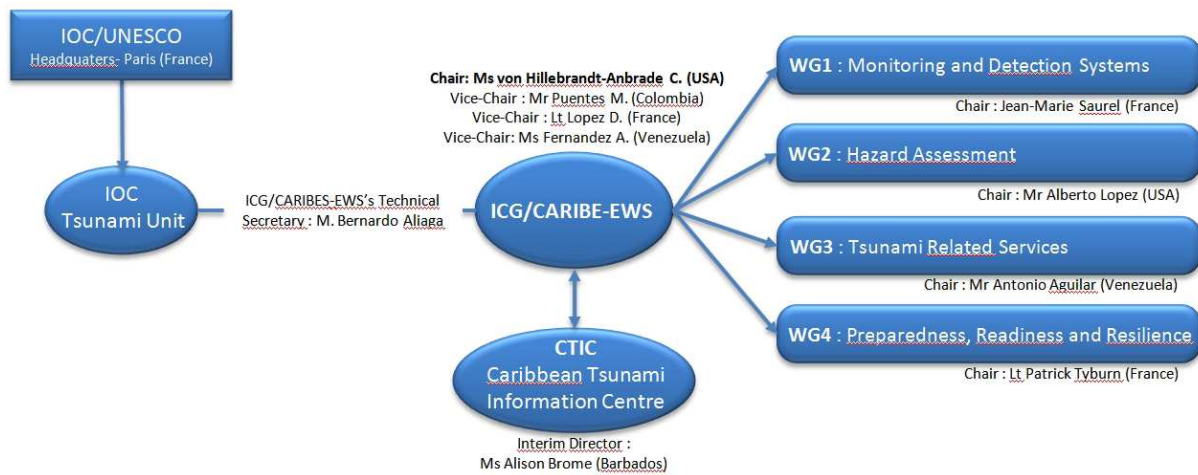


Figure 28 : Organisation de l'Intergovernmental Coordination Group for the Tsunami and other Coastal Hazards Warning System for the Caribbean and Adjacent Regions (ICG/CARIBE-EWS)

Depuis déjà plusieurs années, la France s'implique dans la mise en place de ce système d'alerte, elle est largement représentée au sein de sa gouvernance : l'un des postes de vice-présidence est tenu par Le Lieutenant Colonel Denis Lopez (Chef d'état-major de zone de défense Antilles), et la présidence des groupes de travail 1 et 4 est respectivement tenue par M. Saurel (Directeur technique de l'Observatoire volcanologique et sismologique de la Martinique) et le lieutenant-colonel Patrick Tyburn (Chef adjoint d'état-major de zone de défense Antilles). La Martinique a accueilli notamment une réunion plénière de l'ICG en 2008.

3.2.2. Organisation de la détection des tsunamis dans la Caraïbe

3.2.2.1. Capteurs employés et principes de fonctionnement

La détection précoce de l'aléa tsunami s'appuie sur l'interprétation de données géophysiques issues de réseaux d'observation en temps réel. Tout d'abord, l'analyse des données sismiques offre sans conteste et en seulement quelques minutes, une estimation du potentiel tsunamigène du phénomène. Les sismographes constituent donc le premier maillon de la chaîne de détection des tsunamis d'origine sismique. Ensuite, des stations de mesures du niveau de la mer détectent si une onde de tsunami est générée ou non le long des côtes (marégraphe) ou au large (tsunamimètre). Ces deux derniers instruments sont également employés pour repérer les événements d'origine non sismique.

L'émission des avis de tsunami par les TSPR repose sur leur capacité et leur rapidité d'interprétation des premières données sismiques. L'emplacement de sismographes à proximité des sources sismiques potentielles doit permettre d'enregistrer les ondes sismiques en moins de quelques minutes pour tous les événements de moyenne et de grande ampleur. Plus le réseau est dense et bien adapté, plus les résultats sont fiables et rapides. Les sismogrammes sont retransmis en temps réel par télétransmission aux centres de surveillance et leur analyse est automatisée. La plupart du temps les centres emploient des logiciels de calculs d'inversion selon différents algorithmes mathématiques. Ils traitent les informations relatives au temps d'arrivée des ondes sismiques et leur forme est enregistrée par les sismomètres. Les résultats fournissent les principaux paramètres sismiques quant à la localisation de

l'épicentre, sa magnitude, la profondeur focale et parfois même les mécanismes au foyer. Ainsi, l'avancée principale en matière de détection précoce du tsunami réside dans le déploiement d'observatoires mondiaux, à l'image de celui employé par les américains : le *Global Seismographic Network* (GSN) ou celui développé par les français : GEOSCOPE. Ce progrès a été possible grâce à l'échange de données entre les institutions nationales.

Les instruments de mesure du niveau de la mer constituent l'une des composantes majeures des systèmes d'alerte. Ils sont les seuls à pouvoir vérifier ou non la formation d'un tsunami. Ces données permettent d'annuler une alerte tsunami ou au contraire d'en améliorer les modélisations (temps d'arrivées, amplitude à la côte, nombre de vagues) pour les Etats non encore impactés.

Les marégraphes mesurent les effets du tsunami à la côte. La fiabilité et la qualité des données étaient plus ou moins approximatives en fonction du type de capteur anciennement employé (acoustique, mécanique, à pression), de la période du signal échantillonné, ou encore de la localisation du marégraphe (Roger, 2011). Aujourd'hui, il est possible à l'aide de marégraphes radars, de mesurer des variations anormales du niveau de la mer avec une précision centimétrique et ainsi de détecter les événements même de très faible amplitude (Martín Míguez *et al.*, 2008). Outre le peu d'entretien nécessaire, la facilité d'installation, la fiabilité et la précision, la technologie radar permet de s'affranchir des puits de tranquillisation⁵² et ainsi de mieux observer les phénomènes de haute fréquence comme les tsunamis (Poffa *et al.*, 2010). L'IOC a supervisé la création à l'échelle mondiale d'un réseau de marégraphes (près de 300) dans le cadre du programme GLOSS (*Global Sea Level Observing System*). Ils sont employés entre autres pour la surveillance des tsunamis locaux. Toutefois, pour être exploitables en matière d'alerte tsunami, il faut que les marégraphes répondent à des cahiers des charges stricts. Par exemple, la cadence d'acquisition des données marégraphiques se situant entre quelques dizaines de secondes et une minute semble optimale pour distinguer les vagues de tsunami (Schindelé, 2008). Les informations doivent être envoyées en temps réel ou *quasi* réel avec un temps de latence le plus court possible, de 5 à 15 minutes pour les vastes bassins océaniques (tsunamis en champ lointain) et de 1 à 2 minutes pour les bassins locaux ou proches (tsunamis locaux).

Les tsunamimètres sont des capteurs de pression installés sur le plancher océanique en pleine mer. Ils détectent la propagation des ondes de tsunami selon un système basé sur la mesure de la hauteur de la colonne d'eau sus-jacente, associé aux variations de pression. On distingue aujourd'hui deux types de tsunamimètre, ceux reliés par des câbles sous-marins, employés majoritairement par les japonais⁵³ et les bouées DART® (*Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis*) développées par le PMEL. Ces dernières ont été déployées dans les bassins Pacifique, Indien et Atlantique. Aujourd'hui, on compte 61 bouées DART® en fonctionnement, dont 39 qui appartiennent aux Etats-Unis. Les bouées DART® installées sur des emplacements stratégiques par rapport aux occurrences des phénomènes de tsunami

⁵² Le puits de tranquillisation est un conduit communiquant avec la mer employé pour « filtrer les fluctuations de niveau liées aux vagues, à la houle ou aux seiches afin d'y obtenir une surface horizontale dont l'altitude est identique à l'altitude du niveau extérieur, moyennée sur un laps de temps égal au temps d'échantillonnage de la mesure » <http://refmar.shom.fr/>.

⁵³ Les Japonais ont développé un appareil équivalent dont le coût d'entretien est bien moins élevé. Il est basé sur une transmission des données par câbles. Cette technique procure une grande fiabilité de liaison, par contre la distance d'exploitation de ces systèmes est limitée à 150 km des côtes.

sont autonomes dans la détection et l'analyse de leurs paramètres. Les capteurs de pression qui équipent les DART®II, mesurent les hauteurs d'eau toutes les 15 secondes avec une précision de 1 cm. Ces données sont transmises à la bouée de surface *via* une liaison de télémétrie acoustique. L'information est renvoyée par satellite vers les centres d'alerte (méthode de transmission redondée). Lorsqu'un événement a été détecté de manière automatique par la bouée, il faut moins de trois minutes pour que le transfert des données vers le centre d'alerte tsunami correspondant s'effectue. Dans le sens inverse, lorsque le centre d'alerte veut interroger la bouée, moins de dix minutes sont nécessaires pour obtenir la réponse.

La plupart des instruments (sismographes et marégraphes) employés par les systèmes d'alerte tsunami issus des réseaux d'observation mondiaux ou régionaux étaient utilisés initialement pour d'autres recherches (études des changements climatiques à long terme, surveillance du niveau des océans, études des circulations océaniques, surveillance de traités internationaux). Aussi, ils répondent à des contraintes techniques plus souples et ne conviennent pas forcément aux exigences opérationnelles requises pour l'alerte aux tsunamis. C'est pourquoi l'efficacité et la fiabilité des informations fournies par ces instruments de mesure dépendent de quatre principaux critères :

- leur nombre et leur répartition : plus un réseau est dense et bien déployé sur l'ensemble du territoire de risque et plus la qualité des renseignements est précise et les délais de détection réduits ;
- l'homogénéité des mesures : les méthodes et les protocoles d'acquisition des instruments employés doivent répondre à des cahiers des charges stricts, ce qui a conduit à l'harmonisation et à la modernisation de nombreux instruments déployés en mer depuis longtemps ;
- l'interopérabilité des protocoles d'échange de données et la sécurisation de leur transfert en temps réel ;
- un transfert automatisé des mesures en temps réel ou *quasi* réel, selon des moyens de communication sécurisés et redondants ;
- la redondance des instruments stratégiques en cas de problème de communication ou de dommages liés à des éléments externes (cyclones, vandalisme, etc.) ;
- leur entretien régulier.

Les ICG sous l'autorité de l'IOC-UNESCO jouent un rôle primordial de coordination dans la mise en place de ce réseau de détection. Ils œuvrent en faveur de leur modernisation et de leur densification. Ils favorisent également les ententes internationales et interinstitutionnelles, notamment pour l'échange de données en temps réel issues des instruments de mesure. Ces instruments représentent un coût d'installation et d'entretien élevé pour les nations, auxquels s'ajoutent parfois des blocages géopolitiques.

3.2.2.2. Déploiement dans la Caraïbe

Cela fait plus de 10 ans que l'ICG/CARIBE-EWS a été créé. Les efforts menés pour l'amélioration des réseaux de détection ont été évalués récemment par un groupe d'experts. Les principaux résultats sont présentés dans le nouveau plan d'action 2013-2017 (IOC-UNESCO, 2013a) et sont détaillés dans l'article scientifique de McNamara *et al.* (2015). L'évaluation porte principalement sur les capacités de détection des tsunamis générés par des séismes. Le bilan est très positif au regard des standards internationaux couramment exigés et de la faible dimension du bassin caribéen.

Le nombre de sismographes en temps réel qui représentent le noyau dur du système, est passé de 33 en 2010 à 151 en 2015 (figure 29). Cela permet aujourd'hui de répondre aux critères imposés par le *Working Group 1* de l'ICG/Caribe EWS, à savoir détecter un séisme dont la magnitude est supérieure ou égale à 4.5 en moins d'une minute et selon une précision spatiale de moins d'un kilomètre. Ces valeurs standards garantissent une estimation des paramètres de la source en moins d'une à deux minutes et l'émission rapide des bulletins relatifs au risque de tsunami en moins de cinq minutes (McNamara *et al.*, 2015). Pour ce faire, le PTWC bénéficie dans cette région de plusieurs réseaux de sismographes internationaux (*Global Seismographic Network, GSN*), régionaux (*Middle America Seismograph Consortium, MISAS*) et nationaux (*USGS; Puerto Rico Seismic Network – Université de Porto-Rico; Seismic Research Unit – Université des West Indies; GEOSCOPE – IPGP*). Il dispose également des informations collectées par les réseaux du bassin adjacent en Atlantique (McNamara *et al.*, 2015). Il demeure seulement quelques zones où la couverture du réseau reste insuffisante pour répondre à ces critères. Il s'agit du nord de l'Amérique du Sud et de quelques secteurs du pourtour du golfe du Mexique. Le nombre de marégraphes et tsunamimètres en temps réel ou quasi réel est passé de 24 en 2007 à plus de 69 en 2015 (IOC-UNESCO, 2015). Néanmoins, il subsiste encore quelques espaces où les données marégraphiques sont insuffisantes pour couvrir correctement les principales sources tsunamigènes comme sur le littoral vénézuélien, colombien et cubain. Ce réseau encore peu dense manque également de redondance en cas de dysfonctionnement des instruments ou de dommages en cas d'événements, ce qui est source de grande inquiétude (IOC-UNESCO, 2013a).

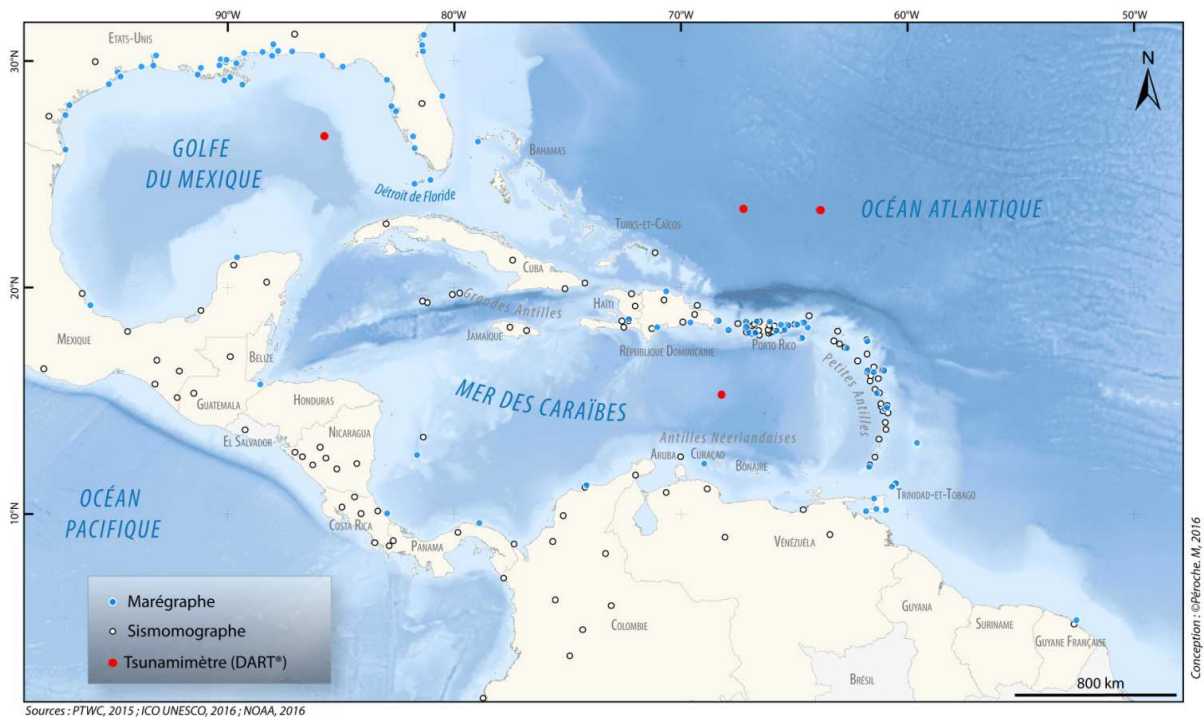


Figure 29 : Carte des réseaux instrumentaux employés par le PTWC pour la surveillance des tsunamis dans la Grande Caraïbe

Les réseaux instrumentaux employés pour la surveillance et l'alerte des tsunamis dans le bassin de la Caraïbe se sont largement densifiés ces dix dernières années. Le réseau de sismographes et de marégraphes est renforcé par 4 bouées DART® et le PTWC dispose également des données en temps réel de trois autres bouées en Atlantique (non représentées sur la carte) : une située à proximité de la dorsale médio-atlantique et les deux autres le long de la côte est américaine. Dans la Caraïbe, le système de surveillance et d'alerte est basé sur un réseau communautaire contrairement à la Méditerranée qui a créé son propre réseau. On soulignera l'importance du rôle joué par les Etats-Unis dans cette partie de l'alerte montante, qui mettent en œuvre des moyens techniques et humains très importants dans la Caraïbe.

3.2.3. Organisation de la phase montante de l'alerte tsunami

3.2.3.1. Rôles des TSP : détection et interprétation des événements au potentiel tsunamigène

Les *Tsunami Service Provider* (TSP) sont en charge de surveiller 24h sur 24 et 7 jours sur 7 les réseaux instrumentaux de leur secteur de responsabilité. Ils veillent à leur bon fonctionnement afin d'assurer une couverture de détection optimale des séismes et de tout mouvement anormal du niveau ou de pression des mers. Ces centres poursuivent trois principaux objectifs opérationnels :

- la diffusion d'avis de tsunami (bulletin d'informations ou de menace) en moins de 15 minutes consécutivement à tout événement sismique potentiellement tsunamigène, complété le cas échéant par l'heure d'arrivée théorique du phénomène le long des côtes du bassin ;

- la diffusion de messages complémentaires au cours de l'événement avec des données d'amplitude théoriques du phénomène à l'approche des côtes ;
- la diffusion d'un message d'annulation ou de fin du phénomène.

L'analyse des données sismiques reçues par les TSP est entièrement automatisée. Elle permet d'interpréter et de caractériser la menace d'un tsunami en seulement quelques minutes après un événement sismique ou la détection anormale du niveau de la mer. Les paramètres sismiques sont confrontés à une matrice de décision qui détermine le message initial à diffuser en fonction des différents seuils de magnitude et de profondeur atteints par l'événement. Elle permet de définir un niveau de risque au regard des premiers paramètres sismiques. Cette matrice est construite en fonction des connaissances scientifiques en rapport avec l'aléa tsunami pour le bassin de risque concerné (sismicité historique, failles actives et mouvements associés, tsunamis historiques). Elle couvre l'ensemble des scénarios possibles pour un secteur de responsabilité donné. Le message initial est ensuite diffusé par les TSP à tous les membres et institutions qui y sont abonnés aux moyens de plusieurs systèmes de communication.

3.2.3.2. Principe de fonctionnement du PTWC pour la Caraïbe

La détection et l'émission d'avis de tsunamis dans le bassin de la Caraïbe sont couvertes par deux TSP depuis 2006. Le *United States National Tsunami Warning Center* (US NTWC), situé en l'Alaska, est administré par les américains. Il est en charge des avis de tsunami pour les Etats-Unis, Porto-Rico et les îles Vierges Américaines et Britanniques⁵⁴. Le PTWC quant à lui, situé à Hawaii⁵⁵, assure l'intérim de TSP pour l'ensemble des autres Etats membres de la Caraïbe⁵⁶ (figure 30). Ces deux centres travaillent en étroite relation et disposent *a priori* de la même instrumentation pour la détection des tsunamis. Tous deux sont reliés au GSN qui constitue le cœur du réseau de détection sismique. Ils sont également rattachés à des réseaux complémentaires d'observation nationaux comme GEOSCOPE⁵⁷ (IPGP).

⁵⁴ Les îles de Porto-Rico et les îles Vierges Britanniques et Américaines devraient prochainement être rattachées au centre d'alerte du PTWC. Prévu initialement pour le 1er avril 2016, ce transfert de compétence a été récemment reporté à une date ultérieure non renseignée (<http://www.nws.noaa.gov/om/notification/scn15-55tsunamiaab.htm>)

⁵⁵ L'agence du PTWC a déménagé au cours de l'année 2015 dans les nouveaux bâtiments de la NOAA sur l'île de Ford (île O'ahu – Etat d'Hawaii). Le choix de ce site en bord de mer et sur une île est controversé. Un rapport rédigé par le *Public Employees for Environmental Responsibility* (PEER), disponible sur internet (http://www.peer.org/assets/docs/noaa/06_12_6_tsunami_readiness_issues.pdf), évoque huit points de failles potentielles liées à l'exposition directe et indirecte du bâtiment face à l'aléa tsunami. Cette affaire est également relayée localement par les médias <http://www.hawaiinewsnow.com/story/25347332/pacific-tsunami-warning-centers-defends-controversial-move>.

⁵⁶ Des discussions sont en cours au sein de l'ICG afin de déterminer quelles seraient les institutions susceptibles de prendre en charge la fonction de TSPR. Elles pourraient être soutenues par un second centre au Nicaragua ou au Salvador pour la partie d'Amérique centrale qui est en cours de création dans le cadre de l'ICG/PTWS

⁵⁷ www.geoscope.ipgp.fr



Figure 30 : Photographie de la salle de surveillance et d'analyse des tsunamis du PTWC (a) hébergée dans le bâtiment du Inouye Regional Center de la NOAA (b) situé sur l'île de Ford (Hawaii) (a) (crédit photo : US Navy⁵⁸)

Le 11 mai 2011, le PTWC a proposé à l'ICG/PTWS la modification du contenu des messages textes diffusés en cas d'avis de tsunami et l'introduction de nouveaux produits graphiques afin d'améliorer le service pour le bassin Pacifique. A cette occasion, un changement de doctrine important est intervenu au sein du PTWC notamment dans les terminologies employées : le PTWC ne fournit plus des messages d'alerte mais des avis de tsunamis accompagnés de prévisions d'amplitude à la côte modélisées en temps quasi réel⁵⁹. La responsabilité revient donc à chaque centre national d'alerte aux tsunamis (NTWC) de définir les niveaux d'alerte en relation avec les prévisions du PTWC et au regard des territoires concernés. Ces nouveaux éléments ont été testés au cours des exercices régionaux « PacWave » de 2011 et 2013. Ils ont été évalués par les participants à la suite de retours d'expérience. Approuvés par l'ICG/PTWS en septembre 2013, ils ont été implémentés au niveau de l'organisation régionale le 1^{er} octobre 2014. Ces nouveaux produits ont été également approuvés par le centre d'alerte Japonais et leur implémentation est en cours pour le centre d'alerte américain sur la période 2016-2018. Après une phase de tests et de prise en main par les utilisateurs qui a débuté le 1^{er} octobre 2015, le PTWC propose désormais les mêmes services pour les territoires Caribéens sous sa responsabilité. Ils sont entrés en vigueur au 1er mars 2016.

⁵⁸ <https://pifsc-www.irc.noaa.gov/facilities.php>

⁵⁹ "PTWC to discontinue issuing Warning, Watch, Information Bulletins to PTWC countries. Instead, PTWC will issue Messages with Tsunami Forecasts, sent by email only to Country TWFPs. TWFP/NTWC will be responsible for issuing Warning, Watch, Information Alert for its own country emergency" (Kong et McCreery, 2014)

L'introduction récente de ces éléments inédits a nécessité une mise à jour importante des documents de planification opérationnelle que nous avons initialement proposés à l'échelle régionale pour les intégrer au prochain plan ORSEC Zonal (chapitre 4).

- Le type d'avis de tsunami émis par le PTWC

Le choix du type d'avis émis par le PTWC se fonde sur une matrice de décision définie selon trois entrées : la magnitude du séisme, la profondeur du foyer et la localisation de son épicentre (cf. annexe 4). Cette matrice couvre l'ensemble des événements sismiques au potentiel tsunamigène, soit pour des séismes dont la profondeur du foyer est inférieure à 100km et qui se produisent dans le bassin de la Grande Caraïbe (magnitude $M_w \geq 6$) ou alors dans l'Océan Atlantique (magnitude $M_w \geq 6.5$). La distinction entre les deux secteurs permet de différencier la magnitude des séismes pour lesquels le risque de tsunami est nul ou quasi nul. Sur la base de cette matrice, deux types d'avis sont émis par le PTWC : des bulletins d'information ou de menace (figure 31).

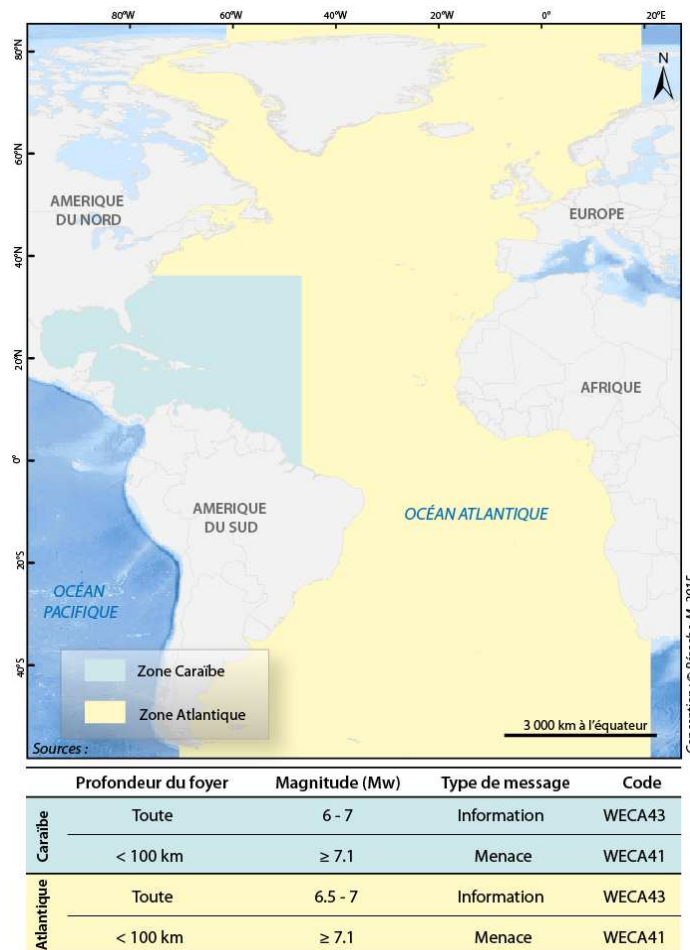


Figure 31 : Zones au potentiel tsunamigène sous surveillance dans le cadre de l'ICG/CARIBE-EWS (d'après IOC-UNESCO, 2015)

Il existe néanmoins deux exceptions qu'il conviendra de prendre en compte dans notre réflexion pour la planification des alertes tsunamis à l'échelle de la Martinique. Un bulletin d'information sera émis par le PTWC dans le cas particulier d'un séisme situé en Atlantique, de magnitude supérieure ou égale

à 7.9, de profondeur inférieure à 100 km et si aucune côte n'est potentiellement exposée à moins de 3 heures. Ces bulletins concernent en premier lieu les séismes qui se produisent le long de la dorsale médio-atlantique. Bien que le potentiel tsunamigène généré par les mouvements tectoniques de cette zone soit très faible (faille transformante), le PTWC poursuit le « *monitoring* » de l'événement jusqu'à ce que les enregistrements des marégraphes et/ou des bouées DART confirment ou non la génération d'un tsunami. Un bulletin d'information est également émis dans le cas de séismes dont l'épicentre est situé à terre mais à proximité du littoral et dont la magnitude M_w est supérieure ou égale à 6 pour n'importe quelle profondeur du foyer. Pour l'ensemble des autres scénarios aucun message n'est lancé par le PTWC.

D'après la documentation officielle rédigée par le PTWC (IOC-UNESCO, 2014a) :

- Les messages d'information sont émis pour informer les états membres du bassin concerné qu'un séisme a été détecté et analysé par le centre américain, mais qu'il ne présente pas une menace pour le bassin ou alors que la menace est inexistante compte tenu de l'épicentre très éloigné à l'intérieur des terres. Néanmoins, ce message n'exclut pas la possibilité d'un tsunami très localisé à proximité immédiate de l'épicentre⁶⁰. Dans ce cas, un message de menace peut être émis à la suite du bulletin d'information si jamais une onde de tsunami est mesurée par des tsunamimètres ou des marégraphes. Le bulletin d'information doit être considéré par les autorités avant tout comme un message qui indique que la menace de tsunami destructeur est nulle, et qu'il est inutile d'évacuer le littoral même si le séisme a été ressenti par la population⁶¹. De janvier 2012 à décembre 2015, le PTWC a émis 22 bulletins d'information à l'intention des Etats de la Caraïbe⁶².
- Les messages de menace sont lancés pour informer qu'un séisme au potentiel tsunamigène a été détecté et analysé par le centre américain, et qu'un tsunami destructeur peut impacter le littoral des pays du bassin concerné. Il ne s'agit pas d'un message d'alerte mais bien d'un avertissement. Il revient aux autorités locales la responsabilité de diffuser une alerte auprès des populations exposées pour une éventuelle évacuation. Ces messages sont actualisés au minimum toutes les heures, ou plus fréquemment si des informations pertinentes pour la gestion de crise sont récoltées par le PTWC, comme par exemple des amplitudes mesurées à la côte.

A la suite des bulletins de menace, le PTWC émet un bulletin d'annulation (« *Warning Cancellation* ») si d'après les enregistrements marégraphiques aucun tsunami aux effets destructeurs potentiel n'a été détecté ou si les enregistrements indiquent que les effets sont dissipés pour la majeure partie du bassin. Le choix de diffuser localement un message de fin d'alerte à la population tient de la responsabilité des NTWC. Le PTWC conseille d'attendre au moins deux heures après la fin des effets destructeurs ou si aucun effet destructeur n'a eu lieu, deux heures après l'ETA. Néanmoins, des effets locaux peuvent

⁶⁰ "no widespread tsunami threat but the small possibility of a local tsunami" (IOC-UNESCO, 2014a).

⁶¹ "Tsunami Information Bulletin indicates there is no threat of a destructive tsunami, and are used to prevent unnecessary evacuations as the earthquake may have been felt in coastal areas" (IOC-UNESCO, 2014a).

⁶² L'historique des messages diffusés par le PTWC est disponible sur : <http://ptwc.weather.gov/ptwc/archive.php?basin=caribe>

persister dans les fonds de baie ou dans les ports pendant plusieurs heures retardant la fin de l'alerte (IOC-UNESCO, 2009).

3.2.3.3. Moyens de diffusion des avis employés par le PTWC

Les temps nécessaires à la diffusion du message initial par le PTWC ont diminué considérablement ces dernières années (figure 32). En 2005, la moyenne du temps de détection d'interprétation et de diffusion des messages dans le Pacifique était de 14.5 min, en 2010 de 6.5 min et en mars 2014 elle n'était plus que de 5.75 min (McCreery et Kong, 2014). Dans la Caraïbe, le PTWC assure l'émission des messages textes (bulletins d'information et/ou de menace) dans un délai théorique compris entre trois et dix minutes (PTWC, 2015).

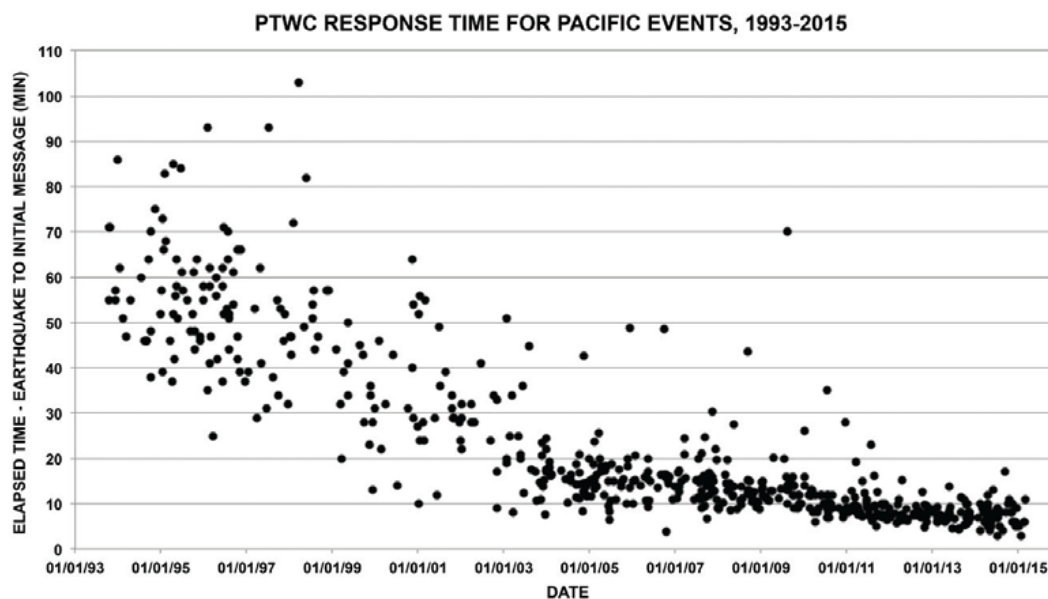


Figure 32 : Evolution des délais de réponse du PTWC entre 1993 et 2015 (source : Anderson, 2016)

La densification des réseaux instrumentaux ainsi que l'amélioration des algorithmes d'interprétation des données sismiques ont largement contribué à réduire de manière significative le temps de publication des premiers messages par le PTWC. On note tout de même que pour quelques événements les bulletins ont été émis encore récemment au-delà d'un délai de 10 min.

Les messages textes sont diffusés selon plusieurs moyens de communication auprès des TFP, des NTWC ainsi qu'à la population. Plusieurs circuits sécurisés sont dédiés à la transmission de messages spécifiques auxquels sont intégrés les messages textes du PTWC (GTS, NWWW, AFTN et EMWIN). D'autres sont plus courants comme les courriels, les SMS, les Fax ou encore les réseaux sociaux. Des tests de communication sont opérés par le PTWC une fois par mois et deux autres tests annuels sont effectués de manière aléatoire (IOC-UNESCO, 2015). Ils permettent d'identifier d'éventuels problèmes de transmission. Ils sont également testés au cours des exercices annuels « Caribe Wave/Lantex ». Dans les retours d'expérience qui sont organisés après chacun de ces exercices, les principaux modes de communication employés par les TWFP pour la réception des messages sont inventoriés (tableau 8). En 2016, il s'agit par ordre d'importance des courriels (50 %), du GTS (15 %) et des Fax (13 %) et

EMWIN (13 %). L'information est également diffusée en temps réel par le PTWC sur leur site internet⁶³.

Tableau 8 : Moyens de communication employés par le PTWC pour l'émission des bulletins d'information et des messages de menace, d'après Vanacore et al. (2016)

Système de diffusion	Acronyme	Information	2016	2015	2014
Global Telecommunication System ⁶⁴	GTS	Réseau dédié	9	9	7
NOAA Weather Wire Service ⁶⁵	NWWW	Réseau dédié	1	1	0
Aeronautical Fixed Telecommunications Network ⁶⁶	AFTN	Réseau dédié	2	3	2
Emergency Managers Weather Information Network ⁶⁷	EMWIN	Réseau dédié	8	8	7
Courriel	-	Internet	30	31	33
Médias sociaux	-	Internet	1	2	0
SMS (système Ranet Alert Watcher) ⁶⁸	-	Téléphone	1	1	1
Fax	-	Téléphone	8	21	18

- L'information contenue dans le message initial

Les messages texte diffusés par le PTWC sont toujours formatés selon le même modèle (cf. annexe 5). Les informations contenues sont différentes selon qu'il s'agit d'un bulletin d'information ou d'alerte. Ces derniers contiennent des informations supplémentaires propres à l'événement tsunami en cours comme les temps théoriques d'arrivée des premiers effets à la côte et les classes d'amplitudes modélisées (tableau 9).

⁶³ <http://ptwc.weather.gov/?region=3>

⁶⁴ "The Global Telecommunication System (GTS) is defined as: "The co-ordinated global system of telecommunication facilities and arrangements for the rapid collection, exchange and distribution of observations and processed information within the framework of the World Weather Watch" (source : www.wmo.int).

⁶⁵ "NWWW singular purpose is to provide timely meteorological, hydrologic, climate, and geophysical information to state and Federal governments, emergency managers, commercial users, media outlets (television, radio, social), and the general public. NWWW collects various weather products, alerts and warnings from NWS National Centers and Weather Forecast Offices (WFOs) and makes all available over the National Weather Service Satellite Broadcast Network (SBN/NOAAPORT) and via an "Open Interface" (OI) using the Internet" (source : www.nws.noaa.gov).

⁶⁶ "A worldwide system of aeronautical fixed circuits provided, as part of the aeronautical fixed service, for the exchange of messages and/or digital data between aeronautical fixed stations having the same or compatible communications characteristics" (ICAO, 2010).

⁶⁷ "The Emergency Managers Information Network is a wireless, priority-driven computer weather data broadcast system providing timely watches, warnings, forecasts, other hydro-meteorological products, graphics and satellite imagery that uses NOAA's GOES satellites and low cost user receive systems across the U.S., the Caribbean, Central America and over most of the Pacific Ocean" (source : www.nws.noaa.gov).

⁶⁸ "RANET AW, SMS is a 'heads-up' notification system for important decision makers. The system broadcasts an abbreviated message as an SMS to mobile phones. This short message lets the recipient know that an official, lengthier message had been issued by the Pacific Tsunami Warning Center" (source : www.itic.ioc-unesco.org/).

Tableau 9 : Synthèse et comparaison des informations contenues dans les bulletins d'information et de menace émis par le PTWC

Type d'information	Bulletin d'information	Message de menace
Code	WECA 43	WECA 41
Numéro du message	Oui	Oui
Centre émetteur	Oui	Oui
Heure de l'émission	Oui	Oui
Titre	« Tsunami information statement »	« Tsunami threat message »
Destinataires	Oui	Oui
Paramètres sismiques préliminaires	Oui	Oui
Evaluation générale de la situation	Oui	Oui
Liste des pays concernés	Non	Oui (avec classe de valeur d'amplitude modélisée dès le deuxième bulletin)
Actions recommandées	Oui	Oui
Heure d'arrivée théorique	Non	Oui
Impacts potentiels	Non	Oui
Observations du phénomène	Non	Oui
Prochaine mise à jour et informations supplémentaires	Oui	Oui

L'en-tête du message définit le type d'avis qui est diffusé, le numéro de bulletin, l'heure d'émission du message par le TSP (en heure UTC) ainsi que le bassin concerné par l'événement. Il est suivi par la description des paramètres préliminaires du séisme avec sa magnitude, l'heure d'origine, la profondeur et les coordonnées géographiques. Puis, l'ensemble des pays pouvant être impactés sont listés et pour chacun d'eux une estimation du temps d'arrivée (ETA)⁶⁹ théorique est donnée. Les nouveaux messages de PTWC contiennent également des énoncés circonstanciés sur l'évaluation de la menace, les impacts potentiels et des informations complémentaires comme par exemple les hauteurs d'eau mesurées par les marégraphes le long des côtes.

C'est l'introduction de données quantitatives d'amplitude estimée sur la base de résultats de simulations numériques en temps réel par le modèle RIFT qui a permis d'optimiser la qualité des informations fournies par le PTWC. Ces estimations sont données dès le 2^{ème} message envoyé moins de 40 minutes après l'événement. Les pays précités sont alors triés selon l'amplitude maximale des vagues modélisées à l'approche des côtes pouvant affecter le littoral. Ces classes sont au nombre de 4 : moins de 0.3 m, de 0.3 à 1 m, de 1 à 3 m et supérieure à 3 m. Ce message contient également trois produits cartographiques et un tableau détaillé des résultats de simulation.

⁶⁹ Les calculs de l'estimation des temps d'arrivée de l'onde de tsunami sont réalisés à l'aide du logiciel GEOWARE TTT (www.geoware-online.com/tsunami.html) avec pour donnée bathymétrique GEBCO 30 arc second (www.gebco.net). La localisation de l'épicentre est considérée comme le point d'origine des calculs de temps de propagation. Si le séisme a lieu à terre, l'origine du calcul est projetée en mer le plus près possible de la source. Cette estimation est calculée pour 102 points répartis dans la Caraïbe. Un point est implanté à Fort-de-France pour la Martinique, trois points à Saint-Martin, un à Saint-Barthélemy, un en Guadeloupe et un en Guyane.

- Description des nouveaux produits graphiques émis par le PTWC

Les produits graphiques émis par le PTWC représentent une réelle avancée pour la gestion de crise locale des tsunamis. Ils offrent aux autorités nationales en charge de l'alerte des populations, les NTWC, la possibilité de différencier des niveaux d'alerte en fonction des amplitudes attendues. Auparavant, il n'était pas possible de distinguer le niveau de menace entre les Etats cités dans les messages d'alertes. Les produits graphiques sont émis par courriels uniquement aux TWFP et NTWC, ils sont au nombre de trois (figure 33) :

- Une carte synthétique qui représente de manière simplifiée les prévisions des amplitudes à la côte sous la forme de polygones. Certains Etats ou territoires sont couverts par un seul polygone et d'autres, dont la longueur de côte est importante, sont segmentés en fonction des limites territoriales administratives ou géomorphologiques. La couleur des polygones renseigne sur les différentes classes d'amplitude selon la valeur maximale modélisée.
- Une carte de propagation de l'énergie du tsunami qui représente les valeurs d'amplitude maximale calculées en eaux profondes. Elle montre comment le tsunami se propage à travers le bassin et les effets de directivité liés à la géométrie de la source et de la bathymétrie.
- Une carte des amplitudes à l'approche des côtes qui indique de manière plus précise les hauteurs d'eau modélisées en chaque point le long du littoral. Cette information peut être employée par les autorités locales pour différencier les niveaux d'alerte en fonction des côtes exposées, information que n'est pas révélée par les polygones. La couleur des points respecte la charte sémiologique des classes d'amplitude de la carte synthétique, selon la valeur maximale modélisée. Ces valeurs sont également fournies par le PTWC au format .KMZ qui permet une meilleure lecture de l'information et de naviguer entre les valeurs au sein du logiciel Google Earth.

L'ensemble de ces données graphiques sont accompagnées d'un tableau statistique qui détaille les valeurs données pour chaque polygone en différenciant les valeurs en eau profonde à l'approche des côtes de celles à proximité de la côte selon la loi de Green. C'est la valeur maximale qui est reportée sur les polygones. Les valeurs sont mesurées en tenant compte de la hauteur de marée.

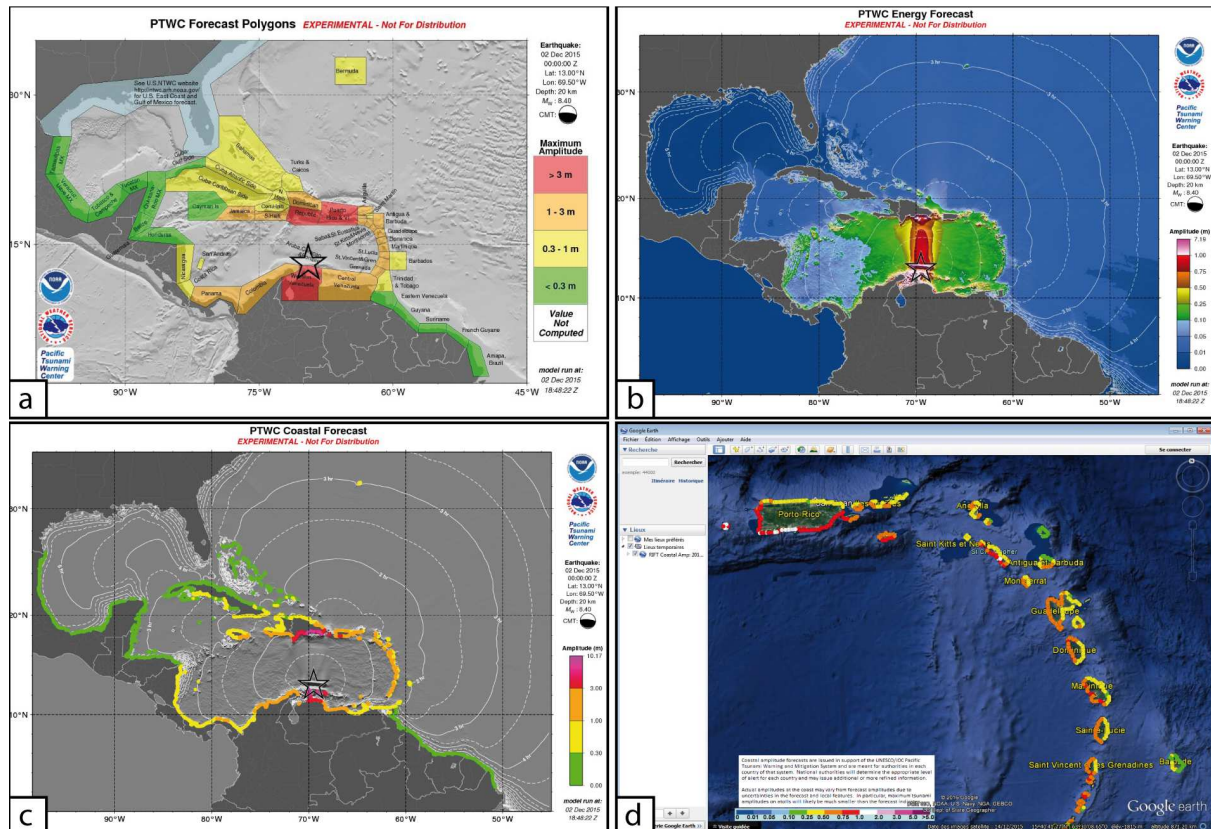


Figure 33 : Miniatures des quatre nouveaux produits graphiques diffusés par le PTWC en cas de message de menace, carte des polygones d'amplitude (a), carte de propagation de l'énergie (b), carte des amplitudes à l'approche des côtes (c), un fichier .kmz à visualiser à l'aide de Google Earth (d)

Ces nouveaux produits testés déjà depuis deux ans au cours des exercices *Caribe Wave* de 2015 et 2016 sont très bien intégrés par l'ensemble des différents pays membres. Seuls les tableaux statistiques ainsi que les fichiers .kmz semblent être un peu moins bien compris ou plus difficilement exploitables en situation de crise (Vanacore *et al.*, 2016). D'ailleurs, suite à l'exercice de 2016, plus de 65 % des participants souhaitent une formation complémentaire pour la compréhension et l'utilisation de ces produits (*ibid.*). L'arrivée « tardive » de ces éléments suite au premier message en relation avec la faible superficie du bassin, et donc la relative proximité des sources tsunamigènes ainsi que les approximations du modèle constituent les deux principales limites que l'on a observées au cours de l'exercice « *Caribe Wave* » de 2016. Deux raisons à cela : les hypothèses de la source génératrice qui sont avancées pour la modélisation rapide sont fondées sur des premières estimations et les interactions entre l'onde de tsunami et la bathymétrie à l'approche des côtes restent difficiles à modéliser. La loi de Green est appliquée pour essayer de rendre compte de ces effets, toutefois les résultats de la modélisation restent encore approximatifs, notamment pour les petits espaces insulaires dont le diamètre est inférieure à 30 km (IOC-UNESCO, 2014a). Ces valeurs doivent être lues avec précaution, et servent avant tout à donner des ordres de grandeur spatialisés quant aux effets attendus.

3.2.3.4. Limites opérationnelles

Un rapport de l'IOC-UNESCO (2009) distingue trois limites opérationnelles en rapport avec les informations contenues dans le premier message diffusé par le PTWC. Ces limites impactent

directement le niveau de fiabilité des informations pourtant essentielles pour les NTWC. Il convient donc de les énumérer.

1. La nécessité d'une alerte rapide oblige le PTWC à diffuser un message précoce à partir des premiers enregistrements sismiques qui peuvent être réévalués après une analyse plus complète des différents trains d'ondes sismiques. De plus, les déplacements verticaux engendrés par un séisme, ceux qui génèrent un tsunami, ne sont pas détectés au cours de la phase préliminaire d'analyse. Des seuils de magnitude conservateurs sont donc intégrés à la matrice de décision initiale pour le choix du type de message. Même si les nouveaux produits du PTWC sont censés limiter le risque de surestimation de l'aléa tsunami, il peut arriver que des messages de menace soient annulés lorsqu'aucune onde de tsunami significative n'a été détectée.

2. Les premières estimations de temps d'arrivée du phénomène sur les côtes, fournies par le PTWC, sont calculées au départ de l'épicentre sous sa forme ponctuelle. Or un tsunami d'origine sismique est généré par une rupture de faille de plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres. Ainsi, en fonction de la magnitude du phénomène, de la géométrie de la source et donc de la directivité principale du phénomène, ces premières estimations peuvent varier de plusieurs minutes positivement ou négativement par rapport à celles initialement annoncées. De plus, la topographie et la morphologie de la bathymétrie locale ne sont pas prises en compte dans les calculs d'ETA alors qu'elles jouent un rôle très important dans les vitesses de propagation des ondes de tsunami (IOC-UNESCO, 2009). Les temps indiqués doivent être considérés avec précaution par les autorités locales en charge de l'alerte.

3. Aujourd'hui encore, et ce malgré les nouveaux produits proposés par le PTWC, les pays et territoires mentionnés dès les premiers messages sont sélectionnés en fonction de leur distance par rapport à l'épicentre du séisme ou de l'estimation du temps d'arrivée du tsunami. Pourtant, les effets à la côte peuvent être différents en fonction de nombreuses variables comme l'orientation de la rupture de faille, de la bathymétrie ou encore de la géométrie de la source. Ainsi, durant les vingt premières minutes après l'alerte initiale, les Etats ne peuvent pas encore déterminer avec exactitude le niveau de menace, ni même s'ils sont réellement menacés.

Dans ce chapitre, nous avons vu que la phase de pré-crise immédiate tsunami est complexe à gérer pour les opérationnels. Les scénarios sont multiples et les délais entre la réception des messages émis par le PTWC et l'arrivée théorique du phénomène sur les côtes sont courts. Malgré les efforts menés par le PTWC pour améliorer et diversifier les produits utiles à la gestion de crise de nombreuses incertitudes subsistent quant à son niveau d'impact. Nous présentons dans le prochain chapitre un document d'aide à la décision que nous avons réalisé à destination des autorités locales pour la conduite d'actes réflexes sur réception des messages du PTWC. Des propositions en matière de procédures opérationnelles de mise en sécurité des navires à destination des autorités portuaires viennent compléter ces travaux.

Chapitre 4 Planifier les évacuations préventives face à l'aléa tsunami : enjeux et difficultés

La connaissance historique et scientifique des tsunamis dans la Caraïbe s'améliore d'années en années. Le réseau de surveillance se densifie et la capacité de détection du phénomène se perfectionne à l'échelle régionale. Le PTWC, centre d'alerte tsunami par intérim, est capable de diffuser un premier bulletin en moins de dix minutes. Depuis janvier 2015, ce ne sont pas moins de 22 bulletins d'information qui ont été émis par le PTWC pour le bassin de la Caraïbe. Il convient à chaque Etat et Territoire de planifier la gestion de crise à l'échelle nationale. Cette dernière étape cruciale est nommée dans la littérature anglo-saxonne « *the last-miles* ».

Ce « dernier kilomètre » représente la phase décisive pour une mise en sécurité réussie des populations. Elle consiste à planifier la réponse institutionnelle régionale et locale, face à la menace tsunami, selon des procédures standard qui tiennent compte de l'ensemble des scénarios envisageables pour les territoires français de la Caraïbe. Dans ce chapitre, nous apportons des propositions d'organisation dans le but d'aider les institutions à préparer cette planification, en cohérence avec les nouveaux produits délivrés par le PTWC depuis la fin de l'année 2015. Ces propositions et les questionnements qui les accompagnent sont les résultats de nombreuses réunions de travail en Préfecture et de notre collaboration avec l'EMIZA.

Un état des lieux exhaustif de la seule parade efficace pour la sauvegarde de la population, à savoir l'évacuation préventive du littoral, vient compléter ce travail. Les territoires de la Caraïbe, dont le système de gestion de crise est proche du modèle américain, ont déjà entamé la préparation et la planification de l'évacuation de leurs populations y compris face à l'aléa tsunami. Pour la France, il s'agit d'une mesure préventive généralement circonscrite à des territoires restreints. Cette solution se heurte à la crainte et à la méconnaissance des autorités qui sont plus familières d'un appel au confinement des populations sur place. Il s'agit donc d'apporter un éclairage sur les plus-values de la planification préventive en rapport avec les tsunamis à travers les crises récentes, et de faire le lien avec les derniers guides nationaux rédigés sur cette mesure exceptionnelle mais incontournable face à l'aléa tsunami.

4.1. Planification des alertes et matrice d'aide à la décision en Martinique

4.1.1. Alerter les institutions de gestion de crise régionale et départementale (fin de la chaîne d'alerte montante)

Le message initial du PTWC est diffusé dans un délai compris entre 3 et 10 minutes après qu'un séisme au potentiel tsunamigène a été enregistré par l'ensemble des *Tsunami Warning Focal Point* (TWFP). Le point focal désigné pour les îles françaises de la Caraïbe est Météo-France⁷⁰. Il s'agit de la seule institution régionale à disposer de l'ensemble des conditions imposées par l'IOC/UNESCO pour prétendre à cette fonction dans l'organisation du système d'alerte, à savoir :

- un réseau principal sécurisé pour la réception des messages du PTWC ;
- un réseau redondant pour assurer une éventuelle faille des systèmes de communication ;
- un opérateur de permanence 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 capable de comprendre le message et de le retransmettre aux *Tsunami Warning Center* (TWC).

Dans la Caraïbe, le centre interrégional de Météo-France Antilles-Guyane est organisé en plusieurs services régionaux situés en Martinique, en Guadeloupe et en Guyane. Chaque entité dispose d'un Centre de Prévision de Proximité (CPP). Toutes reçoivent le message *via* le réseau GTS⁷¹ (*Global Telecommunication System*) ainsi que par email, indépendamment les uns des autres. Dès la réception d'un avis du PTWC, un système sonore et un signal lumineux se déclenchent dans la salle de l'opérateur. Un traitement automatisé permet d'extraire l'information relative à la distance de l'épicentre par rapport aux départements concernés. Ce renseignement ainsi que le message initial du PTWC sont envoyés par email par l'opérateur du CPP (TWFP) vers le SIDPC (NTWC), sous sa responsabilité. Ces deux emails sont doublés d'un appel téléphonique pour confirmer la bonne réception de l'information. Les emails sont également adressés à deux autres institutions, l'EMIZA pour son rôle de coordination à l'échelle régionale, et le CROSS-AG pour la partie maritime. Cette chaîne de traitement et de diffusion du message correspond à la procédure standard.

Les deux CPP de Martinique et de Guadeloupe sont très proches des sources sismiques et tsunamigènes potentielles ce qui peut engendrer une faille dans cette procédure. En effet, leurs infrastructures peuvent être endommagées par un séisme local de forte magnitude (dégradation du bâtiment, rupture des systèmes de communication, affolement du personnel). De plus, l'évacuation

⁷⁰ Les tsunamis ne relèvent pas du risque météorologique. Cependant, aux termes de l'article 6 de la convention cadre entre le Ministère de l'Intérieur/DGSCGC et Météo-France (2013-2017) du 31 janvier 2013 et compte tenu de sa disponibilité opérationnelle H24, Météo-France retransmet aux autorités locales françaises des Antilles, de La Réunion, de Mayotte et des Terres Australes les messages relatifs à ces phénomènes qui circulent sur le Système Mondial de Télécommunication de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) (EMIZA, 2016).

⁷¹ Le GTS désigne le Système Mondial de Télécommunications (SMT en Français), élaboré sous l'égide de l'Organisation Météorologique Mondiale pour « faciliter l'acheminement des données d'observation et de l'information traitée afin de répondre en temps voulu, et de manière fiable et rentable, aux besoins de la Veille Météorologique Mondiale (VMM), [...]. Il doit également fournir des moyens de télécommunications pour la mise en œuvre d'autres programmes, en application des décisions prises par le Congrès ou par le Conseil exécutif de l'OMM et dans les limites de ses objectifs principaux » (OMM, 2009). Il est formé d'un réseau de liaisons de télécommunications terrestres et satellites conçu à trois niveaux (mondial, régional, national) employant des services, installations et lignes spécialisées, sécurisées et redondantes.

des bâtiments par le personnel, conformément aux consignes de sécurité « séisme », risque fort de retarder la diffusion des messages vers les SIDPC voire de la compromettre⁷². Un système de redondance a été mis en place avec le concours du CPP de Guyane, seul centre non exposé à l'aléa sismique (figure 34). Ainsi, pour tous les messages de menace émis par le PTWC, l'opérateur de Guyane doit joindre les CPP de Martinique et de Guadeloupe selon l'ordre d'apparition des territoires sur le message du PTWC. Si le réseau de communication téléphonique est coupé ou qu'aucun opérateur ne répond, alors le CPP de Guyane est en charge de transmettre le message aux SIDPC concernés par mail et par téléphone.

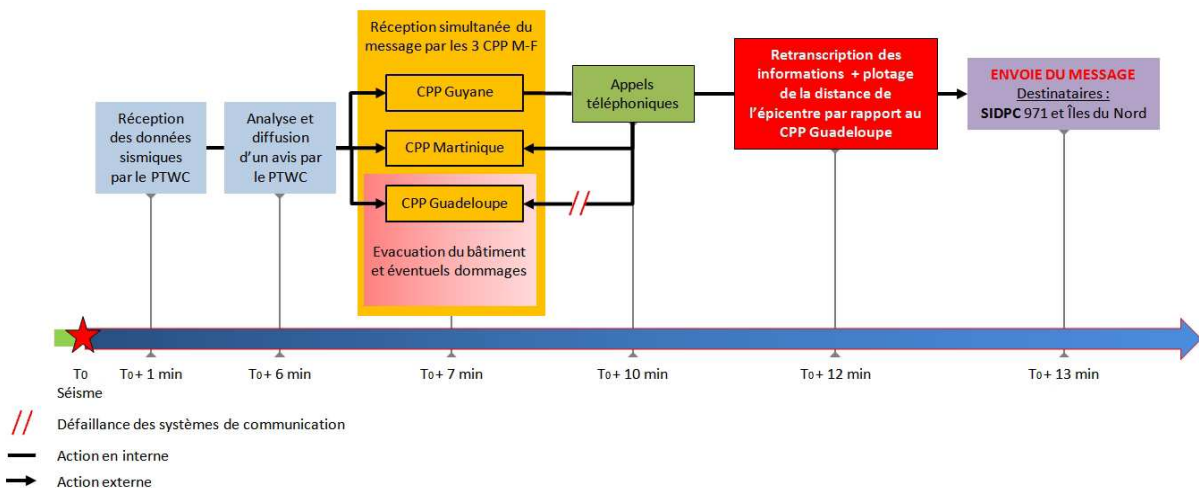


Figure 34 : Chaîne de transmission du message du PTWC en cas de sources tsunamigènes proches du CPP de Guadeloupe et en situation dégradée (les temps sont donnés à titre indicatif et représentent une estimation basse des délais possibles)

4.1.2. Diffusion locale du message d'alerte

4.1.2.1. Modalités d'alerte des populations à terre, l'alerte descendante à l'échelle départementale (Martinique)

Dans la logique de l'Article L 112-1 du code de la sécurité intérieure, l'alerte descendante vers les populations, appréhendée dans un contexte de sécurité civile, répond à la définition suivante : « l'alerte des populations consiste à la diffusion, par les autorités et en phase d'urgence, d'un signal destiné à avertir les individus d'un danger imminent ou en train de produire ses effets, susceptible de porter atteinte à leur intégrité physique et nécessitant d'adopter un comportement réflexe de sauvegarde ». Le message d'avis de tsunami relayé par Météo-France est réceptionné par le personnel du SIDPC en préfecture. Il s'agit du service directement en charge de la diffusion des avis de tsunami vers la population. Néanmoins, la seule autorité compétente pour ordonner une évacuation est le préfet ou si ce dernier n'est pas joignable le directeur de cabinet de la préfecture.

⁷² Le site de Météo-France en Martinique est localisé à moins de 250 m de la limite de l'actuel zonage tsunami PPR réalisé par le BRGM. Sa proximité avec le rivage et sa faible élévation, inférieure à 10 m d'altitude, en font un bâtiment potentiellement exposé à l'aléa tsunami, situé dans la zone d'évacuation tsunami théorique des 0-10 m d'altitude.

Actuellement en Martinique, le moyen de diffusion privilégié est l'envoi simultané de SMS à l'aide d'un automate d'appel⁷³ selon une liste de contacts préétablie. Ces messages sont destinés aux autorités locales, services de secours, services de soins, forces de l'ordre, forces armées, médias et aux responsables de sécurité des grandes entreprises et sites industriels. Cette technique présente trois avantages :

- une rapidité de mise en œuvre pour les TWC en période d'alerte ;
- un rapport coût de mise en place/nombre de destinataires inférieur à tout autre mode de communication ;
- un moyen de communication efficace qui assure une prise de connaissance rapide des messages par les destinataires.

Cependant, les opérateurs téléphoniques ne peuvent pas garantir un taux d'envoi à 100%, ce qui pose un réel problème. Pour y faire face, il est indispensable de multiplier le nombre de destinataires au sein d'un même service, et de veiller à la mise à jour régulière des contacts téléphoniques. Ce mode de diffusion peut éventuellement être doublé d'un envoi par email.

En l'absence de Système d'Alerte et d'Information des Populations (SAIP) sur les territoires français de la Caraïbe (encadré 3), la diffusion des messages par l'intermédiaire des médias classiques représente la condition *sine qua non* pour relayer en masse l'information auprès des populations. En Martinique, le chef du SIDPC encadre des groupes de travail dont l'objectif est de favoriser et d'anticiper les modalités de coopération entre les médias et les préfetures en cas d'alerte. Des conventions sont en cours d'actualisation avec les médias nationaux et locaux. Les télévisions (Martinique 1^{er} et ATV) diffusent des messages texte sous la forme de bandeaux qui s'affichent en direct en bas de l'image (figure 35a). A la radio, il s'agit de messages audio bien sûr. Leur contenu est prédéfini par le bureau de la communication interministériel (BCI)⁷⁴. Il se charge également de la diffusion des messages sur les réseaux sociaux. Aujourd'hui, seul le compte officiel Facebook de la Préfecture est employé. Le préfet peut également mobiliser l'ensemble des moyens aériens de l'Etat, et par exemple diffuser l'alerte via hélicoptère (figure 35b). Cette opération a été testée avec succès le long à la plage des Salines (commune de Sainte-Anne), l'une des plages qui présente le risque le plus fort en cas d'évacuation (chapitre 8).

⁷³ Service « *Contact Everyone* » proposé par l'opérateur téléphonique Orange

⁷⁴ Le bureau de la communication interministérielle assure le pilotage de la communication interministérielle, les relations avec la presse, la communication de crise et la gestion des sites Internet et Intranet des services de l'État à l'échelle départementale

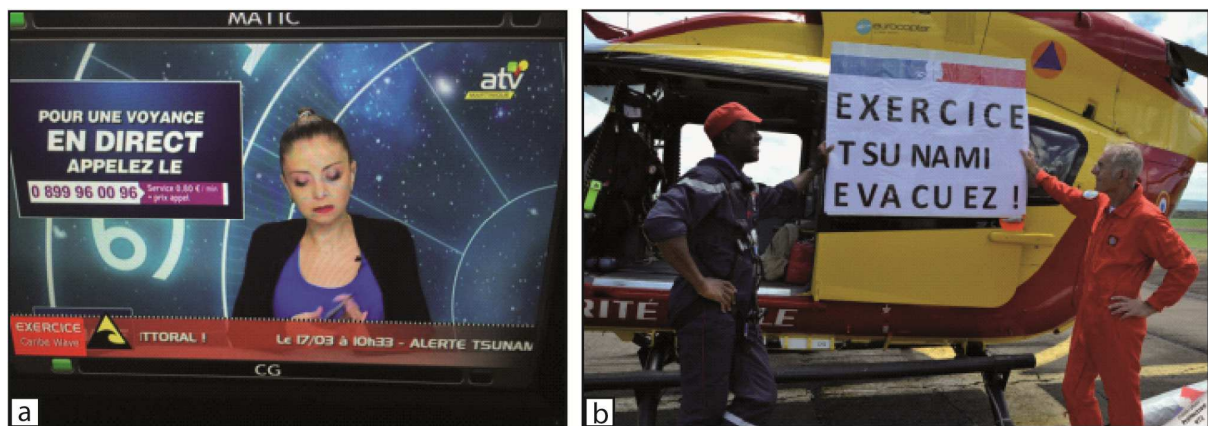


Figure 35 : Bandeau d'alerte tsunami diffusé par une chaîne de télévision locale ATV au cours de l'exercice Caribe Wave 2015 (a), et moyen hélicoptéré utilisé pour avertir les populations présentes sur les plages de Sainte-Anne (b) (crédit photo : préfecture 972)

Cette visibilité doit permettre à quiconque de comprendre et confirmer rapidement la nature de la menace⁷⁵. Cet élément est particulièrement important en période de crise et améliore nettement le taux de mobilisation des individus. Ces deux derniers points mettent en exergue l'importance du rôle des services de communication au niveau préfectoral au cours de l'alerte et celui de la coordination des TWC en période de préparation.

Encadré 3. Le SAIP, un moyen d'alerte efficace et rapide présent dans les départements métropolitains mais inexistant dans les territoires d'outre-mer
(source : Bourgeois, 2015)

Le SAIP est un ensemble d'outils structuré permettant la diffusion d'un signal ou d'un message par les autorités. Son objectif est d'alerter une population exposée, ou susceptible de l'être, de la survenance d'un événement aux conséquences graves. Le contenu du message et le déclenchement de sa diffusion sont sous l'autorité en charge de la protection générale de la population, de l'ordre public et de la défense civile. Sur le terrain, cette compétence est détenue par le maire et le préfet de département. Le SAIP assure une double fonction :

1. une fonction d'alerte : à son écoute, la population doit appliquer des mesures réflexes de sécurité ;
2. une fonction d'information : elle permet d'énoncer les consignes de sécurité à suivre en urgence et de donner les indications sur l'évolution de l'événement.

Le SAIP mobilise plusieurs vecteurs d'alerte et d'information de la population à la fois des sirènes, des SMS et un service de diffusion de l'alerte auprès des opérateurs, relayant avec leurs propres moyens ces informations (notamment panneaux à message variable et radios). Une application logicielle intégrant une interface cartographique permet le déclenchement sécurisé à distance des moyens d'alerte par les autorités à différents échelons :

- des communes, par le maire ;
- des départements, à partir du centre opérationnel départemental (COD) du préfet et, sur ordre d'un maire ou du préfet, à partir du centre opérationnel départemental d'incendie et de secours (CODIS) des sapeurs-pompier ;

⁷⁵ A notre connaissance aucune traduction des messages en langues étrangères n'est prévue pour le moment, ce qui peut poser un problème de compréhension des consignes par les individus en transit et les étrangers.

- dans les zones de défense, à partir du centre opérationnel de zone (COZ) de l'état-major interministériel de zone ;

- sur le territoire national, à partir du centre opérationnel de gestion interministériel des crises (COGIC) du ministère de l'intérieur, des centres de détection et de commandement et du centre national des opérations aériennes (CNOA) de l'armée de l'air.

Cette méthode de déclenchement simultanée, à distance et à l'échelle d'un département est particulièrement pertinente pour l'alerte rapide telle que l'impose l'aléa tsunami dans le contexte antillais. Aucun des DROM n'en est équipé. Son déploiement devrait débuter post 2019-2020 (Bourgeois et al., 2015). A la suite des attentats survenus en France en janvier et novembre 2015, une application mobile a été développée par le ministère de l'Intérieur qui vient compléter le dispositif SAIP. Cette application initialement créée pour répondre à la menace d'attentat devrait intégrer les risques majeurs naturels et technologiques. Il s'agit d'un outil supplémentaire pour l'alerte de population qui permet de pallier l'absence de systèmes dédiés plus coûteux et toujours inexistant dans les DROM.

4.1.2.2. Alerter les populations à terre, l'alerte descendante à l'échelle communale

Une fois que le Préfet a déclenché l'alerte et pris la direction des opérations de secours, il convient à chaque maire des communes littorales de mettre en œuvre les mesures d'alerte et d'information des populations (Guide ORSEC, 2013). Cette obligation lui incombe au titre de ses pouvoirs de police générale (Arrêt du Conseil d'Etat du 22 juin 1987). Ce maillon de la chaîne d'alerte descendante est l'un des plus importants car au plus proche des populations exposées à évacuer. A l'échelle communale, les vecteurs d'avertissement doivent être le plus complémentaires possible pour permettre à un maximum de population de recevoir l'information et les consignes d'évacuation. Ils sont réfléchis en fonction de l'étendue de la zone à évacuer, de leur accessibilité, des moyens humains et matériels disponibles localement au moment de l'alerte, tout en tenant compte des délais théoriques avant l'impact. Deux types d'alerte sont généralement employés : l'émission d'un signal sonore au moyen de sirènes (sirènes communales, de pompiers ou industrielles, ensemble mobile d'alerte) ou par l'émission d'un message (automates d'appel, radios, mégaphones, panneaux à message variable). La procédure relative aux moyens de diffusion de l'alerte et des consignes doit être établie au sein du Plan de Sauvegarde Communal (PCS).

A notre connaissance, en Martinique ces instruments d'alerte de la population employée à l'échelle communale n'ont toujours pas été testés en condition d'exercice grandeur nature à grande échelle. Il n'existe pas de procédures harmonisées en matière de dispositif d'alerte aux populations. Chaque commune s'organise ou non en fonction des moyens disponibles. Le rapport Deloitte (2012) *in* Bourgeois et al. (2015) faisait le constat « d'une certaine débrouille » en matière de dispositifs d'alerte.

4.1.2.3. Alerter les navires en mer et dans les ports

D'une manière générale, les bateaux sont équipés de moyens de communication plus ou moins complets et sophistiqués en fonction de s'il s'agit de bâtiments de commerce ou de bateaux de plaisance. La diversité de situation des navires (amarré au port, au mouillage, en mer) complexifie de fait la transmission du message d'alerte et nécessite de donner des consignes les plus complètes possibles pour répondre à l'ensemble de ces situations. Nous avons travaillé en collaboration avec le

GPMLM et le CROSS AG sur cette problématique d'alerte des navires. Nous avons distingué trois cas particuliers :

1. Les messages d'alerte émis par les autorités portuaires des ports maritimes de commerce.

Les autorités portuaires sont en charge d'une responsabilité réglementaire de sûreté et de police au sein de leurs limites administratives 24h/24 et 7j/7. Elles sont tenues d'alerter l'ensemble des navires et le personnel à terre exposés à un danger imminent et situés dans l'enceinte des infrastructures ou des bassins portuaires. Les alertes en cas de tsunami en font partie.

Les messages émis par le SIDPC de la préfecture de la Martinique sont transmis par SMS et par fax au commandant du GPMLM, au commandant adjoint ainsi que sur le téléphone d'astreinte de l'officier de permanence. Armée 7 jours sur 7, 24 heures / 24, la capitainerie est également informée de la menace en dehors des heures ouvrables. Dès la réception du message d'alerte et en fonction des procédures décrites par la matrice de décision présentée ci-après, un message préformaté est diffusé par la vigie de la capitainerie à l'ensemble des bords via le canal VHF 16 et le canal de dégagement 12⁷⁶. Les agents consignataires⁷⁷ des navires sont également contactés par téléphone via la capitainerie afin de doubler l'information vers les navires. En France, d'après le code des Ports Maritimes, tous les navires de commerce amarrés dans les ports, hormis les embarcations et les bâtiments de pêche de moins de 50 tonnes, doivent avoir en permanence au moins un gardien à bord. Théoriquement, la diffusion du message devrait parvenir rapidement aux capitaines des navires. Par contre, actuellement le port de Fort-de-France ne dispose pas de sirènes ni de véhicules équipés de hauts parleurs pour transmettre l'alerte et avertir les individus à terre.

2. Les messages d'alerte émis par le CROSS-AG.

Le CROSS AG est l'un des *Maritime Rescue Coordination Centres* (MRCC) de la Caraïbe. Il en existe plus de 18 dans le bassin. Situé à Fort-de-France (Martinique), ce centre principal assure la coordination des opérations de recherche et de sauvetage des personnes en détresse, de la surveillance de la circulation maritime, de la surveillance des pollutions marines, de la surveillance des pêches maritimes et de la diffusion des informations de sécurité maritime en mer dans la zone France SRR, au titre du système mondial de détresse et de sécurité en mer (SMDSM). Cette zone, en application de la convention de Hambourg (1979) et d'une résolution notifiée par l'Organisation Maritime Internationale (OMI) en mai 1999, s'étend sur près de trois millions de kilomètres carrés en Atlantique centre-ouest, aux Petites Antilles⁷⁸ et en Guyane Française (CROSS AG, 2011). En cas d'avis de tsunami, le rôle du CROSS AG est d'alerter l'ensemble des navires en mer présents sur sa zone de responsabilité⁷⁹ de la menace imminente. Pour diffuser des bulletins réguliers et exceptionnels auprès des usagers de la mer, il dispose de nombreux moyens de communication. Ils se composent d'une

⁷⁶ Canal VHF habituellement employé par le port pour communiquer avec les navires. Le passage sur le canal 12 évite d'encombrer le canal VHF d'urgence 16

⁷⁷ Un agent consignataire ou agent maritime est un intermédiaire indépendant employé par un armateur ou un affréteur pour le représenter dans un port lors de l'escale d'un navire

⁷⁸ « En plus de la Martinique, de la Guadeloupe et des «Iles du Nord» (Saint-Martin partie française, Saint-Barthélemy), la zone sous responsabilité française comprend, dans les Petites Antilles, les îles indépendantes d'Antigua et Barbuda, Saint-Kitts-Et-Nevis, Dominique, Sainte Lucie, les territoires britanniques de Sombbrero, Anguilla et Montserrat, et les îles néerlandaises dites «Iles au vent» de Saint Martin-partie néerlandaise, Saba et Saint Eustache » (CROSS AG, 2010).

⁷⁹ *Search and Rescue Region* (SRR)

dizaine de stations VHF d'une portée d'environ 20 à 30 milles nautiques, d'un émetteur HF/MF d'une portée d'environ 200 milles nautiques et d'un équipement INMARSAT-C pour la réception et la diffusion de messages au format texte de type SafetyNet. Ce dernier équipement est pourvu de l'*Enhanced Group Call* (EGC) ce qui offre la possibilité de circonscrire la diffusion du message à une zone géographique ou à une flotte en particulier. Ces outils de communication permettent de couvrir la zone de l'arc des Petites Antilles sous la responsabilité du CROSS-AG. Les messages d'alerte sont réceptionnés par le CROSS par courriel et par satellite au même titre qu'un navire. Si la menace concerne un territoire français, les directeurs et directeurs adjoints ainsi que les officiers de quarts reçoivent un SMS par Météo-France. Le CROSS-AG est alors en charge de transmettre un message d'alerte par phonie en VHF au même titre qu'un AVURNAV. Il s'agit du moyen le plus rapide à mettre en œuvre et le plus efficace en termes d'impact en direction des usagers de la mer. Le message est diffusé en français et en anglais à l'attention des navires en mer, au mouillage ainsi qu'aux capitaineries. Il est accompagné des consignes essentielles de mise en sécurité des navires. L'utilisation d'un automate de répétition des messages peut être envisagée dans le cas d'un tsunami transocéanique puisqu'il est nécessaire de diffuser plusieurs messages tout au long de la période de l'alerte. Le message VHF est doublé d'un message en anglais diffusé via INMARSAT-C au format texte (*SafetyNet*) couvrant la zone SRR à l'aide de l'EGC.

3. Les messages d'alerte émis par les services météorologiques mondiaux

Les avis de tsunami émis par le PTWC sont également diffusés vers les navires répondant aux normes SOLAS et les centres de sécurité des compagnies maritimes à l'aide des moyens satellites *SafetyNet* et radio Navtex du système du SMDSM sous la forme de Renseignements sur la Sécurité Maritime (RSM). Ces messages sont diffusés à toutes les stations de réception en état de fonctionnement présentes dans la zone de navigation concernée par le message. Dans la Caraïbe, cette zone correspond à la NAVAREA IV qui est gérée par les gardes-côte américains (USCG)⁸⁰. Ils sont transmis au format texte tel qu'ils sont rédigés initialement par le PTWC. Il n'y a aucune traduction opérationnelle ni de consignes précises de mise en sécurité à destination des navires dans le contenu de ces messages. Une réflexion pour la création d'un message d'alerte propre au domaine maritime a débuté au sein de la Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology (JCOMM) (JCOMM, 2007) mais les propositions de ce groupe de travail n'ont pas toutes abouti (JCOMM, 2009).

L'alerte des navires oblige à mettre en place des moyens de communication variés en fonction des domaines de responsabilité des différents acteurs et de la diversité des situations des navires. Alerter les navires de commerce ne devrait pas être problématique. Par contre, la coordination de leur mise en sécurité est complexe. Il convient donc aux autorités portuaires et aux armateurs de mettre en place des plans de mise en sécurité spécifiques de type SOP⁸¹ en cas d'occurrence d'un tsunami. Ces plans doivent tenir compte des conditions locales (type de port, fréquentation, moyens humains et techniques mobilisables, etc.) et des délais théoriques d'arrivée des premiers effets du phénomène,

⁸⁰ *United States Coast Guard*

⁸¹ *Standard Operational Procedures* ou Procédures Opérationnelles Normalisées sont des procédures de sécurité qui décrivent comment affronter une menace et comment agir pour en diminuer le risque. Elle décrit les étapes à suivre pour réduire la possibilité qu'un incident se produise, et s'il se produit ce qu'il faut faire pour en limiter les conséquences.

comme ceux que nous proposons. Par contre, contacter les navires de plaisance qui ne disposent pas de VHF demeure une réelle difficulté. En effet, la VHF ne fait pas partie du matériel d'armement et de sécurité obligatoire sur les bateaux de plaisance navigant à moins de 6 milles nautiques des côtes même si elle est vivement recommandée. Les plaisanciers misent de plus en plus sur l'utilisation des téléphones mobiles pour l'alerte des secours et ne s'équipent donc pas de VHF. En mer, il semble plus compliqué de les tenir informés de la menace en cours. Les ports de plaisance doivent donc se préoccuper de l'alerte des navigateurs.

4.1.3. Synthèse et principales limites humaines et matérielles identifiées

La chaîne de transmission des messages, depuis celui relatif aux avis du PTCW jusqu'à celui de l'alerte auprès de la population et des capitaines des navires, est longue. Elle passe par de nombreux organismes et nécessite plusieurs canaux de communication (figure 36). Elle s'organise en deux phases distinctes. L'alerte montante débute par l'envoi d'un message d'avis de tsunami par le PTCW (chapitre 3). Celui-ci est transféré par Météo-France aux trois NTWC désignés pour les territoires français à savoir : les autorités départementales (SIDPC), régionales (EMIZA) et maritimes (CROSS-AG). A terre, c'est l'autorité préfectorale, le préfet ou le directeur de cabinet, qui applique la réponse associée en fonction du niveau de menace. Plusieurs niveaux d'alerte ou d'avertissement permettent de répondre en fonction de la gravité du phénomène (chapitre 4).

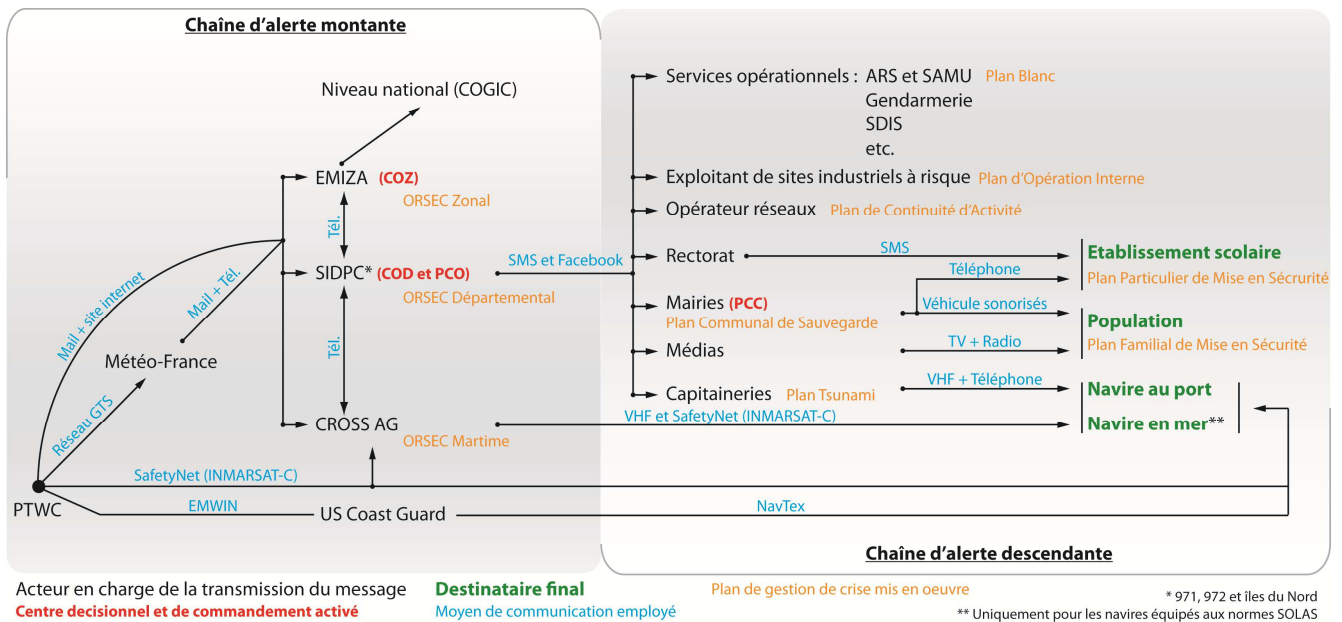


Figure 36 : Chaîne d'alerte montante et descendante propre à l'aléa tsunami aux Antilles françaises

L'alerte descendante auprès des populations et des navires à évacuer est complexe. La transmission du message d'alerte tient de la responsabilité du directeur du SIDPC pour la partie terrestre. Les navires en mer sont alertés par le MRCC en l'occurrence le CROSS-AG. La redondance du message est assurée par téléphone entre l'EMIZA, le SIDPC et le CROSS-AG. Selon l'ampleur de la menace plusieurs centres décisionnels et de commandement sont activés et leurs plans de gestion de crise déroulés. La

multiplication des canaux d'information peut perturber la chaîne de l'alerte et même la compréhension des messages. C'est pourquoi en préalable, ils doivent faire l'objet d'un travail minutieux d'uniformisation des contenus, associé à un effort d'éducation auprès des publics cibles.

D'une manière générale, les points de faille le long de cette chaîne de transmission sont de deux ordres. D'une part, elle ne peut pas être automatisée de bout en bout puisqu'elle nécessite l'action de plusieurs opérateurs. Une erreur de lecture du message initial et de son interprétation est donc possible. C'est pourquoi la redondance et la confirmation du message entre les NTWC est importante même si cette procédure peut prendre plusieurs minutes. D'autre part, dans le cas d'un séisme de forte intensité, les effets ressentis sur le territoire peuvent perturber la transmission du message si les bâtiments des TWFP et NTWC sont évacués conformément aux consignes séisme et si les bâtiments et les vecteurs de transmission (antenne VFH, réseau internet, réseau téléphonique, réseaux électrique) sont affectés. A titre d'exemple en Martinique, le contact avec les maires n'est pas consolidé, le premier message est subordonné au bon fonctionnement de l'opérateur Orange en l'occurrence.

4.1.4. Proposition d'une matrice d'aide à la décision en réponse aux messages diffusés par le PTWC

Au début de nos travaux de thèse, il n'existait aucun plan de gestion de crise ni d'aide à la décision spécifiques aux tsunamis dans les Antilles française contrairement à d'autres territoires français de l'Océan Indien (îles de La Réunion et de Mayotte) ou du Pacifique (Polynésie et Nouvelle-Calédonie), plus en avance dans le domaine (Musson, 2011 ; Sahal, 2011). Très tôt, nous avons proposé à l'EMIZA une première matrice d'aide à la décision issue de nos travaux de recherche. Elle repose sur la synthèse des sources tsunamigènes pouvant impacter les Petites Antilles corrélées avec le contenu des messages du PTWC. Au fur et à mesure des nombreuses séances de travail en collaboration avec l'EMIZA, et par l'intégration des nouveaux produits du PTWC fin 2015, nous avons conçu un document graphique plus complet et générique pour l'aide à la décision dans les Antilles françaises. Ce document définit les grandes orientations quant aux conduites à tenir pour les autorités en charge de l'alerte à l'échelle départementale, donc pour les trois SIDPC : Martinique, Guadeloupe et îles du Nord. L'objectif de ce travail, réfléchi à l'échelle zonale, est d'apporter une aide pour la rédaction des dispositifs spécifiques tsunami des plans ORSEC départementaux et ainsi d'assurer une certaine cohérence dans les mesures prises pour l'ensemble des territoires français des Antilles. Ce document a été validé par l'EMIZA suite à un séisme qui s'est produit le 26 avril 2016 à proximité de la Martinique ce qui a permis notamment d'ajuster certains seuils à la suite de la diffusion d'un message d'information par le PTWC. Il est désormais intégré au Plan ORSEC zonal qui est en cours d'approbation (cf. annexe 6). Cette documentation est actuellement en cours d'adaptation pour être intégrée au plan ORSEC de l'ensemble de la Martinique, auquel nous apportons notre contribution par ailleurs.

Ce support graphique définit les actions à mettre en œuvre pour la mise en sécurité des populations littorales et le type de message à émettre, dès la réception par les SIDPC des premiers paramètres extraits des messages textes du PTWC par Météo-France. Les critères en entrée de la matrice reposent sur trois principales valeurs : la magnitude du séisme, sa profondeur et la distance de l'épicentre par

rapport au département concerné. Ils dépendent également de la nature du message diffusé par le PTWC. Nous proposons de détailler les différents éléments qui le composent.

- Les messages à l'intention des populations

Au sein du document graphique de gestion de crise, nous distinguons un niveau d'avertissement et deux niveaux d'alerte eux-mêmes scindés en trois autres niveaux : d'information, d'avertissement et de fin d'alerte (figure 37). Ils se distinguent tous par une couleur qui leur est propre et qu'il convient de respecter lorsqu'elle est utilisée dans les documents de planification opérationnelle et de prévention à l'intention des populations.

- Le niveau d'information est transmis à la population à la suite d'un séisme ressenti dans le département mais pour lequel aucun message n'a été émis par le PTWC car non tsunamigène. Il peut s'agir de séismes dont la magnitude est inférieure à six ou la profondeur du foyer supérieure à 100 km. Ce message particulièrement important doit limiter les évacuations spontanées des populations littorales qui respectent les consignes de mise en sécurité tsunami. Il annonce également la fin d'une surveillance renforcée par les autorités en charge de l'alerte.
- Le niveau d'avertissement est employé pour attirer l'attention des populations qui ont une activité sur le littoral sur le fait qu'un événement sismique vient de se produire. Il précise qu'il n'y a pas de danger imminent qu'un tsunami perceptible atteigne le département. Le terme n'est d'ailleurs pas employé. En cas de séisme ressenti par la population, il s'agit avant tout de l'informer qu'il n'est pas nécessaire d'évacuer. Néanmoins, pour s'assurer que tout danger est écarté, la cellule de veille de la préfecture reste active et diffusera un message complémentaire d'information ou d'alerte si jamais le PTWC réévalue le niveau la menace.
- Le niveau d'alerte orange notifie à la population présente sur le littoral, à proximité du rivage, sur terre ou dans la mer, de sortir de l'eau et de s'éloigner du bord de mer en raison du risque de tsunami. Une submersion généralisée des côtes du département est exclue, mais néanmoins, localement en raison d'effets de site, le phénomène peut porter atteinte aux individus les plus exposés et vulnérables.
- Le niveau d'alerte rouge est le niveau d'alerte le plus élevé. Il s'agit d'un ordre d'évacuation donné à l'ensemble de la population présente dans la zone à évacuer, c'est-à-dire tous les secteurs littoraux dont l'altitude est comprise entre de 0 et 10 m au-dessus du niveau de la mer. Les évacués doivent regagner à pied le plus rapidement possible un site refuge tsunami ou atteindre les reliefs d'une élévation minimale de 15 m.
- Le message de fin d'alerte informe la population que tout danger de tsunami est écarté mais qu'il convient de rester prudent sur le bord de mer en raison de puissants courants marins qui peuvent persister localement et/ou du fait de l'environnement dégradé dans

les zones sinistrées suite au phénomène. Il peut s'écouler plusieurs heures avant que ce message ne soit transmis par la préfecture.

➤ **Un niveau d'information**

Information « séisme détecté » : FIN DE SURVEILLANCE RENFORCÉE .
Aucun risque de tsunami signalé par le centre d'alerte.

➤ **Trois niveaux d'alerte**

Avertissement: PRUDENCE SUR LE BORD DE MER, SURVEILLANCE RENFORCÉE.
Suite à un séisme détecté, soyez prudent en bord de mer. Surveillance renforcée en cours, restez attentif aux consignes diffusées par les autorités.

Alerte orange « tsunami » : QUITTEZ LE BORD DE MER !
Mouvements marins inhabituels. Eloignez vous du bord de mer et des embouchures. Attendez les consignes des autorités.

Alerte rouge « tsunami » : REJOIGNEZ LES HAUTEURS !
Tsunami annoncé. Evacuez le littoral et dirigez vous vers les hauteurs. Attendez les consignes des autorités.

➤ **Un niveau de fin d'alerte**

Fin d'alerte : DANGER DE TSUNAMI ÉCARTÉ.
Restez prudents en bord de mer. Respectez les consignes de sécurité. L'accès aux zones submergées reste sous contrôle.

Figure 37 : Proposition d'orientations à destination des autorités en charge de l'alerte descendante - Extrait du support graphique pour l'aide à la décision en cas d'avertissement tsunami du PTWC

Ces propositions apportent aux autorités en charge de l'alerte descendante un cadre pour bâtir leur consigne de sécurité ainsi que des éléments de langage. Il convient au SIDPC d'enrichir ces propositions par les informations disponibles supplémentaires qu'il jugera utile de diffuser aux populations.

En fonction de l'estimation du temps d'arrivée des premiers effets à la côte donné par le PTWC et tout au long du *monitoring* du phénomène, il convient aux NTWC de diffuser des messages complémentaires à destination des populations. Leur contenu doit permettre d'améliorer le niveau de confiance des populations en alerte officielle, de les interpeller dans leurs activités en cours et ainsi d'augmenter le taux de mobilisation. Nous proposons que ces grandes orientations en termes de messages soient complétées par des informations plus détaillées comme par exemple :

- un rappel des consignes de sauvegarde associées à chaque niveau d'alerte (moyen d'évacuation privilégié, mesures de mise en sécurité à terre et en mer) ;
- une communication sur l'heure d'arrivée théorique, les délais de temps restant et si possible l'estimation de l'amplitude à la côte ;
- des précisions sur le type d'événement déclencheur et sa localisation approximative ;
- des indications sur les consignes particulières à tenir en fonction de la période de l'alerte (de nuit, milieu de journée, fin de journée de travail / sortie des classes).

- Sur réception d'un bulletin d'information (« *Tsunami Information Statement* »)

Par principe de précaution, un message d'avertissement émis par le SIDPC appelle à la prudence sur la côte si la distance de l'épicentre est localisée à moins de 300 km du département et les membres du SIDPC restent en veille active (figure 38). Au-delà d'une distance de 300 km par rapport à la côte, l'information n'est pas communiquée à la population, elle est transparente. Dans ce type de message, aucun Etat n'est mentionné. En effet, la probabilité qu'un tsunami soit généré par un séisme de cette magnitude est très faible. Néanmoins, le PTWC informe systématiquement qu'il est possible qu'un tsunami ait été généré localement : « *Based on all available data ... There is no significant tsunami threat from this earthquake. However... There is a very small possibility of tsunami waves along Caribbean coasts located nearest the epicenter* » (extrait d'un message de type WECA 43). Néanmoins s'il s'agit d'un événement dont la source est d'origine transatlantique au niveau du golfe de Cadix, le SIDPC doit contacter le COGIC pour une expertise du phénomène par le CENALT. S'il s'agit d'un phénomène dont la source est située dans la mer des Caraïbes, le SIDPC restera en veille active au moins deux heures en cas d'une réévaluation de l'événement par le PTWC ou d'un phénomène associé au séisme (glissement sous-marin). Enfin, s'il s'agit de tout autre scénario, la veille se termine.

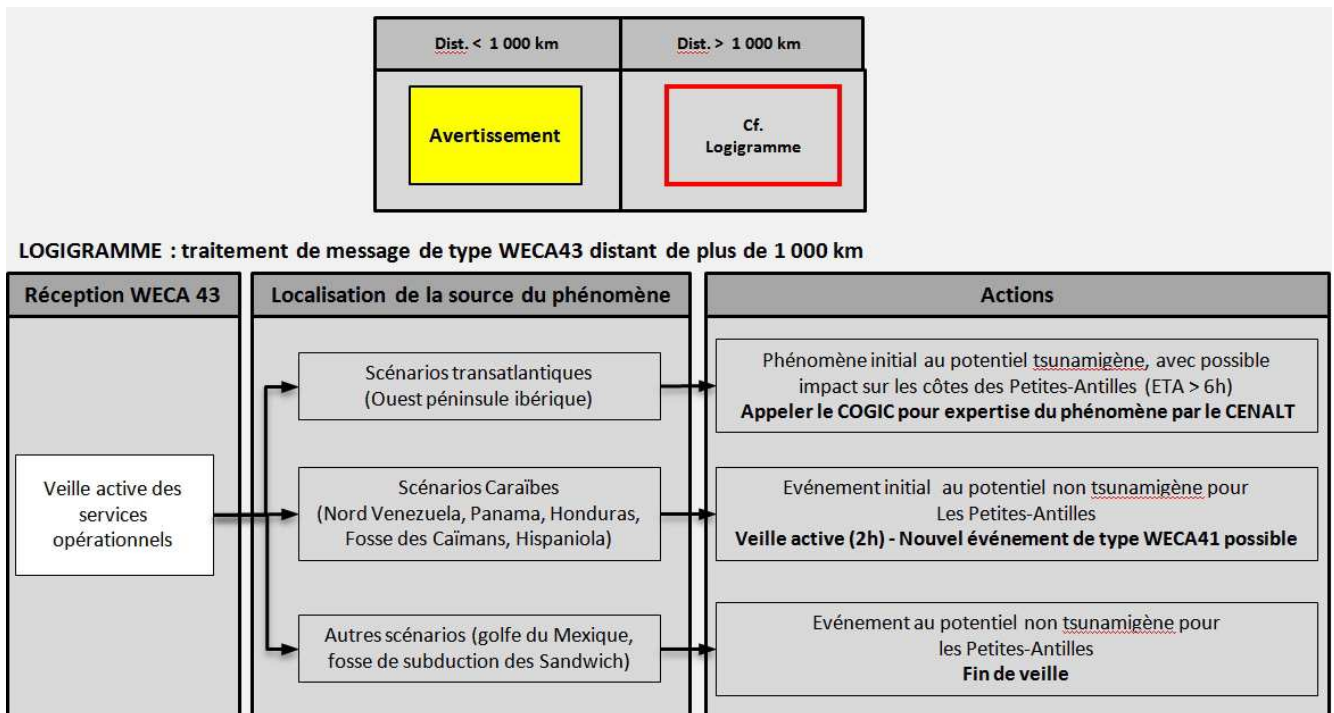


Figure 38 : Traitement des messages de type WECA 43 « *Tsunami Information Statement* » - Extrait du support graphique pour l'aide à la décision en cas d'avertissement tsunami du PTWC

- Sur réception d'un message de menace (« *Tsunami Threat Message* »)

Les critères d'évaluation d'un message de menace tsunami sont définis selon les paramètres de magnitude du séisme, de la distance de son épicentre par rapport aux côtes et si le territoire est

mentionné par le PTWC. Les seuils des distances correspondent aux propositions de consignes faites par le PTWC (IOC-UNESCO, 2014a).

Un ordre d'évacuation de la zone de danger « rouge » ou « orange » est diffusé par les autorités pour tous les événements dont la distance par rapport à l'épicentre est inférieure à 1 000 km et pour lesquels la Martinique est mentionnée dans le message initial. Les très courts délais d'arrivée des premiers effets à la côte, environ 1h45⁸², ne permettent pas d'attendre la diffusion de produits graphiques de la part du PTWC, ni de garantir l'envoi d'un second message. Les événements au-delà de cette distance, mais dont les temps d'arrivée estimés sont inférieurs ou égaux à 3 h, soit environ 2 000 km, sont gérés distinctement en fonction de la magnitude du séisme. Si elle est comprise entre 7.1 et 7.5, un avertissement sera émis. Au-delà de cette magnitude ce sera une alerte orange par principe de précaution. Par principe de précaution également, l'alerte orange peut être employée pour certains événements même si le département n'est pas mentionné mais qu'il subsiste un risque.

Dans le cas des événements plus éloignés dont l'Estimation du Temps d'Arrivée (ETA) est supérieure à 3 h, c'est le logigramme de gestion des sources lointaines qui fait référence. Pour ce type d'événements, un traitement spécifique de l'alerte s'impose au vu des délais de gestion plus longs.

Cette éventualité est peu probable pour la Martinique et relèverait certainement d'une erreur dans le traitement du message.

Ce schéma détermine la typologie des messages pour les événements lointains dont l'ETA est supérieure ou égale à trois heures. Cette valeur théorique a été retenue par le PTWC. Elle représente la période de temps habituellement reconnue nécessaire à l'évacuation des populations littorales en accord avec les exigences de l'agence de gestion de crise de l'Etat d'Hawaii. Cette valeur seuil n'a jamais pu être corroborée par un retour d'expérience ou un exercice d'envergure pour les territoires insulaires français de la Caraïbe. En Martinique, d'après l'expérience du SDIS, de la gendarmerie et des SIDPC, ce délai de trois heures semble être la valeur de temps raisonnable pour l'évacuation générale de la frange côtière. Les messages d'alerte seront diffusés au maximum trois heures avant l'heure théorique d'arrivée du tsunami et/ou immédiatement après la réception des données d'amplitude modélisées par le PTWC. Dans ce cas de scénarios, il est nécessaire d'envoyer des messages intermédiaires complémentaires, notamment pour tenir compte des spécificités liées à l'horaire de l'événement. Les évacuations spécifiques devront être anticipées et mises en œuvre dès la réception du message de confirmation.

⁸² Valeur définie à l'aide du logiciel Tsunami Travel Time développé par Paul Wessel (<http://www.geoware-online.com/>) et utilisé par le PTWC en situation réelle

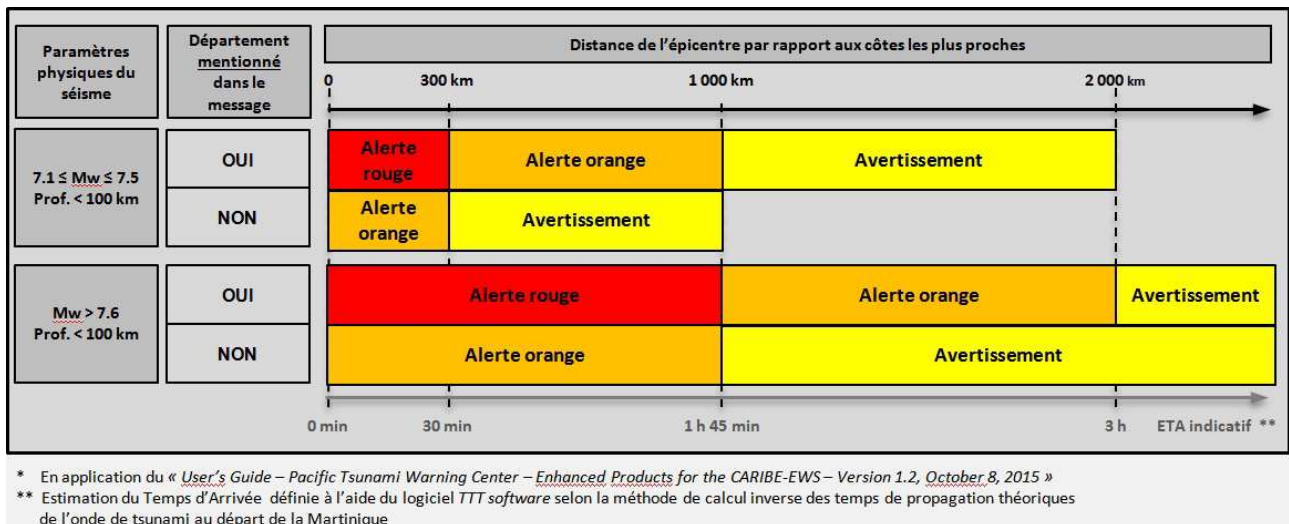


Figure 39 : Matrice de décision pour le traitement des messages de type WECA 41 « Tsunami Threat Message » - Extrait du support graphique pour l'aide à la décision en cas d'avertissement tsunami du PTWC

Quel que soit le scénario, la réception d'un message d'information ou d'alerte du PTWC, entraîne la mise en veille active des TWC pour une durée d'une heure minimum à compter de la réception d'un bulletin d'information et jusqu'à la réception du message de fin d'alerte pour les « WECA 41 », et ce même si le département n'est pas concerné.

- A partir de l'analyse des produits graphiques du PTWC

Le message initial diffusé par les SIDPC peut être réévalué au cours de l'événement au regard des résultats des simulations numériques du phénomène effectuées par le PTWC. Cette information transmise par courriel parvient directement aux SIDPC entre 20 et 30 minutes après l'événement. Chaque territoire insulaire français de la Caraïbe est couvert par un unique polygone dont la couleur varie en fonction de la classe de valeur d'amplitude maximale modélisée à la côte. Ainsi, pour les événements dont l'amplitude maximale est strictement inférieure à 30 centimètres, seul un message d'information doit être émis par les SIDPC (figure 40). Un message d'alerte orange est diffusé pour des amplitudes strictement inférieures à 1 m, et un message d'alerte rouge pour toutes amplitudes supérieures ou égales à 1 m. Au vu des délais de calculs, de transmission et d'interprétation, ce tableau sera très probablement exploité uniquement pour des événements dont la distance à la source est supérieure à 1 000 km.

Amplitude maximale modélisée*	Niveau d'alerte minimum
<div style="border: 1px solid black; background-color: #f08080; padding: 2px; text-align: center;">> 3 m</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: #ffcc99; padding: 2px; text-align: center;">1 - 3 m</div>	<div style="border: 1px solid black; background-color: #ff0000; padding: 5px; color: white;">Alerte rouge</div>
<div style="border: 1px solid black; background-color: #ffff00; padding: 5px;">0.3 - 1 m</div>	<div style="border: 1px solid black; background-color: #ffa500; padding: 5px;">Alerte orange</div>
<div style="border: 1px solid black; background-color: #90ee90; padding: 5px;">< 0.3 m</div>	<div style="border: 1px solid black; background-color: #ffff00; padding: 5px;">Avertissement</div>
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">Value Not Computed</div>	Tenir compte uniquement de la matrice de décision WECA 41

Figure 40 : Validation de la cohérence du niveau d'alerte diffusé par les préfecture avec l'amplitude maximale modélisée par le PTWC - Extrait du support graphique pour l'aide à la décision en cas d'avertissement tsunami du PTWC

- Cas particulier des séismes ressentis sur le département

Aujourd'hui, les territoires français de la Caraïbe ne sont pas équipés d'un SAIP. Il n'est donc pas possible pour les SIDPC de diffuser un signal ou un message d'alerte en masse à la population dans un délai inférieur à 30 minutes. Par conséquent, on compte sur les comportements réflexes des populations en terme de capacité d'auto alerte et leurs connaissances des consignes de mise en sécurité⁸³ en cas de séismes fortement ressentis et/ou de mouvement anormal du niveau de la mer (encadré 4).

Le message d'information « séisme » doit être diffusé le plus rapidement possible après qu'un séisme a été ressenti dans le département même si le PTWC n'a diffusé aucun message. L'objectif est de limiter les perturbations liées à d'éventuelles évacuations spontanées de la population comme il est recommandé voire encouragé dans les nouvelles consignes séismes. Ce scénario concerne donc tous les séismes proches d'un département dont la magnitude est :

- strictement inférieure à MW 6 ;
- inférieure ou égale à MW 7 et dont la profondeur est supérieure à 100 km.

Un communiqué de la préfecture doit être rédigé quelques heures après l'événement pour apporter des informations supplémentaires à la population suivant les premiers éléments fournis par les Observatoires Volcanologiques et Sismologiques.

⁸³ Evacuation spontanée du littoral vers des points hauts

Encadré 4. Les signes énonciateurs d'un tsunami (Lavigne et Paris, 2011)

Le signe précurseur manifeste qu'un tsunami approche des côtes correspond à un mouvement anormal du niveau de la mer. Il s'agit du signe énonciateur perceptible sur les côtes mêmes les plus éloignées de l'origine du tsunami. Il peut s'agir d'une baisse significative du niveau de l'eau et donc du retrait de la ligne de rivage quelques minutes avant son arrivée, ou alors, à l'inverse d'une submersion le long du trait de côte suivie par un retrait. Cette différence est liée à la position de la côte par rapport à la déformation initiale du plancher océanique. A Banda Aceh, la mer s'est retirée jusqu'à plus d'un kilomètre de la côte. Le long des côtes situées à proximité de sources tsunamigènes d'origine sismique, les fortes secousses sismiques sur une longue période de temps sont des signes précurseurs potentiels indéniables. Cinq autres signes énonciateurs sont également identifiables :

- des bruits de détonations similaires à des explosions ;
- un grondement sourd semblable au tonnerre ;
- un comportement anormal des animaux comme le déplacement de colonies d'oiseaux marins en direction des terres ou encore le hurlement des singes ;
- le déplacement vertical de certains secteurs côtiers (subsidence ou soulèvement) ;
- l'impact environnemental sur les nappes phréatiques.

4.2. Proposition de procédures opérationnelles de mise en sécurité des navires en cas d'alerte tsunami

4.2.1. Limiter les enjeux exposés aux tsunamis dans les ports

4.2.1.1. Les ports, des infrastructures vitales particulièrement exposées à cet aléa

Face à l'aléa tsunami, les dommages matériels aux navires et aux infrastructures portuaires peuvent se chiffrer en millions d'euros de pertes. Au Japon, suite au tsunami du 11 mars 2011, plus de 28 000 navires et 319 ports ont été endommagés pour une perte directe estimée à environ 12 milliards de dollars américains (MMAF, 2012 *in* Muhari, 2015). Mais ces dommages ne s'arrêtent pas là, ils ont également des répercussions indirectes sur l'ensemble de l'économie d'une région voire d'un pays en fonction de l'importance des activités maritimes qui y sont développées. Toujours au Japon, les pertes dans le domaine du commerce maritime suite à la fermeture des ports ont été estimées à 3.4 milliards de dollars par jour selon la *Lloyd's List Intelligence*⁸⁴ (Wiśniewski et Wolski, 2012). L'impact des dommages aux infrastructures portuaires est corrélé avec le niveau de dépendance des territoires aux activités maritimes et aux échanges extérieurs, comme c'est le cas notamment pour les petits territoires insulaires qui composent une partie de la Caraïbe. Dans une perspective de prévention, notre objectif dans ce travail est de planifier des mesures d'urgence pour la mise en sécurité rapide des navires de commerce qui fréquentent le Grand Port Maritime de La Martinique en cohérence avec les informations diffusées par le SIDPC en cas de tsunami. Ces mesures doivent non seulement limiter les avaries aux navires mais également restreindre les dommages aux infrastructures portuaires, les deux étant intimement liés.

⁸⁴ Agence spécialiste de l'information économique dédiée à la communauté maritime mondiale (www.lloydslistintelligence.com)

Le Grand Port Maritime de La Martinique, est un port de commerce maritime situé sur la côte caraïbe dans la baie de Fort-de-France. Il s'étend sur 30 hectares de terre-pleins, dispose d'un total de 2.7 km de quai et sa situation offre un tirant d'eau de 14 m qui permet l'accès à des navires de grosse capacité de charge. Ses installations se composent d'un terminal de marchandises en conteneurs d'une capacité de stockage de 250 000 EVP⁸⁵, d'un terminal de marchandises hors conteneurs (véhicules, vrac solide et liquide), d'un appontement pétrolier et minéralier, d'un bassin de radoub, de plusieurs quais pour l'accueil des navires de croisière et d'un terminal à passagers. En 2015, le GPMLM a accueilli 1 093 escales de navires de commerce, manutentionné 3.4 millions de tonnes de marchandise et près de 160 000 conteneurs. En 2015 toujours, 170 navires de croisières ont fait escale, ce qui représente 548 239 passagers⁸⁶ auxquels s'ajoutent les 115 016 passagers du trafic inter-îles (SDDEP / JMV / févr. 2016). En 2014, le GPMLM était classé 11^{ème} port français juste devant la Guadeloupe en termes de trafic de marchandises. Ainsi, cette infrastructure concentre chaque jour un grand nombre d'enjeux particulièrement exposés et vulnérables à l'aléa tsunami pouvant entraîner des pertes humaines, économiques directes et indirectes et environnementales très importantes. Ces enjeux devraient continuer à s'accroître car le GPMLM souhaite se positionner comme un *hub* de transbordement dans la partie sud de la Caraïbe suite à l'élargissement du canal de Panama inauguré le 26 juin 2016. D'ailleurs, l'agrandissement des infrastructures portuaires du GPMLM a été également inauguré le 27 juin 2016, comme une sorte de réponse en écho. Mais c'est également pour son caractère stratégique, renforcé par le contexte insulaire de la Martinique, que la préservation de son fonctionnement en cas de tsunami est essentielle. Ses installations sont d'ailleurs désignées comme une « zone d'activité d'importance vitale »⁸⁷ selon la classification de l'instruction générale interministérielle du 7 janvier 2014 et des articles R. 1332 du code de la défense (SGDS, 2014). Nous avons donc proposé au GPMLM la déclinaison portuaire d'un plan tsunami qui puisse s'intégrer au plan sûreté des installations portuaires conformément à la réglementation nationale du code des ports maritimes et à la réglementation internationale selon le code ISPS⁸⁸.

4.2.1.2. Les facteurs d'endommagement des navires face aux tsunamis dans les ports

A la suite des tsunamis de ces dernières décennies, plusieurs retours d'expérience ont été menés pour quantifier et qualifier les dommages aux navires en relation avec les paramètres physiques de l'événement. La plupart d'entre eux ont été conduits au Japon (Shuto 1987 ; Aketa *et al.* 1994 ; Kawata *et al.* 2004 ; Kazama *et al.* 2006 ; Tsubota *et al.* 2007 ; Kato *et al.* 2009 ; PIANC, 2009 ; Elnashai *et al.*, 2010) mais également aux Etats-Unis suite aux événements du Chili en 2010 et du Japon en 2011

⁸⁵ Abréviation Française pour désigner Equivalent Vingt pieds. Unité de mesure pour exprimer une capacité de transport en multiple du volume standard occupé par un conteneur 20' (exemple PC de 1500 EVP, désigne un navire porte conteneur d'une capacité équivalente à 1500 conteneurs 20') (CMA CGM, 2007)

⁸⁶ Les passagers de croisière en transit (excursionnistes) sont dénombrés 2 fois (au débarquement et à l'embarquement), conformément au référentiel technique annexé à l'arrêté ministériel du 24 octobre 2012 et relatif à l'élaboration et à la transmission des statistiques portuaires (SDDEP / JMV / févr. 2016)

⁸⁷ Les secteurs d'activité d'importance vitale sont définis comme les activités de production et de distribution de biens ou de services indispensables, qui sont difficilement substituables ou remplaçables ou qui présentent un danger grave pour la population. Ces biens ou services doivent être indispensables à la satisfaction des besoins essentiels pour la vie des populations ; ou à l'exercice de l'autorité de l'Etat ; ou au fonctionnement de l'économie ; ou au maintien du potentiel de défense ; ou à la sécurité de la Nation (SGDS, 2014)

⁸⁸ International Ship and Port facility Security

(Wilson *et al.* 2013). Ces études caractérisent les dommages pour de petites unités ne dépassant généralement pas les 10 tonnes. Néanmoins, l'analyse des dommages que ces bateaux ont subi face à l'aléa tsunami, révèle cinq principaux modes d'endommagement (Kubo *et al.*, 2005 ; Suppasri *et al.*, 2013c ; Takahashima et Tsugane, 2013) :

- l'impact de débris flottants : les ports sont des espaces encombrés d'un grand nombre d'objets et de matériaux pouvant être mobilisés au cours d'une submersion par tsunami (conteneurs, véhicules, billes de bois, pontons, etc.). Une fois transportés par le tsunami, la force d'impact de ces débris peut entraîner des dommages importants à la coque du navire et même ouvrir une voie d'eau ;
- la collision avec les infrastructures portuaires : si les amarres d'un navire viennent à rompre et qu'il dérive, la puissance du courant peut projeter le navire contre les installations en dur et endommager la coque ;
- le transport à l'intérieur des terres : au cours de la submersion, lorsque l'amplitude du tsunami dépasse la hauteur des quais additionnée au tirant d'eau du navire, celui-ci peut se retrouver emporté par le flux au cours de l'inondation et être déposé à terre (figure 41) ;
- l'échouage : à quai ou dans le port au moment des premiers effets à la côte, en fonction de la polarité de la première vague et de son amplitude, le navire peut toucher le fond (talonner) et endommager le gouvernail et les hélices (Sakakibara *et al.*, 2013). Si un navire est à la dérive alors il peut s'échouer le long des côtes ou sur des bancs de sédiments mobilisés par le tsunami ;
- le chavirage (perte de stabilité) : à quai, si plusieurs amarres du navire ont rompu mais qu'il reste maintenu par quelques-unes seulement, il peut être renversé par la puissance du tsunami. A proximité de la côte, en fonction de la force du phénomène (vitesse, direction du courant, amplitude) le navire peut être déstabilisé lors du passage des ondes du tsunami ;
- l'incendie: n'importe quel navire transporte des quantités importantes de carburant qui peut conduire à un incendie si un départ de feu se produit. Le risque est largement accru pour les navires de charge comme les pétroliers, chimiquiers ou encore les gaziers.

A ce jour, pour ce qui concerne les navires de commerce, qui sont l'objet de notre étude, aucun navire parmi les plus gros n'a été endommagé au point de sombrer. Au Japon, suite au tsunami du 11 mars 2011, 17 navires de commerce au moins ont subi des avaries. Onze d'entre eux ont été déposés à terre par les vagues de tsunami ou se sont échoués, dont le « *China Steel Integrity* » un navire de charge de 280 m de long, et six autres sont partis à la dérive dans les ports, comme le « *Coral Ring* » un navire de transport de vrac d'une longueur de 225m (Wisniewski et Wolski, 2012). Trente et un navires à passagers ont été également gravement endommagés (Takahashi *et al.*, 2011). Néanmoins, aucun décès parmi les occupants de ces navires n'a été rapporté.



Figure 41 : Photographie du navire de charge « Asia Symphony » déposé à terre sur les quais du port de Kamaishi (préfecture d'Iwate, Japon) à la suite du tsunami du 11 mars 2011 (crédit photo : AFP/Getty Image)

4.2.1.3. La nécessité d'une connaissance fine de l'aléa à l'échelle portuaire

L'étude des différents modes d'endommagements met en évidence que ce n'est pas l'impact des vagues de tsunami qui endommage les navires mais l'interaction avec leur environnement immédiat⁸⁹. Ainsi, le risque majeur pour les navires et notamment pour les bâtiments de commerce est lié à la rupture des amarres, complète ou partielle, et à la perte de manœuvrabilité face à des courants trop puissants ou des dommages sur la propulsion ou les gouvernes.

Lynnett *et al.* (2014) proposent un tableau de probabilités des dommages aux navires selon six niveaux, en fonction des vitesses de courant du tsunami atteintes à l'intérieur des ports, établies sur la base de plusieurs retours d'expérience et couplées à des simulations numériques (figure 42). Un premier seuil de dommages correspond à une valeur de vitesse de courant supérieure à 3 nœuds, à partir de laquelle les navires même de taille moyenne peuvent rompre leurs amarres. En-deçà, aucun dommage n'a été constaté dans les ports étudiés. Le deuxième seuil est atteint au-delà de 6 nœuds. Le niveau de dommage passe alors de modéré à important pouvant détruire les bateaux de plaisance et rompre les amarres des navires les plus gros. Au-delà de 8 ou 9 nœuds, le niveau de dommage est sévère entraînant potentiellement des avaries sur tous les types de navires présents dans le port. Cette grille de niveaux de dommages potentiels est actuellement employée pour apporter une aide à la planification de gestion de crise des ports en Californie aux Etats Unis (Wilson, 2016).

⁸⁹ “[...] the mechanism of damage to the ship by the tsunami is unclear. The tsunami may initiate the movement of the ship, but evidence that the tsunami force is responsible for the destruction of the ships is rarely found in the available literature, as would happen for a static object such as coastal structures or buildings.” (Muhari *et al.*, 2015)

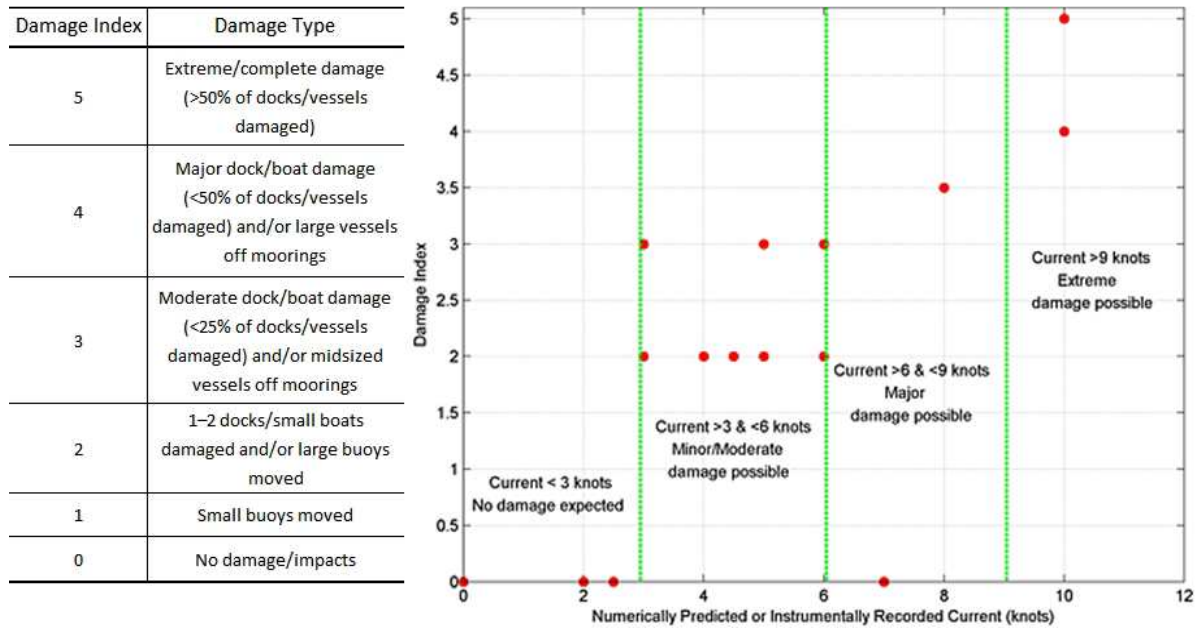


Figure 42 : Graphique des probabilités de dommages des navires face à l'aléa tsunami selon plusieurs classes de vitesses de courant. Les points rouges représentent des valeurs relevées au cours de retours d'expérience, d'après Lynett et al. (2014)

Le risque de rupture des amarres est la principale cause d'avaries des navires de commerce en cas de tsunami. Masuda *et al.*, (2013) soulignent que la tension sur les amarres et donc le risque de rupture ne sont pas uniquement liés à la vitesse du courant mais également à sa direction par rapport au navire. Celle-ci varie en fonction de la période de l'onde de tsunami et des phases de submersion et de *backwash* du tsunami. L'auteur précise que la sollicitation des amarres liée aux variations d'amplitude du niveau de la mer en fonction de la période exerce des contraintes plus ou moins rapprochées (Masuda *et al.*, 2013).

4.2.2. Proposition d'une matrice d'aide à la décision pour le séquençage de l'évacuation des navires dans le Grand Port Maritime de la Martinique

L'exposition des navires est variable en fonction de leur distance par rapport à la côte et de leur profondeur d'eau sous la quille. Au large, les effets de l'onde de tsunami sont négligeables pour les navires, voire imperceptibles. Ce n'est qu'à l'approche des côtes, alors que la profondeur décroît que le phénomène devient dangereux. Dans les ports, on observe des effets de résonance plus ou moins marqués en fonction de la configuration des bassins et de l'orientation des infrastructures (Allgeyer, 2012 ; Lu *et al.*, 2014). Ce phénomène a localement pour conséquence une amplification des hauteurs d'eau et un renforcement des courants. De ce fait, en cas d'alerte tsunami il est avéré que l'évacuation des navires doit avoir lieu vers le large. Dans les guides opérationnels et les plaquettes d'information à destination des navigateurs, plusieurs valeurs de profondeur et de distances théoriques garantissant la sécurité des navires font référence. A titre d'exemple, l'Etat d'Hawaii préconise une valeur de 300 pieds de profondeur (100 m) et de deux milles nautiques (3,2 km) de distance par rapport à la côte (DNLN, 2013). Sur son site internet⁹⁰, le PTWC indique à l'attention des plaisanciers d'atteindre un secteur dont la profondeur est supérieure à 400 m. D'après les résultats de plusieurs simulations de scénarios

⁹⁰ <http://ptwc.weather.gov/ptwc/faq.php>

de tsunamis réalisées à l'échelle portuaire, Borrero *et al.* (2015) notent qu'à partir de 60 m de profondeur la vitesse du courant est inférieure à 0.5m/s soit environ un nœud. Pour ces auteurs, cette valeur de profondeur est donc considérée comme suffisante pour mettre les navires en situation de sécurité. Par mesure de précaution et selon les consignes fournies par l'UNESCO, nous retiendrons pour la suite de nos travaux une valeur 100 m (IOC-UNESCO, 2014c). De vastes plateaux continentaux s'étendent dans la mer des caraïbes. Ils se caractérisent par de faibles profondeurs d'eau. C'est pourquoi il est nécessaire de corrélérer la valeur de distance à la côte avec celle de profondeur pour limiter les distances d'évacuation des navires. En conséquence, nous avons retenu comme distance de mise en sécurité la valeur conservatrice maximale de cinq milles nautiques. Sur la base de ces critères, nous avons cartographié la zone à évacuer sur l'ensemble du bassin de la Grande Caraïbe à partir des données bathymétriques mondiales libres d'accès GEBCO de 2014 (*cf.* annexe 7).

Les délais avant l'impact d'un tsunami en Martinique sont très courts pour une mise en sécurité optimale des installations portuaires et des navires, y compris dans le cas d'un télétsunami. A titre de comparaison, le Plan Cyclone (2013) prévoit dès la phase de vigilance, soit près de 72h avant l'arrivée potentielle du cyclone, une mise en veille des services portuaires et le recensement des enjeux présents dans l'enceinte du port. Puis très rapidement, 54h avant l'événement, les premières opérations de mise en sécurité technique débutent. Face au risque de tsunami, aucune manutention de mise en sécurité des installations portuaires n'est envisageable. En fonction des scénarios, seule l'assistance pour l'arrêt des opérations commerciales, l'appareillage des navires et la fermeture des accès terrestres du port sont à privilégier, sous peine d'exposer le personnel aux effets du tsunami. Notre approche vise avant tout à limiter les enjeux exposés mais également à définir le séquençage de l'évacuation des navires afin de limiter les dommages qu'ils pourraient occasionner aux infrastructures portuaires. De tels dommages risquent fort de les rendre inutilisables pendant plusieurs jours, privant l'accès du port aux navires de commerce ce qui perturberait le rétablissement post-crise à l'échelle départementale. Nous nous sommes appuyés sur les recommandations des travaux existants et sur les matrices d'aide à la décision disponibles (PIANC, 2009) pour construire et adapter des outils dans la perspective de les rendre applicables aux autres ports maritimes du bassin.

Dans un premier temps, nous avons proposé aux autorités portuaires une série d'opérations à réaliser à l'attention des commandants pour la mise en sécurité technique des navires en cas de tsunami. Elle se compose de cinq grandes actions qu'il convient de choisir au cas par cas et en fonction de la situation de chaque navire :

- déconnecter les navires des branchements qui les relient à terre. Il peut s'agir de simples branchements électriques mais aussi de raccords utiles à la manutention des marchandises (flexible à cargaison, bras de chargement, etc.) notamment ceux des pétroliers et autres navires citernes. L'endommagement de ces équipements entraînerait le rejet des produits de la cargaison en mer et sur les quais. Leur rupture peut également occasionner des blessures aux personnels ;
- renforcer des amarres. Si le navire ne peut pas appareiller pour évacuer son poste à quai, le simple fait de rajouter des amarres limite le risque de rupture. Cette action doit être réalisée en autonomie par les membres d'équipage ;

- mettre en marche les machines principales. Même si le navire n'a pas le temps d'appareiller, l'utilisation des moteurs doit permettre de soulager les efforts sur les amarres à quai pour éviter qu'elles ne cèdent, et sur les ancrs au mouillage pour éviter qu'elles ne dérapent sur le fond pendant l'événement ;
- remonter les coupées⁹¹ pour sécuriser les accès à bord, le personnel et les éventuels passagers, en cas de mouvements brutaux du navire liés aux effets du tsunami.

Ces actions sont connues de tous les membres d'équipage. Indépendamment les unes des autres ou pas, elles font partie des manœuvres d'urgence courantes. Par contre, elles ne sont certainement pas présentées comme mesure de mitigation face à l'aléa tsunami. Il convient donc d'en informer tous les navires qui entrent aux ports par l'intermédiaire des agents consignataires⁹².

Comme nous l'avons mentionné en début de chapitre, les autorités portuaires (commandant de port, commandant adjoint et officier de permanence) sont contactées par SMS et par fax par le chef de SIDPC. La réception d'un message d'avertissement par les autorités portuaires n'entraîne ni injonction, ni action auprès des navires. Néanmoins, une cellule de veille est activée et se réunit à la capitainerie à l'initiative du commandant de port. C'est lui qui a la charge de contacter par téléphone le COD pour confirmer qu'il n'y a pas de danger et que les hauteurs d'eau modélisées par le PTWC, dans le cas où il s'agit d'un message de menace, ne dépassent pas 0.3 m d'amplitude. La cellule de veille reste active jusqu'à la diffusion du message d'information par la préfecture. La réception d'un message d'évacuation émis par la préfecture, et quel que soit son niveau (alerte orange ou rouge) entraîne instantanément la diffusion d'un message d'alerte aux bords avec pour première consigne l'arrêt immédiat de toutes les opérations commerciales en cours. Ensuite, des consignes individuelles sont émises pour chaque navire présent dans les limites administratives portuaires ainsi que pour ceux en approche. Nous avons donc réalisé une matrice d'aide à la décision qui vise à guider les autorités portuaires dans cette démarche. Elle est construite sur la base des délais disponibles entre le moment où le port réceptionne le message du SIDPC et le temps théorique avant l'impact du tsunami. Elle tient compte du type de navires et de leur situation au port (figure 43).

⁹¹ « Echelle amovible située de chaque côté du navire permettant de monter à bord » (CMA CGM, 2007).

⁹² « Mandataire de l'armateur, il représente ses intérêts avant, pendant et après l'escale de son navire au port. Il coordonne les opérations commerciales en assurant à l'export, le recrutement de la marchandise (booking), son suivi à l'arrivée au port et au cours du chargement, la documentation et la facturation. A l'import, l'information des réceptionnaires, la facturation et la livraison. Par extension, l'agent consignataire assiste le navire pour les opérations commerciales mais également pour les besoins de l'équipage ou techniques (réparations, soute) » (CMA CGM, 2007).

Scénario		Alerte officielle d'évacuation tsunami (orange ou rouge)		
Temps entre la réception du message par la capitainerie et l'arrivée estimée de la première vague		< 45 min	entre 45 min et 1h30min	> 1h30
Navires à quai, machines stoppées	Pétrolier, Chimiquier, Gazier, Vraquier, Ro-Ro, Conteneur	Mise en sécurité technique des navires, confinement de l'équipage dans le navire	Mise en sécurité technique des navires et appareillage autonome des navires	Mise en sécurité technique des navires et appareillage selon la séquence définie par les autorités portuaires
	Croisière Roulier-mixte	Mise en sécurité technique des navires, confinement des passagers dans le navire. Prise en charge des passagers à terre par du personnel	Si possible appareillage autonome du navire ou mise en sécurité technique. Prise en charge des passagers à terre par du personnel	Appareillage du navire avec les passagers à son bord
	Petites unités commerciales	Débarquement des passagers et appareillage		
Navires à quai, machines en marche		Appareillage si autonome (prise en charge des passagers éventuels à terre par du personnel)	Appareillage (prise en charge des passagers éventuels à terre par du personnel)	
Navires au mouillage		Mise en sécurité technique des navires et mise en marche des moteurs	Mise en sécurité technique des navires et appareillage	
Navires en cours de manœuvre	En cours d'appareillage	Fin de manœuvre		
	En cours d'accostage	Manœuvre stoppée, évacuation vers la haute mer		

Figure 43 : Matrice d'aide à la décision pour la mise en sécurité des navires en cas d'alerte tsunami

Les classes de temps sont définies sur la base de calculs du temps de parcours moyens selon une méthode de calculs sur graphe, présentée au chapitre 7, pour rejoindre la zone de mise en sécurité. Elles sont également tirées de recherches bibliographiques. La zone de mise en sécurité se situe à une distance moyenne de 7.3 km pour l'ensemble des quais. Le temps de navigation pour la rejoindre est en moyenne de 16 minutes. A ce temps incompressible, s'ajoute le temps de réaction des membres d'équipage et celui de l'appareillage des navires. D'après les retours d'expérience menés suite au tsunami de 2011 au Japon, et notamment en étudiant les données AIS⁹³ des navires qui ont évacué dans les ports de Sendai-Shiogama d'Onahama et de Tokyo (Iwanaga et Matsuura, 2012 ; Makino, 2012 ; Shiotani et Makino, 2012, Makino *et al.*, 2012 ; Liu *et al.*, 2015), cette valeur est comprise entre 10 et 30 min pour les navires de commerce. Pour la plupart d'entre eux, il a fallu entre 20 et 30 min pour appareiller, temps de réaction de l'équipage compris. Nous conservons la valeur maximale de 30 min, il s'agit de la même valeur théorique retenue par Kobayashi *et al.* (2008). Les premiers délais sont donc fixés à 45 min, temps en-deçà duquel aucune évacuation n'est envisageable. Un second délai compris entre 45 min et 1h30 min est défini. Il doit permettre aux navires d'évacuer en autonomie,

93

sans assistance pour appareiller, hormis pour les navires citernes. Au-delà d'1h30 minimum, l'ordre d'appareillage des navires est séquencé par les autorités portuaires en fonction des types de navires et de la disponibilité du personnel (pilotes et lamaneurs, remorquage). Ces valeurs ont été validées par les autorités portuaires au cours de nos réunions de travail. Dans le cas d'un séisme fortement ressenti associé ou non à un mouvement anormal du niveau de la mer, il a été décidé que les mêmes procédures que celles définies pour un délai inférieur à 45 min seraient appliquées.

Dans ce chapitre, nous avons élaboré des documents d'aide à la prise de décision en cas d'avis de tsunami émis par le PTWC. Ils ont été réfléchis à l'échelle régionale mais dans la perspective de leur application au niveau des départements des Antilles françaises. En cas de risque élevé, la mesure prise par les autorités à terre et en mer consiste à émettre un message d'alerte pour une évacuation temporaire et généralisée des littoraux. Dans les chapitres suivants, nous proposons de détailler plusieurs méthodes et outils mis en œuvre dans nos travaux utiles à la planification des évacuations. Nous nous attachons dans le prochain chapitre à définir une stratégie d'évacuation pertinente appliquée au territoire de la Martinique.

Chapitre 5 Stratégies d'évacuation et réponses locales : contribution et méthode

L'évacuation de populations s'envisage habituellement selon plusieurs stratégies en fonction du type de menace (spontanée, réactive, planifiée). Toutes peuvent être mises en œuvre dans les îles françaises des Petites Antilles. Néanmoins, plusieurs contraintes opérationnelles orientent notre choix de propositions. Pour certains scénarios de tsunami, les délais d'évacuation sont très courts et le niveau de menace très incertain au moment de la prise de décision par les autorités préfectorales. Dans ce cas de figure, il est nécessaire de mettre en place une stratégie d'évacuation concertée à l'échelle départementale qui doit être relayée localement à travers les Plans Communaux de Sauvegarde (PCS). Deux types d'évacuation sont généralement déployés de manière complémentaire face à l'aléa tsunami : *l'évacuation horizontale*, qui consiste à déplacer des populations hors de la zone théorique d'impact ; *l'évacuation verticale* qui vise à mettre en sécurité des populations à l'étage de bâtiments. Les évacuations menées lors de catastrophes récentes, notamment celle du 11 mars 2011 au Japon, ont révélé des avantages et des inconvénients pour chacune d'elles. En effet, plusieurs facteurs entrent en jeu pour leur planification au regard du contexte géographique local (densité de population, topographie, exposition aux aléas) et réglementaire (normes de construction, procédures). Nous proposons dans ce chapitre une méthode novatrice pour identifier et sélectionner les sites refuges tsunami horizontaux les plus pertinents dans une perspective de planification des évacuations. Cette méthode a été appliquée à l'échelle de la Martinique et sur les deux communes pilotes de Trinité et de Sainte-Anne. Elle est transférable et adaptable sans difficulté aux autres îles de la Caraïbe.

5.1. Comment évacuer face aux tsunamis ?

5.1.1. Modes de transports couramment employés pour les évacuations dans le monde

La France est novice en matière d'expérience d'évacuation de masse. Les guides relatifs à la planification de crise rédigés par la DGSCGC restent imprécis, notamment sur la question des modes de transport envisageables dans le cas d'évacuations massives de populations, quel que soit l'aléa (DGSCGC, 2009 ; DGSCGC, 2014). Il en est de même pour le guide du CEPRI, spécifique aux évacuations face à l'aléa inondation (CEPRI, 2014). La littérature est plus abondante dans des pays anglophones tels que les Etats-Unis, l'Australie ou encore le Canada (Bolton, 2007). Nous distinguons quatre principaux modes d'évacuation. Une synthèse des avantages et des inconvénients de chacun d'entre eux est présentée sous la forme d'un tableau (tableau 10).

- L'évacuation au moyen de véhicules personnels

Cette méthode fait appel à l'autonomie des personnes pour évacuer avec leur propre véhicule. Il s'agit du mode d'évacuation le plus couramment employé (DGSCGC, 2014). L'évacuation en véhicule est possible uniquement si l'on dispose de 3 à 4 jours après que l'alerte ait été lancée, ce qui exige nécessairement un délai important de préavis de crise. Ce type d'évacuation est envisageable même pour les agglomérations les plus importantes. Néanmoins, dans le cas d'un avertissement compris entre 24 et 48 h, la paralysie du réseau routier est à redouter. En dessous de 24 h de délai et en fonction de la densité de population, il n'est plus envisageable d'évacuer en voiture sous peine de congestionner entièrement les réseaux (Ercolano, 2008). Ce mode d'évacuation nécessite également d'estimer au préalable le nombre moyen de véhicules par personne exposée et de prévoir une assistance pour les personnes à mobilité réduite ou dépourvues de moyens motorisés. Il faut également prévoir des stratégies de gestion de la circulation, comme la mise en place de barrages routiers, de déviations, de signalisations spécifiques, et enfin la gestion des sens de circulation et des carrefours. Ces dispositions doivent être planifiées, coordonnées et explicitées localement dans des documents de gestion de crise (SDMG, 2011).

Les autorités françaises disposent de plans de gestion pour améliorer la fluidité du trafic routier interurbain lors des grandes migrations à l'échelle zonale, comme le Plan PALOMAR (Paris – LyOn – MARseille), ou bien encore dans le cas de conditions climatiques exceptionnelles, les plans neige ou intempéries. Etonnamment, le plan PALOMAR n'est évoqué que très brièvement au sein du guide de l'évacuation massive élaboré par la DGSCGC, il semble pourtant particulièrement pertinent pour une évacuation de grande envergure en proposant par exemple « *les délestages du réseau principal, la mise en place d'itinéraires alternatifs, les mesures d'interdiction de circuler et l'information du public* » (DGSCGC, 2014). A notre connaissance, il n'existe pas de plans opérationnels en France à l'échelle d'agglomérations ou de départements pour la gestion d'évacuations massives au moyen de véhicules personnels. Depuis 2008, seul le CEREMA⁹⁴ conduit des travaux visant à modéliser les stratégies d'évacuation à mettre en place pour les villes de Grenoble et Lyon face au risque de rupture de barrage.

⁹⁴ Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Ils se concentrent sur l'évacuation par voie routière tout en intégrant les transports en commun (Murard, 2014).

Aux Etats-Unis des évacuations de masse sont régulièrement ordonnées par les autorités notamment face à la menace de l'aléa cyclonique. Moins d'un mois après la catastrophe de l'ouragan Katrina, l'ouragan Rita (septembre 2005) a entraîné la diffusion d'un ordre d'évacuation des côtes de Louisiane et du Texas entre 58 et 42 h avant l'arrivée du cyclone. Plus de deux millions de personnes ont évacué principalement au moyen de véhicules personnels. Malgré une planification à froid importante, les médias ont rapporté que près de 100 miles d'embouteillages et de nombreux décès avaient eu lieu au cours du processus d'évacuation (Wu *et al.*, 2012).

- L'évacuation en transports en commun (bus, ferry, train, métro)

Ces modes de transport sont principalement recommandés pour l'évacuation en masse des zones à très forte densité de population. Ils sont également sollicités pour l'évacuation des personnes en transit ou sans véhicule, ainsi que pour les établissements recevant du public. Une évacuation de grande ampleur à l'aide des transports en commun présente une difficulté majeure car elle nécessite en amont une planification efficace et bien rodée. Cela implique une bonne coordination entre tous les acteurs et l'adéquation entre les besoins et les capacités disponibles.

Le transport aérien peut également être envisagé pour évacuer de faibles quantités de populations depuis des territoires isolés vers des secteurs éloignés mais sécurisés. C'est l'un des modes de transport que le gouvernement canadien préconise dans son plan national de gestion des urgences des Affaires autochtones et Développement du Nord Canada⁹⁵. Le principal avantage de l'avion est qu'il permet de parcourir des distances franchissables importantes et par conséquent d'éloigner rapidement les populations de la zone à risque.

Lors de l'évacuation de la ville de la Nouvelle-Orléans face à l'ouragan Katrina (août 2005), seulement une centaine de bus ont été mobilisés pour l'évacuation de près de 100 000 personnes ne disposant pas de véhicules privés (Heller, 2010). Ce manquement a alourdi le nombre de décès dans la zone inondée, principalement des personnes socialement faibles et âgées. Autre exemple, en Italie face à la menace volcanique du Vésuve le plan d'évacuation de la région des Champ Phlégréens à l'ouest de la ville de Naples, dans sa version provisoire, prévoit l'évacuation des populations par bus, train et bateau sous la direction de la protection civile italienne (Alberico *et al.*, 2012).

- L'évacuation à pied

Elle est préconisée pour l'évacuation rapide d'une zone de danger afin de rejoindre des sites refuges proches. Les distances doivent être courtes pour garantir au maximum le respect de la consigne d'évacuer à pied. Ce mode de déplacement peut également être employé en tant que premier chaînon d'une stratégie d'évacuation multimodale. L'évacuation se fait à pied pour une première partie de l'itinéraire seulement, et permet de rejoindre ensuite un autre moyen de déplacement, comme les transports en commun par exemple. Cette stratégie est particulièrement efficace pour l'évacuation des

⁹⁵ Disponible en ligne à l'adresse suivante : <https://www.aadnc-aandc.gc.ca/fra/1324572607784/1324572653216#c3>

centres urbains densément peuplés. Mais l'évacuation à pied peut parfois être contrainte par des conditions d'accès limité à des moyens motorisés dans des pays où le niveau de richesse par habitant est très faible. C'est notamment le cas en Inde où l'évacuation de masse en cas de cyclone pourrait se dérouler à pied pour plusieurs centaines de milliers de personnes (Revi et Singh, 2007).

- L'évacuation en transports spécialisés

Des moyens de transport dédiés voire spécialisés sont mis en place pour l'évacuation de personnes à mobilité réduite, nécessitant une assistance médicale ou bien encore pour évacuer des établissements spécifiques (hôpitaux, prisons, etc.). L'une des préoccupations majeures est d'adapter les moyens de transport en fonction des demandes particulières et de préparer en amont les sites d'accueil. Tout comme pour l'évacuation en transport en commun, la concertation entre les différents acteurs est essentielle. A titre d'exemple, en 2011 à Coblenz (Allemagne), 45 000 habitants sont évacués afin de sécuriser une opération de déminage. Parmi eux, les autorités allemandes ont dû organiser le transport et l'hébergement des patients de deux hôpitaux et des détenus d'une prison (OFPP, 2012).

Tableau 10 : Synthèse des principaux modes de déplacement employés pour les évacuations de masse

	Véhicules personnels	Transports en commun	Transports spécialisés	Evacuation pédestre
Avantages	Facilité et rapidité de mise en œuvre Capacité de franchissement assez importante	Capacité importante de transport, le plus souvent à proximité de grands centres urbains voire parfois en centre-ville	Indispensable pour l'évacuation des personnes médicalisées ou hébergées dans des infrastructures spécifiques	Evacuer un maximum de personnes dans un minimum de temps Première phase d'évacuation possible vers des hub-multimodaux
Inconvénients	Paralysie probable en milieu urbain Risque d'accidents Discrimination par rapport à la possession d'un véhicule ou non Nécessité d'aires de stockage des véhicules aux points d'arrivée	Nécessité parfois d'un moyen de transport tiers pour les rejoindre Mobilisation de moyens humains pour la gestion des évacués Dépendance aux réseaux connexes	Besoin en ressources humaines important Nécessite une planification régulièrement actualisée	Limité à de courtes distances Besoin de sécuriser les piétons lorsque l'évacuation met en jeu des véhicules Dépendance des aptitudes physiques des individus
Difficultés de mise en œuvre	Nécessité d'aménagements et d'une planification échelonnée importante en amont	Coordination importante entre acteurs Temps de mise en place Disponibilité du personnel	Définition des priorités d'intervention en amont de la crise Disponibilité du personnel	Taux de mobilisation dépendant des conditions météorologiques et des distances à parcourir Prise en compte difficile des personnes à mobilité réduite
Conseils de mise en œuvre	Adapté pour des évacuations de grande envergure d'une durée supérieure à 24 h où l'on demande aux personnes d'évacuer vers de la famille ou des amis	Efficace pour une évacuation anticipée en milieu urbain	Indispensable pour l'évacuation symétrique des infrastructures médicalisées, pénitentiaires et des populations sous assistance médicalisée.	Pour des évacuations rapides de secteurs bien identifiés Appel à l'entre-aide pour l'évacuation des plus faibles A combiner avec d'autres modes d'évacuation

Les études menées par le Bolton (2007) montrent que, quel que soit le mode de transport préconisé par les autorités en matière d'évacuation, le premier choix des populations se porte toujours sur les véhicules privés. La principale raison avancée est qu'une voiture permet de transporter de la famille, des proches voire des animaux de compagnie (encadré 5). En second lieu, ce sont les modes de transport habituellement usités au quotidien par les évacués qui sont retenus, notamment lorsqu'il s'agit des transports en commun. L'évacuation à pied n'est envisagée qu'en dernier recours.

Encadré 5. La nécessaire prise en compte des animaux au cours des évacuations, d'après CEPRI (2014) et DGSCGC (2014)

La possession d'animaux est un facteur important de refus d'évacuation des populations exposées. Par exemple, à l'approche du cyclone Katrina (août – 2005), 19 % des habitants de La Nouvelle-Orléans (Etats-Unis) n'ont pas évacué de peur d'abandonner leurs animaux de compagnie (Fritz Institute, 2006 in CEPRI, 2014). Il convient aux acteurs de la planification de crise d' « étudier la possibilité d'autoriser la présence des animaux de compagnie dans les transports en commun et préparer des messages à destination des propriétaires sur la nécessité de prévoir : colliers avec nom, laisse, muselières, cages adaptées, médicaments, aliments, et de s'assurer que la vaccination est à jour » (CEPRI, 2014). Cette démarche devrait largement augmenter le taux de mobilisation des populations exposées. Néanmoins, les animaux ne sont habituellement pas autorisés au sein des centres d'hébergement provisoires. La Croix-Rouge par exemple les refuse pour des considérations sécuritaires et sanitaires (www.redcross.org). Les propriétaires d'animaux doivent donc prévoir de les laisser dans un refuge pour animaux, chez de la famille ou des amis. Aux Etats-Unis, cet aspect est pris en compte et planifié. Ainsi, il existe un guide en ligne pour l'élaboration d'un plan d'urgence pour animaux de compagnie (<https://www.ready.gov/animals>) ou encore un site internet pour trouver temporairement une famille d'accueil directement sur internet (<https://www.petfinder.com/animal-shelters-and-rescues/>). En France, le guide du Plan Familial de Mise en Sécurité (PFMS) évoque uniquement la nécessité dans certains cas d'abandonner l'animal : « Si je dois évacuer sans eux [animaux de compagnie], je mets les animaux à l'abri, sur les hauteurs... ». Dans le cas d'évacuations préventives anticipées et selon les délais disponibles, l'évacuation d'animaux d'élevage est également recommandée. Cette recommandation présente deux intérêts majeurs : éviter un probable refus d'évacuer de la part du chef d'exploitation mais aussi limiter le risque sanitaire en cas de décès massif des animaux. Il convient donc que chaque agriculteur anticipe une évacuation en tenant compte de la spécificité de son élevage. Cette opération repose sur la solidarité entre professionnels et doit être organisée pour ne pas entraver ou ralentir l'évacuation des populations ou l'intervention de secours.

5.1.2. Tsunami : la nécessité d'une évacuation pédestre

5.1.2.1. Une évacuation pédestre à privilégier

L'évacuation à pied, comme mode de déplacement principal pour la mise en sécurité des personnes, a longtemps été ignorée des plans de gestion de crise, et ce même dans des pays pourtant habitués aux évacuations massives. L'évacuation par véhicule privé a toujours été prédominante (FHWA). La réelle prise de conscience de privilégier parfois une évacuation pédestre fait suite aux attentats du 11 septembre 2001 sur les villes de New-York et de Washington. Un guide consacré à l'évacuation pédestre des grandes aires métropolitaines a alors été réalisé par le Département des Transports de la *Federal Highway Administration* des Etats-Unis. Il sert aujourd'hui de référence aux autorités des Etats fédéraux américains pour l'intégration de ce mode de déplacement dans leurs manuels opérationnels de gestion des crises. Bien qu'orienté sur des problématiques urbaines, il s'agit du document opérationnel le plus abouti accessible en ligne⁹⁶.

Quelques années plus tard, la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) de l'Unesco conseille d'évacuer à pied face au risque de tsunami (IOC-UNESCO, 2008). Depuis, ce mode de

⁹⁶ <http://ops.fhwa.dot.gov/publications/pedevac/index.htm>

déplacement est communément admis sur le plan international et fait consensus. Cette consigne est relayée dans plusieurs articles scientifiques (Johnstone et Lence, 2011, Scheer *et al.*, 2011, Wood et Schmidlein, 2012, León *et al.*, 2014). Ce mode de déplacement est le plus efficace pour une évacuation rapide des populations lorsque les délais d'avertissement sont courts (Bolton, 2007). En effet, les piétons possèdent une grande flexibilité dans le choix des itinéraires et franchissent plus aisément les obstacles éventuels (débris, voitures abandonnées, barrières). Ces avantages leur donnent la possibilité de prendre les itinéraires les plus directs pour rejoindre les zones de sécurité. Bien que les distances de franchissement d'un piéton restent circonscrites et dépendent largement de leurs aptitudes physiques, ce mode de déplacement limite la congestion du trafic, l'engorgement des réseaux, et le risque d'incidents (León *et al.*, 2014). Ercolano (2008) affirme que les chances de survie, aussi infimes soient-elles, sont forcément augmentées par une évacuation à pied⁹⁷.

Plus récemment, en France, cette recommandation se retrouve dans le guide des évacuations massives rédigé par la DGSGCG (2014) : « *Dans les DROM-COM ou d'autres secteurs particuliers en métropole (zones inondables en cas de rupture de barrage par exemple), en fonction de la cinétique et de la nature de l'événement, compte-tenu de l'engorgement rapide des routes, il pourra être conseillé à la population d'évacuer à pied, notamment en cas de tsunamis pour atteindre des points hauts rapidement* ». Lorsque les délais d'arrivée des premiers effets à la côte ne permettent pas une évacuation anticipée, le respect de cette consigne vise à limiter le risque d'encombrement des réseaux routiers. Notamment, dans le cas d'événements locaux des débris peuvent encombrer les voies et rendre rapidement impossible l'accès aux véhicules. De plus, l'expérience du tsunami du 11 mars 2011 au Japon, a révélé que le taux de mortalité a parfois été plus élevé dans les localités où la population avait enfreint l'ordre d'évacuer à pied (Fraser *et al.*, 2012).

5.1.2.2. L'utilisation des véhicules : un facteur aggravant du risque

Les nombreux retours d'expérience suite à des tsunamis, et notamment ceux réalisés suite au tsunami du Japon de 2011, ont démontré que la consigne d'évacuation à pied n'est pas toujours respectée. D'après une enquête menée auprès de 265 personnes ayant évacué la plaine de Yuriage (Préfecture de Miyagi), 65 % d'entre eux ont évacué en voiture, et près d'un tiers est resté bloqué dans des embouteillages (Murakami *et al.*, 2012). Le même constat a été fait dans les préfectures d'Iwate, de Miyagi et de Fukushima par Yun & Hamada (2011) (n= 870). 57 % des répondants ont utilisé un véhicule et plus d'un tiers s'est retrouvé pris dans les embouteillages. En moyenne, sur l'ensemble de la région frappée par le tsunami, on considère que plus de 50 % des évacuations ont été réalisées en véhicule et que près d'un tiers des évacués a connu des ralentissements sur leur trajet, les mettant en danger (World Bank, 2012). Un retour d'expérience dans la ville de Kushiro (Japon) suite à un alerte tsunami en novembre 2006 a été mené par Suwa et Kato (2006) révélant des chiffres supérieurs. Sur

⁹⁷ « Pedestrian evacuation has been, and continues to be the first step and/or last resort when it comes to escape from a sudden catastrophic event. The United States Department of Transportation (USDOT), the New York City Emergency Response Task Force, and the Federal Highway Administrations' (FHWA) Volpe National Transportation Systems Center all recognized the essential role of mass evacuation on foot, and the need to integrate the walk mode as an essential operational element of local/regional emergency mass evacuation plans » (Ercolano, 2009)

302 répondants, 67,4 % auraient utilisé un véhicule pour rejoindre un site refuge. Pourtant, le non-respect des consignes d'évacuation à pied engendre des congestions du trafic routier sur les réseaux, voire leur paralysie totale. Or, le nombre de décès a tendance à augmenter lorsque les zones de ralentissement sont situées dans la zone de danger. Lee *et al.* (2013) ont observé que le ratio du nombre de victimes a été multiplié par 10 dans la ville de Yamamoto (congestion dans la zone submergée) par rapport à la ville d'Iwanuma (congestion du trafic hors de la zone de danger) qui toutes deux ont pourtant connu des congestions du trafic similaire. En effet, les véhicules pris dans le tsunami sont très rapidement incontrôlables, déplacés voire submergés par le tsunami entraînant le décès des occupants par noyade. L'utilisation de véhicules est dangereuse aussi bien pour les conducteurs et les passagers eux-mêmes que pour les personnes extérieures qui évacuent à pied (Bolton, 2007).

A partir des données récoltées par le *Ministry of Land Infrastructure Transport and Tourism* (MLIT) suite au tsunami du 11 mars 2011, Lee *et al.* (2013) ont étudié les principales raisons ayant motivé le choix d'utiliser un véhicule comme mode d'évacuation. Les auteurs ont sélectionné des données pour trois villes de taille comparables dans la région de Tohoku, mais présentant des différences dans leur topographie environnante et donc d'accès aux sites refuges horizontaux. Ils en concluent que deux facteurs clés conditionnent l'emploi d'un véhicule : les trop longues distances à parcourir et la volonté de rejoindre ses proches ou d'emporter des biens. Le même constat a été mis en évidence par les enquêtes menées auprès d'évacués de la ville de Natori (préfecture de Miyagi, Japon) par Murakami *et al.* (2012). Le premier facteur est directement lié à la planification des évacuations et aux choix de l'emplacement des sites refuges. Le second peut être, quant à lui, limité par de l'information préventive et par l'éducation des populations dans le respect des consignes. La question est donc de savoir à partir de quelle distance la population favorise-t-elle les évacuations en véhicule ?

5.1.2.3. Limiter les durées de parcours pour favoriser l'évacuation à pied

Au cours des évacuations face à l'aléa tsunami, le choix de la voiture comme mode de déplacement augmente au regard de la distance à parcourir pour rejoindre un site refuge (Fraser *et al.*, 2013 ; Lee *et al.*, 2013 ; Murakami *et al.*, 2012). Lamb et Walton (2011) ont mené des enquêtes sur les comportements des individus face à différents scénarios de séisme. Leurs résultats montraient que le pourcentage de personnes qui utiliseraient un véhicule est supérieur à celui qui se déplacerait à pied au-delà d'une distance de 3,25 km de marche. Cette valeur semble particulièrement élevée. En effet, d'après les enquêtes menées par Suzuki et Inamura (2005), l'intention d'employer une voiture pour évacuer est supérieure à 60 % lorsque la distance à parcourir est supérieure à 750 m. Lors de la catastrophe du Japon en 2011, les distances moyennes d'évacuation étaient de 450 m (World Bank, 2012). Lee et al estiment que 95 % de la population ayant évacué à pied a atteint un site refuge en parcourant moins de 1,5 km, et 50 % moins de 300 m. Cumulée, la distance moyenne de marche s'avère être de 321 m. Pour les territoires soumis à des événements locaux, la FEMA conseille une distance maximale de marche d'un demi mile soit environ 804 m (FEMA, 2009). Cette valeur nous semble particulièrement pertinente car elle correspond approximativement aux valeurs moyennes des résultats de plusieurs enquêtes ménages- déplacements quotidiens des ménages en milieu urbain. Par exemple, en France métropolitaine en 2008, la moyenne quotidienne des déplacements à pied en

semaine est de 13,4 minutes, soit une distance de 804 m pour une vitesse moyenne de 3,6 km/h⁹⁸ (Le Jeannic, 2010). En Martinique, en 2001, les déplacements à pied des habitants de l'agglomération de Fort-de-France durent en moyenne 15 minutes⁹⁹, soit 900 m de distance si l'on tient compte de la même vitesse de déplacement que précédemment. Nous retrouvons des valeurs équivalentes dans d'autres études internationales comme aux Etats-Unis, où en 2009, la distance de marche quotidienne était en moyenne de 700 m (Zegeer, 2002 ; DOT NY, 2013), ou encore en Nouvelle-Zélande, de 820 m (Walton et al, 2007).

Néanmoins cette valeur théorique doit être nuancée par plusieurs facteurs. Par exemple, la difficulté liée à la marche augmente avec l'âge. Ce facteur est considéré comme un handicap ou une gêne dans les déplacements (Benlarech *et al.*, 2001). D'après ces auteurs «chez les 75 ans et plus, 48 % des personnes qui ne peuvent plus se déplacer de manière autonome vivent seules et 20 % des ménages qui comportent une personne gênée dans ses déplacements, ont des revenus plus faibles que la moyenne» (Benlarech, *ibid.*). Cette tranche de population est justement en cours d'augmentation en Martinique. En 2012, la population âgée de plus de 60 ans représentait 22.3 % de la population totale, soit 86 597 personnes, dont 7.9 % de plus de 75 ans (INSEE, 2013). Cette situation devrait s'amplifier dans les prochaines décennies. Les projections réalisées par l'INSEE et l'ARS montrent qu'à l'horizon 2040, la population des personnes âgées de 80 ans et plus sera multipliée par 3.5, contre seulement 2.3 en métropole (Henry, 2012). En Martinique toujours, les populations âgées cumulent également l'isolement (près de 40 % des plus de 80 ans ou plus vivent seules) mais également la pauvreté¹⁰⁰. La solidarité intergénérationnelle, traditionnelle aux Antilles (prise en charge voire hébergement des aînés) ne résiste pas face à l'évolution de la société martiniquaise, ce qui rend de plus en plus difficile la prise en charge de la dépendance des aînés par les familles, et participe au renforcement de leur isolement (Henry, 2012). La vieillesse concerne également les populations en transit et plus particulièrement les touristes dont l'âge est également élevé en Martinique (chapitre 2). Outre la capacité physique, il existe d'autres paramètres indirects qui réduisent les aptitudes à la mobilité. Orfeuil (2004) mentionne la pauvreté, l'intégration sociale, les compétences cognitives (connaissance et représentation des lieux, illettrisme).

Nous l'aurons compris, il est fondamental de minimiser au maximum les distances d'évacuation et en tout point pour limiter l'évacuation en véhicule et prévoir des transports collectifs motorisés. Au vu des retours d'expérience suite à la catastrophe du Japon et des valeurs données par les enquêtes ménages-déplacements, la distance de 800 mètres ou le temps de 15 minutes de marche semble être un maximum. Au-delà de cette distance, les populations exposées sont soumises à des contraintes géographiques fortes. Il conviendra donc de réduire cette distance soit par des aménagements, soit en

⁹⁸ Insee - Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) - Inrets, enquêtes nationales transports et communication 1993-1994

⁹⁹ http://www.insee.fr/fr/insee_regions/guyane/themes/antiane/ae48/ae48_art09.pdf

¹⁰⁰ La proportion d'allocataires du minimum vieillesse dans la population des 60 ans et plus, est de 27 % à la Martinique contre 4 % en métropole en 2006 (Didier Breton, Stéphanie Condon, Claude-Valentin Marie, Franck Temporal, « Les départements d'Outre-mer face aux défis du vieillissement démographique et des migrations », *in Population et Sociétés* n° 460 (octobre 2009).

favorisant une évacuation groupée et véhiculée. Cette dernière solution doit néanmoins se discuter en tenant compte du territoire et des densités de population qui l'occupent.

5.1.3. Anticiper une évacuation multimodale à chaque étape de la période d'urgence ...

5.1.3.1. ... au cours de la phase d'évacuation

La consigne d'évacuation à pied donnée par les autorités nécessite un bon niveau d'autonomie de chaque individu. Pourtant, sur un même territoire, des personnes vulnérables sont dans l'incapacité de quitter la zone à évacuer par leurs propres moyens. Deux principales situations se présentent : soit elles sont prises en charge dans des établissements spécialisés, soit elles résident chez elles. Dans les deux cas, il est nécessaire de mettre en place un dispositif d'évacuation spécifique pour ces personnes à l'aide de véhicules (Goto *et al.*, 2012).

- Prise en charge de personnes à mobilité réduite, dépendantes ou d'enfants en bas-âge

L'évacuation des personnes handicapées et/ou âgées isolées est une problématique difficile à résoudre. Ces personnes disposent d'une mobilité effective souvent faible : *« pour les personnes vulnérables pour raison de santé (maladies chroniques, perte d'autonomie, etc.) qui résident chez elles, des moyens de transport adéquats doivent être envisagés il convient de tenir à jour la liste des personnes concernées et des moyens d'accueil envisageables. Ce travail est mené par l'ARS (malades à haut risque vital ayant moins de 4 h d'autonomie sans suppléance), la DDCS(PP) et les collectivités territoriales (pour les personnes isolées et en perte d'autonomie à domicile) » (DGSCGC, 2014).* Face aux faibles délais d'évacuation disponibles, il est nécessaire de mettre au point des dispositions particulières à l'échelle infra-communale. En cas d'évacuation réactive lors d'un aléa local ou régional, le principe est de promouvoir les solidarités de proximité. L'évacuation de personnes vulnérables doit être accompagnée par le voisinage ou la famille géographiquement la plus proche, au moyen de véhicules, voire à pied.

En cas d'évacuation face à un tsunami d'origine lointaine, il est envisageable de mobiliser quelques véhicules spécialisés pour évacuer les malades à haut risque vital. La difficulté principale concerne les malades à domicile, nécessitant un transport médicalisé. L'évacuation des établissements d'accueil collectif de la petite enfance (crèches, garderies, etc.) ou de personnes âgées, représentent également un obstacle majeur. Ces lieux concentrent une population particulièrement vulnérable sans pour autant bénéficier d'une planification de crise spécifique, ni de moyens humains et matériels, contrairement à des établissements particuliers.

- L'évacuation des établissements particuliers

Le terme « établissements particuliers » regroupe les établissements de santé, médico-sociaux et pénitentiaires. La stratégie d'évacuation de ces établissements repose sur la mise en place d'une évacuation « symétrique », c'est-à-dire vers un établissement qui offre les mêmes conditions de prise en charge des personnes (DGSCGC, 2014). Cette stratégie oblige de prévoir en amont un appariement de structures similaires ainsi que des moyens de transport conventionnels, sanitaires, médicalisés ou non.

En France, ce type d'institution bénéficie de plans spécifiques pour le maintien de leurs activités en période de crise. Il s'agit des plans blancs pour les établissements de soins, et bleus pour les établissements médico-sociaux, ils sont propres à chaque établissement. Dans le cadre d'une évacuation d'établissements exposés à l'aléa tsunami, le plan blanc élargi ou le Plan Zonal de Mobilisation permettrait de coordonner l'ensemble des actions à l'échelle départementale. Ces plans intègrent un volet thématique spécifique aux évacuations, décliné en fonction de la cinétique des événements. La DGSCGC rappelle que « *quelle que soit la cinétique de l'évacuation, les établissements de santé sont prioritaires et doivent être en mesure d'évacuer tous leurs patients* ».

Néanmoins, la difficulté majeure pour l'évacuation d'un établissement réside dans le fait d'acheminer des moyens de transport depuis l'extérieur de la zone sur un réseau routier probablement très encombré. Cette étape nécessite de prévoir des véhicules mobilisables directement sur place. Au Pérou par exemple, les professionnels de la santé sont aidés sur la base du volontariat par d'anciens chauffeurs professionnels résidant à proximité des établissements et qui seraient avertis immédiatement de l'alerte (MIT, 2009).

5.1.3.2. ... au cours de la phase d'urgence

Une fois la fin d'alerte levée, en fonction de l'intensité du phénomène et de la gravité des dommages, il convient pour les populations regroupées sur les sites refuges de rejoindre en toute sécurité des Centres d'Accueil et de REgroupement (CARE).

- Rejoindre des centres d'hébergement CARE

Dans un premier temps, il s'agit de mettre en place des dessertes permettant de rallier les sites refuges vers les CARE. Des systèmes de navette assurés par des compagnies de transport en commun devront être établis pour poursuivre l'évacuation des sites refuges. La priorité doit porter sur ceux qui présentent une forte densité de population et/ou une vulnérabilité élevée. Dans un second temps, si le CARE est dépourvu d'hébergement d'urgence, il convient de proposer un transport entre les CARE et les centres d'hébergement. La planification de ces phases de transport est particulièrement importante dans le cas du risque de tsunami dont les effets sont de grande ampleur.

- Organiser le sauvetage

Il subsiste toujours une part incompressible de personnes potentiellement isolées sur la zone impactée. Des moyens de secours spécialisés sont donc nécessaires pour porter assistance à ces personnes et les conduire vers des centres de soins. En fonction du niveau de dommages aux infrastructures routières, il peut être nécessaire d'engager des secours aériens et/ou maritimes, et de faire appel à des unités spécialisées dans le sauvetage et le déblaiement.

Le respect de la consigne d'évacuation à pied face à l'aléa tsunami est primordial pour augmenter les chances de survie des populations exposées à des phénomènes locaux et régionaux. Il convient donc aux autorités de proposer un maillage de sites refuges dense qui incite les populations à se déplacer à pied, tout en garantissant une évacuation multimodale complémentaire pour les situations particulières.

5.2. Vers où évacuer face aux tsunamis ?

Les stratégies d'évacuation de la population sont contraintes par les délais de prévisibilité du phénomène, la durée de la phase d'urgence et le potentiel dévastateur de la menace (chapitre 3). L'évacuation vers des sites refuges temporaires assure la mise en sécurité immédiate des individus exposés face à un aléa peu prévisible mais pour une courte période de temps. Ces sites prennent différentes formes en fonction de la nature du danger (naturel, technologique), de l'environnement (bâtiment public/privé, plein-air) et de la stratégie globale de gestion de crise envisagée (confinement, évacuation, mixte). La planification à froid d'une évacuation face à l'aléa tsunami oblige les autorités à envisager deux types de sites refuges souvent complémentaires : les sites refuges verticaux (bâtiments) ou les sites refuges horizontaux (topographie). Cependant, ils ne sont pas forcément adaptés à tous les terrains et présentent l'un et l'autre des atouts et des inconvénients.

5.2.1. Les sites refuges verticaux

Les sites refuges verticaux sont des infrastructures situées au sein de la zone d'aléa dont la hauteur et la résistance offrent un abri temporaire dans les étages ou sur les toits le temps de l'alerte. Ces sites présentent l'avantage de réduire les temps d'évacuation de par leur proximité avec les populations exposées. Leur proximité limiterait les évacuations au moyen de véhicules individuels et favoriserait la décongestion des réseaux¹⁰¹. Néanmoins, la planification des évacuations vers des sites refuges verticaux implique de répondre à plusieurs obligations d'ordre technique, réglementaire, et organisationnel (tableau 11).

Du point de vue technique, les bâtiments doivent satisfaire à des critères de résistance pour éviter leur effondrement aussi bien face à l'aléa sismique que tsunami. Aux Petites Antilles, les dommages potentiels consécutifs à l'un et l'autre des phénomènes ne peuvent être dissociés, les sources tsunamigènes potentielles d'origine sismique sont proches des îles. Des bâtiments aux normes parasismiques sont nécessaires pour résister aux secousses ou aux effets induits d'un séisme. Un

¹⁰¹ Selon l'étude menée par Suzuki et Imamura (2005), dans le secteur de basse plaine de Sendai, 38 % des personnes utiliseraient une voiture pour rejoindre un site refuge vertical, contre 80 % pour un site refuge horizontal.

bâtiment endommagé par le séisme qui précède l'arrivée d'un tsunami constitue à lui seul une menace pour les personnes et ne peut servir de site refuge. Lors du tsunami de 26 décembre 2004 dans l'Océan Indien, en l'absence de normes parasismiques, les bâtiments renforcés et à plusieurs étages ont été les plus sévèrement endommagés par le séisme. Post-séisme, leur apparente solidité aurait pu laisser penser à d'éventuels sites refuges verticaux (Boen, 2006 ; Ghobarah *et al.*, 2006 ; Cluff, 2007). Si la solidité de la structure est compromise par le séisme, elle diminue également ses capacités de résistance à la submersion.

Ces bâtiments doivent également répondre à des normes de construction propres aux effets du tsunami. Suppasri *et al.* (2013b) distinguent cinq forces principales en jeu :

- la force **hydrostatique** qui exerce une pression perpendiculaire sur les façades des bâtiments et peut agir latéralement ou verticalement sur un objet ;
- la force **hydrostatique verticale** qui agit sur une structure partiellement ou totalement submergée selon le principe de la poussée d'Archimède ;
- les forces **hydrodynamiques** qui s'exercent par la circulation de l'eau le long de la construction (force de frottement et de traînée) sont fonction de la géométrie, de la structure des matériaux et de la vitesse d'écoulement ;
- la force d'**impact** qui s'exerce sur la structure d'un bâtiment lors du passage du front du tsunami ;
- les forces **hydrauliques** engendrées lors d'une submersion par tsunami sont particulièrement puissantes et peuvent fortement varier en fonction de leur localisation (Fraser *et al.*, 2013).

D'autres effets liés à la liquéfaction des sols, à l'affouillement et au sapement des fondations des bâtiments ou encore à l'impact des débris flottant au cours du flux et reflux lors de la submersion peuvent entraîner la destruction des bâtiments.

Un bâtiment à vocation de site refuge vertical ne doit pas s'effondrer, ni se retourner, ni être déplacé par les effets combinés ou non, du séisme et/ou du tsunami. L'identification de ces sites refuges s'effectue sur la base de connaissances de l'aléa sismique et des résultats de simulations numériques de submersion par tsunami (hauteur d'inondation, direction du courant, variations locales de force de flux hydrauliques, résistance aux impacts de débris) (Fraser *et al.*, 2013). Du point de vue réglementaire et organisationnel, la capacité d'accueil de ces bâtiments doit être calibrée en fonction du nombre théorique d'enjeux humains exposés et présents dans son aire d'influence. Elle doit également tenir compte d'une marge d'accueil supplémentaire pour les personnes en transit. Le nombre d'individus maximum par site refuge vertical doit être connu et affiché publiquement.



Figure 44 : Site refuge vertical au Japon (ville de Shirahama, préfecture de Wakayama) (crédit photo : N. Shuto, date inconnue)

Il existe plusieurs stratégies concernant la sélection de sites refuges verticaux. Au Japon par exemple, certains de ces bâtiments sont construits à usage unique et utilisés exclusivement comme sites refuges (figure 44). Néanmoins, la plupart du temps les sites refuges verticaux sont choisis parmi des bâtiments existants, principalement les ERP. Ce double emploi semble être une des stratégies les plus adaptées s'il est bien pensé en amont. Ainsi, les bâtiments conservent leur fonction principale en période normale et se transforment en refuge en période dégradée. Il s'agit d'un bâtiment à la fois accessible et autonome en cas d'isolement et de submersion. Le coût supplémentaire de la construction pour adapter un bâtiment est estimé à 22 % par le (CEPRI, 2014) et entre 10 et 20 % par la FEMA (2009).

Tableau 11 : Synthèse des conditions de mise œuvre de sites refuges verticaux

Objectifs	Conditions de mise en œuvre	Avantages	Inconvénients	Risques associés
Mise à l'abri préventive des individus à l'étage et/ou sur les toits de bâtiments refuges situés en zone à risque	Construits aux normes parasismiques	Réduction du temps de déplacement des individus vers les sites refuges temporaires	Besoin d'aménagements particuliers pour l'accessibilité et la sûreté	Destruction du bâtiment
	Résistance de la structure au tsunami		Nécessité d'accords préalables dans le cas de structures privées	Submersion du bâtiment
	Hauteur suffisante pour garantir la sécurité des individus	Repérage des sites refuges à proximité des populations, même dans des zones à la topographie littorale basse	Accès au bâtiment garanti 24h/7j	Isolement complet du bâtiment
	Capacité d'accueil calibrée pour recevoir la population maximale possible de son aire géographique de convergence	Augmentation de la capacité globale d'accueil	Accès impossible pour les secours tant que la zone à risque est submergée	Mouvement de panique dans les bâtiments surpeuplés
				Conditions d'attente difficiles pour les individus notamment les plus faibles et fragiles

5.2.2. Les sites refuges topographiques

Les sites refuges horizontaux (ou topographiques) sont des espaces de plein-air, plus ou moins aménagés, dont l'altitude permet une mise à l'abri temporaire des évacués. Ces sites possèdent trois avantages principaux : une capacité d'accueil plus importante, une disponibilité horaire généralement plus grande et des coûts d'aménagement faibles (tableau 12). Leur choix est conditionné par la topographie du territoire exposé. Cette variable conditionne les distances à parcourir pour rejoindre une zone refuge horizontale, ce qui peut considérablement augmenter les temps d'évacuation et influencer sur le comportement des individus au cours d'une alerte, quant à leur décision ou non d'évacuer.

Tableau 12 : Synthèse des conditions de mise œuvre de sites refuges topographiques

Objectifs	Conditions de mise en œuvre	Avantages	Inconvénients	Risques associés
Mise à l'abri préventive des individus à l'extérieur de la zone de risque sur des sites en altitude	Topographie garantissant une altitude suffisante pour la sauvegarde des populations	Disponibilité des sites 24h/24 et 7jrs/7	Difficulté à mobiliser les individus en cas de mauvaises conditions climatiques	Exposition des individus à d'autres aléas naturels (mouvement gravitaire, cyclone)
	Délais requis suffisants pour rejoindre le site	Protection totale et souvent d'un grand nombre d'individus	Distances d'évacuation qui peuvent être grandes	
	Distances d'évacuation très courtes pour mobiliser au maximum les individus	Possibilité de dépasser le site refuge pour rejoindre des altitudes plus élevées en cas de nécessité (réduction du sentiment de « prise au piège »)	Isolement plus grand des individus lors de l'attente (exemple de nuit)	Conditions d'attente difficiles pour les individus notamment les plus faibles et fragiles
	Accessibilité de la zone refuge	Accès à la zone non impactée plus facile	Zone à évacuer qui doit être sécurisée temporairement	
	Présence des services de premières nécessités	Réduction du nombre de sauvetages en milieu dévasté		

Quelle que soit la nature du site refuge (topographique ou vertical), sa disponibilité doit être impérativement maintenue tout au long de l'année. Dans le cas contraire, la répartition du nombre de personnes à évacuer serait modifiée et les itinéraires d'évacuation rallongés. Ces deux éléments sont d'autant plus prégnants lorsqu'il s'agit de sites refuges verticaux localisés généralement dans la zone à évacuer et qu'ils possèdent une capacité absolue limitée.

5.2.3. Conditions de mise en œuvre d'une évacuation pédestre vers des sites refuges horizontaux en Martinique

Le degré de prévisibilité et d'anticipation du risque local et régional de tsunami en Martinique, est nul au regard du temps nécessaire à la prise de décision d'une évacuation de masse, du temps de diffusion du message d'alerte et de réaction des populations (chapitre 3). Il ne reste alors que quelques minutes aux individus situés dans la zone à évacuer pour rejoindre un site refuge tsunami. La stratégie d'évacuation déployée repose donc sur la mise en sécurité réactive et immédiate des populations, à pied, vers les sites refuges temporaires horizontaux les plus proches. Nous envisageons donc

d'identifier des sites refuges horizontaux pour l'ensemble de l'île. En effet, le département est doté d'un relief marqué. Cette condition est favorable à la création de sites refuges topographiques. La proposition de secteurs où établir des sites refuges verticaux sera considérée au regard de nos résultats de simulations, comme un aménagement potentiel visant à réduire les temps d'évacuation dans les secteurs les plus critiques et/ou présentant une densité de population importante (chapitre 8).

Le mode de déplacement pédestre se prête bien au territoire martiniquais. En effet, du fait du relief marqué de l'île, les distances d'évacuation sont relativement courtes (chapitre 8). L'enjeu d'une évacuation pédestre réussie repose sur le respect de cette consigne par les populations locales. Cependant, nous identifions deux principaux facteurs sociétaux pouvant compromettre son bon déroulement :

- la pratique de la marche à pied reste un loisir ou un sport mais ne constitue pas une réelle habitude de déplacement pour les populations locales. En effet, ce mode de déplacement au quotidien est difficilement compatible avec la topographie de l'île. De plus, la dispersion de l'habitat et le manque d'aménagements en faveur de la marche à pied contribuent encore davantage à son impopularité. Ce mode de déplacement représente seulement 5,5 % ;
- l'utilisation des véhicules est presque systématique même sur de courts trajets. Deux tiers des ménages disposent au moins d'un véhicule, et 25 % en ont au moins deux (Raillard et Bergua 2015). De plus, Vergé-Dépré (2012) évoque «*l'attachement du Martiniquais à sa voiture*», elle précise que «*c'est un phénomène reconnu, et on pourrait même dire « culturel »*». La reconnaissance sociale associée à la voiture a ancré durablement la Martinique dans l'ère du tout-automobile.

En cas d'évacuation, le comportement de la population locale sera largement influencé par ces habitudes sociétales profondément enracinées. On peut donc s'attendre à une utilisation massive des véhicules malgré la mise en place d'une consigne officielle d'évacuation pédestre. Compte tenu de la congestion quasi systématique des réseaux routiers en période diurne dans les zones urbanisées¹⁰², cette attitude réflexe pourrait être lourde de conséquences.

5.2.4. Méthodes d'identification et de sélection des sites refuges topographiques temporaires en Martinique

5.2.4.1. La mise en sécurité immédiate pour un événement à cinétique rapide

L'objectif d'une évacuation pédestre en cas d'alerte tsunami est de mettre à l'abri du danger un maximum de personnes en un minimum de temps. Conformément à nos hypothèses (chapitre 1 et 4), les scénarios d'évacuation proposés sont réfléchis de manière à atteindre une altitude de mise en sécurité minimale de 15 m. Nous avons établi une méthode en deux étapes. La première vise à créer de

¹⁰² Les heures de pointe se situent entre 7 et 8 heures le matin et entre 16 et 17 heures l'après-midi ; un deuxième pic apparaît en début d'après-midi, entre 13 et 14 h.

http://www.insee.fr/fr/insee_regions/guyane/themes/antiane/ae48/ae48_art09.pdf

manière semi-automatique à l'aide de données cartographiques au sein d'un SIG une couche d'information qui représente les Points d'Entrée en Zone Refuge (PEZR) à l'échelle de la Martinique. Une fois identifiés, ces points sont renseignés par plusieurs critères de qualité par un diagnostic de terrain à l'échelle communale permettant la sélection des sites refuges les plus pertinents.

5.2.4.2. Sélection semi-automatique des Points d'Entrée en Zone Refuge à l'échelle du département

Le traitement à l'échelle départementale nécessite d'établir un protocole cartographique fiable et rapide pour identifier des sites de refuge potentiels. Nous proposons l'identification de Points d'Entrée en Zone Refuge (PEZR). Il s'agit de lieux accessibles par le réseau routier et dont l'altitude permet la mise en sécurité temporaire des populations. A l'exception des PEZR situés à l'entrée d'espaces enclavés de faible superficie, ces espaces présentent en théorie de grandes capacités d'accueil. Ils sont générés de manière automatique à l'aide d'outils de géotraitement au sein d'un SIG à l'intersection entre le réseau routier (BD TOPO® IGN, 2011) et la courbe de niveau de 15 m d'altitude (BD Litto3D®/IGN, 2010). Cette première étape a généré 4 125 PEZR pour l'ensemble de l'île. Ce chiffre élevé est lié à la géométrie très précise de l'isohypse qui, compte tenu de microreliefs, coupe les tronçons routiers à plusieurs reprises, parfois à seulement quelques mètres d'intervalle (figure 45a). De plus, nous avons fait le choix de générer les PEZR sur l'ensemble des types de tronçons routiers, donc en tenant compte des sentiers et des chemins de la BD TOPO® (IGN, 2011), ce qui a pour effet d'augmenter considérablement ce chiffre (figure 45b.)



Figure 45 : Exemple de relocalisation manuelle de PEZR

La seconde étape vise à modifier manuellement leur emplacement par photo interprétation. Le principe est de favoriser des espaces bien délimités dans leur environnement proche, assez vastes et susceptibles d'accueillir temporairement des individus, sans danger. Trois actions ont été réalisées :

maintenir les PEZR générés automatiquement, les supprimer en cas de doublon, ou les déplacer le long du réseau routier sur une tranche d'altitude comprise entre 15 et 25 m maximum (figure 46). Ces améliorations ont permis de limiter le nombre de PEZR à 2 275. Même si cette approche a tendance à majorer le nombre de sites potentiels, elle offre l'avantage de n'écarter aucune possibilité. Cette méthode de recherche semi-automatique des PEZR offre plus de flexibilité et permet d'anticiper la phase de sélection et de validation sur le terrain des sites refuges tsunami définitifs à une échelle locale.

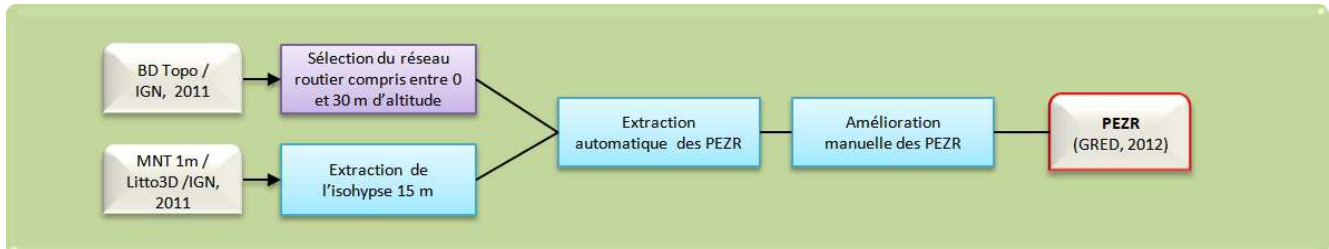


Figure 46 : Schéma méthodologique de création des PEZR à l'échelle départementale

5.2.4.3. Une sélection multicritère à l'échelle communale

La planification des évacuations à visée opérationnelle nécessite un travail d'expertise scrupuleux pour l'identification de sites refuges. Tous les PEZR ne peuvent pas convenir comme site refuge. Ils doivent présenter plusieurs caractéristiques indispensables à l'accueil, même temporaire, des évacués. Plusieurs guides permettent de définir les caractéristiques architecturales d'un bâtiment à vocation de site refuge vertical. *A contrario*, à notre connaissance la littérature scientifique ou opérationnelle ne décrit pas encore d'outils d'aide à la sélection des sites refuges horizontaux spécifique aux tsunamis, même de façon basique. Néanmoins, il est possible d'adapter et d'adopter des critères habituellement usités pour la recherche de sites refuges séismes pour lesquels la littérature est bien plus abondante. Une revue de littérature des articles du domaine parue entre 2011 et 2014 a été conduite par Soltani *et al.*, (2014). Sur la base de 26 articles retenus, sept d'entre eux proposaient des critères de sélection de sites refuges. Soltani *et al.* (2014) ont répertorié 27 critères qu'ils ont classés et regroupés selon les six catégories principales suivantes : leur dimension et localisation ; leur exposition face aux autres risques ; les ressources disponibles sur place et l'accessibilité des secours ; la possibilité de leur réalisation ; la qualité de leur environnement proche ; les aspects sociaux. Nous nous sommes inspirés de ces critères que nous avons enrichis d'une réflexion sur la base des articles de Forouzandeh *et al.* (2008) et Anhorn et Khazai (2015) et d'un guide très complet réalisé par l'OASP¹⁰³ (2002). Nous avons proposé de retenir quelques-uns des critères pour construire des indices synthétiques facilitant le choix sur le terrain des sites refuges horizontaux tsunami temporaires.

Chaque site refuge est caractérisé par deux indices multicritères. Le premier renseigne son niveau de sécurité et le second son niveau d'accessibilité. Ils sont composés de trois critères chacun, renseignés eux-mêmes par plusieurs paramètres. A chaque critère correspond un coefficient de pondération et à chaque paramètre une note (tableau 13). Enfin, un Indice de Qualité Synthétique (IDQS) est calculé selon la moyenne des deux indices précédents. Plus cet indice est élevé, plus le site refuge est pertinent.

¹⁰³ Earthquake Planning And Protection Organization (OASP)

- L'Indice de Sécurité du site refuge (IDS)

Les sites refuges doivent offrir aux individus une capacité d'accueil suffisante dans un environnement sécurisé (figure 47). Nous proposons de calculer l'Indice de Sécurité par l'évaluation de trois critères.

- Le premier renseigne sur la présence ou non d'une zone de regroupement (RGR) bien identifiable sur le terrain. Il s'agit de l'espace sur lequel sera implanté le panneau du site refuge, là où les évacués seront regroupés dans l'attente de la fin d'alerte. Nous avons associé à ce critère une note de pondération basse car il s'agit d'un espace qui peut éventuellement être aménagé si la localisation s'avère stratégique et particulièrement adéquate.
- Le second critère informe sur la capacité d'accueil (ACC) de la zone de regroupement. Les paramètres de ce critère sont définis selon une surface utile de réception mesurée en mètres carrés par photo-interprétation¹⁰⁴. Elle permet d'estimer le nombre moyen d'évacués par site refuge. Il n'existe pas de normes internationales qui déterminent la valeur de la capacité d'accueil d'un site refuge temporaire. Elle varie en fonction des guides consultés et des auteurs¹⁰⁵. Nous retiendrons la valeur standard théorique de 2 m²/personne proposée par l'OASP (2002). Ainsi trois classes ont été définies : une de très faible capacité d'accueil inférieure à 50 évacués soit une surface de 100 m², une de faible capacité d'accueil comprise entre 50 à 250 évacués soit une surface comprise entre 100 et 500 m² et une grande capacité d'accueil supérieure à 250 évacués soit supérieure à une surface de 500 m².
- Le troisième critère, le plus discriminant, correspond au type de voie à proximité (V_PROX) de laquelle se situe le site refuge potentiel. Faute de zone de regroupement bien définie sur le terrain, la plupart des sites refuges temporaires sont localisés le long du réseau viaire. Or cette proximité potentielle avec des véhicules pose la question de l'intégrité des évacués, qui se renforce en période d'évacuation (confusion, perturbation du trafic, augmentation du nombre de véhicule d'intervention d'urgence, etc.). A travers la pondération de ce critère nous privilégions les routes à faible trafic routier qui posent moins de problèmes de cohabitation entre piétons et véhicules, et donc moins de risque de collision.

$$IDS = \frac{RGR \times 1 + ACC \times 2 + V_PROX \times 3}{20} \times 100$$

¹⁰⁴ La surface utile correspond à l'espace entièrement dégagé permettant le regroupement des évacués. L'ensemble des éléments urbains, murets, poteaux, etc., ont été exclus de cette surface.

¹⁰⁵ Plusieurs valeurs théoriques d'occupation des sites refuges sont données en fonction de la durée d'attente potentielle sur le site. En ce qui concerne les sites refuges temporaires, les valeurs standard peuvent varier pour un même pays. Par exemple au Japon elles sont de 1,65 m²/personne pour les villes de Higashiyamato et de Takatsuki, de 2m²/personne pour les villes d'Hinode Cho et de Sendai et de 2,5m²/personne pour la ville de Nihonmastu (Xu et al, 2008). Les sites refuges à l'intérieur de bâtiments demandent une plus grande place entre 5 et 20 m²/personne pour la FEMA (2015), 4 m² pour la DGSCGC (2014) et 10 m² pour le CEPRI (2014)

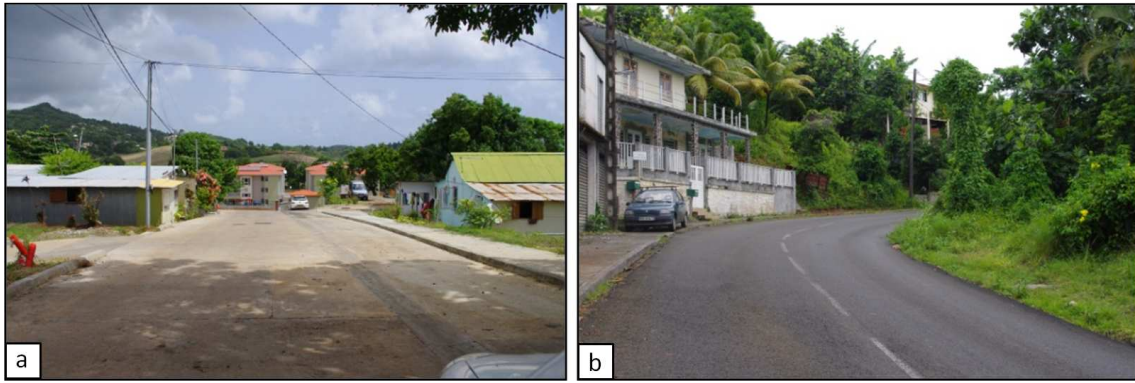


Figure 47 : Photographies de deux sites refuges potentiels, l'un offrant un bon niveau de sécurité (a) et l'autre un mauvais (b)

- Indice d'Accessibilité du site refuge (IDA)

Les sites refuges doivent être facilement atteignables à pied pour le plus grand nombre d'individus au cours de l'évacuation (figure 48). Ils doivent également être accessibles par les services de secours même en cas de dégradation des routes littorales. Trois critères sont pris en compte dans le calcul de l'IDA. Le premier consiste à savoir si le site refuge est localisé sur voie ou sur un espace sans issue (IMPASS). Dans ce cas, ce site n'offre pas aux évacués la possibilité de rejoindre le reste du réseau routier sans retourner en direction de la zone de danger et donc la possibilité de rejoindre des secours par exemple. Le critère d'accès à un centre de soin (SOIN) révèle la possibilité ou non d'atteindre un des différents hôpitaux ou cliniques de la Martinique depuis les sites refuges sur un réseau routier potentiellement dégradé par la submersion du tsunami. Cette information a été définie sur la base de calculs de graphe routier (cf chap 6) au sein d'un SIG dont les tronçons d'altitude inférieure à cinq mètres ont été supprimés. Le dernier critère prend en compte le type de voie d'accès (V_ACCS) sur lequel est localisé le site refuge. Il permet ainsi de discriminer ceux qui sont situés le long de sentiers ou de chemins et qui présentent donc une difficulté d'accès pour les populations les plus fragiles physiquement et les populations à mobilité réduite (PMR).

$$IDA = \frac{IMPASS \times 1 + SOIN \times 2 + V_ACCS \times 3}{20} \times 100$$



Figure 48 : Photographies de deux sites refuges potentiels, l'un offrant un bon niveau d'accessibilité (a) et l'autre un mauvais (b)

- Indice de Qualité Synthétique du site refuge (IDQS)

L'indice de qualité synthétique correspond à la moyenne des deux indices détaillés ci-dessus. Il permet d'obtenir une note globale qui représente la valeur intrinsèque du site refuge (figure 49). Cet indice sert à faciliter le choix final de ces derniers pour la planification des évacuations à l'échelle communale au cours d'une démarche participative avec les collectivités et les autorités locales (chapitre 8). La valeur de l'indice est discrétisée en cinq classes permettant de faciliter les discussions au cours des réunions préparatoires avec nos partenaires locaux. Les sites refuges qualifiés de bons et très bons ont généralement été retenus d'office. Quant à ceux qualifiés de moyens, faibles et très faibles, nous avons proposé des sites refuges alternatifs et ils ont fait l'objet d'une visite de terrain pour discuter des aménagements spécifiques permettant d'en améliorer la sécurité et/ou l'accessibilité.

$$IDQS = \frac{IDS + IDA}{2}$$



Figure 49 : Photographies de deux sites refuges potentiels, l'un offrant un indice de qualité synthétique élevé (a) et l'autre un indice très faible (b)

Un dernier critère particulièrement important n'a pas été pris en compte dans le calcul des indices car trop discriminant et nécessitant une connaissance empirique du terrain. Il concerne la disponibilité des sites refuges. Il précise si le site refuge se trouve sur un terrain privé ou public. Les sites définis comme étant privés lors du repérage de terrain sont exclus du calcul des itinéraires et des temps d'évacuation. Par contre, ils sont mentionnés sur les cartes employées pour la validation de terrain avec les autorités locales (chapitre 8). Ils peuvent ainsi faire l'objet d'une demande formalisée de la mairie auprès des propriétaires, s'ils présentent un intérêt pour améliorer l'évacuation en termes de temps ou d'accueil.

Tableau 13 : Critères et paramètres employés pour le calcul des indices de sécurité et d'accessibilité des sites refuges topographiques temporaires

	Critère	Code	Coefficient de pondération	Paramètre	Note	Mode de construction	Source
Sécurité	Zone de regroupement	Z_REGR	1	Inexistante hormis sur les accotements	1	Manuelle par identification sur le terrain	UMR GRED, 2013
				Bien identifiable sur le terrain	2		
	Capacité d'accueil	CAP_ACC	2	Très limitée (inférieure à 100 m ²)	1	Manuelle par identification sur le terrain + photo-interprétation	UMR GRED, 2013
				Limitée (inférieure à 500 m ²)	2		
				Illimitée (supérieure à 500 m ²)	3		
	Type de voie à proximité	V_PROX	3	Route à une chaussées (importance 1, 2, 3)	1	Automatique à partir des données attributaires	BD TOPO®/IGN, 2011 modifiée UMR GRED, 2013
				Route à 2 chaussées, autoroute, quasi-autoroute, bretelle			
				Escalier	2		
				Sentier			
				Route à une chaussée (importance 4, 5)	3		
			Chemin	4			
			Route empierrée				
Accessibilité	Localisé dans un lieu sans issue	IMPASS	1	Oui	1	Manuelle par photo-interprétation	BD TOPO®/IGN, 2011 modifiée UMR GRED, 2013
				Non	2		
	Accessibilité depuis le CHU la Meynard (routes coupées 0-5m a.s.l.)	PC_CHU	2	Non	1	Calcul sur graphe au sein d'un SIG	BD TOPO®/IGN, 2011 modifiée UMR GRED, 2013
				Oui dont une portion par voie piétonne	2		
				Oui	3		
	Type de voie d'accès	V_ACC	3	Escalier	1	Automatique à partir des données attributaires	BD TOPO®/IGN, 2011 modifiée UMR GRED, 2013
				Sentier			
				Route à 2 chaussées, autoroute, quasi-autoroute, bretelle			
Chemin				2			
Route empierrée				3			
			Route à une chaussées (importance 4, 5)	4			
			Route à une chaussées (importance 1, 2, 3)				

Afin de tester la méthode, nous avons réalisé un diagnostic de terrain systématique pour chaque PEZR des deux communes de Trinité et de Sainte-Anne. La grille d'analyse finale est le résultat de nombreuses améliorations par construction, déconstruction et simplification de l'approche. L'indice de qualité proposé est simple à construire. Il se base principalement sur un diagnostic visuel réalisé sur le terrain et complété par une analyse spatiale (figure 50). Il se veut être facilement compréhensible et transposable. Ainsi renseignés, les sites refuges ont été proposés aux acteurs locaux et sélectionnés de manière concertée au cours d'une réunion préparatoire en salle suivie d'une visite de terrain (chapitre 8).

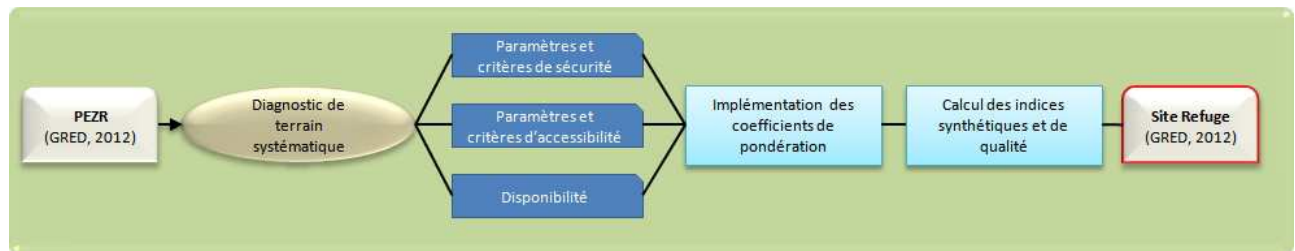


Figure 50 : Etapes de la sélection des sites refuges à l'échelle communale

D'autres critères auraient pu être renseignés, tel que par exemple, le niveau de visibilité du site refuge depuis la zone à évacuer. Ce paramètre est un atout qui facilite le cheminement des personnes lors de l'évacuation. Inversement, la visibilité de la zone à risque depuis le site refuge est également un facteur qui permet de mieux « fixer » les évacués au cours de l'événement. Tout aussi pertinent mais plus difficile à évaluer, il serait intéressant d'intégrer les critères de connaissance préalable et de réputation du site par les populations, qu'elles soient locales ou en transit. La localisation des sites dans des zones « attractives » et connues du plus grand nombre faciliterait leur prise en compte par les populations. Mais en complexifiant les indices par la multiplication de critères, on risque d'augmenter la difficulté d'interprétation, ce qui peut nuire à la diffusion d'une information claire et précise, et à son assimilation par les usagers. Notre objectif est de concevoir un outil fiable mais simple d'utilisation et généralisable lors d'une application de la méthode (EXPLOIT).

Dans ce chapitre, nous avons défini une stratégie visant à la mise en sécurité de la population par l'accès à des sites refuges topographiques situés à une altitude supérieure à 15 m. Des travaux plus fins à l'échelle des deux communes pilotes de Sainte Anne et de Trinité ont permis de construire une grille d'analyse multicritères pour les sélectionner tout en garantissant leur qualité en tant que sites refuges temporaires. A ce stade, l'un des objectifs est d'évaluer la faisabilité d'une évacuation pédestre. Pour ce faire, nous proposons d'employer des outils de calculs sur graphe et de mettre en place une méthode de géo-simulation pour estimer les temps de déplacement nécessaires pour rejoindre des sites de mise en sécurité à terre et en mer.

Chapitre 6 Optimiser des itinéraires d'évacuation à l'aide d'outils de calculs sur graphe

La planification d'évacuations préventives suppose d'adopter une démarche *a priori* pour définir les contraintes inhérentes à sa bonne conduite. L'usage des SIG, à travers un approche de géo-simulation par scénarios (aléa, vitesse de déplacement, fréquentation, maritime/terrestre, etc.), permet d'expérimenter précisément un grand nombre de paramètres et de situations afin d'anticiper d'éventuelles difficultés dans une optique d'optimisation. Nous proposons ici une méthode pour l'optimisation du choix des itinéraires d'évacuation et des sites refuges à l'aide d'un outil de calcul sur graphe intégré à un SIG. Son ambition est d'être facile à mettre en œuvre (moyens techniques et humains), transposable à plusieurs types d'occupation des territoires (milieu urbain, rural, etc.), et d'offrir des résultats cartographiques simples à exploiter par les acteurs locaux en charge de les déployer sur le terrain. Dans ce chapitre, nous explorerons les méthodes de modélisation et les outils développés en géographie, plus particulièrement dans le domaine de la géographie des transports. Ce bref état de l'art n'a pas la prétention d'être exhaustif, tant les domaines de recherche sont vastes. Il offre néanmoins des clés de compréhension sur le choix de l'outil employé dans ce travail de recherche. Il permettra notamment d'éclairer les choix de l'usage d'un outil de calculs sur graphe par rapport à des outils de simulation numérique. Enfin, nous exposerons l'ensemble des méthodes et des paramètres employés pour nos calculs d'accessibilité des sites refuges terrestre et maritime afin de les rendre reproductibles.

6.1. Modélisation des évacuations préventives de masse, ou l'importance d'expérimenter des scénarios

6.1.1. Outils de simulation comme supports pour la planification des évacuations

6.1.1.1. Le récent recours à la modélisation en géographie

La notion de modèles et son intégration en géographie s'amorce à partir des années soixante, période dite de la « nouvelle géographie », sous l'influence des économistes américains et de leurs modèles de diffusion (Gould, 1968). Cette période marque l'essor des techniques quantitativistes largement développées outre-Atlantique (Pumain et Robic, 2002). Ces techniques s'imposeront progressivement chez les géographes français (Racine, 1974). Mais l'introduction des mathématiques en géographie n'explique pas à elle seule le développement des modèles dans cette science. D'après Chamussy (1989), au cours de cette même période un changement de paradigme est intervenu dans la géographie moderne où le territoire est alors considéré comme un système de dynamiques complexes en interaction. Cette nouvelle approche a nécessité l'introduction de nouveaux outils pour les géographes tels que la construction de modèles. La construction du modèle ou « modélisation », est un processus complexe qui nécessite plusieurs niveaux d'abstraction, le choix d'une formalisation et des contraintes associées ainsi qu'un protocole de validation. En fonction du type de formalisme principal choisi (graphique, mathématique, logique, orienté-objet, etc.), l'abstraction schématique n'est plus qu'une étape qui aide à mettre en équation un phénomène connu et mesurable (Brunet, 2000). L'appropriation des méthodes de mathématiques appliquées par les géographes conduit la discipline à enrichir ces modèles par l'usage de la simulation. C'est la simulation, à l'aide d'un simulateur, qui permet de calculer sur ordinateur les solutions du modèle. Aujourd'hui, le recours à des outils de simulation numérique en géographie est fréquent. Ils offrent notamment l'avantage de rendre compte plus facilement des dynamiques temporelles, limites principales des représentations cartographiques.

6.1.1.2. Classification simplifiée des outils de modélisation des mobilités humaines

L'étude des mobilités humaines fait partie d'un champ largement développé en géographie des dynamiques de populations, que ce soit en géographie urbaine ou en géographie des transports. Ces études sont menées dans une démarche prospective à visée parfois opérationnelle, tel que dans l'évaluation de l'impact des différentes politiques publiques en matière de planification urbaine ou des transports. Les géographes disposent d'un grand nombre d'outils permettant d'étudier ces dynamiques, aussi bien à l'échelle de l'individu qu'à celle d'un système urbain. Ces outils permettent de répondre à des thématiques variées telles que la simulation du trafic routier, l'étude des flux des plateformes multimodales, le suivi de la pollution ou encore l'analyse des demandes de transport. On distingue deux grandes catégories de modèles de mobilité humaine : les modèles d'optimisation et les modèles de simulation numérique.

- Les premiers consistent à appliquer des algorithmes de recherche pour maximiser ou optimiser une fonction d'objectifs donnés. Ils introduisent des paramètres intrinsèques aux caractéristiques du problème, et sont généralement soumis à des variables exogènes imposées.
- Les seconds s'attachent à restituer le fonctionnement d'un système complexe par une action modélisatrice d'entités internes du système et de leurs interactions.

Les géographes sont plus à l'aise avec les outils d'optimisation car les interfaces de calculs sont aujourd'hui directement disponibles dans des Systèmes d'Information Géographique (SIG). Par opposition l'usage d'outils de simulations demande des connaissances approfondies en programmation informatique et nécessite une puissance et un temps de calcul très importants, alors que l'intégration de ces résultats à des SIG reste limitée.

Les modèles employés en simulation des dynamiques spatiales peuvent être classés en fonction du type de formalisme générique employé. Nous distinguerons les modèles de type graphique (graphe, hypergraphe) et les modèles « orienté-objet » (automate cellulaire, système multi-agents). Ces classes utilisent des formalismes aux langages très variés, tout en faisant appel à de nombreux autres formalismes tels que l'informatique, les mathématiques, la logique (Khalil, 2012).

Plusieurs niveaux d'analyse, ou niveaux d'agrégation, sont couramment employés. D'une manière synthétique, les modèles microscopiques permettent de simuler les comportements d'un objet (individus, véhicules, ménages, entreprises) tout en intégrant plusieurs caractéristiques individuelles associées à des entités virtuelles, ainsi que les interactions entre objets à une échelle spatiale restreinte. Par opposition, les modèles macroscopiques sont basés sur des niveaux d'agrégation à une échelle globale afin d'appréhender le système dans son ensemble, et non pas à partir des éléments qui le composent. On obtient alors des valeurs théoriques (temps, capacités, etc.) selon une distribution zonale (Hamacher et Tjandra, 2001 ; Boulanger et Brechet, 2003). Le troisième niveau d'analyse, dit de meso-simulation, se place à la croisée des deux premiers en proposant un niveau d'agrégation intermédiaire des différents descripteurs (Sanders, 2006). Buguellou (2012) propose comme exemple deux modèles mésoscopiques pour lesquels les véhicules forment des « paquets homogènes » aux propriétés identiques.

Pour chacune des catégories, des classes et des niveaux d'analyse, plusieurs autres paramètres permettent de les distinguer comme : la prise en compte du temps (modèle statique ou dynamique), son implémentation (continue, discrète), les algorithmes employés, les règles d'interactions entre les entités et/ou leur forme d'intelligence, ou encore le type de données en entrée du modèle. La littérature scientifique dans le domaine de l'analyse spatiale (Sanders, 2001, 2006 ; Boulanger et Brechet, 2003 ; Grandjean, 2004) et plus précisément celle dédiée au transport (Buguellou, 2012 ; Bavoux *et al.*, 2005) ou aux évacuations (Korikanthimath, 2006 ; Pel *et al.*, 2010, 2012) proposent des descriptions théoriques étayées par de nombreux exemples.

6.1.1.3. Intérêt des outils de simulation pour la planification des évacuations de masse

La modélisation des évacuations intéresse une grande diversité de disciplines, aussi bien en sciences humaines, en informatique appliquée, en ingénierie du transport, qu'en génie civil. En effet,

l'évacuation est un processus particulièrement difficile à appréhender. Au cours d'une évacuation, la réaction des populations et les comportements individuels ou collectifs sont déterminés par un grand nombre de facteurs en interrelations. Ainsi le recours à la modélisation vise à répondre à trois difficultés principales : la rareté de mesures qualitatives et quantitatives d'événements réels, l'absence d'approche expérimentale, et le caractère *quasi* non reproductible de mise en situation (expérimentation).

Chacune de ces disciplines emploie des outils différents en fonction des thèmes abordés et des objectifs. Nous distinguons deux principaux champs dans l'étude des évacuations de masse en lien avec les catégories de modèles exposés précédemment :

- l'optimisation s'attache à construire des plans d'évacuation dont la planification doit répondre à certaines conditions. Ces plans d'évacuation sont employés pour la construction des matrices origine/destination ainsi que le choix des itinéraires (modèle d'affectation de trafic). Principalement de type macroscopique, les piétons ou les véhicules sont représentés sous la forme de flux. Nous renvoyons vers les travaux d'Alaeddine *et al.* (2013) qui répertorient un grand nombre des algorithmes d'optimisation pour la planification d'évacuation.
- la simulation, s'attache d'avantage à vérifier et valider les plans d'évacuation. Généralement de type microscopique, ces outils s'emploient pour simuler des comportements d'individus en fonction des différentes phases de l'évacuation. Ils permettent de prendre en compte une grande variété d'éléments qui caractérisent les évacués. La plupart du temps, les outils de simulation nécessitent des résultats de modèles d'optimisation comme données d'entrée.

Dans le cas d'une simulation de type microscopique, les résultats issus d'une agrégation de comportements individuels sont à l'origine des mouvements du système. A l'inverse dans le cas d'un outil d'optimisation de type macroscopique, ce sont les paramètres du réseau qui conditionnent les résultats : « *les modèles macroscopiques arrivent à une contradiction méthodologique : ils recherchent la formation de processus de congestion spontanée et les seuils de capacité, à partir d'hypothèses les intégrant a priori. Le résultat recherché est déjà dans le fondement théorique du modèle. De fait ces modèles ne peuvent pas être explicatifs au niveau de la formation des conditions de circulation* » (Buguellou, 2012).

6.1.2. Exemples d'outils d'optimisation et de simulation employés pour la planification des évacuations...

6.1.2.1. ...face aux aléas d'origine naturelle et technologique

Les premiers modèles de simulation d'évacuation ont été développés aux Etats-Unis à la fin des années soixante-dix (Pel *et al.*, 2010). Ils se sont nettement multipliés dans le cadre de la sécurité nucléaire suite à l'incident de *Three Mile Island* en 1979. Les outils développés ont été conçus pour répondre à des hypothèses particulières de délais d'évacuation relativement longs et de modes de transport par véhicules personnels. Cette orientation s'est renforcée dans les années quatre-vingt-dix suite à une série de cyclones dévastateurs le long de la côte est américaine. On constate alors dans la littérature une prédominance des modèles de trafic routier appliqués aux évacuations. Ils offrent la

possibilité de modéliser des évacuations de masse à des échelles régionales (Wolshon et MacArdhle, 2009 ; Dixit et al, 2011). Hardy *et al.* (2008) proposent un inventaire des outils de simulation des évacuations routières. Ils en dénombrent 30. Ces modèles sont très intéressants pour les autorités en charge de la planification d'évacuation car ils offrent de nombreux résultats quantitatifs et qualitatifs de différentes caractéristiques et de distributions spatiotemporelles des conditions d'évacuation (vitesse, volume, densité, ralentissement, congestion, etc.). La grande difficulté aujourd'hui encore est de réussir à intégrer dans les modèles, des dynamiques individuelles qui soient calibrées et validées afin que les résultats de simulation reflètent des conditions réalistes de trafic (Dixit *et al.*, 2011). Des travaux sont également menés pour modéliser les évacuations en tenant compte des interactions entre piétons et véhicules (Fang *et al.*, 2011).

Ces dernières années de nouveaux modèles ont été employés face aux aléas naturels, comme le risque de feu de forêt en Australie (Alsnih *et al.*, 2004 ; Taylor et Freeman, 2010), d'inondation par submersion marine en Hollande (Tu *et al.*, 2010), d'inondation fluviale en Angleterre (Lumbroso et Di Mauro, 2008), de submersion et inondation en Hollande (Jonkman *et al.*, 2008), de cyclone (Chen *et al.*, 2006), de crise volcanique (Marrero *et al.* 2010), de post-séisme à Tokyo (Osaragi *et al.*, 2014). Les modèles de micro-simulation (système multi-agents, automates cellulaires, etc.) quant à eux sont principalement développés pour la modélisation des évacuations en cas d'incidents à l'intérieur de bâtiments (centres commerciaux, grands hôtels, stades) (Fang *et al.*, 2011 ; Valentin *et al.*, 2011) ou encore de bateaux (Klүpfel, 2001).

Les modèles d'évacuation à pied existent depuis plusieurs années. Ils sont principalement dédiés à l'évacuation d'espaces restreints et clos (bâtiment, train, avion, navire, tunnel, etc.). Ces outils sont intimement liés à l'évolution des connaissances sur le comportement des dynamiques de foule dont les premières modélisations ont débuté il y a plus de quarante ans (Fruin, 1971 *in* Conca et Vignolo, 2012). Les attentats du 11 septembre 2001 aux Etats-Unis ont également renforcé les recherches autour de la modélisation des évacuations, notamment en zone urbaine densément peuplée tout en favorisant des moyens de transports multimodaux. En effet la marche à pied est étudiée comme un mode de déplacement mais également comme un moyen de transport multimodal (Ercolano, 2009 ; Conca et Vignolo, 2012). Depuis les tsunamis catastrophiques de 2004 et de 2011, les travaux de recherche sur la modélisation des évacuations pédestres se sont très largement développés, la consigne relayée au niveau international étant d'évacuer à pied.

6.1.2.2. ...face à l'aléa tsunami

Les recherches dans le domaine des évacuations pédestres face au risque tsunami à travers des scénarios prédictifs, visent à simuler des évacuations dans une double optique souvent combinée de planification et d'évaluation de probabilité de pertes humaines en fonction de différents scénarios d'aléa, lorsque ces derniers sont disponibles. Ces approches permettent d'évaluer la capacité d'évacuation d'un territoire soumis à l'aléa tsunami en tenant compte des caractéristiques physiques du secteur comme la topographie, les caractéristiques du réseau routier (densité, connectivité) et de la population (répartition, quantité). Cette évaluation porte principalement sur les calculs des temps d'évacuation, la charge des réseaux, l'identification des points de congestion et l'adéquation entre le

nombre d'évacués et la capacité des sites refuges, et enfin la recherche d'emplacements stratégiques pour établir un site refuge.

Nous avons relevé dans la littérature scientifique deux approches prédominantes de modèles d'évacuation. La première, parmi les plus élaborées, permet d'introduire des caractéristiques physiques et comportementales à l'échelle des individus et ainsi de se rapprocher au plus près des conditions réelles d'une évacuation, ces modèles sont appelées modèles de micro-simulation. Parmi eux les plus représentés sont les modèles de simulation multi-agents (SMA). Il s'agit d'un système au sein duquel chaque agent, qui représente les évacués, est autonome dans son processus de décision (comportement) tout en respectant un certain nombre de règles de départ qui lui sont accordées (Mas *et al.*, 2015). Ces systèmes multi-agents se sont largement développés depuis les années deux mille en lien notamment avec l'amélioration des capacités de calculs informatiques. Ils peuvent employer plusieurs approches sur la base de réseaux, de grilles ou encore des modèles hybrides et cherchent aujourd'hui à intégrer le mieux possible les comportements humains en période d'évacuation (Mas *et al.*, 2012a). L'intérêt également est de pouvoir coupler le modèle à base d'agents avec d'autres modèles comme par exemple un modèle de submersion et d'en analyser les interactions (Helding, 2012). Les travaux scientifiques exploitant les capacités des SMA sont aujourd'hui très nombreux et couvrent de nombreux terrains d'études. Parmi les plus récents on peut citer les travaux de : Lämmel *et al.* (2010b) sur la ville de Padang (Indonésie), de Mas *et al.* (2012a) sur la ville d'Arahama (Japon), de Mas *et al.* (2013) sur la ville de La Punta (Pérou), Wang *et al.* (2016) sur la ville de Seaside (Etats-Unis) et encore de Sahal *et al.*, (2013) sur la ville de Nice (France). Les SMA offrent également la possibilité d'étudier les interactions entre les différents moyens d'évacuation (Aguilar *et al.*, 2015). Ce type d'approche est particulièrement intéressant pour étudier la validité de plans d'évacuation en lien avec l'aménagement du territoire ainsi que les dynamiques temporelles, tout en essayant d'intégrer au mieux les comportements humains.

La seconde approche exploite les capacités des outils SIG pour répondre à des problèmes complexes de dimension spatiale. L'intégration de multiples couches d'informations géoréférencées au sein d'un SIG et leurs traitements à l'aide de différents algorithmes permet la création de cartes de synthèse offrant des résultats pour l'aide à la décision et la planification. Ils sont particulièrement utiles notamment pour la modélisation des évacuations et sont employés dans ce domaine depuis la fin des années quatre-vingt et le début des années quatre-vingt-dix (Cova et Church, 1997). Nous distinguons deux approches principales appliquées aux évacuations pédestres en cas d'alerte tsunami. La première est basée sur des calculs de distances des moindres coûts (least-cost-distance – LCD). Plusieurs données de l'environnement modélisé (surface de friction) sont intégrées à l'outil SIG au format raster et vont moduler les vitesses de déplacement, comme l'occupation du sol, la nature du terrain, la pente, ou encore la population, etc. L'utilisation d'un algorithme de calcul de friction permet de définir des temps d'évacuation et des données d'allocation spatiale. Ils ont été employés en Indonésie (Mück, 2008 ; Post *et al.* 2009), aux Etats-Unis (Graehl et Dengler, 2008 ; Wood et Schmidlein, 2012 ; Wood *et al.*, 2014), en France (Scheer *et al.*, 2011), au Salvador (Gonzales-Riancho Calzada et al., 2013) ou encore en Nouvelle-Zélande (Fraser *et al.*, 2014). La seconde approche est celle que nous emploierons dans nos travaux. Elle repose sur l'utilisation d'un outil dit de macro-simulation de type statique sur

graphe (Hamacher et Tjandra, 2001) (encadré 6). Ces outils d'analyse des réseaux sont initialement conçus pour le calcul d'itinéraires routiers au sein de SIG sous la forme d'une représentation vectorielle des données. Leur emploi est détourné afin de calculer des temps d'évacuation et la recherche d'itinéraires optimisés pour la mise en sécurité des personnes à pied en cas de tsunami. Il permet de calculer le meilleur couple « distance-temps » en fonction de contraintes et d'hypothèses imposées au logiciel. Des approches similaires à la nôtre ont été développées pour l'aide à la planification des itinéraires d'évacuation dans le domaine du risque de tsunami notamment en Indonésie par Dewi (2010) et Mayaguezz (2015). Comme tout modèle de macro-simulation, nous négligeons l'hétérogénéité des situations des évacués (localisation, activité, contraintes, opportunités) et l'on suppose des usagers rationnels et identiques. Nous partons du constat que l'intention et le besoin des évacués sont de rejoindre la zone refuge la plus proche en temps d'accès.

Les approches SIG sont qualifiées d'approche « *top-down* » car les résultats sont une description du système dans sa globalité. *A contrario*, les résultats issus des modèles de simulation multi-agents sont issus d'une agrégation de valeurs individuelles : « *l'émergence d'un comportement collectif « intelligent » (adapté) naît de ces interactions* » (Dumolard, 1999). Néanmoins, bien que les hypothèses et les objectifs varient, quelques soient les outils employés la modélisation des évacuations face à l'aléa tsunami vise les mêmes objectifs à savoir (Wood et Schmidlein, 2012):

- Estimer des temps d'évacuation spécifiques ou généraux selon différents scénarios ;
- Identifier des points de congestion éventuels sur le réseau ;
- Caractériser la dégradation d'accessibilité (coupures des tronçons routiers sensibles) ;
- Optimiser la cadence des départs d'une évacuation échelonnée ;
- Identifier les secteurs potentiellement isolés ;
- Optimiser l'emplacement de sites refuges ;
- Optimiser les itinéraires d'évacuations.

Encadré 6. Présentation générale de la théorie des graphes

Les graphes sont employés dans plusieurs domaines de recherche, en génétique, en chimie, en économie, en urbanisme, etc. Leur construction et le vocabulaire associé peut varier en fonction de leur application. Dans le domaine des transports, les graphes représentent les réseaux de communication comme les routes, les chemins de fer, les voies de navigation maritime ou encore des réseaux multimodaux. Chaque tronçon correspond à un arc du graphe et les intersections, ou nœuds, à des sommets. Un graphe est dit orienté si les arcs sont renseignés par un sens de parcours et valué si les arcs sont pondérés par une valeur de coût de déplacement. L'étude topologique de ces réseaux fait alors appel à la théorie des graphes. Il s'agit d'une théorie mathématique qui fournit de nombreux moyens de recherche du chemin « optimal » (Dumolard, 1999). Les graphes sont alors largement employés pour les calculs d'accessibilité des lieux (Bavoux et al., 2005). Il est possible par exemple de mesurer les impacts d'une évolution d'un même réseau à l'aide de plusieurs indices spécifiques (nombre d'arêtes, indice de connectivité, indice de connectivité maximale, densité d'un graphe, etc.) (Morin et al., 1976 ; Chapelon, 1996). Il existe un grand

nombre d'algorithmes d'affectation statique par chemins minimaux, parmi les plus connus nous pouvons citer les algorithmes de Dantzig, Bellman, Floyd, Ford et de Dijkstra (Buguellou, 2012).

6.2. Présentation des outils d'optimisation employés et de leurs paramétrages

6.2.1. Présentation de l'outil RouteFinder®

6.2.1.1. Fonctionnalités des calculs sur graphe fournies par RouteFinder®

RouteFinder® est un utilitaire qui s'intègre à un environnement SIG conçu pour l'analyse performante, rapide et simple de graphes routiers. C'est un logiciel de type statique stochastique qui emploie des algorithmes d'optimisation différents en fonction des outils sollicités. Il offre plusieurs fonctionnalités comme :

- optimiser et générer un itinéraire en fonction d'une série de points de passage ;
- représenter des isochrones à partir d'un ou de multiples points ;
- créer des tables de distance et des matrices origine/destination ;
- créer des tables de direction le long d'un itinéraire optimisé ;
- cartographier des zones d'accessibilité au départ d'un ou de plusieurs lieux.

L'ensemble des fonctionnalités utilise des attributs spécifiques prédéfinis du réseau routier pour les calculs d'accessibilité. Ces attributs conditionnent les vitesses, les durées et les modes de déplacement sur le graphe. RouteFinder® offre différentes représentations de l'information sous des formes : graphique, tabulaire, cartographique (isochrones, tracés d'itinéraires) (figure 51).

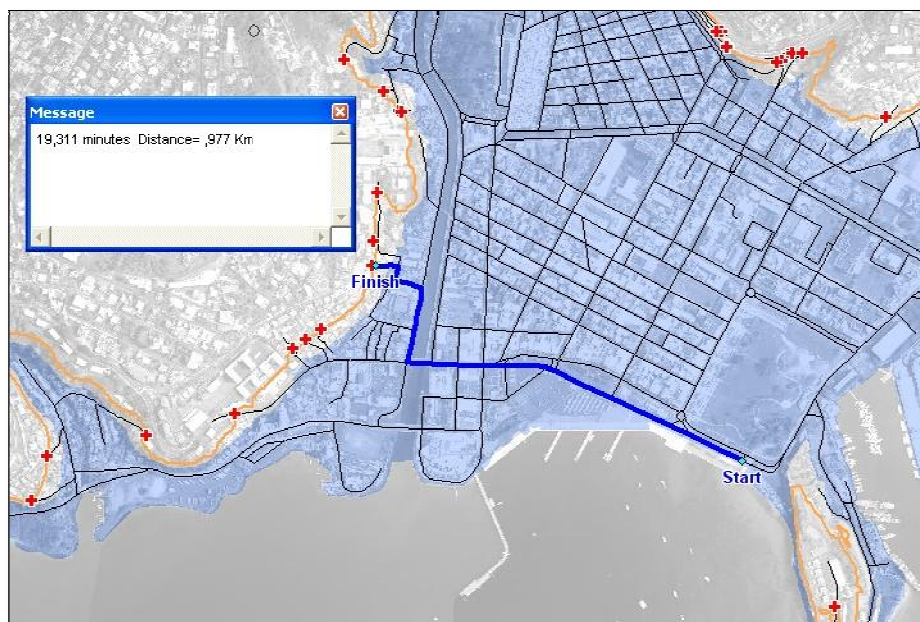


Figure 51 : Exemple de calcul du plus court chemin à l'aide de RouteFinder® (capture d'écran centrée sur Fort-de-France)

L'outil RouteFinder® génère un graphe routier exploitable à partir d'un réseau préexistant au format MapInfo®. Ce fichier doit préalablement être pourvu de trois champs distincts afin d'être importé : « *ID* » pour l'identifiant des tronçons, « *Fcode* » pour le code des vitesses et « *RF_Result* » qui renseigne le type de tronçon identifié par l'outil de test de la topologie. RouteFinder® propose plusieurs options de calculs d'itinéraires. Cet outil a été testé et éprouvé au cours de nombreux projets de recherches récents et sur plusieurs sites d'études appliqués à la problématique des calculs d'accessibilité en lien avec la gestion de crise, comme :

- face au risque volcanique dans le cadre de l'ANR CASAVA (Martinique et Guadeloupe) (Leone *et al.*, 2015) ;
- face au risque d'avalanche dans le cadre du projet MOPERA (Leone *et al.*, 2014) ;
- face au risque tsunami dans le cadre du projet PREPARTOI (Lavigne *et al.*, 2012) et MAREMOTI (Leone *et al.*, 2012) ;
- face au risque de coulées de débris dans le cadre du projet SCAMPEI (Leone *et al.*, 2011a) ;

Cet outil a également été utilisé par plusieurs doctorants en géographie des risques naturels spécialisés sur la gestion des crises volcaniques (Mei, 2013) et la vulnérabilité des réseaux de transport face aux laves torrentielles (Utasse, 2015).

6.2.1.2. Utilisation de l'outil matrice origine/destination

Le calcul du chemin le plus court selon sa simple géométrie ne répond pas à notre objectif de planification d'évacuation. Il convient de pondérer les arcs du graphe pour tenir compte des questions de coût en termes de temps de parcours en lien avec les vitesses de déplacement permises sur l'infrastructure et en fonction des capacités physiques de déplacement pédestre des évacués. Le choix de l'itinéraire le plus court n'est donc pas forcément le plus rapide, et inversement. Aussi, la méthode d'optimisation des itinéraires d'évacuation que l'on propose nécessite deux phases de traitement distinctes (figure 52).

La première permet la sélection de l'ensemble des couples origine/destination selon le chemin le plus rapide. Cette recherche est effectuée à l'aide de l'outil « matrice origine destination » de RouteFinder® selon le mode de calcul « *Fastest* » (encadré 7). Elle assure le choix de l'itinéraire optimisé en termes de capacité de flux d'évacués sur chaque tronçon routier. A titre d'exemple, pour rejoindre un même site refuge, l'itinéraire qui emprunte une route empierrée sera préféré à celui qui emprunte un sentier, ou encore une route à deux voies sera privilégiée face à une route à une voie. La seconde phase correspond à la sélection du chemin le plus court en distance au départ de chaque maille du territoire exposé parmi l'ensemble des itinéraires les plus rapides calculés précédemment. Cette étape est réalisée au sein d'un SIG. Elle assure de retenir parmi l'ensemble des sites refuges sollicités par le modèle, celui dont la distance d'évacuation est la plus courte. Il est possible à partir de cette méthode d'établir le volume théorique de personnes pour chaque zone refuge, les durées et distances moyennes de parcours ainsi que de calculer la charge statique de passages cumulés sur chaque portion du réseau.

L'ensemble de la méthodologie déployée pour les calculs d'accessibilité et des traitements SIG des résultats pour la conception des plans d'évacuation est détaillée en annexe sous la forme d'un guide enrichi par de nombreuses captures d'écran illustrant les différentes étapes logicielles (cf. annexe 8). Elle combine un ensemble de procédures de géotraitement qui nécessite l'emploi de deux outils SIG : MapInfo® pour son application RouteFinder® et Arcgis® pour ses outils et l'automatisation des tâches à l'aide de ModelBuilder®.

Etape 1: RouteFinder Choix du paramétrage	Temps Mode « fastest » Prise en compte des paramètres de vitesse Pour chacune des combinaisons possibles (maille de départ x PEZR) le logiciel choisit le chemin le plus rapide.		Distance Mode « Shortest » Prise en compte uniquement de la distance parcourue Pour chacune des combinaisons possibles (maille de départ x PEZR) le logiciel choisit le chemin le plus court quelque soit la nature de la route.	
Etape 2: MapInfo Choix de l'attribut de sélection	Temps (MinTime) L'itinéraire d'évacuation le plus rapide est sélectionné quelque soit la distance à parcourir	Distance (MinDist) Parmi les itinéraires les plus rapides, celui au plus proche du PEZR est sélectionné	Temps (MinTime) Parmi les itinéraires les plus courts, celui le plus rapide est sélectionné	Distance (MinDist) L'itinéraire le plus court est sélectionné quelque soit la durée du parcours
Exemple d'itinéraire sélectionné (en rouge)				

Figure 52 : Détail des paramètres cartographiques possibles pour les calculs d'accessibilité à l'aide de RouteFinder® et MapInfo®. Figuré par un encadré vert, notre protocole pour le calcul optimisé des temps et des parcours d'évacuation.

Encadré 7. Usage de l'outil matrice Origine/Destination de RouteFinder®

L'outil matrice origine/destination (O/D) permet de rechercher automatiquement les plus courts chemins en temps ou en distance reliant un couple de sommets selon l'algorithme de Dijkstra (1959) modifié par les développeurs du logiciel RouteFinder®. Pour utiliser les fonctionnalités de calculs de distance des matrices, l'utilitaire requiert trois types de données en entrée :

- un graphe de communication valué possédant en attribut un code de vitesse de déplacement ;
- des points d'origine (enjeux humains ou portion de territoires à évacuer) (chapitre 7) ;
- des points de destination (les points d'entrée en zone refuge ou les sites refuges) (chapitre 5).

Ces deux derniers éléments requièrent au préalable de posséder un identifiant unique (ID_CELL et ID_ZR) afin de localiser d'une part le point d'entrée en zone refuge le plus proche de chaque point d'origine, et d'autre part les points d'origine de chaque entrée en zone refuge. Les points d'origine situés en dehors du réseau lui sont réaffectés à l'aide de l'option « Exact with Off Road » de RouteFinder®. Une vitesse de déplacement de 1 km/h est paramétrée. Nous utilisons une vitesse très faible afin d'intégrer les obstacles éventuels hors du réseau. Les données d'accessibilité peuvent par la suite être traitées directement sous SIG ou bien exportées pour être valorisées de manière statistique et cartographique.

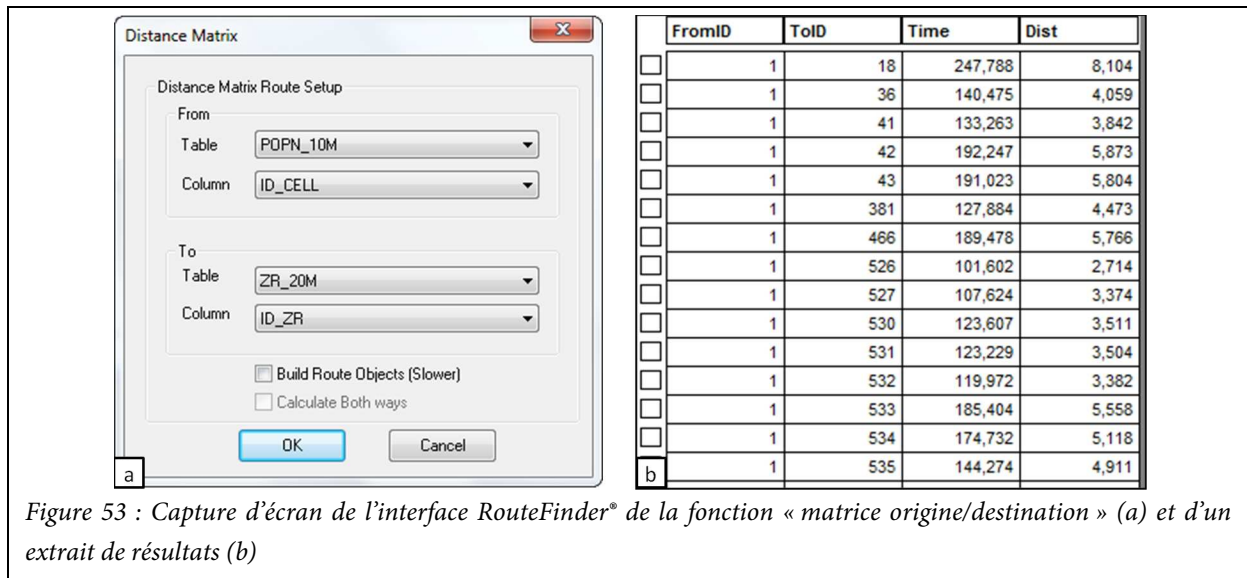


Figure 53 : Capture d'écran de l'interface RouteFinder® de la fonction « matrice origine/destination » (a) et d'un extrait de résultats (b)

6.2.2. Présentation du réseau routier

6.2.2.1. Description du graphe des voies de communication à l'échelle de la Martinique

Le réseau des voies de communication utilisé pour la modélisation de l'évacuation provient de la BD TOPO® de l'IGN (2004). En Martinique, le réseau routier, carrossable ou non, est constitué de 63 821 tronçons pour une longueur cumulée de 8 386 km. Les données attributaires de ces données vectorielles distinguent le réseau viarie en 9 classes en fonction de la nature des voies (tableau 14). La majorité du réseau est constituée de voies à une chaussée (39,5 %) et de chemins (39,5 %).

Tableau 14 : Nature et longueur des voies de communication routières de la Martinique, source : BD TOPO® de l'IGN (2014)

Nature	Longueur (km)	Pourcentage
Autoroute	13,2	0,2
Quasi-autoroute	20,9	0,2
Bretelle	20,8	0,2
Route à 2 chaussées	47,0	0,6
Route à 1 chaussée	3 312,8	39,5
Route empierrée	991,1	11,8
Chemin	3 309,5	39,5
Sentier	664,3	7,9
Escalier	7,0	0,1
Total	8 386,5	100

Cette base de données offre une très grande qualité en ce qui concerne la construction SIG du graphe. En effet, l'ensemble des tronçons est interconnecté par des nœuds. Il n'y a pas de perte de liaisons, ce qui est déterminant pour le bon fonctionnement du logiciel.

6.2.2.2. Amélioration du graphe routier à l'échelle communale

Les résultats issus du travail de modélisation des itinéraires d'évacuation à l'aide de l'outil RouteFinder® dépendent de la précision topologique du graphe routier. Des tronçons ont été numérisés manuellement pour améliorer la connectivité du réseau pour les deux communes test de Trinité et de Sainte-Anne (tableau 15). Cette étape est indispensable pour se rapprocher au mieux de la pratique des usagers piétons. Nous avons réactualisé le réseau routier à partir de l'orthophoto de 2010 avec les nouveaux tronçons construits depuis 2004 puis modifié la géométrie des tracés par photo interprétation sur nos deux zones d'étude dans une tranche d'altitude comprise entre 0 et 30 m. Ce travail a été complété par un diagnostic de terrain notamment pour compléter les données attributaires. Nous avons constaté que pour les réseaux pédestres (escalier, sentier, chemin), il existe des lacunes importantes des tracés dans la BD Route de l'IGN (tableau 16). En milieu rural certains sentiers sont fermés par la végétation alors que d'autres au contraire se sont naturellement dessinés à force de passages. En ville beaucoup de petits passages n'existent pas dans la BD comme par exemple la traversée des parkings, des places ou encore des terrains vagues alors qu'ils peuvent être empruntés à pied. Nous nous sommes attachés à prendre en compte ces espaces afin que notre modèle reflète au mieux la réalité de terrain. Ainsi, sur l'ensemble de nos deux secteurs d'études, ce sont plus de 210 tronçons de route qui ont été vectorisés ou modifiés manuellement.

Tableau 15. Exemple d'améliorations de la base de données du réseau routier

	Base de données initiales BD Topo de l'IGN, 2004	Base de données retravaillées, UMR GRED, 2012
Modification des tracés existants		
Création de nouveaux tronçons routiers		

6.2.2.3. Implémentation des vitesses pédestres au graphe routier

- Critères de friction retenus

Le calcul des temps d'évacuation théoriques à l'aide d'un outil d'optimisation sur graphe ne permet pas de prendre en compte les déplacements individuels sur le réseau. Nous proposons donc de renverser le problème en assignant des contraintes théoriques de déplacement en fonction de paramètres externes, en lien avec la nature physique des voies d'accès vers les sites refuges et PEZR. Ces contraintes, ou résistances, sont définies par Bavoux *et al.* (2005) comme des critères de friction. Ainsi, en fonction des vitesses paramétrées, certains itinéraires seront privilégiés au détriment d'autres qui pourtant peuvent être plus courts en distance. Nous en retiendrons trois. Les deux premiers en lien avec le niveau de services (largeur et revêtement des voies) et le troisième qui tient compte de la pente longitudinale des tronçons.

- Le niveau de service se caractérise par deux éléments : la largeur de voie et le revêtement du sol. Ces derniers influencent directement les vitesses de déplacement. La largeur de voie fait principalement varier la capacité de flux des tronçons routiers. Plus la dimension des voies est étroite plus le rapport entre la concentration du nombre d'évacués et l'espace disponible augmente. Il convient donc de privilégier les larges tronçons du réseau pour permettre une vitesse de déplacement optimale, et par conséquent une évacuation rapide. Le revêtement du sol joue sur la rugosité est donc la plus ou moins grande facilité de déplacement. Un terrain irrégulier comme sur des chemins, un sol meuble comme sur des sentiers ensablés diminuent les vitesses de marche. En fonction des conditions climatiques certains tronçons routiers au revêtement non dimensionné peuvent devenir impraticables. Ces types de revêtement sont évidemment défavorables à une évacuation. Dans le cas où ils représentent l'unique solution d'évacuation dans des délais convenables un aménagement pérenne devra être envisagé.
- La pente du terrain entraîne la variation des vitesses de marche. En milieu urbain et mis à part pour une faible pente descendante, quelle que soit la pente, elle diminue les vitesses de marche.

Tandis que le niveau de service est déterminé par les données attributaires du réseau routier, nous avons mis en place une méthode d'analyse spatiale pour le calcul de la pente.

- Vitesses de déplacement en fonction de la pente

La pente longitudinale moyenne des tronçons routiers est calculée de manière automatique à partir du MNT de 1 m de résolution (Litto3D). Nous employons la fonctionnalité d'ajout « d'informations de surface » proposée par l'extension 3D Analyst dans ArcGis®. Elle permet d'attribuer à des entités vectorielles des informations relatives à sa topographie. L'avantage d'utiliser cet outil est que « *la pente moyenne provient de la moyenne de la pente de tous les segments de ligne après pondération de chaque segment* »¹⁰⁶. Cette méthode offre une information bien plus précise que le simple calcul de pente moyenne à partir du dénivelé et de la longueur du tronçon routier. Seulement un même tronçon routier peut se caractériser par des valeurs de pente positive et négative. Afin de limiter cet aspect,

¹⁰⁶ <http://resources.arcgis.com/fr/help/main/10.1/index.html#//00q90000005z000000>

nous avons retravaillé la topologie du graphe routier de manière à découper les tronçons en fonction des ruptures de pente d'une valeur seuil de 10 %. Il s'agit de la valeur maximale communément admise dans la construction des voiries. L'isocline 10 % a été extraite du raster de pente d'1 m de résolution sous la forme de polylignes. Une fois nettoyées des microreliefs, les isoclines sont lissées de manière à limiter les intersections avec les tronçons routiers uniquement à des ruptures de pente importantes.

Le réseau routier initial est découpé par l'isocline de 10 %. On lui attribue une valeur de pente moyenne calculée en pourcentage à l'aide de l'outil « *ajouter les informations de surface* »¹⁰⁷ du logiciel ArcGis®. Les tronçons ont ensuite été reclassés par classe de pente de 3 %. Cette valeur sert de référence pour pondérer les vitesses de déplacement à pied sur le réseau. Initialement le réseau routier dont l'altitude est inférieure à 30 m est constitué de 23 939 tronçons pour une longueur moyenne de 98 m. Une fois retravaillé le nombre de tronçons a doublé, 49 365 pour une longueur moyenne de 48 m environ et une pente moyenne de 6.3 %. Concernant le cas particulier des franchissements de cours d'eau ou d'autres routes, une valeur arbitraire de pente nulle a été uniformément fixée. La limite principale de cette méthode réside dans l'approximation de la numérisation des tronçons routiers. Leurs tracés ne s'ajustent pas forcément au centre de la route « réelle ». Ce décalage par rapport à la BD Litto3d de l'IGN génère des valeurs de pente parfois faussées si les abords du réseau sont marqués par du relief.

Dans la littérature, la vitesse dite « de confort » d'un piéton se déplaçant à une allure de marche normale et sur du plat, est de l'ordre de 0,9 à 1,5 m/s. Ces valeurs sont très hétérogènes car fortement dépendantes de la distance de parcours et des caractéristiques des individus (âge, genre, corpulence, conscience du risque). A partir des vitesses de déplacement recensées dans 27 sources bibliographiques, Daamen (2004) trouve une valeur moyenne de 1,34 m/s. Par définition, une évacuation en cas de tsunami implique un dénivelé positif. Il convient donc de moduler la vitesse pédestre en fonction de la pente du terrain. Cependant, la bibliographie est peu abondante à ce sujet. Dans le cadre du Projet PREPARTOI, Lavigne et *al.* (2012) ont compilé l'ensemble des données bibliographiques traitant de cette question et calculé la courbe polynomiale de régression associée. Nous avons exploité cette formule pour calculer les vitesses de déplacement pour 10 classes de pente à 3 % (tableau 16). Par ailleurs, nous avons mené quelques tests de vitesse sur le terrain pour des itinéraires de pente homogène de 1 km, avec des prises de temps intermédiaires tous les 200 m. Nous avons croisé ces relevés de terrain aux données issues de la bibliographie. Les données de terrain révèlent des vitesses de déplacement supérieures à celles issues des références bibliographiques. Cette différence s'explique par la prédominance de marcheurs « jeunes et sportifs » et la distance de parcours relativement courte.

Tableau 16 : Détail des vitesses de déplacement par tronçons routiers selon la pente

Classe de pente	Valeur de pente (%)	Vitesse de déplacement (m/s)	Nombre de tronçons	Longueur cumulée
1	< 3	1,3485	14 445	810 333
2	[3-6[	1,2644	16 055	704 086
3	[6-9[	1,1823	7 911	283 590
4	[9-12[	1,1023	5 352	240 583
5	[12-15[	1,0245	2 736	156 158
6	[15-18[	0,9491	1 276	79 057
7	[18-21[	0,8760	647	40 790
8	[21-24[	0,8054	353	21 235
9	[24-27[	0,7373	222	10 925
10	≥ 27	0,4751	368	13 006

- Vitesses en fonction du niveau de service

Nous avons hiérarchisé les voies en fonction de leur niveau de service. La classification retenue se base sur les valeurs attributaires contenues dans le champ « nature » de la BD TOPO® de l'IGN (2004). Nous avons défini un coefficient de réduction de la vitesse de déplacement basé sur la nature de la voie d'après les travaux menés par Dewi (2010) (tableau 17). La valeur maximale est représentée par : les voies de forte capacité (de type autoroute, route à deux chaussées, etc.) et la valeur minimale est attribuée aux voies de faible capacité (escalier, sentier). Ce coefficient varie du simple ou double selon la nature de la voie.

Tableau 17 : Coefficient de réduction de la vitesse selon le niveau de service de la voie

Classe nature	Nature	Coefficient de réduction de la vitesse
1	Route à 2 chaussées, bretelle, quasi-autoroute, autoroute	1
2	Route à 1 chaussée	0,8
3	Chemin, sentier, escalier, route empierrée	0,5

- Synthèse des paramètres retenus et scénarios proposés

Le réseau routier est alors paramétré selon trois scénarios de vitesses différentes. Ces scénarios ont pour objectif de calculer des temps d'évacuation en fonction des capacités physiques humaines et du niveau de service offert par le réseau routier.

- Scénario 1- Vitesse de déplacement libre

La valeur de vitesse est unique. Elle est fixée à 4.86 km/h. Cette valeur correspond à la moyenne des vitesses de déplacement libres calculées d'après les recherches bibliographiques. Comme aucune variation de vitesse n'est paramétrée, la recherche du chemin le plus rapide correspond à rechercher le

plus court. Les temps calculés représentent le temps d'évacuation absolu nécessaire à un individu aux conditions physiques dites « normales » et avec un rythme de marche classique, sans contrainte pour se mettre en sûreté. Quant aux conditions de déplacement, elles sont optimales, c'est-à-dire que les réseaux ne sont pas encombrés, la nature du terrain et la pente sur de courtes distances ne limitent pas la vitesse de déplacement. La vitesse généralement retenue est de 5 km/h.

- Scénario 2 – Vitesses de déplacement contraintes

Les valeurs de vitesse sont déterminées en fonction de la classe de pente du tronçon routier et pondérées par leur niveau de service. On obtient ainsi 30 classes auxquelles une vitesse spécifique a été attribuée (tableau 18). A titre d'exemple, un tronçon à 1 chaussée d'une inclinaison de 6 %, aura une vitesse pédestre associée de 0,95 m/s. Les temps calculés représentent le temps d'évacuation pour un groupe d'individus aux conditions physiques normales mais dont les rythmes de marche sont influencés par les caractéristiques physiques des itinéraires.

Tableau 18 : Synthèse des vitesses de déplacement du scénario 2 (vitesse contrainte)

Valeur de la pente (%)	Vitesse associée (m/s)	Coefficient de réduction de la vitesse		
		Route à 2 chaussées, bretelle, quasi-autoroute, autoroute	Route à 1 chaussée	Chemin, sentier, escalier, route empierrée
		1	0,8	0,5
< 3	1,348	1,35	1,08	0,67
[3-6[	1,264	1,26	1,01	0,63
[6-9[	1,182	1,18	0,95	0,59
[9-12[	1,102	1,1	0,88	0,55
[12-15[	1,025	1,02	0,82	0,51
[15-18[	0,949	0,95	0,76	0,47
[18-21[	0,876	0,88	0,7	0,44
[21-24[	0,805	0,81	0,64	0,4
[24-27[	0,737	0,74	0,59	0,37
≥ 27	0,475	0,48	0,38	0,24

- Scénario 3 – Vitesses de déplacement contraintes dégradées

Il existe une variabilité importante des vitesses de marche en fonction des conditions physiques des individus (Daamen et Hoogendoorn, 2007 ; Kholshvnikov et Samoshin, 2010). Ainsi, certaines personnes peuvent avoir le temps d'évacuer tandis que d'autres, selon une vitesse de marche plus lente, ne pourront pas atteindre un site refuge dans les délais impartis (Wood et Schmidlein, 2013). Nous proposons pour ce troisième scénario de définir des valeurs de déplacement qui correspondraient à la vitesse d'une personne âgée. Elles varient selon les auteurs entre 0.95 m/s et 0.80 m/s sur un terrain plat (Sugimoto *et al.*, 2003 ; LIPI / DLR / UNU-EHS, 2011 ; Victor et Klein, 2011) et entre 0.83 m/s et 0.19 m/s en fonction de la pente (Victor et Klein, 2011). Nous avons calculé le rapport moyen entre la

vitesse de marche d'un individu aux conditions physiques « normales » telles que nous les avons définies précédemment (tableau 19) à celles d'une personne âgée. Ainsi, l'ensemble des valeurs de vitesse proposées dans le scénario 2 sont diminuées de 32 % pour les tronçons de moins de 3 % de pente, et de 65 % pour les autres.

Tableau 19 : Synthèse des vitesses de déplacement du scénario 3 (vitesse contrainte dégradée)

Valeur de la pente (%)	Vitesse associée (m/s)	Coefficient de réduction de la vitesse		
		Route à 2 chaussées, bretelle, quasi-autoroute, autoroute	Route à 1 chaussée	Chemin, sentier, escalier, route empierrée
		1	0,8	0,5
< 3	0.971	0.97	0.78	0.48
[3-6[	0.442	0.44	0.35	0.22
[6-9[	0.414	0.41	0.33	0.20
[9-12[	0.386	0.38	0.31	0.19
[12-15[	0.359	0.36	0.29	0.18
[15-18[	0.332	0.33	0.26	0.17
[18-21[	0.307	0.31	0.24	0.15
[21-24[	0.281	0.28	0.25	0.14
[24-27[	0.260	0.26	0.20	0.13
≥ 27	0.166	0.17	0.13	0.08

L'emploi de cet outil suppose de lourdes hypothèses comme la capacité illimitée du réseau de transport, la non prise en compte des effets de congestion et d'un départ simultanés des évacués le long du réseau. Elle ne tient pas compte non plus de la diminution des vitesses de marche en fonction de la distance et du temps de parcours qui peuvent être liés à la fatigue ou au stress (Wood et Schmidlein, 2013). Néanmoins, les valeurs de déplacement pédestre retenues dans nos travaux (tableaux 18 et 19) sont lentes et présupposent donc des valeurs qui pourraient être maintenues tout au long du trajet. Il conviendra en termes de perspective d'étalonner nos vitesses d'évacuation à partir de valeurs mesurées sur le terrain par exemple au cours d'exercices d'évacuation.

6.2.3. Optimiser et définir les itinéraires d'évacuation des navires

6.2.3.1. Construction d'un réseau multidirectionnel

Quel que soit le moyen d'évacuation privilégié des populations à terre, l'optimisation et la planification des itinéraires sont définies selon un parcours exclusivement le long d'un réseau routier. Il est le seul à garantir une évacuation efficace en proposant des itinéraires plus ou moins connus et aménagés. Notre précédente approche de calcul d'accessibilité sur graphe exploite donc des données vectorielles représentant le réseau routier. Il s'agit d'une représentation du monde réel sous la forme numérique du réseau physique des voies routières et exploitables au sein d'un SIG. Ce sont des données classiques des référentiels cartographiques nationaux à grandes échelles comme la BD TOPO® de l'IGN.

La résolution de calculs d'itinéraires sur graphe dans le domaine maritime nécessite de définir une approche cartographique autre, à partir d'un réseau sans lien apparent avec des entités physiques réelles. En effet, il n'existe pas de données cartographiques des voies maritimes pouvant être employées comme support des calculs sur graphe. Cela n'aurait d'ailleurs pas de sens car il n'existe aucune contrainte réglementaire de navigation des navires en mer, hormis dans le cas spécifique de quelques rails maritimes très fréquentés et dotés d'un dispositif de séparation du trafic (DST)¹⁰⁸. Les itinéraires empruntés par les navires répondent avant tout à une logique commerciale qui vise à limiter le coup de transport par la sélection de la voie maritime la plus courte et sécuritaire¹⁰⁹. Cette problématique se rencontre également dans d'autres domaines de modélisation d'itinéraires sur des espaces ouverts comme pour la course d'orientation, le déplacement d'animaux, la progression d'engins militaires ou encore la recherche de personnes disparues (Quinquenel, 2013).

Nous avons créé un réseau géométrique qui prend la forme d'une grille multidirectionnelle à l'échelle du bassin de la Grande Caraïbe. Pour coller au plus près de la réalité, ce réseau est constitué de plusieurs grilles interconnectées et interdépendantes dont le pas se réduit à l'approche des côtes et des escales (ports et mouillages). La longueur des arêtes les plus courtes est de 75 m au niveau des escales, et de 24 300 m au-delà de 20 MN (37 km) des côtes. Cette technique de construction offre deux avantages. Le premier est qu'elle couvre l'ensemble du bassin de la Grande Caraïbe tout en limitant le nombre d'objets géographiques (points d'intersection et segments). Le second est qu'elle conserve une résolution plus fine au niveau des littoraux ce qui accroît la précision des résultats obtenus sur les espaces qui concentrent le maximum de navires et pour lesquels l'exposition aux tsunamis est la plus élevée (chapitre 4). Cette méthode a nécessité de nombreux traitements SIG ainsi que l'utilisation du gestionnaire de bases de données PostgreSQL¹¹⁰ implémenté de l'extension PostGIS¹¹¹. Ces traitements ont été effectués à l'aide de scripts Python¹¹², certaines fonctions faisant appel aux outils de géotraitement PostGis.

La méthode de construction du graphe consiste à créer des jeux de données (arcs et sommets du graphe) à différents pas, par scripts Python, sur des espaces délimités par SIG. Ces jeux de données sont ensuite « nettoyés » par des fonctions de géotraitement PostGis pour supprimer les éléments qui intersectent les côtes. Cette méthode s'est déroulée en cinq étapes principales (encadré 8). La quantité de mémoire informatique requise pour générer les segments nous a obligé à découper l'ensemble des données en six sous-secteurs, multipliant de fait le temps de conception. Au final, le réseau maritime que nous avons conçu est composé de plusieurs graphes à différents pas, de forme géométrique

¹⁰⁸ Dans la Grande Caraïbe, environ une dizaine de DST sont répertoriés d'après une liste figurant sur l'encyclopédie libre Wikipédia (www.wikipedia.org). Il s'agirait principalement de dispositifs établis à l'entrée de ports. Nous n'avons pas trouvé d'informations supplémentaires, ni de données cartographiques permettant de les intégrer à nos travaux.

¹⁰⁹ Les conditions météorologiques, des conflits ou tensions géopolitiques ou encore la menace de piratage et évidemment la bathymétrie peuvent contraindre les navires à modifier leur trajectoire.

¹¹⁰ PostgreSQL est un Système de Gestion de Base de Données Relationnel-Objet (SGDBRO) libre : <http://www.postgresqlfr.org/>

¹¹¹ PostGis est une extension de PostgreSQL qui permet d'utiliser des données spatialisées sous différentes formes géométriques (point, ligne, polygone) et confère ainsi à PostgreSQL le statut de SGDBR spatial.

¹¹² Python est un langage informatique de programmation qui peut s'utiliser sous la forme de scripts permettant d'automatiser des tâches répétitives plus ou moins complexes.

tétraédrique. Chaque graphe de pas est relié au graphe de pas $n+1$ par un ensemble de segments. Au final, le graphe complet est constitué de 221 811 sommets (ou nœuds) et de 684 517 tronçons (ou arcs) pour une longueur totale d'environ 3,8 millions de kilomètres (tableau 20).

Tableau 20 : Description du graphe multidirectionnel

Secteurs	Longueur des arêtes (en m)	Nombres d'arêtes	Nombre de sommets
Escales	75	28 819	8 445
Proximité de l'escale	300	49 157	14 058
1MN	900	376 769	127 836
5MN	2700	107 924	37 124
20MN	8100	47 590	15 198
Reste du bassin	24300	74 258	19 150
Total	-	684 517	221 811

Encadré 8. Les étapes de la construction du graphe multidirectionnel

Les différentes grilles du graphe ont été conçues en s'appuyant sur l'emprise spatiale de zones tampons définies en fonction de la distance à la côte et de la proximité des infrastructures portuaires. Nous retiendrons les distances de 1 MN, 5 MN, 20 MN pour les buffers de pas de 2 700, 8 100 et 24 300 m (figure a). Pour les pas inférieurs, 75, 300 et 900 m, l'emprise spatiale est dessinée manuellement et correspond à la zone portuaire dont la vitesse est limitée à 5 nœuds, puis à la zone portuaire sans restriction de vitesse et ensuite la zone permettant de faire le lien avec le pas des 2 700 m. Par script Python, les nœuds sont tout d'abord générés pour chaque buffer (figure b). La couche des segments est ensuite produite en reliant les points d'une même grille par un segment horizontal, vertical et diagonal (figure c). Ces 6 pas ont été retenus après plusieurs essais de génération du réseau. Ils permettent, dans notre cas d'étude, de générer un réseau suffisamment dense et régulier pour les calculs optimisés de temps et distance entre deux points.

La connexion entre un réseau de pas N et le réseau de pas immédiatement inférieur et contigu est effectué par un script Python après avoir sélectionné les points limitrophes des deux zones par une fonction géographique PostGIS (ST_Buffer) dont le rayon est la valeur du pas de la grille prise en référence (figure d). Les points de la grille de pas N ainsi sélectionnés sont reliés aux points les plus proches de la grille de pas immédiatement inférieurs par trois à cinq segments (figure e). Les segments qui intersectent un buffer auquel ils n'appartiennent pas ou qui intersectent une terre émergée, sont supprimés par une fonction géographique PostGIS (ST_Intersects).

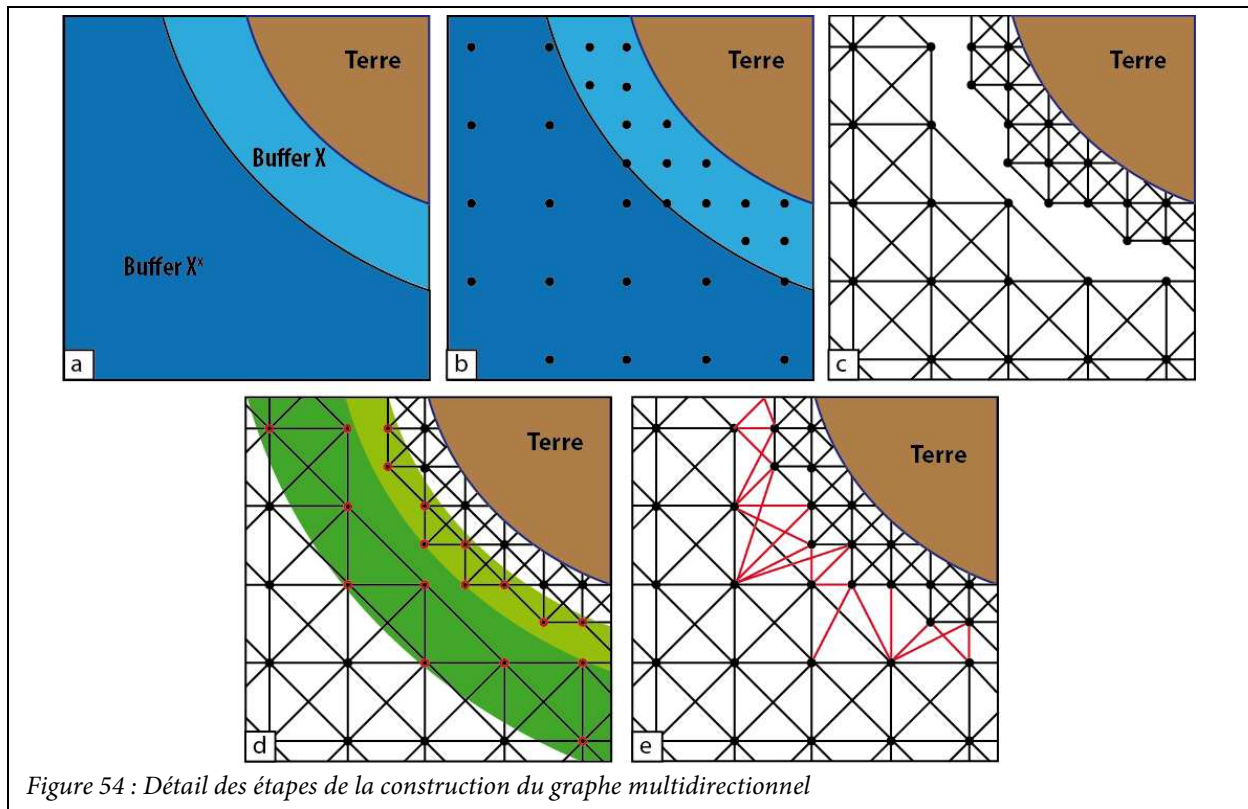


Figure 54 : Détail des étapes de la construction du graphe multidirectionnel

6.2.3.2. Paramétrage du réseau et outil de calculs

Les vitesses de déplacement le long du réseau ont été paramétrées de manière à représenter le plus fidèlement possible les conditions de navigation réelles des navires de croisière dans une optique d'évacuation depuis la position du navire au moment de l'alerte tsunami (considéré comme étant à l'arrêt) vers un site de mise en sécurité au large. Nous n'avons trouvé aucune information dans la littérature scientifique, ni technique¹¹³, permettant de construire un abaque des différentes vitesses de navigation que ce soit en situation normale ou d'urgence. En situation normale, la vitesse d'un navire est variable en fonction de plusieurs paramètres comme le type de motorisation, ses dimensions, l'opération commerciale et les manœuvres en cours, l'environnement maritime¹¹⁴, les distances de traversée ou encore la recherche d'économie en carburant. Nous nous sommes attachés dans un premier temps à définir les bornes et valeurs moyennes de ces vitesses. Ainsi les vitesses atteintes par les navires de croisière les plus rapides avoisinent les 30 nœuds (nd). A titre d'exemple, la vitesse de croisière du *Queen Mary 2* (2 620 passagers) est de 29 nd (54 km/h) et celle du *MS Voyager* (3 138 passagers) est de 28 nd (51.5 km/h). La vitesse de croisière optimale moyenne des navires à passagers les plus imposants, est comprise entre 20 et 22 nd¹¹⁵. Néanmoins, pour les plus récents, ils peuvent atteindre aisément des vitesses de 25 - 27 nd, toujours dans des conditions de navigation correcte pour les passagers, notamment pour s'éloigner de la trajectoire d'un cyclone ou en situation d'urgence. Nous retiendrons une allure moyenne de 22 nd. Cette valeur est également la plus représentée au sein

¹¹³ Cours en ligne de l'École Nationale de la Marine Marchande de Marseille (<http://dept.navigacion.enmm.free.fr/>)

¹¹⁴ Conditions météorologiques, visibilité, densité du trafic, proximité des dangers.

¹¹⁵ <http://www.cruisemapper.com/wiki/762-fastest-cruise-ship-speed>

d'une liste de 305 vitesses de croisière accessibles sur internet¹¹⁶, la moyenne étant de 19.5 nd. Une vitesse de 22 nd est certainement conservatrice pour la majorité des navires de croisière en situation d'urgence qui chercheraient à s'éloigner des côtes en cas d'alerte tsunami.

Il n'est pas envisageable de paramétrer notre graphe par cette seule unique valeur. L'inertie de propulsion des navires est grande et dépend de leurs capacités évolutives¹¹⁷. Elle contraint les navires à un certain délai de temps avant d'atteindre la vitesse demandée. Pour permettre de reproduire cette phase de montée en allure, nous avons décidé de paramétrer les vitesses croissantes de navigation en fonction de l'éloignement des côtes (tableau 21). Elles ont été retenues en fonction de valeurs réglementaires ainsi que par l'observation de l'allure de plusieurs dizaines de navires au moment de leur appareillage, au départ de différents ports de la Caraïbe (données disponibles en temps réel sur le site de MarineTraffic¹¹⁸). Finalement, la vitesse minimale retenue est de 3 nd. Elle est appliquée à l'ensemble des segments situés dans les ports pour une distance des côtes inférieures à 0.25 NM. La valeur maximale est de 22 nd pour les tronçons situés à plus de 20 NM des côtes.

Tableau 21 : Description des valeurs de vitesse de navigation appliquées au graphe multidirectionnel

Longueur des arêtes (en m)	Distance des côtes		Vitesses de navigation	
	en NM	en km	en nd	en km/h
75 et 300	≤ 0.25	≤ 0.463	3	5.6
	] 0.25 ; 0.5 ]	] 0.463 ; 0.926]	6	11.1
	> 0.5	> 0.926	12	22.2
900	≤ 0.5	< 0.926	6	11.1
	> 0.5	> à 0.926	12	22.2
2 700	-	-	18	33.3
8 100	-	-	20	37.0
24 300	-	-	22	40.7

Les calculs d'accessibilité des sites maritimes de mise en sécurité ont été effectués à l'aide de l'extension PgRouting¹¹⁹ du logiciel PostgreSQL. Il s'agit d'un module *open source* qui permet d'étendre les fonctionnalités de PostgreSQL/PostGIS en intégrant des solutions de calculs sur graphe. Cette extension propose plusieurs outils en rapport avec l'algorithme de recherche employé. Nous avons utilisé celui de Dijkstra (K_Dijkstra) qui permet la recherche de l'itinéraire le plus rapide en fonction d'un coût minimum, exprimé dans nos travaux par le temps de parcours de chaque arc du graphe (longueur de l'arc divisée par la vitesse de déplacement des navires). Cet outil a été utilisé récemment pour la modélisation des itinéraires d'évacuation de la ville de Padang (Indonésie) (Mayaguezz, 2015). Nous avons utilisé PgRouting à la place de RouteFinder® car ce dernier n'est pas en mesure d'intégrer un graphe d'une dimension si grande et composé d'un si grand nombre d'arcs et de sommets. De plus, l'utilisation de script Python permet d'effectuer les calculs de manière automatisée

¹¹⁶ <http://www.cruisemapper.com/wiki/762-fastest-cruise-ship-speed>

¹¹⁷ Elles sont déterminées par ses caractéristiques générales (forme de la carène, largeur, longueur, tirant d'eau, tirant, d'air, etc.), ses moyens de manœuvre (type de propulsion, type d'hélice, type de gouvernail, etc.), ses caractéristiques manœuvrières (architecture, allure de manœuvre, caractéristique de giration, etc.) (Source : http://dept.navigation.enmm.free.fr/intro_manoeuvre.swf)

¹¹⁸ <https://www.marinetraffic.com>

¹¹⁹ <http://pgrouting.org/>

en boucle tout en consommant peu de ressources informatiques. L'une des contraintes de PgRouting est que le calcul des temps de parcours de chaque itinéraire doit s'effectuer au départ et à l'arrivée des nœuds du graphe. Ainsi pour chaque nouveau calcul, il est nécessaire d'affecter aux données en entrée du modèle (position des navires ou escales portuaires et les sites de mise en sécurité), le nœud le plus proche du graphe. Le site de mise en sécurité retenu par le modèle est celui dont le temps de parcours est le plus rapide pour évacuer parmi les cinq plus proches en distance linéaire. Une vingtaine de résultats de calculs de temps de navigation réalisés individuellement ont été confrontés à des données historiques d'AIS disponibles sur *MarineTraffic*. Nous avons constaté, pour les distances les plus longues, que les temps de parcours ainsi que les trajectoires calculées sont très proches de la réalité. Par contre sur des trajets plus courts, inférieurs à trente minutes de navigation, les écarts pouvaient atteindre quelques minutes en raison des faibles vitesses que nous avons implémentées à notre graphe.

Encadré 9. Sélection spatiale des sites de mise en sécurité des navires à l'échelle de la Grande Caraïbe

D'après nos recherches détaillées au chapitre 4, nous avons défini la zone de mise en sécurité des navires, elle est atteinte lorsque la profondeur est supérieure à 100 m ou que la distance par rapport au trait de côte est supérieure à 5 MN (figure 55a). Les sites de mise en sécurité des navires ont été définis comme l'ensemble des points d'intersection entre le graphe multidirectionnel et la limite de la zone de sécurité (figure 55 b).

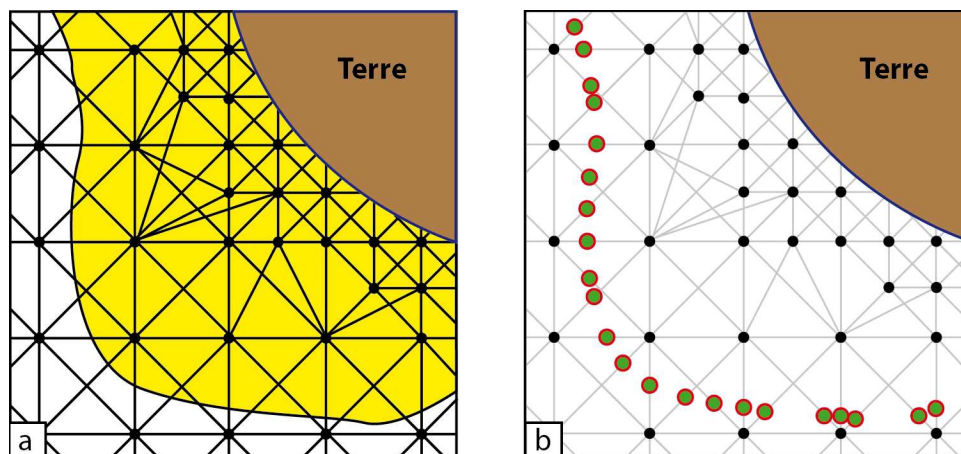


Figure 55 : Création des sites de mise en sécurité des navires utiles au modèle de calculs sur graphe

Dans ce chapitre, nous avons construit et paramétré par des vitesses de déplacement variables un graphe du réseau routier de la Martinique pour l'évacuation à terre et un graphe multidirectionnel à l'échelle de la Grande Caraïbe pour l'évacuation en mer des navires exposés. Les temps calculés permettront de définir la faisabilité des évacuations en fonction de plusieurs scénarios potentiels de tsunami. Le prochain chapitre présente plusieurs méthodes mises en œuvre pour quantifier et spatialiser les enjeux humains exposés à l'aléa tsunami qui doivent être évacués en cas d'alerte.

Chapitre 7 Scénariser les volumes de personnes à évacuer

On sait que les effets dommageables d'un tsunami se concentrent exclusivement sur les zones basses littorales. Bien entendu, les distances de pénétration dans les terres sont variables en fonction de l'intensité du phénomène. Toutefois, l'évaluation de la vulnérabilité directe des enjeux exposés à ce phénomène reste circonscrite aux zones côtières. Il convient donc de mener des études qui portent sur des emprises d'extension maximale lorsque celles-ci sont connues (résultats de simulations numériques d'inondation), ou sur la zone théorique à évacuer. Cela peut apparaître comme un « avantage » méthodologique, or il n'en est rien. Les réponses à apporter doivent être à la hauteur des enjeux humains et économiques et prendre en compte la diversité des activités présentes. En effet, les zones côtières forment un territoire attractif en matière de développement économique et de loisirs. Il s'y concentre un grand nombre d'activités humaines de natures très différentes et aux variations saisonnières importantes. Ces fluctuations représentent la difficulté majeure de notre travail de quantification des enjeux car le dimensionnement de la réponse va en dépendre.

Le premier objectif de ce chapitre vise à proposer des méthodes pour évaluer le nombre théorique d'enjeux humains exposés à l'aléa tsunami en Martinique en fonction de différents scénarios de fréquentation des espaces littoraux. Des travaux d'analyses spatiales associés à un important recueil de données sur le terrain nous ont permis de construire des bases de données fines sur les enjeux humains à différentes échelles spatiales et temporelles. Le second objectif est de quantifier les enjeux exposés sur le domaine maritime. Ce travail en particulier porte sur l'activité de croisière à l'échelle des escales portuaires maritimes ainsi que sur celle des navires dans le cadre de l'exercice régional de gestion de crise tsunami *Caribe Wave* de 2015. Ces scénarios de fréquentation alimenteront en données d'entrées le modèle de calcul sur graphe dont les résultats sont développés au chapitre 8.

7.1. Constitution des bases de données d'enjeux humains exposés selon plusieurs scénarios d'occupation nocturne

7.1.1. Présentation de la problématique

Parce que l'intégrité de la vie humaine est l'enjeu le plus important à sauvegarder, il est essentiel pour les autorités en charge de la gestion de crise de disposer d'informations spatialisées sur les populations exposées (Freire et Aubrecht, 2011). Cette évidence s'impose lorsqu'il s'agit de planifier des évacuations de masse notamment face à l'aléa tsunami (IOC-UNESCO, 2008 ; Scheer *et al.*, 2011). Toutefois, la quantité d'individus est variable dans l'espace et dans le temps. On pense notamment aux variations journalières (déplacements domicile-travail), hebdomadaires (jours ouvrables, de repos, fériés) et saisonnières (tourisme, migration) qui modifient de façon significative les quantités de populations exposées. Ces variations infra-annuelles sont difficiles à établir à partir de données démographiques couramment disponibles. Néanmoins, plusieurs méthodes d'interpolation spatiale associant des données de recensements officiels, l'analyse d'occupation du sol, des comptages et des enquêtes de terrain permettent de réaliser une estimation des variations spatio-temporelles de l'activité humaine à des échelles très fines.

Les recherches les plus abouties, en termes de planification des évacuations face au risque de tsunami, tendent à évaluer le nombre d'évacués en fonction de plusieurs scénarios. La plupart des études en identifient au minimum deux (Sleeter et Wood, 2006 ; Mück, 2008 ; Dewi, 2010 ; Freire et Aubrecht, 2011). Le premier représente la distribution de la population selon un scénario de nuit, et le second selon un scénario de jour. Les deux représentent le nombre de résidents. Ils sont généralement construits à partir de données démographiques fournies par des organismes étatiques. Plusieurs méthodes sont déployées en fonction des données disponibles. Sur la côte ouest des Etats-Unis, Wood et Schmidlein (2012) emploient des données relatives aux nombres d'employés par secteur d'activité. A Padang (Indonésie), Lämmel *et al.* (2010) caractérisent des valeurs d'occupation diurne théoriques en fonction de caractéristiques des bâtiments révélées par télédétection et complétées par des enquêtes de terrain. Ces différentes approches reposent sur des méthodes statistiques d'allocation spatiale par interpolation ou désagrégation de données (Vignes *et al.*, 2013). Elles offrent des informations plus fines que celles produites par le recensement brut. Néanmoins, cette donnée reste affectée exclusivement aux bâtiments. Les populations présentes sur les espaces de plein-air, et plus généralement en transit ne sont pas prises en compte alors qu'elles sont les plus vulnérables (absence de protection, méconnaissance du risque et des mesures de mise en sécurité). Ce mode d'analyse est donc particulièrement adapté pour couvrir de vastes régions et localiser des « *hotspots* » de populations exposées à l'aléa tsunami (Wood et Schmidlein, 2012). Toutefois, c'est un moyen qui reste complètement dépendant de la qualité des données disponibles. D'autres études (Péroche, 2010 ; Sahal, 2011 ; Leone *et al.*, 2012b ; Mayagezz, 2015) proposent une quantification multi-horaires des populations à partir de relevés de terrain qui tiennent compte de la variété des activités propres à chaque territoire et de leurs caractéristiques en termes de fréquentation. Cette seconde approche

nécessite un travail de terrain substantiel. Néanmoins, elle apporte des données précises indispensables pour des travaux à visée opérationnelle.

Ces informations sont essentielles à la modélisation des évacuations. Elles conditionnent l'ensemble des résultats qui visent à évaluer le degré de congestion du réseau, localiser et quantifier les populations les plus éloignées de tous sites refuges, définir le volume maximum de personnes à évacuer par site refuge selon les différents scénarios, voire d'estimer des probabilités de pertes humaines. Les enjeux directs exposés à l'aléa tsunami se concentrent sur les littoraux (populations, bâtiments, réseaux, infrastructures portuaires, navires, exploitations agricoles, mangroves, etc.). Nous proposons d'établir plusieurs bases de données permettant de quantifier et spatialiser les enjeux humains en fonction de différents scénarios spatio-temporels à travers :

- la répartition des espaces bâtis habités à l'échelle départementale et infra communale ;
- la fréquentation des plages selon plusieurs scénarios d'occupation hebdomadaire en période de haute saison à l'échelle départementale ;
- la fréquentation annuelle des ports de la Grande Caraïbe ;
- la capacité d'emport de passagers et d'équipages des navires de croisière présents dans le bassin de la Grande Caraïbe au cours de l'exercice régional d'alerte tsunami *Caribe Wave* de 2015.

7.1.2. Bases de données de population disponibles en Martinique

7.1.2.1. Bases de données nationales

En France, l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE) a pour principale mission de collecter, d'analyser et de diffuser des informations sur la situation économique et sociale de la population française. Il est également en charge du recensement des populations et il restitue des statistiques socio-économiques à différentes échelles spatiales, depuis le niveau infra-communal jusqu'au niveau national. Néanmoins, dans un souci du respect de la vie privée et de la confidentialité des informations dites « sensibles » (revenus, âges, nombre de ménages constitués d'une seule personne, nombre de ménages propriétaires), certaines échelles spatiales de représentation sont volontairement dégradées. Avant 2009, l'échelle d'agrégation la plus fine relative à l'information sur les populations était le zonage IRIS. Ce découpage, qui a été élaboré en partenariat avec les communes selon des règles définies en concertation avec la Commission Nationale Informatique et Libertés (CNIL), partage le territoire infra-communal en « îlots ». Il couvre l'ensemble des territoires français. Les limites ont été établies en respectant des critères démographiques et d'homogénéité de l'habitat pour une population moyenne d'environ 2 000 habitants. Les communes dont la population est inférieure à ce seuil sont intégrées tel quel pour permettre la couverture de l'ensemble du territoire. La France compte environ 16 000 IRIS dont 650 pour les DOM. La Martinique est composée de 141 îlots IRIS dont 17 qui représentent des communes non partitionnées. Les variables associées aux IRIS fournissent des informations afférentes à la population par tranche d'âge et par sexe. Dans le cadre de notre recherche, ce zonage ne permet pas de spatialiser les enjeux humains suffisamment précisément avec ceux de notre zone à évacuer en cas d'alerte tsunami.

Depuis 2013, l'IGN propose trois nouveaux produits : deux d'entre eux se présentent sous la forme d'un carroyage régulier de 1 km ou 200 m de côté, avec pour seule information une valeur de population, et un troisième sous la forme d'un carroyage aux mailles de taille variable contenant des données sociodémographiques (figure 56). Ce mode de représentation en libre accès permet de diffuser des données spatialisées agrégées précises tout en préservant l'anonymat des informations. Ces données sont construites à partir des informations contenues dans les revenus fiscaux localisés, établis au 31 janvier 2012. Elles proviennent des déclarations de revenus des personnes physiques et de la taxe d'habitation transmises par la Direction Générale des Impôts à l'INSEE. La description de l'ensemble des variables accessibles sur le site internet de l'INSEE et les méthodes de calculs figurent dans un document intitulé « revenus fiscaux localisés des ménages (RFL) »¹²⁰.

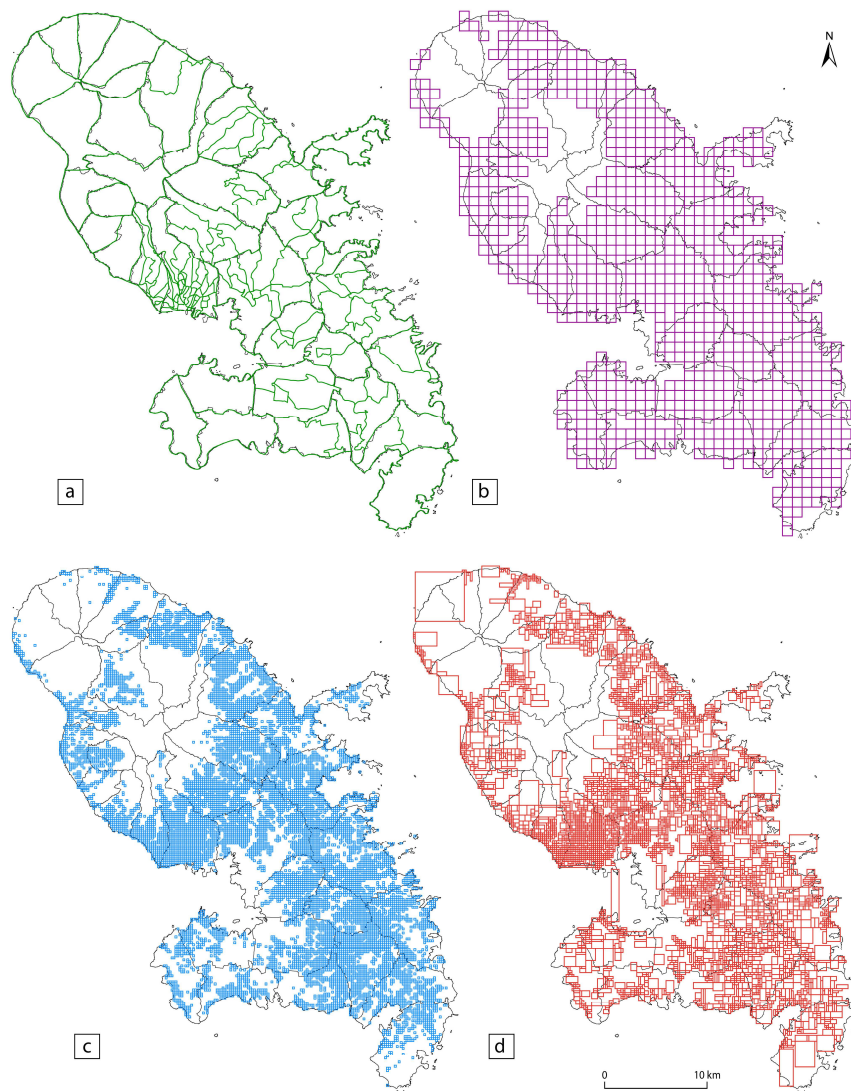


Figure 56 : Emprise des données spatiales proposées par l'INSEE à l'échelle du département de la Martinique - Zonage IRIS - 141 îlots (a) ; Carroyage 1 km - 967 mailles (b) ; Carroyage 200 m - 11 001 mailles (c) ; Zonage rectangulaire- 4 730 entités (d)

¹²⁰http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=0&ref_id=donnees-carroyees&page=donnees-detaillees/donnees-carroyees/donnees-carroyees-200m.htm

Des attributs supplémentaires sont livrés pour le maillage rectangulaire. Ils fournissent aux utilisateurs des informations sur la structure par âge des individus, sur les caractéristiques des ménages ainsi que sur leurs revenus. Parmi les 18 variables proposées, une majorité d'entre elles doit rester confidentielle de sorte qu'aucun traitement SIG ou statistique ne permette d'obtenir des informations relatives à un ménage en particulier. Ainsi, les mailles de 200 m de côté dont le nombre de ménages fiscaux¹²¹ est inférieur à 11, sont agrégées de manière à dépasser ce seuil. Il en résulte une couche d'informations spatialisées sous la forme de carreaux ou rectangles plus ou moins réguliers (figure 5). L'emploi d'une maille si grande risquerait de générer une surestimation trop importante du nombre de personnes à évacuer et un manque de crédibilité des résultats associés (encadré 10). C'est pourquoi, cela nécessiterait *a minima* un traitement géostatistique selon une méthode de calculs au prorata des surfaces habitées développées par maille, information qui à l'heure actuelle n'est pas disponible pour la Martinique (SOeS, 2012).

Encadré 10. Exemple de géotraitements à partir de données brutes carroyées à 200 m de l'INSEE

L'un des principaux résultats que l'on souhaite obtenir à travers des bases de données de population est de quantifier le nombre de personnes à évacuer en cas d'alerte tsunami. Or, la grande dimension des mailles fournies par l'INSEE au regard de la géométrie très découpée et parfois étroite de la zone à évacuer biaise les résultats d'une manière importante. A titre d'exemple, nous proposons de calculer le nombre de personnes en zone à évacuer selon différents paramètres de sélection géo-spatiale. Ainsi, d'après cette base de données, 11 742 personnes résideraient en zone à évacuer si l'on sélectionne les mailles entièrement comprises dans le zonage (147) ; 49 755 personnes (786 mailles) pour celles dont le centroïde est compris entre 0 et 10 m et enfin 102 636 personnes (1 9243 mailles) pour celles qui intersectent le zonage. Ces différentes sélections mettent en évidence une variation très importante des résultats en fonction des critères de sélection employés. Il n'est donc pas possible d'utiliser cette base de données en l'état pour nos applications.

7.1.2.2. Autres bases de données de population disponibles à l'échelle départementale

A l'échelle départementale, il n'existe aucune donnée de population officielle plus précise que celle fournie par l'INSEE. Néanmoins, des travaux réalisés dans le cadre du projet de recherche CARIBSAT (programme INTERREG IV) ont permis de définir un nombre d'habitants par résidence principale à l'échelle de la parcelle cadastrale, à partir de données de la DGFIP¹²². Initialement, cette base de données a été réalisée pour la création d'indicateurs géographiques de risques naturels en Martinique par Gutton (2010).

¹²¹ Un ménage fiscal est un ménage constitué par le regroupement des foyers fiscaux répertoriés dans un même logement (hors logement collectif). Sont exclus des ménages fiscaux : les contribuables vivant en collectivité (foyers de travailleurs, maisons de retraite, maisons de détention...); les sans-abri ; les ménages de contribuables concernés par un événement de type décès au cours du mois de décembre de l'année. De plus, les ménages constitués de personnes ne disposant pas de leur indépendance fiscale (essentiellement les étudiants) sont comptés dans les ménages qui déclarent leurs revenus même si ces personnes occupent un logement indépendant.

¹²² Les fichiers fonciers ou fichiers MAJIC II (Mise à Jour des Informations Cadastreales, deuxième version) sont produits annuellement et principalement utilisés pour renseigner les contribuables lors de la sortie des avis d'imposition (taxe foncière et taxe d'habitation). Ils contiennent des renseignements relatifs aux propriétés bâties et non bâties et sont gérés par la Direction Générale des Finances Publiques DGFIP (ex-DGI).

L'exploitation des informations fournies par le DGFIP extraites de la base de données MAJIC a été rendue possible suite à un traitement effectué par le CETE Nord-Picardie¹²³ sur l'ensemble des données nationales de 2009. Ce traitement visait à rendre les informations anonymes conformément aux exigences de la CNIL et à formater les fichiers pour en simplifier l'utilisation avec des logiciels courants de gestion de bases de données. A partir de ce support, livré au format Access®, il a été possible d'extraire les données relatives au nombre de foyers par bâtiment (correspondant au nombre de résidences principales non vacantes soumises à la taxe d'habitation) et à leur vocation (habitation, professionnel ou mixte). Cependant, bien que ces fichiers fournissent de nombreuses informations qualitatives (superficies construites, équipements, année de construction, nombre de niveaux, matériaux des structures, etc.), il n'existe aucune couche SIG géoréférencée permettant de lier ces informations à des bâtiments. Seule une clé primaire permet de rattacher ces informations aux parcelles de la base de données cadastrales de l'IGN (BD PARCELLAIRE®, 2008). L'estimation du nombre de personnes a été réalisée en multipliant le nombre de foyers par parcelle (DGFIP, 2009) par la taille moyenne des ménages de l'IRIS correspondante (INSEE, 2006). La valeur obtenue correspond alors au nombre moyen d'occupants en résidence principale par parcelle cadastrale. Cette donnée offre globalement une bonne spatialisation de la population particulièrement en milieu urbain où la dimension des parcelles est plus restreinte (Gutton, 2010 ; Leone *et al.*, 2012a). Pour autant, l'agrégation de l'information à l'échelle des parcelles cadastrales répond difficilement au niveau de précision attendue pour l'analyse des enjeux exposés à l'aléa tsunami. Leur surface et leur géométrie sont trop variables, notamment entre les zones urbaines et rurales. Les parcelles chevauchent fréquemment la limite de la zone à évacuer et ne permettent donc pas de quantifier efficacement le nombre de personnes. De plus, la représentation cartographique des résultats et leur lecture seraient trop difficiles à l'échelle communale (~ 1 : 60 000^{ème}). Nous avons donc mis en œuvre une méthode d'allocation spatiale qui permet de reporter l'information relative à la population sur des mailles régulières de 50 m de côté soit d'une surface de 2 500 m² (figure 57). Ce système de représentation offre les avantages suivants :

- Limiter les doubles comptes par la stricte concomitance des mailles les unes par rapport aux autres ;
- S'affranchir des limites administratives et ainsi offrir une représentation continue de l'information spatiale ;
- Agréger l'information pour limiter le nombre d'entités en entrée du modèle d'accessibilité et ainsi optimiser les temps de calcul informatique ;
- Conserver un zonage de référence qui permet d'y agréger facilement de nouvelles informations géographiques ;
- Faciliter la lecture des représentations cartographiques pour une communication efficace des résultats.

¹²³ L'objectif était de rendre les fichiers plus lisibles et standardisés, de faciliter les croisements avec d'autres bases de données nationales.

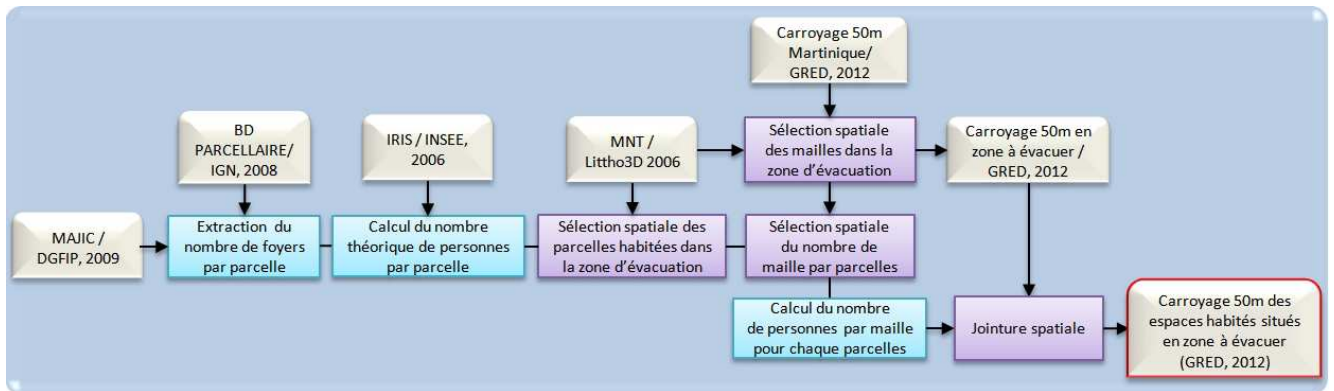


Figure 57 : Schéma méthodologique de l'estimation de l'occupation nocturne par la population en résidence principale, située en zone à évacuer à l'échelle départementale

7.1.2.3. Description du scénario nocturne à l'échelle de l'île

En cas d'alerte tsunami, les autorités préfectorales peuvent ordonner l'évacuation de l'ensemble du littoral Martiniquais compris entre 0 et 10 m. Jusqu'à présent aucune estimation de la population à évacuer n'avait pu être donnée faute de bases de données suffisamment précises. L'amélioration apportée aux résultats des travaux issus du projet CARIBSAT a permis de quantifier le nombre théorique d'évacués à l'échelle de l'île (figure 58). Ainsi, on estime que la population résidante nocturne située à moins de 10 m d'altitude est de 66 377 personnes ce qui représente 16.7 % de la population des communes martiniquaises en 2009.

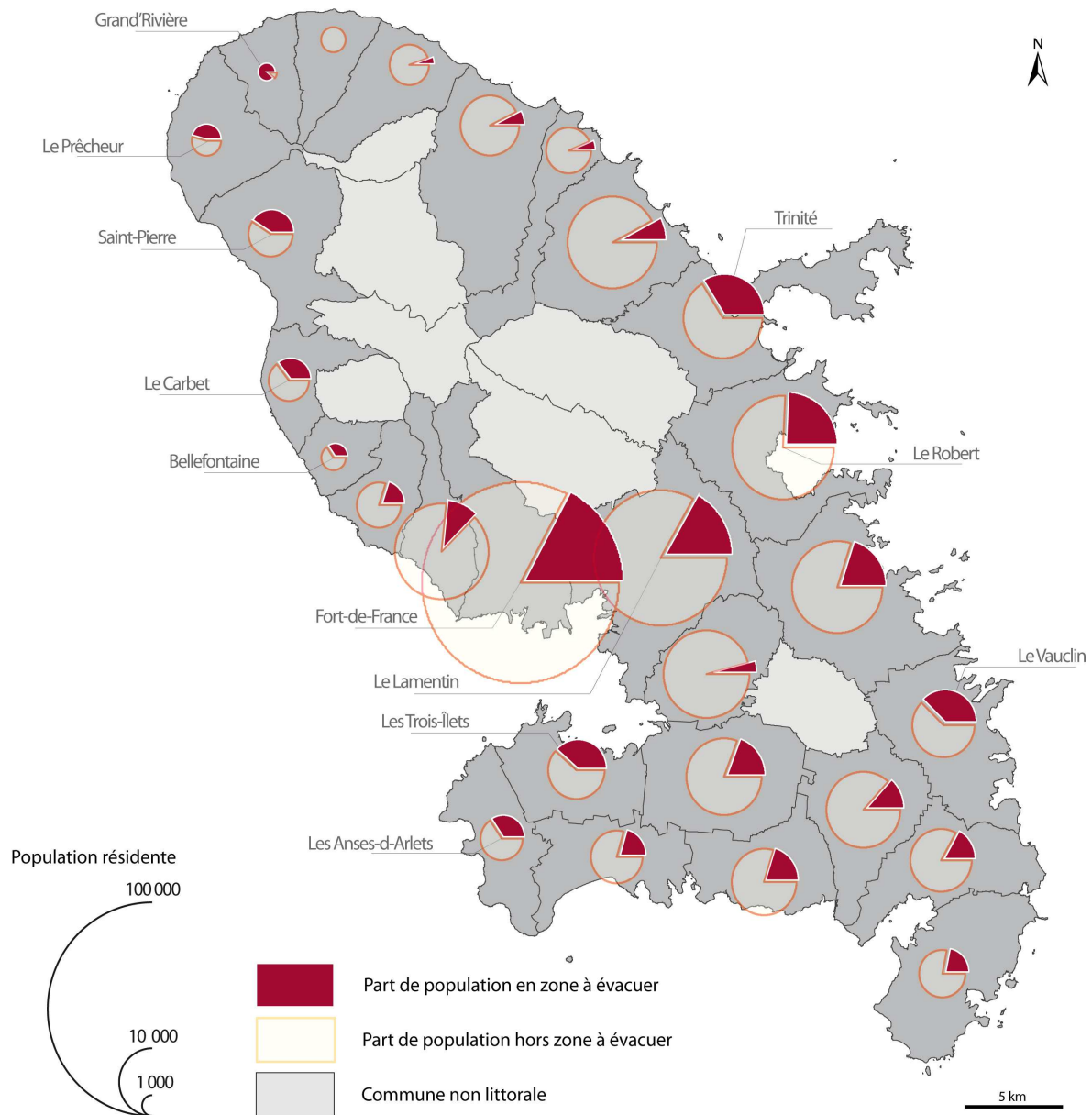


Figure 58 – Carte du nombre de personnes situées dans la zone à évacuer par commune (population résidente nocturne)

A l'extrême nord de la Martinique, la commune de Grand'Rivière présente la proportion de population la plus importante située dans la zone à évacuer, avec un peu plus de 88 % (608 personnes)¹²⁴. Les communes de Fort-de-France et du Lamentin possèdent le plus grand nombre de personnes à évacuer avec respectivement 15 413 et 6 715 personnes résidant à moins de 10 m d'altitude. Plus d'un tiers de la population communale en zone à évacuer réside sur les communes du Prêcheur, de Saint-Pierre, des Trois-Ilets, du Vauclin, du Carbet, de Bellefontaine, des Anses-d'Arlet et de Trinité. Enfin, sur la côte atlantique, c'est au Robert que le nombre de personnes à évacuer est le plus important avec 5 751 personnes.

¹²⁴ Depuis 2009, le nombre de personnes exposées en valeur absolue a diminué étant donné la forte déprise démographique dans cette commune particulièrement isolée. Entre 2009 et 2012, la population communale de Grand'Rivière a baissé de 21.8 %.

7.1.3. Création d'une base de données de population multi-temporelle pour deux scénarios d'occupation à l'échelle infra-communale (bourgs des communes de Trinité et de Sainte-Anne)

La méthode que nous employons a été développée dans le cadre du programme de recherche MAREMOTI sur les tsunamis en Méditerranée et financée par l'ANR (Péroche, 2010). Elle repose sur un important travail de terrain qui vise à cartographier de manière précise l'ensemble des composantes d'un territoire (bâtiment, espace de plein-air et réseau routier). Après avoir vectorisé ces entités dans un SIG, une classe fonctionnelle homogène en termes d'usage et donc de fréquentation théorique leur est attribuée. Ensuite, leur Capacité d'Accueil Maximale Crédible (CAMC) est calculée en fonction de plusieurs expertises de terrain et de récoltes de données d'effectifs. Pour finir, des valeurs de fréquentation leur sont assignées au pas de temps souhaité afin de moduler la CAMC d'une classe donnée. Cette technique, particulièrement adaptée au milieu urbain, permet de restituer une cartographie dynamique des densités humaines selon plusieurs scénarios. Même si elle peut paraître chronophage, cette méthode présente l'avantage de restituer des valeurs d'occupation au plus près de la réalité du territoire et d'être facilement reproductible. Sa pertinence a été éprouvée sur plusieurs terrains d'étude, notamment sur deux îles de l'Océan Indien (La Réunion et Mayotte) dans le cadre du projet PREPARTOI (Lavigne *et al.*, 2012) et au Maroc dans le cadre du projet MAREMOTI (Leone *et al.*, 2012). Nous avons adapté la méthode sur deux secteurs, le bourg de Trinité et le bourg de Sainte-Anne, nos deux communes pilotes (figure 59). Ils ont été choisis pour la diversité de leur d'habitat, la présence de structures hôtelières, leur forte densité de population littorale et l'existence d'une zone à évacuer qui s'étend profondément à l'intérieur des terres. La taille de ces secteurs est suffisamment restreinte pour limiter le temps de travail sur le terrain à quelques semaines de diagnostic. Les scénarios proposés tiennent compte exclusivement des espaces bâtis pour une occupation nocturne en période de haute et basse saison.

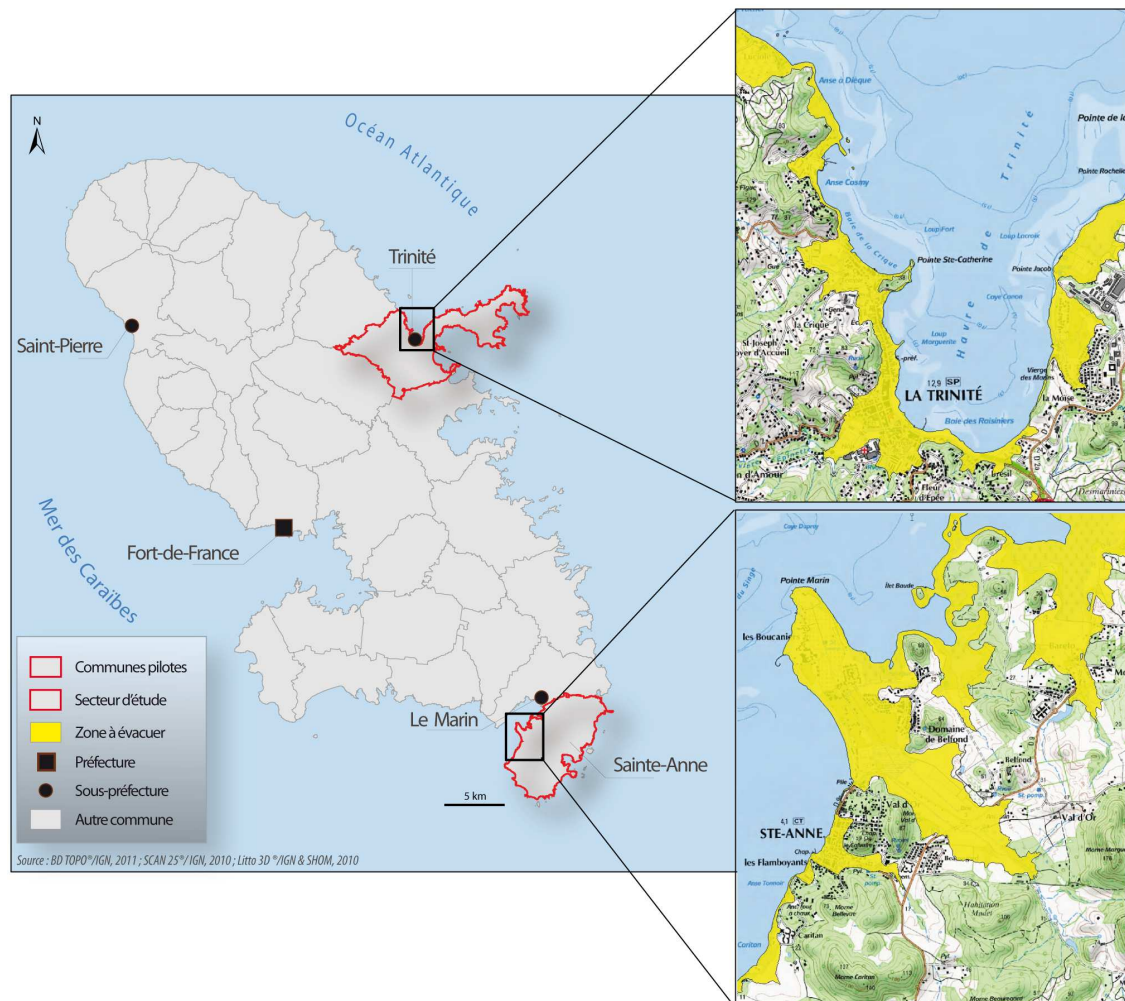


Figure 59 : Carte de présentation des secteurs d'étude à l'échelle infra-communale

7.1.3.1. Identification des fonctions du bâti

- Choix de la base de données

L'IGN propose deux bases de données cartographiques au format vectoriel contenant les limites des bâtiments : la BD Topo® et la BD Parcellaire®. La comparaison de ces deux bases de données met en évidence plusieurs approximations (tableau 22). Nous avons également consulté la table attributaire de chacune des deux bases et procédé à un rapide diagnostic visuel de la géométrie des polygones par photo-interprétation (BD ORTHO®/IGN, 2010).

Tableau 22 : Comparatif entre la BD Parcellaire et la BD TOPO (IGN, 2010)

	Géométrie habitat groupé	Géométrie habitat dispersé	Données attributaires
BD Parcellaire® IGN, 2010	Précision plus faible des limites de bâtiment	Décalage des bâtiments de plusieurs mètres	Un seul champ différencie la nature du bâti (entre construction légère et bâtiment en dur)
BD Topo® IGN, 2010	Simplification du bâti en blocs homogènes	Plus grand nombre de bâtiments numérisés	Plusieurs champs sont disponibles comme notamment la hauteur du bâtiment

Dans la mesure où notre travail de caractérisation de la vulnérabilité du bâti se fonde avant tout sur un diagnostic de terrain, nous avons fait le choix de travailler à partir de la BD TOPO® de l'IGN. Elle possède un plus grand nombre de bâtiments numérisés et dispose de données attributaires mieux renseignées. Néanmoins, avant de commencer le diagnostic de vulnérabilité sur le terrain, nous avons amélioré la base de données « bâti indifférencié » de la BD TOPO® (IGN, 2010) par photo interprétation (figure 60). La vectorisation des bâtiments en milieu urbain a été réalisée à partir de l'orthophotographie d'une résolution de 15 cm disponible suite à la couverture du département par des données LIDAR. Ce traitement est appliqué aux bâtiments dont l'altitude est comprise entre 0 et 10 m sur les deux secteurs d'étude. La vectorisation est indispensable notamment dans les zones d'habitat dense, en ville ou dans les centres des villages, elle facilite le travail de l'opérateur sur le terrain.

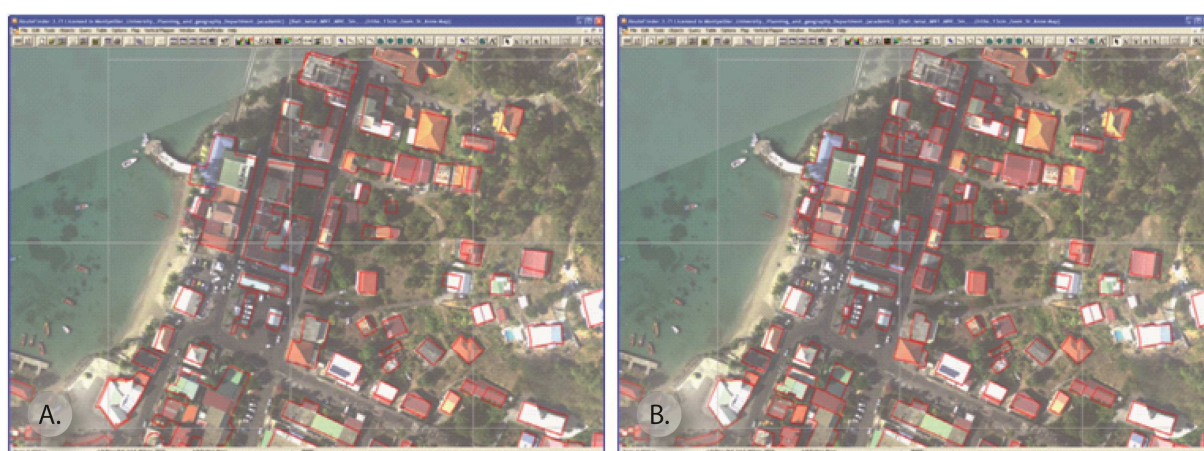


Figure 60 : Capture d'écran de la couche « BATI_INDIFFERENCIE » de la BD Topo® IGN (2010) d'origine (a.) et après numérisation manuelle par photo-interprétation (a.)

Une fois le diagnostic de terrain terminé, nous avons complété, amélioré et finalisé la vectorisation de la base de données « bâti » pour les deux secteurs. Cette nouvelle base de données compte 1 472 bâtiments. Plus de 600 polygones ont été numérisés.

- Description des classes fonctionnelles

La construction d'un modèle de mobilité humaine intra-urbain repose sur l'identification des bâtiments en fonction de leur catégorie d'usage et selon une classification normalisée. Cette étape essentielle permet d'appliquer des valeurs théoriques de fréquentation (densité et/ou effectifs). Pour nos deux secteurs d'étude nous avons créé 29 classes fonctionnelles différentes (cf. annexe 9). Chaque classe est définie par un code court et représentatif des bâtiments ou des lieux qu'il regroupe afin de faciliter son utilisation au sein d'un SIG. A chaque bâtiment sont associées deux classes fonctionnelles, une pour les étages l'autre pour le rez-de-chaussée. Elles permettent d'une part d'identifier la fonction des objets de chaque table, d'autre part de faire le lien entre ces mêmes objets et une densité de population ou une valeur de capacité d'accueil prédéfinie.

7.1.3.2. Implémentation des effectifs pour chaque espace bâti et calculs des CAMC

Deux méthodes sont employées pour caractériser la Capacité d'Accueil Maximale Crédible (CAMC) des espaces bâtis. La première se base sur la recherche de l'effectif maximum que peut recevoir une structure (données officielles, témoignages ou comptages directement sur le terrain). La seconde méthode vise à déterminer une densité théorique d'occupation de référence pour chaque classe fonctionnelle. Une fois multipliée par la surface du bâtiment, cette densité permet de définir une quantité maximale théorique d'enjeux humains.

- Les classes fonctionnelles renseignées par un effectif

La plupart des caractéristiques des Etablissements Recevant du Public (ERP) sont renseignées à partir d'un effectif réel. La récolte d'informations a fait l'objet de nombreuses démarches administratives auprès des gestionnaires locaux. Les trois principaux pourvoyeurs de données sur nos secteurs d'études sont :

- le rectorat, qui a fourni le nombre d'élèves et de personnels présents dans les établissements scolaires des communes de Trinité et de Sainte-Anne pour l'année scolaire 2012-2013 ;
- le SDIS¹²⁵ qui a procuré le fichier des ERP pour lesquels ils ont en charge la commission de sécurité. Il renseigne sur l'effectif maximum d'accueil de la structure ;
- le club martiniquais des hôteliers qui a communiqué le nombre de lits par établissement hôtelier de la commune de Trinité et de Sainte-Anne.

En ce qui concerne les ERP pour lesquels nous ne disposons pas des effectifs, tels que les restaurants ou les bars, nous sommes allés directement chercher l'information auprès des propriétaires. Dans les cas de refus, nous avons estimé la capacité d'accueil maximale de l'établissement par le comptage direct du nombre de places assises disponibles. Il s'agit évidemment d'une estimation et ne représente pas une valeur réglementaire telle que fournie par le fichier des ERP, mais elle donne tout de même une bonne estimation de la fréquentation maximale de l'établissement (hors événement particulier).

- Les classes fonctionnelles renseignées par une densité

Faute d'obtenir des données en termes d'effectifs pour certains bâtiments de type ERP, comme pour les bâtiments administratifs, nous leur avons attribué une valeur de densité théorique définie par le guide de la police des ERP (Walle, 2009). La première étape consiste à calculer leur surface de plancher¹²⁶. Cette valeur a été déterminée à partir de la surface de l'emprise au sol des immeubles calculée selon leur géométrie au sein d'un SIG puis multipliée par le nombre d'étages préalablement relevé sur le terrain¹²⁷. Toutefois, pour calculer la surface de plancher, il convient de déduire les éléments suivants à la surface développée des bâtiments :

- l'espace libéré par une porte (ou une fenêtre) lorsqu'elle est ouverte (embrasure) ;
- tout espace qui se situe côté extérieur par rapport aux portes et fenêtres de la maison (terrasse, balcon, véranda, etc.) ;

¹²⁵ Service Départemental d'Incendie et de Secours basé à Fort-de-France

¹²⁶ « La surface de plancher est égale à la somme des surfaces de plancher de chaque niveau clos et couvert, calculée à partir du nu intérieur des façades. Les loggias, toitures-terrasses, balcons ne sont pas considérés comme étant des éléments clos et couverts, ils n'entrent donc pas dans le calcul de la surface de plancher » (source : www.service-public.fr).

¹²⁷ Cette valeur correspond à la surface développée du bâtiment.

- les combles de la maison ;
- le sous-sol de la maison (sauf les parties aménagées pour l'habitation) ;
- les paliers d'escalier lorsqu'ils sont compris dans une cage (fermée par des portes).

Par conséquent, nous avons diminué de 10 % cette surface, sans distinction de classe des bâtiments pour obtenir la surface de plancher. Cette valeur correspond à la déduction forfaitaire généralement appliquée aux immeubles collectifs¹²⁸. Une fois cette surface calculée, la seconde étape vise à multiplier cette surface par les densités propres à chaque classe fonctionnelle. Comme nous distinguons la fonction des étages de celle du rez-de-chaussée, il est nécessaire de calculer la CAMC pour les deux classes fonctionnelles de façon distincte, puis d'en faire la somme. Nous avons obtenu alors la CAMC totale pour chaque bâtiment.

- Les classes fonctionnelles renseignées par un nombre de logements

Cette méthode concerne les classes fonctionnelles des bâtiments d'habitation (HCOL, HINDIV et RESID). Au cours du diagnostic de terrain, nous nous sommes attachés à relever le nombre de logements dans chaque bâtiment par le comptage du nombre de boîtes aux lettres. Pour chacun d'eux, cette valeur a été multipliée par le nombre moyen de personnes par résidence principale¹²⁹. Ce calcul a été effectué à partir des « Chiffres clés » publiés par l'INSEE pour l'année 2009 (Mise à jour 28 juin 2012). Cette valeur est identique pour les communes de Trinité et de Sainte-Anne, à savoir une valeur moyenne de 2.5 personnes par ménage. Les valeurs de population par habitation ont ensuite été agrégées au carroyage de 50 m de côté (figure 61).

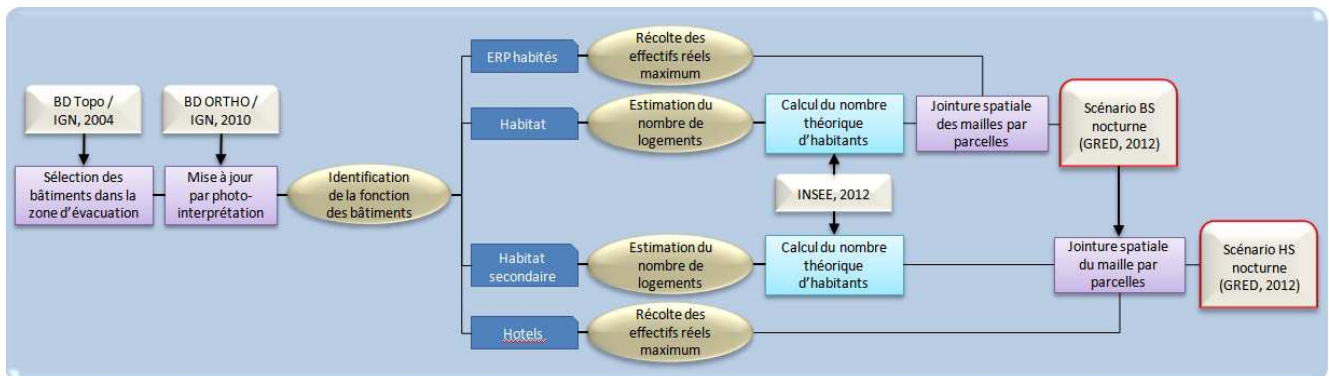


Figure 61 : Schéma méthodologique de l'estimation de l'occupation nocturne en période de basse et haute saison des populations situées en zone à évacuer à l'échelle infra-communale

7.1.3.3. Description des scénarios de nuit définis selon l'occupation théorique des habitations

Les deux secteurs d'études à l'échelle infra-communale sont renseignés par deux scénarios d'occupation nocturne (figure 62). Le premier prend en compte les logements privés à vocation de résidence principale ainsi que les logements de fonction, internats et établissements de santé. Il s'agit du scénario minimisant le nombre d'évacués, dit de basse saison (BS). On compte 748 bâtiments habités pour une population exposée de 4 234 individus. Le second tient compte des bâtiments

¹²⁸ Valeur qui est fixée par le décret n°2011-2054 du 29 décembre 2011, publié au JO du 31 décembre 2011 relative à la réforme de la surface de plancher instaurée par l'ordonnance n°2011-1559 du 16 novembre 2011.

¹²⁹ Le nombre moyen de personnes par résidence principale est calculé à partir de la population des ménages. Au sens du recensement de la population, un ménage est constitué de l'ensemble des personnes apparentées ou non, qui partagent la même résidence. Le nombre de ménages est donc égal au nombre de résidences principales.

précités ainsi que des hôtels et des logements de vacances. Il s'agit du scénario maximisant le nombre d'évacués, dit de haute saison (HS). On compte 876 bâtiments habités pour une population exposée de 5 775 individus. Hormis l'estimation du nombre théorique d'évacués et de victimes potentielles, ces scénarios de fréquentation complémentaires permettent également d'évaluer la fréquence de passage cumulé des itinéraires d'évacuation ainsi que de discuter de la pertinence du choix des sites refuges sollicités par notre modèle d'accessibilité sur graphe.

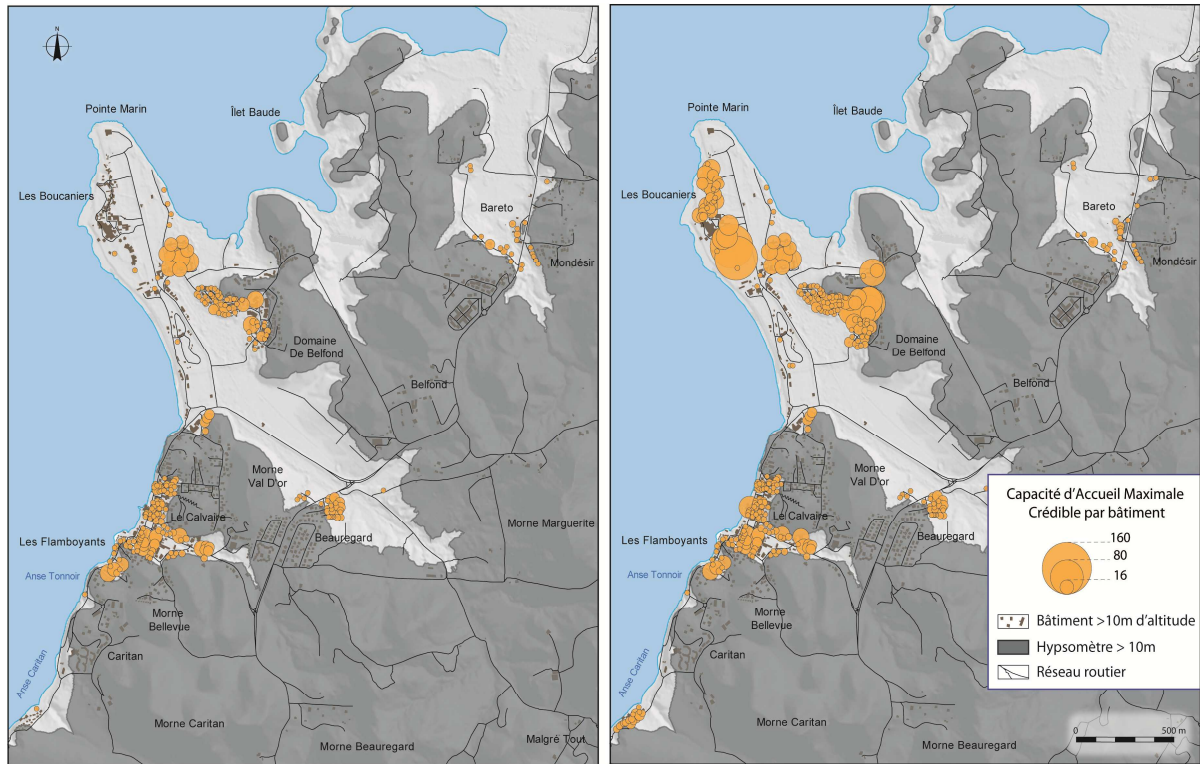


Figure 62 : Exemple des CAMC par bâtiments habités pour les scénarios nocturnes de basse saison (à gauche) et haute saison (à droite) sur le bourg de la commune de Sainte-Anne

7.1.3.4. Comparaisons des données d'enjeux humains pour les scénarios nocturnes

Nous proposons de comparer les données de population de la DGFIP/INSEE aux données issues du diagnostic de terrain (scénario nocturne en basse saison). Elles sont facilement comparables car elles sont agrégées sur la même base carroyée.

- Estimation de la population

Sur les deux secteurs d'étude, nos relevés de terrain font apparaître 1 617 individus supplémentaires par rapport aux données de la DGFIP/INSEE (tableau 23). Cet écart s'explique par des méthodes de comptage et des données de référence différentes. En effet, la DGFIP recense uniquement les logements dans lesquels réside un ménage fiscal. Ce protocole de comptage sous estime sensiblement la population réelle car il ne tient pas compte des populations non soumises à la taxe d'habitation. *A contrario*, au cours des relevés de terrain tous les logements sont comptabilisés : les maisons d'habitation principale mais aussi les logements de fonction, les logements prêtés à titre gratuit, les casernes, les internats, les hôpitaux ou encore les maisons de retraite. Pour certains, ces espaces bâtis

présentent un fort potentiel d'accueil de populations, et d'autres nécessiteraient des besoins humains et matériels particuliers en cas d'évacuation. Par exemple à Trinité, nous avons dénombré les familles qui habitent dans la gendarmerie mais également les personnes hébergées à l'internat de l'Ecole de Formation Professionnelle aux Métiers Maritimes (EFPMA). Il est donc essentiel de les répertorier par un travail systématique de relevés de terrain. Enfin, le repérage des habitations vacantes s'avère difficile, ce qui justifie aussi les différences entre les résultats et creuse d'autant plus l'écart.

Tableau 23 : Comparaison des bases de données disponibles

Secteur d'étude	DGFIP/INSEE		Relevé de terrain		Ecart	
	Nombre de mailles	Population	Nombre de mailles	Population basse saison	Nombre de mailles habitées	Population
Bourg de Trinité	301	1 874	181	2 903	120	1 029
Bourg de Sainte-Anne	361	743	115	1 331	246	588
Total	662	2 617	296	4 234	166	1 617

- Répartition géographique de la population

Les écarts les plus importants entre les deux bases de données apparaissent dans le nombre de mailles habitées. Selon la méthode DGFIP/INSEE, plus de 660 mailles sont renseignées par une valeur de population, tandis qu'on en dénombre seulement 296 pour le diagnostic de terrain, soit moins de la moitié. Cet écart s'explique par l'absence d'identifiant commun aux deux bases des données employées par la méthode DGFIP/INSEE permettant d'attribuer des informations directement aux bâtiments. Le niveau le plus fin d'agrégation de la donnée est donc la parcelle. Ainsi, lorsque la taille de la parcelle est importante, certaines portions de territoire normalement inhabitées sont représentées par une valeur de population, cela se vérifie particulièrement sur le secteur de la commune de Sainte-Anne où l'écart du nombre de mailles est plus important (68 %). La localisation des enjeux humains est donc faussée, notamment pour les parcelles de grande superficie (figure 63).

Les écarts de quantité et de spatialisation des populations sont importants entre les deux bases de données. Les valeurs issues du diagnostic de terrain fournissent des informations bien plus fiables par rapport aux données à l'échelle départementale. Pour autant, ce travail comparatif ne permet pas de définir une marge d'incertitude qu'il serait possible d'intégrer ou d'extrapoler aux scénarios à l'échelle de l'île.

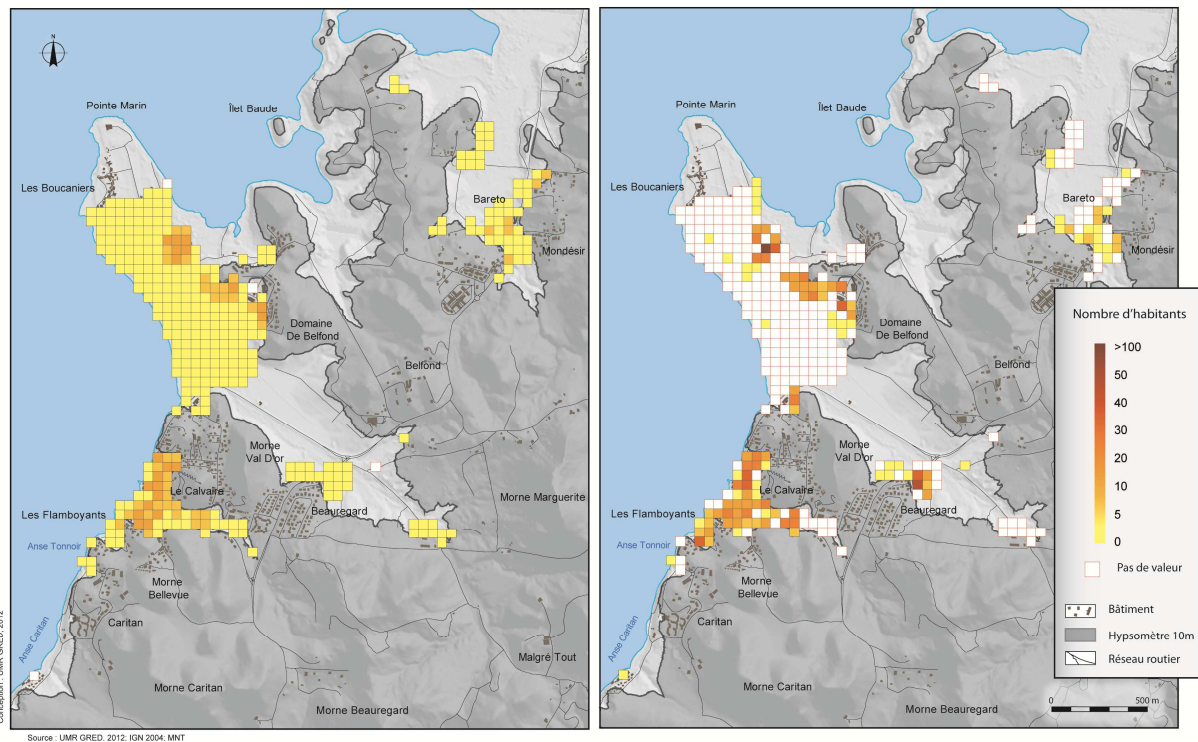


Figure 63 : Cartes de fréquentation de population du secteur du bourg de Sainte-Anne selon la base de données IGN/DGFIP (à gauche) et par relevés de terrain (à droite)

Moins bien spatialisées et certainement sous estimées, les données fournies par la DGFIP® présentent néanmoins trois intérêts majeurs :

- une échelle d'application départementale issue de données nationales homogènes ;
- l'estimation d'une quantité de population agrégée sur un carroyage plus fin que celui à 200 m tel que proposé par l'INSEE ;
- un temps de traitement initial raccourci depuis que le CETE NP propose une version simplifiée des données extraites de la base MAJIC.

Même si cette donnée offre des résultats intéressants à l'échelle départementale, elle ne permet pas d'obtenir une représentation suffisamment précise de la problématique liée à l'évacuation en Martinique. Elle est beaucoup trop générale pour la création de scénarios de risque à visée opérationnelle à l'échelle communale. En effet, elle ne prend pas en compte les ERP (les hôtels, les villages vacances...) et l'information agrégée à l'échelle de la parcelle entraîne des erreurs quant à la localisation des enjeux humains exposés. La méthodologie qui consiste à relever directement sur le terrain le nombre de logements par bâtiment est facilement généralisable et ne présente pas de difficultés particulières quant à sa mise en œuvre. Néanmoins, cette méthode demande beaucoup de temps, nous avons mis en moyenne deux semaines par secteur pour la réalisation de l'ensemble des tâches : numérisation manuelle du bâti, validation sur le terrain, récolte des données de fréquentation et traitements cartographiques. Il s'agit d'une méthode chronophage mais fiable.

7.1.4. Estimation des enjeux humains sur les plages

7.1.4.1. Définition et techniques de comptages

Suivant les scénarios de gestion de crise préétablis (chapitre 4), les plages devront être évacuées quel que soit le niveau d'alerte tsunami. Pour mettre en exergue les difficultés éventuelles d'évacuation des populations (absence de sites refuges accessibles, isolement, forte concentration d'enjeux touristiques), il est indispensable de réaliser l'évaluation de la fréquentation des plages. En Martinique à ce jour, aucune étude de fréquentation d'envergure n'a été menée à l'échelle départementale. Seuls quelques comptages sont réalisés ponctuellement au cours d'événements culturels ou sportifs pilotés par les communes elles-mêmes. Il n'existe aucun protocole de comptage ni de suivi dans le temps. Toutefois, de nombreuses études de fréquentation des plages sont menées sur les littoraux du monde entier. Elles abordent principalement la question de la qualité des plages au sens large du terme, en mesurant par exemple leur attractivité (Duvat, 2009). Deux principaux sujets sont étudiés, parfois conjointement car ils sont corrélés. Le premier, en lien avec la préservation de l'environnement, vise à estimer la capacité de charge maximale du milieu. Il s'agit de représenter la limite à partir de laquelle le littoral peut se voir dégradé. On mesure alors l'impact de la présence humaine et du développement touristique sur le littoral. Le second, à caractère socio-économique, concerne le rapport entre la fréquentation des espaces littoraux et les retombées économiques pour un territoire. Ces données servent à définir les pratiques touristiques, à améliorer la qualité de l'accueil et à orienter les politiques d'aménagement en conséquence. Ces études de qualité des plages sont réalisées par des observatoires permanents (Observatoire national de la mer et du littoral, IFREMER), dans le cadre de recherches à portée scientifique ou conduites par des collectivités (commune de Sainte-Anne).

L'étude de la fréquentation des littoraux par les géographes, sociologues et économistes permet de répertorier différents critères pour qualifier les qualités environnementales, paysagères ou encore l'attractivité touristique de ces espaces. La littérature scientifique est vaste sur ce domaine, à l'image des champs d'application, des spécificités et des enjeux propres à chaque territoire. Les scientifiques déploient des méthodes d'évaluation propres au contexte des sites étudiés (type de milieu, échelle spatiale) et à la nature des informations recherchées (qualitatives ou purement quantitatives). Des grilles méthodologiques plus ou moins complexes sont réalisées pour l'évaluation de la qualité des plages (Leatherman, 1997 ; Morgan, 1999 ; Pereira *et al.*, 2003 ; Micallef et Williams, 2004 ; Duvat, 2009). Elles visent à définir des critères « objectifs ». Elles sont parfois complétées par des enquêtes auprès des usagers pour déterminer des qualités « subjectives » (Roca, 2008 ; Duvat, 2009 ; Roca, 2009). Certaines recherches portent uniquement sur les effectifs de fréquentation multi-horaires pour déterminer des capacités de charge (Zacaria *et al.*, 2011) ou pour améliorer l'aménagement et la sécurité des plages (Kammler et Schernewski, 2004 ; Jiménez *et al.*, 2007).

L'étendue de notre terrain d'étude, le grand nombre de plages, leur dispersion sur tout le pourtour de l'île, le manque de moyens humains et de temps sur place ne permettent pas de faire une étude systématique de fréquentation. Pour pallier à ces difficultés de mise en œuvre d'un comptage individuel des plages, nous proposons une méthode fondée sur l'élaboration d'une typologie homogène de plages en termes de fréquentation, en fonction de critères issus de la littérature et de

notre observation de terrain. A chaque type de plage et pour plusieurs scénarios, des densités d'occupation théoriques issues de comptages leur seront attribuées. La valeur obtenue multipliée par les surfaces des plages numérisées permet de réaliser des estimations de fréquentation à l'échelle départementale. Cette méthode fournit des ordres de grandeur quant à la fréquentation des plages pour plusieurs scénarios journaliers en période de haute saison. Cette information cruciale et indispensable n'est pas connue aujourd'hui en Martinique.

7.1.4.2. Numérisation et classification des plages

Nous limitons notre étude à la définition de plages en tant qu'espace littoral d'accrétion sableuse. Elles ont été numérisées par photo-interprétation à partir de la BD Ortho® (IGN, 2010) à une échelle de saisie constante de 1 : 500^{eme}. Chaque polygone vectorisé correspond à la surface de la plage disponible pouvant accueillir les usagers. Cette surface utile a été délimitée dans sa partie basse par la ligne de démarcation entre le sable humide et le sable sec. La limite haute de la plage est définie par les éléments d'aménagements anthropiques ou les barrières naturelles (falaise, étang, etc.). Dans le cas où l'arrière plage est couverte de végétation, seule la strate végétalisée de type arboré (hors palétuviers) a été conservée. Les surfaces en eau courante ou stagnante, encombrées par divers objets (bateaux, déchets) ou bétonnées n'ont pas été vectorisées en tant que plage.

Pour l'ensemble de la Martinique, nous avons ainsi identifié 322 plages dont les surfaces varient de 50 m² à 24 000 m² pour une moyenne de 1 920 m². Ce sont les communes de Sainte-Anne et de Trinité qui présentent les surfaces de plage cumulées les plus importantes, avec respectivement 152 400 m² et 79 600 m².

La vectorisation des plages par photo-interprétation introduit un certain nombre de biais dans la construction même de la base de données géographiques. En tant que processus d'abstraction du monde réel, la représentation cartographique génèrent forcément des imprécisions géométriques (Girres, 2012). Le premier niveau d'incertitude porte sur la délimitation même de l'objet géographique. Il peut être lié à deux causes principales :

- la qualité de la source de donnée

L'orthophoto (BD ORTHO®, 2010) employée pour la photo interprétation est constituée d'une mosaïque de clichés qui présentent parfois de fortes disparités d'ensoleillement et d'apparences colorées. Le produit est issu d'un compromis entre les différents clichés à l'échelle départementale (IGN, 2011).

Aspect visuel

Le défaut d'aspect visuel le plus problématique s'observe dans les zones d'ombre portée, liées au relief ou à la végétation. Au niveau de ces zones, l'image est « bouchée » (les pixels sont très sombres voire noirs) et la photo-interprétation est délicate.



Dates multiples des clichés

L'orthophoto est composée de plusieurs dalles réalisées à différentes dates. Aussi, en fonction des conditions de météo-marine le jour de la prise de vue, le jet de rive diffère et la limite sable sec/sable humide peut varier de quelques mètres sur une même plage.



- la variabilité de l'objet numérisé

Les plages de sable de par leur composition sédimentaire sont des espaces particulièrement sensibles aux actions des forces naturelles (marin, éolien, marée) sur des périodes de temps variables (journalier, saisonnier, ponctuel). L'évolution de leur profil topographique peut modifier de manière significative leur surface utile et donc leur fréquentation.

Condition météo-marine

La limite basse du polygone de plage varie dans le temps en fonction de plusieurs facteurs comme le marnage, la hauteur de houle, la direction du vent. Certaines plages en fonction de leur exposition et de la bathymétrie locale sont plus ou moins impactées par des transferts sédimentaires importants.



Le second niveau d'incertitude porte sur l'imprécision géométrique du tracé en termes de positionnement des limites et de simplification des contours des polygones de plage par l'opérateur au sein du SIG. Certaines plages du département présentent une couverture végétale d'arrière plage relativement dense, ce qui complexifie la tâche de numérisation. A titre d'exemple, un décalage de 2 mm dans la numérisation d'un point à une échelle de 1 : 500^{eme} représente 1 m sur le terrain.

Au vu de ces principales limites, un repérage sur le terrain a été effectué pour les plages qui présentent une forte fréquentation de population. Cet effort devrait être systématisé au moins pour vérifier la pertinence de la limite haute pour l'ensemble des plages de la Martinique. La limite basse devrait être réactualisée plus régulièrement en fonction des saisons et/ou des épisodes climatiques extrêmes et des données disponibles.

7.1.4.3. Attribution du type de plage en unité homogène de fréquentation

Certaines études, comme celle de Micallef et Williams (2004), proposent de quantifier un nombre théorique de personnes par surface utile de plages en fonction d'une valeur d'occupation moyenne standard. L'auteur a fixé cette valeur à 1 personne/3 m² pour les plages de l'île de Malte. Les recherches bibliographiques de Roca *et al.*, (2008), recensent 18 autres capacités d'occupation moyenne de plages, variant de 4 à 25 personnes/100 m² selon les auteurs. Ce type d'approche permet d'estimer facilement

mais assez grossièrement une capacité de charge maximale. A l'échelle départementale de notre travail, cette méthode est beaucoup trop réductrice pour représenter la réalité de terrain. Nous avons donc construit une typologie des plages de la Martinique en huit classes afin de leur attribuer des valeurs communes de densité théorique de fréquentation. Leurs critères de différenciation reflètent leur niveau de fréquentation. Ces catégories sont définies sur la base de critères relevés dans la littérature et par des observations de terrain. Nous en avons retenu trois, eux-mêmes renseignés par plusieurs variables (tableau 24) :

- l'accessibilité : présence d'une aire de stationnement plus ou moins aménagée, la proximité avec le réseau routier ou encore la distance de marche sur le sentier ;
- les aménagements sur place : installation de commodités, de points d'eau ou encore d'espaces de pique-nique ;
- les infrastructures pour des activités de détente et de loisirs : implantation de services hôteliers, de restaurants, de bases de plein-air (activités nautiques, boutiques).

La présence ou l'absence de l'un de ces critères permet de classer les différentes plages. Certaines variables sont facultatives car non discriminantes pour certains types de plages comme la présence ou non d'équipements de baignade. Quelques plages appartenant à une même unité morphologique peuvent être divisées en plusieurs polygones en fonction des critères qu'elles remplissent. Le découpage est réalisé à partir des discontinuités de fréquentation observées sur le terrain. Ainsi, on compte 352 polygones vectorisés qui représentent des plages ou des portions de plages dont la valeur de fréquentation est homogène. La somme totale de la surface des zones numérisées représente environ 67,58 ha.







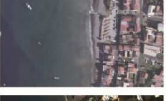









Plusieurs autres facteurs déterminants influencent la fréquentation des plages¹³⁰. Certains très subjectifs sont difficiles à intégrer de façon rigoureuse dans notre typologie, comme par exemple la notoriété d'une plage. En effet, à niveau d'équipement équivalent, voire inférieur, certaines plages de la Martinique présentent une forte attractivité touristique, ce qui modifie de manière significative leur fréquentation. Les raisons peuvent être liées à leur qualité environnementale, la présence d'une curiosité géologique ou anthropique ou tout simplement la beauté du site. Afin de pallier cette limite, nous avons procédé au comptage de fréquentation, hors typologie, de deux plages particulièrement appréciées en Martinique : la plage de Grande Anse des Salines (commune de Sainte-Anne) au sud et la plage d'Anse Coulevre (commune du Prêcheur) au nord caraïbe.

D'autres facteurs extrinsèques peuvent influencer la fréquentation des plages comme les conditions météo-marines, la présence de pollution littorale ou de dégradation du milieu marin¹³¹ par exemple. Le premier de cette liste est probablement le facteur qui peut faire varier de manière la plus importante et soudaine la fréquentation des plages. Nous nous sommes attachés à effectuer nos comptages uniquement au cours de journées ensoleillées. Seules deux campagnes de comptage ont dû être reportées ultérieurement pour cause de pluie sur certaines plages de l'île.

¹³⁰ La présence de postes de secours, critère très fréquemment repris dans la littérature scientifique, n'est pas considérée ici, car très peu de communes en disposent. S'il en existe, ils ne sont généralement pas ouverts ou très exceptionnellement pour les cours de natation en mer.

¹³¹ Exemple de l'échouage d'algues sargasse.

Tableau 24 : Typologie des plages martiniquaises et critères d'identification associés

Type de plage	Code	Descriptif	Capture ortho	Photo terrain	Accessibilité					Infrastructures			Activité touristique
					Parking aménagé	Aire de stationnement	Accès direct par route carrossable	Marche < 400 m	Marche > 400 m	Douche/toilette	Equipement public (tabl., carbet, poubelle...)	Equipement de baignade	Restauration, base nautique, hôtel
Principale touristique	PPT	Plage qui présente un attrait touristique très important grâce notamment à sa bonne accessibilité et ses nombreux aménagements			O	/	O	/	/	O	O	F	O
Secondaire touristique	PST	Plage qui offrent peu voire aucun services mais qui est facilement accessible par la route			F	O	O	F	/	F	O	F	F
Urbaine fréquentée	PUF	Plage située en milieu urbain et aménagée pour l'accueil du public			F	F	O	/	/	F	O	F	O
Urbaine non fréquentée	PUNF	Plage située en milieu urbain qui ne présente aucun aménagement et qui n'est pas fréquentée pour la baignade			F	F	O	/	/	/	/	/	/
Privée Semi-privée	PSP	Plage privée des hôtels, ou située à proximité dont l'accès peu être réservé ou limité aux clients de la structure			F	/	O	/	/	F	F	F	O
Naturelle	PN	Plage dite "naturelle" dont l'isolement géographique et la faible accessibilité nécessite au moins plusieurs minutes de marche			F	F	/	F	F	/	F	/	/
Pêcheurs	PP	Plage fréquentée uniquement par les pêcheurs comme espace de mise à l'eau, de mouillage ou d'échouage des yoles			F	F	F	/	/	/	F	/	/
Non fréquentée	PNFQ	Plage habituellement non fréquentée hormis ponctuellement lors d'événements spécifiques			/	/	F	F	F	/	/	/	/

O Obligatoire

F Facultatif

/ Absent

7.1.4.4. Présentation de la méthode de comptage employée et résultats

- Choix de la période de comptage

En Martinique, les espaces littoraux et notamment les plages sont très fréquentés. Leurs usages et les activités pratiquées sont variables dans l'espace comme dans le temps. Elles diffèrent aussi en fonction du type de population, résidente ou non (locaux, métropolitains, touristes), de l'âge et du genre des individus (Desse, 2006). De décembre à mai, c'est à la saison sèche, dite du Carême que la fréquentation des plages culmine. C'est à cette période que les touristes sont présents sur les plages tout comme les résidents. Les statistiques d'occupation des hôtels montrent bien ces variations touristiques, avec des taux moyens de remplissage supérieurs à 50 % (figure 64). Les pics de fréquentation des mois de juillet et d'août correspondent à la période temporaire de « retour au pays ». Au cours de ces deux mois, les antillais vivant en métropole ou les personnes ayant des connaissances sur l'île profitent des vacances d'été pour revenir en Martinique. Malgré tout, la fréquentation des plages reste globalement limitée compte tenu de la présence restreinte de touristes et du départ des métropolitains résidents de Martinique (Desse, 2006). Ainsi, la période de faible fréquentation, dite d'Hivernage, s'étend de juin à novembre.

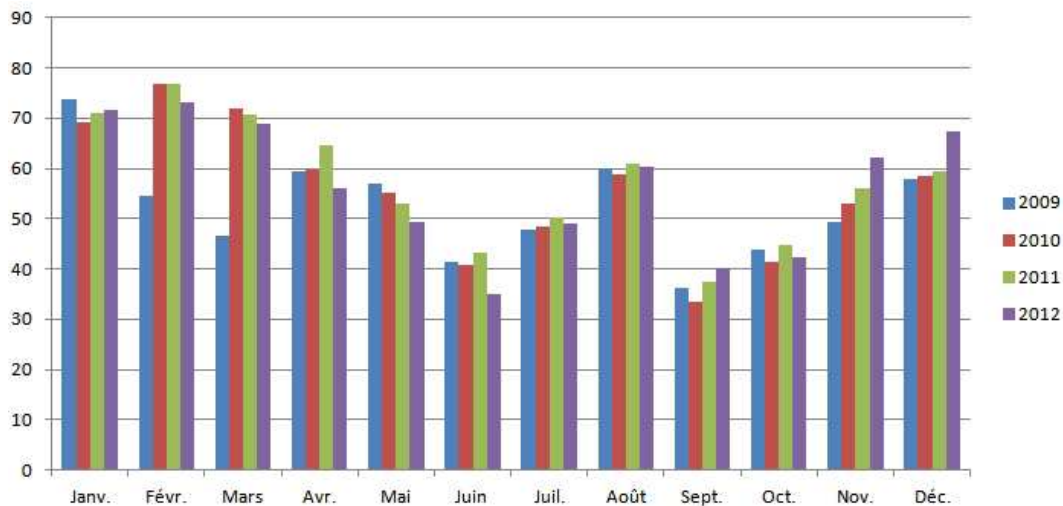


Figure 64 : Taux d'occupation mensuel des hôtels homologués du département de la Martinique de 2009 à 2012, source : CMT (2013)¹³²

La fréquentation touristique de l'île n'est pas homogène tout au long de l'année. Sur une moyenne de 5 ans entre 2009 et 2012, le mois d'octobre est celui qui attire le moins de touristes en Martinique tandis que le mois d'août est le plus fréquenté avec respectivement 26 566 et 54 772 touristes soit une variation de près de 50 % (48,48 %).

La période de comptage s'est déroulée sur deux semaines entre le 15 mars et le 1^{er} avril 2013, en pleine période de haute saison touristique. Les résultats des comptages représentent donc des valeurs hautes de fréquentation sans pour autant atteindre les maxima possibles, car ils ont été réalisés hors période

¹³² Source : site internet du Comité Martiniquais du Tourisme, <http://www.martinique.org/>, consulté en février 2013

scolaire aussi bien en Martinique qu'en métropole. Deux autres séries de comptages ont été effectuées sur les plages de référence aux cours du week-end de Pâques, du samedi 30 mars au 1^{er} avril 2013. Ce week-end représente un scénario maximisant hors événement particulier sur une plage isolée (encadré 11). Il constitue la situation de plus forte exposition des enjeux humains sur les plages à l'échelle départementale en cas de tsunami.

Encadré 11. Fréquentation des plages en Martinique lors du week-end de Pâques

Bien que les périodes estivales et scolaires concentrent un grand nombre de vacanciers sur les plages, c'est lors du week-end de pâques que leur fréquentation explose et atteint son paroxysme. C'est une période particulière pour les martiniquais qui fêtent la fin du carême en famille. Toutes les plages de l'île sont occupées le temps d'un week-end. C'est l'occasion de pique-niquer en famille pour manger le « Matoutou », une recette traditionnelle à base de crabe. Parfois, dès la veille du week-end, plusieurs membres d'une famille « réservent » et préparent l'emplacement du campement. On y tend des bâches entre les arbres pour se protéger du soleil ou de la pluie et des tentes sont installées. Même si la fréquentation de ces espaces est plus faible la nuit, un grand nombre d'enjeux humains restent présents 24h/24 au cours de ces trois jours. Seuls des événements plus ponctuels comme la course nautique du Tour des Yoles Rondes à la Martinique qui a lieu chaque année pendant une semaine entre fin juillet et début août concentre un plus grand nombre d'enjeux humains.

- Choix du jour et de l'heure de comptage

En tant qu'espace de récréation, les plages sont principalement fréquentées en week-end notamment par les populations locales (Desse, 2006). Un comptage a donc été effectué les week-ends. Mais, c'est au cours de la semaine qu'une alerte tsunami est la plus probable. C'est pourquoi trois comptages ont été effectués par secteur du lundi au vendredi de manière à obtenir des valeurs de fréquentation moyenne plus fiables.

Le choix de la tranche horaire des comptages a été déterminé suite à un premier comptage multi-horaire de la plage de Grande Anse des Salines (commune de Sainte-Anne) qui montre un taux de fréquentation plus élevé entre 14h et 17h (Leone *et al.*, 2012). Cette information a été confirmée par les données de comptage de trafic routier automatisé d'une station localisée sur un tronçon routier qui dessert plusieurs plages de la commune de Sainte-Anne (*cf.* annexe 10). Cette source de données confirme également que la fréquentation est plus élevée les week-ends. Ainsi, nous avons fait le choix de procéder au comptage des usagers de cette plage entre 14h et 17h pour un scénario en semaine et un scénario en week-end. Il ne s'agit certainement pas du créneau horaire correspondant à la plus forte fréquentation de l'ensemble des catégories de plage mais c'est le meilleur compromis.

- Choix de la méthode de comptage

Les études et les suivis de fréquentation des milieux littoraux se scindent en trois grandes familles complémentaires : quantitative, qualitative et comportementale (Le Corre *et al.*, 2011 ; Le Berre *et al.*, 2013). Chacune repose sur un large éventail de méthodes, par exemple Le Corre *et al.* (*ibid.*) en dénombrent seize dans leur revue de littérature. Chaque méthode vise à quantifier la fréquentation des milieux littoraux et insulaires terrestres grâce à l'utilisation de photographies aériennes (Lemahieu 2010, Le Berre *et al.*, 2013) ou de photographies au sol (Robert *et al.*, 2008, Colas, 2011) ou de vidéos (Kammler et Schernewski, 2004).

Nous avons comparé les résultats de trois techniques de comptage différents afin de choisir celle qui offre le meilleur rapport temps d'exécution/qualité de données dans le contexte martiniquais. La plus classique est le comptage par observation directe du nombre de personnes présentes. Il est réalisé par un agent qui se déplace le long de la plage sur une période de temps la plus courte possible. Une seconde technique permet de compter le nombre de personnes *a posteriori*, à partir de photographies prises depuis un point haut ou éloigné de la plage. Une troisième consiste à extrapoler un nombre théorique de personnes à partir du nombre de voitures stationnées à proximité des plages. Les trois ont été menées quasi-simultanément sur une même plage, puis comparées. Les deux dernières techniques requièrent un temps d'exécution plus court mais les différences de résultats obtenus avec la première qui nous sert d'étalon sont beaucoup trop importantes. Nous retenons donc la méthode classique, simple d'exécution et largement testée et validée par la communauté scientifique, le comptage par observation directe (Le Corre *et al.*, 2011).

Nous avons défini plusieurs plages de référence pour lesquelles les comptages ont été effectués de manière systématique. Néanmoins, afin de rendre compte des différences de fréquentation qui existent à l'échelle du territoire Martiniquais (Dehoorne *et al.*, 2012), nous avons choisi plusieurs plages de référence pour une même classe sur trois secteurs de l'île : le Nord Caraïbe, l'Ouest Atlantique et le Sud de l'île (figure 65). Cette méthode permet de lisser sensiblement les valeurs de densité obtenues suite aux comptages et ainsi de mieux rendre compte d'une fréquentation moyenne des plages à l'échelle de l'île. Le comptage manuel du nombre d'usagers des plages a été réalisé par deux opérateurs au départ de l'extrémité des plages, une fois à l'aller et une fois au retour. Le nombre d'usagers a été calculé selon la moyenne des quatre valeurs. Les limites de plages, préalablement numérisées sur SIG, ont permis de cadrer la zone de comptage. A noter que les personnes dans l'eau au moment du passage de l'agent sont comptabilisées alors que celles pratiquant un sport nautique ou présentes sur un bateau au mouillage sont exclues de la zone de comptage.

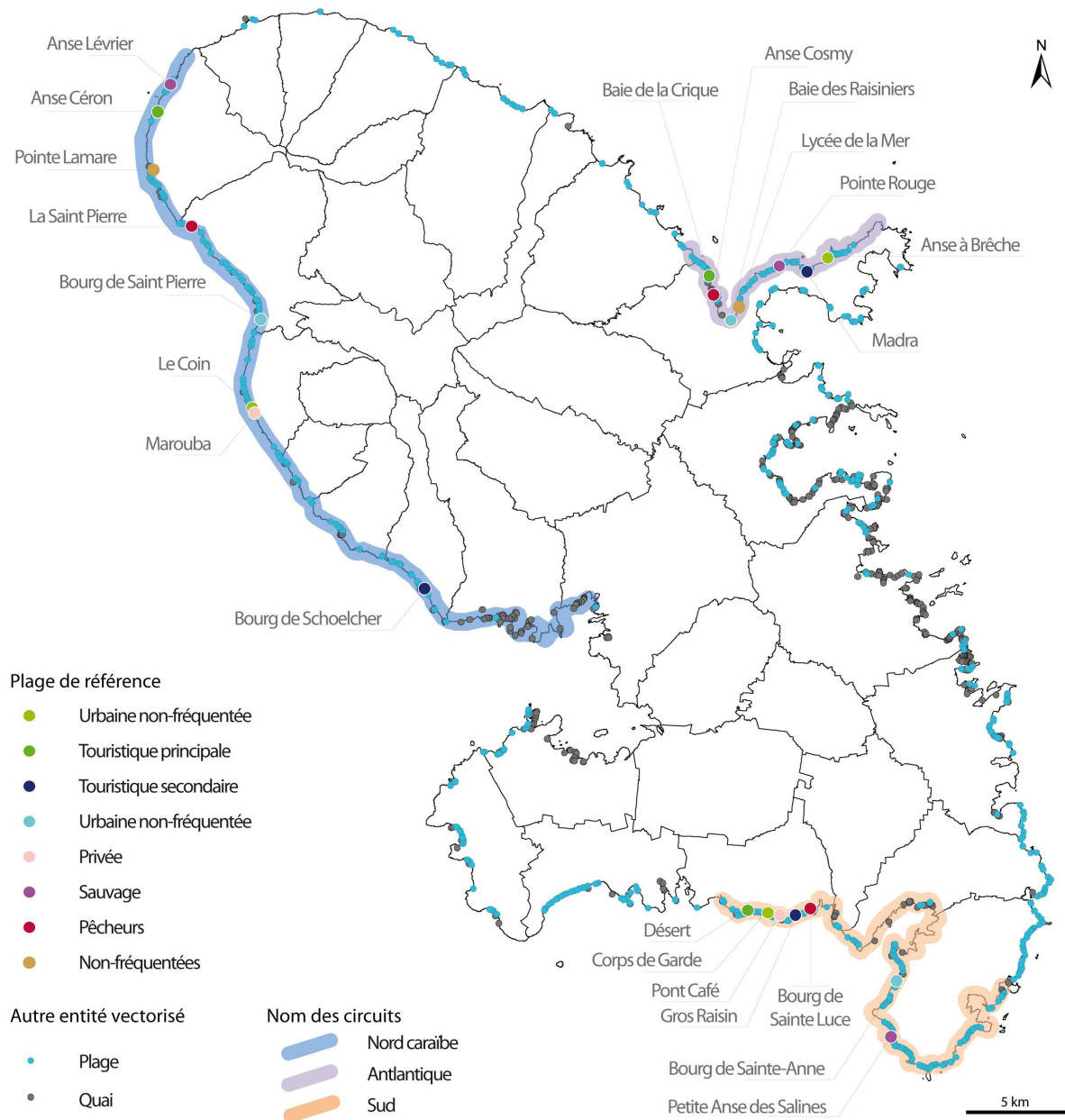


Figure 65 : Carte de localisation des circuits de comptage réalisés et des plages de référence associées

- Calcul des densités d'occupation

A partir des 95 comptages effectués, 24 densités théoriques ont été calculées. Elles renseignent trois scénarios de fréquentation différents pour 8 types de plages (figure 66). La plus faible densité est de 0.07 pers/ 100 m² pour les plages « non fréquentées » pour un scénario en semaine et la plus élevée est de 10 pers/100 m² pour les plages « touristiques principales » à Pâques. Chaque plage de même type de fréquentation est renseignée par la densité associée à chacun des trois scénarios. La valeur de densité est multipliée par la surface utile de chaque plage dans un SIG. Les autres plages sont renseignées par extrapolation à partir des valeurs de densité (figure 67).

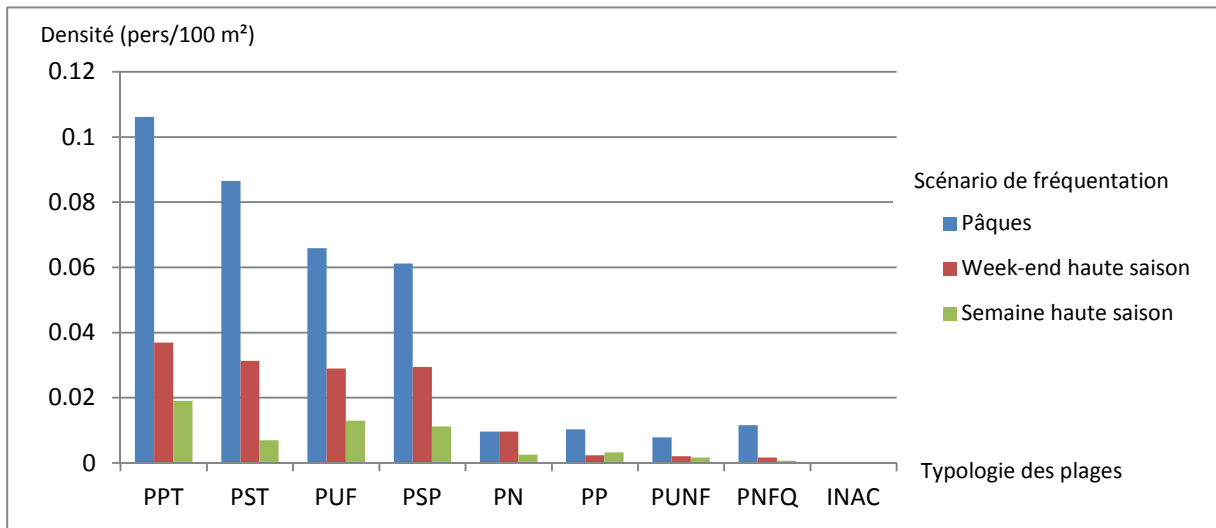


Figure 66 : Densité théorique pour chaque type de plage en fonction des trois scénarios de comptage

- Le cas particulier des appontements

Les appontements au même titre que les plages devront être évacués en cas d’alerte tsunami. Nous avons donc numérisé les appontements présents sur le pourtour du littoral martiniquais par photo-interprétation à partir de l’orthophoto de l’IGN (2011). L’intérêt d’intégrer ces espaces littoraux dans la planification d’évacuation n’est pas de dénombrer précisément le nombre d’usagers, mais de définir un site refuge et un itinéraire d’évacuation pour chacun d’eux. Ainsi, l’estimation de leur fréquentation théorique se base sur une typologie simplifiée définie selon quatre classes d’appontements : les pontons privés ou de pêche, les pontons dans les ports de plaisance, les débarcadères et enfin les quais commerciaux. Nous avons dénombré plus de 400 appontements sur l’ensemble du littoral Martiniquais.

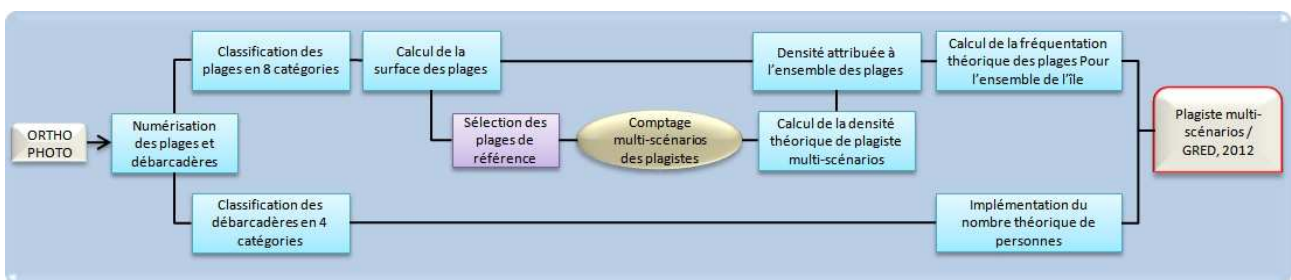


Figure 67 : Schéma méthodologique des scénarios d’occupation diurne des plages en période de haute saison à l’échelle départementale

7.1.4.5. Description des scénarios diurnes

La méthodologie mise en place pour le comptage des usagers des plages permet d’estimer le nombre de personnes exposées à l’aléa tsunami selon trois scénarios différents et qui représentent un nombre potentiel de victimes (figure 68). Les deux premiers sont établis en tenant compte d’une

occupation moyenne des plages en période de haute saison, en semaine (3 686 personnes) et le week-end (9 381 personnes). Le troisième scénario, dont le comptage a été effectué le week-end de Pâques, correspond au scénario maximisant (22 136 personnes).

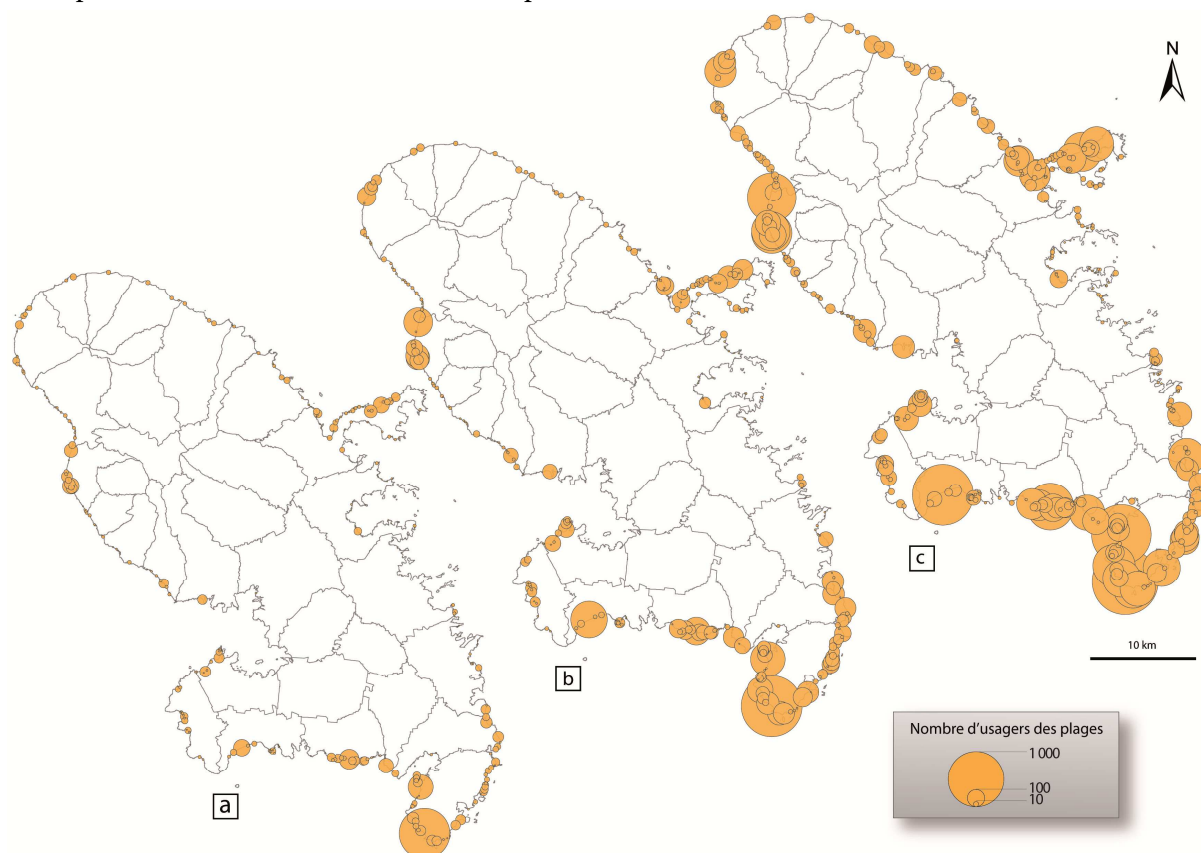


Figure 68 : Collection de cartes représentant le nombre d'usagers des plages pour les scénarios en semaine (a), week-end (b) et pour le week-end de Pâques (c)

Au cours de la semaine, seules les principales plages touristiques affichent une plus forte fréquentation. Les plages privées et semi-privées sont réservées aux clients des hôtels. Pour ces deux scénarios, les valeurs de fréquentation représentent des valeurs de moyenne basse car les comptages ont été effectués hors période scolaire en métropole comme en Martinique.

7.1.5. Estimation des enjeux humains en lien avec l'activité de croisière

Les escales portuaires de croisière maritime concentrent un grand nombre d'enjeux humains, surtout dans la Caraïbe où cette activité est particulièrement développée (chapitre 2). Fortement exposés aux effets potentiels d'un tsunami, ces espaces présentent un niveau de risque très élevé face à cet aléa. Nous cherchons à caractériser la fréquentation des escales de croisière par leurs données annuelles en termes de nombre de passagers. L'objectif final est de croiser cette information avec les temps moyens d'évacuation vers les sites de mise en sécurité des navires pour chacune des escales afin de créer un indice global de risque tsunami (chapitre 6). Deux étapes sont nécessaires : localiser les escales des navires de croisière et rechercher les informations de fréquentation.

7.1.5.1. Localisation des escales portuaires dans la Grande Caraïbe

Les escales portuaires sont les sites où les navires de croisière accostent pour embarquer et débarquer des passagers, temporairement pour les visites touristiques (escale de transit) et/ou sur plusieurs jours, en début et fin de circuit (escale dans un port-base). Cette appellation générique regroupe les ports et les mouillages. Au port, les navires sont amarrés à quai au niveau des terminaux de croisière et des gares maritimes. Certains terminaux, de grande capacité, peuvent accueillir plusieurs navires simultanément. Dans la Caraïbe, certaines escales ne sont pas équipées d'infrastructures suffisamment développées ou d'un chenal suffisamment profond pour recevoir les navires de croisière. Ils jettent alors l'ancre à quelques encablures de la côte le temps de la visite du site. Les passagers sont débarqués des navires au moyen des navettes appelées « tender » (figure 69).



Figure 69 : Touristes débarquant en navette depuis des navires au mouillage (Georges Town – îles Caymans) (Crédit photo : JM. Sullivan, 2008)

Nos travaux de localisation des escales portuaires de croisière maritime dans la Grande Caraïbe ont débuté par une recherche des bases de données existantes à l'échelle mondiale ou régionale sur internet. La base de données la plus complète que nous avons trouvée est celle créée par la *National Geospatial Intelligence Agency* (NGIA) connue sous le nom de « *Pub 150, World Port Index* ». La version la plus récente date de 2014 (23^{ème} édition). Cette base de données mondiale accessible en ligne gratuitement sur le site de la NGIA¹³³ et fournie au format *shape*, est directement exploitable dans le logiciel ArcGis. Elle renseigne la position de près de 3 700 ports, les installations portuaires et les terminaux pétroliers, sous la forme de figurés ponctuels auxquels sont associés de nombreuses informations concernant leurs caractéristiques, le type d'infrastructure ou encore les services disponibles. En tout, ce sont 78 champs d'informations qui sont renseignés. La base de données est accompagnée d'une notice explicative qui fait office de métadonnées (NGIA, 2016). Selon cette base de données, dans notre cadre d'étude de référence de la Grande Caraïbe, 279 ports sont répertoriés. Les trois principaux pays qui disposent d'un port sont : les Etats-Unis (73), suivis par le Venezuela (32) et Cuba (25). L'exploitation de cette base de données s'avère très limitée pour nos travaux. En effet, elle ne contient aucune information permettant de sélectionner uniquement les escales portuaires usitées par les compagnies maritimes de croisière. De plus, elle ne localise pas les zones de mouillage. Cette base de données nous servira uniquement de référence pour une première localisation des principales escales portuaires. Finalement, nous avons construit une base de données spécifique aux escales de

¹³³ http://msi.nga.mil/NGAPortal/MSI.portal?_nfpb=true&_pageLabel=msi_portal_page_62&pubCode=0015

croisière selon deux méthodes complémentaires. La première visait à collecter un maximum d'informations concernant les escales proposées par les grandes compagnies maritimes. A travers leurs sites internet, ces compagnies détaillent les circuits qu'elles proposent aux touristes. Nous avons consulté les sites internet des 15 principales compagnies de croisière¹³⁴, toutes membres de la *Florida Caribbean Cruise Association, (FCCA)*, et qui naviguent régulièrement dans la Grande Caraïbe. D'une manière générale, une carte présente les différents circuits proposés dans la Caraïbe. Pour autant les renseignements donnés restent imprécis et ne permettent pas de les intégrer à un SIG. C'est avec le site internet MarineTraffic¹³⁵ que nous avons pu développer la seconde méthode. En effet, ce site propose une interface cartographique web qui permet de visualiser la position des escales maritimes portuaires et du trafic maritime en temps réel (encadré 12). Néanmoins, aucune de ces informations ne peut être téléchargée sans être facturée à un prix relativement élevé¹³⁶. Nous avons donc consulté de manière journalière en période de haute saison de croisière la position des navires sur une séquence d'un mois environ à différentes heures de la journée. Ce travail s'est révélé essentiel notamment pour repérer la position des mouillages couramment utilisés par les paquebots. Ainsi, pour chaque navire amarré ou à l'ancre sur un nouveau site nous avons relevé leurs coordonnées géographiques et nous les avons compilées dans un tableur. En tout, nous avons numérisé 86 escales portuaires maritimes dont 16 mouillages sur notre secteur d'étude. Deux ports américains ont été exclus de notre base de données. Il s'agit des ports de la Nouvelle Orléans (Etat de Louisiane) et de Mobile (Etat de l'Alabama), deux ports-bases de moyenne importance (Hartog, 2014), situés dans un estuaire en amont des fleuves et donc très éloignés du rivage. Les effets d'un tsunami, événement très peu probable dans le golfe du Mexique (chapitre 1), y seraient imperceptibles pour les navires. Leur intégration n'aurait aucun sens pour les calculs d'accessibilité des sites de mise en sécurité.

La localisation et la densité des escales portuaires de croisière maritime est hétérogène sur le pourtour du bassin Caraïben (Hartog, 2014). Les escales situées sur le pourtour de la péninsule de la Floride et aux Bahamas sont nombreuses. Il s'agit pour la plupart des ports-bases qui accueillent les navires mères des plus grandes flottes de croisière, telles que *Carnival, Royal Caribbean, Norwegian*. L'emplacement de ces ports, en tête de ligne, est stratégique. Il « *répond à une véritable équation spatiale, dans laquelle interviennent de multiples variables : qualité de la desserte aérienne, valorisation d'un circuit proche, sûreté de la logistique à terre ou effets d'une forte concurrence* » (Hartog, 2009). La carte fait également apparaître trois sous-régions. La première située à proximité immédiate des Etats-Unis se compose des ports du Mexique, de la Jamaïque et des îles Caïman. La seconde s'égrène tout au long de l'arc des Grandes et Petites Antilles et accueille quelques ports-bases majeurs tels que San-Juan (Porto-Rico) au nord et Bridgetown (Barbade) au sud. Enfin, la dernière région abrite les escales les

¹³⁴ AIDA Cruise (www.aida.de), Azamara Club Cruise (www.azamaraclubcruises.com), Carnival Cruise Lines (www.carnival.com), Celebrity Cruises, Costa Cruise Lines (www.celebritycruises.com), Cunard Line (<http://www.cunard-france.fr>), Disney Cruise Line (www.disneycruise.disney.go.com), Holland America Line (www.hollandamerica.com), MSC Cruises (www.msccruises.com), Norwegian Cruise Line (www.ncl.eu/), Princess Cruises (www.princess.com), P&O Cruises (www.pocruises.com), Royal Caribbean International (www.royalcaribbean.fr), Seabourn (www.seabourn.com), TUI Cruises (www.tuicruises.com)

¹³⁵ www.marinetraffic.com

¹³⁶ Une demande de devis a été effectuée auprès de MarineTraffic afin d'obtenir les données historiques des trajectoires des navires de croisière pour une période d'un mois à l'échelle de la Grande Caraïbe. Le coût de cette prestation dans le cadre de recherches universitaires s'élève à 2 404 euros.

plus éloignées des ports-bases et éparpillées le long des côtes de l'Amérique du sud et centrale. Derrière ces positions se cachent une forte hiérarchisation et une domination de quelques grands ports (Vergé Depré, 2006) dont l'importance se caractérise notamment par leur fréquentation.

Encadré 12. Présentation du site internet MarineTraffic

Le site MarineTraffic est un projet développé et hébergé par l'université d'Egée (Grèce) qui permet d'observer gratuitement en temps réel la position et le déplacement des navires équipés d'un transpondeur AIS dans le monde entier. Cette balise, rendue obligatoire pour les navires de commerce de plus de 300 tonnes par l'Organisation Maritime Internationale (OMI) en 2004 dans le cadre de la convention internationale SOLAS¹³⁷, transmet à intervalle régulier (2 à 10 sc) leur position, leur vitesse et quelques informations complémentaires (nom, dimension, détails du voyage). L'interface cartographique web de MarineTraffic permet de visualiser ces informations dans les zones couvertes par une station de base équipée d'une antenne VHF (figure 70). Ces antennes de réception captent les signaux AIS dans un rayon maximum de 40 à 60 miles nautiques. Au-delà de cette distance, l'information est transmise par satellite, mais la visualisation de cette information nécessite un compte d'accès payant.

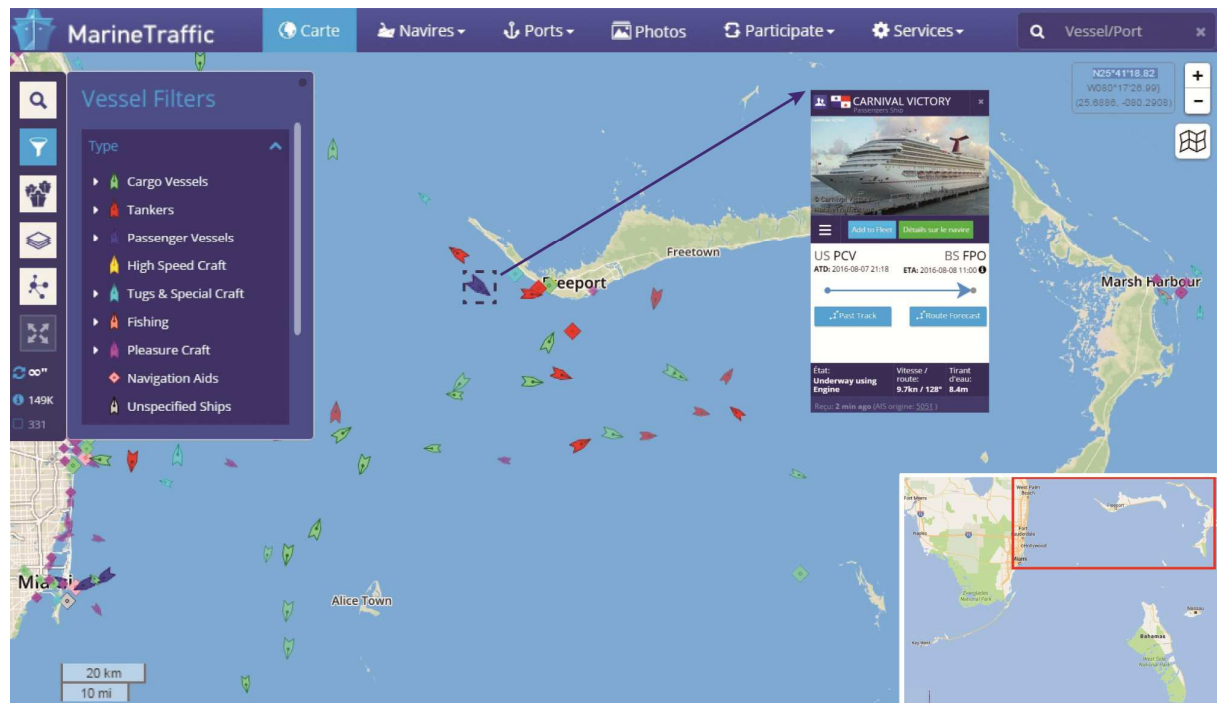


Figure 70 : Capture d'écran du site MarineTraffic.

Les navires en route sont représentés par un symbole en forme de flèche qui indique direction du navire. La couleur de ces symboles varie en fonction du type de navire. Les navires à passagers sont de couleur bleue. La taille est variable en fonction des dimensions du navire et le symbole change de forme (losange) lorsque le navire est stoppé. Dans le cadre de nos travaux, MarineTraffic se révèle être un outil particulièrement adapté, même dans sa version gratuite, car il permet avant tout de localiser et d'identifier les bateaux se trouvant à proximité des côtes, au mouillage ou à quai. Ce sont précisément ces espaces qui sont à la fois les plus exposés à l'aléa tsunami et qui concentrent le maximum d'enjeux. Néanmoins, quelques zones d'ombre subsistent toujours dans la couverture des antennes VHF le long des littoraux. Il est possible alors de consulter d'autres sites internet similaires qui, en fonction des conventions passées avec les organismes en charge des stations de réception et des réseaux déployés, peuvent couvrir une zone non couverte par MarineTraffic. C'est le cas par exemple de VesselTracker.

¹³⁷ Safety Of Life At Sea

Ainsi, nous avons pu localiser l'ensemble des escales portuaires de croisière maritime et pour chacune d'elles nous avons reporté des informations de fréquentation annuelle. Les infrastructures des ports les plus importants s'étendent sur de vastes superficies. Certains quais peuvent donc être très éloignés de l'entrée du port et par conséquent de la zone de sécurité, ce qui modifie de manière importante les temps de parcours vers ces sites. Nous avons recherché les plans des infrastructures de nombreux ports pour permettre d'identifier les terminaux de croisière. Toutefois cette information n'est pas disponible pour toutes les escales portuaires que nous avons recensées. Pour la majorité des ports il n'existe pas de plans et ceux qui sont disponibles ne font pas la distinction entre les différents types de quai. Nous avons alors convenu de numériser l'ensemble des quais, sans faire la distinction dans leur fonction, par photo interprétation à l'aide des images satellites accessibles sur le catalogue ArcGIS Online. Au total, les coordonnées de 437 quais ont été localisées pour l'ensemble des escales portuaires de croisière maritime sur le pourtour de la Grande Caraïbe.

7.1.5.2. Estimation de la fréquentation annuelle des escales portuaires de croisière maritime

Le recueil d'informations statistiques sur la fréquentation des escales portuaires de croisière maritime à l'échelle de la Grande Caraïbe est une tâche délicate. Les données et leurs sources sont nombreuses et souvent très disparates. Nous avons été confrontés à quatre difficultés principales :

1. L'accès aux données détaillées de fréquentation annuelle pour chaque escale s'avère difficile. L'information qui figure dans les documents de statistiques mondiales ou régionales agrège généralement les valeurs à l'échelle d'un territoire, notamment lorsque celui-ci est de petite taille, que la fréquentation des ports est faible ou qu'une seule autorité portuaire gère plusieurs sites. On trouve fréquemment ces trois situations dans notre zone d'étude et notamment aux Petite-Antilles.
2. Plusieurs bases de données statistiques sur le nombre de passagers de croisière existent mais elles sont difficiles à obtenir. En effet, la plupart d'entre elles sont payantes dans leur version complète et elles ne couvrent généralement pas l'ensemble des territoires de la Caraïbe. A titre d'exemple, les bases de données que nous avons consultées en premier lieu comme celles de l'*American Association of Port Authorities* (AAPA), de la *Florida Caribbean Cruise Association* (FCCA), et de la *Cruise Lines International Association* (CLIA) concernent uniquement les ports ou les compagnies membres. Afin de limiter des valeurs trop hétérogènes, nous avons recherché la base de données la plus générale possible. Nous avons utilisé celle du *Cruise Industry News*¹³⁸, qui édite chaque année un rapport sur l'industrie de la croisière dans le monde. Il s'agit de la base de données couramment exploitées par les géographes du domaine (Cruise Industry News, 2013). Le prix de ce rapport disponible exclusivement au format papier est également élevé, plus de 900 \$. Nous avons pu consulter gracieusement le rapport en date de 2013 disponible dans les bureaux du Comité Martiniquais du Tourisme (CMT). Il renseigne 38 ports inscrits dans notre base de données. Nous avons alors complété cette base de données à l'aide de celles présentées précédemment,

¹³⁸ <http://www.cruiseindustrynews.com/store/product/annual-reports/>

ainsi que par des informations obtenues au fil des recherches sur les sites des autorités portuaires et par contact mail. Au total, 59 des 86 escales ont pu être renseignées et numérisées.

3. Les méthodes de comptage varient selon les organismes et en fonction des législations en vigueur et appliquées dans les différents Etats. A titre d'exemple, dans les ports français, les passagers en transit sont comptés deux fois par les autorités portuaires, au moment du débarquement et de l'embarquement du navire. Elles comptent le nombre de mouvements, au même titre que pour un conteneur, même si ce mouvement a lieu sur une même journée. *A contrario*, le CMT compte le nombre de passagers qui débarque sur l'île. Par contre, dans le cas d'une escale dans un port base les mêmes passagers sont comptés à deux reprises, en début et en fin de circuit, autant par la CTM que par le GPMLM. Ainsi, les statistiques de fréquentation pour la saison 2015/2016 fournies par le CMT évaluent à 371 284 passagers tandis que le GPMLM en dénombre 640 069 (SDDEP-JMV, 2016). Par conséquent, en fonction de l'origine des données, qu'il s'agisse de celles fournies par les autorités portuaires, les organisations de tourisme ou des méthodes de comptage propres à chaque pays, les valeurs obtenues sont hétérogènes.

4. Les chiffres concernant le nombre de passagers sont donnés par les agents maritimes aux capitaineries. Il correspond en général au nombre total de passagers présents dans le navire mais ne représentent pas nécessairement la réalité quant au nombre d'individus qui descendent du navire. A titre d'exemple les autorités portuaires du GPMLM estiment de manière arbitraire que seulement 70 à 80 % en moyenne des passagers descendent du navire¹³⁹. Ce pourcentage est certainement variable en fonction de l'attrait touristique de chaque escale mais c'est un exemple des difficultés rencontrées dans notre travail pour quantifier les enjeux.

Sur l'ensemble de notre zone d'étude, 27 escales portuaires de croisières maritimes sur 86 ne disposent pas d'information en termes de fréquentation (figure 71). Il s'agit essentiellement d'escales au mouillage situées le long des Petites Antilles comme à Montserrat et à Saint-Vincent et les Grenadines. Nous avons calculé un total de 40.6 millions de passagers pour l'année 2012. La Caraïbe insulaire compte près de 20 millions de passagers, les Etats continentaux d'Amérique latine et du sud 5.9 millions d passagers et 14.5 millions de passagers pour les Etats Unis. La prédominance historique des Etats Unis dans le secteur de la croisière s'explique par le rôle hégémonique de leurs ports bases. Ainsi, il est un des premiers pays consommateurs de ce mode de voyage. Dans la Caraïbe, les ports-bases de Porto-Rico et de la Barbade ressortent également en tête des espaces les plus fréquentés.

¹³⁹ Valeur donnée à titre indicative par les autorités portuaires du GPMLM au cours d'un entretien téléphonique (05/07/2016)

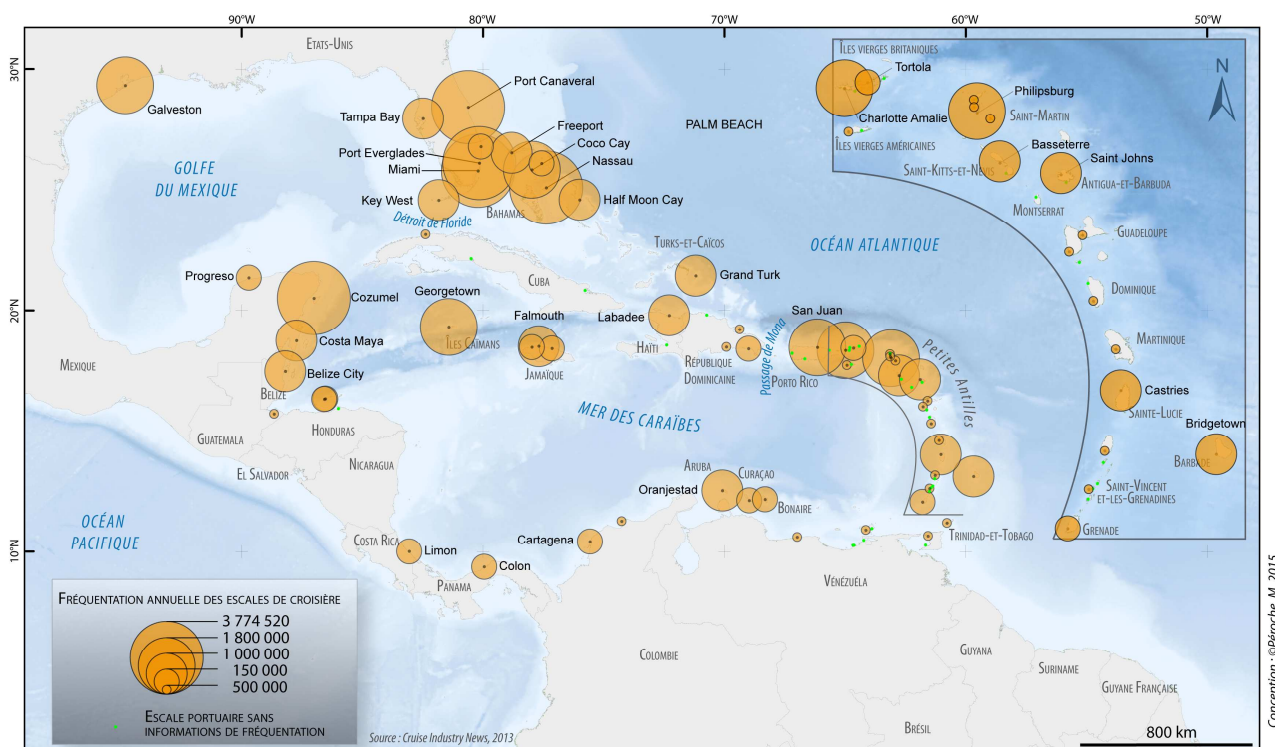


Figure 71 : Carte de fréquentation des escales portuaires de croisière maritime dans la Grande Caraïbe

Les valeurs de fréquentation présentées dans la carte précédente doivent être lues avec précaution. Il est impossible de certifier qu'il n'y a pas de « double compte » des passagers notamment pour les valeurs qui concernent les ports-bases. Le nombre total de passagers risque d'être surestimé. Les résultats qui visent à caractériser le risque tsunami pour les escales portuaires de croisière maritime serviront avant tout à spatialiser et à attirer l'attention sur cette problématique (chapitre 8).

7.1.5.3. Localisation des navires de croisière au cours de l'exercice Caribe Wave 2015

Le tourisme de croisière offre aux passagers la possibilité de visiter un grand nombre de sites tout au long de leur circuit. Les bateaux naviguent de nuit pour rejoindre leur destination et ne restent généralement pas plus d'une journée à quai ou au mouillage, le temps de l'excursion. L'exposition des navires et de leurs passagers est donc très variable en fonction de l'heure de l'impact d'un tsunami. Nous proposons de quantifier le nombre d'enjeux humains en lien avec l'activité de croisière (passagers et équipage) exposés à l'échelle du bassin de la Grande Caraïbe face à un scénario de tsunami fictif créé à l'occasion d'un exercice régional de préparation à la gestion de crise organisé annuellement par le GIC/CARIBE-EWS.

Des exercices internationaux de sécurité civile sur le risque tsunami intitulés « Caribe Wave » sont organisés chaque année dans le bassin de la Caraïbe depuis 2009. Ils sont coordonnés par l'ICG/CARIBE-EWS (chapitre 3). Ils permettent de renforcer les capacités de réponse des gestionnaires du risque et des populations de la Caraïbe en cas d'alerte réelle de tsunami. Les mêmes types d'exercice sont conduits dans les différents bassins soumis à l'aléa tsunami à l'échelle mondiale.

Pour évaluer l'exposition des croisiéristes dans des situations fictives de crise, l'exercice qui s'est déroulé le 31 mars 2015 dans ce cadre nous a servi de support. Il nous a permis d'obtenir un scénario d'aléa de référence modélisé par le PTWC qui offre des données de temps d'arrivée et d'amplitude à la côte en une vingtaine de minutes après la détection de l'événement (chapitre 3). Le scénario retenu correspond à un phénomène sismique d'une magnitude Mw 8.5 localisé au large du Panama à 14h00 UTC (figure 72). Il s'inspire de l'événement du 7 septembre 1882 qui a frappé les côtes de cette région. Les amplitudes maximales modélisées à l'approche des côtes sont de 3m à Saint-Domingue (République Dominicaine), de 2.6 m à Santa Marta (Colombie) et de 2.4 m à El Porvenir (Panama). La date du scénario étant connue à l'avance, cela nous a permis de préparer en amont de l'exercice une base de données sur la capacité des navires à passagers régulièrement présents dans le bassin.

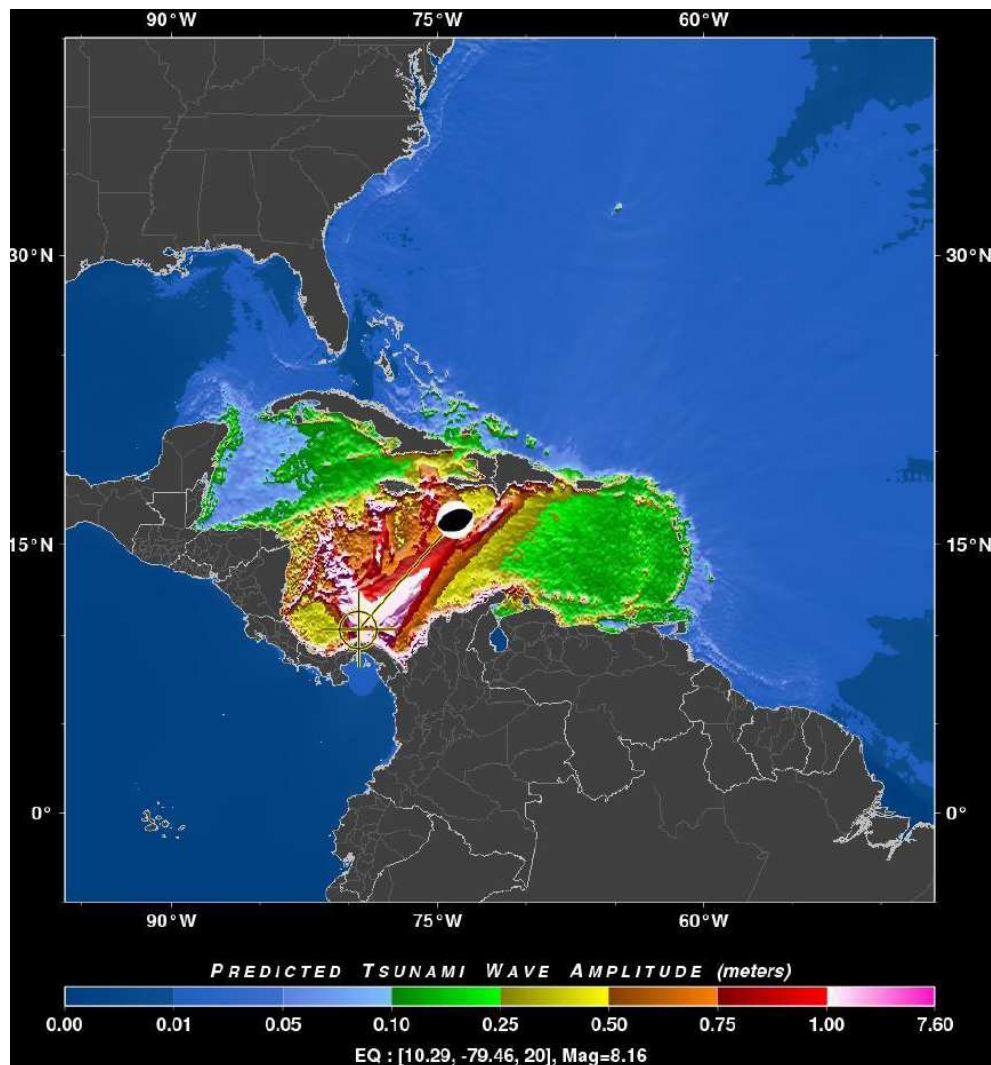


Figure 72 : Carte des amplitudes maximales modélisées par le PTWC (modèle RIFT) pour l'exercice régional tsunami Caribe Wave 2015 (source : IOC-UNESCO, 2015)

Avant de débiter l'évaluation en temps réel des navires exposés, nous avons créé une base de données des navires sur les principales compagnies de croisières maritimes qui proposent des circuits dans la Caraïbe. Elle renseigne le nombre maximum de passagers et d'équipage ainsi que des caractéristiques du navire (numéros d'identifications, longueur, largeur, etc.). Elle a été construite à

70% sur la base de collectes de données disponibles sur les sites internet des compagnies et à 30% sur la base d'observation des navires présents dans la Grande Caraïbe dont la position a été relevée sur MarineTraffic les jours qui précédaient l'exercice puis complétée le jour-même quelques heures à peine avant le début de l'exercice. Au total, cette base de données renseigne la capacité maximale d'individus pour 173 navires, soit un total de 249 596 passagers et 101 184 membres d'équipage.

Les coordonnées géographiques de l'ensemble des navires à passagers (navettes maritime, navires de croisière et rouliers¹⁴⁰) présents dans la Grande Caraïbe au moment de l'exercice ont été relevées manuellement. Nous avons utilisé les données relatives au trafic maritime disponibles en temps réel sur les sites internet MarineTraffic et VesselTracker. Le travail de reconnaissance a été effectué à partir de ces deux sites car l'exhaustivité des informations dépend de la couverture des antennes de réception à terre des données AIS (encadré 12). Cette méthode a permis de renseigner une base de données sous la forme d'un tableur comprenant : le nom des navires, leur numéro d'identification, leur position ainsi que leur statut de navigation (à quai, au mouillage, en cours de navigation). Nous avons donc recensé 170 navires à passagers présents dans notre zone d'étude, dont 106 navires de croisière, 40 navettes maritime et 24 rouliers.

7.1.5.4. Quantification de la capacité maximale d'individus par navire de croisière à évacuer

Le scénario Caribe Wave 2015 s'est déroulé en pleine période de haute saison pour les circuits touristiques de croisière et à des heures théoriques d'impact comprises entre 8 h du matin (heure locale pour le Golfe du Mexique) et 13 h en heure locale (heure locale aux Petites Antilles). Il s'agit des heures de la journée au cours desquelles les navires de croisière sont principalement en approche des côtes ou amarrés à quai ou au mouillage. Au total, d'après nos hypothèses définies au chapitre 4, 78 navires de croisière parmi les 106 sont situés dans la zone à évacuer (profondeur inférieure à 100 m et distance par rapport aux côtes inférieure à 5 NM). Cumulé, cela représente une capacité d'accueil maximale de 233 706 personnes (168 033 passagers et 65 673 membres d'équipage) (figure 73). C'est la première fois que des données AIS sont utilisées en « temps réel ». Elles ont permis de couvrir un événement en situation de crise tsunami simulée à une échelle régionale et de quantifier un nombre théorique d'enjeux exposés. Elles sont plus couramment employées pour des retours d'expérience post-tsunami, comme par exemple au Japon suite à l'événement de 2011. Les données AIS ont permis d'étudier les trajectoires d'évacuation des navires et les effets de congestion dans la baie de Tokyo (Makino *et al.*, 2012), les temps de réaction des capitaines pour l'évacuation du port de Onahama (Makino, 2012) ou bien encore de valider des résultats de simulation numérique d'évacuations (Pitana et Kobayashi, 2010).

¹⁴⁰ Les rouliers sont des navires principalement utilisés pour transporter des véhicules mais certains peuvent transporter en plus plusieurs centaines de passagers.

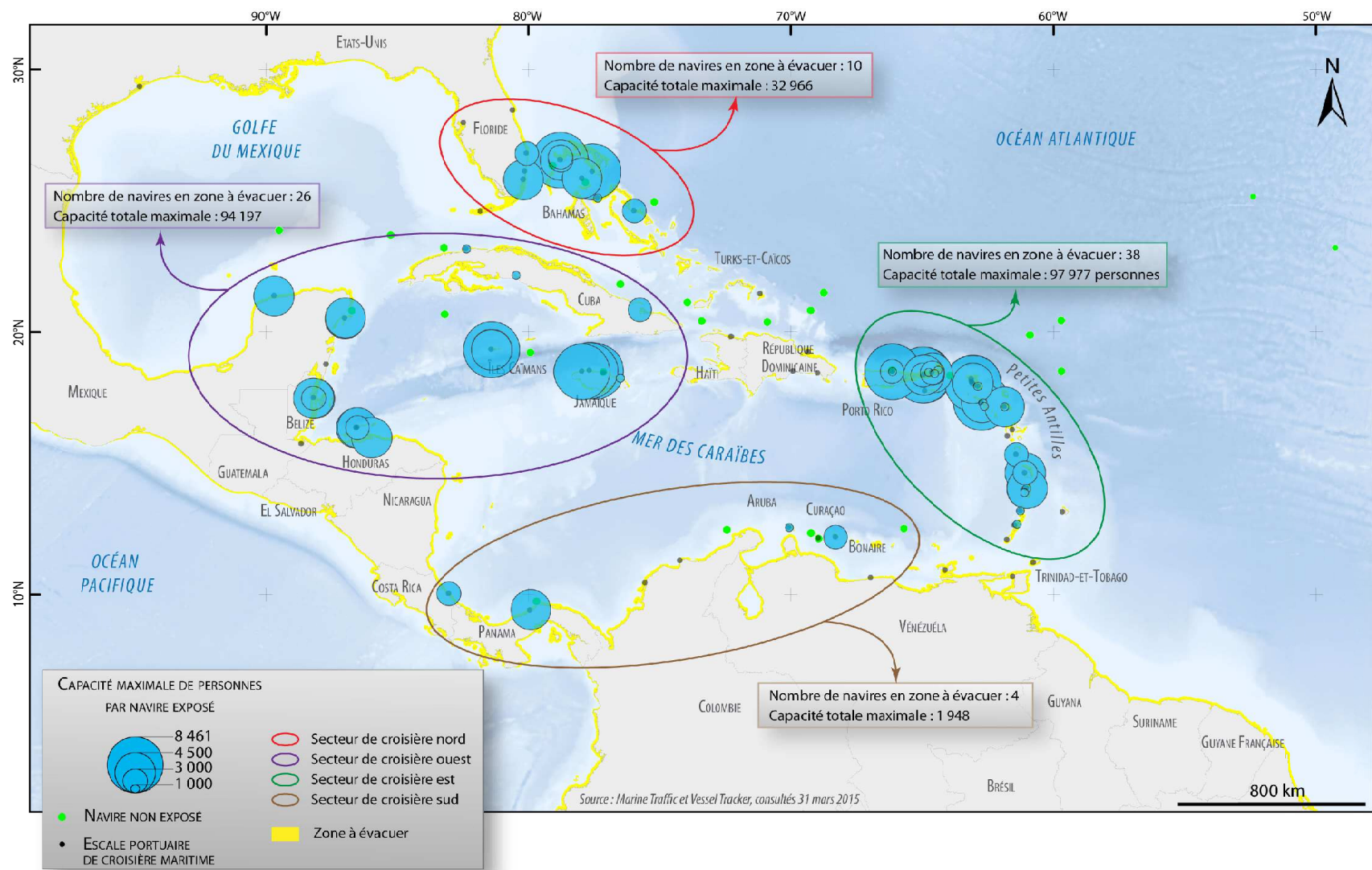


Figure 73 : Carte de la capacité d'accueil maximale des navires de croisière situés dans la zone à évacuer au cours de l'exercice Caribe Wave 2015

Dans ce chapitre, nous avons élaboré des méthodes pour quantifier et spatialiser les enjeux humains à sécuriser à terre et en mer. Ce travail a été réalisé respectivement à l'échelle de la Martinique et de la Grande Caraïbe. Ces informations constituent les dernières données en entrée du modèle de géo-simulation nécessaires aux calculs d'accessibilité des sites refuges. Elles permettront d'estimer des quantités d'enjeux humains théoriques sécurisés ou non, en fonction de plusieurs scénarios de fréquentation et d'aléa ainsi que de spatialiser les secteurs les plus critiques en matière d'évacuation. Les résultats de ces travaux sont présentés au chapitre suivant.

Chapitre 8 Des résultats exploitables pour la planification des évacuations

Le nombre d'enjeux humains à évacuer dans la Caraïbe en cas d'alerte tsunami est très élevé et également très variable notamment en fonction des périodes de haute et de basse fréquentation touristique. La conduite d'une évacuation réussie repose alors sur une planification à froid rigoureuse permettant d'évaluer la faisabilité d'une telle procédure dans les délais impartis en fonction de scénarios crédibles de tsunami et de l'occupation des territoires exposés. Pour mobiliser au maximum les populations à évacuer, plusieurs conditions doivent être réunies. La première d'entre elles est de leur garantir que l'ensemble des conditions ont été validées préalablement pour assurer leur sécurité. Nous proposons donc dans ce dernier chapitre d'apporter des éléments de réponse quant aux délais d'évacuation. A cet effet, nos méthodes de calculs sur graphe apportent des informations quantitatives et spatialisées pour définir l'une des phases du processus d'évacuation : le temps de déplacement pour une mise en sécurité. Elles sont conçues pour s'appliquer au domaine maritime à l'échelle de la Grande Caraïbe et au domaine terrestre pour le territoire de la Martinique. Nos préconisations visent à aider les autorités locales pour la mise en place d'aménagements adaptés à l'évacuation des populations face au risque de tsunami, à l'échelle départementale.

Nous présentons ici la méthode mise en place à l'échelle communale pour aider à la planification des évacuations en cas d'alerte tsunami et au renforcement des capacités de gestion de crise. Ces travaux ont été parachevés par l'élaboration d'un modèle de charte graphique pour les plans d'évacuation et l'affichage du risque sur le terrain. Ces deux éléments sont d'une importance capitale pour une communication uniforme et claire à l'échelle zonale, régionale voire nationale.

8.1. Des résultats « généraux » exploitables pour la planification des évacuations

8.1.1. Caractériser le risque tsunami des activités de croisière en cas d'évacuation à l'échelle de la Grande Caraïbe

8.1.1.1. Evaluation du risque tsunami des escales portuaires de croisière maritime

Nous proposons d'évaluer le risque tsunami de l'ensemble des escales portuaires au regard des temps moyens de navigation pour rejoindre un site de mise en sécurité. Ces temps sont combinés avec des valeurs de fréquentation annuelle de passagers. Les temps ont été calculés au départ des quais et des mouillages de l'ensemble des escales numérisées précédemment (chapitre 7) au moyen de calculs d'accessibilité sur graphe selon l'itinéraire d'évacuation le plus rapide (*cf.*, annexe 12). L'indicateur de risque a été calculé en multipliant les temps moyens d'évacuation par le nombre de passagers pour chaque escale portuaire, dont la valeur avait été rapportée préalablement entre zéro et un. On obtient ainsi une vision synthétique et globale à l'échelle de la Grande Caraïbe de l'exposition des escales de croisière et des navires en mer susceptibles de connaître des difficultés liées à l'évacuation des passagers à terre en cas d'alerte tsunami. Plusieurs escales, 27 sur 86, sont dépourvues d'une valeur de fréquentation. Elles n'ont donc pas pu être renseignées au moyen cet indicateur.

Prendre en compte de la fréquentation annuelle des escales au moyen de cet indicateur est essentiel. En effet, cette valeur caractérise deux difficultés principales en cas d'évacuation des ports. Il s'agit en premier lieu de l'évaluation de la probabilité selon laquelle plusieurs navires de croisière de grande capacité seront présents au moment de l'alerte. En temps normal, les manœuvres de ports au cours de l'accostage ou de l'appareillage d'un navire sont longues. Elles durent plusieurs dizaines de minutes et nécessitent des moyens humains et matériels importants. La présence d'un pilote à bord pour conseiller les capitaines est obligatoire pour les navires de grande taille en phase d'approche et de sortie des ports ainsi qu'au cours des manœuvres. Le pilote est généralement assisté par un ou plusieurs remorqueurs qui guident et sécurisent les mouvements du navire. Sur les quais et sur le plan d'eau, plusieurs lamaners sont en charge de manipuler les aussières pour amarrer ou désamarrer les bateaux. De telles manœuvres demandent donc une grande coordination entre chaque opérateur et sont prévues plusieurs heures avant le départ ou l'arrivée des navires. En cas d'alerte tsunami, les besoins en termes de services portuaires risquent d'être largement dépassés et désorganisés si le nombre de navires est trop important. Il ne sera alors pas possible de les prendre en charge simultanément, *a fortiori* si l'alerte se produit de nuit ou que le port abrite également des navires de commerce. Le séquençage des évacuations d'urgence doit être planifié par les autorités portuaires (chapitre 4) et connu de l'ensemble des acteurs (compagnie maritime, stations de pilotage et lamaners). En second lieu, il s'agit de quantifier la fréquentation des escales portuaires en termes de nombre de passagers et de personnel présents dans l'enceinte portuaire, site particulièrement exposé à l'aléa tsunami. A terre, les passagers présents sur les quais et les terminaux de croisières devront être évacués selon les procédures opérationnelles définies en amont et s'inscrivant dans une réflexion de planification continue entre les domaines maritimes et terrestre. Dans le cas d'un scénario majeur,

même si les passagers sont bien pris en charge par les autorités à terre, le temps de l'évacuation vers des sites refuges temporaires, il est possible que des dommages aux navires et/ou aux infrastructures portuaires et/ou l'obstruction du chenal par des débris ou des sédiments déposés par le tsunami empêchent les passagers de réembarquer à bord. A terre, il faudra alors prévoir des centres d'hébergement provisoires suffisamment importants pour accueillir les passagers. Cette problématique est d'autant plus grande pour certains Etats et territoires insulaires où l'affluence journalière de touristes représente une part substantielle de la population de l'île. Il convient donc que toutes les villes portuaires prennent en compte cet afflux potentiel d'évacués supplémentaires comme nous l'avons proposé pour le GPMLM (chapitre 4). La gestion de l'interface entre les installations portuaires et les villes portuaires doit être rigoureusement planifiée. Ainsi, plus la fréquentation d'une escale portuaire maritime est élevée (passagers et navires) plus les besoins de coordination et de logistique sont élevés.

L'indicateur que nous avons construit permet d'évaluer le niveau de risque de chaque escale en termes d'évacuation. Ainsi, parmi les 59 escales portuaires de croisière maritime renseignées par l'indicateur de risque, huit présentent un risque « très fort » (figure 74). Six de ces escales se concentrent sur les côtes étatsuniennes et aux Bahamas auxquelles s'ajoutent deux escales au risque « fort » (port de Key West et de Freeport). Les ports de Miami, Port Canaveral, Port Everglades et de Nassau figurent parmi les ports les plus fréquentés du bassin avec plus de trois millions de passagers accueillis en 2012. Les valeurs moyennes de temps de navigation pour rejoindre un site de sécurité sont élevées. On compte une moyenne de 30 minutes, soit sept minutes de plus que le temps moyen de notre secteur d'étude. Les ports de Tampa et de Galveston quant à eux sont des ports dont la distance du site de mise en sécurité est très éloignée par rapport aux quais, ce qui nécessite respectivement 2h20 et 50 minutes de navigation. Ils présentent également une forte fréquentation avec plus d'un million de passagers en 2012 en moyenne. Trois autres ports présentent un indice de risque « fort » et « très fort », il s'agit de San Juan (Porto-Rico), de Charlotte-Amalie (îles Vierges américaines) et de Phillipsburg (Sint-Marten). Les 11 ports renseignés par un indice de risque « fort » à « très fort » sont pour la plupart des ports-bases donc très fréquentés. Les autorités portuaires devraient initier des études pour caractériser l'aléa tsunami à l'échelle du port, et à partir des résultats définir des procédures standards pour planifier au mieux d'éventuelles évacuations en fonction des scénarios en jeu. Sur le reste du bassin, et notamment dans la Caraïbe, les escales portuaires affichent un indice de risque « moyen » à « faible » notamment en raison des temps de navigation vers les sites de mise en sécurité qui sont limités (moyenne de 16 min) et une fréquentation annuelle plus faible que les ports-bases. Une évacuation préventive des navires semble plus facile à mettre en œuvre y compris dans le cas de scénarios de tsunamis proches de ces escales.

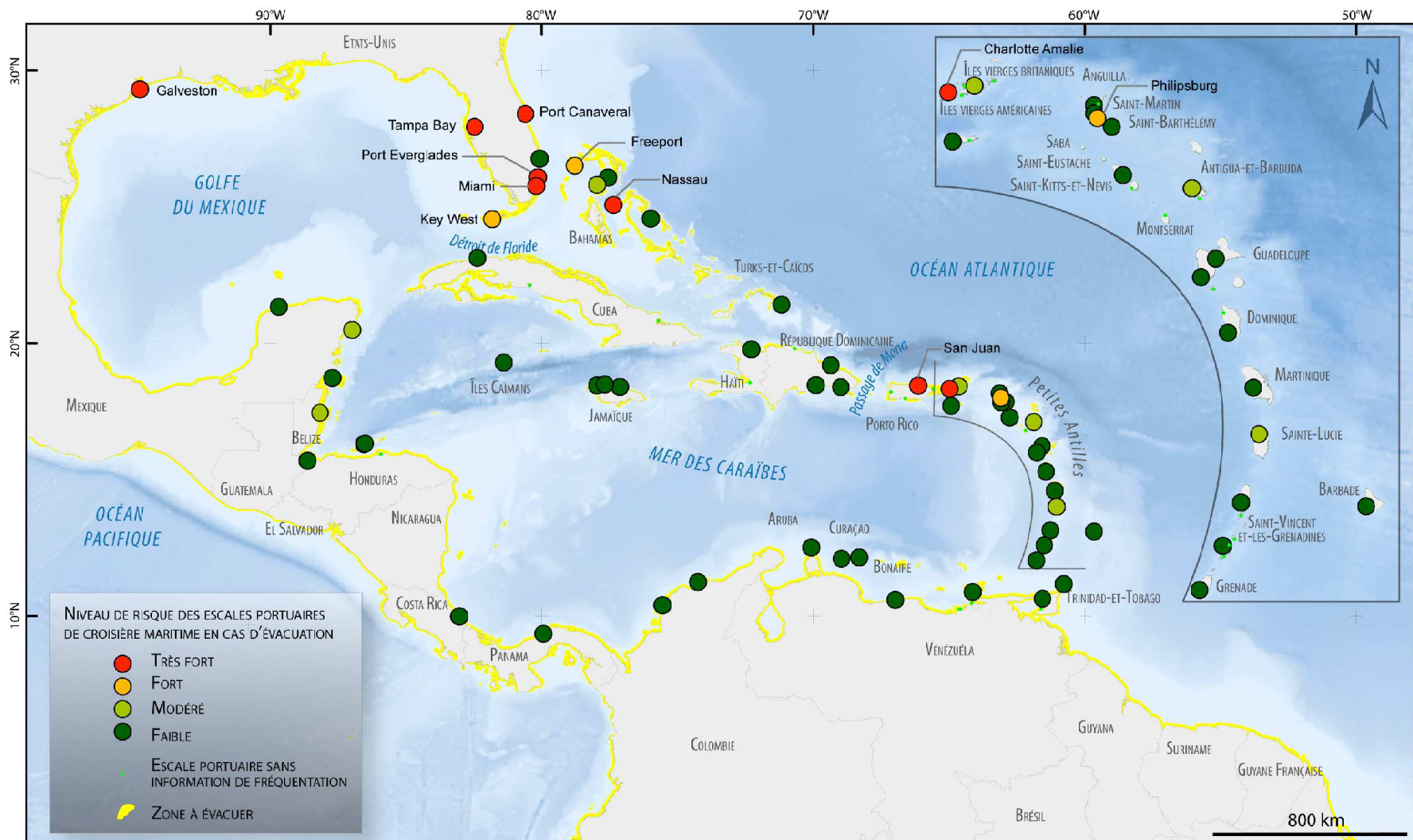


Figure 74 : Indice de risque des escales portuaires de croisière maritime en cas d'évacuation d'urgence face à une alerte tsunami

8.1.1.2. Evaluation du risque tsunami des navires de croisière à évacuer (scénario *Caribe Wave* 2015)

Les escales portuaires et les navires qui y sont amarrés sont plus ou moins exposés aux tsunamis en fonction de l'intensité du phénomène et de sa localisation. Tous ne devront pas évacuer, et tous ne disposent pas du même temps pour mener à bien cette procédure. Nous proposons de mettre en exergue ces variations d'après le scénario régional de gestion de crise tsunami conçu dans le cadre de l'exercice *Caribe Wave* qui s'est tenu en mars 2015. Tous les navires de croisière présents dans notre zone d'étude ont été localisés au moment de l'alerte fictive (chapitre 7). Nous leur avons attribué la valeur d'amplitude de vague maximale à l'approche des côtes¹⁴¹ par la valeur modélisée la plus proche du navire. Nous leur avons également attribué l'estimation du temps d'arrivée du tsunami selon l'information de la carte des temps de trajet du tsunami fournie par le PTWC. Ce temps a été confronté aux temps de navigation théoriques nécessaires pour rejoindre les sites de mise en sécurité au large d'après les résultats de nos calculs sur graphe. Ces informations couplées aux données de capacités d'emports des navires permettent notamment d'estimer un nombre théorique maximum d'individus exposés.

Parmi les 78 navires localisés dans la zone à évacuer, 68 sont situés le long des côtes où l'amplitude du tsunami serait supérieure à 0.1 m ¹⁴². Onze navires seraient exposés à des vagues d'amplitude supérieures à 0.5 m dont un à des vagues supérieures à 2 m. Tous les autres navires soit 55, sont situés dans des zones où l'amplitude modélisée serait comprise entre 0.1 m et 0.5 m (tableau 25 et figure 75). D'après nos recherches pour la conception de la matrice de planification de gestion de crise tsunami du GPMLM (chapitre 4), ces navires devraient tous évacuer vers le large par principe de précaution si les délais le permettent. Seuls dix navires ne seraient pas menacés par un événement de ce type. Ce sont des bâtiments situés dans le golfe du Mexique, en Floride et aux Bahamas, espaces où les eaux sont protégées par les îles des Grandes Antilles et le détroit du Yucatan.

Tableau 25 : Statistiques du nombre de navires exposés et de leur capacité d'accueil maximale associée en fonction des classes d'amplitude théoriques modélisées

Classe d'amplitude	Nombre de navires	Nombre de passagers	Nombre de membres d'équipage	Capacité maximale
> 2	1	2 170	999	3 169
[0.5 - 2 [	10	25 840	9 487	35 327
[0.1 - 0.5[	55	111 965	44 273	156 238
< 0.1	12	26 056	10 914	36 970

¹⁴¹ Valeur donnée par le PTWC environ 20 minutes après l'événement sous la forme d'un fichier .kmz.

¹⁴² Cumulée, leur capacité maximum atteint 194 734 individus, membres d'équipage inclus.

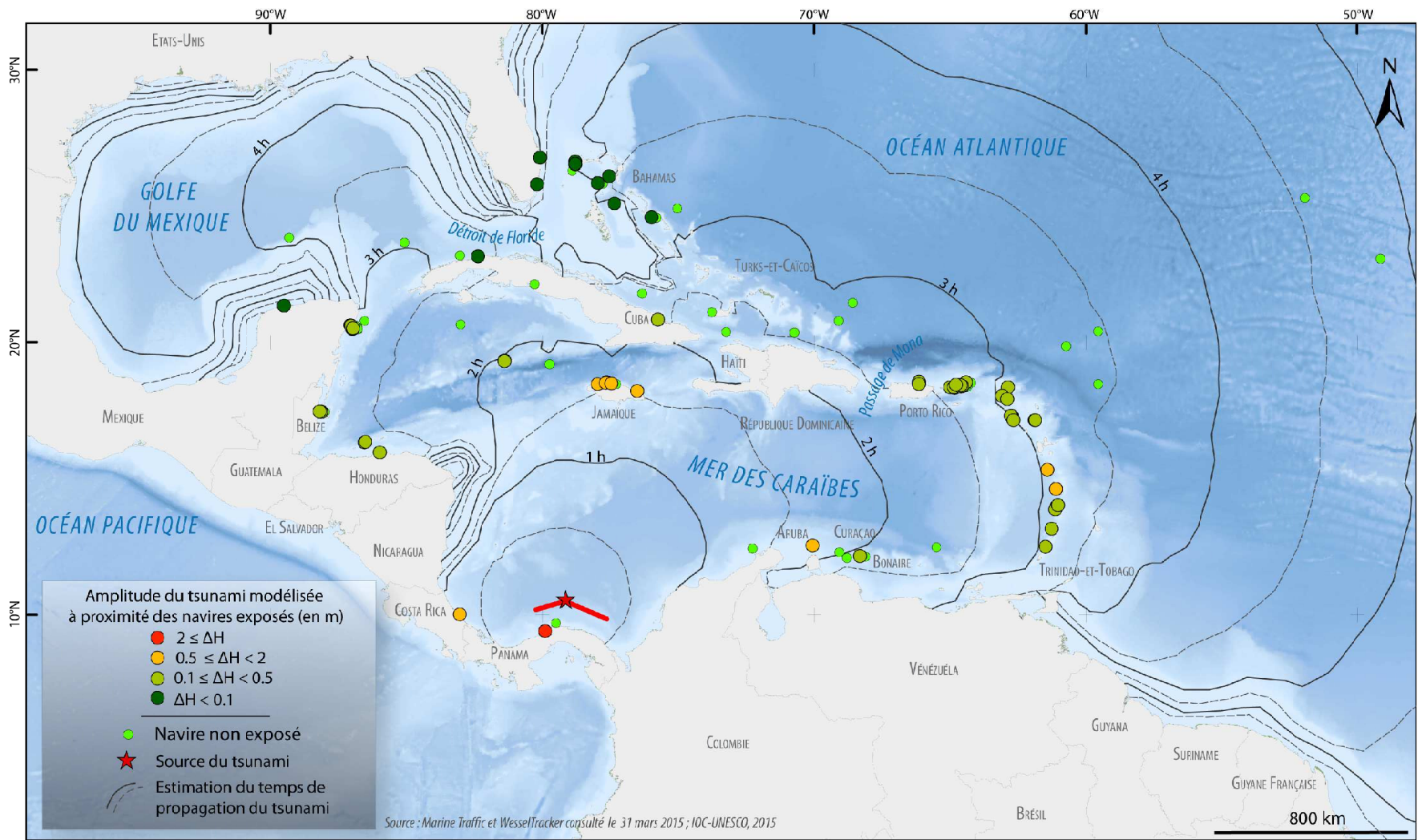


Figure 75 : Exposition des navires de croisière au moment de l'alerte tsunami fictive émise au cours de l'exercice « Caribe Wave » 2015

L'évacuation d'un navire consiste à quitter la zone de danger pour atteindre une profondeur de plus de 100 m ou à s'éloigner à plus de cinq milles nautiques des côtes. L'évacuation est donc ordonnée par les autorités portuaires en fonction du délai dont les navires disposent pour appareiller, entre le moment où les bords seront alertés et le moment où le tsunami impactera la côte. En Martinique, nous avons défini que pour un seuil inférieur à 30 minutes de délai pour évacuer (45 minutes en comptant le temps de navigation), l'équipage doit procéder à la mise en sécurité technique du bâtiment. Au-delà de ce délai, et en fonction de l'autonomie des navires pour l'appareillage, ceux-ci doivent évacuer vers le large. A partir d'1h30 de délai, le séquençage de l'évacuation doit être organisé par les autorités portuaires et respecté par les capitaines. L'assistance des pilotes est alors envisagée. Ces éléments nous permettent de commenter nos résultats à l'échelle du bassin de la Grande Caraïbe.

Le temps moyen de navigation pour rejoindre un site de mise en sécurité de l'ensemble des navires théoriquement impactés par le tsunami est de 28 min. Il varie entre six minutes au minimum (navire « *Celebrity Silhouette* » au mouillage à Georgetown aux îles Caïman, capacité maximale 4 386 passagers et membres d'équipage) et 79 minutes au maximum (navire « *Louis Cristal* » amarré au port d'Antilla à Cuba, capacité maximale 2 200 passagers et membres d'équipage). Un seul navire ne disposerait pas du temps imparti pour naviguer jusqu'au site de mise en sécurité avant l'arrivée du tsunami. Il s'agit du « *Celebrity Infinity* » appartenant à la compagnie de croisière *Celebrity Cruise* dont la capacité totale est de 3 169 personnes (999 membres d'équipage et 2 170 passagers). Ce navire était en cours d'accostage dans le port de Colon (Panama) au moment de l'alerte, site pour lequel le PTWC a modélisé une amplitude de vague à la côte de 2 m. Le temps d'arrivée de la première vague était estimé approximativement à 15 minutes alors que le temps de navigation que nous avons calculé pour quitter le port et rejoindre le site refuge était de 21 min, soit une différence négative de 6 min. Néanmoins, si le pilote était toujours à bord, l'accostage aurait dû être stoppé et une manœuvre d'urgence aurait permis au navire de s'éloigner le plus rapidement possible des infrastructures portuaires afin de limiter le risque de collisions avec les quais. Cette situation illustre l'importance d'une alerte rapide des bords ainsi que la connaissance des mesures de mise en sécurité par les capitaines et les pilotes des ports pour une réactivité la plus prompte possible. Si une telle décision n'est pas prise, on peut imaginer qu'à quelques minutes près, plusieurs centaines de passagers débarquent sur les quais du port, et viennent ainsi grossir le nombre potentiel de victimes.

Le second navire le plus menacé est l'« *Azamara Journey* », détenu également par la compagnie de croisière *Celebrity Cruise*. Sa capacité totale est de 1 013 individus (319 membres d'équipage et 694 passagers). Il était amarré au port de Limon (Costa-Rica) à proximité de la source. Les temps d'arrivée approximatifs étaient de 45 minutes et l'amplitude à la côte modélisée était de 1.1 m. Le temps de navigation pour rejoindre le site refuge est de 13 min. Il disposerait d'environ 32 minutes pour la manœuvre ce qui est très bref, d'autant qu'il faut en déduire le temps de diffusion de l'alerte et de réaction de l'équipage. Dans ce cas précis, la prise en charges des passagers pour une évacuation à terre est l'action recommandée. Plusieurs centaines de passagers risquent alors d'être présents sur l'escale. Dans l'éventualité d'une alerte en cours et sans connaissance du territoire, ils devront se diriger vers les hauteurs pour une évacuation temporaire à travers les rues d'une ville de plus de 60 000 habitants¹⁴³. Il

¹⁴³ Selon les valeurs du recensement de 2011 disponible sur le site internet : www.citypopulation.de

convient donc aux autorités portuaires en collaboration avec les services de sécurité civile de la ville d'organiser ce type d'évacuation.

Sept navires de croisières disposent de 45 minutes à 1h30 pour appareiller (tableau 26). Ainsi, selon leur autonomie dans les manœuvres et la densité du trafic au moment de l'alerte, il convient d'évacuer vers le large le plus rapidement possible. L'un d'eux est amarré au port de Cienfuegos (Cuba), un autre au port d'Oranjestad (Aruba) et les cinq autres en Jamaïque. Deux d'entre eux sont localisés à la même escale de Falmouth : l'« *Independence of the Seas* » et l'« *Allure of the seas* »¹⁴⁴. Ils appartiennent tous deux à la compagnie « *Royal Caribbean Cruise Line* ». Ces deux paquebots cumulent une capacité totale de 14 191 individus alors que la petite ville de Falmouth compte seulement 8 686 habitants¹⁴⁵. Dans une telle situation, il s'agit de savoir si la compagnie « *Royal Caribbean Cruise Line* » a anticipé ce type de risque et si elle a mis en place une procédure opérationnelle. Si tel est le cas, soit les passagers à proximité du navire sont réembarqués pour une évacuation vers le large soit ils sont pris en charge à terre.

Tableau 26 : Description des navires disposant entre 45 min et 1h30 pour évacuer

Nom du navire	Capacité d'accueil maximale	Statut au moment de l'alerte	Amplitude maximum à l'approche des côtes	Temps de navigation nécessaire pour l'évacuation	Temps disponible pour l'alerte des bords et les manœuvres d'urgence	Nom de l'escale portuaire	Pays de l'escale portuaire
Star Flyer	244	Amarre	0.9	25	65	Port Antonio	Jamaïque
Norwegian epic	5 853	Encre	0.7	22	67	Ocho Rios	Jamaïque
Carnival Magic	5 057	Amarre	0.5	21	69	Montego Bay	Jamaïque
Independence of the seas	5 730	Amarre	0.6	18	72	Falmouth	Jamaïque
Allure of the seas	8 461	Amarre	0.6	11	79	Falmouth	Jamaïque
Freewinds	640	Amarre	0.7	26	79	Oranjestad	Aruba
Club Med II	568	Amarre	0.4	61	88	Cienfuegos	Cuba

Les 69 autres navires de croisière disposent de plus d'1h30 min, délai qui doit être suffisant pour un appareillage en sécurité. Néanmoins, un élément attire notre attention, il s'agit du nombre de navires amarrés simultanément dans plusieurs des escales notamment aux Petites Antilles. A titre d'exemple, cinq navires de croisière sont amarrés au petit port de Phillipsburg dans la partie néerlandaise de l'île de Saint Martin. Cumulée, leur capacité maximale est de 23 234 passagers et membres d'équipage, soit seulement 10 000 personnes de moins que le nombre d'habitants de l'île. Dans ce cas précis, c'est bien la question de l'évacuation des navires qui se pose mais également celle de la prise en compte des enjeux humains. Ces deux problématiques nécessitent une réflexion concertée quant à la planification d'une évacuation de masse. La même situation se retrouve aux îles Vierges américaines avec quatre

¹⁴⁴ L'« *Allure of the Seas* » était jusqu'en 2016 le plus gros paquebot du monde. Il a été détrôné en mai 2016 par la mise en service de l'« *Harmony of the Seas* » (6 296 passagers et 2 394 membres d'équipage).

¹⁴⁵ Selon les valeurs du recensement de 2011 disponible sur le site internet : www.citypopulation.de

navires de croisière amarrés à *Charlotte Amalie* (pour une capacité maximale de 16 876 individus) et aux îles Vierges Britanniques où trois navires de croisière sont au mouillage à Tortolla (pour une capacité maximale de 7 905 individus).

Au cours, de l'exercice *Caribe Wave 2015*, nous avons d'ailleurs transmis les résultats de nos recherches préliminaires à l'intention de l'EMIZA et du CROSS-AG, quelques minutes seulement après l'heure théorique de réception des modèles de scénarios RIFT afin de les sensibiliser à cette problématique. Trois navires de croisière étaient amarrés dans des ports français (deux en Martinique et un à Saint Barthélemy) et 21 navires de croisière étaient exposés au tsunami dans la SSR du CROSS-AG. Aucune suite n'a été donnée à notre démarche.

Ces travaux exploratoires ont pour vocation de faire prendre conscience à travers les chiffres exposés que l'évacuation des navires de croisière est un enjeu fondamental, notamment pour les petits espaces insulaires. Le processus est complexe, il demande des moyens humains et matériels importants pour une planification de crise efficace, sur la base de documents opérationnels permettant entre autres de recenser et d'identifier tous les acteurs susceptibles de jouer un rôle en cas d'alerte tsunami aussi bien à terre qu'en mer. A travers ces exemples, les noms de plusieurs compagnies sont revenus au cours de notre analyse. Nous sommes convaincus de l'importance de la prise en compte de l'aléa tsunami dans les plans internes des compagnies de croisière sur la base de manœuvres d'urgence qui pourraient être réfléchies en collaboration avec les autorités portuaires des escales qu'elles fréquentent. Face à de tels enjeux, nous préconisons également que l'aléa tsunami fasse l'objet de modèles de simulations numériques détaillés à l'échelle des bassins portuaires, espaces particulièrement sujets à des effets de site et éventuellement à des amplifications du phénomène. Une meilleure connaissance locale du phénomène et notamment de la vitesse des courants attendus pour chaque poste à quai permettrait de mieux définir les actions de sauvegarde à tenir (Lynett *et al.*, 2012 ; Wilson et Miller, 2014). Il semble également particulièrement important que les plans d'évacuation des secteurs portuaires tiennent compte de cet afflux temporaire d'évacués, notamment pour ce qui est de la dimension des sites refuges et des besoins particuliers en termes de nécessités vitales (eau, nourriture, soins).

8.1.2. Anticiper des scénarios crédibles d'évacuation à terre à l'échelle départementale

8.1.2.1. Estimations des temps d'évacuation pour rejoindre les PEZR

L'évacuation de masse est un processus complexe séquencé en plusieurs phases dont les délais sont variables en fonction de chaque individu ou groupe d'individus (chapitre 4). On compte trois phases principales : le temps de l'alerte, le temps de réaction et le temps de la mobilisation. C'est ce dernier que l'on propose de déterminer par nos résultats de calculs d'accessibilité sur graphe. Le réseau routier employé à l'échelle départementale permet de calculer, à l'aide de l'outil RouteFinder® les temps et les distances de parcours pour rejoindre des Points d'Entrée en Zone Refuge (PEZR) (chapitre 5), au départ de chacune des mailles situées dans la zone à évacuer à l'échelle départementale (chapitre 7). Il est paramétré selon trois scénarios de vitesse de déplacement qui reflètent la plus ou moins grande facilité à se déplacer sur le réseau. La représentation cartographique des temps de

parcours permet de visualiser et de spatialiser les secteurs les plus éloignés des PEZR, et donc les plus vulnérables en cas d'alerte. Associée à l'analyse des distances à l'aide d'outils SIG, nous sommes alors en mesure de proposer des aménagements pour optimiser l'évacuation terrestre. Il s'agit des deux informations indispensables à l'élaboration de plans opérationnels pour la gestion d'une évacuation massive du littoral en cas d'alerte tsunami.

En Martinique, quels que soient les scénarios de vitesse de déplacement, les secteurs de mangrove et de basse plaine sont particulièrement critiques. En effet, distants de tout relief, et par conséquence de sites refuges horizontaux, leur éloignement rend une évacuation pédestre délicate. Les temps maximums d'évacuation se retrouvent dans le fond de la baie de Fort-de-France (figure 76). Il faut souligner que de nombreuses activités économiques ainsi que l'aéroport international Aimé Césaire se situent dans ce secteur. A l'extrême sud de l'île, sur la commune de Sainte-Anne, les temps de parcours excèdent également les 15 minutes de marche sur pratiquement tout son littoral. Ces valeurs augmentent logiquement pour le scénario aux vitesses dégradées. Dans ce cas de figure, le temps de marche maximum s'avère être supérieur à deux heures.

Pour le reste de l'île, les temps de parcours sont relativement bien conditionnés. Le temps moyen pour rejoindre un PEZR est de 14.4 minutes selon le premier scénario de vitesse de déplacement. Pour le second, les temps d'évacuation augmentent et dépassent le seuil des 15 minutes sur les franges littorales. Le temps de parcours moyen est de 20.7 minutes de marche. Dans le dernier scénario, les valeurs supérieures à 15 minutes de marche prédominent largement, puisque le temps moyen est de 28.3 minutes et seuls les secteurs les plus proches de PEZR conservent des temps inférieurs à 15 minutes de marche. Ces observations préliminaires nous permettent de poursuivre par une analyse plus détaillée en croisant ces données avec les scénarios de fréquentation définie au chapitre 7. D'une part, ils permettront de définir les secteurs les plus à risque compte tenu de la quantité d'enjeux humains par la création d'un indicateur de risque, et d'autre part de déterminer la faisabilité d'une évacuation en fonction de plusieurs scénarios d'événements tsunamigènes, deux informations déterminantes pour la planification des évacuations à l'échelle départementale.

La collection de cartes page suivante représente les temps de parcours pour rejoindre un PEZR au départ de la zone de danger en fonction des trois scénarios de vitesse de déplacement. La sémiologie cartographique est commune aux trois scénarios. Les zones de couleurs froides (vert) correspondent à des temps de marche inférieurs à 15 minutes et les tons chauds (jaune, orange) aux secteurs dont les temps sont supérieurs à 15 minutes.

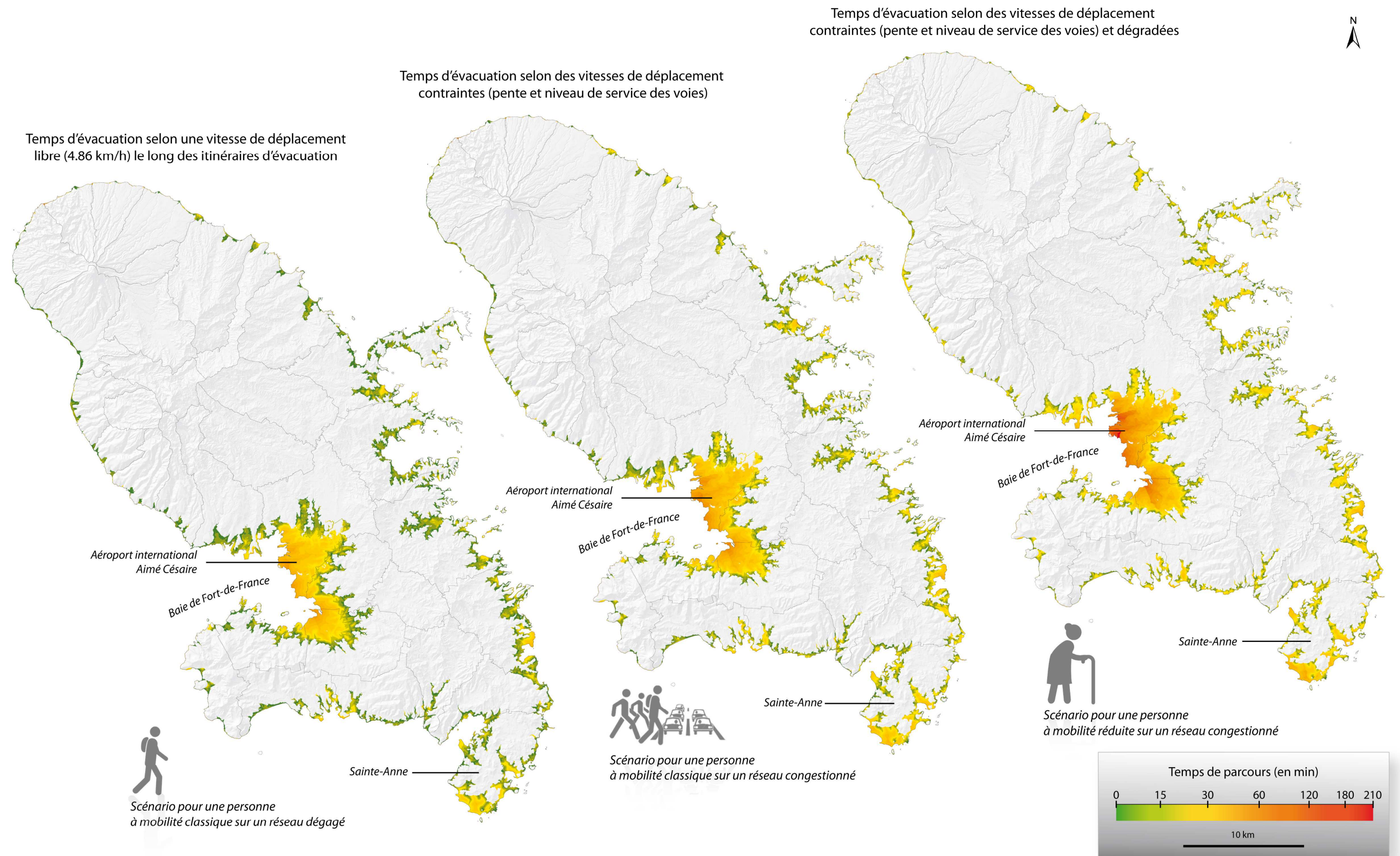


Figure 76. Collection de cartes des temps d'évacuation théoriques pour rejoindre un PEZR à pied

8.1.2.2. Modélisation des évacuations pour un scénario d'occupation nocturne

Les mailles du territoire exposé sont renseignées en fonction d'une quantité de population selon différents scénarios temporels de fréquentation. L'un d'eux représente une répartition de la population selon un scénario nocturne (nombre de résidents à l'année) et l'autre selon des scénarios diurnes (nombre d'usagers des plages en période de haute saison en week-end, en semaine et à Pâques) (chapitre 7). A ce stade du travail, nous sommes en mesure de quantifier des volumes de personnes à sécuriser en fonction du temps disponible avant l'arrivée d'un tsunami. Cette information peut être représentée sous la forme de graphiques ou de courbes d'accessibilité (Chapelon, 2006). Elles correspondent au nombre d'évacués ayant atteint des PEZR en fonction du temps. Sur un même graphique, nous avons reporté les courbes d'accessibilité calculées selon les différentes vitesses théoriques de déplacement pédestre. L'amplitude qui les sépare met en évidence l'incertitude des vitesses de déplacement des individus le long des itinéraires d'évacuation en fonction de leur capacité physique et de la congestion du réseau au moment de l'alerte d'évacuation. Elle équilibre l'analyse des valeurs moyennes crédibles.

- Evacuation à l'échelle départementale

À l'échelle départementale, les calculs sont effectués au départ de chaque maille du territoire renseignée par une valeur de population selon le scénario d'occupation nocturne (DGFIP / INSEE) soit 16 725 mailles pour une population totale à évacuer de plus de 66 000 personnes. Les calculs d'itinéraires sont optimisés pour évacuer un maximum de personnes en un minimum de temps selon l'itinéraire le plus rapide vers un PEZR dont l'altitude minimale est de 15 m au dessus du niveau de la mer.

Le temps théorique de mise en sécurité des personnes pour un scénario d'évacuation de nuit en période de basse saison, varie entre 54 minutes pour une vitesse de déplacement libre et 134 minutes pour une vitesse contrainte dégradée sur la commune du Lamentin. La valeur maximale selon une vitesse contrainte est estimée à 76 minutes. Malgré ces valeurs maximales élevées, deux éléments sont mis en évidence par le graphique (figure 77). Premièrement, les temps moyens de parcours sont relativement courts. Ils sont respectivement de 5,7, 8,5 et 12,2 minutes pour les scénarios à vitesse libre, contrainte et contrainte dégradée. Deuxièmement, près de 93 % (61 846 personnes) de la population accéderaient à l'altitude de mise en sécurité de 15 m en moins de 15 minutes de marche, le maximum pouvant être atteint est de 97 % (64 538 évacués) pour une vitesse de déplacement libre et le minimum serait de 73 % (48 682 évacués) d'entre elles pour une vitesse contrainte dégradée. Ces estimations présentent une tendance générale plutôt optimiste sur les possibilités d'évacuation de l'île à l'échelle du département. Par conséquent, ce constat est à nuancer à une échelle d'analyse plus fine.

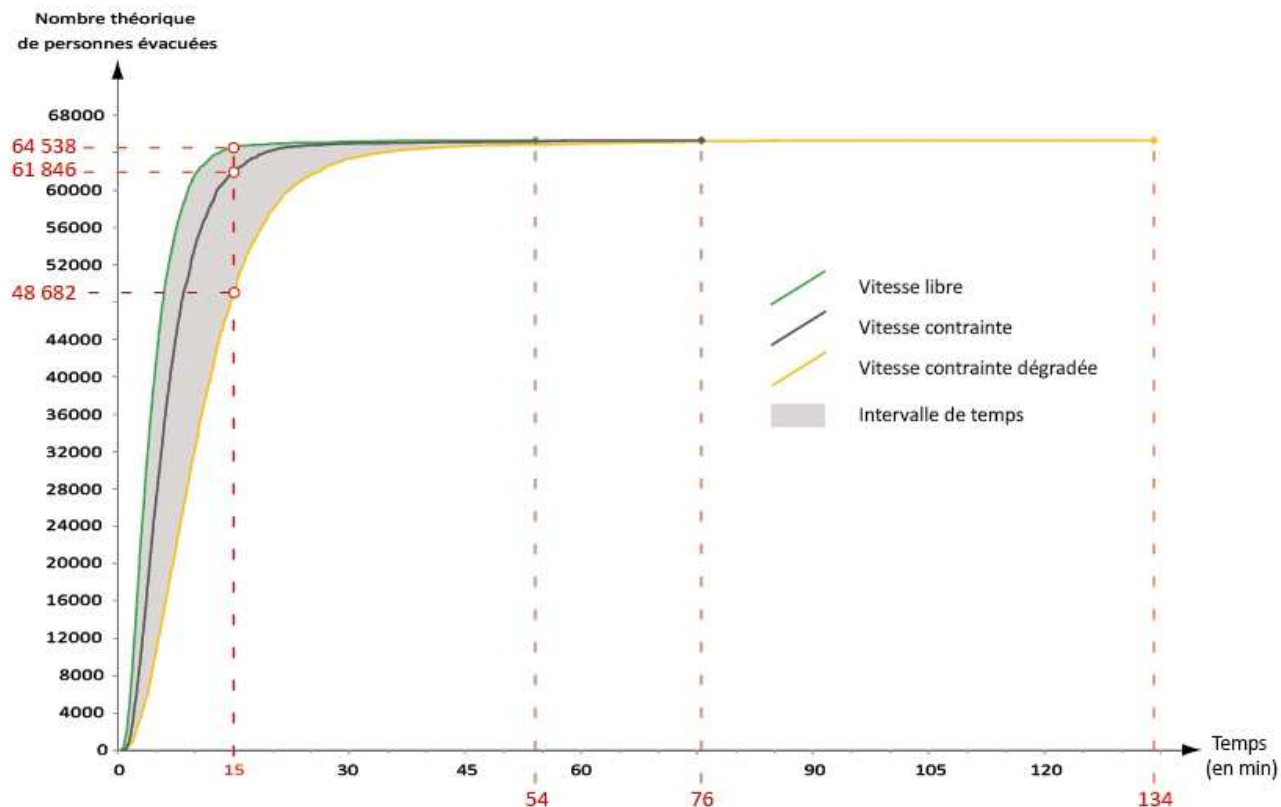


Figure 77 : Courbes d'accessibilité des temps minimaux de sécurisation des personnes situées en zone à évacuer pour rejoindre un PEZR selon trois valeurs de vitesse de déplacement pour un scénario de fréquentation nocturne à l'échelle de la Martinique.

La courbe verte représente le volume maximum théorique de personnes «évacuables» selon le temps minimum «absolu» pour rejoindre un PEZR à pied. La courbe jaune représente la même information mais selon une vitesse de marche largement dégradée en fonction de la voie et de la pente. La courbe grise correspond à un scénario moyen crédible. Quel que soit le scénario de vitesse, la distance moyenne de marche varie de 330 m (plus ou moins 5 m).

- Evacuation à l'échelle communale

Le traitement des précédents résultats au niveau communal révèle une grande hétérogénéité des temps théoriques de mise en sécurité à l'échelle de l'île (figure 18). Les caractéristiques pour chaque commune sont représentées par des courbes d'accessibilité dont le profil général illustre une plus ou moins grande difficulté pour rejoindre un PEZR. Ces courbes sont analysées à travers l'étude des trois paramètres suivants : les valeurs maximales d'évacuation, la forme générale des courbes et les écarts de valeurs entre les différents scénarios.

On constate globalement que les temps d'évacuation maximum sont relativement courts pour les communes du nord de la Martinique. Ces communes sont marquées par un fort relief qui contribue à réduire les distances à parcourir pour rejoindre les PEZR. En effet, pour les 12 communes situées entre Schœlcher (n°1) et Sainte-Marie (n°12) en passant par le Prêcheur (n°6), le temps d'évacuation moyen sur le réseau est de sept minutes, selon une vitesse de marche contrainte, pour une distance moyenne de 250 m. Le temps moyen de marche à pied pour rejoindre un PEZR pour les 15 autres communes est

supérieur à neuf minutes pour une distance moyenne de 340 m. Seules deux d'entre elles présentent un temps d'évacuation maximum (vitesse de marche contrainte) inférieur à 20 minutes. Les temps les plus importants pour atteindre un PEZR selon le paramétrage de vitesses crédibles concernent les communes du Lamentin (76 min), Sainte-Anne (41 min), Rivière-Salée et Trinité (35 min). Il faut souligner que Fort-de-France, le Lamentin, le Robert, la Trinité et le François sont les cinq communes avec le plus grand nombre de personnes à évacuer pour un scénario de nuit. Fort-de-France se détache du lot avec plus de 15 413 personnes pour une durée d'évacuation crédible de 21 minutes, un minimum théorique de 15 minutes et un maximum théorique de 42 minutes. Les communes de Grand'Rivière, Le Précheur, et Macouba présentent les durées de parcours théoriques minimales.

La description d'ensemble de l'allure des courbes d'accessibilité permet aussi de faire ressortir quelques grandes généralités. Les courbes des communes de Fort-de-France, de Trinité, du Robert et de Schoelcher revêtent un aspect quasiment linéaire, très abrupt, ce qui figure un grand nombre d'évacués en simultané sur le réseau, et donc des risques importants de congestion des itinéraires d'évacuation. À l'inverse, celles des communes de Bellefontaine, Case-Pilote, Basse-Pointe, du Lorrain, du Marigot, de Sainte-Anne ou encore de Rivière-Salée prennent une forme plus allongée. Cette forme représente une plus grande dispersion spatiale de la population à évacuer et un réseau plus étendu sur des secteurs plus plats.

Les écarts plus ou moins importants entre les courbes d'accessibilité pour les différents paramètres de vitesse expriment la plus ou moins bonne qualité des réseaux d'évacuation. Plus l'écart entre les courbes est faible plus les itinéraires d'évacuation sont propices à une évacuation, car leurs caractéristiques (largeur, revêtement et pente) sont favorables à l'accueil d'un flux important de population. C'est le cas des communes de Grand'Rivière, du Lorrain, du Marigot, des Anses-D'Arlet, du François, du Robert, de Trinité ou encore du Vauclin. *A contrario*, les communes de Basse-Pointe, du Carbet, de Bellefontaine, de Fort-de-France, du Lamentin ou encore de Rivière-Salée présentent des différences de temps supérieures à la moyenne. Ce sont les distances d'évacuation plus longues qui génèrent l'augmentation des temps d'accès. Elles creusent les écarts de temps parfois combinés à des itinéraires d'évacuation qui empruntent des voies étroites et/ou à forte pente. Ce type d'examen associé à des analyses spatiales permet de prioriser des actions à mener, commune par commune, pour améliorer les délais d'évacuation comme l'ouverture de nouveaux sites refuges et itinéraires, limiter le stationnement de véhicules le long d'itinéraires d'évacuation très sollicités, etc.

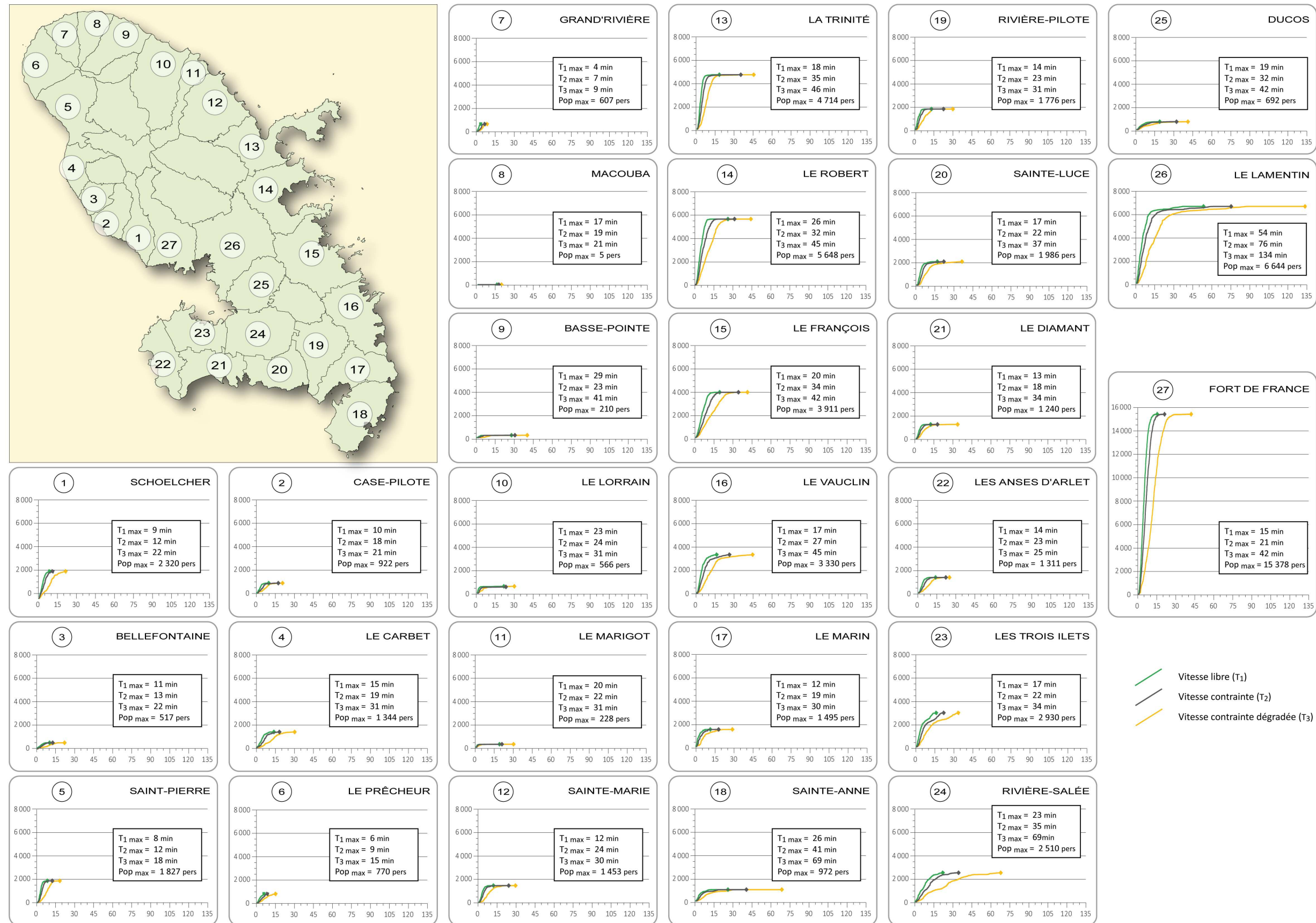


Figure 78 : Courbes d'accessibilité des temps minimaux de sécurisation des personnes situées en zone à évacuer pour rejoindre un PEZR selon trois valeurs de vitesse de déplacement pour un scénario de fréquentation nocturne à l'échelle communale

8.1.2.3. Modélisation des évacuations pour des scénarios diurnes

- Evacuation à l'échelle départementale

La méthode de comptage des usagers et l'extrapolation des densités théoriques de fréquentation de plusieurs plages de la Martinique à l'ensemble d'entre elles, nous ont permis de définir plusieurs scénarios d'occupation de ces espaces à l'échelle de l'île (chapitre 4). Ces espaces, au plus proches de la mer, sont particulièrement exposés aux effets d'un tsunami et leur évacuation est une priorité. Seulement, ils sont souvent les plus éloignés des points hauts. Ainsi, l'ensemble des valeurs moyennes de mise en sécurité des personnes présentes sur les plages est plus élevé que pour l'évacuation du scénario nocturne. A l'échelle départementale, le temps moyen de marche est de 12 minutes pour une distance moyenne de 470 m afin de rejoindre un PEZR (vitesse de marche contrainte). Le temps minimum théorique est de 39 minutes (vitesse libre), le maximum de 94 minutes (vitesse contrainte dégradée) et le crédible de 54 minutes (vitesse contrainte). Quel que soit le scénario de fréquentation, l'allure des courbes d'accessibilité est étendue sur l'axe des abscisses, figurant une grande dispersion des usagers des plages et donc une plus grande difficulté pour rejoindre un site refuge que pour le scénario d'occupation nocturne (figure 79). En effet, la quantité théorique de population mise à l'abri en 15 minutes pour un réseau paramétré selon des valeurs de marche libre, est de 1 898 évacués en semaine (57 %), 5 245 évacués en week-end (58 %), et de 14 103 évacués à Pâques (60 %). Les rapports entre les écarts du nombre d'évacués des différents scénarios de vitesse de déplacement et de fréquentation sont très proches des uns des autres. Les extremums des temps d'évacuation restent d'ailleurs inchangés. En effet, la non prise en compte des variations dynamiques au cours du temps des vitesses de déplacement sur le réseau en fonction de la densité d'individus ne permet pas de rendre compte de ces effets par nos calculs. Néanmoins, on peut imaginer que les temps nécessaires pour évacuer en semaine, au moment où la fréquentation est plus faible, seront plus proches d'un scénario selon une vitesse de déplacement libre et que le nombre d'évacués variera entre 1 898 (57 %) et 2 383 (71 %) ; *a contrario* ces valeurs seront plus proches d'une fourchette comprise entre 9 306 et 14 103 évacués pour un scénario à Pâques.

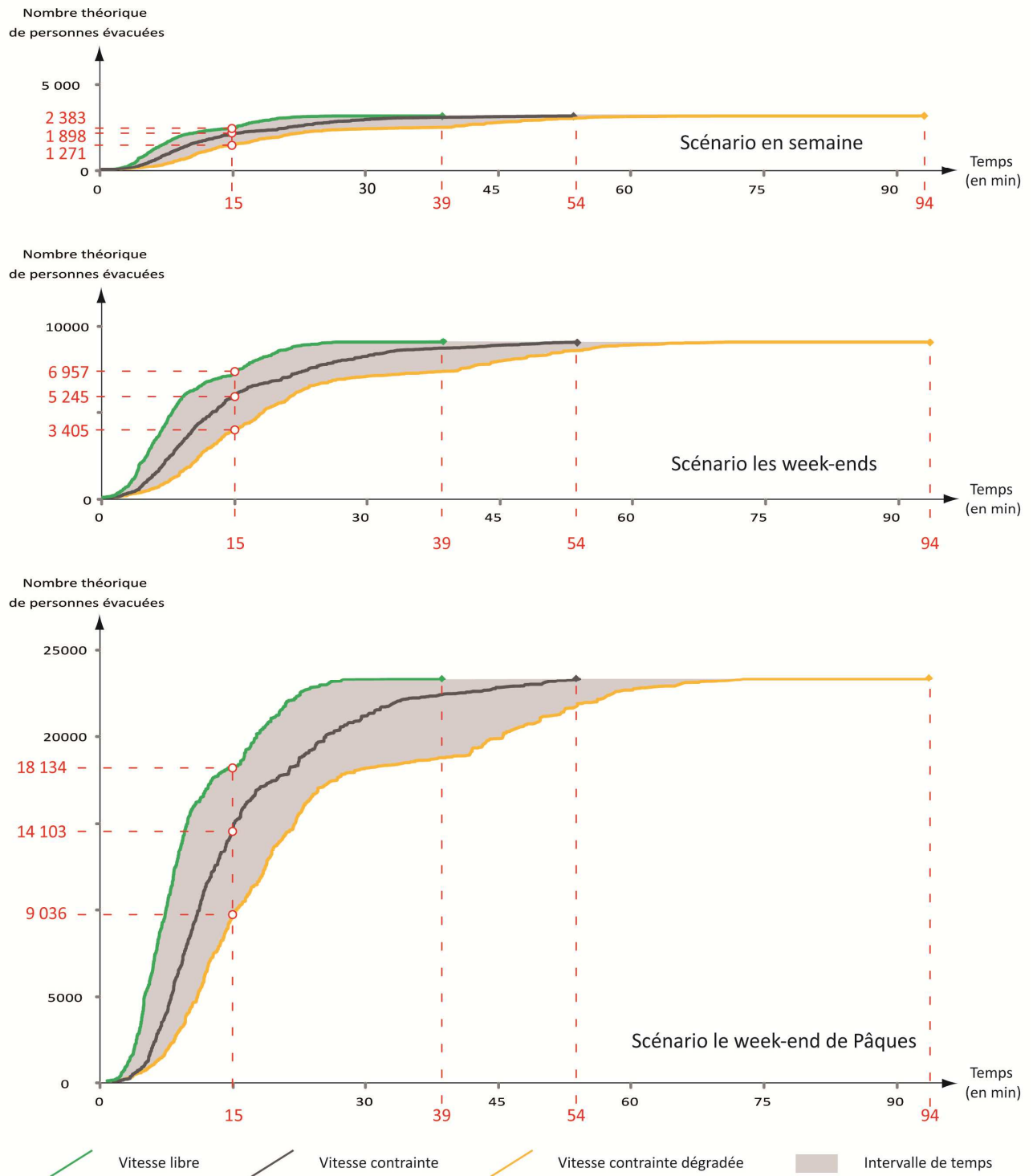


Figure 79 : Courbes d'accessibilité des PEZR au départ des plages de la Martinique pour trois scénarios de fréquentation

- Evacuation à l'échelle des plages

En Martinique, pour 56 des 352 polygones de plages numérisés, il faut compter un temps moyen de marche à pied supérieur à 15 minutes pour rejoindre un PEZR (tableau 27). Cette sélection comprend notamment l'une des plus touristiques d'entre elles : la plage de Grande Anse des Salines. Sa

fréquentation dépasse plus de 1 200 personnes au cours des week-ends et son temps moyen de parcours est estimé à 26.1 minutes pour une distance de 1.41 km.

Tableau 27 : Description des plages présentant des temps d'évacuation supérieurs à 15 min

Type de plage	Plages avec un temps d'accès supérieur à 15 min	Fréquentation en semaine	Nb de personnes Week-end	Nb de personnes à Pâques
PPT	1	819	1 184	1 397
PST	10	233	1 038	2 867
PUF	1	33	73	166
PUNF	3	23	28	106
PSP	10	174	458	953
PN	14	160	588	594
PP	5	7	4	21
PNFQ	12	28	4	453
Totaux	56	1477	3377	6 557

Tableau 28 : Description des plages présentant des distances d'évacuation théoriques supérieures à 800 m

Type de plage	Plage avec une distance d'accès inférieure à 800 m	Fréquentation en semaine	Nb de personnes Week-end	Nb de personnes à Pâques
PPT	0	0	0	0
PST	4	112	502	1 386
PUF	0	0	0	0
PUNF	2	20	25	94
PSP	3	51	132	274
PN	8	78	285	288
PP	4	5	3	14
PNFQ	7	15	35	244
Totaux	28	281	982	2300

L'analyse des valeurs des distances d'évacuation plage par plage montre que la moitié de ces plages se situe à une distance moyenne inférieure à 800 m de marche d'un PEZR (tableau 78). Il semble donc possible d'améliorer la qualité des itinéraires pour gagner en temps et permettre ainsi à plus de 2 000 personnes supplémentaires de rejoindre un site refuge dans des délais théoriques convenables. Les communes les plus concernées par ce besoin en aménagement sont : Sainte-Anne (huit plages), Sainte-Luce (quatre plages), le Marin (deux plages), le Carbet (deux plages), ce qui représente respectivement 1 369, 191, 213 et 309 personnes pour un scénario de fréquentation à Pâques. Nous avons également représenté sous la forme d'histogrammes le nombre de personnes présentes sur les plages qui peuvent atteindre ou non un site refuge en moins de 15 minutes, selon une vitesse de déplacement contrainte pour les 20 plages les plus fréquentées et pour chaque scénario d'occupation diurne (figure 80). Les trois plages dont la totalité de l'espace est éloignée à plus de 15 minutes de marche d'un PEZR, sont celles de Grande Terre, d'Anse à Prune et des Salines toutes trois situées sur la commune de Sainte-Anne. Elles totalisent un nombre de victimes potentielles de 2 755 individus pour un scénario d'occupation maximisant (Pâques), 1 795 en week-end de haute saison et 896 en semaine en période de haute saison. Ces informations sont particulièrement précieuses et attendues par les gestionnaires de crise. Nous avons donc généralisé ce type d'analyse à l'échelle de l'île à partir de traitements SIG.

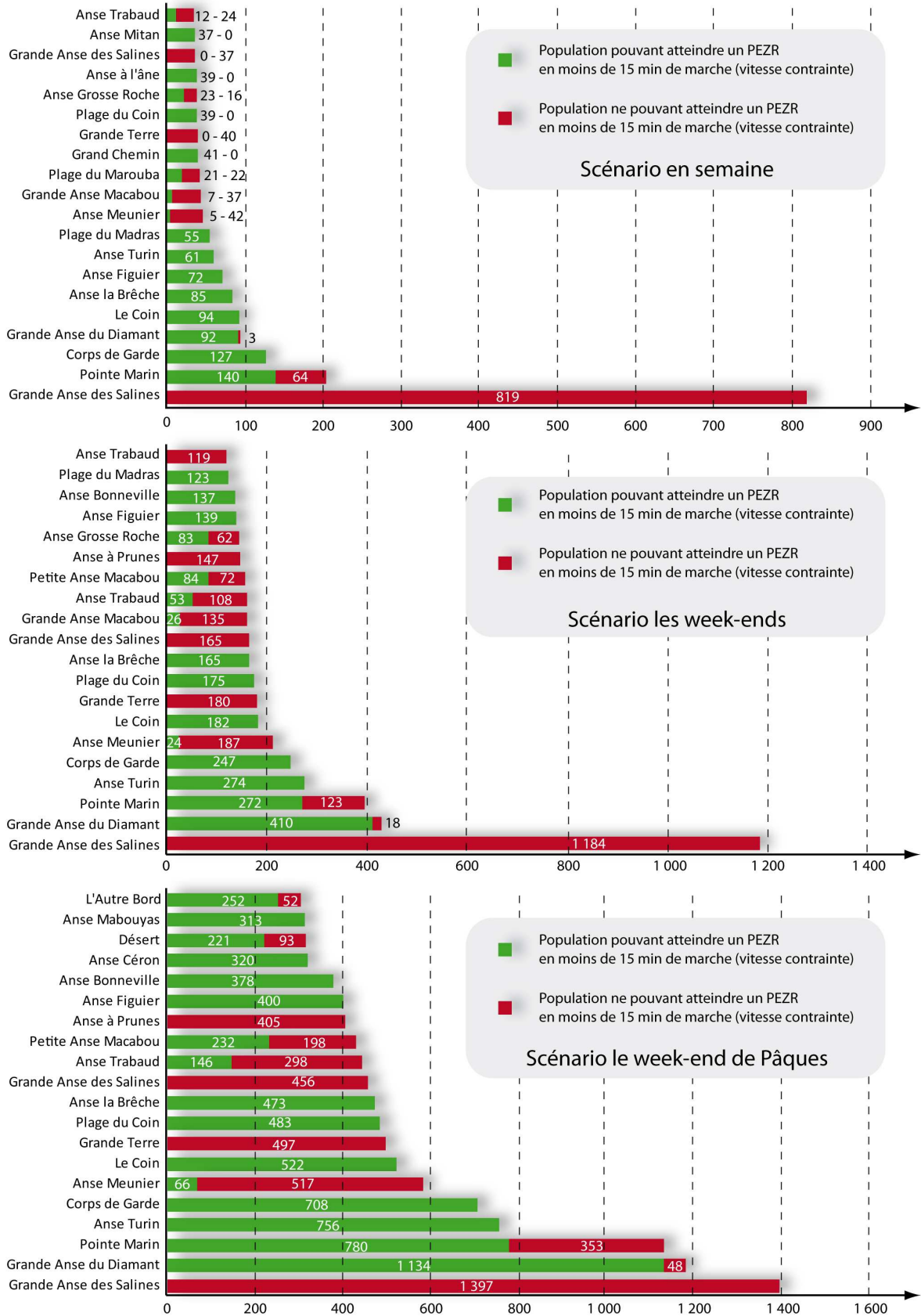


Figure 80 : Histogramme du nombre d'évacués pouvant atteindre ou non un site refuge en moins de 15 min de marche au départ des 20 plages les plus fréquentées pour trois scénarios de fréquentation

8.1.2.4. Estimation du volume d'évacués par PEZR à l'échelle locale

Choisir judicieusement les sites refuges, même temporaires, est un des éléments clés pour la réussite des opérations d'évacuation. Le choix de ces sites refuges doit répondre à plusieurs critères. Ils sont tenus d'offrir la sécurité nécessaire aux évacués, répondre aux paramètres primaires d'accessibilité et surtout présenter une capacité d'accueil suffisante selon différents scénarios d'occupation (chapitre 5). Notre approche fournit les premiers résultats nécessaires pour cette dernière évaluation à l'échelle de l'île.

- Estimer la sollicitation des PEZR et leur occupation théorique

Plus de 1 930 PEZR sont sollicités par le modèle pour l'évacuation de la zone de danger, sur les 2 322 relevés initialement à l'échelle de l'île (fréquentation nocturne). Le nombre élevé de PEZR ainsi que leur bonne répartition contribuent à diminuer les distances d'évacuation. En fonction de la répartition initiale de la population, leur occupation peut considérablement varier d'un scénario à un autre. Il s'agit donc pour les autorités locales, de veiller à l'adéquation entre l'offre et le besoin d'évacuation. Bien que plusieurs des PEZR concernent des territoires inhabités, où la fréquentation est *quasi* nulle, d'autres au contraire sont susceptibles d'accueillir une très grande quantité d'évacués (tableau 29). Par exemple, 1 117 des PEZR sont sollicités par le modèle et accueillent au moins une personne pour le scénario de nuit. Le nombre moyen d'évacués sur l'île est d'environ 60 par PEZR et le maximum est de 1 450 individus. Trente PEZR accueillent plus de 400 personnes dont 8 plus de 800. C'est la quantité initiale d'individus au moment de l'évacuation et leur répartition spatiale qui déterminent en grande partie les sites refuges sollicités et leurs taux d'occupation. A l'échelle départementale, ces informations permettent de réaliser une première estimation de la répartition de la population sur les sites refuges. A cette échelle, il est possible de dégager de grandes orientations qui seront affinées notamment par les scénarios maximisants. Les chiffres théoriques d'occupation seront confrontés à la capacité d'accueil crédible des futurs sites refuges afin de s'assurer de la bonne adéquation entre la sollicitation théorique et l'offre.

Tableau 29 : Statistiques du nombre d'évacués par PEZR à l'échelle départementale

Scénarios	Nocturne	Diurne semaine	Diurne week-end	Diurne Pâques
Nombre de PEZR sollicités	1 117	227	238	299
Moyenne d'évacués par PEZR	60	14	38	78
Maximum d'évacués sur un PEZR	1452	503	1 078	3 137
Nombre de PEZR sollicités par plus de 400 évacués	30	1	2	11
Nombre de PEZR sollicités par plus de 800 évacués	8	0	1	5

- Définir les aires d'influences de chaque PEZR

Les résultats des calculs d'accessibilité permettent de représenter précisément les zones d'influence de chaque PEZR (figure 81). Ces zones déterminent en chaque point de la zone à évacuer le PEZR le plus rapide à rejoindre. Cette information est importante pour les collectivités locales. C'est un moyen simple et fiable pour mettre à jour des données de fréquentation des PEZR en fonction par

exemple, de l'évolution de l'urbanisme en zone à évacuer comme l'implantation d'un nouvel ERP ou d'un lotissement d'habitations. Ainsi, il est facile de déterminer si la capacité d'accueil du site refuge est toujours adaptée pour recevoir la quantité d'individus résidents ou en transit.

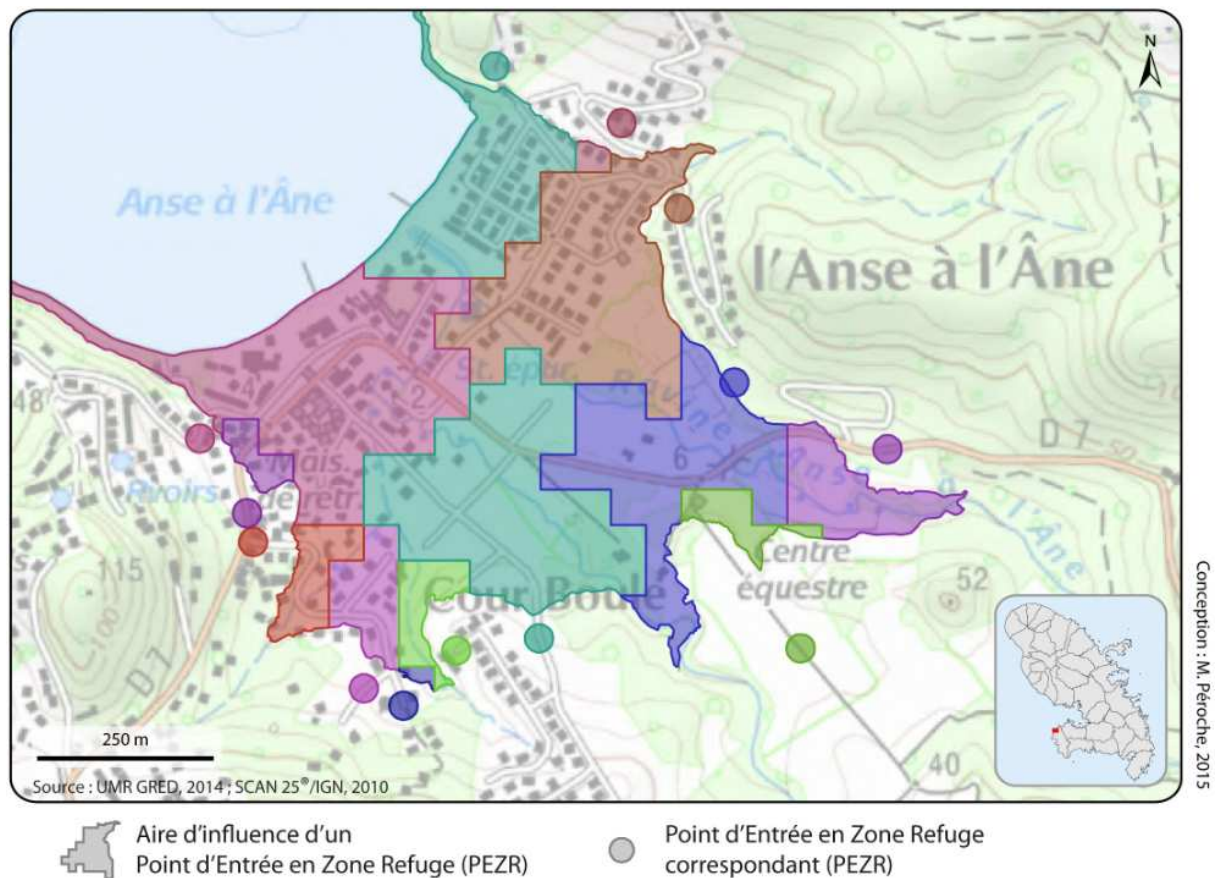


Figure 81 : Exemple d'aires d'influence des PEZR (bourg de l'Anse à l'Âne, commune des Trois-Îlets)

8.1.2.5. Estimation de la charge cumulée de la fréquence de passages associée à chaque tronçon des itinéraires d'évacuation

Les itinéraires d'évacuation représentent les liens physiques (réseaux routiers) qui permettent de quitter les zones à évacuer pour atteindre les points hauts hors de danger. Estimer leur qualité en termes de capacité de flux est tout aussi important que d'estimer celle de la capacité d'accueil d'un site refuge. Nous avons donc généré les itinéraires d'évacuation au départ de chaque maille du territoire exposé vers les PEZR selon les parcours les plus rapides et optimisés pour évacuer le plus grand nombre de personnes à l'aide de l'outil RouteFinder®. Puis, nous avons développé une chaîne de traitement SIG qui permet de cartographier la fréquence de passages cumulés par tronçon routier (cf. annexe 8). Nous sommes alors en mesure de quantifier et spatialiser avec précision les axes d'évacuation théoriquement les plus sollicités au cours du processus d'évacuation en fonction de différents scénarios de fréquentation de la zone à évacuer (cf figure 82). Cette information peut être comparée à la qualité de service de la voie afin de définir les itinéraires les plus critiques et susceptibles d'être particulièrement encombrés. Il convient alors aux autorités locales de prendre des mesures temporaires en phase d'alerte et/ou d'initier des travaux d'aménagement permanents pour fluidifier les évacuations pédestres (González-Riancho Calzada *et al.*, 2013; León et March, 2014).

Temporairement, les évacués peuvent être guidés par les autorités pour limiter les éventuels problèmes de congestion au cours de l'évacuation. En milieu urbain certains tronçons pourraient être interdits au stationnement des véhicules et dédiés uniquement à l'évacuation pédestre comme le propose Bolton (2007). En milieu rural, certains sentiers ou chemins particulièrement sollicités en cas d'évacuation pourraient être élargis voir goudronnés. Les axes majeurs d'évacuation doivent également faire l'objet d'une étude minutieuse du risque de coupures, qui est particulièrement redouté en cas de tsunami local pour un séisme de forte intensité, ressenti en Martinique et qui plus est, ne laisserait qu'un temps d'évacuation très court. Une fois les itinéraires critiques repérés nous sommes en mesure de modéliser une seconde fois les itinéraires d'évacuation pour déterminer un itinéraire de déviation optimisé. Si finalement le temps d'évacuation dépasse les hypothèses de départ, l'aménagement de l'itinéraire principal sera favorisé.

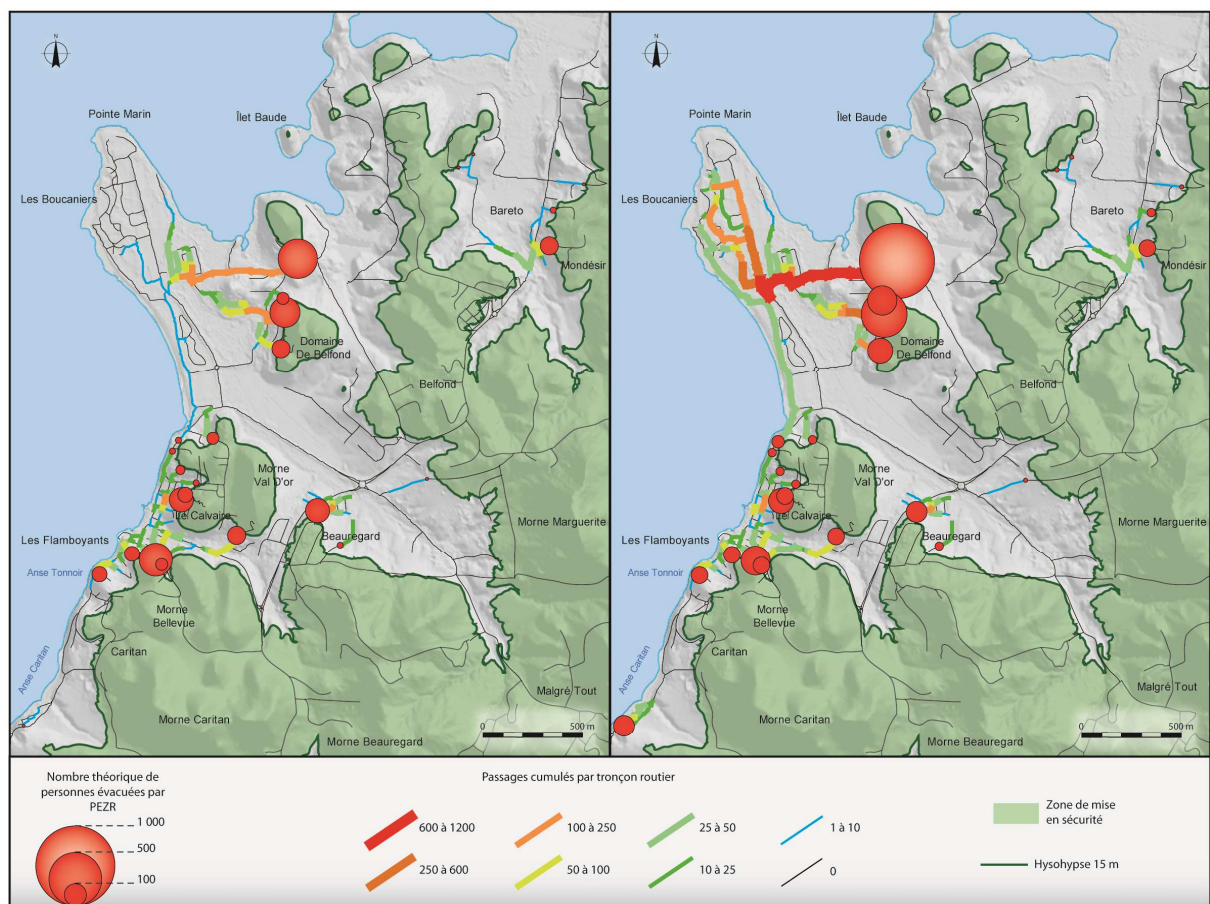


Figure 82 : Carte de la fréquence de passages cumulés par tronçon routier et du nombre théorique d'évacués par PEZR, scénario de basse saison (à gauche) et scénario de haute saison (à droite)

La fréquence de passages cumulés est représentée selon l'épaisseur du figuré linéaire en huit classes distinctes et le nombre d'évacués par site refuge selon des cercles proportionnels. On remarque selon les deux scénarios d'occupation de la zone à évacuer que la charge du réseau ainsi que les PEZR sont plus ou moins sollicités. En période de haute saison, l'établissement hôtelier du Club-Méditerranée situé à l'extrémité de Pointe Marin peut accueillir jusqu'à 700 individus, touristes et personnels inclus. Ainsi l'un des axes d'évacuation en rouge est particulièrement emprunté. Il s'agit pourtant d'un sentier. Le choix d'un autre itinéraire ou alors son aménagement doit être considéré par les responsables locaux.

8.1.3. Spatialiser la vulnérabilité humaine en Martinique pour mieux se préparer

8.1.3.1. Exemple d'évaluation de faisabilité d'une évacuation en fonction de quatre scénarios de tsunami

La confrontation des temps théoriques de mise en sécurité des populations à des temps de trajet de tsunami permet de discuter la performance d'une évacuation face à plusieurs scénarios. Le principe est de dénombrer les personnes en sécurité de celles toujours en cours de déplacement au moment de l'impact théorique du tsunami. Nous illustrons ce type d'évaluation à travers quatre scénarios crédibles d'origine sismique pouvant affecter la Martinique, proposés par le BRGM (Poisson et Pédreros, 2007). Tous présentent des temps de trajet inférieurs à 40 minutes. Le temps minimum de 18 minutes est attribué à un événement localisé au niveau du prisme de Sainte-Lucie. Face à ces scénarios locaux, seule la reconnaissance des signes annonciateurs par les populations permet de débiter une évacuation spontanée vers les hauteurs. Nous ne tenons alors pas compte du temps de diffusion du message d'alerte considérant que la population qui a ressenti les secousses cherchera à évacuer le littoral pour se mettre en sécurité sur les hauteurs. Par contre, nous déduisons aux temps de trajet un temps théorique de réaction estimé à 15 minutes. Cette valeur définie arbitrairement doit faire l'objet d'une étude sur les comportements humains plus approfondie en s'appuyant sur des résultats issus de RETEX ou d'enquêtes d'intention réalisés sur le territoire martiniquais pour constituer une valeur fiable.

Ainsi, à l'échelle de la Martinique pour un scénario de fréquentation nocturne, la quantité de personnes susceptibles d'atteindre un PEZR en moins de trois minutes, pour le scénario n°1, est de : 35 % au maximum (vitesse libre), 5.5 % au minimum (vitesse contrainte dégradée) et de 15.7 % (vitesse contrainte) (figure 83). Un peu moins de 42 500 personnes (65 %) ne pourraient pas rejoindre un PEZR à temps quels que soient les paramètres de vitesse employés, et 12 624 individus supplémentaires ne pourraient pas rejoindre un PEZR dans l'hypothèse où les axes d'évacuation seraient encombrés ou que leur capacité physique serait limitée. Fort heureusement ces valeurs chutent très vite pour les autres scénarios proposés par le BRGM. Avec seulement quatre minutes de délai supplémentaire (scénario n°2), près de 19 500 individus pourraient évacuer quelle que soit leur allure, et 11 557 ne pourraient pas rejoindre un PEZR. Ce n'est qu'au-delà de 21 minutes de délai pour évacuer (scénario n°4) que la quasi totalité des personnes en zone à évacuer pourrait rejoindre un site refuge topographique. Seules 321 personnes n'auraient pas rejoint un PEZR avant l'arrivée de l'onde de tsunami.

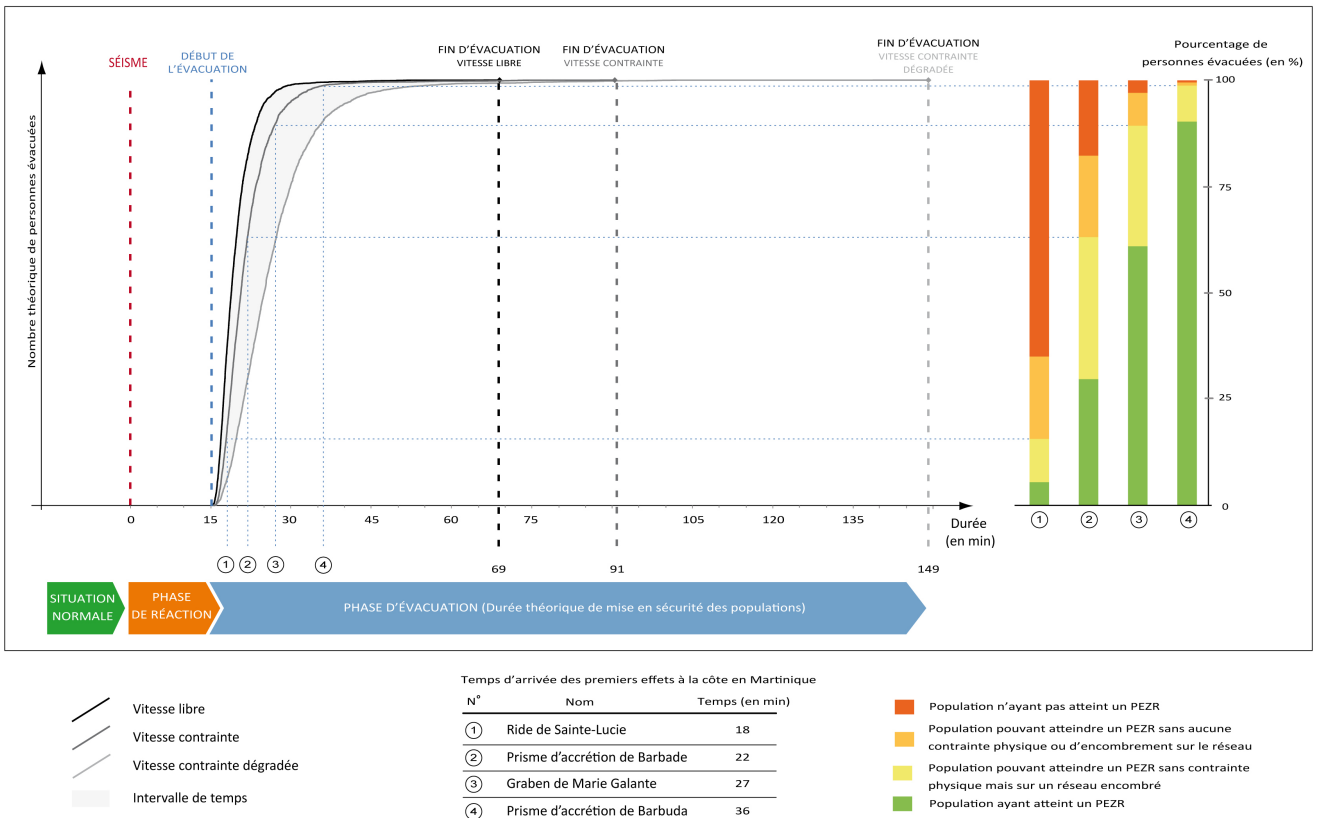


Figure 83 : Courbes de faisabilité d'évacuation à l'échelle de la Martinique pour quatre scénarios de tsunami local

8.1.3.2. Zones critiques et propositions pour optimiser une évacuation pédestre

L'étude des temps de parcours modélisés précédemment permet seulement une analyse générale des problématiques d'accessibilité aux échelles départementale et communale. Nous complétons notre démarche par une analyse spatiale détaillée des valeurs théoriques de temps et de distance d'évacuation. Nous avons établi six propositions de mise en situation, dont cinq qui concernent des zones que nous avons identifiées comme particulièrement critiques à évacuer (figure 84). Il s'agit ainsi d'aider les autorités locales dans le choix des mesures à mettre en place pour améliorer les temps d'évacuation vers un site refuge. Le principe de la méthode sous SIG consiste à sélectionner les mailles du territoire qui répondent à des requêtes spatiales particulières en fonction de : leurs données attributaires (temps et distance d'évacuation), de données complémentaires (PZER, réseau routier) et de données topographiques (MNT).

1) Zones critiques éloignées de tout relief

Cette première proposition concerne les secteurs éloignés de plus de 800 m de tout relief. En Martinique, ces secteurs concernent près de 14 % de la zone totale à évacuer. Ils sont localisés principalement dans la mangrove de Génipa. Dans ce secteur, deux sites sont particulièrement critiques : l'aéroport Aimé Césaire et la zone d'activité de la Lézarde. Ces lieux concentrent une grande quantité d'enjeux humains, notamment en journée. Au sud de la Martinique, la commune de Sainte-Anne, la Pointe Marin et la plage de Grande Anse des Salines sont également concernées. On y retrouve notamment le Club-Méditerranée. Pour ces secteurs particulièrement exposés, il est

impossible de rejoindre un site refuge topographique dans des conditions d'accès satisfaisantes¹⁴⁶. Sur ces trois espaces, on préconise d'identifier des sites refuges verticaux répondant aux critères déjà énoncés dans le chapitre 5. L'accès aux données de diagnostics parasismiques réalisés par le BRGM permettrait une présélection de sites refuges verticaux pour ces secteurs (Belvaux *et al.*, 2014). Des critères de résistance aux tsunamis, de sécurité, d'accès et de capacité devraient compléter ce diagnostic sur la base des valeurs retenues par la FEMA (2008). La plage de Grand Anse des Salines reste un cas particulièrement complexe car aucun bâtiment ne peut faire office d'espace refuge vertical à l'heure actuelle. De plus, son inscription comme site RAMSAR¹⁴⁷ en 2008 constitue un frein à la création d'un site refuge vertical dans un futur proche.

2) Zones en limite de secteurs critiques

Cette seconde mise en situation permet de délimiter les zones éloignées de moins de 800 m par rapport à l'isohypse de 15 m selon une distance euclidienne¹⁴⁸ mais pour lesquelles l'emplacement des PEZR dépasse cette valeur critique. Deux nouveaux secteurs critiques apparaissent : la pointe des Grives sur la zone portuaire de Fort-de-France, et l'extrémité du quartier Pointe du Bout sur la commune des Trois-îlets. Ils concernent une très faible population nocturne ainsi qu'une surface limitée. Sur ces secteurs, nous conseillons l'ouverture de sites refuges topographiques accompagnés d'aménagements d'itinéraires. En dépit de l'expertise nécessaire à l'évaluation de la faisabilité de ces sites horizontaux, il se peut que certains obstacles comme un relief abrupt, des chemins impraticables ou des terrains privés empêchent le projet d'aboutir. Dans ce cas, on peut proposer la construction d'un ou plusieurs sites refuges verticaux. Néanmoins, la très grande proximité de ces sites avec la mer ainsi que l'absence de protections littorales naturelles ou anthropiques peut apparaître comme un frein à cet aménagement.

3) Zones à faible connectivité

Cette troisième sélection représente les secteurs dont la longueur d'itinéraire d'évacuation vers un PEZR est supérieure à 800 m, mais dont la distance euclidienne est inférieure à 800 m de l'isohypse de 15 minutes. Ces secteurs englobent ceux précédemment cités mais comprennent également quelques portions de territoire de toutes les communes littorales, à l'exception de Schœlcher et Saint-Pierre. La population résidente nocturne y est importante, puisqu'elle s'élève à 2 300 habitants auxquels il faut ajouter près de 20 % d'usagers des plages, quel que soit le scénario de fréquentation. Pour ces secteurs, nous recommandons en priorité d'ouvrir de nouveaux itinéraires d'évacuation afin de diminuer efficacement les temps d'évacuation.

4) Zones à faible accessibilité

Dans la quatrième sélection figurent les secteurs dont la longueur de l'itinéraire d'évacuation est inférieure à 800 m mais dont le temps de parcours est supérieur à 15 minutes de marche (scénario de vitesse crédible). Toutes les communes sont plus ou moins concernées sauf celle de Saint-Pierre. Cette sélection concerne près de 11 % de la zone à évacuer. La plupart de ces secteurs sont situés dans des

¹⁴⁶ Distance de marche inférieure à 800 m pour un temps d'évacuation inférieur à 15 minutes de marche.

¹⁴⁷ Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau (traité international adopté le 2 février 1971).

¹⁴⁸ Distance à vol d'oiseau entre deux points.

espaces reculés le long de sentiers et ne regroupent pas d'enjeux humains particuliers. Par contre, pour ceux qui concentrent des enjeux, il est impératif d'améliorer la qualité des itinéraires d'évacuation voire d'en créer de nouveaux.

5) Zones à faible accessibilité

Ce sont les secteurs dont la longueur d'itinéraire d'évacuation est inférieure à 800 m et dont le temps de parcours est supérieur à 15 minutes de marche pour les scénarios de vitesse dégradée. Sur ces secteurs, il convient de recenser précisément et régulièrement les populations à mobilité réduite ou sous assistance médicale. Des modes de transports particuliers ainsi qu'une organisation locale doivent permettre d'évacuer ces populations en priorité, de manière planifiée ou spontanée. Pour une évacuation en période diurne, la gestion de la circulation routière sur ces secteurs est primordiale.

6) Zones résilientes

Il s'agit des secteurs pour lesquels les deux critères (distance et temps de parcours) par rapport au site refuge sont de moins de 800 m et inférieurs à 15 minutes de marche, selon le paramétrage crédible. Ces secteurs correspondent à près de 40 % de la zone à évacuer et présentent les conditions adéquates pour une évacuation à pied en cas d'alerte tsunami. Ils concentrent près de 75 % de la population nocturne, mais seulement 41 à 45 % des usagers des plages. Ils couvrent toute la zone du littoral proche de reliefs marqués. Il s'agit de secteurs où l'accessibilité des PEZR est bonne mais dont il faut assurer la qualité des flux de piétons dans le cas d'une évacuation massive. Il convient néanmoins de maintenir les itinéraires facilement accessibles qui les traversent, voire d'améliorer leur capacité de charge pour maximiser les temps d'évacuation sur le reste du territoire.

A cette échelle de travail, nos résultats apportent les premiers éléments de réponses opérationnelles en termes d'estimation de délais d'évacuation, de quantification et de spatialisation des secteurs critiques. Il est primordial que ces conclusions conduisent à une réelle prise de conscience de la part des autorités locales afin d'assurer la mise en place de moyens d'évacuation spécifiques dans ces secteurs. A partir de ces premiers résultats, une réflexion sur la planification locale des évacuations peut être engagée en concertation avec tous les acteurs de la gestion des risques (sélection de sites refuges, conception de plans d'évacuation normalisés, proposition de chartes graphiques et de panneaux standardisés). Il convient néanmoins de l'affiner par une approche de terrain et une expertise partagée entre connaissances scientifiques et empiriques.

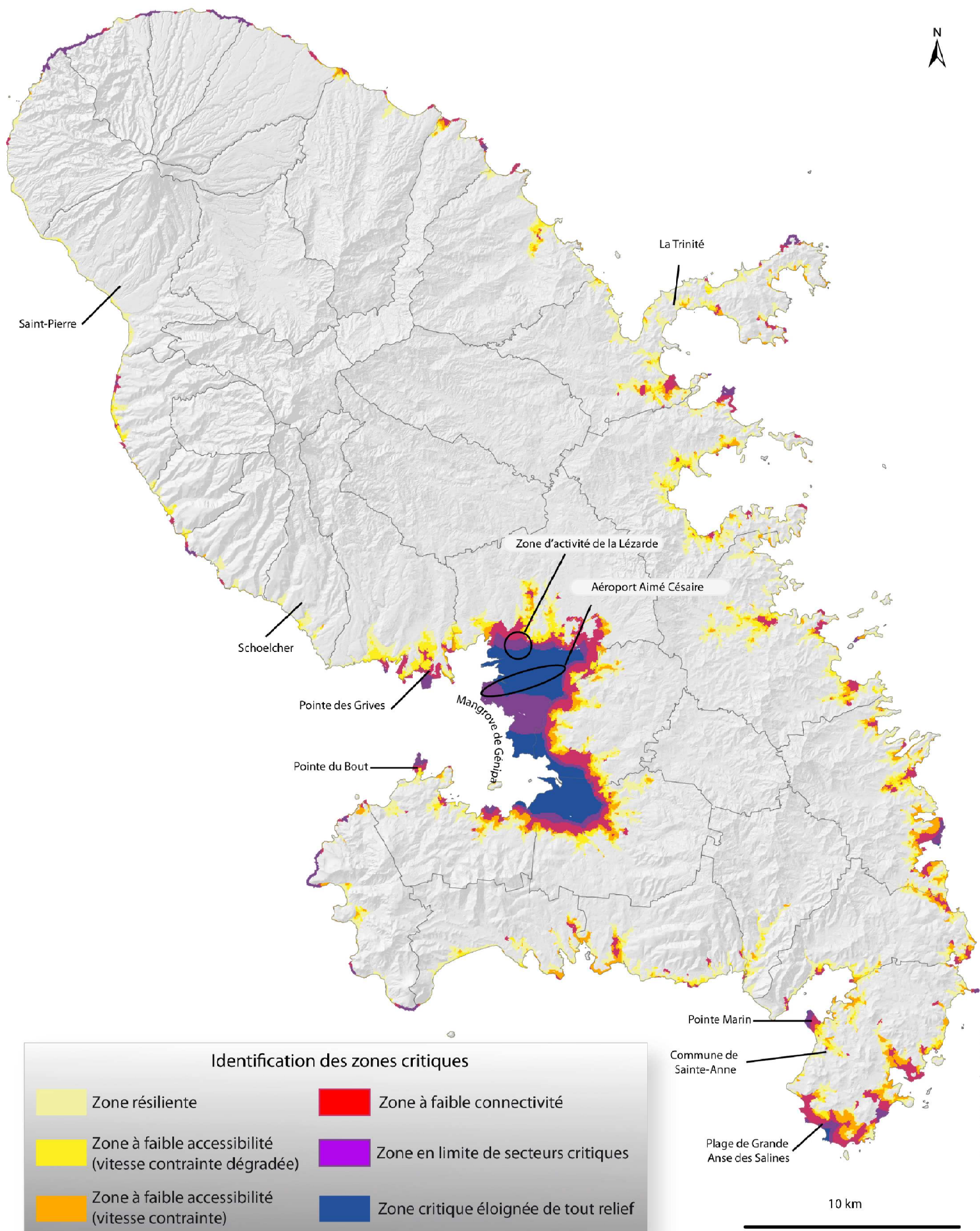


Figure 84. Carte des secteurs les plus critiques pour la conduite d'une évacuation pédestre.

8.2. Propositions opérationnelles pour une planification locale des évacuations

8.2.1. Confronter les résultats de modélisation à la réalité de terrain pour des plans d'évacuation opérationnels

8.2.1.1. Des résultats comme supports d'aide à la concertation

La méthode de calculs d'accessibilité des sites refuges utilisée à l'échelle départementale est reproduite à l'échelle communale sur deux communes test : Sainte-Anne et Trinité. En revanche, les données en entrée du modèle sont issues d'une expertise plus fine et de diagnostics de terrain, elles sont donc plus précises et exhaustives. Pour rappel :

- Les sites refuges sont renseignés par un indice de qualité multicritère (chapitre 6). Il permet d'établir un classement facilitant la prise de décision finale quant au choix des sites refuges. Tous les sites refuges sont employés comme point d'arrivée du modèle. Le principe est de sélectionner prioritairement ceux qui offrent les temps d'évacuation les plus rapides ;
- Le réseau routier est amélioré et paramétré selon les vitesses crédibles de déplacement (chapitre 7), ce qui permet de générer les itinéraires d'évacuation optimisés et de les rendre plus fidèles à la réalité de terrain ;
- Les enjeux humains exposés pour plusieurs scénarios d'occupation à l'échelle des bâtiments, (chapitre 8) sont renseignés à partir du scénario de fréquentation maximum qui leur est propre.

Les résultats des calculs sur graphe sont reportés sur une carte et accompagnés d'une légende détaillée. Nous l'enrichissons par plusieurs éléments issus d'analyses spatiales : les secteurs dont le temps ou la distance d'évacuation sont supérieurs aux recommandations, l'indice de qualité des sites refuge, le type de voie d'évacuation, ou bien encore le nombre théorique d'évacués par site refuge. L'ensemble de ces informations offrent une vision synoptique qui favorise la compréhension des difficultés d'une évacuation pédestre des littoraux (figure 85). Nous proposons de les employer comme support de concertation pour les acteurs locaux afin de leur permettre de faire des choix d'orientation et de réaliser les aménagements nécessaires à la gestion d'une évacuation. La cartographie permet alors d'ouvrir le dialogue sur la base de modèles scientifiques et de connaissances empiriques. C'est en cela que ces résultats sont qualifiés de « préparatoires » car ils nécessitent une phase indispensable de validation avec les experts locaux de la gestion des risques, pour déboucher sur un plan d'évacuation en cas d'alerte tsunami qui soit opérationnel et pouvant être annexé aux PCS.

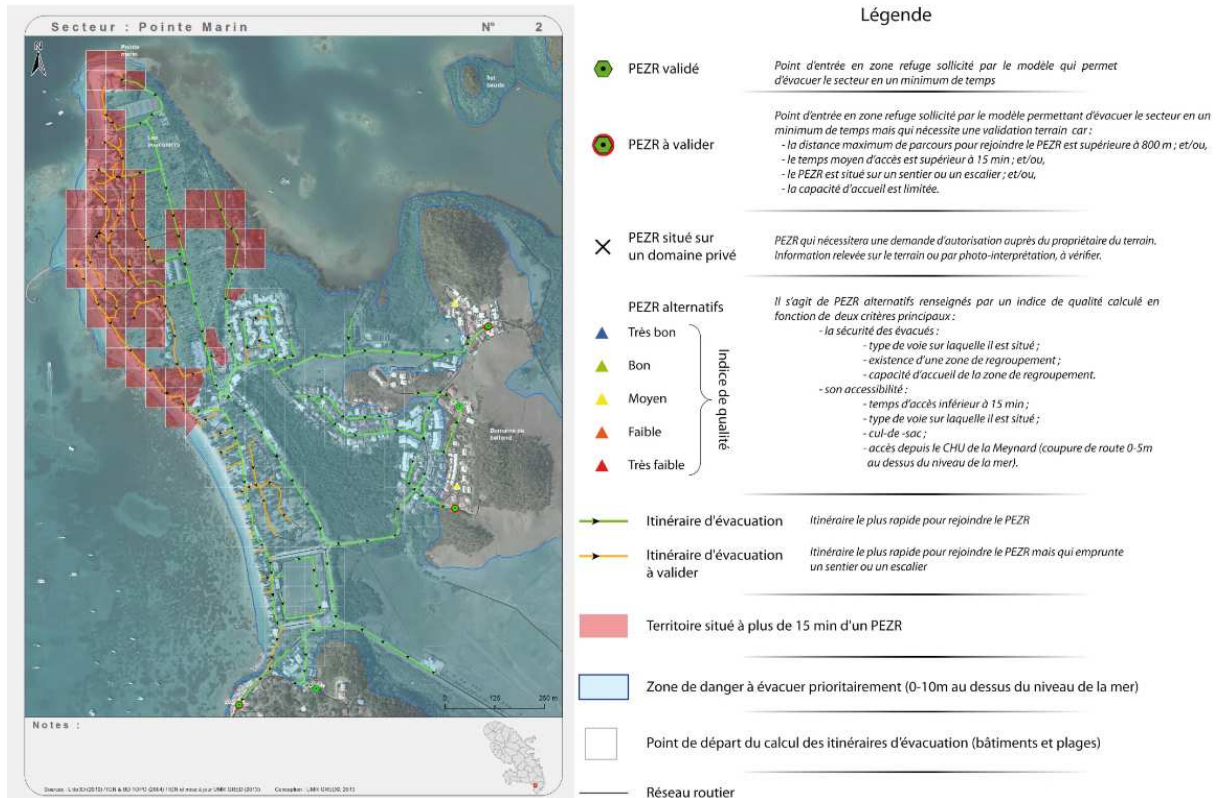


Figure 85 : Carte préparatoire à la planification des évacuations à l'échelle communale employée comme support de concertation avec les acteurs locaux

8.2.1.2. Evaluation et validation participative de la méthode

Au cours d'une mission d'une semaine en Martinique, le protocole méthodologique a été examiné et validé par un comité d'experts locaux. Cette semaine s'est organisée en deux phases. Durant les premiers jours, trois réunions se sont déroulées respectivement à la Préfecture de Martinique, puis dans les deux communes test. Ensuite, des journées de vérifications sur le terrain ont été programmées avec les acteurs locaux. Trois points fondamentaux de la méthode ont été retenus : sa simplicité de mise en œuvre, la pertinence de ses résultats intermédiaires pour la planification des évacuations, et son adéquation avec les attentes locales (intégration aux PCS, harmonisation à l'échelle départementale).

La réunion en préfecture organisée par l'EMIZA, a permis de présenter officiellement la méthode aux chefs de service et aux responsables des Collectivités et des Services de l'Etat en lien avec les risques majeurs, ainsi qu'aux autorités représentantes des communes de Sainte-Anne et de Trinité. A cette occasion, nous avons rappelé que notre rôle en tant qu'expert scientifique consistait à réaliser des outils pour aider à l'élaboration de plans d'évacuation. Seul le maire, dans l'exercice de sa fonction de police générale, est responsable de décider de l'organisation des évacuations à l'échelle locale. Dans chaque commune, deux journées de travail ont été organisées pour discuter et approuver l'ensemble des résultats de la méthode déployée (qualité et disponibilité des sites refuges, calculs d'accessibilités, itinéraires d'évacuation générés, sollicitation des sites refuges). Elles ont été supervisées par une délégation constituée d'un représentant de chacun des organismes suivants :

- Service Interministériel de Défense et de Protection Civiles (SIDPC),

- Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL),
- Conseil Général de la Martinique,
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

Le personnel des mairies de Sainte-Anne et de Trinité ainsi que des sapeurs-pompiers des Centres de Secours Principaux de Trinité et du Marin étaient présents en qualité d'experts locaux principaux. Les séances de travail se sont déroulées en deux temps. Dans un premier temps, nous avons organisé et animé une réunion pour présenter nos premiers résultats et discuter des secteurs qui représentent des difficultés particulières pour l'évacuation des populations (figure 86). Un support cartographique est employé pour animer les discussions. Au cours de ce travail en salle, nous avons également présenté aux acteurs les sites refuges sélectionnés par notre modèle et qui répondaient à l'ensemble des critères de qualité retenus (31 à Sainte-Anne et 66 pour la Trinité). La connaissance locale fine du territoire a permis au cours de cette étape d'en valider une majeure partie de manière unanime. Cette façon de procéder a permis de gagner du temps sur le terrain pour l'évaluation des résultats en concentrant nos déplacements sur le terrain aux secteurs les plus critiques.



Figure 86 : Séance de travail, salle du conseil municipal de la commune de Sainte-Anne (crédit photo : F. Leone, 2014)

Dans un second temps, nous avons conduit l'ensemble des participants sur le terrain pour un diagnostic visuel des sites refuges dépourvus de certains critères de qualité (figure 87). Pour la plupart d'entre eux, il s'agissait soit d'une capacité d'accueil limitée soit la disponibilité du site non garantie. A Sainte-Anne, plus de 27 sites refuges étaient concernés et près de 49 à la Trinité. Les discussions ont eu lieu directement sur le terrain, pour tenter de résoudre les problèmes propres à chaque site refuge. Nous avons proposé des alternatives comme : le choix de sites refuges complémentaires pour augmenter les capacités d'accueil, et/ou la prise de contact avec les propriétaires de sites refuges situés sur des terrains privés. Lors de cette visite de terrain, nous avons également discuté des aménagements à prévoir pour réduire les temps de parcours, comme la sélection de nouveaux sites refuges et l'ouverture d'itinéraires d'évacuation, parfois sur des terrains privés, pour les secteurs les plus critiques.



Figure 87 : Comité d'experts présents sur le terrain pour la phase de validation de la méthode à Sainte-Anne (Martinique) (crédit photo F. Leone, 2014)

- Choix concerté des sites refuges

Les sites refuges retenus au cours de la phase d'évaluation figureront sur les plans d'évacuation officiels de chaque commune. Ils représentent les espaces privilégiés pour recevoir des évacués en cas d'alerte tsunami. Cela implique de la part des communes un minimum d'investissement pour signaler et entretenir ces espaces. Finalement, plus de 90 % des sites refuges «validés» par le modèle ont été retenus par les membres des délégations sur les deux communes. La majorité des 10 % restants a été supprimée lors des réunions en salle de manière unanime. Il s'agissait essentiellement de :

- 1) Sites refuges présents le long des sentiers de randonnées. Nous partons du principe que les randonneurs sont équipés pour rejoindre un point haut rapidement, même hors des sentiers. Un rappel des consignes de sécurité en cas de tsunami, accompagné d'une cartographie, sera lisible sur un panneau installé au départ des traces balisées. Le principe est d'attirer l'attention du visiteur sur le risque existant, sans pour autant lui imposer un itinéraire qui risquerait de l'exposer d'avantage à l'aléa tsunami.
- 2) Sites refuges multiples sur un même secteur. Seuls un ou deux sites refuges sont sélectionnés parmi les plus adéquats si leur capacité d'accueil est supérieure à leur fréquentation théorique maximum. Le nombre de sites refuges doit être rationalisé pour limiter le nombre de panneaux signalétiques du risque tsunami, donc limiter les coûts (prix du panneau et pose) et de l'entretien du site.

A la suite de l'expertise de terrain, 46 sites refuges sur les 76 à faire valider sont conservés. Quinze sont retenus à Sainte-Anne et 31 à la Trinité. Sur ces 46 sites refuges, 19 sont localisés sur des chemins et nécessiteront, en fonction de leur fréquentation théorique, des aménagements particuliers pour offrir un meilleur niveau de service aux évacués. Par contre, neuf s'avèrent être plus problématiques.

Ces derniers peuvent se retrouver isolés en cas de dégradation majeure du réseau routier. Seuls des moyens de secours aériens permettraient de les atteindre. Enfin, quelques sites localisés sur des terrains privés ont été conservés temporairement. Les services de la mairie pourront officialiser leur utilisation à condition que les trois actions suivantes soient réalisées :

- Si le site refuge présente un intérêt majeur pour la sécurité des personnes, une demande d'accès au site sera établie en accord avec le propriétaire pour l'intégrer au plan d'évacuation de la commune ;
- Si le site refuge concerne l'enceinte d'un ERP, le maire devra s'assurer que le propriétaire (ou le chef d'établissement) en ont connaissance. Ce site devra être accessible aux usagers de l'établissement. Il ne figurera pas sur le plan d'évacuation communal à moins qu'il ne soit accessible en permanence même pour des personnes extérieures à la structure ;
- Si le site refuge présente un intérêt majeur pour la sécurité des personnes extérieures au terrain privé, une demande d'accord sera rédigée avec le propriétaire pour l'intégrer au plan d'évacuation de la commune.

Certains sites refuges ont parfois été déplacés de quelques dizaines de mètres afin de créer une zone de regroupement mieux délimitée, plus spacieuse et offrant de meilleures conditions d'attente pour les évacués (ombre, point d'eau, etc.).

- Proposition d'ouverture de nouveaux sites refuges horizontaux

Les secteurs aux Salines et à la Pointe Marin sur la commune de Sainte-Anne combinent des temps d'évacuation particulièrement élevés avec une fréquentation humaine importante. Pour répondre à ce cas de figure, la création d'accès vers des sites refuges jusqu'alors inaccessibles a donc été envisagée. Trois propositions ont été faites suite à notre visite de terrain. Ces sites refuges permettraient d'évacuer des plages très fréquentées, parfois même la nuit, plus rapidement en cas de tsunami¹⁴⁹.

L'option d'ouvrir des sites refuges verticaux a été envisagée uniquement sur la commune de Sainte-Anne pour le secteur de Pointe-Marin, où se trouve l'établissement hôtelier le plus important de l'île : le Club-Méditerranée¹⁵⁰. Il s'agit d'une problématique inquiétante car la zone refuge topographique la plus proche se trouve à plus d'un kilomètre de marche de l'établissement. L'idée d'employer un bâtiment à étages comme site refuge vertical est envisageable mais nécessite entre autres, une expertise rigoureuse de sa structure en termes d'accessibilité, de résistance, de hauteur et de capacité d'accueil.

¹⁴⁹ Traditionnellement le camping est pratiqué depuis des décennies à l'occasion des grandes vacances (retour des martiniquais congés bonifiés) et des vacances de Pâques à l'Anse à Prune. Cette pratique est encadrée par une association «Le Camp» en accord avec l'ONF à qui appartient le terrain. En 2007 lors du cyclone DEAN, l'évacuation des campeurs a été organisée par l'ONF mais l'intervention de la gendarmerie a été nécessaire afin d'évacuer plusieurs personnes réticentes.

¹⁵⁰ Le complexe s'étend sur près de 22 ha et compte 396 chambres pour une capacité maximale d'environ 750 clients et 150 membres du personnel sur place.

- Propositions d'aménagements des itinéraires existants mais inadaptés

Les itinéraires d'évacuation pourvus d'un escalier, d'un ouvrage d'art ou utilisant un sentier apparaissent sur la carte des résultats intermédiaires par un figuré linéaire orange. En fonction de la géométrie du réseau et de sa connexité, nous avons discuté de leur maintien en tant qu'itinéraire d'évacuation ou pas. La décision prise dans les deux communes a été de doubler d'un deuxième itinéraire ceux pourvus d'un escalier. Lorsque cette solution n'était pas envisageable, le site refuge a été supprimé. Le principe est que l'ensemble de la population, quelle que soit sa condition physique, puisse évacuer vers les sites refuges indiqués sur le plan. L'itinéraire d'évacuation empruntant les ponts a été conservé dès lors qu'il était localisé au début d'un itinéraire d'évacuation et que le nombre estimé de passages cumulés était faible. Dans le cas contraire, des itinéraires de substitution devront être envisagés par les autorités locales et connus par avance des forces de l'ordre. Mis à part l'entretien d'un chemin qui servira d'itinéraire d'évacuation sur la commune de Sainte-Anne, aucune autre proposition d'aménagement n'a été retenue.

A la fin de la mission, au cours de la réunion de restitution finale à la préfecture, les observateurs ont exprimé leur satisfaction quant au bon déroulement des expertises sur le terrain. Ils ont souligné l'intérêt majeur de la méthode pour l'aide à la planification d'une évacuation face à l'aléa tsunami. Le pourcentage de sites refuges retenus par le modèle et finalement validés en est la démonstration. La rapidité d'exécution sur le terrain pour la phase de vérification a également été appréciée, puisqu'il a fallu seulement deux jours pour les deux communes. De cette démarche de validation, émergent les constats suivants :

- Les résultats intermédiaires fournis par la méthode facilitent le choix concerté des sites les mieux adaptés pour évacuer. Ils permettent d'accroître la capacité maximale théorique d'accueil tout en limitant le nombre ;
- Les résultats intermédiaires sont issus de calculs d'accessibilité simples à comprendre par tout un chacun ;
- Les hypothèses et paramètres du modèle sont tangibles et facilement vérifiables sur le terrain, ce qui simplifie le dialogue entre scientifiques et acteurs locaux ;
- La méthode proposée s'appuie sur des hypothèses validées localement qui s'appliquent à l'échelle des Antilles et dont les résultats assurent une cohérence territoriale ;
- L'approche par le terrain permet d'intégrer les connaissances empiriques des acteurs locaux et participe ainsi à une meilleure appropriation de la démarche.

8.2.2. Proposer un référentiel cartographique national pour les plans d'évacuation

8.2.2.1. Des exemples à l'échelle internationale

L'objectif d'un plan d'évacuation est d'aider les personnes exposées à un risque à s'orienter pour rejoindre une zone de sécurité selon un itinéraire d'évacuation planifié. Sur ce plan doivent figurer les consignes de sécurité et les instructions à suivre. Dans l'idéal une signalétique sur le terrain y est

associée. Elle est pensée et réalisée dans le respect de codes couleurs et d'une sémiologie spécifique afin de la rendre facilement compréhensible par un large public. Sa lecture doit donc être intuitive. A ce jour, il n'existe aucun langage cartographique ou sémiologie graphique harmonisés des plans d'évacuation à l'échelle internationale. L'hétérogénéité des cartes risque de nuire à leur bonne compréhension, notamment lorsqu'elles couvrent des territoires géographiquement proches les uns des autres (Kurowski *et al.*, 2011), ce qui est le cas par exemple des Etats et territoires des Petites Antilles.

En 2015, nous avons supervisé les travaux menés par un étudiant de master 2 GCRN (Gustave, 2015). Nous avons analysé la conception et la sémiologie cartographique de plusieurs plans d'évacuation en cas d'alerte tsunami à l'international et disponibles en ligne. Nous avons adopté une grille d'analyse inspirée des travaux de Kurowski *et al.* (2011). Elle permet de comparer les plans entre eux et d'évaluer leur qualité au moyen de plusieurs critères (*cf.* annexe 13). Cette grille a été divisée selon les quatre grandes thématiques suivantes :

- les zonages réglementaires ;
- les éléments propres aux évacuations ;
- les éléments de contexte et l'habillage du plan d'évacuation ;
- les informations textuelles (légende, consigne).

Plus de 30 cartes ont été analysées. Elles proviennent de 14 pays différents, répartis sur l'ensemble des bassins océaniques soumis à l'aléa tsunami¹⁵¹. Nous avons relevé ci-dessous trois principaux éléments qui illustrent la grande hétérogénéité des plans d'évacuation étudiés.

- La généralisation des itinéraires d'évacuation

Les échelles des plans d'évacuation relevées dans ce travail sont très variables. On constate bien souvent que pour des raisons de lisibilité, des contraintes de généralisation entraînent des difficultés dans la représentation des itinéraires d'évacuation ainsi que dans le positionnement exact des sites refuges. Selon le choix de l'échelle, le degré d'abstraction est tel que seules des flèches de taille grossière donnent l'orientation générale de l'évacuation, sans pour autant indiquer de réels itinéraires. On observe alors un changement de mode d'implantation, passant d'un figuré linéaire à un figuré ponctuel.

- La terminologie employée pour désigner les zones de danger et les zones refuges.

Les zones de danger et de sécurité représentées sur les plans d'évacuation que nous avons analysés sont désignées sous des termes hétérogènes, y compris sur un même territoire tels qu'aux Etats-Unis. Cette multiplicité de terminologie engendre nécessairement des difficultés de compréhension notamment pour les personnes en transit. On dénombre six appellations différentes pour les zones à évacuer parmi lesquelles on retient notamment l'une d'elle qualifiée de « niveau de submersion attendu », et représentée sur le plan par des hauteurs d'eau variable. Cette information

¹⁵¹ Les territoires asiatiques sont les moins bien représentés dans ce travail car très peu de plans d'évacuation sont traduits dans notre alphabet.

technique implique de la part du lecteur une connaissance a priori du risque localement. Pour ce qui concerne la zone de sécurité, sept appellations sont employées pour désigner un même objet. Ici également l'expression « terrain élevé », ne restitue pas la notion de sécurité. Son emploi présuppose de savoir que la mise en sécurité passe en général par le fait de rejoindre un point haut.

- La sémiologie utilisée pour représenter les sites refuges

Sur la base des 32 plans d'évacuation analysés, pour sept d'entre eux aucun site refuge n'est identifié. Dans la plupart des plans d'évacuation étudiés ce sont principalement des sites refuge horizontaux qui sont identifiés, représentés majoritairement par un figuré ponctuel tout comme pour les sites refuges horizontaux. Le terme de « rassemblement » est celui le plus utilisé pour désigner un site refuge sans distinction de nature, notamment sur les plans d'origine anglo-saxonne et hispanique.

Après un examen attentif de l'ensemble des différentes pratiques cartographiques relevées ci-dessus, nous avons proposé une charte cartographique standardisée pour la conception des plans d'évacuation en cas d'alerte tsunami pour les territoires français de la Caraïbe.

8.2.2.2. Adoption d'une charte graphique pour représenter les plans d'évacuation

A l'échelle nationale, il n'existe aucun référentiel cartographique pour la conception des plans d'évacuation face au risque de tsunami, et encore moins à l'échelle mondiale. A la suite de nos travaux de validation de la méthode, nous avons proposé une charte graphique et sémiologique de plan d'évacuation qui soit transposable à toutes les communes littorales des Antilles françaises (figure 88). Le référentiel présenté ici est le fruit de l'analyse de nombreux plans d'évacuation disponibles au format papier. Notre priorité a été de simplifier la lecture et l'interprétation des informations par les populations, qu'elles soient résidentes ou en transit. La charte graphique a été améliorée au fil de réunions techniques organisées par le SIDPC. Ces temps de travail rassemblaient de nombreux acteurs locaux institutionnels, associatifs ou privés, en charge de la gestion des risques en Martinique. La charte sémiologique de ces plans normalisés vient d'être appliquée par l'UMR GRED sur les villes de Tanger (Maroc) et de Syracuse (Italie) dans le cadre du projet de recherche européen ASTARTE.

Les plans répondent à un cahier des charges strict pour servir également de support d'information et de diffusion des consignes de mise en sécurité. Ils sont proposés pour une échelle de représentation infra-communale, ce qui offre un niveau de détails très précis et une bonne lecture de l'information entre 1 : 5 000^{ème} et 1 : 12 000^{ème} environ au format A4. Les plans peuvent être ainsi imprimés un à un, sous la forme de prospectus ou compilés sous la forme d'un atlas pour couvrir l'ensemble d'une commune. Le premier format est plutôt destiné à être distribué aux personnes en transit présentes sur les secteurs à évacuer, et le second est destiné aux personnes résidentes des communes littorales notamment. A titre de comparaison, les plans disponibles aux Iles Vierges Américaines varient entre 1 : 100 000^{ème} (île de Sainte Croix) et 1 : 45 000^{ème} (île de Saint-Jones) au format A3. Ce format de document est très mal adapté pour une diffusion auprès du grand public, seulement, si ces mêmes plans étaient imprimés à un format plus petit, leur lecture deviendrait très délicate.



Figure 88 : Extrait du référentiel national proposé pour les plans d'évacuation en cas d'alerte tsunami après validation par les autorités locales, (Bourg de Sainte-Anne)

Les planches sont découpées de manière à toujours couvrir l'itinéraire complet des sites refuges représentés sur le plan. Si toutefois un itinéraire d'évacuation est découpé par la bordure du cadre du plan d'évacuation, il convient d'indiquer le code du plan qui fait référence à la coupure adjacente et au site refuge. Chaque site refuge représenté sur le plan doit contenir l'itinéraire d'évacuation complet.

- Informations relatives aux évacuations
- La zone à évacuer correspond à la zone de danger potentiel. Elle a été délimitée en cohérence avec les scénarios de submersion extrêmes crédibles ainsi que les consignes et messages d'alerte que nous avons préparés avec le concours de l'EMIZA (chapitre 1 et 4). Faute de zonage plus précis, cette enveloppe représente la frange littorale dont l'altitude est comprise entre 0 et 10 m au-dessus du niveau de la mer. Elle est symbolisée par un aplat de couleur jaune en rappel de la couleur de sécurité du panneau de danger tsunami (figure 90). Cette couleur est aussi largement utilisée sur les plans d'évacuation étrangers.
- La zone refuge correspond à la zone de mise en sécurité des individus. Il s'agit de l'ensemble du territoire dont l'altitude est supérieure à 10 m. Elle est représentée par la couleur verte qui symbolise couramment une situation de sécurité. En cas de délais trop courts pour évacuer vers un site refuge, il est possible voire même recommandé, de rejoindre la zone refuge quel que soit l'itinéraire emprunté et sans chercher à rejoindre des sites refuges répertoriés.

- Les itinéraires d'évacuation correspondent aux parcours optimisés pour rejoindre le site refuge le plus proche. La qualité du réseau routier associée à une échelle de représentation adaptée permet d'indiquer de manière précise ces itinéraires ainsi que leur direction par des flèches. La couleur verte étant déjà employée en aplat, nous avons représenté cette information par la couleur noire qui offre un niveau de contraste très élevé facilitant ainsi sa lecture.
- Les sites refuge tsunami correspondent aux sites de rassemblement à privilégier en cas d'évacuation. Ils sont indiqués sur le terrain et connus des services de secours. Ils sont représentés sur les plans d'évacuation par un figuré ponctuel de couleur noire selon le même stylisme que les itinéraires d'évacuation. Cette représentation offre une continuité sémiologique dans le cheminement du parcours. Le nom local du site sur lesquels ils sont implantés est également inscrit, facilitant ainsi leur reconnaissance par la population.
- Informations stratégiques

Les consignes écrites qui accompagnent les plans d'évacuation comportent plusieurs éléments importants pour la mise en sécurité des individus (zonages, lieux, environnement naturel, aménagements). Il est particulièrement important de les retrouver sur les cartes. Par exemple, une portion de mer ou d'océan doit toujours figurer sur les plans d'évacuation. Elle indique d'où provient le danger. Les cours d'eau doivent apparaître également car il s'agit de zones particulièrement exposées à la submersion par tsunami. Utiliser du relief en fond de carte permet de visualiser facilement les hauteurs. Quelques éléments ponctuels de danger sont également reportés sur les plans tels que les ouvrages de franchissement (ponts, passages à gué) ou encore des installations dangereuses.

Nous ajoutons à cette catégorie d'informations tous les établissements stratégiques utiles à la gestion de crise comme les centres de secours, les hôpitaux, les camps militaires, etc. En dehors de la zone de danger, ces bâtiments et leur personnel constituent des ressources pour l'aide à l'évacuation ou l'accueil des évacués. *A contrario*, ceux situés au sein de la zone de danger doivent être évacués au même titre que le reste de la population. Cette information permet aux visiteurs de se rendre compte de l'exposition du bâtiment qu'ils fréquentent habituellement ou ponctuellement. Elle contribue autant à la sensibilisation des populations qu'à celle des autorités.



























L'ensemble de ces informations stratégiques permet d'augmenter la capacité d'orientation et facilite la localisation du plan d'évacuation pour les lecteurs. Nous renforçons ce dernier aspect en ajoutant des éléments de repérage comme les bâtiments, les voies routières et autres réseaux. Les bâtiments remarquables (édifices religieux, marché, curiosité) et les autres édifices sont choisis du fait de leur réputation ou de leur grande visibilité de loin (antenne, château d'eau, tours, édifices religieux).

- Charte graphique

Un plan d'évacuation est un type de carte opérationnelle spécialisée employé pour informer et guider les populations vers des lieux de sécurité. Il est le résultat d'une sélection exigeante d'informations pour transmettre correctement les instructions et répondre aux besoins immédiats du lecteur en situation d'urgence. Cette information doit être généralisée de manière à permettre une lecture presque instinctive de la carte tout en conservant suffisamment de détails pour garantir une bonne orientation. Les propriétés des variables visuelles sont associées de manière à conserver une

hiérarchisation naturelle de l'information. Elles sont également sélectionnées de manière à satisfaire une bonne qualité de lecture aux échelles de représentation qu'impose le format d'édition de ces plans. Cette charte est construite selon trois niveaux de lecture. Au premier plan figurent deux informations complémentaires primordiales aux évacuations : les itinéraires optimisés et les sites refuges planifiés. Ils sont représentés par des formes pleines, très contrastées, avec pour couleur dominante le noir. La taille des symboles est également plus importante. Ces informations se superposent aux zones à évacuer et de refuge. Les couleurs vives associées à de vastes surfaces en aplat sont le gage d'une interprétation spontanée de l'information pour la majorité des individus. La lecture des informations concernant la localisation des bâtiments à vocation stratégique passe en second plan. Ils sont représentés par des figurés ponctuels de plus petite taille. Les symboles sont en couleurs pour trancher par rapport aux teintes dominantes que sont le jaune et le vert. Enfin, l'ensemble des éléments employés comme aide à la localisation passe en dernier plan avec des variables de forme et de couleur plus petites et moins contrastées.

Tableau 30. Charte graphique initiée pour la cartographie des plans d'évacuation des communes de Trinité et de Sainte-Anne

	Intitulé de légende	Traduction en anglais	Description	Type	Mode d'implantation	Symbole	Couleur principale associée / de contraste / de symbole	Code CMJN	Transparence	Taille (pts)
Evacuation	Zone à évacuer (alt.<XXm)	Tsunami hazard zone	Zone potentielle de danger	Vecteur	Zonal		Jaune	91019310	25%	/
	Zone refuge (alt.>XXm)	Tsunami safe zone	Zone de mise en sécurité des individus	Vecteur	Zonal		Vert	6410110010	40%	/
	Itinéraire d'évacuation	Evacuation route	Parcours optimisé pour rejoindre un site refuge	Vecteur	Linéaire		Noir / Blanc / Noir	010101100	Aucune	2
	Site refuge tsunami	Tsunami safe location	Point de rassemblement privilégié et balisé sur le terrain	Vecteur	Ponctuel		Noir / Noir / Blanc	010101100	Aucune	16
	Pont	Bridge	Défaillance potentielle le long d'un itinéraire d'évacuation	Vecteur	Zonal		Rouge	019519510	Aucune	/
	/	/	Position de la carte sur le plan qu'elle décrit	Vecteur	Ponctuel		Rouge / blanc / rouge	019519510	Aucune	30
Etablissements stratégiques	Hôpital	Hospital	Hôpital et clinique	Vecteur	Ponctuel		Bleu / Bleu / Blanc	90175101100	Aucune	20
	Pompier	Fire station	/	Vecteur	Ponctuel		Rouge / Rouge / Blanc	01951951100	Aucune	20
	Force de l'ordre	Police force	Gendarmerie, Police	Vecteur	Ponctuel		Bleu / Bleu / Blanc	90175101100	Aucune	20
	Pharmacie	Pharmacy	/	Vecteur	Ponctuel		Vert / Blanc / Vert	70110110010	Aucune	18
	Mairie	Town hall	/	Vecteur	Ponctuel		Blanc / Blanc / Noir	010101100	Aucune	12
Lieux d'intérêt	École	School	Ecole maternelle et primaire	Vecteur	Ponctuel		Blanc / Blanc / Noir	010101100	Aucune	10
	Collège	School	/	Vecteur	Ponctuel		Blanc / Blanc / Noir	010101100	Aucune	10
	Lycée	School	/	Vecteur	Ponctuel		Blanc / Blanc / Noir	010101100	Aucune	10
	Église / chapelle	Church / chapel	/	Vecteur	Ponctuel		Noir	010101100	Aucune	11
	Cimetière	Cemetery	/	Vecteur	Ponctuel		Noir	010101100	Aucune	10
	Réservoir	Water tank	/	Vecteur	Ponctuel		Bleu / Gris / Bleu	551141010	Aucune	12
	Pylône	Tour	/	Vecteur	Ponctuel		Noir / Blanc	010101100	Aucune	18
	Terrain de sport	Sport field	Terrain multi-sport, foot, basket	Vecteur	Ponctuel		Blanc / Blanc / Noir	010101100	Aucune	24
	Route	Road	/	Vecteur	Linéaire		Blanc	43101010	Aucune	1.7
	Bâtiment	Building	/	Vecteur	Zonal		Gris	01010120	Aucune	/
Attributs du fond de carte	Cours d'eau	River	/	Vecteur	Linéaire		Bleu	851501010	10%	1.5
	/	/	Courbe de niveau	Vecteur	Linéaire		Gris	01010120	10%	0.5
	/	/	Mer ou océan	Vecteur	Zonal		Bleu	43101010	Aucune	/
	/	/	Nord	Vecteur	Ponctuel		Noir / Blanc	010101100	Aucune	18
	/	/	Échelle	Vecteur	Linéaire		Noir	010101100	Aucune	1
	/	/	Relief	Raster	/	/	Dégradé de gris	/	Aucune	/

Nous nous sommes inspirés de plusieurs cartes existantes que nous avons enrichies par notre propre symbolologie sous ArcGis®. La plupart des informations stratégiques sont représentées par des figurés ponctuels de type conventionnel. Bien qu'ils obligent à avoir recours à la légende, ils évitent au maximum le risque de mauvaise interprétation, contrairement à des idéogrammes (symbole figuratif ou évocateur).

- Habillage de la carte

L'habillage des plans d'évacuation intègre des éléments courants de cartographie. Les indispensables flèches d'orientation, échelle, titre, éditeur et année de conception sont placés à l'extérieur du cadre et mis en valeur en bas de la carte. On y insère également les logos des institutions ayant contribué à la réalisation du plan d'évacuation. Le cadre principal accueille le bloc de la légende, le carton de situation, la source ainsi que les coordonnées géographiques le long des marges intérieures. Le format utile de la carte est fixé à un cadre d'une dimension de 280 x 180 mm au format paysage. Dans son ensemble, la mise en page du plan d'évacuation est sobre. Elle contribue à la bonne lisibilité du document.

La question de la langue de traduction a été soulevée à plusieurs reprises au cours de réunions techniques. Le choix de l'anglais a été privilégié par rapport à celui du créole. Plusieurs raisons ont été évoquées. La première repose sur le constat que la *quasi*-totalité des populations résidentes comprend le français. La seconde tient du fait que le lexique créole est différent entre les îles françaises et nécessiterait plusieurs traductions. La troisième est que l'anglais, en tant que langue universelle, est sans conteste la mieux lue et comprise par les étrangers et touristes qui fréquentent les îles françaises de la Caraïbe.

Une fois les plans d'évacuation réalisés, il est impératif de décliner l'information directement sur le terrain avec la signalisation correspondante.

8.2.3. Adopter une signalétique standardisée pour l'affichage du risque

8.2.3.1. Les différentes pratiques à l'étranger

La standardisation des signalétiques pour la sécurité routière ou au travail, est le gage d'une meilleure reconnaissance et compréhension par l'ensemble des populations cibles (travailleurs résidents, touristes, etc.), quel que soit leur culture ou leur niveau d'alphabétisation. L'ouverture mondiale des échanges commerciaux tout comme le tourisme nécessitent d'harmoniser les symboles employés à l'échelle internationale pour garantir des réactions adéquates et promptes face à une situation particulière ou une menace.

La signalétique propre aux évacuations tsunami doit permettre à un individu, même non familier du terrain, de savoir s'il est exposé à l'aléa et indiquer l'itinéraire recommandé pour rejoindre un lieu de sécurité. La standardisation de ces panneaux est une nécessité absolue tant au niveau local, national qu'international (Scheer *et al.*, 2011). Néanmoins aujourd'hui, on observe à travers le monde une grande diversité de symboles et de panneaux pour l'affichage du risque de tsunami. Cette diversité s'exprime par des signes, symboles, couleurs, formes, dimensions, supports et termes employés (figure 89).



Figure 89 : Photographies de la diversité des panneaux d'affichage du risque tsunami et d'itinéraires d'évacuation, à droite île de Stromboli, Italie (crédit photo : M. Péroche, 2011) ; au centre île de Bali, Indonésie (crédit photo : B. Guilbert, 2015) ; à droite île de Honshū, Japon (crédit Photo : A. Moatty, 2015)

Au-delà de cette diversité dans la conception des panneaux d'évacuation, nous avons constaté que le nombre d'informations standardisées varie en fonction des Etats et des organismes en charge de l'affichage du risque. Par exemple, en Nouvelle-Zélande, des panneaux distinguent les itinéraires d'évacuation en véhicule, de ceux réservés aux piétons et de ceux qui convergent vers un site refuge vertical. Autre exemple, au Japon comme en Nouvelle-Zélande, les autorités ont choisi de signaler les limites de zone d'inondation par des panneaux spécifiques et des traçages au sol. Nous avons compilé une grande variété de symboles à partir de recherches sur Internet afin d'obtenir un aperçu le plus exhaustif possible des pratiques à l'international en vue de les adapter au contexte martiniquais.

8.2.3.2. Les panneaux standards aux normes ISO proposés par l'UNESCO

Depuis 2008, l'UNESCO encourage les états membres des différents groupements Intergouvernementaux de Coordination (GIC) à mettre en place des systèmes d'alerte tsunami à déployer sur les littoraux exposés, par des symboles approuvés aux normes ISO (figure 90). Il s'agit de trois symboles basiques qu'il convient de compléter par des informations supplémentaires comme une flèche de direction, des noms de lieux ou encore des distances à parcourir (Kong, 2009).



Figure 90 : Symboles approuvés selon les normes ISO pour l'affichage de l'aléa tsunami et les évacuations. De gauche à droite ISO 20712-1 :2008 – WSW014 ; ISO 20712-1 :2008 – WSE002 et ISO 20712-1 :2008 – WSE003, source : Kong (2009)

Le panneau de danger est représenté par une vague noire sur fond jaune. L'évacuation vers un site refuge horizontal est représentée par une personne qui court vers une plateforme ou un point haut. Les sites refuges verticaux sont représentés par une personne qui court en direction d'un bâtiment.

Cependant, cette signalétique est peu suivie à travers le monde. Une grande majorité des pays anglophones exposés à l'aléa tsunami, emploie des panneaux créés et déployés au cours des années quatre-vingt-dix aux Etats-Unis (encadré 13). De couleur bleue et blanche, cette signalétique continue d'être utilisée car elle sert de référentiel dans le cadre du label de certification américain *TsunamiReady*[®]. Ces panneaux ont été implantés récemment dans la Caraïbe sur les îles de Porto-Rico, les îles Vierges Américaines et Britanniques et Anguilla. De plus, la Nouvelle-Zélande a fourni un document très détaillé pour la mise en place de panneaux similaires (MCDEM, 2008). Ce document contient un grand nombre de paramètres pour la conception complète des panneaux : symboles, terminologie à employer, polices de caractère, taille de police, dimension des panneaux, etc. Ce type de document accessible gratuitement en ligne, favorise considérablement son déploiement. Les panneaux proposés par l'UNESCO n'offrent pas de réel équivalent.

Sur le territoire national et avant nos travaux, aucun panneau d'évacuation n'avait encore été installé de manière concertée avec les services de l'Etat. En Martinique, seules quelques initiatives sous l'impulsion d'associations locales et de mairies ont vu le jour. Les communes du Prêcheur et de Sainte-Anne ont par exemple installé des panneaux représentant un itinéraire d'évacuation au standard américain. Ces panneaux ne correspondent ni au langage sémiologique, ni aux codes couleurs de sécurité habituellement employés en France. Ils n'adoptent pas non plus le standard ISO 20712 établi en 2009 pour l'ensemble du bassin caribéen par le GIC/CARIBE EWS (Aliaga, 2009).

Encadré 13. Evolution historique de la signalétique tsunami

C'est aux Etats-Unis en 1994, que les premières réflexions ont débuté pour définir une signalétique tsunami internationale sous l'impulsion des services de l'Etat de l'Oregon et de l'Université locale. Tom Weeks, un graphiste de l'université a proposé deux panneaux : l'un pour représenter les itinéraires d'évacuation et l'autre la zone de danger de couleur bleue. Cette signalétique a été adoptée officiellement en 1997 aux Etats-Unis et déployée dans plusieurs Etats de la côte pacifique : Californie, Oregon, Washington, Hawaii ainsi qu'en Colombie Britannique (Canada). Plus tard, en 2001, lors d'une réunion de groupe de coordination du système d'alerte tsunami dans le Pacifique, la commission a évoqué l'intérêt d'une signalétique internationale : « Evacuation routes, dangerous areas, safe meeting areas, as well as other information must be indicated in the field, as well as on different types of maps prepared especially for tsunami preparedness, risk evaluation and other needs. This information should be presented by means of internationally standardized and recognized appropriate symbols and signage. Therefore the Workshop participants recommends: "The development of an international standardised set of symbols and signage to be used in the field and on tsunami inundation maps, tsunami evacuation maps and others" ». C'est en 2003 que la décision a été prise de faire approuver aux normes ISO au moins deux panneaux relatifs aux évacuations en cas de tsunamis. La couleur bleue employée aux Etats-Unis ne correspondait pas aux teintes de couleur habituellement usitées pour signaler les dangers (jaune / noir), ni les signes de sécurité (vert). Elle a donc été réétudiée par l'UNESCO pour figurer finalement au catalogue ISO selon le code 20712 relatif à l'eau et aux plages.



Figure 91 : Panneau d'affichage du risque tsunami selon les normes américaines (source : www.ioc-unseco.org)

8.2.3.3. Proposition d'une charte graphique normalisée des panneaux

Nous proposons plusieurs panneaux pour l'affichage du risque et le balisage des itinéraires d'évacuation à partir des symboles aux normes ISO 20712. Ils ont été enrichis par des informations utiles aux évacuations dans le respect d'autres normes ISO comme pour les flèches de direction (ISO 7010). Nous avons également créé deux nouveaux panneaux propres à l'affichage des sites refuges horizontaux et verticaux. Ils servent à signaler aux évacués la zone de rassemblement sécurisée. Ces panneaux étaient jusqu'à présent inexistantes des normes ISO 20712. Plusieurs formats, ont été proposés et testés au cours de l'exercice d'évacuation du collège du Robert, notamment pour prendre en compte la distance d'observation du lecteur.

Les panneaux de la zone de danger sont constitués de trois blocs distincts (figure 92). Sur le premier figure le symbole de la zone à évacuer aux normes ISO ainsi que sa description. Le second représente un plan d'évacuation doublé du nom de la zone. Le plan est orienté en fonction de l'emplacement du panneau. Un repère sur le plan aide à déterminer la position du lecteur sur la carte. Enfin, un pavé en bas du panneau renseigne sur les principales consignes d'évacuation. L'ensemble du texte est en français et traduit en anglais. Les panneaux qui indiquent la zone de danger doivent être implantés de manière à ce qu'un panneau d'itinéraires d'évacuation soit visible depuis celui-ci. Une version simplifiée du panneau est également proposée pour les secteurs qui ne bénéficient pas encore de la cartographie d'itinéraires d'évacuation.

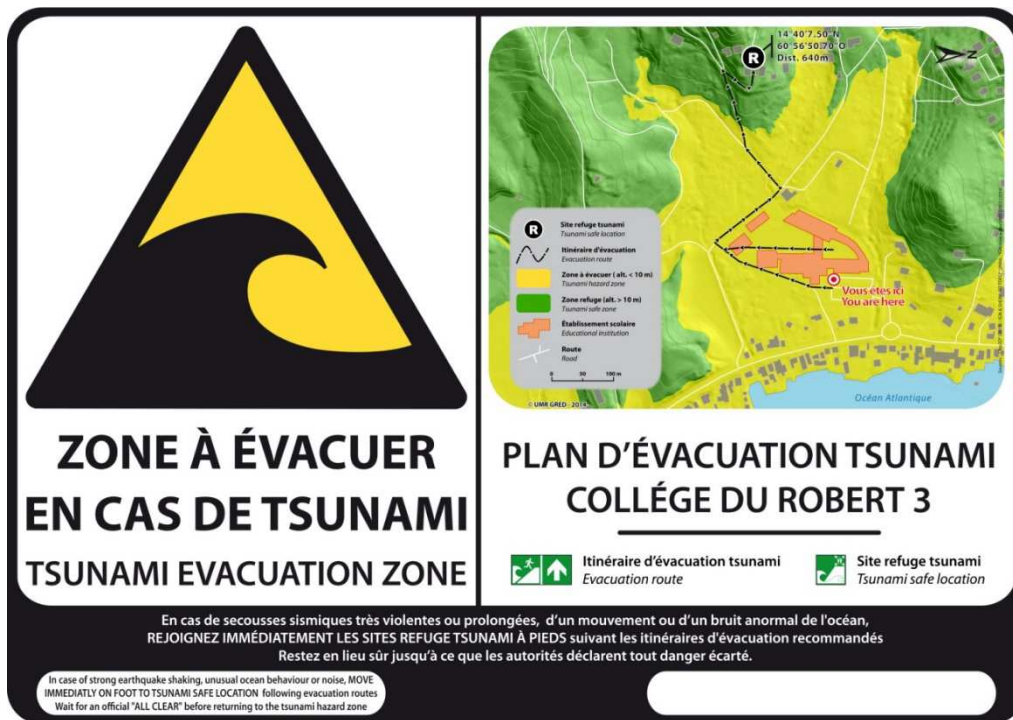


Figure 92 : Panneaux standardisés de la zone d'évacuation avec un plan d'évacuation intégré

Les panneaux d'itinéraire d'évacuation sont très épurés de manière à apporter les informations essentielles à la compréhension de l'utilisateur (figure 93). Le symbole d'évacuation tsunami est accompagné de sa description en français et traduite en anglais. La direction de l'itinéraire à suivre est matérialisée par une flèche aux normes ISO 7010 ainsi que la distance à parcourir pour rejoindre le site refuge le plus proche. Le symbole ISO 20712 doit être adapté en fonction du type de site refuge (vertical ou topographique) et de la direction de l'itinéraire d'évacuation.



Figure 93 : Panneaux standardisés d'évacuation vers un site refuge topographique.

Le panneau propre aux sites refuges en cas de tsunami n'existe pas dans la norme ISO 20712. L'UNESCO préconise de garder le même symbole que pour l'itinéraire d'évacuation sans la flèche de direction, ou bien d'utiliser le symbole des points de rassemblement habituellement employé (incendie, séisme). Aucune des deux solutions ne nous convient. Dans le premier cas, le symbole représente un individu qui court, poursuivi par une vague. Il n'indique en rien une situation de sécurité et son interprétation prête à confusion. Dans le second cas, le symbole de regroupement couramment employé dans les ERP risque de prêter à confusion tant il est associé à des risques déjà bien identifiés par les populations. De plus, l'un ne peut se substituer à l'autre et des confusions risqueraient de se produire en cas d'événements. Nous en avons donc créé un nouveau (figure 94). Nous nous sommes inspirés d'exemples de panneaux chiliens et néo-zélandais que nous avons adaptés aux normes ISO employées en France. Il est accompagné par sa description ainsi que le nom de la zone, les coordonnées GPS du point ainsi que d'un code unique à l'échelle départementale. Un pavé en bas du panneau rappelle quelques consignes d'évacuation. Ce même panneau a été décliné pour les sites refuges verticaux, seul le symbole est remplacé.



Figure 94 : Proposition d'un nouveau panneau d'évacuation pour repérer les sites refuges tsunami

Ces panneaux doivent être adaptés par l'intégration de données propres à leur implantation et selon leur usage. A chaque emplacement, les informations de distance, de toponymes, de direction doivent être modifiées (figure 95). Ce travail est le gage d'une signalétique de qualité et efficace.

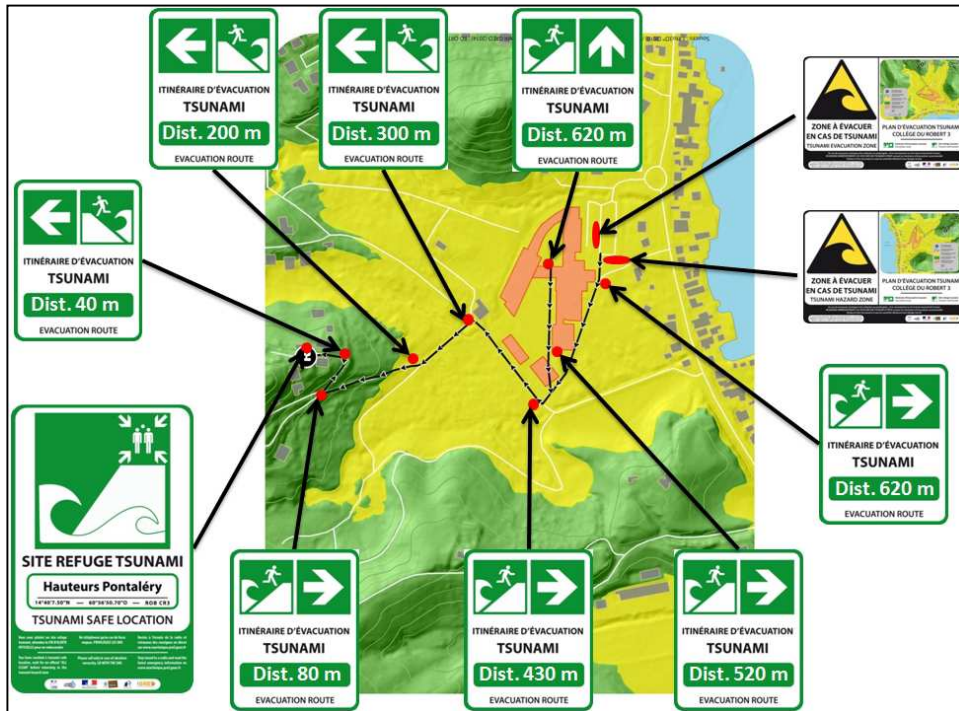


Figure 95 : Exemple d'aménagement d'un itinéraire d'évacuation proposé pour un établissement scolaire dans le cadre de l'exercice CARIBWAVE 2014 (Collège du Robert 3, commune du Robert)

Des panneaux d'entrée et de sortie de la zone de danger nous semblent également être particulièrement utiles, notamment pour avertir les individus en transit. Ces panneaux doivent être installés à des endroits stratégiques, les plus visibles possibles. L'intégration de ce balisage permanent au sein du paysage, représente un moyen de prévention efficace autant pour les populations locales que passagères. Il participe au maintien d'un niveau de conscience et de préparation du risque de tsunami (Scheer *et al.*, 2011). Ces panneaux peuvent être complétés sur le terrain par des panneaux d'affichage rappelant dans le détail les consignes d'évacuation (figure 96).



Figure 96 : Plan d'évacuation zonale tsunami accompagné des procédures (île de Java, Indonésie – crédit photo Moatty, 2013)

Dans ce dernier chapitre, l'usage de la cartographie a permis de caractériser la faisabilité des évacuations tant dans le domaine maritime à l'échelle de la Grande Caraïbe, qu'à terre à l'échelle de la Martinique. Il en ressort qu'en fonction des scénarios, certaines infrastructures portuaires dans la Grande Caraïbe et certains secteurs du territoire de la Martinique peuvent présenter des risques élevés en cas d'évacuation. Pour ces derniers, nos apports cartographiques contribuent à déterminer des aménagements utiles pour limiter les temps de déplacement vers des sites refuge et ainsi tendre à une diminution du risque. Nos travaux à l'échelle communale ont abouti à la création d'une méthode pour l'aide à planification des évacuations et à la construction de plans d'évacuation directement intégrables aux Plans Communaux de Sauvegarde (PCS). Cette méthode facilement reproductible a été validée grâce au partenariat avec l'EMIZA et au concours de plusieurs institutions et collectivités locales. Pour parachever ces travaux, nous avons décliné des chartes graphiques et sémiologiques standardisées pour afficher le risque tsunami sur les territoires français des Antilles.

Conclusion

Synthèse des résultats

La gestion d'une crise dépend fortement de l'adéquation entre les scénarios planifiés *a priori* et le développement des capacités à faire face chez les gestionnaires du risque et les citoyens. Ce point d'équilibre est certainement l'un des plus délicats à orchestrer, notamment face à l'aléa tsunami qui menace des espaces d'interface toujours plus attractifs que sont les littoraux. Les tsunamis sont des phénomènes rares mais parfois extrêmes et dont le potentiel dévastateur n'est plus à démontrer. Ils sont couramment qualifiés de « *low chance, high impact event* ». Pour préparer la gestion de crise face à cet aléa, il convient d'anticiper la catastrophe en limitant la présence de populations exposées sur le littoral. Pour réduire les enjeux au moment de l'impact, la mise en place d'une planification précise de l'évacuation des individus s'impose, qu'elle soit organisée ou spontanée. Le principe est d'ordonner la gestion du risque tsunami autour de la détection précoce du phénomène, associée à une évacuation réactive des populations. Dans le cas général des territoires français aux Antilles et de l'île de la Martinique en particulier, l'intégration de scénarios de tsunami locaux aux délais d'arrivées sur la côte très courts, constitue une des difficultés majeures pour élaborer des plans de gestion de crise tsunami efficaces. En effet, l'insularité est un facteur de vulnérabilité primordial à prendre en compte dans la gestion d'une crise majeure. Sur le pourtour des territoires insulaires de la Caraïbe, ce sont pas moins de 5 740 874 personnes (LandScan, 2008 / SRTM) qui vivent au plus proche des côtes, à moins de dix mètres d'altitude. Mallet (2008) le rappelle d'ailleurs dans le Livre blanc sur la défense et la sécurité nationale¹⁵² : « *Les crises majeures, qu'elles soient d'origine intentionnelle ou non, peuvent affecter des populations entières, notamment dans les DOMCOM en raison de leurs caractéristiques géographiques* ». Or, aux Antilles française, peu de travaux abordent la question des évacuations de masse en milieu insulaire, alors qu'une grande partie de la population de ces territoires exigus, souvent densément peuplés, se concentre majoritairement sur les littoraux. Mallet (2008) fait également état de ce manque avéré en soulignant que : « *Les crises peuvent occasionner des déplacements massifs de population, organisés ou spontanés. [...]. Les questions posées par l'évacuation des populations et ses conséquences, en termes de prise en charge des victimes, sont aujourd'hui très insuffisamment traitées.*»

Cette thèse répond à une attente locale forte de la part des acteurs institutionnels de la gestion des risques ainsi que des collectivités territoriales en matière de recherches appliquées (guide méthodologique, support de prévention). Dès son début, elle s'est inscrite dans le cadre de la mise en place d'un système de surveillance régionale des tsunamis (ICG/CARIBE-EWS), dans lequel la France est largement représentée, notamment par l'EMIZA avec qui nous avons particulièrement collaboré. Aujourd'hui le PTWC, centre de surveillance par intérim, est en capacité de détecter et de diffuser un premier message d'avis ou de menace de tsunami aux Etats et aux territoires de la Caraïbe en moins

¹⁵²« Le Livre blanc fixe la stratégie française de défense et de sécurité nationale, et précise notamment son articulation avec la politique de sécurité et de défense commune de l'Union européenne et avec l'Alliance Atlantique, et les capacités requises pour la mettre en œuvre dans les quinze à vingt ans à venir » (www.livreblancdefenseetsecurite.gouv.fr)

cinq minutes (von Hillebrandt-Andrade, 2013). Le système régional est testé chaque année avec succès, dans le cadre d'exercices régionaux. On peut ainsi constater que la partie de l'alerte montante fonctionne bien. Néanmoins, une gestion de crise réussie pour les territoires de la Caraïbe reste un défi. En effet, la méconnaissance générale de l'aléa demeure une des difficultés majeures. Du fait de ce manque de connaissance de la part des autorités locales et de la population, cet aléa a été intégré tardivement dans la chaîne de planification de crise. L'ambition de notre travail est de construire des dispositifs opérationnels pour aider à la planification des alertes et à l'évacuation des populations par des approches combinées, cohérentes, spatialisées et complémentaires. Il y répond tout en s'insérant dans les grandes orientations nationales françaises de gestion de crise (dispositions ORSEC), en respectant les guides stratégiques pour l'évacuation récemment élaborés par la DGSCGC (2014) et le CEPRI (2014). Enfin, il satisfait aux attentes couramment exprimées au niveau international en matière de tsunami grâce à des échanges avec l'UNESCO.

Nos travaux s'inscrivent également dans la continuité de trois thèses françaises en géographie qui portent sur le risque tsunami, dont une franco-marocaine en co-tutelle. La première intitulée « *le risque tsunami en France : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque* », a été soutenue en 2011 par Alexandre Sahal. L'auteur y proposait une évaluation combinée des différentes composantes du risque tsunami pour plusieurs territoires français (villes d'Antibes, île de La Réunion, île de Mayotte), avec en toile de fond, la volonté de développer des passerelles entre les sciences dures, les sciences sociales et les gestionnaires du risque. En 2012, Samira Mellas a soutenu une thèse intitulée « *évaluation du risque tsunamique sur le littoral atlantique marocain* ». L'auteure a contribué à la recherche de paléo-tsunamis et à la modélisation de plusieurs scénarios d'aléa qu'elle a finalement employés pour proposer des scénarios de probabilité de pertes humaines sur la ville d'El Jadida (Maroc). Plus récemment en 2015, Henky Mayaguezz a soutenu sa thèse : « *Exposition humaine, analyse et renforcement des capacités d'évacuation face aux tsunamis à Padang (Indonésie)* ». L'auteur a réalisé une évaluation de l'exposition humaine spatio-temporelle de la ville de Padang (Indonésie) associée à la cartographie des capacités d'évacuation face aux tsunamis, à l'aide d'outils de calculs sur graphe. Notre affiliation à ces travaux de thèse est forte, notamment par l'adaptation de certaines méthodes et outils selon des protocoles inédits. Ils reposent sur des outils de calculs sur graphe statique combinés à l'utilisation des SIG pour modéliser différents scénarios d'évacuation. Ces derniers intègrent la dimension spatio-temporelle grâce à la prise en compte de la variabilité des enjeux humains, elle-même confirmée par notre étude de fréquentation touristique. Notre apport cartographique en fait son originalité, et offre une vision simplifiée d'une situation complexe telle que peut l'être une évacuation. L'utilisation des SIG est prépondérante tout au long de nos travaux. Elle permet d'analyser à froid des scénarios de crise et d'évaluer la faisabilité d'une évacuation massive. La validation de notre méthode de planification des évacuations par les autorités locales confirme bien le rôle évident que jouent les SIG et la cartographie associée en tant que support d'aide à la prise de décision. La prédominance de la cartographie dans nos travaux reflète l'importance d'une analyse spatio-temporelle et territoriale de la gestion des risques et de crise tsunami : « *de par leur caractère interactif, les SIG offrent l'opportunité de mettre un phénomène en perspective dans sa complexité spatiale et peuvent ainsi apporter une aide à la concertation et à la prise de décision* » (Propeck-Zimmerman, 2003).

Renforcer la dimension opérationnelle en termes de planification de crise tsunami est l'un des objectifs de notre étude. Nous avons toujours favorisé un réel transfert de connaissances entre le domaine scientifique et opérationnel, tout en nous assurant du niveau d'appropriation de l'information par les acteurs locaux. La dimension géographique de cette étude apporte une vision transversale et permet de faire le lien entre scientifiques, opérationnels, acteurs locaux et populations. La géographie peut ainsi devenir l'interprète de biens des situations, avec comme principale alliée la cartographie, faisant office de traducteur et de support de discussions. De nombreux auteurs en ont fait le constat comme l'illustre cette citation de Ruin (2007): « *c'est peut être sur cet aspect que la géographie, à mi-chemin entre les deux approches et leurs méthodologies, est la plus à même de jouer les entremetteuses* ». Les travaux contenus dans cette thèse présentent un caractère opérationnel indéniable et notre travail de géographe centré sur la gestion de crise s'inscrit dans une démarche contemporaine de gestion des risques à travers une analyse de ses différentes composantes adaptées aux contextes locaux caribéens et antillais.


















Notre étude repose sur la mise en œuvre d'outils d'analyse complexes, certains basés sur des protocoles méthodologiques déjà connus et d'autres tout à fait innovants. Nous nous sommes également attachés à créer des relations privilégiées avec les principaux acteurs de la gestion des risques, chacun référent dans leur domaine, dans le cadre de nos trois grandes orientations : la planification terrestre des évacuations, la planification maritime pour la mise en sécurité des navires ainsi que les transferts de connaissances pour la prévention du risque tsunami localement (figure 97). C'est bien au travers des nombreux échanges entre professionnels de la gestion des risques et crise, dans un esprit de concertation, que de véritables solutions opérationnelles ont pu voir le jour et être validées par les autorités.



Figure 97 : Schéma synthétique de l'approche intégrée de la planification de l'alerte et des évacuations en cas d'alerte tsunami proposée dans cette thèse

Nos travaux de recherche débouchent sur plusieurs résultats opérationnels, certains sont déjà exploités en Martinique pour la planification de crise tsunami, d'autres le seront notamment aux Antilles Françaises. Ils ont permis d'alimenter plusieurs étapes cruciales de la gestion de crise tsunami (tableau 31). Ces résultats concernent des territoires de tailles variables, depuis le bassin de la Grande Caraïbe jusqu'à la commune, en fonction de la pertinence des échelles associées et de la disponibilité des données. A ce jour, leur niveau de validation est variable en raison de leur caractère plus ou moins exploitable à court terme et en fonction du degré d'implication des partenaires. Notre étude a débuté par un état des lieux de la connaissance scientifique de l'aléa tsunami qui menace les territoires de la Caraïbe. Ces travaux ont permis d'établir et de valider nos hypothèses initiales utiles à la planification des évacuations. Nous avons poursuivi par l'évaluation des principales composantes du risque ainsi que par l'évaluation des enjeux humains théoriques potentiellement concernés par une évacuation à terre et en mer, à l'échelle de la Grande Caraïbe. Le travail a été affiné et complété pour l'île de la Martinique, notamment au moyen de calculs sur graphe afin de définir des temps de parcours depuis les zones à évacuer vers des sites refuges topographiques selon différents scénarios de fréquentation. Les résultats ont permis de spatialiser les secteurs les plus à risque et de proposer de grandes orientations d'aménagement pour améliorer les temps d'évacuation. Nous nous sommes également attachés à accompagner plusieurs établissements scolaires dans la conduite d'exercices d'évacuation, à adapter la signalétique tsunami selon une charte graphique standardisée et à développer une méthodologie de planification d'évacuation pédestre qui a conduit à la réalisation d'une cartographie des plans d'évacuation normalisée. Un travail abouti a été réalisé en collaboration avec l'EMIZA, pour l'élaboration de documents graphiques d'aide à la décision en cas d'alerte tsunami. Cette démarche a été étendue au domaine maritime avec une proposition de procédures de mise en sécurité des navires spécifiques au GPMLM. A partir des connaissances acquises au cours de nos travaux de recherche et aux côtés de l'ensemble des acteurs de la gestion des risques en Martinique, nous avons élaboré un exercice de gestion de crise sur table qui contribue à l'appropriation de nos résultats opérationnels et à la prise de décision. Nous avons également travaillé sur des supports de communication pour contribuer à la sensibilisation et à l'éducation des populations (*cf.* annexe 18). Nos résultats sont repris et développés dans trois projets de recherche en cours. Ils participent ainsi au transfert de connaissances scientifiques.

Tableau 31 : Synthèse des principaux résultats de nos travaux pour la gestion de crise tsunami dans la Caraïbe.
Contribution géographique aux dispositifs d'alerte et d'évacuation des populations.

Étapes de la planification de crise tsunami	Résultats	Exemple d'illustration	Territoire	Partenaires	Utilisateurs finaux potentiels	État de validation et/ou niveau d'appropriation actuels
Connaissance du phénomène	Analyse comparative des catalogues historiques tsunami		Grande Caraïbe Atlantique	/	/	/
	Synthèse des sources tsunamigènes menaçant les Antilles		Grande Caraïbe Atlantique	/	/	/
Évaluation des risques	Quantification de la population en zone à évacuer		Caraïbe	/	/	/
	Temps moyens d'évacuation des ports et navires exposés selon le scénario CaribeWave 2015		Grande Caraïbe	/	Services de sécurité civile Autorité portuaire	/
	Cartographie synthétique de vulnérabilité des populations résidentes et des usagers des plages et propositions d'aménagements		Martinique	/	Collectivités territoriales	/
Préparation à la gestion de crise	Préparation d'exercices d'évacuation de plusieurs établissements scolaires		Communal (Commune du Robert, du François, de Sainte-Anne)	Rectorat, Conseil Général, EMIZA Collège du Robert 3 Cité scolaire de la Jetée Collège Ixora Pelage	Rectorat, Collectivités territoriales	- Démarche initiée pour les trois établissements partenaires et pérenne dans le temps - Volonté du rectorat de la Martinique d'étendre la démarche à l'ensemble des établissements scolaires en zone à évacuer
	Conception et mise en pratique d'un exercice de gestion de crise tsunami sur table		Caraïbe	/	Services de sécurité civile Préfecture Centre de formations	Exercice testé par les étudiants des Masters 2 Télédéttection et Risques Naturels (TRN) et Master Prévention et Gestion Territoriales des Risques (PGTR)
	Adaptation et conception de la signalétique du risque tsunami		Antilles françaises	Etat Major de Zone Préfecture Conseil Général	Collectivités territoriales	Validé par les partenaires
Réponses opérationnelles en cas d'avis de tsunami	Développement d'une méthodologie de planification des évacuations pédestres		Antilles françaises	Etat Major de Zone Antilles, Préfecture, DEA, Conseil Général, Commune de Trinité, Commune de Sainte-Anne	Communes Préfecture	Validé par les partenaires
	Mise au point d'une charte cartographique des plans d'évacuation		Antilles françaises	Etat Major de Zone SIDPC Martinique Météo-France OVS	Préfectures	- Intégré au dispositif ORSEC Zonal (en cours de validation) - En cours d'intégration au dispositif ORSEC départemental (Martinique)
	Construction d'arbres de décision pour le traitement des messages d'information et avis tsunami diffusés par le PTWC		Antilles françaises	Etat Major de Zone SIDPC Martinique OVS	Préfectures	- Intégré au dispositif ORSEC Zonal (en cours de validation) - En cours d'intégration au dispositif ORSEC départemental (Martinique)
Supports de sensibilisation	Elaboration d'une matrice de décision pour l'alerte des populations à terre		Antilles françaises	Etat Major de Zone SIDPC Martinique OVS	Préfectures	Possible intégration au plan tsunami du Grand Port Maritime de la Martinique
	Matrice de séquençage d'évacuation des navires		Grand Port Maritime de la Martinique (commune de Fort-de-France)	Autorités portuaires du Grand Port Maritime de la Martinique	Ports maritimes	Possible intégration au plan tsunami du Grand Port Maritime de la Martinique
Transfert de connaissances	Contribution à l'élaboration de posters pour l'information préventive tsunami et l'éducation des populations		Antilles françaises	Etat Major de Zone Antilles Météo-France OVS SIDPC Martinique	Collectivités territoriales	Validés par les partenaires Imprimés sur Kakémonos
	Application de la méthode de planification des évacuations pédestres (projets EXPLOIT et ASTARTE, en cours)		Antilles françaises (60 communes littorales)	JMIF GRED CRPLC EMIZA	Collectivités territoriales	En cours d'application
	Construction de l'étude de cas (gestion de crise tsunami)		Villes de Syracuse (Italie) et de Tanger (Maroc)	27 institutions européennes sous la coordination de l'IPMA	Responsables de site CNRST (Maroc) et Université de Bologne et Protection Civile (Italie)	En cours d'application
			Caraïbe	INRIA COGIT JMIF GRED EMIZA	Etat Major de Zone Antilles	/

Nous ne reviendrons pas sur tous les résultats de notre recherche déjà détaillés dans chaque chapitre et synthétisés dans le tableau (tableau 31). Nous proposons d’approfondir les commentaires de trois résultats majeurs dont les limites méthodologiques seront évoquées.

- Consolider les documents d’aide à la décision par une meilleure connaissance locale de l’aléa tsunami

La matrice d’aide à la décision conçue au cours de ce travail figurera dans le prochain plan ORSEC zonal et servira de base à la conception des volets départementaux spécifiques ORSEC tsunami (Martinique, Guadeloupe, Saint-Martin, Saint-Barthélemy). A ce jour, seul le département de la Martinique a débuté sa rédaction en intégrant les résultats de nos recherches. L’intérêt de ce document graphique de référence est de permettre aux opérationnels d’apporter une réponse adaptée et de prendre une décision réflexe suite à la réception d’un message d’information ou de menace de tsunami sur la base des informations standards contenues dans les messages initiaux du PTWC. Ce travail a été réalisé en tenant compte des données actuelles disponibles pour la gestion de crise tsunami. L’absence de travaux scientifiques de modélisation des effets à la côte pour l’ensemble des sources potentielles de tsunami menaçant la Martinique constitue sa principale limite. En effet, la carence de ces résultats scientifiques ne permet pas d’apporter des réponses individualisées en fonction des secteurs d’origine de l’événement en jeu. Les simulations numériques de tsunami établies à partir de plusieurs zones de failles actives sur le pourtour de la plaque caraïbe montrent une importante variabilité des effets du phénomène en fonction de leur directivité selon les simulations numériques du PTWC (*cf.* annexe 1) et des recherches d’Harbitz *et al.* (2012). C’est pourquoi des travaux de modélisation secteur par secteur doivent être initiés, sur le même modèle que ceux réalisés en Polynésie française (Sladen *et al.*, 2007). Lorsqu’ils seront disponibles, les récents résultats de modélisation de tsunami obtenus dans le cadre du projet de recherche TSUNAHOULE devraient permettre d’améliorer nos matrices et d’apporter des réponses opérationnelles adaptées pour chacune des sources sismiques identifiées (chapitre 1). Pour autant, subsiste toujours le problème lié à l’absence de connaissances précises des effets potentiels des tsunamis d’origine non sismique. En effet, les incertitudes qui entourent ces scénarios empêchent d’intégrer les données aux outils comme ceux que nous proposons.

Les nouveaux produits graphiques diffusés par le PTWC quelques minutes après la détection du phénomène représentent une avancée certaine pour l’aide à la décision et la conduite de gestion de crise. Les limites du modèle de simulation numérique de tsunami (RIFT) employé par le PTWC pour la modélisation en temps quasi réel du tsunami et des effets à la côte génèrent une incertitude importante quant à la fiabilité des valeurs d’amplitudes fournies en période de crise (chapitre 3). Cette fiabilité est d’autant plus faible que les espaces insulaires sont de petites dimensions, généralement inférieures à 30 km de diamètre. Dans ce cas, le PTWC annonce que les classes d’amplitude modélisées sont surestimées. Aujourd’hui, les réponses associées aux messages émis par le PTWC que nous avons proposées et inscrites dans la matrice d’aide à la décision (chapitre 4) ont tendance également à surévaluer la réponse des autorités par principe de précaution. Les raisons qui président au choix de cette position reposent sur trois éléments. D’une part, la faible dimension du bassin caribéen associée à des sources potentielles génératrices proches des côtes ne laisse que peu de temps aux autorités locales

pour réagir. Elles ne peuvent pas attendre les résultats des modèles de simulation numérique du PTWC fournis plus 20 à 30 minutes après l'envoi du premier message. D'autre part, les limitations techniques liées à la transmission de l'information au cours de l'alerte descendante empêcheraient certainement de diffuser un second message en fonction de la réévaluation éventuelle du phénomène. Enfin, la méconnaissance générale des effets d'un tsunami comme évoqué plus haut, combinée avec leur faible récurrence, ne facilitent pas l'appréhension de l'impact d'un tel phénomène par les autorités, ni l'apprentissage des « bonnes réactions » par les populations. L'ensemble des incertitudes scientifiques se répercutent donc dans les prises de décision en matière de protection civile et conduisent inévitablement à une sur-réaction des autorités, et en l'occurrence à une sur-évacuation. De notre point de vue, cet effet est à double tranchant. En effet, plusieurs études montrent que les évacuations officielles répétées peuvent démobiliser les populations et par conséquent limiter le taux de mobilisation lors des évacuations suivantes, au moment-même où elles deviennent impératives. En Martinique, et dans la Caraïbe, les périodes de récurrence des tsunamis se comptent en dizaines voire centaines d'années. Si une évacuation avait lieu en Martinique pour un événement qui dans les faits ne se justifiait pas, elle devrait être considérée comme un moyen de tester la planification et la réaction des populations. En termes opérationnels, les autorités préfectorales doivent donc se tenir prêtes à communiquer rapidement sur ce phénomène en fonction de deux situations distinctes. La première, si l'évacuation est ordonnée par le préfet alors qu'aucun signe perceptible à la côte n'est observé. La seconde, si un séisme ressenti entraîne l'évacuation spontanée de la population.

En période de gestion de crise, l'avis d'experts est très souvent sollicité par les autorités pour établir un diagnostic de la situation et éventuellement confirmer la menace qui pèse sur le territoire. Ce sont les compétences de Météo-France pour les aléas météo-climatiques, des Observatoires volcanologiques et Sismologiques pour les aléas géodynamiques internes et du BRGM pour les mouvements de terrain, d'aider à la prise de décision. Concernant l'aléa tsunami aux Antilles, l'absence de référents scientifiques français présents sur place et dédiés à ce phénomène prive les autorités locales de jugements d'experts en période de veille active ou d'alerte¹⁵³. Dans le rapport d'évaluation du plan de submersion rapide (Bourgeois, 2015), il ressort que l'une des pistes de réflexion principale pour améliorer la prévision et l'alerte des tsunamis est d'étendre le périmètre de surveillance du CENALT à l'ensemble des territoires d'outre-mer des Caraïbes et de l'Océan Indien. Cette extension permettrait de mutualiser les connaissances scientifiques et d'apporter une expertise française en matière d'alerte tsunami en temps réel aux Antilles. Le CEA deviendrait alors l'interlocuteur privilégié des autorités locales en charge de la gestion de crise après la détection d'un événement. Cette proposition a déjà été évoquée suite à une mission d'inspection générale de l'administration menée en 2014 (Lamy, 2014). Le CENALT pourrait se positionner sur un rôle de point focal aux Antilles à la place de Météo France, sans pour autant tenir celui de centre d'alerte. Cette suggestion nous semble particulièrement pertinente pour améliorer la réponse de gestion de crise localement et limiter également les points de défaillance dans la transmission des messages d'alerte¹⁵⁴.

¹⁵³ L'OVSM joue le rôle de représentant scientifique français au sein de l'ICG/CARIBE-EWS mais n'intervient pas pour ce qui concerne les tsunamis d'origine sismique en période de crise.

¹⁵⁴ La localisation des infrastructures du CENALT sur le sol métropolitain offre l'assurance de la continuité dans la transmission du message d'alerte, les bâtiments étant situés hors zone à risque sismique et tsunami.

- Compléter l'évaluation de la vulnérabilité des ports de la Grande Caraïbe face à l'aléa tsunami

Au cours de chacune des étapes de notre travail, nous nous sommes attachés à appliquer, ou à développer des outils (calculs sur graphe) et des méthodes (quantification des enjeux, matrices de décision) pour caractériser le risque tsunami propre au domaine maritime. Il s'agit d'une problématique encore peu traitée dans la littérature scientifique. Pourtant, l'ensemble des activités maritimes très présentes dans le bassin de la Caraïbe seraient les premières concernées par un tsunami. Une approche exploratoire a été initiée en collaboration avec l'IOC-UNESCO en encadrant deux étudiants stagiaires sur cette problématique. Nous avons poursuivi et approfondi nos réflexions en proposant un géoindice d'exposition des escales portuaires de croisière maritime à l'échelle de la Grande Caraïbe. Les résultats montrent que plusieurs d'entre elles présentent un risque particulièrement élevé en cas d'alerte tsunami comme les ports de la Floride, des Bahamas et de plusieurs îles situées au nord des Petites Antilles. Ces premiers résultats doivent être considérés avec précaution. En l'état actuel de nos travaux, leur seule ambition est d'offrir une première grille de lecture pertinente pour caractériser le risque en cas d'évacuation tsunami pour chaque escale portuaire. Pour aller plus loin, il est nécessaire d'intégrer d'autres critères de risque. En effet, l'exposition d'un port face à l'aléa tsunami est très variable. Elle dépend de sa position dans le bassin par rapport aux sources tsunamigènes mais également de la configuration du port en lui-même. Pour chaque port, il conviendrait d'évaluer le volume de trafic propre à l'activité de croisière par rapport aux autres activités commerciales. D'une part une forte densité de navires peut entraîner la congestion des voies navigables et augmenter le risque de collision au cours des manœuvres d'urgence. D'autre part, la diversité des types de navires complexifie le séquençage de l'évacuation notamment si l'on tient compte des enjeux environnementaux avec des navires citernes (chimiquiers, gaziers, pétroliers, etc.). Nous proposons d'améliorer cet indicateur par la prise en compte de l'ensemble des services disponibles en termes de moyens humains et matériels pour assister les manœuvres d'appareillage d'urgence des navires en cas d'alerte.

- Renforcer l'appropriation des résultats de la méthode de planification des évacuations pédestres

Nous avons fait le choix de développer une méthode de planification et d'optimisation des évacuations au moyen de calculs sur graphe associés à une sélection multicritères de sites refuges. Elle permet par ailleurs de simuler les conditions d'une évacuation selon différents scénarios de temps d'arrivée d'un tsunami, des vitesses de déplacement sur le réseau et des fréquentations humaines des zones à évacuer. Suite aux résultats de nos travaux à l'échelle de la Martinique, il apparaît que dans plusieurs secteurs la population est particulièrement vulnérable. Pour y répondre, nous avons dégagé quelques grandes orientations d'aménagement pour optimiser les temps d'évacuation et ainsi limiter la vulnérabilité des espaces éloignés des zones refuges. Les mêmes outils de calcul sur graphe avec des données en entrée plus détaillées et renseignées par des informations collectées directement sur le terrain ont permis de construire des plans d'évacuation opérationnels pour les communes de Trinité et de Sainte-Anne. Les résultats cartographiques intermédiaires issus du modèle d'optimisation représentent une étape pour

l'aide à la concertation. Ils ont été confrontés à des observations sur le terrain au moyen d'une approche participative, impliquant la collaboration des acteurs locaux. Cela a permis d'aboutir à des choix partagés, résultats des connaissances empiriques et des études scientifiques. Néanmoins, un effort supplémentaire doit être conduit pour intégrer la participation des citoyens en leur donnant la possibilité d'évaluer les plans d'évacuation voire de proposer de nouveaux sites refuges et itinéraires. Les participants seraient associés à l'étude de leurs propositions qui figureraient dans les futurs plans officiels si elles étaient validées. Ce type de démarche intégrée favorise la connaissance de l'aléa et l'appropriation des documents de prévention. Cela se fait depuis quelques années au Japon : dans la ville de Kamakura l'élaboration des plans d'évacuation est discutée quartier par quartier et les habitants organisent eux-mêmes des exercices d'évacuation sur la base de leurs propositions (Shibayama *et al.* 2013). Cette approche combinée sera prochainement testée par l'UMR GRED au Vanuatu.

Tout au long de nos travaux, nous avons eu le souci d'optimiser et de simplifier les différentes étapes de la méthode de planification des évacuations à l'échelle communale. Néanmoins, l'efficacité de la chaîne globale de traitement cartographique pourrait être optimisée. Actuellement, deux logiciels de cartographie différents sont employés : MapInfo® et Arcgis®. Il serait pertinent de comparer les fonctionnalités du module NetworkAnalyst® d'Arcgis®, qui offre également la possibilité d'effectuer des calculs d'accessibilité, avec celle de RouteFinder® (MapInfo®)¹⁵⁵. Si celui-ci convient, il sera alors possible de créer une chaîne de traitements automatisés dans Arcgis® à l'aide du module *ModelBuilder* pour gagner du temps lors de la phase de traitement des données. Actuellement, la méthode telle que nous l'avons appliquée est relativement chronophage. La conception complète des plans d'évacuation sur les deux communes pilotes de Trinité et de Sainte-Anne a nécessité environ 1 mois en temps cumulé uniquement pour la récolte de données sur le terrain. La surface de territoire à évacuer sur ces deux communes représente 9.5km² et compte environ 1 500 bâtiments (initialement environ 750 sur la BD Topo), 110 km de voies comprises entre 0 et 25 m d'altitude et 224 sites refuges. D'après ces valeurs qui nous servent de référence, et d'après les bases de données cartographiques disponibles à l'échelle départementale, nous estimons que pour couvrir l'ensemble des 27 communes littorales de la Martinique il faudrait 1,7 année de travail soit un coût de 70 000 euros, calculé selon les barèmes tarifaires d'un ingénieur d'étude. Pour autant, cette méthode offre un avantage majeur. Les résultats sont directement exploitables sous SIG au format vectoriel dans un temps relativement court car la méthode ne nécessite pas de connaissances approfondies en programmation informatique, ni une grande puissance de calcul. Il existe d'autres pistes de prolongement de nos travaux, notamment permettre aux communes la mise à jour simple et de manière intuitive des données en entrée du modèle via une interface en ligne dédiée à l'actualisation des plans d'évacuation. L'automatisation du processus pourrait être réalisée sur la base de scripts codés en langage Python en utilisant l'extension de PGrouting implémentée à PostgreSQL, à l'instar de la méthode développée dans nos recherches pour le domaine maritime.

¹⁵⁵ Une plus large diffusion du procédé serait également envisageable par l'adaptation de la méthode autour d'un logiciel gratuit de cartographie performant comme Qgis®, sous réserve d'analyser son potentiel de calcul sur graphe.

Les plans d'évacuation proposés aux communes de Trinité et de Sainte-Anne n'ont pas été testés à grande échelle sur le terrain. La pertinence des itinéraires en situation d'évacuation n'a pas encore été évaluée et nous n'avons pas pu comparer les vitesses de déplacement paramétrées sur notre réseau avec des vitesses réelles. Nous pourrions faire appel à des outils de micro-simulation du type SMA (Sahal *et al.*, 2013) pour tester la fluidité des routes proposées et ainsi mieux comprendre l'importance de l'environnement urbain et son influence sur les temps d'évacuation. Ces tests pourraient avoir lieu en milieu urbain densément peuplé comme à Fort-de-France et sur des secteurs à forts enjeux comme au Lamentin. Sur la base de ces résultats, nous pourrions proposer des aménagements urbains pour fluidifier les évacuations. Ces outils permettraient également de mieux tenir compte de la diversité des comportements des populations en situation d'alerte et de leur capacité physique à évacuer en intégrant par exemple la problématique de l'accessibilité des sites refuges aux populations à mobilité réduite.

Une simulation d'évacuation de navires de croisières en poste à quai vers des sites refuge à terre selon différents taux de remplissage est également une voie de recherche potentielle. Ces résultats permettraient aux autorités portuaires d'affiner les réponses et les mesures de mise en sécurité déjà proposées en intégrant par exemple des seuils critiques de temps au-delà desquels l'évacuation des passagers d'un navire n'est pas réalisable ou souhaitable.

Trois pistes de recherche potentielles

- Associer la prise en compte du risque tsunami avec la prévention du risque sismique

L'un des premiers défis en matière de prévention est de renforcer la prise en compte du risque tsunami au sein de la prévention générale de l'aléa séisme. Cette dernière est développée déjà depuis de nombreuses années en Martinique, notamment à travers des actions de prévention régulières (programme REPLIK) portées par le plan Séisme Antilles 1 (2005-2007) et le plan Séisme Antilles 2 qui débute cette année¹⁵⁶. Cette expérience a contribué à sensibiliser la population à des actes de mise en sauvegarde sur un mode réflexe. Pour autant, certains d'entre eux ne sont pas adaptés au risque tsunami. A titre d'exemple, immédiatement après un séisme les individus présents à l'intérieur d'un bâtiment doivent l'évacuer pour se prémunir du risque d'effondrement. Dans le cas d'ERP ou d'habitats collectifs, les évacués rejoignent des sites de regroupement qui ont été préalablement désignés et validés par une commission de sécurité. Or le choix de ces sites n'a jamais pris en compte l'aléa tsunami. Il s'avère que pour certains d'entre eux, du fait de leur emplacement, les populations sont maintenues dans la zone à évacuer ou pire, sont exposées encore davantage en les rapprochant du littoral. Suite à l'accompagnement d'exercices d'évacuation d'établissements scolaires, nos retours d'expériences confirment l'absence de prise en compte de l'aléa tsunami dans la prévention du risque sismique. En effet, l'architecture même des bâtiments n'est pas étudiée pour une évacuation vers l'extérieur. A titre d'exemple, l'établissement du collège du Robert 3 compte deux sites de regroupement séisme. L'un d'eux, à proximité de la route, permet facilement d'accéder au site refuge

¹⁵⁶ Le Plan Séisme Antilles 1 est déclinée en Plan Séisme Antilles 2 pour une durée de quatre années (2016-2020). Il bénéficie d'une dotation de l'Etat d'un montant de 450 millions d'euros (MEEM, 2016)

tsunami éloigné d'environ 300m. Par contre, le second est situé dans une cour intérieure entourée de bâtiments à un étage. Le seul moyen d'accéder à l'itinéraire d'évacuation tsunami est de passer sous l'un des bâtiments. Or, en cas de séisme de très forte magnitude la structure risque de s'être effondrée. Des aménagements devraient être réfléchis pour permettre une évacuation en toute sécurité. Au Japon, le 11 mars 2011, la simple construction d'un escalier permettant d'évacuer directement les élèves sur la colline qui surplombe un établissement a permis de sauver la totalité des 88 élèves de l'école élémentaire de Omoto dans la ville Iwaizumi (préfecture d'Iwate) (World Bank, 2012). L'une des premières actions serait de conduire une étude systématique de tous les plans d'évacuation séisme au niveau des ERP situés dans la zone à évacuer, avec une attention particulière pour les zones de regroupement. Ce travail pourrait être mené dans le cadre d'une démarche scientifique plus globale qui porterait sur un diagnostic de vulnérabilité intégré prenant en compte des scénarios sismiques proches associés à un tsunami. Au vu de la proximité de la Martinique avec la zone de subduction, ce type de scénario ne peut être ignoré. Il existe déjà de nombreuses études sur la vulnérabilité des bâtiments par rapport à une sollicitation sismique en Martinique mais aucun ne propose une réflexion sur les conséquences en cas de submersion par tsunami. Scénariser des évacuations en condition dégradée suite à l'obstruction des réseaux par l'effondrement de bâtiments pourrait être un moyen d'y remédier.

- Préparer le cadre général d'un retour d'expérience (RETEX) tsunami aux Antilles Françaises

Les résultats de nos travaux se basent exclusivement sur une démarche prospective par scénario visant à anticiper le bon déroulement d'une évacuation en cas d'alerte tsunami. En l'absence de tsunamis récents en Martinique, et donc de retours d'expériences auprès de la population civile et des autorités en situation de crise réelle, nous n'avons pas pu intégrer la dimension sociale des évacuations (reconnaissance et connaissance du phénomène, réponse aux messages d'alerte, qualité des comportements, etc.), ni vérifier nos hypothèses de simulation par des valeurs propres au contexte social martiniquais (délais de réaction, vitesse de déplacement pédestre, taux de mobilisation, etc.). Pour pallier ces carences et anticiper un futur RETEX scientifique, nous envisageons la construction de supports standardisés et adaptés au contexte antillais pour la conduite de retours d'expérience suite à un événement qui aurait déclenché une évacuation massive de la population littorale, et tout en s'attachant à instruire les multiples facettes d'un RETEX scientifique post catastrophe naturelle, en particulier sur les comportements face aux signaux d'alerte (Leone, 2007).

La pratique des retours d'expérience en France a été institutionnalisée à travers la loi de modernisation de la sécurité civile du 13 août 2004. Mais elle reste trop souvent cantonnée à un niveau institutionnel prenant peu en compte par exemple les comportements individuels des populations (Ruin, 2007, Morin, 2012). A l'échelle internationale, l'IOC-UNESCO a publié un guide pour la conduite de retours d'expérience post-tsunami en vue d'uniformiser les informations collectées par les scientifiques (Dominey-Howes et al, 2012). La question des comportements humains face à l'alerte y est peu présente. Le cadre de référence que l'on souhaite mettre en place vise à renforcer cette thématique par une meilleure compréhension des blocages éventuels en cas d'évacuation et ainsi apporter une amélioration de la prévention du risque de tsunami auprès des populations, à travers des actions répondant aux attentes locales. Il pourra prendre appui sur les différentes phases du processus

d'évacuation (réception de l'alerte, temps de réaction, moyen de déplacement utilisé, motivation du choix du site refuge, temps pour le rejoindre, difficultés rencontrées). Une partie du questionnaire à visée d'enquête sociologique permettra de faire le lien entre les résultats et les profils sociodémographiques des personnes interrogées. Une telle démarche devrait être conduite après tout événement au cours duquel la population a dû évacuer (Gaillard *et al.*, 2008 ; Bird *et al.*, 2011 ; Lavigne et Paris, 2011 ; Okumura *et al.*, 2011).

- Poursuivre les travaux sur la mise en sécurité des navires en cas d'alerte tsunami

Les travaux menés dans cette thèse en lien avec le domaine maritime nous ont demandé beaucoup de temps pour comprendre le fonctionnement d'un secteur d'activité qui reste difficile à appréhender pour un néophyte. Outre le vocabulaire spécifique, c'est certainement la multiplicité des acteurs, de leurs rôles et surtout de leurs domaines de compétence et de responsabilité qui est complexe à assimiler. Il s'agit également d'un univers relativement fermé, difficile à aborder notamment lorsqu'on évoque les questions de sécurité et de tsunami. A titre d'exemple, nous avons élaboré un questionnaire que nous avons adressé au siège de plusieurs compagnies maritimes. Malgré l'appui des services de la Direction de la Mer (DM), nous avons eu peu de retour, ce qui a compromis son exploitation. Cette enquête en version française et anglaise, composé de 55 questions visait quatre objectifs :

- dresser un état des lieux sur la prise en compte du risque tsunami par les armateurs dont les navires croisent dans les Caraïbes ;
- comprendre l'organisation des alertes au sein de différentes compagnies (chaîne de diffusion des messages, systèmes de communication employés, type de messages retransmis) ;
- évaluer les attentes et les contraintes techniques des armateurs face au risque de tsunamis ;
- améliorer les consignes de mise en sécurité des navires dans les ports et assurer leur cohérence à l'échelle départementale et régionale.

L'exploitation poussée de réponses à ce questionnaire aurait certainement permis de dresser un premier bilan de la prise en compte des tsunamis par les compagnies de croisière. Il conviendra de le retravailler en limitant le nombre de questions, en ciblant mieux les destinataires et en révisant nos protocoles de diffusion.

Compte tenu des enjeux humains présents à l'échelle de la Grande Caraïbe, nous avons focalisé une partie de nos travaux sur l'activité de croisière. Toutefois, dans cette zone maritime le trafic du commerce maritime est relativement important et doit s'intensifier suite à l'élargissement du canal de Panama. Il conviendra alors d'étendre notre étude aux autres navires de commerce avec une attention toute particulière pour les navires de transport de matières dangereuses. En effet, en cas d'avarie liée à un tsunami, la cargaison de ces navires représente une menace de dégradation environnementale très importante et une perte financière pour les compagnies. Cette recherche pourrait également être élargie à d'autres bassins soumis à l'aléa tsunami et pour lesquels le trafic est particulièrement dense, comme en Méditerranée par exemple.

Trois propositions de valorisation future des résultats de la thèse

- Adaptation d'un label de type « *Tsunami Ready* » au contexte français

Le doute scientifique, l'impossible prévision de l'aléa tsunami, les faibles délais d'organisation de réponse face à l'alerte sont autant de facteurs qui doivent conduire à une forme de prévention plus flexible, adaptée aux contextes locaux et aux préoccupations des citoyens. Les mesures de mitigation habituellement employées pour l'atténuation des conséquences en matière d'aléas naturels seraient très délicates à appliquer compte tenu de la grande incertitude qui règne sur les effets potentiels d'un tsunami dans la Caraïbe, et plus particulièrement en Martinique. Ces régions menacées par des tsunamis aux longues périodes de retour, interrogent alors les nouvelles formes de gouvernance des risques naturels en France par une participation multi-échelle de l'ensemble des acteurs. C'est un espace vierge pour initier justement une nouvelle forme de prévention du risque. Aucune démarche « officielle » validée au niveau national n'existe en rapport avec l'aléa tsunami. Elle laisse alors le champ à de nouvelles initiatives. C'est justement à l'échelle internationale que des mesures pour favoriser les actions de mitigation sont prises dans le cadre de la mise en place du système d'alerte régional caribéen. Un groupe de travail de l'ICG/CARIBE-EWS réfléchit depuis 2005 à l'adaptation à l'échelle de la Caraïbe du label déjà existant « *Tsunami Ready* », initialement développée par NOAA dans le cadre du NTHMP¹⁵⁷ en 2001.

Ce label s'organise autour de trois principes directeurs : le renforcement de la mitigation, la préparation à la gestion de crise et la planification de la réponse opérationnelle. Dans la Caraïbe, Antigua et les Iles Vierges Britanniques ont obtenu la reconnaissance « *Tsunami Ready* » et actuellement les îles de Saint Kits and Nevis en font la demande. Nous avons été sollicités pour participer à la traduction du document en français. Au cours de cette tâche nous avons relevé quelques éléments qui méritent une adaptation plus poussée pour répondre aux spécificités françaises, et à laquelle nous souhaitons apporter notre contribution, notamment dans le cadre du projet EXPLOIT. Pour obtenir la reconnaissance « *Tsunami Ready* » les niveaux d'exigence des principes directeurs sont adaptés en fonction du type de communauté qui en fait la demande. Ainsi, les échelles territoriales sont assez bien prises en compte et on peut aisément imaginer qu'une commune en fasse la demande en intégrant les mesures proposées à leur PCS. Néanmoins, il nous semble plus difficile à mettre en place pour des établissements publics ou privés. Sans complexifier la démarche, il pourrait être intéressant d'accompagner la conception d'une déclinaison du label pour les établissements hôteliers ainsi que pour les établissements scolaires notamment.

Ce type de label, nous semble particulièrement pertinent face à l'aléa tsunami. En effet, il permet de s'assurer que la prévention s'accompagne bien de mesures concrètes. A titre d'exemple, une étude menée par Johnston *et al.* (2005) révèle que les habitants interrogés avaient connaissance de l'aléa tsunami et de la menace qui pesait sur l'Etat de Washington et pourtant cette connaissance ne s'est pas traduite en actions concrètes. Le label peut servir également à la conception des guides pour améliorer l'intégration de l'aléa tsunami aux Plans Familiaux de Mise en Sureté (PFMS), en favorisant une réflexion pour toute la famille sur les actions en cas d'alerte tsunami, notamment celles concernant l'évacuation, « vers où je me dirige, par quel itinéraire, qu'est-ce que j'emporte avec moi » toujours en

¹⁵⁷National Tsunami Hazard Mitigation Program

fonction des différents lieux de vie réguliers et pour chaque membre de la famille. C'est un des objectifs du projet EXPLOIT auquel nous sommes associés.

- Réalisation d'un site internet dédié à la prévention du risque tsunami aux Antilles françaises

Nous prévoyons dans les mois qui viennent la construction d'un site internet dédié à une diffusion de nos travaux auprès des populations locales et à l'information préventive en général. Il sera construit autour d'une interface de cartographie interactive permettant d'afficher des données sur la connaissance de l'aléa, sur le risque en Martinique, ainsi que des informations pour préparer les évacuations. Un outil du site permettra également à l'utilisateur de trouver le site refuge le plus proche de sa zone de recherche, de récupérer les informations relatives à ce site ainsi que l'itinéraire pour le rejoindre. Ce site permettra d'afficher des informations en temps réel et de relayer les consignes officielles de la préfecture. En complément, on peut imaginer le développement d'une application *smartphone* qui permettra d'améliorer la portabilité des informations avec, pourquoi pas, l'affichage de notification « *push* » en temps réel en cas de diffusion d'un message par la préfecture.

- Valorisation scientifique

Des travaux sont en cours pour assurer le transfert de certains acquis de la thèse dans le cadre de deux projets de recherches (EXPLOIT et MapMuxing). Nous sommes impliqués dans ces deux projets favorisant la sensibilisation des populations et des acteurs de la gestion de crise. Le projet EXPLOIT cofinancé par la Fondation de France, vise à exploiter notre méthode de planification des évacuations à l'échelle communale (cf. annexe 15). L'intérêt de ce projet porte sur l'harmonisation des hypothèses opérationnelles et scientifiques en matière d'évacuation à l'échelle des Antilles françaises, dans la perspective de faciliter la communication et l'information auprès des populations locales et en transit sur les différentes îles. Le projet MAPMUXING, financé par l'ANR, s'intéresse quant à lui, à l'organisation de la concertation au niveau opérationnel. Son ambition est de proposer des prototypes d'outils de géo-visualisation de l'information géographique utile pour gérer une crise tsunami aux Antilles (cf. annexe 16). Un de ces outils prendra la forme d'une plateforme d'échanges et de partages des données cartographiques pour interpréter le phénomène et orienter la réponse opérationnelle associée, utile notamment aux préfectures.

Malgré les lacunes de connaissance sur le risque tsunami aux Antilles, une certaine dynamique de prévention s'est mise en place depuis quatre ans face à ce risque. Elle a été impulsée par l'UNESCO avec le système d'alerte régional et notre recherche a permis d'y contribuer grâce à une relation complexe mais privilégiée avec un des acteurs majeurs du dispositif régional de gestion des crises, l'EMIZA. Les deux projets de recherche évoqués plus haut vont nous permettre de renforcer notre présence aux Antilles et d'enrichir nos travaux sur les plans opérationnels et scientifiques, tout en élargissant leur périmètre géographique et l'éventail des collaborations. Le nouveau plan Séisme Antilles qui vient de débiter cet été confirme la volonté de l'Etat français de poursuivre son effort de renforcement des résiliences locales. C'est un signe fort et stimulant pour la recherche appliquée que nous souhaitons poursuivre. C'est un contexte très institutionnel favorable pour diffuser et amplifier les premiers résultats de cette thèse.

Bibliographie

- ABADIE S. M. HARRIS J. C. GRILLI S. T. ET FABRE R. (2012): Numerical modeling of tsunami waves generated by the flank collapse of the Cumbre Vieja Volcano (La Palma, Canary Islands): Tsunami source and near field effects, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117, 10.1029/2011JC007646
- ABE K. (1973): Tsunami and mechanism of great earthquakes, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 7, 143-153 p., [http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201\(73\)90004-6](http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201(73)90004-6)
- ABE K. (1979): Size of great earthquakes of 1837–1974 inferred from tsunami data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 84, 1561-1568
- ACCARY F. ET ROGER J. (2010): *Journal of Tsunami Society International, Science of Tsunami Hazards*, 29, 148
- AFD (2013) : Cadre d'intervention régional caraïbes 2013-2015, Agence Française de Développement, 48 p.
- AGUILAR L. WIJERATHNE L. ICHIMURA T. HORI M. ET TANAKA S. (2015): Mixed mode large urban area tsunami evacuation considering car-pedestrian interactions, 71, I_633-I_641
- AKETA S. YANO K. MIZUNO Y. SATO J. ET TERAUCHI K. (1994): Reduction effect of port and fishing port facilities by tsunami damage, *Proceedings of the coastal engineering conference (JSCE)*, 1176-1180 p.
- ALAEDDINE H. NERON E. MAIZAI M. ET SERRHINI K. (2013) : Un modèle d'optimisation spatio-temporel (STOM) pour l'évacuation de la population située en zone inondable, 14ème congrès de la Société de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision.
- ALBERICO I. PETROSINO P. MAGLIONE G. BRUNO L. CAPALDO F. DAL PIAZ A. LIRER L. ET MAZZOLA S. (2012): Mapping the vulnerability for evacuation of the Campi Flegrei territorial system in case of a volcanic unrest, *Natural hazards*, 64, 1823-1854
- ALIAGA B. (2009): Caribbean region to adopt ISO tsunami signage, *ISO Focus*, 45-46
- ALLGEYER S. (2012) : Modélisation de l'aléa tsunamis et des résonances côtières en France, Université Paris-Diderot-Paris VII
- ALSNIH R. ROSE J. ET STOPHER P. (2004): Dynamic travel demand for emergency evacuation: the case of bushfires, *Institute of Transport Studies Working Paper*
- AMBRASEYS N. ET SYNOLAKIS C. (2010): Tsunami Catalogs for the Eastern Mediterranean, Revisited, *Journal of Earthquake Engineering*, 14, 309-330 p., 10.1080/13632460903277593
- AMBRASEYS N. N. (1962): Data for the investigation of the seismic sea-waves in the Eastern Mediterranean, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 52, 895-913
- ANHORN J. ET KHAZAI B. (2015): Open space suitability analysis for emergency shelter after an earthquake, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 789-803
- ARANGUIZ R. (2012): The effect of a submarine canyon on tsunami propagation in the Gulf of Arauco, Chile, *Coastal Engineering Proceedings*, 1, 8
- ARCAS D. ET SEGUR H. (2012): Seismically generated tsunamis, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370, 1505-1542
- ARS (2011) Schéma Régional de Prévention de Martinique 2011-2014 - Volet Alerte et Gestion des Urgences Sanitaires, 48 p.
- ATKINS J. P. MAZZI S. ET EASTER C. D. (2000) A commonwealth vulnerability index for developing countries: the position of small states, *Commonwealth Secretariat London*
- ATWATER B. F. URI S. BUCKLEY M. HALLEY R. S. JAFFE B. E. LÓPEZ-VENEGAS A. M. REINHARDT E. G. TUTTLE M. P. WATT S. ET WEI Y. (2012): Geomorphic and stratigraphic evidence for an unusual tsunami or storm a few centuries ago at Anegada, British Virgin Islands, *Natural Hazards*, 63, 51-84
- AUDEMARD F. A. (2006): Surface rupture of the Cariaco July 09, 1997 earthquake on the El Pilar fault, northeastern Venezuela, *Tectonophysics*, 424, 19-39 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2006.04.018>
- AUDEMARD F. A. (2007): Revised seismic history of the El Pilar fault, Northeastern Venezuela, from the Cariaco 1997 earthquake and recent preliminary paleoseismic results, *Journal of Seismology*, 11, 311-326
- BAPTISTA M. ET MIRANDA J. (2009): Revision of the Portuguese catalog of tsunamis, *Natural Hazards and Earth System Science*, 9, 25-42

- BARDET J. P. SYNOLAKIS C. E. DAVIES H. L. IMAMURA F. ET OKAL E. A. (2003) Landslide Tsunamis: Recent Findings and Research Directions, in: Landslide Tsunamis: Recent Findings and Research Directions, edited by: Bardet, J.-P., Imamura, F., Synolakis, C., Okal, E., and Davies, H., Pageoph Topical Volumes, Birkhäuser Basel, 1793-1809
- BARKAN R. URI S. ET LIN J. (2009): Far field tsunami simulations of the 1755 Lisbon earthquake: Implications for tsunami hazard to the US East Coast and the Caribbean, *Marine Geology*, 264, 109-122
- BARKAN R. ET TEN BRINK U. (2010): Tsunami simulations of the 1867 Virgin Island earthquake: Constraints on epicenter location and fault parameters, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 995-1009
- BAVOUX J.-J. BEAUCIRE F. CHAPELON L. ET ZEMBRI P. (2005) : *Géographie des transports*, Paris
- BEGOT M. BULEON P. ET ROTH P. (2001) *Emergences caraïbes: éléments de géographie politique*, L'Harmattan
- BELVAUX M., MONFORT-CLIMENT D, BERTIL D, ROULLE A, NOURY G, (2014) : *Cartographie départementales du risque sismique en Martinique*, BRGM, 209 p.
- BENLAHRECH N. LE RUYET A. LIVEBARDON C. ET DEJEAMMES M. (2001): La mobilité des personnes âgées: Analyse des enquêtes ménages déplacements,
- BERNARD P. ET LAMBERT J. (1988): Subduction and seismic hazard in the northern Lesser Antilles: revision of the historical seismicity, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78, 1965-1983
- BERNARD E. MEINIG C. TITOV V. O'NEIL K. LAWSON R. JARROTT K. BAILEY R. NELSON F. TINTI S. ET VON HILLEBRANDT C. Tsunami resilient communities, *Proceedings of the OceanObs09: Sustained Ocean Observations and Information for Society Conference*, 2010, 4 p.
- BILEK S. L. ET LAY T. (2002): Tsunami earthquakes possibly widespread manifestations of frictional conditional stability, *Geophysical Research Letters*, 29, 18-11-18-14 p., 10.1029/2002GL015215
- BIRD P. ET LIU Z. (2007): Seismic hazard inferred from tectonics: California, *Seismological Research Letters*, 78, 37-48
- BIRD D. K. CHAGUÉ-GOFF C. ET GERO A. (2011): Human response to extreme events: A review of three post-tsunami disaster case studies, *Australian Geographer*, 42, 225-239
- BLAIKIE P. CANNON I. ET WISNER B. (1994): *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*, London: Routledge
- BLAIKIE P. CANNON T. DAVIS I. ET WISNER B. (2014) *At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*, Routledge
- BOEN T. (2006): Observed reconstruction of houses in Aceh seven months after the great Sumatra earthquake and Indian Ocean tsunami of December 2004, *Earthquake spectra*, 22, 803-818
- BOLTON P. A. (2007) *Managing Pedestrians During Evacuation of Metropolitan Areas*, Federal Highway Administration
- BONDEVIK S. LØVHOLT F. HARBITZ C. MANGERUD J. DAWSON A. ET SVENDSEN J. I. (2005): The Storegga Slide tsunami—comparing field observations with numerical simulations, *Marine and Petroleum Geology*, 22, 195-208
- BORRERO J. C. WEISS R. OKAL E. A. HIDAYAT R. ARCAS D. ET TITOV V. V. (2009): The tsunami of 2007 September 12, Bengkulu province, Sumatra, Indonesia: post-tsunami field survey and numerical modelling, *Geophysical Journal International*, 178, 180-194
- BORRERO J. C. LYNETT P. J. ET KALLIGERIS N. (2015): Tsunami currents in ports, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 373, 20140372
- BOUDON G. LE FRIANT A. KOMOROWSKI J. DEPLUS C. ET SEMET M. (2003): Instabilité des volcans de l'arc Antillais: origine et implication sur les risques volcaniques, *Rapport Quadriennal*, 111
- BOUDON G. LE FRIANT A. KOMOROWSKI J.-C. DEPLUS C. ET SEMET M. P. (2007): Volcano flank instability in the Lesser Antilles Arc: Diversity of scale, processes, and temporal recurrence, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112, B08205 p., 10.1029/2006JB004674
- BOULANGER P.-M. ET BRECHET T. (2003) Une analyse comparative des classes de modèles « Modélisation et aide à la décision pour un développement durable », 32 p.

- BOURGEOIS P. DUPIN F. GALIBERT T. RIDAO J.-P. ET VERLHAC E. (2015) Evaluation du plan de prévention des submersions rapides dans les Outre-Mer, Ministère de l'Intérieur - Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 213 p.
- BRIGUGLIO L. The vulnerability index and small island developing states: A review of conceptual and methodological issues, AIMS Regional Preparatory Meeting on the Ten Year Review of the Barbados Programme of Action: Praia, Cape Verde, 2003p.
- BRIGUGLIO L. ET GALEA W. (2003): Updating and augmenting the economic vulnerability index, Occasional Reports on Islands and Small States
- BRUNET R. (2000): Des modèles en géographie ? Sens d'une recherche, Bulletin de la Société de Géographie de Liège, 39, 21-30
- BRYANT E. (2005): Natural Hazards, 2nd Edition ed., 330 pp.
- BRYANT E. (2008): Tsunami: the underrated hazard, Springer
- BUGUELLOU J.-B. (2012) Micro-simulation des déplacements par systèmes multi-agents - Explorations multi-niveaux, Thèse de Doctorat, Aménagement de l'Espace et Urbanisme, Université François Rabelais, 321 p.
- BURAC M. (1994) Assumer son américanité, pour contribuer au développement durable de la Guadeloupe, de la Martinique et de la Guyane. Guadeloupe, Martinique et Guyane dans le monde américain, Paris
- BURBIDGE D. CUMMINS P. R. MLECZKO R. ET THIO H. K. (2008): A probabilistic tsunami hazard assessment for Western Australia, Pure and Applied Geophysics, 165, 2059-2088
- BURBIDGE D. R. C., P. R.; LATIEF, H.; MLECZKO, R.; MOHTARI, M.; NATAWIDJAJA, D., RAJENDRAN, C.P., THOMAS, C. (2009): A Probabilistic Tsunami Hazard Assessment of Indian Ocean Nations, Geoscience Australia Professional Opinion, No. 2009/11, 107
- CAI Q. RUSHTON G. BHADURI B. BRIGHT E. ET COLEMAN P. (2006): Estimating Small-Area Populations by Age and Sex Using Spatial Interpolation and Statistical Inference Methods, Transactions in GIS, 10, 577-598 p., 10.1111/j.1467-9671.2006.01013.x
- CALGARO E. ET LLOYD K. (2008): Sun, sea, sand and tsunamis: examining disaster vulnerability in the tourism community of Khao Lak, Thailand, Singapore Journal of Tropical Geography, 29, 288-306
- CARTWRIGHT J. H. ET NAKAMURA H. (2008): Tsunamis: a history of the term and of scientific understanding of the phenomenon in Japanese and Western culture, Notes and Records of the Royal Society, 62, 151-166
- CEPRI (2014) L'évacuation massive des populations - les territoires face à l'inondation, 98p.
- CHAMUSSY H. (1989) La modélisation des systèmes dynamiques en géographie - Problèmes théoriques et méthodologiques 0213-3709, 87 - 108 p.
- CHAPELON L. (1996): Modélisation multi-échelles des réseaux de transport: vers une plus grande précision de l'accessibilité, Mappemonde, 3, 28-36
- CHAPELON L. (2006): L'accessibilité, marqueur des inégalités de rayonnement des villes portuaires en Europe, Cybergeog: European Journal of Geography
- CHARVÉRIAT C. (2000): Natural disasters in Latin America and the Caribbean: An overview of risk,
- CHARVET I. IOANNOU I. ROSSETTO T. SUPPASRI A. ET IMAMURA F. (2014): Empirical fragility assessment of buildings affected by the 2011 Great East Japan tsunami using improved statistical models, Natural Hazards, 73, 951-973
- CHEN X. MEAKER J. W. ET ZHAN F. B. (2006): Agent-based modeling and analysis of hurricane evacuation procedures for the Florida Keys, Natural Hazards, 38, 321-338
- CHOUQUER G. (2008) Traité d'archéogéographie - La crise des récits géohistoriques, Paris
- CLIA (2015): 2016 Cruise Industry Outlook, 29 p.
- CLUFF L. (2007): Effects of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake and Indian Ocean tsunami in Aceh province, BRIDGE-WASHINGTON-NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING-, 37, 12
- CMA CGM (2007) Glossaire du transport maritime, 28 p.
- COLAS R. (2011) Elaboration d'une méthodologie pour l'étude de fréquentation d'une zone à forte vulnérabilité humaine - Le cas des plages d'Antibes face au risque de tsunami, Géographie, Université Paris 1 - Panthéon-Sorbonne, 95 p.
- COMFORT L. K. BOIN A. ET DEMCHAK C. C. (2010) Designing resilience: Preparing for extreme events, University of Pittsburgh Pre

- CONCA A. ET VIGNOLO M. G. (2012): Pedestrian flow analysis in emergency evacuation,
- CONTRERAS-LÓPEZ M. WINCKLER P. SEPÚLVEDA I. ANDAUR-ÁLVAREZ A. CORTÉS-MOLINA F. GUERRERO C. J. MIZOBE C. E. IGUALT F. BREUER W. ET BEYÁ J. F. (2016): Field survey of the 2015 Chile tsunami with emphasis on coastal wetland and conservation areas, *Pure and Applied Geophysics*, 173, 349-367
- COUR DES COMPTES (2011): La gestion des risques naturels dans les départements d'outre-mer, 37
- COURTEAU R. (2007) L'évaluation et la prévention du risque du tsunami sur les côtes françaises en métropole et outre-mer, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 171p. p.
- COVA T. J. ET CHURCH R. L. (1997): Modelling community evacuation vulnerability using GIS, *International Journal of Geographical Information Science*, 11, 763-784
- CROSS AG (2011) CROSS Antilles - Guyane : Bilan d'activité 2010, Centre Régional Opérationnel de Surveillance et de Sauvetage Antilles - Guyane, 34 p.
- CRUISE INDUSTRY NEWS (2013): State of the Industry Report - Annual Report 2013, 25rd Edition, 418p.
- CRUSE R. (2010): Politiques de la fragmentation urbaine et violence, l'exemple de Kingston, Jamaïque, *Cybergeo: European Journal of Geography*
- CRUSE R. ET SAFFACHE P. (2013) Définir les frontières de la Caraïbe : Une Introduction, *Caribbean Atlas* ed.
- CTO (2015): State of the tourism industry report 2015, 1
- D'ERCOLE R. THOURET J. DOLLFUS O. ET ASTE J. (1994): Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés: concepts, typologie, modes d'analyse, *Revue de géographie alpine*, 82, 87-96
- D'ERCOLE R. (2003): Catastrophes et disparités de développement dans le bassin caraïbe, *Mappemonde*, 72, 37-42
- DAAMEN W. (2004) Modelling passenger flows in public transport facilities, TU Delft, Delft University of Technology
- DAAMEN W. ET HOOGENDOORN S. P. (2007) Pedestrian free speed behavior in crossing flows, in: *Traffic and Granular Flow'05*, Springer, 299-304
- DAUPHINE A. ET PROVITOLLO D. La résilience: un concept pour la gestion des risques, *Annales de géographie*, 2007, 115-125 p.
- DAUPHINE A. ET PROVITOLLO D. (2013) Risques et catastrophes: observer, spatialiser, comprendre, gérer, Armand Colin
- DE RICHEMOND N. (sous presse): Le risque de tsunami à Mazagan - El Jadida (Maroc) : réévaluation des sources documentaires historiques évoquant le séisme et le tsunami de 1755, *Gérer les risques naturels - Pratiques et outils*, 7
- DE RICHEMOND N. M. ET REGHEZZA M. La gestion du risque en France: contre ou avec le territoire?, *Annales de géographie*, 2010, 248-267 p.
- DEAL MARTINIQUE (2015) PPRN Martinique - Règlement - Commune de Ducos, 240 p.
- DEHOORNE O. ET JOSEPH P. (2004): Iles et littoraux des Caraïbes: entre risques naturels et vulnérabilité des sociétés, *Espaces tropicaux et risques: du local au global*, 58
- DEHOORNE O. MURAT C. ET PETIT-CHARLES N. (2009): Le tourisme de croisière dans l'espace caribéen: évolutions récentes et enjeux de développement, *Études caribéennes*
- DEHOORNE O. FURT J.-M. ET TAFANI C. (2012): L'éco-tourisme, un «modèle» de tourisme alternatif pour les territoires insulaires touristiques français? Discussion à partir d'expériences croisées Corse-Martinique, *Études caribéennes*
- DEHOORNE O. ET TAFANI C. (2012): Le tourisme dans les environnements littoraux et insulaires: permanences, limites et perspectives, *Études caribéennes*
- DELOITTE (2012): Système d'alerte et d'information aux populations – adaptation du SAIP dans les DOM,
- DEPLUS C. LE FRIANT A. BOUDON G. KOMOROWSKI J.-C. VILLEMANT B. HARFORD C. SEGOUFIN J. ET CHEMINEE J.-L. (2001): Submarine evidence for large-scale debris avalanches in the Lesser Antilles Arc, *Earth and Planetary Science Letters*, 192, 145-157
- DEPRAETERE C. (2008): The challenge of nissology: a global outlook on the world archipelago. Part I: Scene setting the world archipelago, *Island Studies Journal*, 3, 3-16
- DESSE M. (2006): La plage: reflet des fractures sociales et ethniques aux Antilles, *Études caribéennes*
- DESSE M. (2013) Les îles de la Caraïbe: enjeux et perspectives, *Itinéraires géographiques*

- DEWI R. S. (2010) A GIS-based approach to the selection of evacuation shelter building and routes for tsunami risk reduction: A case study of Cilacap coastal area Indonesia, Universitas Gadjah Mada, 166 p.
- DGSCGC (2006) Guide ORSEC Départemental - Méthode Générale, 73p. pp.
- DGSCGC (2009) Guide ORSEC Départemental - Dispositions généralres - Mode d'action "Soutien des populations", G.2, 80p. pp.
- DGSCGC (2014) Guide Méthodologique "Évacuations Massives", 78p. p.
- DI RISIO M. BELTRAMI G. M. ET DE GIROLAMO P. (2011) Forecasting landslide generated tsunamis: a review, INTECH Open Access Publisher
- DIAS F. (2011): Modélisation mathématique des tsunamis, Images des Mathématiques, 5 p.
- DIJKSTRA E. W. (1959): A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische mathematik*, 1, 269-271
- DIXIT V. MONTZ T. ET WOLSHON B. (2011): Validation techniques for region-level microscopic mass evacuation traffic simulations, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 66-74
- DNLR (2013) Hawai'i Boater's Hurricane and Tsunami Safety Manual, State of Hawai'i Department of Land and Natural Resources 56 p.
- DOMINEY-HOWES D. DENGLER L. DUNBAR P. KONG L. FRITZ H. IMAMURA F. MCADOO B. SATAKE K. YALCINER A. ET YAMAMOTO M. (2012): International tsunami survey team (ITST) post-tsunami survey field guide, UNESCO-IOC, Paris
- DOT NY (2013) Pedestrian Facility Design, in: Highway Design Manual, 78
- DRAGANI W. C. D'ONOFRIO E. E. GRISMEYER W. FIORE M. M. VIOLANTE R. A. ET ROVERE E. I. (2009): Vulnerability of the Atlantic Patagonian coast to tsunamis generated by submarine earthquakes located in the Scotia Arc region. Some numerical experiments, *Natural hazards*, 49, 437-458
- DUBOIS-MAURY J. ET CHALINE C. (2002) Les risques urbains, U : Géographie, A. Colin
- DUMOLARD P. (1999): Accessibilité et diffusion spatiale, *Espace géographique*, 205-214
- DUPUTEL Z. (2011) Détermination rapide des paramètres de la source des grands séismes à partir de la phase W, Université de Strasbourg
- DUTYKH D. (2007) Mathematical modelling of tsunami waves, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan
- DUTYKH D. ET DIAS F. (2009): Energy of tsunami waves generated by bottom motion, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, 465, 725-744
- DUVAT V. (2008): Le système du risque à Saint-Martin (Petites Antilles françaises), *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, dossier 11
- DUVAT V. (2009): Qualité des plages et tourisme dans les îles Vierges Britanniques, *Études caribéennes*, 13 p.
- DUVAT V. ET MAGNAN A. (2014) Des catastrophes...«naturelles», Le Pommier-Belin, 368 pp.
- ECLAC (2011): Study on the vulnerability and resilience of Caribbean Small Island Developing States (SIDS), 49
- ELNASHAI A. S. GENCTURK B. KWON O.-S. AL-QADI I. L. HASHASH Y. ROESLER J. R. KIM S. J. JEONG S.-H. DUKES J. ET VALDIVIA A. (2010): The Maule (Chile) earthquake of February 27, 2010: Consequence assessment and case studies, MAE Center Report No. 10-04
- EMIZA (2016) PLAN ORSEC ZONAL Organisation de la Réponse de Sécurité Civile en zone Antilles - Edition 2016, 231 p.
- ERCOLANO J. (2008): Pedestrian Disaster Preparedness and Emergency Management of Mass Evacuations on Foot: State-of-the-Art and Best Practices, *Journal of Applied Security Research*, 3, 389-405 p., 10.1080/19361610801981068
- ERCOLANO J. (2009) Integrating Pedestrian Disaster Preparedness and Mass Evacuation on Foot into Emergency Evacuation Operations, *Local Infrastructure Needs & Long Range Transportation Planning*, 12p. p.
- FALCONE G. CONSOLE R. ET MURRU M. (2010): Short-term and long-term earthquake occurrence models for Italy: ETES, ERS and LTST, *Annals of Geophysics*, 53, 41-50
- FANG Z. LI Q. LI Q. HAN L. D. ET WANG D. (2011): A proposed pedestrian waiting-time model for improving space-time use efficiency in stadium evacuation scenarios, *Building and Environment*, 46, 1774-1784
- FEMA (2008): Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, 176p. p.
- FEMA (2009): Vertical Evacuation from Tsunamis: A Guide for Community Officials, 64p. p.

- FEUILLET N. MANIGHETTI I. TAPPONNIER P. ET JACQUES E. (2002): Arc parallel extension and localization of volcanic complexes in Guadeloupe, Lesser Antilles, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107, 2331 p., 10.1029/2001JB000308
- FEUILLET N. BEAUDUCEL F. ET TAPPONNIER P. (2011): Tectonic context of moderate to large historical earthquakes in the Lesser Antilles and mechanical coupling with volcanoes, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116, B10308 p., 10.1029/2011JB008443
- FINE I. RABINOVICH A. BORNHOLD B. THOMSON R. ET KULIKOV E. (2005): The Grand Banks landslide-generated tsunami of November 18, 1929: preliminary analysis and numerical modeling, *Marine Geology*, 215, 45-57
- FOROUZANDEH A. J. HOSSEINI M. ET SADEGHZADEH M. (2008): Guidelines for Design of Temporary Shelters After Earthquakes Based on Community Participation, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, Oct, 12-17 p.
- FRASER S. LEONARD G. MATSUO I. ET MURAKAMI H. (2012) Tsunami evacuation: lessons from the Great East Japan earthquake and tsunami of March 11th 2011
- FRASER S. JOHNSTON D. ET LEONARD G. (2013) Intended evacuation behaviour in a local earthquake and tsunami at Napier, New Zealand
- FRASER S. A. WOOD N. J. JOHNSTON D. LEONARD G. S. GREENING P. D. ET ROSSETTO T. (2014): Variable population exposure and distributed travel speeds in least-cost tsunami evacuation modelling, *Natural Hazards and Earth System Science*, 14, 2975-2991
- FREIRE S. (2010): Modeling of spatiotemporal distribution of urban population at high resolution—value for risk assessment and emergency management, in: *Geographic information and cartography for risk and crisis management*, Springer, 53-67
- FREIRE S. ET AUBRECHT C. (2011): Assessing spatio-temporal population exposure to tsunami hazard in the Lisbon metropolitan area, *Proceedings of ISCRAM*
- FRITZ H. M. BORRERO J. C. SYNOLAKIS C. E. ET YOO J. (2006): 2004 Indian Ocean tsunami flow velocity measurements from survivor videos, *Geophysical Research Letters*, 33
- FRITZ H. M. PHILLIPS D. A. OKAYASU A. SHIMOZONO T. LIU H. MOHAMMED F. SKANAVIS V. SYNOLAKIS C. E. ET TAKAHASHI T. (2012): The 2011 Japan tsunami current velocity measurements from survivor videos at Kesenuma Bay using LiDAR, *Geophysical Research Letters*, 39
- FRITZ H. M. HILLAIRE J. V. MOLIÈRE E. WEI Y. ET MOHAMMED F. (2013): Twin tsunamis triggered by the 12 January 2010 Haiti earthquake, *Pure and Applied Geophysics*, 170, 1463-1474
- FRUIN J. J. (1971) *Pedestrian planning and design*, New York, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 206p.
- GAILLARD J.-C. CLAVÉ E. VIBERT O. AZHARI DEDI DENAIN J.-C. EFENDI Y. GRANCHER D. LIAMZON C. C. SARI D. R. ET SETIAWAN R. (2008): Ethnic groups' response to the 26 December 2004 earthquake and tsunami in Aceh, Indonesia, *Natural Hazards*, 47, 17-38 p., 10.1007/s11069-007-9193-3
- GALL M. NGUYEN K. H. ET CUTTER S. L. (2015): Integrated research on disaster risk: Is it really integrated?, *International Journal of Disaster Risk Reduction*
- GAMBLIN A. (2005) *Les Amériques latines: Unité et diversité des territoires*, Editions Sedes
- GAYER G. LESCHKA S. NÖHREN I. LARSEN O. ET GÜNTHER H. (2010): Tsunami inundation modelling based on detailed roughness maps of densely populated areas, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 1679-1687
- GEIST E. L. ET PARSONS T. (2006): Probabilistic analysis of tsunami hazards, *Natural Hazards*, 37, 277-314
- GEIST E. L. ET PARSONS T. (2009): Assessment of source probabilities for potential tsunamis affecting the US Atlantic coast, *Marine Geology*, 264, 98-108
- GILBERT C. (1992) *Le pouvoir en situation extrême: catastrophes et politique*, Editions L'Harmattan
- GIRRES J. (2012): *Modèle d'estimation de l'imprécision des mesures géométriques de données géographiques. Application aux mesures de longueur et de surface*, PhD, Université Paris–Est, France, 372
- GISLER G. WEAVER R. ET GITTINGS M. L. (2006): SAGE calculations of the tsunami threat from La Palma, *Sci. Tsunami Hazards*, 24, 288-312

- GHOBARAH A. SAATCIOGLU M. ET NISTOR I. (2006): The impact of the 26 December 2004 earthquake and tsunami on structures and infrastructure, *Engineering Structures*, 28, 312-326 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.09.028>
- GLEYZE J. F. ET REGHEZZA M. (2007): La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement, *Géocarrefour: Revue de géographie de Lyon*, 82, 17-26
- GONZÁLEZ F. GEIST E. L. JAFFE B. KÂNOĞLU U. MOFJELD H. SYNOLAKIS C. TITOV V. V. ARCAS D. BELLOMO D. ET CARLTON D. (2009): Probabilistic tsunami hazard assessment at seaside, Oregon, for near-and far-field seismic sources, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114
- GONZALEZ-RIANCHO CALZADA P. AGUIRRE AYERBE I. ANIEL-QUIROGA ZORRILLA Í. ABAD HERRERO S. GONZALEZ RODRIGUEZ E. M. LARREYNAGA J. GAVIDIA MEDINA F. GUTIERREZ GUTIERREZ O. Q. ÁLVAREZ GOMEZ J. A. ET MEDINA SANTAMARIA R. (2013): Tsunami evacuation modelling as a tool for risk reduction: application to the coastal area of El Salvador,
- GONZÁLEZ P. A. DELGADO R. C. MAHABIR R. ET FERNÁNDEZ E. F. (2016): The Feasibility of Applying the Disaster Severity Score: The Case of Spain, *Journal of Intensive and Critical Care*
- GOTO Y. M., T; NAKABAYASHI, I Fact-finding about evacuation from the unexpectedly large tsunami, *International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, 2012p.
- GOULD P. (1968): *The new geography: where the action is*, Harper's Magazine
- GRAEHL N. ET DENGLER L. (2008): Using a GIS to model tsunami evacuation times for the community of Fairhaven, California, *AGU Fall Meeting Abstracts*, 24 p.
- GRAEHL N. (2009): Using a GIS to model pedestrian evacuation times for Newport, OR, Unpublished research, Humbolt State University, California
- GRAVEL N. (2009) *Géographie de l'Amérique latine. Une culture de l'incertitude*, Presses de l'Université du Québec, Québec
- GRANCHER D. B.-H., AVNER; PARIS, RAPHAËL; LAVIGNE, FRANCK; WASSMER, PATRICK (2011): Interpolation spatiale de données circulaires : application au tsunami du 26 décembre 2004, *Tsunarique*, 49-58
- GRANDJEAN S. (2004) Etude des classifications de modèles de simulation spatiale en Géographie, Master 2, Université de Franche-Comté, 33 p.
- GRILLI S. DUBOSQ S. POPHET N. PÉRIGNON Y. KIRBY J. ET SHI F. (2010): Numerical simulation and first-order hazard analysis of large co-seismic tsunamis generated in the Puerto Rico trench: near-field impact on the North shore of Puerto Rico and far-field impact on the US East Coast, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 2109-2125
- GRILLI S. T. TAYLOR O.-D. S. BAXTER C. D. ET MARETZKI S. (2009): A probabilistic approach for determining submarine landslide tsunami hazard along the upper east coast of the United States, *Marine Geology*, 264, 74-97
- GUHA-SAPIR D. VOS F. BELOW R. ET PENSERRE S. (2012) Annual disaster statistical review 2011: the numbers and trends, UCLp.
- GUSIAKOV V. (2009) Tsunami history: recorded, in: *The Sea Tsunamis*, FR Bernard et AR Robinson ed., Harvard University Press, Boston, 23-53
- GUSTAVE G. (2015) Gestion du risque tsunami dans la Caraïbe : bases de données, référentiels cartographiques et contribution méthodologique, Mémoire de Master 2 GCRN Université Paul Valéry Montpellier III, 105 p.
- GUTSCHER M.-A. ET WESTBROOK G. K. (2009) Great earthquakes in slow-subduction, low-taper margins, in: *Subduction Zone Geodynamics*, Springer, 119-133
- GUTSCHER M.-A. WESTBROOK G. K. MARCAILLOU B. GRAINDORGE D. GAILLER A. PICHOT T. ET MAURY R. C. (2013): How wide is the seismogenic zone of the Lesser Antilles forearc?, *Bulletin de la Société Géologique de France*, 184, 47-59
- GUTTON R. (2010) Elaboration, application et spatialisation d'indicateurs géographiques de risques naturels en zones urbanisées. Martinique Rapport de stage M2 GCRN, Université Montpellier 3, 90 p.
- GUZMAN J. M. RODRIGUEZ J. MARTINEZ J. CONTRERAS J. M. ET GONZALEZ D. (2007): La démographie de l'Amérique latine et de la Caraïbe depuis 1950, *Population*, 61, 623-733

- HAMACHER H. W. ET TJANDRA S. A. (2001) Mathematical modelling of evacuation problems: A state of art, Fraunhofer-Institut für Techno-und Wirtschaftsmathematik, Fraunhofer (ITWM)
- HAMPTON M. A. LEE H. J. ET LOCAT J. (1996): Submarine landslides, *Reviews of Geophysics*, 34, 33-59 p., 10.1029/95RG03287
- HARBITZ C. (1992): Model simulations of tsunamis generated by the Storegga slides, *Marine Geology*, 105, 1-21
- HARBITZ C. GLIMSDAL S. BAZIN S. ZAMORA N. LØVHOLT F. BUNGUM H. SMEBYE H. GAUER P. ET KJEKSTAD O. (2012): Tsunami hazard in the Caribbean: regional exposure derived from credible worst case scenarios, *Continental Shelf Research*, 38, 1-23
- HARDY M. DODGE L. SMITH T. VÁSCONEZ K. C. ET WUNDERLICH K. E. Evacuation management operations modeling assessment: Transportation modeling inventory, 15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS America's 2008 Annual Meeting, Nova Iorque, 2008, 17 p.
- HARTOG T. (2009) Le tourisme de croisière dans le Bassin caraïbe: une affaire américaine, in: *Les littoraux de la Caraïbe-Pratiques sociales et nouvelles dynamiques spatiales*, Karthala et GEODE Caraïbe ed., pp. 79-92
- HARTOG T. (2014): La mise en réseau des îles caraïbes par les compagnies de croisière états-uniennes, *Géotransports, Transport et territoires insulaires*, 55-77
- HASLETT S. K. MELLOR H. E. ET BRYANT E. A. (2009): Meteo-tsunami hazard associated with summer thunderstorms in the United Kingdom, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34, 1016-1022
- HATORI T. (1979): Relation between tsunami magnitude and wave energy, *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 54, 531-541
- HAYASHI S. ET KOSHIMURA S. (2013): The 2011 Tohoku Tsunami flow velocity estimation by the aerial video analysis and numerical modeling, *J. Disaster Res*, 8, 561-572
- HAYES G. P. MCNAMARA D. E. SEIDMAN L. ET ROGER J. (2014): Quantifying potential earthquake and tsunami hazard in the Lesser Antilles subduction zone of the Caribbean region, *Geophysical Journal International*, 196, 510-521
- HEARTY P. J. (1997): Boulder deposits from large waves during the last interglaciation on North Eleuthera Island, Bahamas, *Quaternary Research*, 48, 326-338
- HEBERT H. BRUNSTEIN D. LOEVENBRUCK A. SLADEN A. ROGER J. SCHINDELE F. LAVIGNE F. ET VAUTIER F. (2011): Modélisation numérique du tsunami dans les districts de Banda Aceh et Lhok Nga, *Tsunarisque*, 59-76
- HEINRICH P. MANGENEY A. GUIBOURG S. ROCHE R. BOUDON G. ET CHEMINEE J. L. (1998): Simulation of water waves generated by a potential debris avalanche in Montserrat, Lesser Antilles, *Geophysical Research Letters*, 25, 3697-3700
- HEINRICH P. GUIBOURG S. MANGENEY A. ET ROCHE R. (1999): Numerical modeling of a landslide-generated tsunami following a potential explosion of the Montserrat volcano, *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 24, 163-168 p., [http://dx.doi.org/10.1016/S1464-1895\(99\)00013-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1464-1895(99)00013-7)
- HEINRICH P. BOUDON G. KOMOROWSKI J. SPARKS R. HERD R. ET VOIGHT B. (2001): Numerical simulation of the December 1997 debris avalanche in Montserrat, Lesser Antilles, *Geophysical Research Letters*, 28, 2529-2532
- HELBING D. (2012) : Agent-based modeling, in: *Social self-organization*, Springer, 25-70
- HELLER D. S. (2010): Evacuation Planning in the Aftermath of Katrina: lessons learned, *Risk, Hazards & Crisis in Public Policy*, 1, 131-174
- HENRY (COORD.) H. (2012) DEPAMAR Analyse de la réponse du dispositif sanitaire et médico-social aux besoins de la population âgée dépendante en Martinique Agence Régionale de Santé Martinique, Conseil Général de la Martinique Société Martiniquaise de Gérontologie et Gériatrie 48 p.
- HERNANDEZ J. (2010) ReNew Orleans?: Résilience urbaine, mobilisation civique et création d'un «capital de reconstruction» à la Nouvelle-Orléans après Katrina, Paris 10
- HILL E. M. BORRERO J. C. HUANG Z. QIU Q. BANERJEE P. NATAWIDJAJA D. H. ELOSEGUI P. FRITZ H. M. SUWARGADI B. W. PRANANTYO I. R. LI L. MACPHERSON K. A. SKANAVIS V. SYNOLAKIS C. E. ET SIEH K. (2012): The 2010 Mw 7.8 Mentawai earthquake: Very shallow source of a rare tsunami earthquake

- determined from tsunami field survey and near-field GPS data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117, B06402 p., 10.1029/2012JB009159
- HORRILLO J. KNIGHT W. ET KOWALIK Z. (2008): Kuril Islands tsunami of November 2006: 2. Impact at Crescent City by local enhancement, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113, C01021 p., 10.1029/2007JC004404
- HORSPOOL N. PRANANTYO I. GRIFFIN J. LATIEF H. NATAWIDJAJA D. KONGKO W. CIPTA A. BUSTAMAN B. ANUGRAH S. ET THIO H. (2014): A probabilistic tsunami hazard assessment for Indonesia, *Natural Hazards and Earth System Science*, 14, 3105-3122
- IEDOM (2015) *Le Tourisme à la Martinique – Un secteur à la recherche d'un nouveau souffle*, Note expresse n°307 – Janvier 2015, 8p.
- IIDA K. COX D. C. ET PARARAS-CARAYANNIS G. (1967) Preliminary catalog of tsunamis occurring in the Pacific Ocean, DTIC Documentp.
- IMAMURA A. (1942): History of Japanese tsunamis, *Kayo-No-Kagaku (Oceanography)*, 2, 74-80
- INSEE (2013): *Le logement aujourd'hui et demain en Martinique*, 44
- IOC-UNESCO (2007): Intergovernmental Coordination Group for the Tsunami Early Warning and Mitigation System in the North Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas (ICG/NEAMTWS), 75 p. p.
- IOC-UNESCO (2008): *Préparation aux tsunamis - Guide d'information à l'intention des responsables de la planification en cas de catastrophe*, 29p. p.
- IOC-UNESCO (2009) : *Soixante ans de science à l'UNESCO, 1945 - 2005*, UNESCO, 763 p.
- IOC-UNESCO (2012) : *Préparation aux tsunamis - Protection Civile - Guide des bonnes pratiques*, UNSECO - Intergovernmental Oceanographic Commission, 73p. p.
- IOC-UNESCO (2013a): *Tsunami and other Coastal Hazards Warning System for the Caribbean and Adjacent Regions (CARIBE-EWS) - Implementation Plan 2013–2017*, Paris, 55 p.
- IOC-UNESCO (2013b) : *Glossaire sur les tsunamis*, Edition révisé 2012 ed., Paris, 49 pp.
- IOC-UNESCO (2014a): *User's Guide for the Pacific Tsunami Warning Center Enhanced Products for the Pacific Tsunami Warning System*, 90 p.
- IOC-UNESCO (2014b) : *Stratégie à moyen terme de la COI*, 67 p.
- IOC-UNESCO (2014c): *Tsunami, The Great Waves*, second revised edition, UNESCO, p. 16 p.
- IOC-UNESCO (2015): *Tsunami warning and mitigation systems to protect coastal communities* 15 p.
- ISHIWATARI M. ET ARAKIDA M. (2012): *Evacuation*, The World Bank Intitute, 16p. p.
- IWANAGA S. ET MATSUURA Y. (2012): Safety of ships' evacuation from tsunami: survey unit of the Great East Japan earthquake, *Artificial Life and Robotics*, 17, 168-171
- JANSEN E. BEFRING S. BUGGE T. EIDVIN T. HOLTEDAHL H. ET SEJRUP H. P. (1987): Large submarine slides on the Norwegian continental margin: sediments, transport and timing, *Marine Geology*, 78, 77-107
- JARVIS M. (2013): *The 1929 Tsunami-A Look Inside*, Proto-Type, 1
- JCOMM (2007): *Guidelines for the provision of MSI related to tsunamis (organization, content, formats)*, 37 p. p.
- JCOMM (2009): *Report on the specification of tsunami related MSI*, 3 p. p.
- JIMÉNEZ J. OSORIO A. MARINO-TAPIA I. DAVIDSON M. MEDINA R. KROON A. ARCHETTI R. CIAVOLA P. ET AARNIKHOF S. (2007): Beach recreation planning using video-derived coastal state indicators, *Coastal Engineering*, 54, 507-521
- JOHNSTON D. PATON D. CRAWFORD G. L. RONAN K. HOUGHTON B. ET BÜRGELET P. (2005) *Measuring tsunami preparedness in coastal Washington, United States*, in: *Developing Tsunami-Resilient Communities*, Springer, 173-184
- JOHNSTONE W. ET LENCE B. (2011): Use of flood, loss, and evacuation models to assess exposure and improve a community tsunami response plan: Vancouver Island, *Natural hazards review*, 13, 162-171
- JONKMAN S. VRIJLING J. ET VROUWENVELDER A. (2008): Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method, *Natural Hazards*, 46, 353-389
- KAGAN Y. Y. JACKSON D. D. ET RONG Y. (2007): A testable five-year forecast of moderate and large earthquakes in southern California based on smoothed seismicity, *Seismological Research Letters*, 78, 94-98
- KAMMLER M. ET SCHERNEWSKI G. (2004): Spatial and temporal analysis of beach tourism using webcam and aerial photographs, *Managing the Baltic Sea. Coastline Reports*, 2, 121-128

- KANAMORI H. (1972): Mechanism of tsunami earthquakes, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 6, 346-359 p., [http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201\(72\)90058-1](http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201(72)90058-1)
- KAWATA Y. NINA K. HARADA K. ET SUZUKI S (2004). Proposal for evaluation method of ship damage by tsunami, *Proceedings of the coastal engineering conference (JSCE)*, 316-320 p.
- KAZAMA T. NAKAMURA T. ITO T. OTSUKA K. SATO K. ET IMAZU Y. (2006): A study on evacuation area for mitigating ship damage by tsunami, *Proceedings of the coastal engineering conference (JSCE)*, 1356-1360 p.
- KERMISCH C. (2011) : Le concept du risque: - De l'épistémologie à l'éthique, Editions TEC et DOC ed., Lavoisier
- KHALIL W. (2012) : Contribution à la modélisation graphique de système de systèmes, Lille 1, 138 p.
- KHOLSHEVNIKOV V. V. ET SAMOSHIN D. A. (2010) Parameters of pedestrian flow for modeling purposes, in: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, Springer, 157-170
- KIM D. KIM B. J. LEE S.-O. ET CHO Y.-S. (2014): Best-fit distribution and log-normality for tsunami heights along coastal lines, *Stochastic environmental research and risk assessment*, 28, 881-893
- KLÜPFEL H. MEYER-KÖNIG T. WAHLE J. ET SCHRECKENBERG M. (2001): Microscopic simulation of evacuation processes on passenger ships, in: *Theory and practical issues on cellular automata*, Springer, 63-71
- KOBAYASHI E. KOSHIMURA S. ET YONEDA S. Guideline for ship evacuation from a tsunami attack, *Proc 18th Int Offshore and Polar Engineering Conf*, 2008, 536-542 p.
- KONG L. (2009): Tsunami Signage, Fourth Session of the Intergovernmental Coordination Group for the Tsunami and Other Coastal Hazards Warning System for the Caribbean and Adjacent Regions (ICG/CARIBE EWS-IV), Fort-de-France, Martinique, 13 p.
- KORIKANTHIMATH V. V. (2006) Analytical model for staging emergency evacuations, 10
- KOSHIMURA S. OIE T. YANAGISAWA H. ET IMAMURA F. (2009): Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, *Coastal Engineering Journal*, 51, 243-273
- KUBO M. CHO I.-S. SAKAKIBARA S. KOBAYASHI E. ET KOSHIMURA S. (2005): The influence of tsunamis on moored ships and ports, *Journal of Korean navigation and port research*, 29, 319-325
- KUROWSKI M. J. HEDLEY N. ET CLAGUE J. J. (2011): An assessment of educational tsunami evacuation map designs in Washington and Oregon, *Natural hazards*, 59, 1205-1223
- LACASSIN R. KLINGER Y. ET FEUILLET N. (2013): Sismotectonique du tremblement de terre du 12 janvier 2010 en Haïti, *Outre-terre*, 163-183
- LAFORGE R. C. ET MCCANN W. R. (2005): A seismic source model for Puerto Rico, for use in probabilistic ground motion hazard analyses, *Geological Society of America Special Papers*, 385, 223-248
- LAGADEC P. (1991): La gestion des crises - Outils de réflexion à l'usage des décideurs, Ediscience international. Paris, 300
- LAGADEC P. ET GUILHOU X. (2002): Les conditions de survenue des crises graves, *Conditions et mécanismes de production des défaillances, accidents et crises*, Grenoble, CNRS-MSH-Alpes, 157-210
- LAGADEC P. (2003): Chapitre XVII La recherche confrontée à la question des crises. Pour des ruptures créatrices, *Risques collectifs et situations de crise: Apports de la recherche en sciences humaines et sociales*, 297
- LAGADEC P. ET GUILHOU X. (2006): Katrina: Quand les crises ne suivent plus le script, *Préventique-Sécurité*, 31-33
- LAMB S. M. ET WALTON D. K. (2011): Travel behaviours following the 2007 Gisborne earthquake: evidence for the use of simulation in earthquake research, *International Journal of Emergency Management*, 8, 42-59
- LAMBERT J. ET TERRIER M. (2011): Historical tsunami database for France and its overseas territories, *Natural Hazards and Earth System Science*, 11, 1037-1046
- LÄMMEL G. GREYER D. ET NAGEL K. (2010a): The representation and implementation of time-dependent inundation in large-scale microscopic evacuation simulations, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18, 84-98
- LÄMMEL G. RIESER M. NAGEL K. TAUBENBÖCK H. STRUNZ G. GOSEBERG N. SCHLURMANN T. KLÜPFEL H. SETIADI N. ET BIRKMANN J. (2010b) Emergency Preparedness in the Case of a Tsunami—Evacuation Analysis and Traffic Optimization for the Indonesian City of Padang, in: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, Springer Berlin Heidelberg, 171-182

- LAMY P., MARBOUTY, D., PINET, M. (2014) Mission sur le fonctionnement du Centre national d'alerte aux tsunamis (CENALT), Ministère de l'Intérieur / Ministère de l'Ecologie de Développement Durable de l'Energie, 70 p.
- LANDER J. F. WHITESIDE L. S. ET LOCKRIDGE P. A. (2002): A brief history of tsunamis in the Caribbean Sea, *Science of Tsunami Hazards*, 20, 57-94
- LASSERRE G. (1974) *Les Amériques du Centre: Mexique-Amérique centrale-Antilles-Guyanes*, Paris
- LAVIGNE F. GOMEZ C. GIFFO M. WASSMER P. HOEBRECK C. MARDIATNO D. PRIOYONO J. ET PARIS R. (2007): Field observations of the 17 July 2006 Tsunami in Java, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 177-183
- LAVIGNE F. PARIS R. GRANCHER D. WASSMER P. BRUNSTEIN D. VAUTIER F. LEONE F. FLOHIC F. DE COSTER B. GUNAWAN T. GOMEZ C. SETIAWAN A. CAHYADI R. ET FACHRIZAL (2009): Reconstruction of Tsunami Inland Propagation on December 26, 2004 in Banda Aceh, Indonesia, through Field Investigations, *Pure and Applied Geophysics*, 166, 259-281 p., 10.1007/s00024-008-0431-8
- LAVIGNE F. (DIR) S. A., COQUET M., WASSMER P., GOETT H., LEONE F., PEROCHE M., LAGAHE E., GHERARDI M., VINET F., HACHIM S., DROUET F., QUENTEL E., LOEVENBRUCK A., SCHINDELE F., HEBERT H., ANSELME B., DURAND P., GAULTIER-GAILLARD S., PRATLONG F., DIVIALLE F., MORIN J., (2012) PREPARTOI (Prévention et REcherche Pour l'Atténuation du Risque de Tsunami dans l'Océan Indien (Réunion-Mayotte), Rapport final, Fondation MAIF, Université Paris 1, 257 p.
- LAVIGNE F. C. ET PARIS R. C. (2011) *Tsunarisque: Le tsunami du 26 décembre 2004 à Aceh, Indonésie*, Publications de la Sorbonne, 324 pp.
- LE BERRE S. PEUZIAT I. LE CORRE N. ET BRIGAND L. (2013): Observer et suivre la fréquentation dans les aires marines protégées de,
- LE BLANC A. ET ZWARTEROOK I. (2013): Introduction à la résilience territoriale: enjeux pour la concertation, *Cahier de la sécurité industrielle*, Fondation pour une culture de sécurité industrielle, Toulouse, France.
- LE CORRE N. LE BERRE S. MEUNIER M. BRIGAND L. BONCOEUR J. ET ALBAN F. (2011): Dispositifs de suivi de la fréquentation des espaces marins, littoraux et insulaires et de ses retombées socio-économiques: état de l'art, Rapport Géomer LETG, UMR, 6554
- LE FRIANT A. BOUDON G. KOMOROWSKI J.-C. ET DEPLUS C. (2002): L'île de la Dominique, à l'origine des avalanches de débris les plus volumineuses de l'arc des Petites Antilles, *Comptes Rendus Geoscience*, 334, 235-243
- LE FRIANT A. BOUDON G. DEPLUS C. ET VILLEMANT B. (2003a): Large-scale flank collapse events during the activity of Montagne Pelée, Martinique, Lesser Antilles, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108, 2055 p., 10.1029/2001JB001624
- LE FRIANT A. HEINRICH P. DEPLUS C. ET BOUDON G. (2003b): Numerical simulation of the last flank-collapse event of Montagne Pelée, Martinique, Lesser Antilles, *Geophysical Research Letters*, 30, 1034 p., 10.1029/2002GL015903
- LE FRIANT A. HEINRICH P. ET BOUDON G. (2008): Field survey and numerical simulation of the 21 November 2004 tsunami at Les Saintes (Lesser Antilles), *Geophysical Research Letters*, 35, L12308 p., 10.1029/2008GL034051
- LE FRIANT A. ISHIZUKA O. BOUDON G. PALMER M. TALLING P. VILLEMANT B. ADACHI T. ALJAHDALI M. BREITKREUZ C. ET BRUNET M. (2015): Submarine record of volcanic island construction and collapse in the Lesser Antilles arc: First scientific drilling of submarine volcanic island landslides by IODP Expedition 340, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16, 420-442
- LE JEANNIC T. (2010): *La mobilité des Français, panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*, Paris: ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement
- LEAT P. T. DAY S. J. TATE A. J. MARTIN T. J. OWEN M. J. ET TAPPIN D. R. (2013): Volcanic evolution of the South Sandwich volcanic arc, South Atlantic, from multibeam bathymetry, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 265, 60-77
- LEATHERMAN S. P. (1997): Beach rating: a methodological approach, *Journal of Coastal Research*, 253-258
- LEE H. J. (2009): Timing of occurrence of large submarine landslides on the Atlantic Ocean margin, *Marine Geology*, 264, 53-64 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2008.09.009>

- LEE J. HATOYAMA K. ET IEDA H. Formulation of Tsunami Evacuation Strategy to Designate Routes for the Car Mode-Lessons from the Three Cities in Tohoku Area, Japan, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2013p.
- LEKKAS E. ANDREADAKIS E. KOSTAKI I. ET KAPOURANI E. (2011): Critical factors for run-up and impact of the Tohoku earthquake tsunami, *International Journal of Geosciences*, 2, 310
- LEMAHIEU A. (2010) Elaboration d'un protocole de suivi de la fréquentation de la Réserve Naturelle Marine de La Réunion par voie aéroportée, Mémoire de M2, Géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 71 p.
- LEÓN J. ET MARCH A. (2014): Urban morphology as a tool for supporting tsunami rapid resilience: A case study of Talcahuano, Chile, *Habitat International*, 43, 250-262
- LEONE F. ET VINET F. (2006): La vulnérabilité, un concept fondamental au coeur des méthodes d'évaluation des risques naturels, *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques*, 9-25
- LEONE F. (2007) : "Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes" naturelles": contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones), Université Paul Valéry-Montpellier III
- LEONE F. VINET F. DENAIN J.-C. ET BACHRI S. (2007): Développement d'une méthodologie d'analyse spatiale des destructions consécutives au tsunami du 26 décembre 2004 (Banda Aceh, Indonésie), *Géocarrefour*, 82, 77-90
- LEONE F. D. R., NANCY ; VINET, FREDDY (2010) Aléas naturels et gestion des risques Collection Licence Géographie ed., 288 pp.
- LEONE F. (DIR.) D. J., JOMELLI V., CHAPELON L., BOUHET O., COLAS A., VINET F., CHEREL J. P., MASTER 2 GCRN (2011a) Vulnérabilités des réseaux routiers face aux debris flows dans les Alpes. Quantification des risques et modélisation de l'accessibilité territoriale. Partie 1 : Approche régionale. Vulnérabilités des réseaux routiers et dégradation de l'accessibilité territoriale (Alpes-de-Haute-Provence, Hautes-Alpes, Savoie). Partie 2 : Approche locale. Diagnostic intégré du risque torrentiel et accessibilité routière des secours sur cinq bassins-versants. Moyenne vallée de l'Ubaye (Alpes-de-Haute-Provence) - Rapport WP6, Projet ANR SCAMPEI (Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes), UMR GRED, Université Montpellier 3, 135 p.
- LEONE F. LAVIGNE F. PARIS R. DENAIN J.-C. ET VINET F. (2011b): A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability, *Applied Geography*, 31, 363-375 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.07.009>
- LEONE F. GUTTON R. ET PEROCHE M. (2012) Contribution méthodologique pour l'aide à la planification des évacuations de population en cas de tsunami Modélisation spatiale et temporelle de l'accessibilité des zones refuges (Martinique, France), IRD & Université Montpellier 3, 111 p.
- LEONE F. (DIR.) B. M. A., ZOURARAH B., MEHDI K., LAVIGNE F., MESCHINET DE RICHEMOND N., OMIRA R., MELLAS S., PEROCHE M., LAGAHE E., HEYMANN A., GHERARDI M., GRANCHER D., CHEREL J.P., SAHAL. A., DENAIN J.C., MEUNIER. N., INANI D. (2012) Evaluation des vulnérabilités territoriales et humaines face aux tsunamis au Maroc (façade atlantique et ville d'El Jadida) : données historiques, modélisation de l'aléa et des enjeux humains, critères de vulnérabilité, indicateurs de risque, aide à la gestion des évacuations - Rapport WP5 (D5.4., D5.5, D5.6), Projet ANR-08-RISK-NAT-05 MAREMOTI (MAREgraphie, observations de tsunamis, modélisation et études de vulnérabilité pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée occidentale), UMR GRED (ex. EA GESTER), Université Montpellier 3 & IRD, 190 p.
- LEONE F. (DIR.) C. A., GARCIN Y., ECKERT N., JOMELLI V., GHERARDI M. (2014) Vulnérabilités des réseaux routiers alpins aux Avalanches (Hautes-Alpes, Alpes-de-Haute-Provence, Alpes-Maritimes). Evaluation des impacts et cartographie de la perte d'accessibilité territoriale – Rapport Tâches 3.2 et 4.1, ANR MOPERA (Modélisation Probabiliste pour l'Evaluation du Risque Avalanche), UMR GRED, Montpellier, 65 p.
- LEONE (DIR.) G. M., LESALES T., LALUBIE G., GROS-DESORMEAUX J.R., BURAC M., DEYMIER J., HEYMANN A., SEDANO S., PEROCHE M. (2015) Exposition, vulnérabilité et accessibilité territoriales en cas d'éruptions volcaniques aux Antilles : une approche comparative Martinique / Guadeloupe – Rapport final

- WP4, programme ANR CASAVA (Compréhension et Analyse des Scénarios, Aléas, et risques Volcaniques aux Antilles – Implications pour l'aide à la décision, la gestion de crise, et le développement raisonné), UMR GRED, Montpellier, 105 p.
- LETCHIMY S. ET BAZABAS G. (1992) De l'habitat précaire à la ville: l'exemple martiniquais, Editions L'Harmattan
- LETETREL C. (2010) Mouvements verticaux à la surface de la Terre par altimétrie radar embarquée sur satellite, marégraphie et GPS.: un exemple d'application: le Golfe du Mexique, Université de La Rochelle
- LEVIN B. ET NOSOV M. (2008): On the possibility of tsunami formation as a result of water discharge into seismic bottom fractures, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 44, 117-120
- LEWSEY C. CID G. ET KRUSE E. (2004): Assessing climate change impacts on coastal infrastructure in the Eastern Caribbean, *Marine Policy*, 28, 393-409
- LHOMME S. (2012) Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain-Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine, Université Paris-Diderot-Paris VII
- LINDSAY J. SHEPHERD J. ET WILSON D. (2005): Volcanic and Scientific Activity at Kick 'em Jenny Submarine Volcano 2001–2002: Implications for Volcanic Hazard in the Southern Grenadines, Lesser Antilles, *Natural Hazards*, 34, 1-24 p., 10.1007/s11069-004-1566-2
- LIPI/DLR/UNU-EHS (2011) Guideline for tsunami risk assessment in Indonesia scientific proposal for practitioner and end users, Provided by the Indonesian – German Working Group on Tsunami Risk Assessment., 132 p.
- LIU X. SHIOTANI S. ET SASA K. (2015): An Analysis of Ship Behavior Induced by the Great East Japan Earthquake Tsunami Based on AIS, *Activities in Navigation: Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 119
- LØVHOLT F. PEDERSEN G. ET GISLER G. (2008): Oceanic propagation of a potential tsunami from the La Palma Island, *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 113
- LU S. LEE J.-J. ET XING X. (2014): Harbour resonance under impact of powerful tsunami, *Coastal Engineering Proceedings*, 1, 12
- LUMBROSO D. ET DI MAURO M. (2008): Recent developments in loss of life and evacuation modelling for flood event management in the UK, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 118
- LYNETT P. J. BORRERO J. C. WEISS R. SON S. GREER D. ET RENTERIA W. (2012): Observations and modeling of tsunami-induced currents in ports and harbors, *Earth and Planetary Science Letters*, 327, pp. 68-74
- LYNETT P. J. BORRERO J. SON S. WILSON R. ET MILLER K. (2014): Assessment of the tsunami-induced current hazard, *Geophysical Research Letters*, 41, 2048-2055
- MACDONALD K. C. ET HOLCOMBE T. (1978): Inversion of magnetic anomalies and sea-floor spreading in the Cayman Trough, *Earth and Planetary Science Letters*, 40, 407-414
- MAGNAN A. (2006): L'évacuation des populations aux Maldives après le tsunami du 26 décembre 2004, *Mappemonde*, 84
- MAGNAN A. (2008): L'intégration spatiale du tourisme dans l'île d'Anguille (Petites Antilles), *L'Information géographique*, 72, 17-31
- MAKINO H. (2012): Analysis of ship refuge action in tsunami using AIS data - Case of the 2011 east Japan earthquake and tsunami, *Journal of Shipping and Ocean Engineering*, 2, pp. 380-385
- MAKINO H. FURUSHO M. ET YANO Y. (2012): Analysis of ship evacuation during tsunami using AIS (Automatic Identification System) data, *Journal of Earth Science and Engineering*, 2, 412-417
- MALDONADO R., HAYEM, M. (2015) Remittances to Latin America and the Caribbean - Set a new record high in 2014, Multilateral Investment Fund, Inter-American Development Bankp.
- MALLET J.-C. (2008) Défense et sécurité nationale: le livre blanc, O. Jacob
- MALLET R. Catalog of recorded earthquakes from 1600 BC to AD 1850, Report of the 23rd meeting of the British Association for the Advancement of Sciences, 1854, 1-326 p.
- MARAMAI A. BRIZUELA B. ET GRAZIANI L. (2014): The Euro-Mediterranean Tsunami Catalogue, *Annals of Geophysics*, 57, 26

- MARÇOT N. COLAS B. ET TERRIER M. (2007) Etude préliminaire de l'aléa tsunami en Méditerranée occidentale - Mouvements de terrain côtiers de grande ampleur, 37 p.
- MARÍN A. GELCICH S. ARAYA G. OLEA G. ESPÍNDOLA M. ET CASTILLA J. C. (2010): The 2010 tsunami in Chile: Devastation and survival of coastal small-scale fishing communities, *Marine Policy*, 34, 1381-1384
- MARRERO J. GARCIA A. LLINARES A. RODRIGUEZ-LOSADA J. ET ORTIZ R. (2010): The Variable Scale Evacuation Model (VSEM): a new tool for simulating massive evacuation processes during volcanic crises, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 747-760
- MARTÍN MÍGUEZ B. LE ROY R. ET WÖPPELMANN G. (2008): The Use of Radar Tide Gauges to Measure Variations in Sea Level along the French Coast, *Journal of Coastal Research*, 61-68 p., 10.2112/06-0787.1
- MAS E. IMAMURA F. ET KOSHIMURA S. (2012a) An agent based model for the tsunami evacuation simulation. A case study of the 2011 great east Japan tsunami in Arahama town, 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering, 1957-1964 p.
- MAS E. KOSHIMURA S. SUPPASRI A. MATSUOKA M. MATSUYAMA M. YOSHII T. JIMENEZ C. YAMAZAKI F. ET IMAMURA F. (2012b): Developing Tsunami fragility curves using remote sensing and survey data of the 2010 Chilean Tsunami in Dichato, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 2689-2697
- MAS E. ADRIANO B. ET KOSHIMURA S. (2013): An integrated simulation of tsunami hazard and human evacuation in La Punta, Peru, *Journal of Disaster Research*, 8, 285-295
- MAS E. KOSHIMURA S. IMAMURA F. SUPPASRI A. MUHARI A. ET ADRIANO B. (2015): Recent Advances in Agent-Based Tsunami Evacuation Simulations: Case Studies in Indonesia, Thailand, Japan and Peru, *Pure and Applied Geophysics*, 1-16 p., 10.1007/s00024-015-1105-y
- MASUDA M. MINAMI K. ET MASUDA K. (2013): A Study on Damage Control of Vessels Moored to the Wharf in Tsunamis (Part 1), *The Journal of Japan Institute of Navigation*, 128, p. 9
- MAYAGUEZZ H. (2015) Exposition humaine, analyse et renforcement des capacités d'évacuation face aux tsunamis à Padang (Indonésie), Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, 271 p.
- MCADOO B. PRATSON L. ET ORANGE D. (2000): Submarine landslide geomorphology, US continental slope, *Marine Geology*, 169, 103-136
- MCCAFFREY R. (2008): Global frequency of magnitude 9 earthquakes, *Geology*, 36, 263-266
- MCCALL G. (1994): Nyssology : A proposal for consideration, *Fournal of the Pacific Society*, 17, 2-3 14
- MCCANN W. R. (2006) Estimating the threat of tsunamogenic earthquakes and earthquake induced-landslide tsunami in the Caribbean, World Scientific Publishing, Singapore
- MCDEM (2008) National Tsunami Signage Technical Standard for the CDEM Sector, Ministry of Civil Defence & Emergency Management, 20 p.
- MCCREERY C. ET KONG L. PTWC New Enhanced Products for Pacific countries : Overview, 2014, 36 p.
- MCNAMARA D. E. VON HILLEBRANDT-ANDRADE C. SAUREL J. M. HUERFANO V. ET LYNCH L. (2015): Quantifying 10 Years of Improved Earthquake-Monitoring Performance in the Caribbean Region, *Seismological Research Letters*
- MEI E. T. W. (2013) Gestion des évacuations lors des crises volcaniques étude de cas du volcan Merapi, Java, Indonésie, Thèse de doctorat, Université Paris 1, 333 p.
- MICALLEF A. ET WILLIAMS A. T. (2004): Application of a novel approach to beach classification in the Maltese Islands, *Ocean & coastal management*, 47, 225-242
- MIKAMI T. MATSUBA S. ET SHIBAYAMA T. (2014): Flow geometry of overflowing tsunamis around coastal dykes, *Coastal Engineering Proceedings*, 1, 15p.
- MIMURA N. YASUHARA K. KAWAGOE S. YOKOKI H. ET KAZAMA S. (2011): Damage from the Great East Japan Earthquake and Tsunami-a quick report, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 16, 803-818pp.
- MIT (2009) Mission 2009: the tsunami threat in the Pacific: saving the world one mission at a time, Massachusetts Institute of Technology 11-32pp. p.
- MMAF - MINISTRY OF AGRICULTURE F. A. F. (2012): The Damage caused by the Great East Japan Earthquake.
- MOLES A. A. (1982): Nissonologie ou science des îles, *Espace géographique*, 11, 281-289

- MORALES-ESTEBAN A. MARTÍNEZ-ÁLVAREZ F. TRONCOSO A. JUSTO J. L. ET RUBIO-ESCUADERO C. (2010): Pattern recognition to forecast seismic time series, *Expert Systems with Applications*, 37, 8333-8342 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2010.05.050>
- MORGAN R. (1999): A novel, user-based rating system for tourist beaches, *Tourism management*, 20, 393-410
- MORI N. TAKAHASHI T. YASUDA T. ET YANAGISAWA H. (2011): Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up, *Geophysical Research Letters*, 38
- MORIN D. GAUTHIER P. ET BERNATCHEZ M. (1976): La théorie des graphes: le cas du réseau routier de l'université Laval, *Cahiers de géographie du Québec*, 20, 551-559
- MORIN E. (1976): Pour une crisologie, *Communications*, 25, 149-163
- MORIN J. (2012) Gestion institutionnelle et réponses des populations face aux crises volcaniques: études de cas à La Réunion et en Grande Comores, Université de la Réunion, 469 p.
- MORTON R. A. RICHMOND B. M. JAFFE B. E. ET GELFENBAUM G. (2006): Reconnaissance investigation of Caribbean extreme wave deposits-preliminary observations, interpretations, and research directions,
- MORTON R. A. GELFENBAUM G. ET JAFFE B. E. (2007): Physical criteria for distinguishing sandy tsunami and storm deposits using modern examples, *Sedimentary Geology*, 200, 184-207
- MOSCARDELLI L. WOOD L. ET MANN P. (2006): Mass-transport complexes and associated processes in the offshore area of Trinidad and Venezuela, *AAPG bulletin*, 90, 1059-1088
- MOSCARDELLI L. ET WOOD L. (2008): New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad, *Basin Research*, 20, 73-98 p., [10.1111/j.1365-2117.2007.00340.x](http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2117.2007.00340.x)
- MOSCARDELLI L. HORNBAACH M. ET WOOD L. (2010) Tsunamigenic Risks Associated with Mass Transport Complexes in Offshore Trinidad and Venezuela, in: *Submarine Mass Movements and Their Consequences*, edited by: Mosher, D., Shipp, R. C., Moscardelli, L., Chaytor, J., Baxter, C. P., Lee, H., and Urgeles, R., *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Springer Netherlands, 733-744
- MOYA J. (1999): Stratigraphical and morphologic evidences of tsunami in northwestern Puerto Rico, Sea Grant College Program, University of Puerto Rico, Mayaguez Campus
- MUHARI A. CHARVET I. TSUYOSHI F. SUPPASRI A. ET IMAMURA F. (2015): Assessment of tsunami hazards in ports and their impact on marine vessels derived from tsunami models and the observed damage data, *Natural Hazards*, 78, 1309-1328
- MURAKAMI H. TAKIMOTO K. ET POMONIS A. Tsunami Evacuation Process and Human Loss Distribution in the 2011 Great East Japan Earthquake-A Case Study of Natori City, Miyagi Prefecture, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 2012p.
- MURARD F. (2014) Évacuation d'agglomération : un enjeu de sécurité publique, CEREMA, 2p.
- MURRAY-TUITE P. ET WOLSHON B. (2013): Evacuation transportation modeling: An overview of research, development, and practice, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 27, 25-45 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2012.11.005>
- MURRU M. CONSOLE R. ET FALCONE G. (2009): Real time earthquake forecasting in Italy, *Tectonophysics*, 470, 214-223 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2008.09.010>
- MURTY T. NIRUPAMA N. NISTOR I. ET HAMDI S. (2005): Why the Atlantic generally cannot generate trans-oceanic tsunamis, *ISETJ. Earthq. Technol*, 42, 227-236
- MUSSON D. (2011) L'optimisation de la gestion du risque tsunami en France : des axes de progrès pour une situation territoriale contrastée, mémoire de Master 2 Gestion des Catastrophes et des Risques Naturels, Université Montpellier 3, Montpellier, 89 p.
- NANAYAMA F. ET SHIGENO K. (2006): Inflow and outflow facies from the 1993 tsunami in southwest Hokkaido, *Sedimentary Geology*, 187, 139-158 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.12.024>
- NGIA (2016) Pub 150, World Port Index National geospatial-intelligence agency, 250 p.
- NIKOLKINA I. ZAHIBO N. ET PELINOVSKY E. (2010): Tsunami in Guadeloupe (Caribbean Sea), *Open Oceanography Journal*, 4, 44-49
- NRC (2007) Tools and Methods for Estimating Populations at Risk from Natural Disasters and Complex Humanitarian Crises, National Research Council, 264 p.
- O'LOUGHLIN K. F. ET LANDER J. F. (2003) Caribbean tsunamis: a 500-year history from 1498-1998, Springer

- OASP (2002) Emergency evacuation of the population in case of an earthquake, European Centre On Prevention And Forecasting Of Earthquakes - Earthquake Planning And Protection Organization, 72 p.
- OFPP (2012) Protection de la population - Dossier Evacuation à grande échelle, Office fédéral de la protection de la population, 36 p.
- OKAL E. (1988): Seismic parameters controlling far-field tsunami amplitudes: A review, *Natural Hazards*, 1, 67-96 p., 10.1007/BF00168222
- OKAL E. ET HARTNADY C. (2009): The South Sandwich Islands earthquake of 27 June 1929: seismological study and inference on tsunami risk for the South Atlantic, *South African Journal of Geology*, 112, 359-370
- OKAL E. A. ET SYNOLAKIS C. E. (2003): A theoretical comparison of tsunamis from dislocations and landslides, *Pure and Applied Geophysics*, 160, 2177-2188
- OKAL E. A. ET SYNOLAKIS C. E. (2004): Source discriminants for near-field tsunamis, *Geophysical Journal International*, 158, 899-912 p., 10.1111/j.1365-246X.2004.02347.x
- OKAL E. A. ET SYNOLAKIS C. E. (2008): Far-field tsunami hazard from mega-thrust earthquakes in the Indian Ocean, *Geophysical Journal International*, 172, 995-1015 p., 10.1111/j.1365-246X.2007.03674.x
- OKUMURA Y. HARADA K. ET KAWATA Y. (2011): Evacuation Behavior in the 29 September 2009 Samoa Islands Region Earthquake Tsunami, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 5, 217-229
- OMIRA R. BAPTISTA M. MELLAS S. ET LEONE F. (2010) The November 1st, 1755 Tsunami in Morocco: Can Numerical Modeling Clarify the Uncertainties of Historical Reports?, *AGU Fall Meeting Abstracts*, 1242 p.
- OMIRA R. ZOURARAH B. LEONE F. CHEREL J. BAPTISTA M. DE RICHEMOND N. M. ET MELLAS S. (2012) The November, 1st, 1755 Tsunami in Morocco: Can Numerical Modeling Clarify the Uncertainties of Historical Reports?, *INTECH Open Access Publisher*
- OMM (2009) Manuel du Système mondial de télécommunications, Organisation météorologique mondiale, 308 p.
- ORFEUIL J.-P. (2004): Introduction de l'ouvrage, *Transports, pauvretés, exclusions. Pouvoir bouger pour s'en sortir*. Editions de l'Aube, 11-25
- OSARAGI T. MORISAWA T. ET OKI T. (2014) Simulation Model of Evacuation Behavior Following a Large-Scale Earthquake that Takes into Account Various Attributes of Residents and Transient Occupants, in: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*, edited by: Weidmann, U., Kirsch, U., and Schreckenberg, M., Springer International Publishing, 469-484
- PAPADOPOULOS G. A. ET IMAMURA F. (2001) A proposal for a new tsunami intensity scale, *ITS 2001 Proceedings*, 569-577 p.
- PARARAS-CARAYANNIS G. (1992): The tsunami generated from the eruption of the volcano of Santorin in the Bronze Age, *Natural Hazards*, 5, 115-123 p., 10.1007/bf00127000
- PARARAS-CARAYANNIS G. (2004): Volcanic tsunami generating source mechanisms in the eastern Caribbean region, *Science of Tsunami Hazards*, 22, 74-114
- PARIS R. TORRADO F. J. P. CARRACEDO J. C. SCHNEIDER J.-L. WASSMER P. CABRERA M. D. C. GUILLOU H. ET GIMENO D (2003): Massive flank failures and tsunamis in the Canary Islands: past, present, future, *Regional Conference of the International Association of Geomorphology, Geomorphic hazards: toward the prevention of disasters*, Mexico City, 27/10-02/11/2003, 132 p.
- PARIS R. (2015): Source mechanisms of volcanic tsunamis, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373, 20 p., 10.1098/rsta.2014.0380
- PARSONS T. ET GEIST E. L. (2009) Tsunami probability in the Caribbean region, in: *Tsunami Science Four Years after the 2004 Indian Ocean Tsunami*, Springer, 2089-2116
- PATTIARATCHI C. B. ET WIJERATNE E. S. (2009) Tide gauge observations of 2004–2007 Indian Ocean tsunamis from Sri Lanka and Western Australia, in: *Tsunami Science Four Years after the 2004 Indian Ocean Tsunami*, Springer, 233-258
- PEDREROS R. TERRIER M. ET POISSON B. (2007): Tsunamis: étude de cas au niveau de la côte antillaise française, *Rapport de synthèse BRGM/RP*, 55795, 77
- PEL A. J. HOOGENDOORN S. P. ET BLIEMER M. C. J. (2010): Evacuation modeling including traveler information and compliance behavior, *Procedia Engineering*, 3, 101-111 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2010.07.011>

- PEL A. J. BLIEMER M. C. ET HOOGENDOORN S. P. (2012): A review on travel behaviour modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations, *Transportation*, 39, 97-123
- PELINOVSKY E. ZAHIBO N. DUNKLEY P. EDMONDS M. HERD R. TALIPOVA T. KOZELKOV A. ET NIKOLKINA I. (2004): Tsunami generated by the volcano eruption on July 12–13, 2003 at Montserrat, Lesser Antilles, *Sci. Tsunami Hazards*, 22, 44-57
- PELLING M. ET UITTO J. I. (2001): Small island developing states: natural disaster vulnerability and global change, *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 3, 49-62 p., [http://dx.doi.org/10.1016/S1464-2867\(01\)00018-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1464-2867(01)00018-3)
- PERAY E. (1991) : *Le chapelier pirate*, Paris, 379p.
- PEREIRA L. C. C. JIMÉNEZ J. A. MEDEIROS C. ET COSTA R. R. M. D. (2003): The influence of the environmental status of Casa Caiada and Rio Doce beaches (NE-Brazil) on beaches users, *Ocean & Coastal Management*, 46, 1011-1030
- PÉREZ-TORRADO F. J. PARIS R. CABRERA M. C. SCHNEIDER J.-L. WASSMER P. CARRACEDO J.-C. RODRÍGUEZ-SANTANA Á. ET SANTANA F. (2006): Tsunami deposits related to flank collapse in oceanic volcanoes: The Agaete Valley evidence, Gran Canaria, Canary Islands, *Marine Geology*, 227, 135-149 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2005.11.008>
- PEROCHE M. (2010) : Caractérisation spatio-temporelle de la vulnérabilité urbaine face au risque de tsunami : le cas d'El Jadida (Maroc), Master 1, Université Montpellier 3, 141 p.
- PHILIP L.-F. L. WOO S.-B. ET CHO Y.-S. (1998): Computer Programs for Tsunami Propagation and Inundation, 104 p.
- PIANC (2009) Mitigation of tsunami disasters in ports, 116 p. p.
- PIGEON P. Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels, *Annales de géographie*, 2002, 452-470 p.
- PIGEON P. (2010): Catastrophes dites naturelles, risques et développement durable: Utilisations géographiques de la courbe de Farmer, *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 10
- PITANA T. ET KOBAYASHI E. (2010): Assessment of ship evacuations in response to pending tsunamis, *Journal of marine science and technology*, 15, pp. 242-256
- POFFA N. ENET S. ET KERINEC J.-C. (2010): Évolution instrumentale des marégraphes du réseau RONIM, 13
- POISSON B. ET PEDREROS R. (2007) Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte antillaise française - Modélisation numérique, BRGM, 111 p. POISSON B. ET PEDREROS R. (2010): Numerical modelling of historical landslide-generated tsunamis in the French Lesser Antilles, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1281-1292 p., 10.5194/nhess-10-1281-2010
- POLET J. ET KANAMORI H. (2000): Shallow subduction zone earthquakes and their tsunamigenic potential, *Geophysical Journal International*, 142, 684-702
- PORTAL T. ROUX-DUFORT C. ET RAMBOATIANA S. (2009) II-Pendant la crise, in: *Crises et facteur humain*, De Boeck Supérieur, 81-148
- POST J. WEGSCHEIDER S. MUECK M. ZOSSEDER K. KIEFL R. STEINMETZ T. ET STRUNZ G. (2009): Assessment of human immediate response capability related to tsunami threats in Indonesia at a sub-national scale, *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 9
- POUVREAU N. (2008) Three hundred years of Sea-Level Measurement in France: tools, methods and trends of the components of sea level at the port of Brest, Université de La Rochelle
- PROENZA X. W. ET MAUL G. A. (2010): Tsunami hazard and total risk in the Caribbean basin, *Science of Tsunami Hazards*, pp. 70 - 77
- PROPECK-ZIMMERMANN E. (2003): l'inscription des risques dans l'Espace: difficultés d'appréhension et de représentation - l'exemple des risques industriels, *Les risques*, 157-172
- PROVITOLLO D. ET REGHEZZA-ZITT M. (2015): Résilience et vulnérabilité: de l'opposition au continuum, *Résilience-sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes*
- PTWC (2015) User's Guide - Pacific Tsunami Warning Center Enhanced Products for the CARIBE-EWS 62 p. p.

- PUMAIN D. ET ROBIC M.-C. (2002): Le rôle des mathématiques dans une « révolution » théorique et quantitative : la géographie française depuis les années 1970, *Revue d'Histoire des Sciences Humaines*, 6, 123 p., 10.3917/rhsh.006.0123
- PÜNDRICH A. P. BRUNEL O. ET BARIN-CRUZ L. (2009): Les dimensions des crises: analyse de deux études de cas sous les approches processuelle et événementielle, *Revue internationale d'intelligence économique*, 1, 213-235
- QUENAULT B. (2015): De Hyōgo à Sendai, la résilience comme impératif d'adaptation aux risques de catastrophe: nouvelle valeur universelle ou gouvernement par la catastrophe?, *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, 6
- QUINQUENEL H. (2013) Optimisation d'itinéraire dans les espaces ouverts : application du SIG à la course d'orientation, IGN\ENSG\DCAIG, 24 p.
- RACINE J. B. (1974): Modèles de recherche et modèles théoriques en géographie, *Bulletin de l'Association de géographes français*, 51-66
- RAILLARD J.-P. ET BERGUA F. (2015) Le coût de possession et d'usage d'une automobile - Comparatif entre la Martinique et la Métropole - Rapport final, Syndex, 40 p.
- RASTOGI B. ET JAISWAL R. (2006): A catalog of tsunamis in the Indian Ocean, *Science of Tsunami Hazards*, 25, 16
- REGHEZZA M. (2006): La vulnérabilité: un concept problématique, *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques, Géorisques*, 35-40
- REINHARDT E. G. PILARCZYK J. ET BROWN A. (2012): Probable tsunami origin for a shell and sand sheet from marine ponds on Anegada, British Virgin Islands, *Natural hazards*, 63, 101-117
- REVI A. ET SINGH A. K. (2007) Cyclone and storm surge, pedestrian evacuation and emergency response in India, in: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*, Springer, 119-130
- RHOADES D. A. (2007): Application of the EEPAS model to forecasting earthquakes of moderate magnitude in southern California, *Seismological Research Letters*, 78, 110-115
- ROBERT J. (2012) Pour une géographie de la gestion de crise: de l'accessibilité aux soins d'urgence à la vulnérabilité du territoire à Lima, Université Grenoble Alpes, 556 p.
- ROBERT S. SILLERE G. ET LIZIARD S. (2008): Évaluer et représenter le nombre d'usagers sur une plage urbaine (Les Ponchettes, Nice), *Mappemonde*
- ROCA E. RIERA C. VILLARES M. FRAGELL R. ET JUNYENT R. (2008): A combined assessment of beach occupancy and public perceptions of beach quality: a case study in the Costa Brava, Spain, *Ocean & Coastal Management*, 51, 839-846
- ROCA E. VILLARES M. ET ORTEGO M. (2009): Assessing public perceptions on beach quality according to beach users' profile: A case study in the Costa Brava (Spain), *Tourism Management*, 30, 598-607
- ROGER J. ALLGEYER S. HÉBERT H. BAPTISTA M. LOEVENBRUCK A. ET SCHINDELÉ F. (2010): The 1755 Lisbon tsunami in Guadeloupe Archipelago: source sensitivity and investigation of resonance effects, *Open Oceanography Journal*, 4, 58-70
- ROGER J. (2011) Tsunamis générés par des séismes au niveau de la zone de collision entre les plaques africaine et eurasiennne: Etudes de cas pour l'évaluation du risque tsunami en Méditerranée occidentale et Atlantique nord, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI
- ROGER J. BAPTISTA M. SAHAL A. ACCARY F. ALLGEYER S. ET HÉBERT H. (2011): The transoceanic 1755 Lisbon tsunami in Martinique, *Pure and Applied Geophysics*, 168, 1015-1031
- ROLL H. U. (1979) Au cœur de la recherche océanique - La commissions océanographique intergouvernementale Historique, fonctions et réalisations, UNESCO, France, 68 p.
- ROSENTHAL U. CHARLES M. T. ET HART P. T. (1989) Coping with crises: The management of disasters, riots, and terrorism, Charles C Thomas Pub Ltd
- ROUX-DUFORT C. (2010): La vulnérabilité organisationnelle à la loupe: entre fragilité et ignorance, *Télescope*, 16, 1-21
- RUIN I. (2007) Conduite à contre-courant. Les pratiques de mobilité dans le Gard: facteur de vulnérabilité aux crues rapides, Université Joseph-Fourier-Grenoble I

- SAHAL A. ROGER J. ALLGEYER S. LEMAIRE B. HÉBERT H. SCHINDELÉ F. ET LAVIGNE F. (2009): The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdes-Zemmouri (Algeria) earthquake: field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modelling, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1823-1834
- SAHAL A. ET LEMAHIEU A. (2010): The 1979 nice airport tsunami: mapping of the flood in Antibes, *Natural Hazards*, 56, 833-840 p., 10.1007/s11069-010-9594-6
- SAHAL A. (2011) *Le risque tsunami en France: contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque*, Université Panthéon-Sorbonne-Paris I
- SAHAL A. LEONE F. ET PÉROCHE M. (2013): Complementary methods to plan pedestrian evacuation of the French Riviera's beaches in case of tsunami threat: graph- and multi-agent-based modelling, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1735-1743 p., 10.5194/nhess-13-1735-2013
- SAKAI T. TAKEDA T. SORAOKA H. YANAGISAWA K. ET ANNAKA T. (2006): Development of a probabilistic tsunami hazard analysis in Japan, *14th International Conference on Nuclear Engineering*, , 69-75 p.
- SAKAKIBARA S. ABE I. TSUGANE M. ET KUBO M. (2013): A Study on Emergency Ship Handling Against Tsunami for Moored Vessel in Harbor Basin by Intentional Ship Grounding, *The Journal of Japan Institute of Navigation*, 128
- SALAMON A. ROCKWELL T. WARD S. N. GUIDOBONI E. ET COMASTRI A. (2007): Tsunami hazard evaluation of the eastern Mediterranean: historical analysis and selected modeling, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 705-724
- SAMUEL W. (1996): The contribution of remittances to social and economic development in the Caribbean, *Eastern Caribbean Central Bank (ECCB)*
- SANDERS L. (2001) *Modèles en analyse spatiale introduction*, in: *Modèles en analyse spatiale*, edited by: Sanders, L., *Information Géographique et Aménagement du Territoire*, Hermes-Lavoisier, 17-29
- SANDERS L. (2006): Les modèles agent en géographie urbaine, *Modélisation et simulation multi-agents; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, 151-168
- SATAKE K. BOURGEOIS J. ABE K. ABE K. TSUJI Y. IMAMURA F. LIO Y. KATAO H. NOGUERA E. ET ESTRADA F. (1993): Tsunami field survey of the 1992 Nicaragua earthquake, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 74, 145-157 p., 10.1029/93EO00271
- SATAKE K. (1994): Mechanism of the 1992 Nicaragua Tsunami Earthquake, *Geophysical Research Letters*, 21, 2519-2522 p., 10.1029/94GL02338
- SATAKE K. (2012): Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for Nuclear Power Plants in Japan, *AGU Fall Meeting Abstracts*, , 03 p.
- SAUNDERS W. S. A. PRASETYA G. ET LEONARD G. S. (2011) *New Zealand's Next Top Model: Integrating tsunami inundation modelling into land use planning*, 42 p.
- SCHEER S. GARDI A. GUILLANDE R. EFTICHIDIS G. VARELA V. DE VANSSAY B. ET COLBEAU-JUSTIN L. (2011): *Handbook of tsunami evacuation planning - SCHEMA (Scenarios for Hazard-induced Emergencies Management)*, project n° 030963, 54p.
- SCHEER S. J. VARELA V. ET EFTYCHIDIS G. (2012): A generic framework for tsunami evacuation planning, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 49, 79-91
- SCHEFFERS A. (2002): Paleotsunamis in the Caribbean: Field evidences and datings from Aruba, Curaçao and Bonaire, *Essener Geographische Arbeiten*, 33, 181
- SCHEFFERS A. ET KELLETAT D. (2003): Sedimentologic and geomorphologic tsunami imprints worldwide—a review, *Earth-Science Reviews*, 63, 83-92
- SCHEFFERS A. SCHEFFERS S. ET KELLETAT D. (2005): Paleo-Tsunami Relics on the Southern and Central Antillean Island Arc, *Journal of Coastal Research*, 263-273 p., doi:10.2112/03-0144.1
- SCHEFFERS A. ET KELLETAT D. (2006): New evidence and datings of Holocene paleo-tsunami events in the Caribbean (Barbados, St. Martin and Anguilla), *Caribbean Tsunami Hazard: Singapore*, World Scientific Publishing, 178-202
- SCHINDELE F. (2008): La participation de la France dans la mise en place du réseau de surveillance du niveau de la mer en Méditerranée occidentale et dans l'Atlantique Nord-Est, *La lettre de RONIM n°6*, 4-5

- SDMG (2011) Queensland Evacuation Guidelines for Disaster Management Groups, State Disaster Management Group, 54p. p.
- SGDS (2014) Instruction générale interministérielle relative à la sécurité des activités d'importance vitale, Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale, 71 p.
- SHEN Z.-K. JACKSON D. D. ET KAGAN Y. Y. (2007): Implications of geodetic strain rate for future earthquakes, with a five-year forecast of M5 earthquakes in southern California, *Seismological Research Letters*, 78, 116-120
- SHIBAYAMA T. ESTEBAN M. NISTOR I. TAKAGI H. THAO N. D. MATSUMARU R. MIKAMI T. ARANGUIZ R. JAYARATNE R. ET OHIRA K. (2013): Classification of tsunami and evacuation areas, *Natural hazards*, 67, 365-386
- SHIOTANI S. ET MAKINO H. Analysis of ship evacuation in tsunami using ais data, *Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, Tokyo, Japan, 2012, 8 p.
- SHUTO N. (1987): Changing of tsunami disasters, *Tsunami Engineering Technical Rep*, 4, 1-41
- SHUTO N. (1993) *Tsunami intensity and disasters*, Springer
- SHUTO N. ET FUJIMA K. (2009): A short history of tsunami research and countermeasures in Japan, *Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and Biological Sciences*, 85, 267-275pp.
- SIEBERG A. H. ET GUTENBERG B. (1923) *Geologische, physikalische und angewandte Erdbebenkunde*, von August Sieberg... mit beiträgen von dr. Beno Gutenberg... mit 178 Textabbildungen, einer farbigen seismisch-tektonischen weltkarte und einem anhang von 17 hilfstabeln für die angewandte erdbebenforschung, Fischer
- SLADEN A. HEBERT H. SCHINDELE F. ET REYMOND D. (2007): L'aléa tsunami en Polynésie française : apports de la simulation numérique, *Comptes Rendus Geoscience*, 339, 303-316 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2007.03.001>
- SLEETER R. ET WOOD N. Estimating daytime and nighttime population density for coastal communities in Oregon, 44th Urban and Regional Information Systems Association Annual Conference, British Columbia, 2006p.
- SOES (2012) Méthodes d'estimation de population et de logements en zone inondable, Commissariat général au développement durable – Service de l'observation et des statistiques, 23 p. p.
- SOLARES J. M. ET ARROYO A. L. (2004): The great historical 1755 earthquake. Effects and damage in Spain, *Journal of Seismology*, 8, 275-294
- SOLOVIEV S. (1970): Recurrence of tsunamis in the Pacific, *Tsunamis in the Pacific Ocean*, 149-163
- SOLTANI A. ARDALAN A. BOLOORANI A. D. HAGHDOOST A. ET HOSSEINZADEH-ATTAR M. J. (2014): Site selection criteria for sheltering after earthquakes: a systematic review, *PLOS Currents Disasters*
- SORENSEN J. H. (1991): When shall we leave? Factors affecting the timing of evacuation departures, *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 9, 153-165
- SORENSEN J. H. ET SORENSEN B. V. (2007) Community processes: warning and evacuation, in: *Handbook of disaster research*, Springer, 183-199
- SORENSEN M. SPADA M. BABEYKO A. WIEMER S. ET GRÜNTAL G. (2011): Probabilistic Tsunami Hazard Assessment in the Mediterranean Sea, *AGU Fall Meeting Abstracts*, 04 p.
- SPARKS R. (2003): Forecasting volcanic eruptions, *Earth and Planetary Science Letters*, 210, 1-15
- SPIske M. ET HALLEY R. (2014): A coral-rubble ridge as evidence for hurricane overwash, Anegada (British Virgin Islands), *Advances in Geosciences*, 38, 9-20
- SRIVICHAI M. CHIDTONG Y. SUPRATID S. ET SHUTO N. The 2004 Sumatra tsunami: Deaths and damages to buildings at the Kamala beach, Phuket, Thailand, *SCIENTIFIC FORUM ON THE TSUNAMI, ITS IMPACT AND RECOVERY*, 2005, 60 p.
- SUGIMOTO T. MURAKAMI H. KOZUKI Y. NISHIKAWA K. ET SHIMADA T. (2003): A human damage prediction method for tsunami disasters incorporating evacuation activities, *Natural Hazards*, 29, 587-602
- SUPPASRI A. KOSHIMURA S. ET IMAMURA F. (2011): Developing tsunami fragility curves based on the satellite remote sensing and the numerical modeling of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 173-189
- SUPPASRI A. CHARVET I. IMAI K. ET IMAMURA F. (2013a): Fragility curves based on data from the 2011 Great East Japan tsunami in Ishinomaki city with discussion of parameters influencing building damage, *Earthq Spectra*. doi, 10, 1193

- SUPPASRI A. MAS E. CHARVET I. GUNASEKERA R. IMAI K. FUKUTANI Y. ABE Y. ET IMAMURA F. (2013b): Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami, *Natural Hazards*, 66, 319-341
- SUPPASRI A. MUHARI A. FUTAMI T. IMAMURA F. ET SHUTO N. (2013c): Loss functions for small marine vessels based on survey data and numerical simulation of the 2011 Great East Japan tsunami, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 10 p.
- SUWA Y. ET KATO F. (2006): Decision Making on Evacuation from the Tsunami Following the Earthquake off Kuril Islands in 2006, 10
- SUZUKI T. ET IMAMURA F. (2005): Simulation model of the evacuation from a tsunami in consideration of the resident consciousness and behavior, *Journal of Japan Society for Natural Disaster Science*, 23, 521-538
- SYNOLAKIS C. E. (1995): Tsunami prediction, *Science (New York, NY)*, 270, 15c
- TAGLIONI F. (2003) Les petits espaces insulaires et leurs organisations régionales, *Université Paris-Sorbonne-Paris IV*
- TAGLIONI F. Les petits espaces insulaires face à la variabilité de leur insularité et de leur statut politique, *Annales de géographie*, 2006, 664-687 p.
- TAKAHASHI S. TODA K. KIKUCHI Y. SUGANO T. KURIYAMA Y. YAMAZAKI H. NAGAO T. SHIMOSAKO K.-I. NEGI T. ET SUGENO J. (2011): Urgent survey for 2011 Great East Japan Earthquake and tsunami disaster in ports and coasts, *Technical note of the port and airport research institute*, 1231, 31-44
- TAKASHIMA K. ET TSUGANE M. (2013): A Study on Traffic Control for Emergency Evacuation, *The Journal of Japan Institute of Navigation*, 128
- TAYLOR M. A. P. ET FREEMAN S. K. (2010): A review of planning and operational models used for emergency evacuation situations in Australia, *Procedia Engineering*, 3, 3-14 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2010.07.003>
- TEN BRINK U. GEIST E. LYNETT P. J. ET ANDREWS B. D. (2006a): Submarine slides north of Puerto-Rico and them tsunami potential, *Caribbean Tsunami Hazard*, 67
- TEN BRINK U. TWICHELL D. GEIST E. CHAYTOR J. LOCAT J. LEE H. BUCZKOWSKI B. BARKAN R. SOLOW A. ET ANDREWS B. (2008): Evaluation of tsunami sources with the potential to impact the US Atlantic and Gulf coasts, *USGS Administrative report to the US Nuclear Regulatory Commission*
- TEN BRINK U. TWICHELL D. LYNETT P. GEIST E. CHAYTOR J. LEE H. BUCZKOWSKI B. ET FLORES C. (2009): Regional assessment of tsunami potential in the Gulf of Mexico, *US Geol. Surv. Admin. Rep*
- TEN BRINK U. S. GEIST E. L. ET ANDREWS B. D. (2006b): Size distribution of submarine landslides and its implication to tsunami hazard in Puerto Rico, *Geophysical Research Letters*, 33, L11307 p., 10.1029/2006GL026125
- TEN BRINK U. S. BAKUN W. H. ET FLORES C. H. (2011): Historical perspective on seismic hazard to Hispaniola and the northeast Caribbean region, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 116
- TERRIER M. C. B.-D.-B., S. (2007) Réalisation d'un zonage sismique de la plaque caraïbe préalable aux choix de scénarios de tsunamis aux Antilles françaises BRGM, 77p. p.
- THOURET J.-C. (2002): Aléas et risques volcaniques : mieux comprendre pour prévoir et mieux gérer pour durer, *Annales de Géographie*, 503-523
- TIAMPO K. F. ET SHCHERBAKOV R. (2012): Seismicity-based earthquake forecasting techniques: Ten years of progress, *Tectonophysics*, 522–523, 89-121 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2011.08.019>
- TINTI S. ET MARAMAI A. (1996): Catalogue of tsunamis generated in Italy and in Côte d'Azur, France: a step towards a unified catalogue of tsunamis in Europe, *Annals of Geophysics*, 39
- TINTI S. MARAMAI A. ET GRAZIANI L. (2001): A new version of the European tsunami catalogue: updating and revision, *Natural Hazards and Earth System Science*, 1, 255-262
- TINTI S. MARAMAI A. ET GRAZIANI L. (2004): The new catalogue of Italian tsunamis, *Natural Hazards*, 33, 439-465
- TINTI S. MARAMAI A. ARMIGLIATO A. GRAZIANI L. MANUCCI A. PAGNONI G. ET ZANIBONI F. (2006): Observations of physical effects from tsunamis of December 30, 2002 at Stromboli volcano, southern Italy, *Bulletin of Volcanology*, 68, 450-461 p., 10.1007/s00445-005-0021-x
- TINTI S. C. (2009) An examination of non-seismic sources of tsunamis and their impacts on European coastlines

- TITOV V. V. ET GONZALEZ F. (1997) Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model, US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Pacific Marine Environmental Laboratory
- TOYAMA M. S., J. (2012) Measuring the Cost-effectiveness of Various DRM Measures, The World Bank Institute, 13p.
- TSUBOTA Y. MIYAKE K. ET SAITO M. (2007): Tension in a mooring rope of fishing boat under the influence of tsunami, Research Rep, 19, 69-75
- TSUTSUMI A. SHIMAMOTO T. KAWAMOTO E. ET LOGAN J. M. (2000): Nearshore flow velocity of Southwest Hokkaido earthquake tsunami, Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 126, 136-143
- TU H. TAMMINGA G. DROLENGA H. DE WIT J. ET VAN DER BERG W. (2010): Evacuation plan of the city of almere: simulating the impact of driving behavior on evacuation clearance time, Procedia Engineering, 3, 67-75
- TURNER B. A. (1976): The organizational and interorganizational development of disasters, Administrative Science Quarterly, 378-397
- UNISDR (2009): UNISDR Terminologie pour la Prévention des risques de catastrophe, 39
- UNDP (2014) Human Development Report 2014 - Sustaining Human Progress: Reducing Vulnerabilities and Building Resilience, United Nations Development Programme, 239 p. p.
- UNISDR (2015) Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015, 316 p. p.
- UTASSE M. (2015) Les réseaux de transport routiers face aux laves torrentielles, contribution à l'évaluation du risque : l'exemple des Alpes françaises, Thèse de doctorat, Université Paris 1
- VALE L. J. ET CAMPANELLA T. J. (2005) The resilient city: How modern cities recover from disaster, Oxford University Press
- VALENTIN J. COUDRET F. GOUARDERES E. ET LEFER W. (2011): Modélisation du comportement humain pour la simulation d'évacuation de bâtiment en feu, Revue Electronique Francophone d'Informatique Graphique (REFIG), 5, 41-51
- VANACORE E. VON HILLEBRANDT-ANDRADE C. HINCAPIE-CARDENAS C. ET REYES C. CARIBE WAVE 2016 ICG/CARIBE-EWS Tsunami Exercise, April 5-7, 2016, Carthagène (Colombie), 2016, 55 p.
- VERGE-DEPRE C. R. (2006): Les nouvelles hiérarchies du système portuaire dans le Bassin Caraïbe, Études caribéennes
- VERGE-DEPRE C. R. (2012): Les enjeux territoriaux du TCSP de la Martinique, Revue Géographique de l'Est, 52
- VEYRET-MEKDJIAN Y. (2001): Géographie des risques naturels, Paris : La Documentation française, La Documentation photographique, 63 p.
- VICTOR N. ET KLEIN O. (2011) Modélisation et visualisation de l'accessibilité piétonne à Luxembourg-Ville, SIG 2011 Conférence francophone ESRI, Versailles
- VIGNES C. RIMBOURG S. RUIZ-GAZEN A. ET THOMAS-AGNAN C. (2013) Fiches méthodologiques, méthodes statistiques d'allocation spatiale: interpolation de données surfaciques, Toulouse School of Economics (TSE), 74 p.
- VINET F. (2007) Approche institutionnelle et contraintes locales de la gestion du risque Recherches sur le risque inondation en Languedoc-Roussillon, Université Paul Valéry-Montpellier III
- VON HILLEBRANDT-ANDRADE C. (2013): Minimizing Caribbean tsunami risk, Science, 341, 966-968
- WALD D. JAISWAL K. MARANO K. EARLE P. ET ALLEN T. (2011) Advancements in casualty modelling facilitated by the USGS prompt assessment of global earthquakes for response (PAGER) system, in: Human Casualties in Earthquakes, Springer, 221-230
- WALLE M.-L. (2009) La police des établissements recevant du public, 106 pp.
- WALTON D. SUNSERI S. ET LAND TRANSPORT N. (2007) Impediments to walking as a mode choice, Land Transport New Zealand
- WANATABE H. (1983) Revised table of tsunamis occurring in and near Japan, 83 - 107 p.
- WANG H. MOSTAFIZI A. CRAMER L. A. COX D. ET PARK H. (2016): An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 64, 86-100

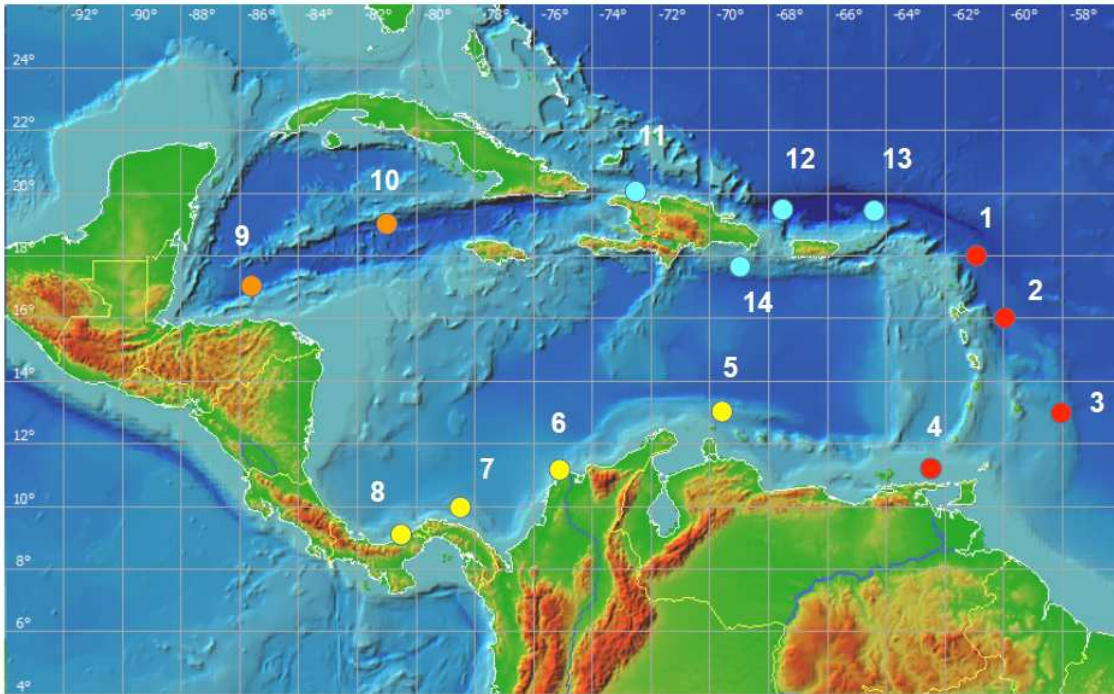
- WARD S. N. ET ASPHAUG E. (2000): Asteroid impact tsunami: a probabilistic hazard assessment, *Icarus*, 145, 64-78
- WARD S. N. ET DAY S. (2001): Cumbre Vieja Volcano—Potential collapse and tsunami at La Palma, Canary Islands, *Geophysical Research Letters*, 28, 3397-3400 p., 10.1029/2001GL013110
- WARD S. N. (2007): Methods for evaluating earthquake potential and likelihood in and around California, *Seismological Research Letters*, 78, 121-133
- WEISSERT T. P. (1990): Tsunami travel time charts for the Caribbean, *Tsunami Hazards*, 67 p.
- WILSON R. I. ADMIRE A. R. BORRERO J. C. DENGLER L. A. LEGG M. R. LYNETT P. MCCRINK T. P. MILLER K. M. RITCHIE A. ET STERLING K. (2013): Observations and impacts from the 2010 Chilean and 2011 Japanese tsunamis in California (USA), *Pure and Applied Geophysics*, 170, 1127-1147
- WILSON R. ET MILLER K. (2014): Tsunami Emergency Response Playbooks and FASTER Tsunami Height Calculation: Background Information and Guidance for Use, *California Geological Survey Special Report*, 236 p.
- WILSON R. LYNETT P. MILLER K. ADMIRE A. AYCA A. CURTIS E. DENGLER L. HORNICK M. NICOLINI T. ET PETERSON D. (2016) *Maritime Tsunami Response Playbooks: Background Information and Guidance for Response and Hazard Mitigation Use*, 48 p.
- WIRASINGHE S. CALDERA H. DURAGE S. ET RUWANPURA J. Preliminary analysis and classification of natural disasters, *Proceedings of the ninth annual conference of the International Institute for Infrastructure, Renewal and Reconstruction*, 2013 p.
- WISNER B. WESTGATE K. ET OKEEFE P. (1976): Poverty and disaster, *New Society*, 37, 546-548
- WISNER B. BLAIKIE P. CANNON T. ET DAVIS I. (2004): *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and disasters*, 134 p.
- WISNER B. GAILLARD J. C. ET KELMAN I. (2012) *Handbook of hazards and disaster risk reduction and management*, Routledge
- WIŚNIEWSKI B. ET WOLSKI T. (2012): The safety of the shipping and ports in the aspect of the tsunami events, *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie*, pp. 150-157
- WOLSHON B. ET MCARDLE B. (2009): Temporospatial analysis of Hurricane Katrina regional evacuation traffic patterns, *Journal of Infrastructure Systems*, 15, 12-20
- WONG A. (2015): *Caribbean Island Tourism: Pathway to Continued Colonial Servitude*, *Études caribéennes*
- WOOD N. ET SCHMIDTLEIN M. (2012): Anisotropic path modeling to assess pedestrian-evacuation potential from Cascadia-related tsunamis in the US Pacific Northwest, *Natural Hazards*, 62, 275-300 p., 10.1007/s11069-011-9994-2
- WOOD N. JONES J. SCHELLING J. ET SCHMIDTLEIN M. (2014): Tsunami vertical-evacuation planning in the U.S. Pacific Northwest as a geospatial, multi-criteria decision problem, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 9, 68-83 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2014.04.009>
- WORLD BANK (2012) *Learning from megadisaster - CLUSTER 2: Nonstructural Measures - Evacuation - KNOWLEDGE NOTE 2-6* 16 p.
- WTTC (2015): *Travel & Tourism Economic impact 2015 - Caribbean*, 24
- WU H.-C. LINDELL M. K. ET PRATER C. S. (2012): Logistics of hurricane evacuation in Hurricanes Katrina and Rita, *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 15, 445-461
- WÜNNEMANN K. ET WEISS R. (2015): The meteorite impact-induced tsunami hazard, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 373, 20140381
- XU W. OKADA N. HATAYAMA M. ET TAKEUCHI Y. (2008): A Model Analysis Approach for Reassessment of the Public Shelter Plan Focusing both on Accessibility and Accommodation Capacity for Residents-Case Study of Nagata Ward in Kobe City, Japan, *Journal of Natural Disaster Science*, 28, 85-90
- YAGYU T. (2011): Thank you very much for your messages of sympathy regarding the Great East Japan earthquake of March 11, 2011- a message from the secretary of PIANC Japan. *Sailing ahead (PIANC E-Newsletter)*, 8, *Sailing Ahead (PIANC E-Newsletter)*, 8
- YALÇINER A. C. PELINOVSKY E. N. OKAL E. ET SYNOLAKIS C. E. (2003) *Submarine landslides and tsunamis*, Springer

- YALÇINER A. PELINOVSKY E. TALIPOVA T. KURKIN A. KOZELKOV A. ET ZAITSEV A. (2004): Tsunamis in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental, and numerical data, *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 109
- YUN N.-Y. ET HAMADA M. A comparative study on human impacts caused by the 2011 Great East Japan earthquake and disaster mitigation, *International Symposium on Engineering Lessons Learned from the, 2011p.*
- ZACARIAS D. A. WILLIAMS A. T. ET NEWTON A. (2011): Recreation carrying capacity estimations to support beach management at Praia de Faro, Portugal, *Applied Geography*, 31, 1075-1081
- ZAHIBO N. ET PELINOVSKY E. (2001): Evaluation of tsunami risk in the Lesser Antilles, *Natural Hazards and Earth System Science*, 1, 221-231
- ZAHIBO N. PELINOVSKY E. KURKIN A. ET KOZELKOV A. (2003a): Estimation of far-field tsunami potential for the Caribbean Coast based on numerical simulation, *Science of Tsunami Hazards*, 21, 202-222
- ZAHIBO N. PELINOVSKY E. YALÇINER A. KURKIN A. KOZELKOV A. ET ZAITSEV A. (2003b): The 1867 Virgin Island Tsunami, *Natural Hazards and Earth System Science*, 3, 367-376
- ZAHIBO N. PELINOVSKY E. OKAL E. YALÇINER A. KHARIF C. TALIPOVA T. ET KOZELKOV A. (2005): The earthquake and tsunami of November 21, 2004 at Les Saintes, Guadeloupe, Lesser Antilles, *Science of Tsunami Hazards*, 23, 25
- ZEGEER C. V. (2002) *Pedestrian facilities users guide providing safety and mobility*, FHWA-RD-01-102, 162p.

Annexes



Annexe 1. Cartes de l'amplitude maximale des ondes de tsunami modélisée par le PTWC (modèle RIFT) pour 18 sources potentielles

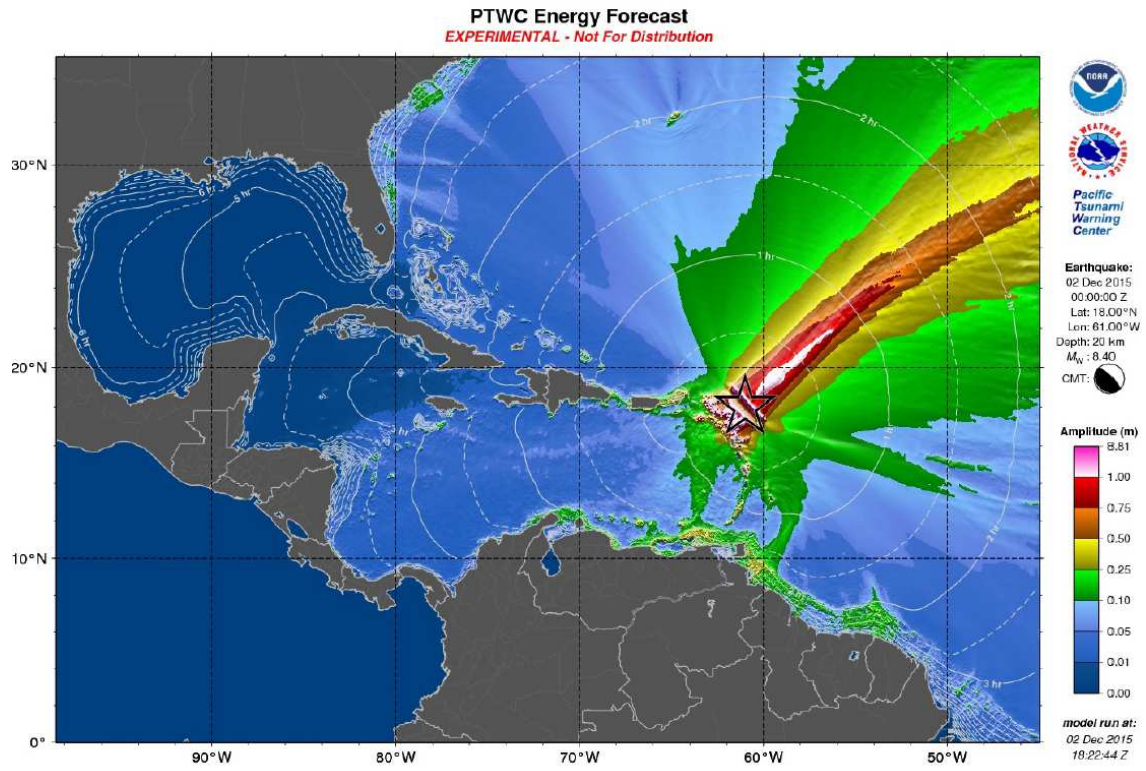


RIFT MODEL REGIONAL TSUNAMI SCENARIOS (M8.4)

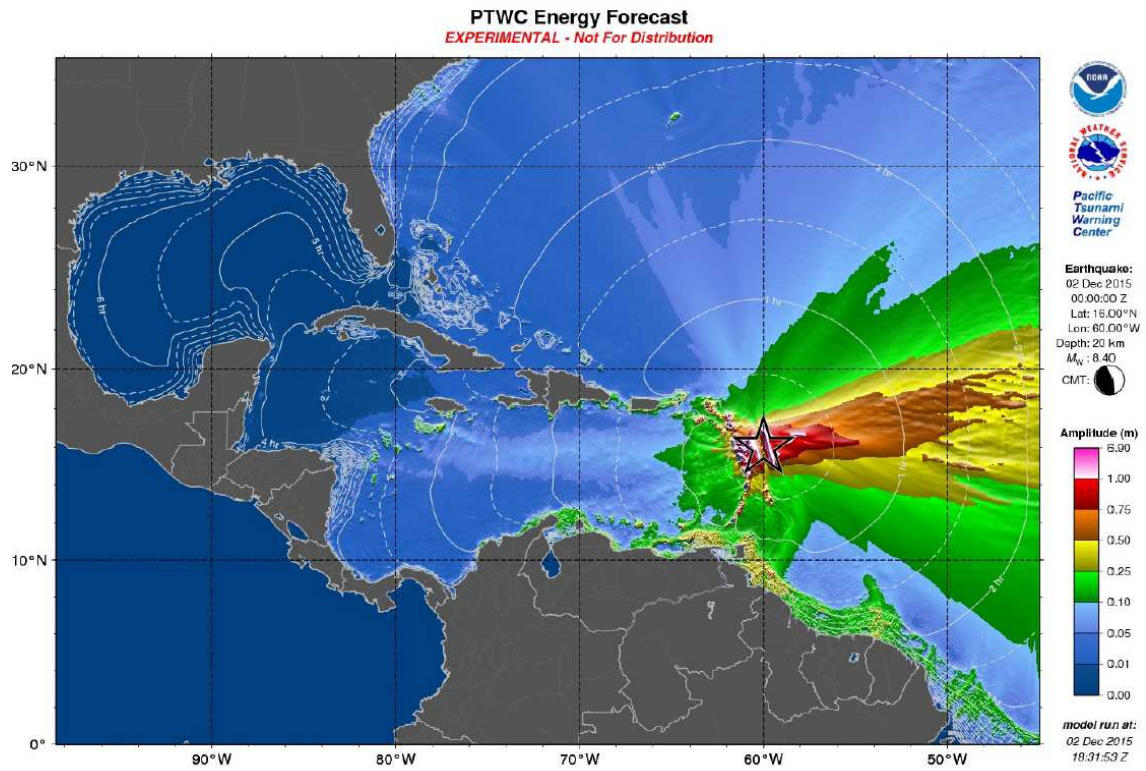


**RIFT MODEL
DISTANT TSUNAMI
SCENARIOS**

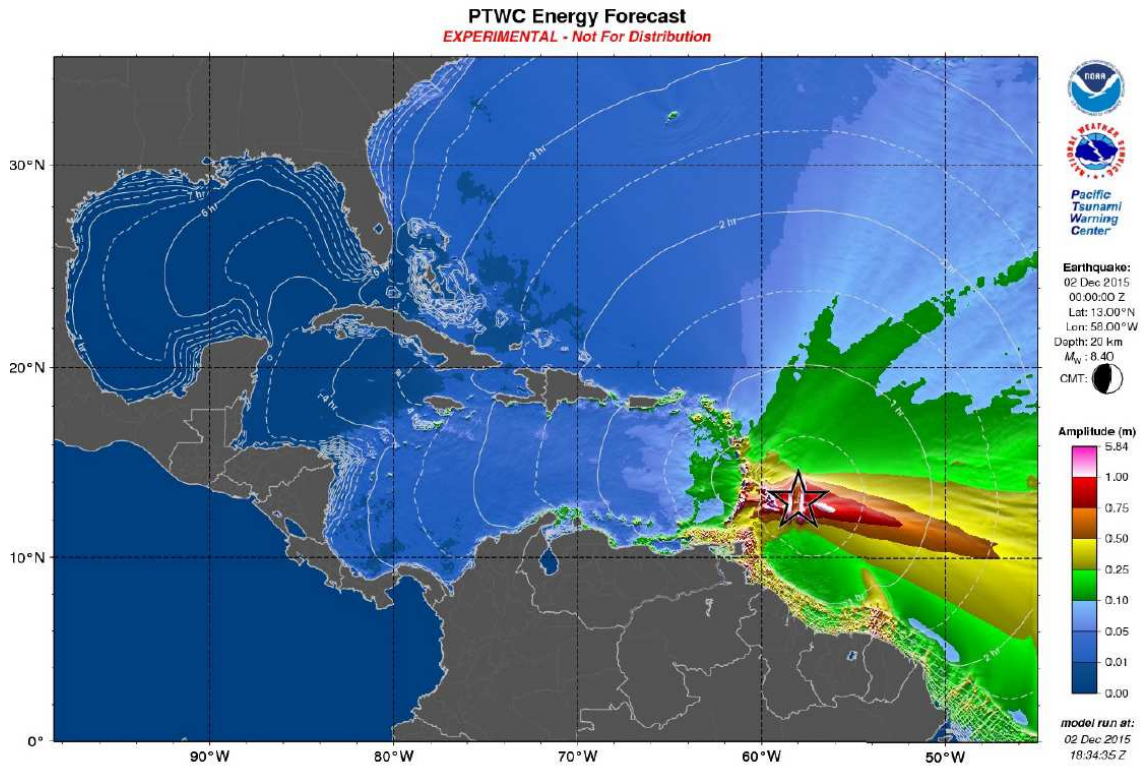
Scénario 1



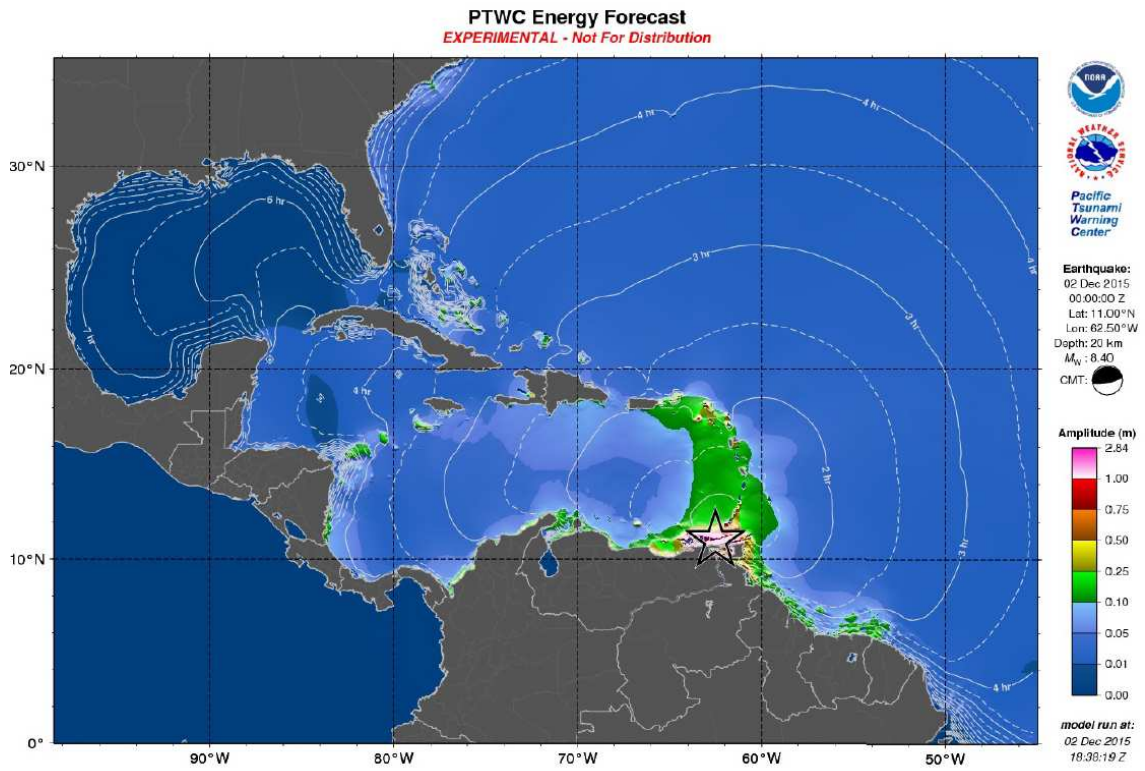
Scénario 2



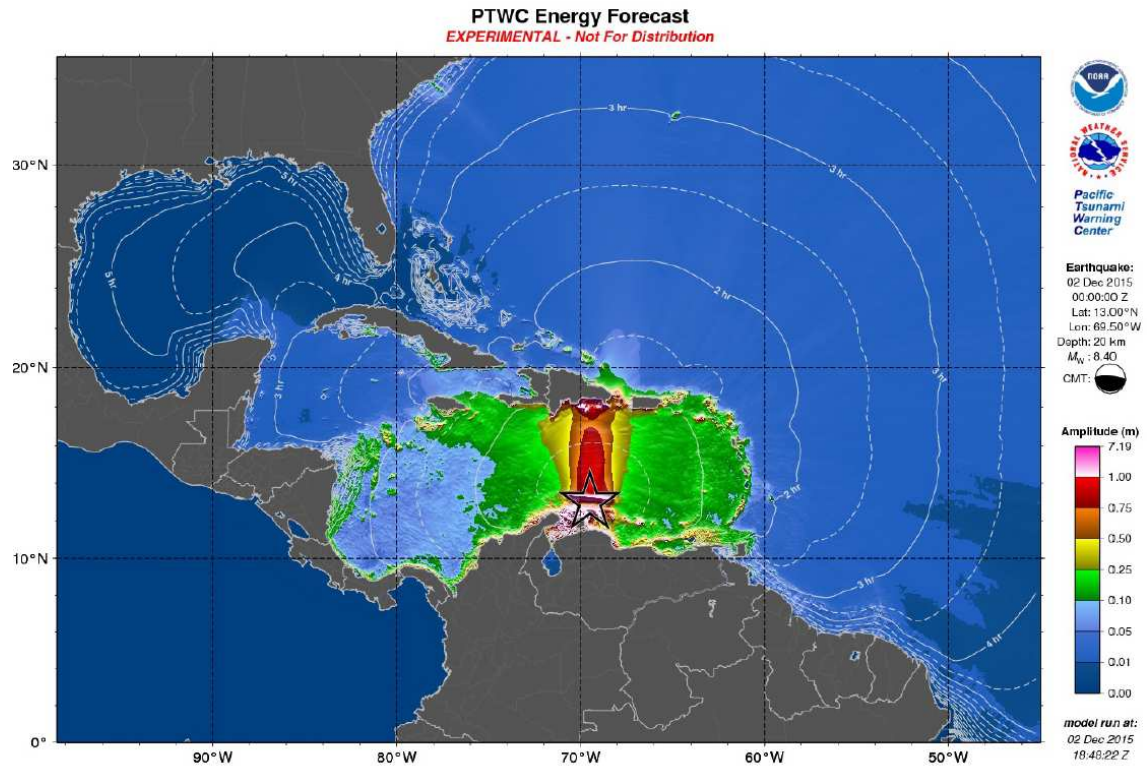
Scénario 3



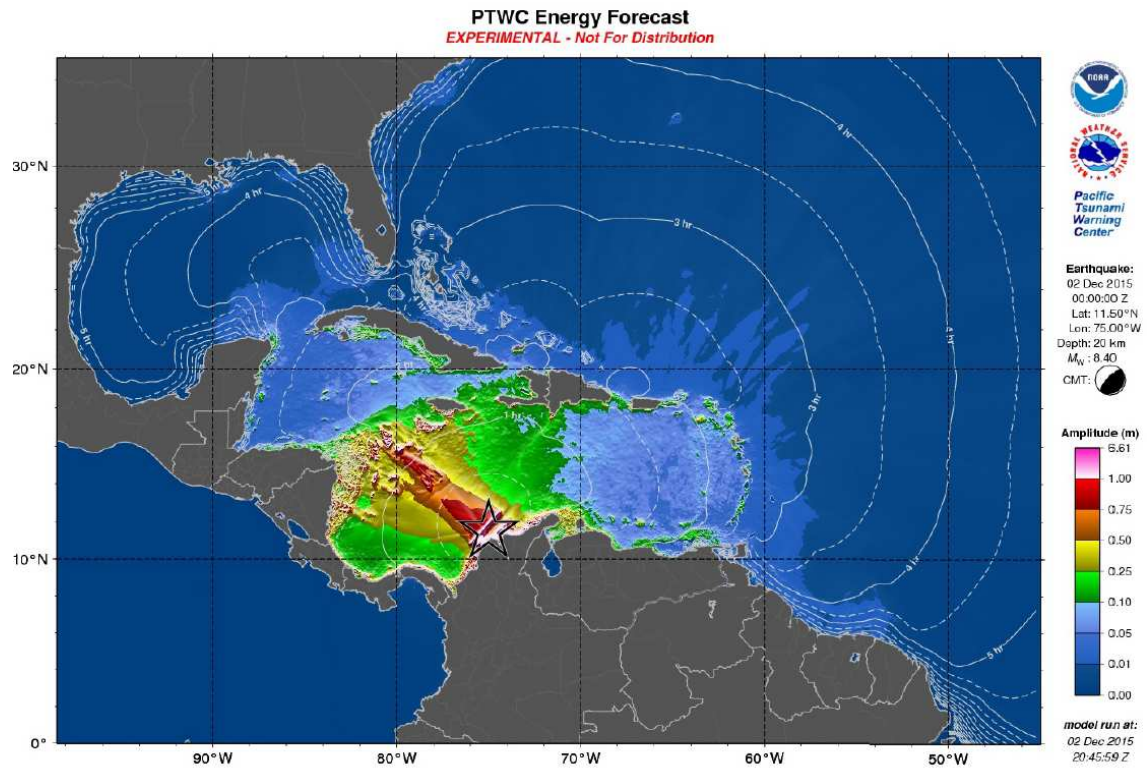
Scénario 4



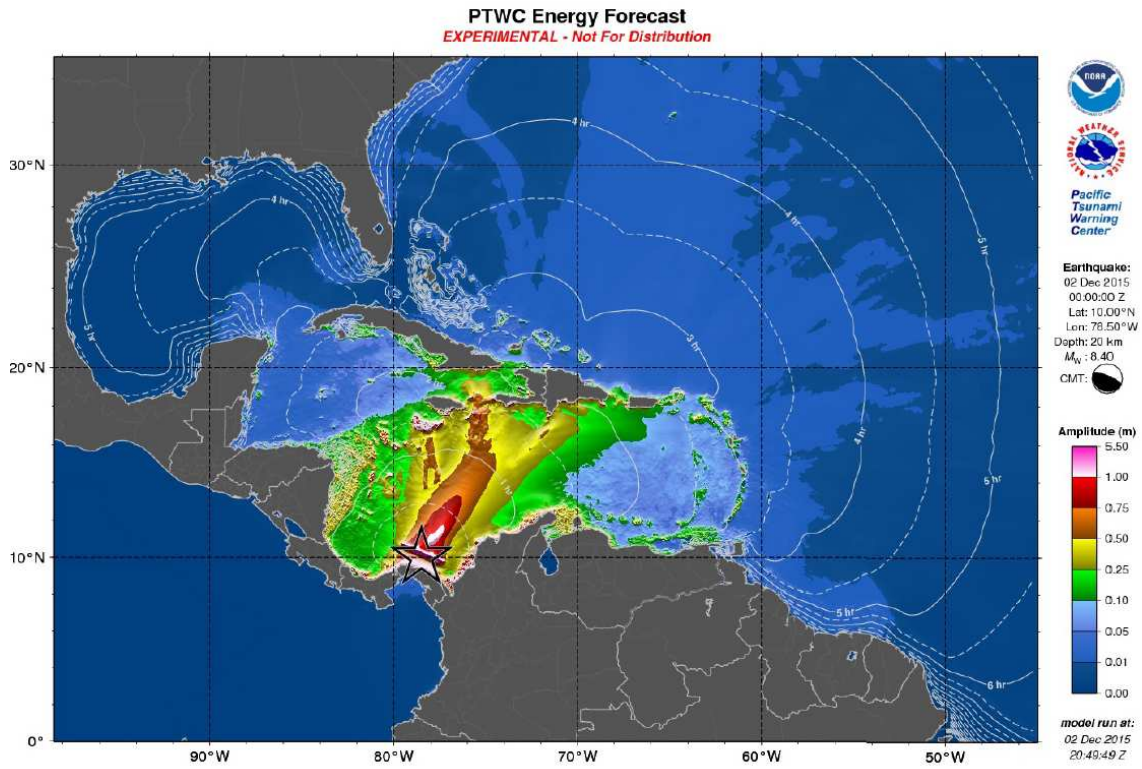
Scénario 5



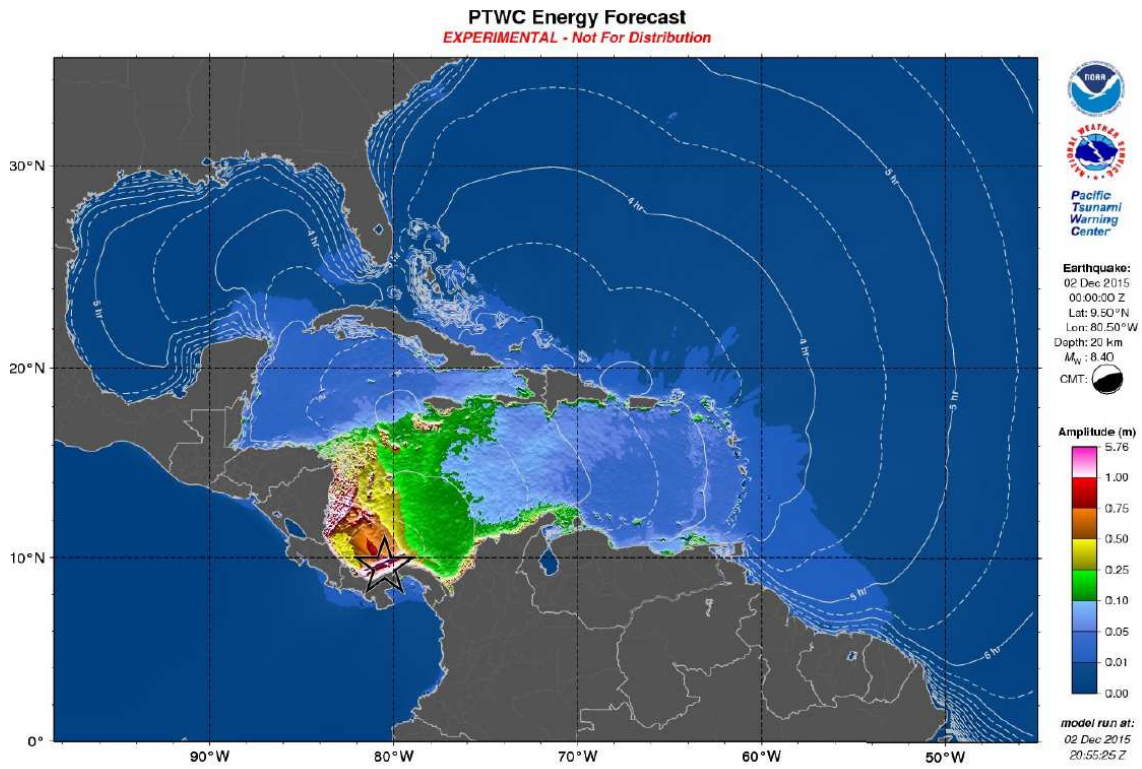
Scénario 6



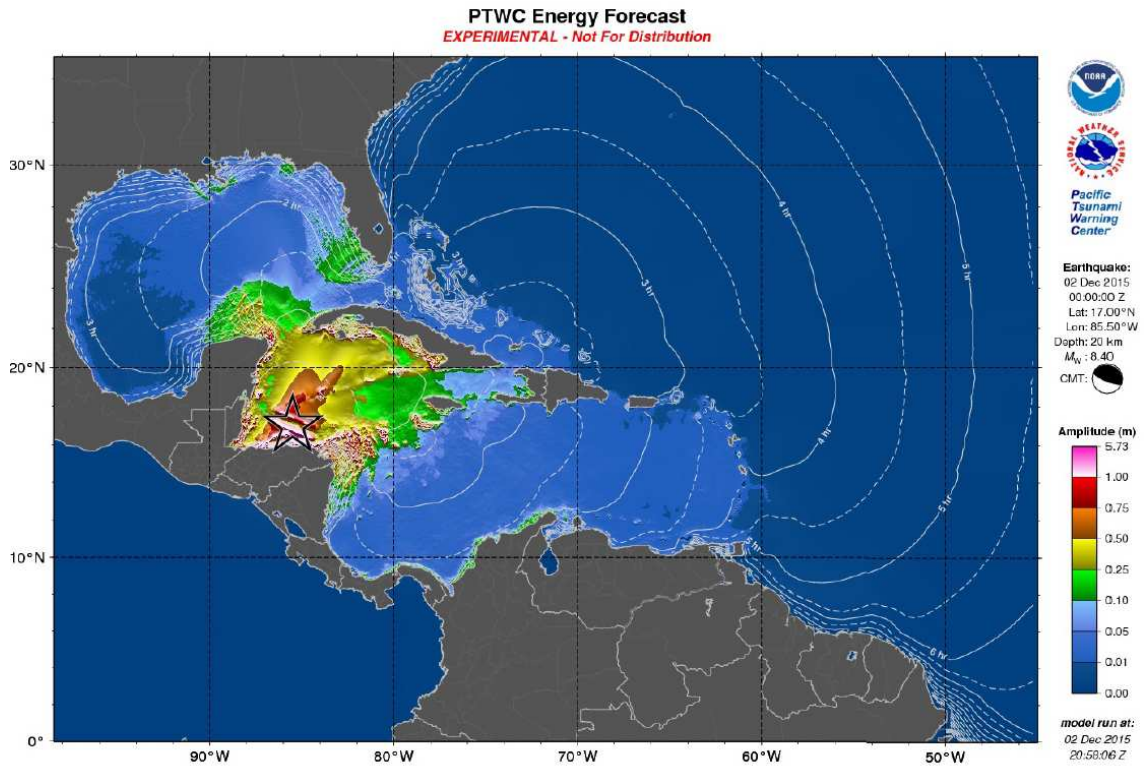
Scénario 7



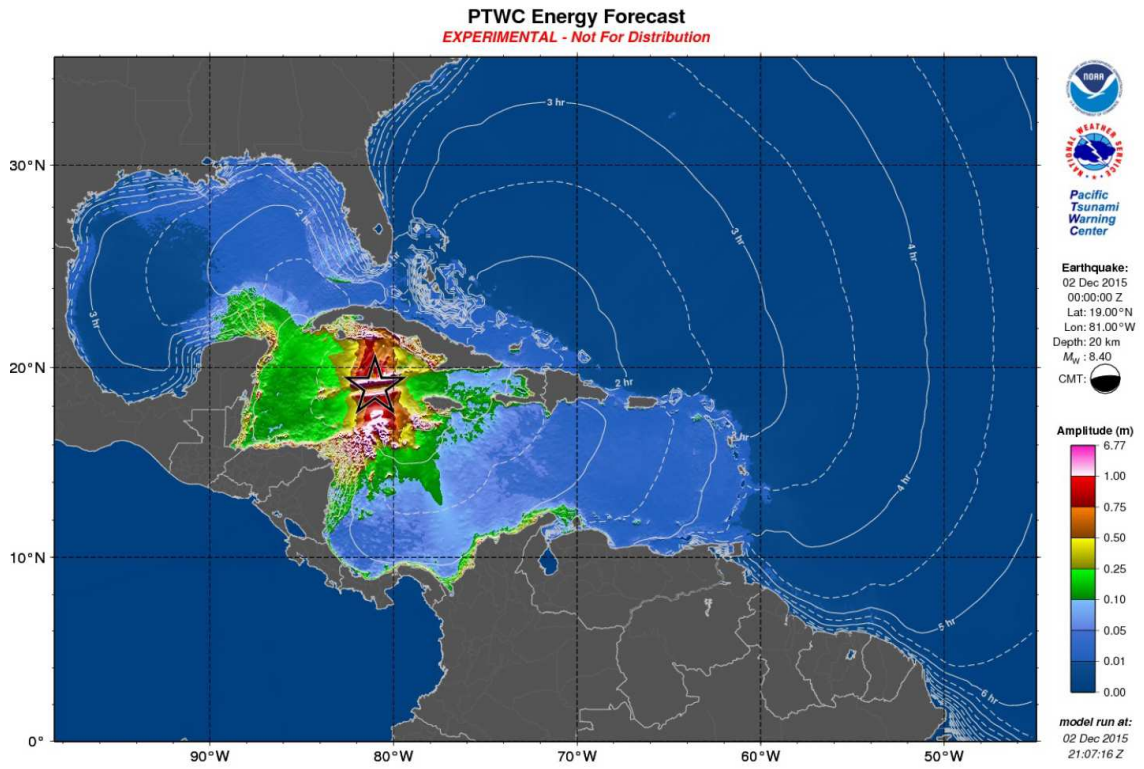
Scénario 8



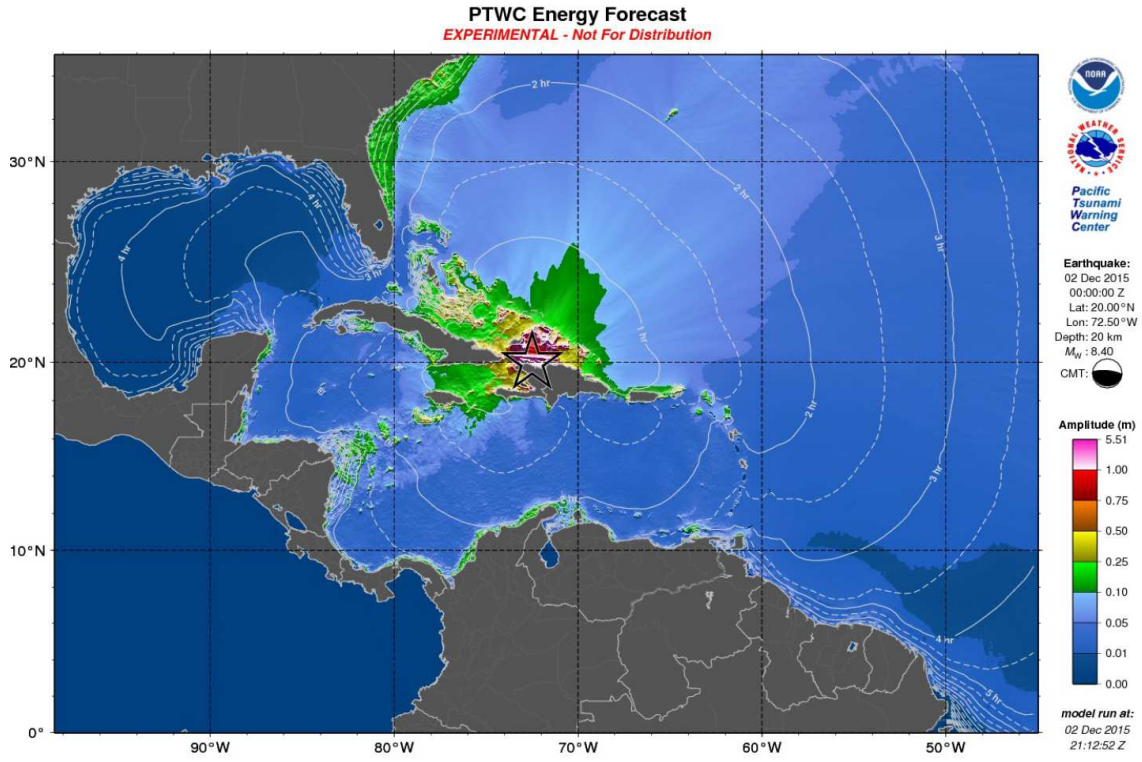
Scénario 9



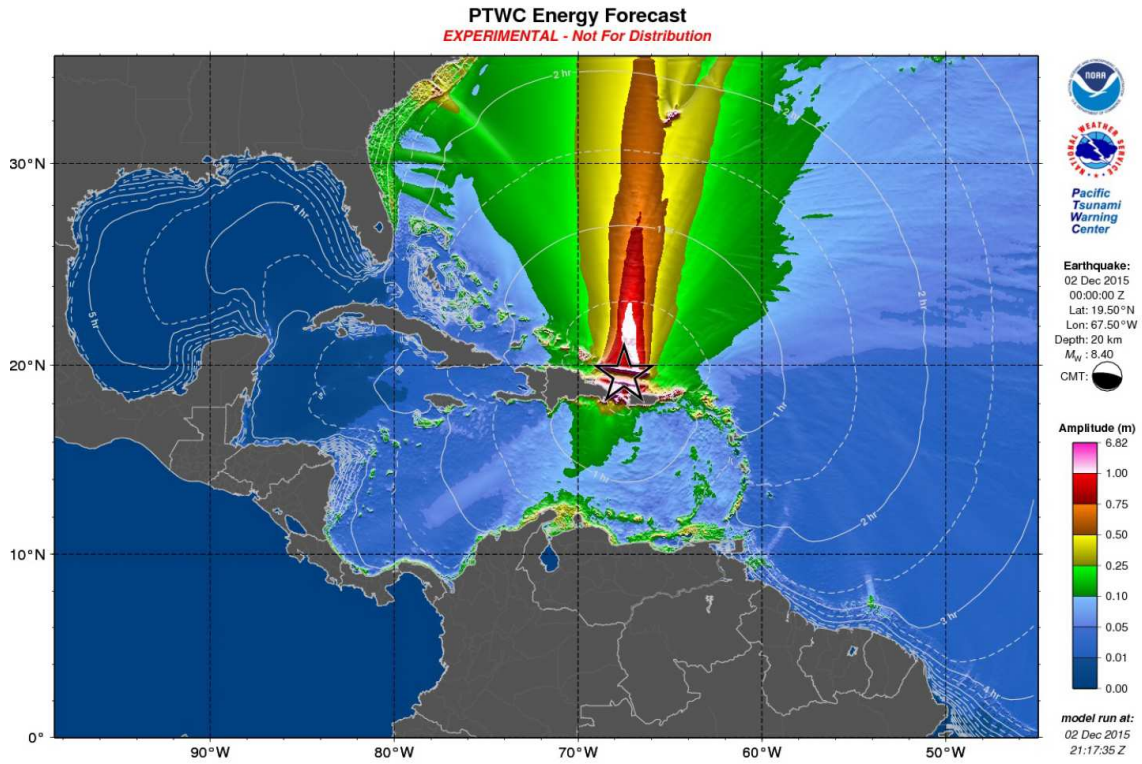
Scénario 10



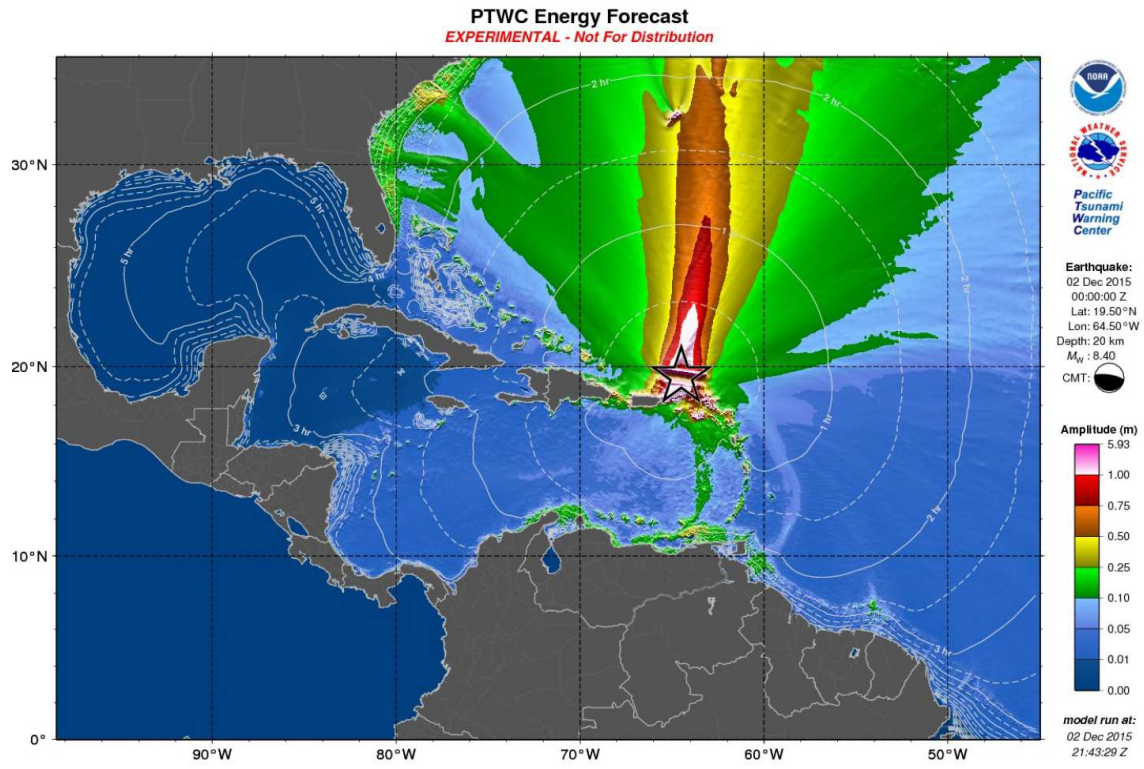
Scénario 11



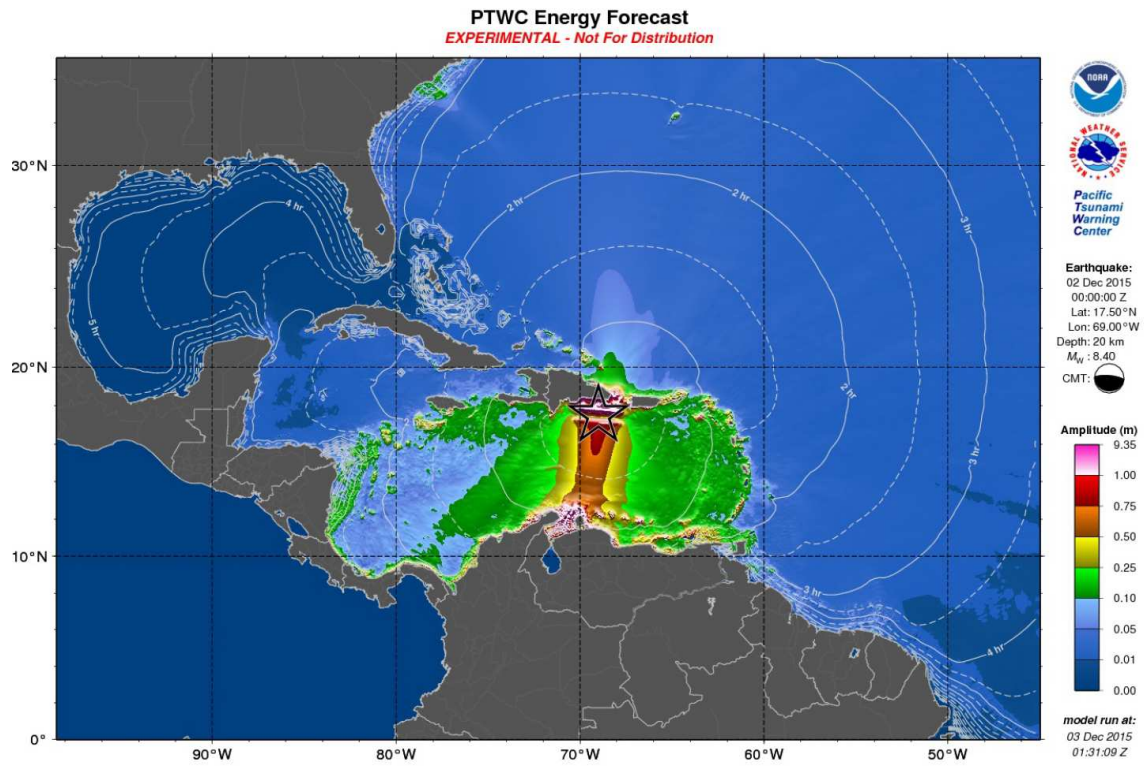
Scénario 12



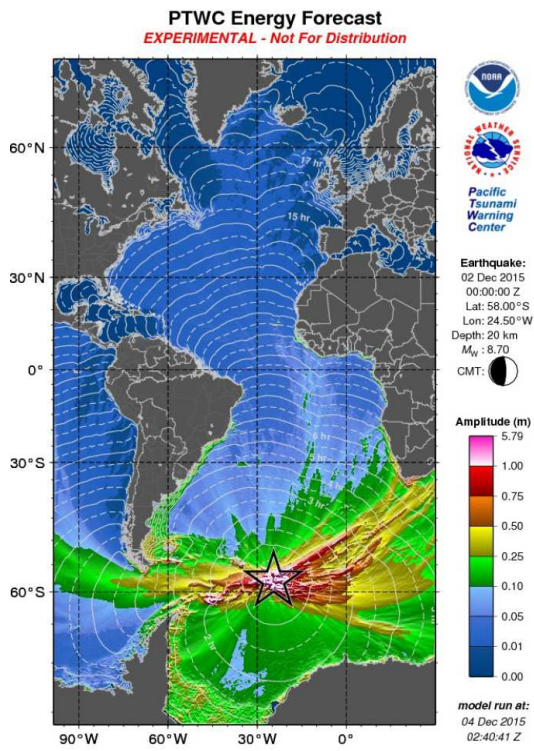
Scénario 13



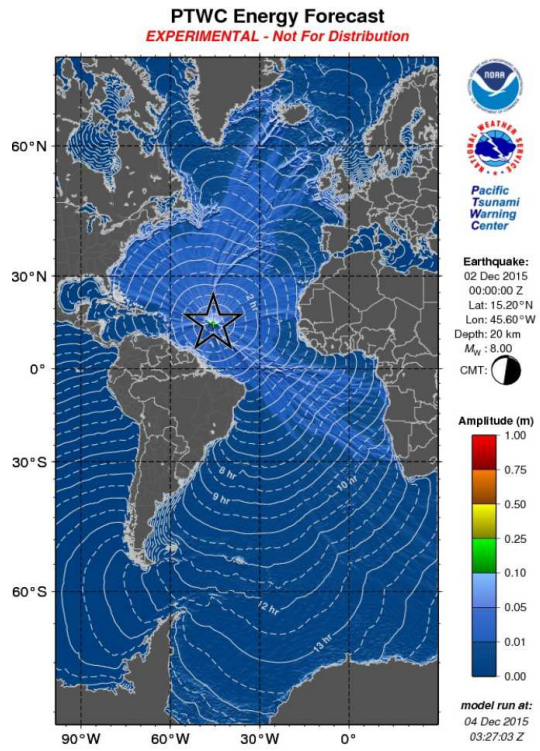
Scénario 14



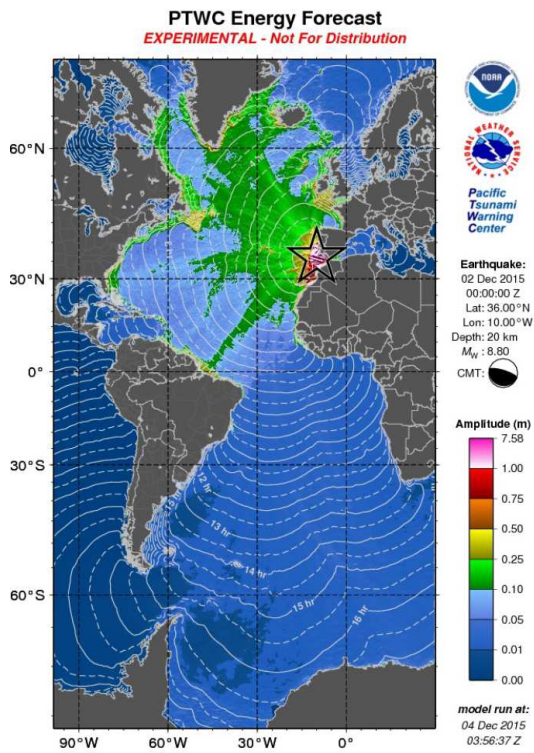
Scénario 15



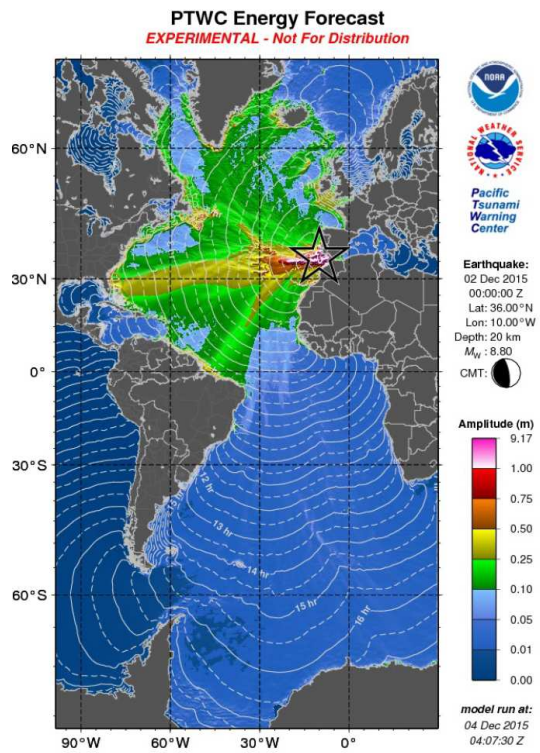
Scénario 16



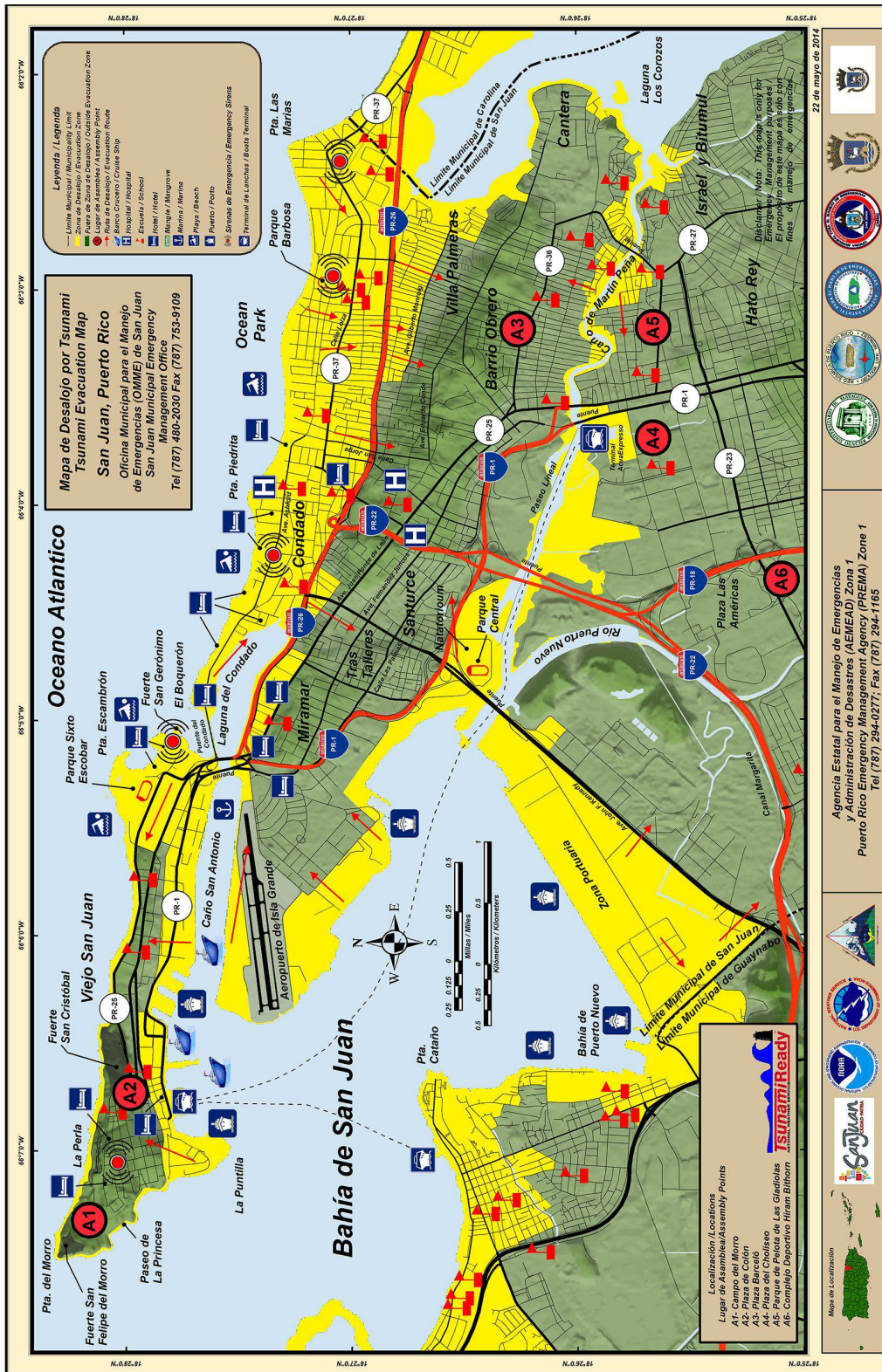
Scénario 17



Scénario 18



Annexe 2. Plan d'évacuation tsunami de la ville de San Juan (Porto-Rico)



Annexe 3. Disponibilité et choix des données topographiques mondiales employées pour délimiter la zone à évacuer à l'échelle de la Grande Caraïbe

La représentation numérique de l'altitude d'une zone géographique est fournie par des MNT (Modèle numérique de terrain). Il s'agit d'un terme générique. Nous distinguerons par la suite les MNS (Modèle numérique de surface) pour lesquels l'information d'altitude comprend les éléments de sursol comme la végétation, les bâtiments et autres infrastructures anthropiques (Charleux Demargne, 2001). Les SIG permettent le traitement et/ou la visualisation de ces informations sous différents formats, images matricielles (fichier raster) ou vectorielles. Les données topographiques (altimétrie et bathymétrie) sont couramment employées dans de nombreuses disciplines. En géoscience, elles s'utilisent en hydrologie, géologie, géomorphologie, environnement, biologie. Ces données permettent d'extraire des informations primaires comme l'altitude, la pente, l'exposition mais également des données dérivées ou secondaires comme des indices d'humidité ou d'ensoleillement (Moore et al., 1991). Dans le domaine de la gestion du risque de tsunami ces données sont employées pour :

- la recherche de sources potentielles (glissement de terrain sous-marin ou subaérien, volcanisme...);
- la modélisation de l'aléa (propagation en haute mer et à l'approche des côtes, inondation);
- la planification des évacuations (définition des zones à évacuer, des itinéraires et des sites refuge).

Les données altimétriques disponibles à l'échelle mondiale sont des MNS (ou DEM en anglais, Digital Elevation Model). A cette échelle, les données sont acquises par satellite et offrent une résolution planimétrique en dessous des 100m avec une précision verticale comprise entre 10 et 20m environ (Czubski, 2013). Il existe plusieurs bases de données globales (GDEM - Global Digital Elevation Model) accessibles gratuitement mais dont les techniques d'acquisition, les résolutions spatiales et altimétriques sont différentes (Arefi et Reinartz, 2011). Nous décrivons ici les GDEM les plus précis qui couvrent entièrement notre zone d'étude, il s'agit du SRTM3 et ASTER GDEM.

Les données **SRTM3 V4.1** (2009) couvrent la quasi-totalité du globe de 60°N et 56°S. Leur résolution spatiale est de 3 arc-second ce qui représente une taille de pixel d'environ 90m à l'équateur pour une résolution verticale moyenne d'environ 16m. Elles sont produites par l'administration nationale aéronautique et de l'espace des Etats Unis (NASA) et la National Imagery and Mapping Agency. La technique employée repose sur l'exploitation d'images radar connues sous le nom d'interférométrie Radar à Ouverture Synthétique (SAR). Ces images ont été acquises au cours d'une mission de 11 jours en février 2000. Depuis 2003, sa gratuité et sa disponibilité dans sa première version en fait une donnée largement employée dans les études scientifiques. Cette dernière version emploie un nouvel algorithme d'interpolation sophistiqué pour éliminer les vides et les aberrations (Reuter, 2007). La NASA a annoncé la disponibilité prochaine des données à pleine résolution (SRTM1) à l'échelle mondiale.

Les données ASTER DEM V2 sont disponibles depuis 2001. Elles couvrent la surface terrestre de 83° N à 83° S. Alors que la version 1 était distribuée à titre expérimental, la version 2 a été enrichie par

plusieurs milliers d'images, ce qui porte à 1.5 million de stéréo paires employées. Sa résolution spatiale est de 1 arc-second soit environ 30m à l'équateur. Elles sont coproduites par le Ministère japonais de la recherche (METI) et la NASA. Ces données sont téléchargeables gratuitement pour la recherche et l'enseignement aux formats Geotiff. Elles sont produites par radiométrie, par l'interprétation stéréoscopique d'images satellites.

Les MNT ne donnent qu'une représentation partielle du terrain réel. « *La représentation des valeurs de l'altitude [...] est effectuée de manière discontinue et par extension* », ces valeurs sont « distribuées » par interpolation ou extrapolation (Charleux Demargne, 2001). Bien que des algorithmes soient utilisés pour combler les trous, ces bases de données contiennent malgré tout de nombreux artefacts. Au regard de l'étendue spatiale de notre échelle de travail nous n'avons pas pu mettre en place un protocole d'évaluation systématique. La littérature scientifique disponible nous renseigne néanmoins sur la qualité des données.

Ces deux bases de données ont été comparées entre elles ou confrontées à des données nationales acquises par des méthodes plus précises comme le Lidar¹⁵⁸, ou encore par des mesures directes sur le terrain. Dans leurs versions actuelle ou plus ancienne, ces deux modèles de terrain ont déjà fait l'objet de nombreuses études comparatives dans plusieurs pays comme en Australie (Rexer et Hirt, 2014), en Chine (Li *et al.*, 2012 ; Jing *et al.*, 2013), en Inde (Mukherjee *et al.*, 2013), en Indonésie (Suwandana *et al.*, 2012), en Grèce (Nikolapopoulos *et al.*, 2006), en Pologne (Czubski, 2013) ainsi que par des équipes de validation des données, elles-mêmes (Aster, 2011). Malgré une résolution topographique plus importante, il ressort que les données SRTM V4.1 ont une précision globale verticale de meilleure qualité que celle des données ASTER GDEM V2. Toutefois cette différence varie en fonction de la nature du terrain, du relief ou encore du type de couverture du sol (Czubski, 2013 ; Li *et al.*, 2012 ; Mukherjee *et al.*, 2013). Jing *et al.* (2013) et Suwandana *et al.*, (2012) préconisent aux personnes qui ne retravaillent pas les données brutes d'utiliser les données SRTM. Nous avons donc opté pour l'utilisation des données de topographie SRTM V4.1.

Construction du zonage

Notre zone d'étude est couverte par 39 dalles. Nous avons extrait la courbe d'altitude 10 mètres pour chacune d'entre elles à l'aide d'une chaîne de traitement et d'itérations construite avec l'outil Model Builder d'Arcgis (figure 1). Cette chaîne est composée de trois principales étapes successives : le reclassement des dalles raster, la vectorisation des limites et le nettoyage de données vectorielles.

¹⁵⁸ Lidar (Light Detection And Ranging) : c'est une technique de relevés topographiques utilisant la technologie laser avec un capteur généralement aéroporté. Ce capteur comporte un système actif émetteur d'ondes laser qui sont réfléchies par les points d'impact.

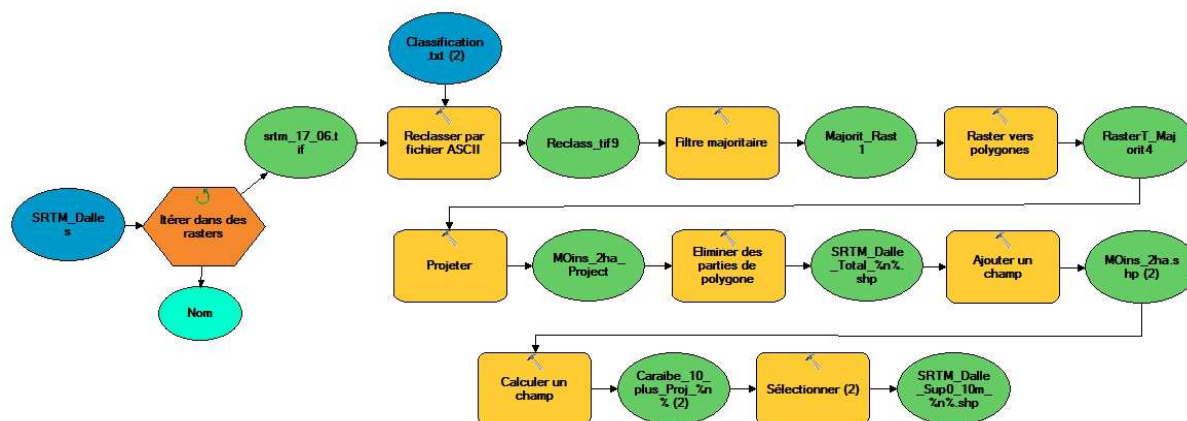


Figure 1 – Annexe 3 : Chaîne de traitement d'extraction des isohypses

Cette méthode permet de définir la limite haute du zonage mais pas sa limite basse. En effet, la présence d'artefacts dans les données proches du trait de côte détériore de manière significative sa vectorisation. Ainsi, nous avons recherché une base de données des limites territoriales des Etats plus fiable. Il en existe plusieurs disponibles sur internet (Brigham, 2012). Nous les avons examinées par comparaison visuelle avec les données de l'IGN (BD Topo, 2014) qui sert de référence (figure 2). C'est la base de données réalisée dans le cadre des projets Système d'information sur les marchés agricoles, CountrySTAT nommée Global Administrative Unit Layers (GAUL)¹⁵⁹, qui offre la meilleure qualité. Elle a été conçue à partir de la combinaison d'un grand nombre de données nationales, et a bénéficié d'une amélioration des contours par photo-interprétation d'images satellites.



Figure 2 – Annexe 3 : Observation comparative des trois traits de côte

¹⁵⁹ Animée par la volonté de normaliser et standardiser les données spatiales représentant les unités administratives, la FAO met à disposition une base de données régulièrement mise à jour nommée la Global Administrative Unit Layers (GAUL). Il est possible de connaître l'historique des modifications apportées et il s'agit de données utilisées par la communauté des Nations Unies ainsi que d'OpenStreetMap.

Bibliographie Annexe 3 :

- AREFI H. ET REINARTZ P. (2011): Accuracy enhancement of ASTER global digital elevation models using ICESat data, *Remote Sensing*, 3, 1323-1343
- CHARLEUX DEMARGNE J. (2001) Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie, Application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants,
- CZUBSKI K. K., J ; KOLECKA, N (2013): Accuracy of SRTM-X and ASTER Elevation Data and its Influence on Topographical and Hydrological Modeling: Case Study of the Pieniny Mts. in Poland, *International Journal of Geoinformatics*, 9
- JING C. SHORTRIDGE A. LIN S. ET WU J. (2013): Comparison and validation of SRTM and ASTER GDEM for a subtropical landscape in Southeastern China, *International Journal of Digital Earth*, 1-24
- LI P. SHI C. LI Z. MULLER J.-P. DRUMMOND J. LI X. LI T. LI Y. ET LIU J. (2012): Evaluation of ASTER GDEM ver2 using GPS measurements and SRTM ver4.1 in China, XXII Congress of International Society of Photogrammetry, Melbourne, Australia
- MOORE I. D. GRAYSON R. ET LADSON A. (1991): Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological processes*, 5, 3-30
- MUKHERJEE S. JOSHI P. MUKHERJEE S. GHOSH A. GARG R. ET MUKHOPADHYAY A. (2013): Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM), *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 205-217
- REUTER H. I. N., A. ; JARVIS, A. (2007): An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data, *International Journal of Geographic Information Science*, 21:9, 983-1008
- REXER M. ET HIRT C. (2014): Comparison of free high resolution digital elevation data sets (ASTER GDEM2, SRTM v2. 1/v4. 1) and validation against accurate heights from the Australian National Gravity Database, *Australian Journal of Earth Sciences*, 61, 213-226
- SUWANDANA E. KAWAMURA K. SAKUNO Y. KUSTIYANTO E. ET RAHARJO B. (2012): Evaluation of ASTER GDEM2 in comparison with GDEM1, SRTM DEM and topographic-map-derived DEM using inundation area analysis and RTK-dGPS data, *Remote Sensing*, 4, 2419-2431

Annexe 4. Matrice de décision employée par le PTWC pour le choix de l'avis à diffuser aux TWFP des pays et territoires de la Grande Caraïbe, en cas de séisme au potentiel tsunamigène

Region	Earthquake			Product	
	Location	Depth	Magnitude (Mw)	Type	Tsunami Threat
Caribbean	under the sea or very near the coast	any	< 6.0	none	none
			6.0 – 7.0	Information Statement	None - earthquake is too small
	well inland		≥ 6.0	Information Statement	None – earthquake is too far inland
Atlantic	under the sea or very near the coast	any	< 6.5	none	none
			6.5 – 7.0	Information Statement	None - earthquake is too small
	well inland		≥ 6.0	Information Statement	None – earthquake is too far inland
Caribbean or Atlantic	under the sea or very near the coast	≥ 100 km	≥ 7.1	Information Statement	None - earthquake is too deep
		< 100 km	7.1 - 7.5	Threat Message	Potential threat to coasts within 300 km
			7.6 – 7.8	Threat Message	Potential threat to coasts within 1000 km
			≥ 7.9	Threat Message	Potential threat to coasts with ETA ≤ 3 hours
Atlantic	under the sea or very near the coast	< 100 km	≥ 7.9	Information Statement	Potential threat but no coasts with ETA ≤ 3 hours. Evaluation continues.

Annexe 5. Exemple de messages textes émis par le PTWC

Text Product

ZCZC
WECA43 PHEB 012117
TIBCAX

TSUNAMI INFORMATION STATEMENT NUMBER 1
NWS PACIFIC TSUNAMI WARNING CENTER EWA BEACH HI
2117 UTC THU OCT 1 2015

...TSUNAMI INFORMATION STATEMENT...
**** NOTICE **** NOTICE **** NOTICE **** NOTICE **** NOTICE *****
THIS STATEMENT IS ISSUED FOR INFORMATION ONLY IN SUPPORT OF THE
UNESCO/IOC TSUNAMI AND OTHER COASTAL HAZARDS WARNING SYSTEM FOR
THE CARIBBEAN AND ADJACENT REGIONS AND IS MEANT FOR NATIONAL
AUTHORITIES IN EACH COUNTRY OF THAT SYSTEM.

NATIONAL AUTHORITIES WILL DETERMINE THE APPROPRIATE LEVEL OF
ALERT FOR EACH COUNTRY AND MAY ISSUE ADDITIONAL OR MORE REFINED
INFORMATION.

**** NOTICE **** NOTICE **** NOTICE **** NOTICE **** NOTICE *****
PRELIMINARY EARTHQUAKE PARAMETERS

* MAGNITUDE 6.4
* ORIGIN TIME 2107 UTC OCT 1 2015
* COORDINATES 15.0 NORTH 60.5 WEST
* DEPTH 120 KM / 75 MILES
* LOCATION LEEWARD ISLANDS

EVALUATION

* AN EARTHQUAKE WITH A PRELIMINARY MAGNITUDE OF 6.4 OCCURRED IN
THE LEEWARD ISLANDS AT 2107 UTC ON THURSDAY OCTOBER 1 2015.
* BASED ON ALL AVAILABLE DATA... THERE IS NO TSUNAMI THREAT
FROM THIS EARTHQUAKE.

RECOMMENDED ACTIONS

* NO ACTION IS REQUIRED.
NEXT UPDATE AND ADDITIONAL INFORMATION

* THIS WILL BE THE ONLY STATEMENT ISSUED FOR THIS EVENT UNLESS
ADDITIONAL DATA ARE RECEIVED OR THE SITUATION CHANGES.
* AUTHORITATIVE INFORMATION ABOUT THE EARTHQUAKE FROM THE U.S.
GEOLOGICAL SURVEY CAN BE FOUND ON THE INTERNET AT
EARTHQUAKE.USGS.GOV/EARTHQUAKES -ALL IN LOWERCASE LETTERS-.

* FURTHER INFORMATION ABOUT THIS EVENT MAY BE FOUND AT
PTWC.WEATHER.GOV AND AT WWW.TSUNAMI.GOV.
* COASTAL REGIONS OF PUERTO RICO... THE U.S. VIRGIN ISLANDS...
AND THE BRITISH VIRGIN ISLANDS SHOULD REFER TO U.S. NATIONAL
TSUNAMI WARNING CENTER MESSAGES SPECIFICALLY FOR THOSE
PLACES THAT CAN BE FOUND AT NTWC.ARH.NOAA.GOV.
* COASTAL REGIONS OF THE US GULF COAST... US EAST COAST... AND
THE MARITIME PROVINCES OF CANADA SHOULD REFER TO U.S.
NATIONAL TSUNAMI WARNING CENTER MESSAGES THAT CAN BE FOUND
AT NTWC.ARH.NOAA.GOV.

Text Product

ZCZC
WECA41 PHEB 021657
TSUCAX

TSUNAMI MESSAGE NUMBER 1
NWS PACIFIC TSUNAMI WARNING CENTER EWA BEACH HI
1657 UTC FRI OCT 2 2015

...TSUNAMI THREAT MESSAGE...

**** NOTICE **** NOTICE **** NOTICE **** NOTICE **** NOTICE *****
THIS MESSAGE IS ISSUED FOR INFORMATION ONLY IN SUPPORT OF THE
UNESCO/IOC TSUNAMI AND OTHER COASTAL HAZARDS WARNING SYSTEM FOR
THE CARIBBEAN AND ADJACENT REGIONS AND IS MEANT FOR NATIONAL
AUTHORITIES IN EACH COUNTRY OF THAT SYSTEM.
NATIONAL AUTHORITIES WILL DETERMINE THE APPROPRIATE LEVEL OF
ALERT FOR EACH COUNTRY AND MAY ISSUE ADDITIONAL OR MORE REFINED
INFORMATION.

**** NOTICE **** NOTICE **** NOTICE **** NOTICE **** NOTICE *****
PRELIMINARY EARTHQUAKE PARAMETERS

* MAGNITUDE 8.4
* ORIGIN TIME 1652 UTC OCT 2 2015
* COORDINATES 15.0 NORTH 60.5 WEST
* DEPTH 20 KM / 12 MILES
* LOCATION LEEWARD ISLANDS
EVALUATION

* AN EARTHQUAKE WITH A PRELIMINARY MAGNITUDE OF 8.4 OCCURRED IN
THE LEEWARD ISLANDS AT 1652 UTC ON FRIDAY OCTOBER 2 2015.
* BASED ON THE PRELIMINARY EARTHQUAKE PARAMETERS... WIDESPREAD
HAZARDOUS TSUNAMI WAVES ARE POSSIBLE.
TSUNAMI THREAT FORECAST

* HAZARDOUS TSUNAMI WAVES FROM THIS EARTHQUAKE ARE POSSIBLE
WITHIN THE NEXT THREE HOURS ALONG SOME COASTS OF
DOMINICA... MARTINIQUE... SAINT LUCIA... GUADELOUPE...
BARBADOS... SAINT VINCENT... MONTSERRAT... TRINIDAD
TOBAGO... GRENADA... BARBUDA... SAINT KITTS... SABA...
SINT EUSTATIUS... ANTIGUA... US VIRGIN ISLANDS... PUERTO
RICO... SINT MAARTEN... ANGUILLA... SAINT BARTHELEMY...
SAINT MARTIN... DOMINICAN REP... BONAIRE... CURACAO... BR
VIRGIN ISLANDS... TURKS N CAICOS... ARUBA... VENEZUELA...
HAITI... BAHAMAS... CUBA... BERMUDA... COLOMBIA AND
JAMAICA

RECOMMENDED ACTIONS

* GOVERNMENT AGENCIES RESPONSIBLE FOR THREATENED COASTAL AREAS
SHOULD TAKE ACTION TO INFORM AND INSTRUCT ANY COASTAL
POPULATIONS AT RISK IN ACCORDANCE WITH THEIR OWN
EVALUATION... PROCEDURES AND THE LEVEL OF THREAT.
* PERSONS LOCATED IN THREATENED COASTAL AREAS SHOULD STAY ALERT
FOR INFORMATION AND FOLLOW INSTRUCTIONS FROM NATIONAL AND
LOCAL AUTHORITIES.
ESTIMATED TIMES OF ARRIVAL

* ESTIMATED TIMES OF ARRIVAL -ETA- OF THE INITIAL TSUNAMI WAVE
FOR PLACES WITHIN THE REGION IDENTIFIED WITH A POTENTIAL
TSUNAMI THREAT. ACTUAL ARRIVAL TIMES MAY DIFFER AND THE
INITIAL WAVE MAY NOT BE THE LARGEST. A TSUNAMI IS A SERIES
OF WAVES AND THE TIME BETWEEN WAVES CAN BE FIVE MINUTES TO
ONE HOUR.
LOCATION REGION COORDINATES ETA(UTC)

ROSEAU DOMINICA 15.3N 61.4W 1711 10/02
FORT DE FRANCE MARTINIQUE 14.6N 61.1W 1712 10/02
CASTRIES SAINT LUCIA 14.0N 61.0W 1714 10/02
BASSE TERRE GUADELOUPE 16.0N 61.7W 1721 10/02
BRIDGETOWN BARBADOS 13.1N 59.6W 1723 10/02
KINGSTOWN SAINT VINCENT 13.1N 61.2W 1726 10/02
PLYMOUTH MONTSERRAT 16.7N 62.2W 1739 10/02
PIRATES BAY TRINIDAD TOBAGO 11.3N 60.6W 1745 10/02
SAINT GEORGES GRENADA 12.0N 61.8W 1747 10/02

PALMETTO POINT BARBUDA 17.6N 61.9W 1748 10/02
 BASSETERRE SAINT KITTS 17.3N 62.7W 1753 10/02
 SABA SABA 17.6N 63.2W 1754 10/02
 SINT EUSTATIUS SINT EUSTATIUS 17.5N 63.0W 1755 10/02
 SAINT JOHNS ANTIGUA 17.1N 61.9W 1757 10/02
 ST CROIX US VIRGIN ISLAND 17.8N 64.7W 1800 10/02
 FAJARDO PUERTO RICO 18.3N 65.6W 1804 10/02
 SIMPSON BAAI SINT MAARTEN 18.0N 63.1W 1805 10/02
 THE VALLEY ANGUILLA 18.3N 63.1W 1808 10/02
 SAN JUAN PUERTO RICO 18.5N 66.2W 1808 10/02
 PONCE PUERTO RICO 18.0N 66.6W 1811 10/02
 SAINT BARTHELEM SAINT BARTHELEMY 17.9N 62.8W 1814 10/02
 BAIE LUCAS SAINT MARTIN 18.1N 63.0W 1819 10/02
 BAIE GRAND CASE SAINT MARTIN 18.1N 63.1W 1820 10/02
 MAYAGUEZ PUERTO RICO 18.2N 67.2W 1822 10/02
 CABO ENGANO DOMINICAN REP 18.6N 68.3W 1826 10/02
 ONIMA BONAIRE 12.3N 68.3W 1828 10/02
 BAIE BLANCHE SAINT MARTIN 18.1N 63.0W 1831 10/02
 WILLEMSTAD CURACAO 12.1N 68.9W 1836 10/02
 PUERTO PLATA DOMINICAN REP 19.8N 70.7W 1836 10/02
 SANTO DOMINGO DOMINICAN REP 18.5N 69.9W 1841 10/02
 TORTOLA BR VIRGIN ISLAND 18.4N 64.6W 1842 10/02
 ST THOMAS US VIRGIN ISLAND 18.3N 64.9W 1846 10/02
 GRAND TURK TURKS N CAICOS 21.5N 71.1W 1847 10/02
 ORANJESTAD ARUBA 12.5N 70.0W 1848 10/02
 MAIQUETIA VENEZUELA 10.6N 67.0W 1849 10/02
 ST JOHN US VIRGIN ISLAND 18.3N 64.8W 1849 10/02
 CUMANA VENEZUELA 10.5N 64.2W 1850 10/02
 CAP HAITEN HAITI 19.8N 72.2W 1852 10/02
 MAYAGUANA BAHAMAS 22.3N 73.0W 1859 10/02
 LONG ISLAND BAHAMAS 23.3N 75.1W 1915 10/02
 SANTIAGO D CUBA CUBA 19.9N 75.8W 1925 10/02
 RUTHS BAY BERMUDA 32.4N 64.6W 1927 10/02
 EXUMA BAHAMAS 23.6N 75.9W 1927 10/02
 RIOHACHA COLOMBIA 11.6N 72.9W 1930 10/02
 CAT ISLAND BAHAMAS 24.4N 75.5W 1931 10/02
 BARRANQUILLA COLOMBIA 11.1N 74.9W 1936 10/02
 ABACO ISLAND BAHAMAS 26.6N 77.1W 1938 10/02
 ANDROS ISLAND BAHAMAS 25.0N 77.9W 1944 10/02
 MONTEGO BAY JAMAICA 18.5N 77.9W 1946 10/02
 CARTAGENA COLOMBIA 10.4N 75.6W 1953 10/02
 KINGSTON JAMAICA 17.9N 76.9W 1953 10/02
 POTENTIAL IMPACTS

* A TSUNAMI IS A SERIES OF WAVES. THE TIME BETWEEN WAVE CRESTS
 CAN VARY FROM 5 MINUTES TO AN HOUR. THE HAZARD MAY PERSIST
 FOR MANY HOURS OR LONGER AFTER THE INITIAL WAVE.
 * IMPACTS CAN VARY SIGNIFICANTLY FROM ONE SECTION OF COAST TO
 THE NEXT DUE TO LOCAL BATHYMETRY AND THE SHAPE AND ELEVATION
 OF THE SHORELINE.
 * IMPACTS CAN ALSO VARY DEPENDING UPON THE STATE OF THE TIDE AT
 THE TIME OF THE MAXIMUM TSUNAMI WAVES.
 * PERSONS CAUGHT IN THE WATER OF A TSUNAMI MAY DROWN... BE
 CRUSHED BY DEBRIS IN THE WATER... OR BE SWEEPED OUT TO SEA.
 NEXT UPDATE AND ADDITIONAL INFORMATION

 * THE NEXT MESSAGE WILL BE ISSUED IN ONE HOUR... OR SOONER IF
 THE SITUATION WARRANTS.
 * AUTHORITATIVE INFORMATION ABOUT THE EARTHQUAKE FROM THE U.S.
 GEOLOGICAL SURVEY CAN BE FOUND ON THE INTERNET AT
 EARTHQUAKE.USGS.GOV/EARTHQUAKES -ALL IN LOWERCASE LETTERS-.
 * FURTHER INFORMATION ABOUT THIS EVENT MAY BE FOUND AT
 PTWC.WEATHER.GOV AND AT WWW.TSUNAMI.GOV.
 * COASTAL REGIONS OF PUERTO RICO... THE U.S. VIRGIN ISLANDS...
 AND THE BRITISH VIRGIN ISLANDS SHOULD REFER TO U.S. NATIONAL
 TSUNAMI WARNING CENTER MESSAGES SPECIFICALLY FOR THOSE
 PLACES THAT CAN BE FOUND AT NTWC.ARH.NOAA.GOV.
 * COASTAL REGIONS OF THE US GULF COAST... US EAST COAST... AND
 THE MARITIME PROVINCES OF CANADA SHOULD REFER TO U.S.
 NATIONAL TSUNAMI WARNING CENTER MESSAGES THAT CAN BE FOUND
 AT NTWC.ARH.NOAA.GOV.

Annexe 6. Support graphique d'aide à la décision pour la gestion des avis de tsunami réceptionnés par les NTWC des Antilles françaises

MATRICE 1 Traitement des messages textes du PTWC*

➤ Traitement de message de type **WECA 43** – « Information Statement »

Dist. < 1 000 km	Dist. > 1 000 km
Avertissement	Cr. Logigramme

LOGIGRAMME : traitement de message de type WECA43 distant de plus de 1 000 km

Réception WECA 43	Actions
Localisation de la source du phénomène	Phénomène initial au potentiel tsunamigène, avec possible impact sur les côtes des Petites-Antilles (ETA > 6h) Appeler le COGIC pour expertise du phénomène par le CENALT
Veille active des services opérationnels	Scénarios transatlantiques (Ouest péninsule ibérique) Scénarios Caraïbes (Nord Venezuela, Panama, Honduras, Fosse des Caïmans, Hispaniola) Autres scénarios (golfe du Mexique, fosse de subduction des Sandwich)
	Événement initial au potentiel non tsunamigène pour les Petites-Antilles Veille active (2h) - Nouvel événement de type WECA41 possible
	Événement au potentiel non tsunamigène pour les Petites-Antilles Fin de veille

Traitement de message de type WECA 41 – « Threat Message »

Paramètres physiques du séisme	Département mentionné dans le message	Distance de l'épicentre par rapport aux côtes les plus proches
7.1 ≤ Mw ≤ 7.5 Prof. < 100 km	OUI	0 - 300 km
	NON	300 - 1 000 km
Mw > 7.6 Prof. < 100 km	OUI	1 000 - 2 000 km
	NON	> 2 000 km

0 min 30 min 1 h 45 min 3 h ETA indicatif **

* En application du « User's Guide – Pacific Tsunami Warning Center – Enhanced Products for the CARIBE-EWS – Version 1.2, October 8, 2015 »
** Estimation du Temps d'Arrivée définie à l'aide du logiciel TTI software selon la méthode de calcul inverse des temps de propagation théoriques de l'onde de tsunami au départ de la Martinique

ORIENTATION à destination des autorités en charge de l'alerte descendante

➤ Un niveau d'information

Information « séisme détecté » : FIN DE SURVEILLANCE RENFORCÉE. Aucun risque de tsunami signalé par le centre d'alerte.
➤ Trois niveaux d'alerte
Avertissement: PRUDENCE SUR LE BORD DE MER, SURVEILLANCE RENFORCÉE. Suite à un séisme détecté, soyez prudent en bord de mer. Surveillance renforcée en cours, restez attentif aux consignes diffusées par les autorités.
Alerte orange « tsunami » : QUITTEZ LE BORD DE MER ! Mouvements marins inhabituels. Éloignez vous du bord de mer et des embouchures. Attendez les consignes des autorités.
Alerte rouge « tsunami » : REJOIGNEZ LES HAUTEURS ! Tsunami annoncé. Évacuez le littoral et dirigez vous vers les hauteurs. Attendez les consignes des autorités.
➤ Un niveau de fin d'alerte
Fin d'alerte : DANGER DE TSUNAMI ÉCARTÉ. Restez prudents en bord de mer. Respectez les consignes de sécurité. L'accès aux zones submergées reste sous contrôle.

Traitement des produits graphiques « forecast polygons » du PTWC

Amplitude maximale modélisée*	Niveau d'alerte minimum
> 3 m	Alerte rouge
1 - 3 m	Alerte orange
0.3 - 1 m	Avertissement
< 0.3 m	Avertissement
Value Not Computed	Tenir compte uniquement de la matrice de décision WECA 41

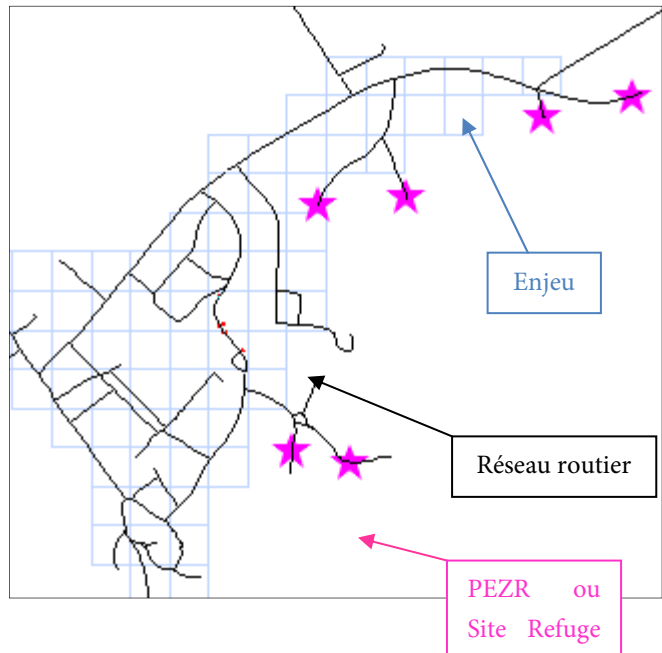
* Information non accessible à la population, ni à communiquer.

Annexe 8. Description des étapes cartographiques pour réaliser les calculs d'accessibilité des PEZR et des sites refuges au moyen des logiciels SIG MapInfo et son extension RouteFinder, et ArcGis

QUANTIFICATION DU NOMBRE D'EVACUES PAR ZONE REFUGE SOUS ROUTEFINDER

1/ Préparation des données

- Créer un champ « ID_SR » (flottant) dans la table des zones refuge (ZR.TAB) puis mettre à jour ce champ en entrant la formule : **ROWID** (création d'un attribut unique pour chaque ZR).
- Créer un champ « ID_CELL » (flottant) dans la table des enjeux humains (POP.TAB qui contient un attribut POP correspondant au nombre de personnes) puis mettre à jour ce champ en entrant la formule : **ROWID** (création d'un attribut unique pour chaque cellule).



Captures d'écran des tables ENJEUX & ZR :

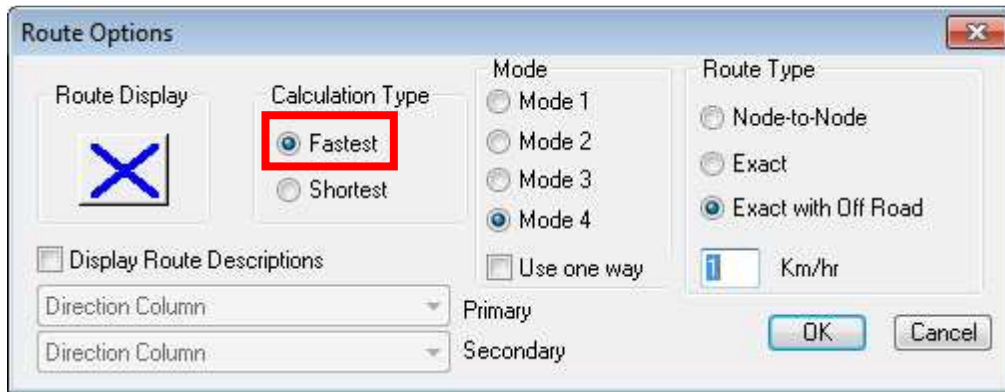
ID_CELL	X	Y
1	719 275	1629 974.99
2	719 275	1630 024.99
3	719 325	1630 024.99
4	719 375	1630 024.99
5	720 025	1630 024.99
6	719 174.99	1630 074.99
7	719 225	1630 074.99
8	719 275	1630 074.99
9	719 325	1630 074.99
10	719 375	1630 074.99
11	719 425	1630 074.99
12	719 475	1630 074.99
13	719 525	1630 074.99
14	719 575	1630 074.99

ID_SR	Secteur	Alti m
49	S	19
50	S	17
51	S	16
52	S	17
53	S	16
54	S	17
55	S	18
56	S	18
57	S	19
58	S	15
59	S	16
60	S	17
61	S	18
62	S	18

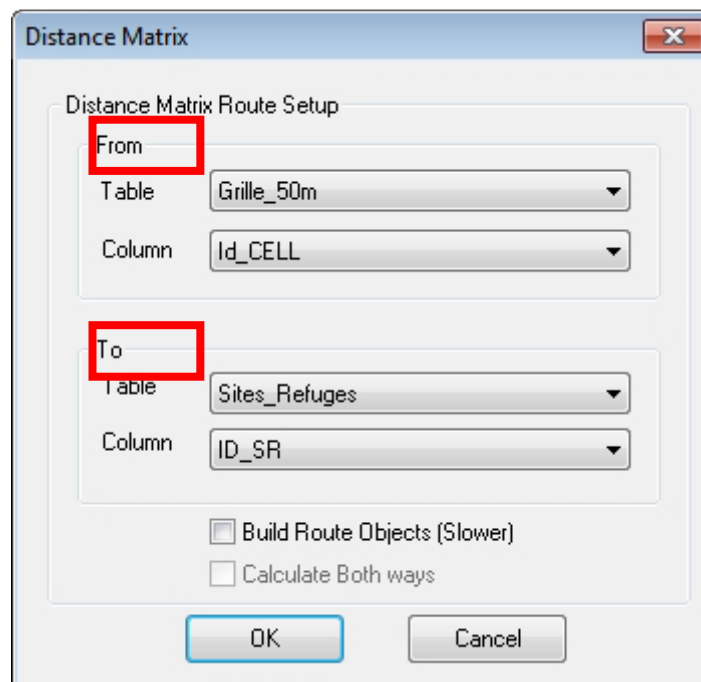
2/ Route Finder



Attention : lorsque le réseau est paramétré, il est nécessaire de calculer les temps de parcours selon la méthode du chemin le plus rapide.



- Lancer la création de la matrice des distances sous *RouteFinder* en sélectionnant les tables et les champs créés précédemment :



- En sortie, on obtient la table **RouteResults** où :
 - ⇒ Le champs « **FromID** » correspond au champ « **ID_CELL** » de la table des enjeux,
 - ⇒ Le champ « **ToID** » correspond au champ « **ID_SR** » de la table des zones refuge.

FromID	ToID	Time	Dist
506	185	-33	1e+038
506	186	-33	1e+038
506	187	267.224	11.605
506	188	-33	1e+038
506	189	341.798	14.625
506	190	323.112	13.868
506	191	333.7	14.297

- Sélectionner des valeurs non nulles : « **TIME <>-33** » et enregistrement de la requête sous le nom « **RouteResults_moins_33** ».

Select

Select Records from Table: RouteResults

that Satisfy: Time<>-33

Store Results in Table: _33

Sort Results by Column: none

Browse Results Find Results In Current Map Window

OK Cancel Save Template Load Template Help

3/ Mapinfo

- Ouvrir la table « **RouteResults_moins_33** » et modifier le type des champs « **FromID** » et « **ToID** » de « **caractère** » à « **flottant** ».

Fields	Type	Indexed
FromID	Float	<input type="checkbox"/>
ToID	Character(25)	<input type="checkbox"/>
Time	Float	<input type="checkbox"/>
Dist	Float	<input type="checkbox"/>

Up Down

Add Field

Remove Field

- Mettre à jour la table des enjeux selon la distance de parcours minimal (« **Minimum** » du champ « **Dist** » de la table « **RouteResults_moins_33** ») selon la jointure « **ID_CELL = FromID** » :

Update Column

Table to Update: Grille_50m

Column to Update: Add new temporary column

Get Value From Table: RouteResults_moins_33 Join...

Calculate: Min

of: Dist

Browse Results

OK Cancel Clear Help

Specify Join

Join

where Id_CELL from table Grille_50m

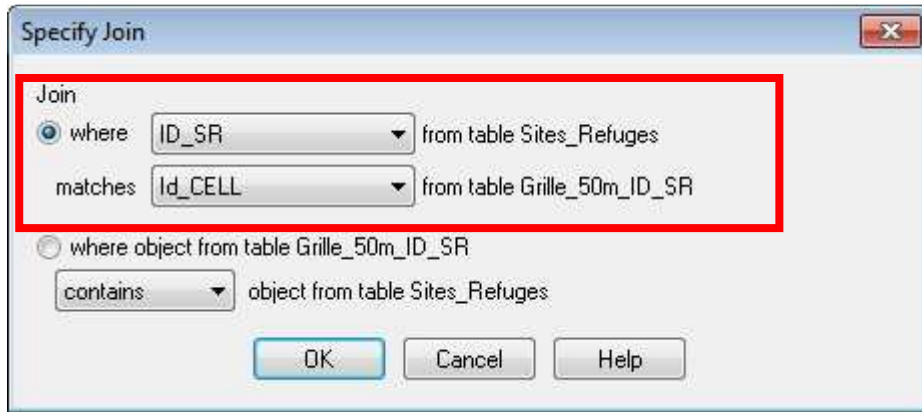
matches FromID from table RouteResults_moins_33

OK Cancel Help

- Effectuer une requête SQL entre la table des enjeux « **Grille_50m** » et la table « **RouteResults_moins_33** » **sur l'identifiant de la cellule et sur la distance**. Enregistrer la table sous le nom « **Grille_50m_ID_SR** ».

Attention au risque de doublons. Il faut vérifier que le nombre de lignes soit équivalent aux nombre d'enregistrements de la table des mailles de départ « Grille_50m ». Si ce n'est pas le cas : utiliser l'outil « Delete Duplicates » sur les identifiants ID_CELL et MinOfDist

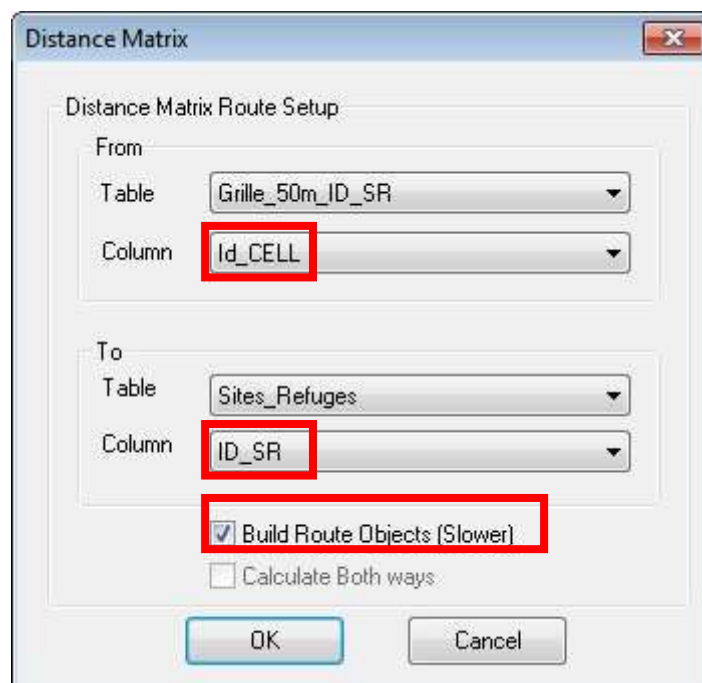
- Mettre à jour la table des sites refuges « Sites_Refuges » selon la somme du champ « POP » de la table « Grille_50m_ID_SR » selon la jointure « ID_ZR = ToID » et enregistrer la table sous le nom « ZR-POP ».



CARTOGRAPHIE DES ITINERAIRES D'EVACUATION OPTIMISES ET CALCUL DE LA FREQUENCE DE PASSAGES CUMULES

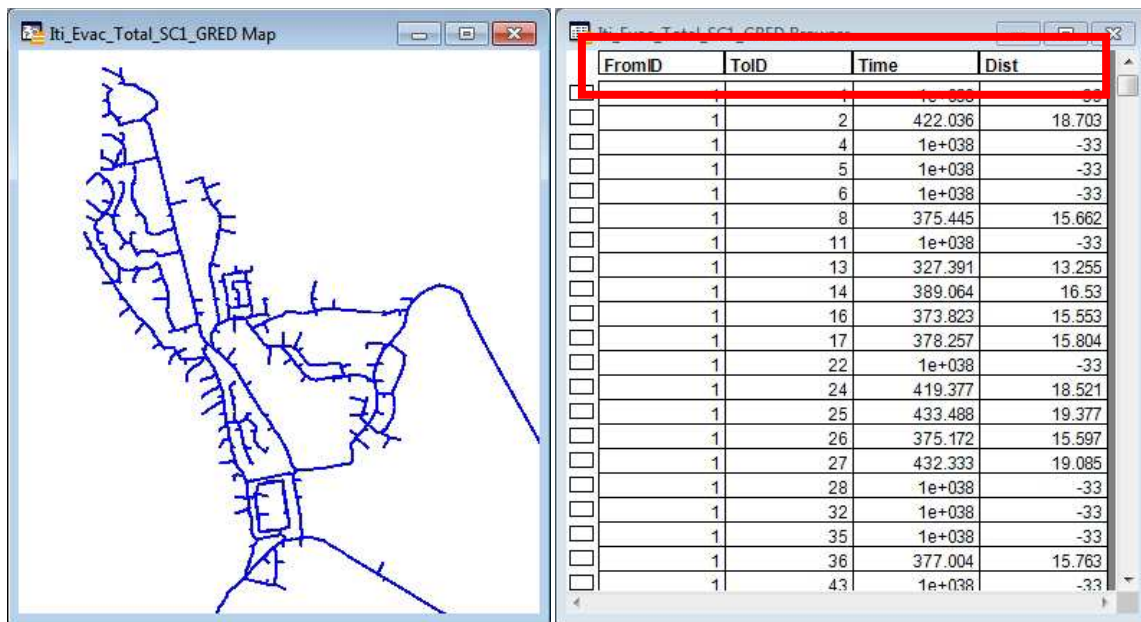
1/ RouteFinder

- Afin d'optimiser le temps de calcul des itinéraires d'évacuation, on sélectionne uniquement les PEZR qui sont sollicités.
- Lancer la création de la matrice des distances sous *RouteFinder* en sélectionnant les tables et les champs créés précédemment et en sélectionnant « Build Route Objects » :



- En sortie, on obtient la table **RouteResults** où :
 - ⇒ Le champ « **FromID** » correspond au champ « **ID_CELL** » de la table des enjeux
 - ⇒ Le champ « **ToID** » correspond au champ « **ID_ZR** » de la table des zones refuge

- Une fenêtre carte avec l'ensemble des itinéraires qui mènent à tous les PEZR.

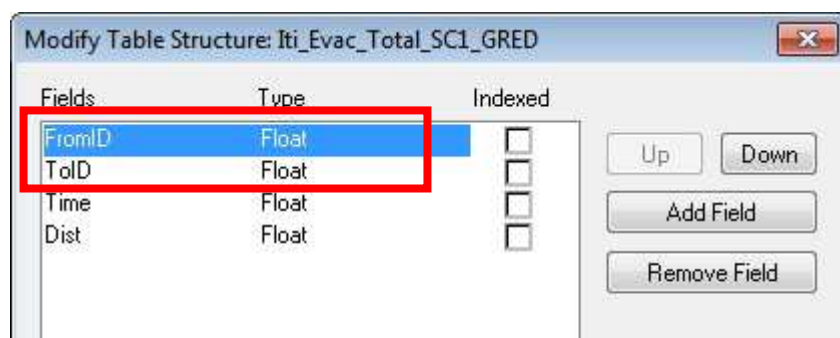


- Enregistrer le résultat sous le nom « **Iti_Evac** »

Les petits tronçons qui dépassent du réseau routier correspondent à l'itinéraire généré par RF pour calculer les temps d'évacuation pour rejoindre le centroïde de la maille vers le tronçon routier le plus proche (option « exact with off road »)

2/ MapInfo

- Ouvrir la table « **Iti_Evac** » et modifier le type des champs « **FromID** » et « **ToID** » de « caractère » à « flottant ».



- Effectuer une requête SQL entre la table « **Iti_Evac** » et la table des **enjeux** sur l'identifiant de la cellule (**From_ID**) et sur l'identifiant du PEZR (**To_ID**)

The screenshot shows the 'SQL Select' dialog box with the following fields and options:

- Select Columns:** *
- from Tables:** Iti_Evac, Grille_50m_ID_SR
- where Condition:** Iti_Evac.FromID=Grille_50m_ID_SR.FromID AND Iti_Evac.ToID=Grille_50m_ID_SR.ToID
- Group by Columns:** (empty)
- Order by Columns:** (empty)
- into Table Named:** Iti_Evac_Pop
- Options:** Browse Results, Find Results In Current Map Window
- Buttons:** OK, Cancel, Clear, Verify, Help, Save Template, Load Template
- Dropdowns:** Tables, Columns, Operators, Aggregates, Functions

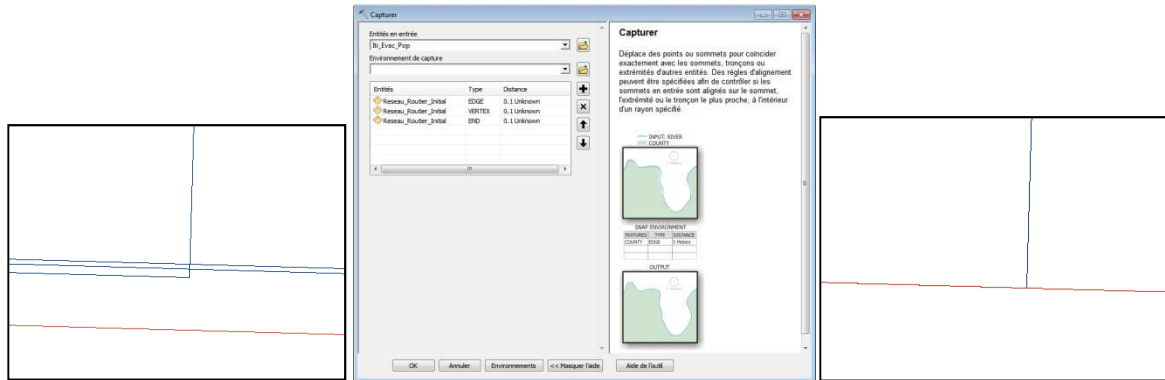
- Enregistrer le résultat sous le nom « **Iti_Evac_Pop** »

Enregistrer, il s'agit des itinéraires optimisés pour rejoindre les zones d'évacuation prioritaires vers les ZR avec pour chaque itinéraire les champs renseignés de la maille de départ, donc la population.

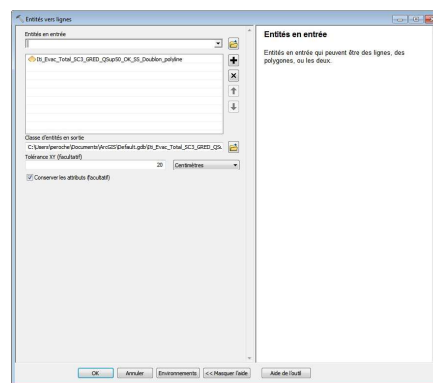
3/ ArcGis

Exporter les tables : « Iti_Evac_Pop » ; « PEZR » et « Pop » en fichier .shp

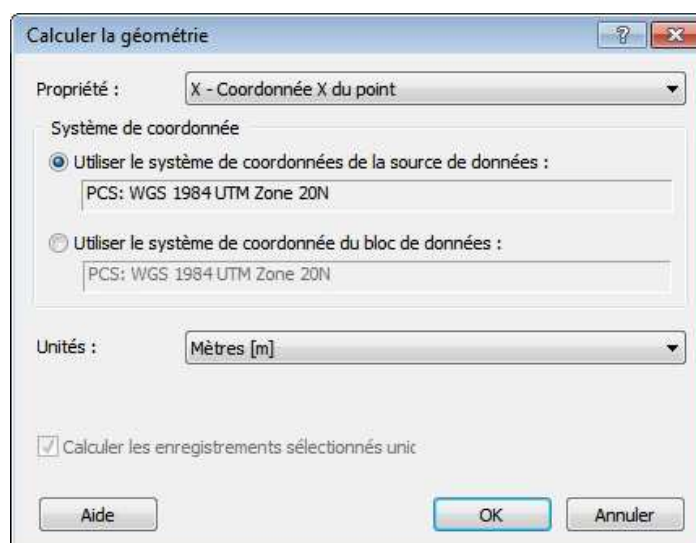
- Préparation des données qui vont servir à la cartographie finale et au calcul des informations
 - Utiliser l'outil « capture » pour améliorer la topologie des itinéraires à partir du réseau initial utilisé (« Gred » ou « IGN »)



- Découper les itinéraires d'évacuation les uns par rapport aux autres avec l'outil « Entité vers lignes » sur la table « Iti_Evac_Pop »



- Enregistrer cette nouvelle classe d'entité « Iti_Evac_Pop_Decoup »
- Créer deux nouvelles colonnes pour calculer les coordonnées X et Y du centroïde de l'ensemble des tronçons à l'aide de l'outil « calcul de géométrie » sur la couche « Iti_Evac_Pop_Decoup »



- Calculer la somme du nombre de personnes à l'aide de l'outil « fusionner » avec comme champ de fusion : TOID, X et Y

Annexe 9. Classes fonctionnelles des bâtiments diagnostiqués et valeurs d'effectifs ou de densité associées

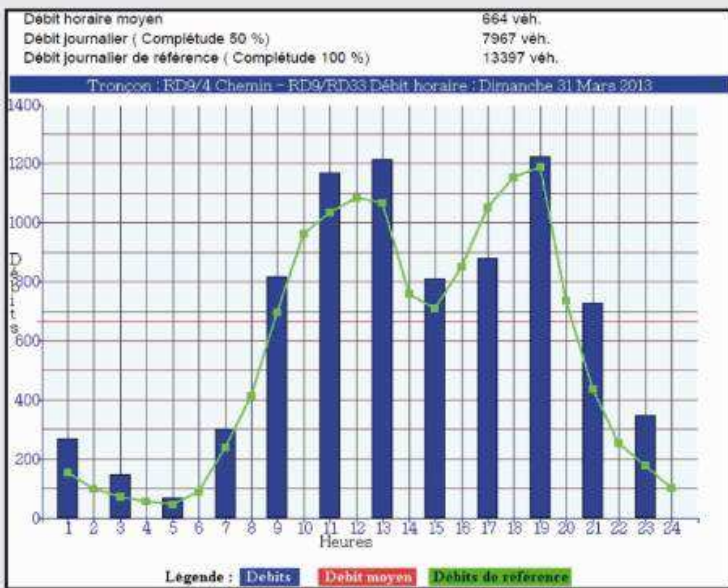
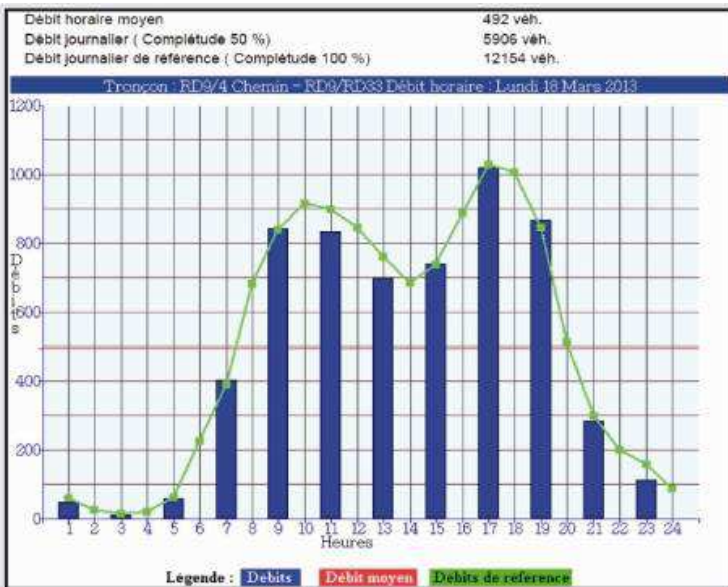
Codes des classes fonctionnelles	Caractéristiques des bâtiments regroupés	Densité	Source
HINDIV	Habitat individuel	Moyenne du nombre de personnes par foyer selon la commune	INSEE, 2009
HCOL	Habitat collectif		
LOC	location saisonnière		
INHAB	Habitat abandonnée, inhabité	0	UMR GRED
GARA	Garage privé, dépendance		
PCOM	Petit commerce, pharmacie, épicerie	1pers/m ² sur 1/3 de la surface	Guide ERP
BANK	Banque, assurance, concessionnaire...	1pers/10m ² accessibles au public	Guide ERP
ADMI_0	Service administratif ne recevant aucun public	1pers/20m ²	UMR GRED
ADMI_1	Service administratif recevant public	1pers/10m ² accessibles au public	Guide ERP
ASSO	Salle de regroupement d'associations	1pers/10m ² accessibles au public	UMR GRED
ESSO	Station service	1pers/m ² sur 1/3 de la surface	Guide ERP
GARE	Gare routière, ferrovière, aéroport	1pers/3m ²	UMR GRED
INDU	Bâtiments industriel ou agricole	1 personne/100m ²	UMR GRED
BAR	Café-terrasse, bar	Déclaration du propriétaire ou comptage ou au minimum 1 pers/m ²	Guide ERP
RESTO	Restaurant	Déclaration du propriétaire ou comptage ou au minimum 1 pers/m ²	Guide ERP
HOTEL	Hôtel	Effectifs (Rectorat, Club des hoteliers Martiniquais...)	Guide ERP
COLO	Colonie de vacances		
CANTI	Cantine		
EDUC	Ecole, collège, lycée, Ecole sup, Université		
EDUC_A	Equipement annexe de l'établissement (services administratifs, toilettes, salle de repose...)	0 car l'ensemble du personnel et déjà compté dans l'effectif	UMR GRED
MOL	Grande surface, super marché	1pers/5m ²	Guide ERP
SANTE	Maison de retraite, hôpital, clinique	1 pers. par lit + 1 pers./3 lits pour le personnel + 1	Guide ERP
SECU	Caserne de pompier, poste de police, de sécurité, prison	Effectifs	UMR GRED
CULT	Eglise, lieux de culte	Effectif ou 2pers/m ² sur l'espace pour fidèles (0,5 de la surface tot)	Guide ERP
MARCHE	Marché couvert, étal à poisson	1pers/2m ²	UMR GRED
HANG	Parking couvert, entrepôt, serre	1 personne/100m ²	UMR GRED
LOISIR	Gymnase, bibliothèque, centre de loisir	Effectifs ou 1pers/ 4 m ²	UMR GRED
GRADIN	Gradin, salle de spectacle	Déclaration du propriétaire ou 1 pers./siège + 1 pers./0,50m de bancs ou de gradins + spectateurs debout (3 pers./m ² ou 5 pers./mètre linéaire)	Guide ERP
PTINSTALL	Equipement de service (station service, arrêt de bus, abris, sanitaire, vestiaire)	2 personnes dans la journée	UMR GRED

© Insee 2009, Base Chiffre Clés Logement disponible en ligne

WALLE M-L, La Police des établissements recevant du public, Ed. Territorial, 103p.

UMR GRED : les chiffres avancés sont établis à partir d'extrapolations du guide ERP et de comptages

Annexe 10. Comptage du trafic routier sur un tronçon majeur d'accès aux plages de la commune de Sainte-Anne



Données de la station de comptage permanente du Conseil Général 972 située au niveau du rond-point de morne Poirier à l'entrée de la commune de Sainte-Anne. Il s'agit des données cumulées aller-retour (source <http://www.inforoute.cg972.fr>)



Conseil Général de la Martinique

MRA9B.p - POIRIER_MERE
Tronçon : RD9/4 Chemin - RD9/RD33

Annexe 11. Comparaison des résultats de comptages des usagers des plages selon trois méthodes

- Première méthode : comptage à partir de photographies

Un appareil photo est placé de manière stratégique sur un trépied afin de photographier l'ensemble de la plage en seulement quelques secondes (figure 1). Cette technique permet de définir la fréquentation du site en post traitement à un instant T. Elle offre l'avantage de pouvoir spatialiser plus précisément les concentrations de population. Par contre, le matériel photographique n'étant pas sécurisé il n'est pas possible de le laisser sur place pour un déclenchement automatique heure par heure, par exemple. De plus, la zone à couvrir oblige à prendre plusieurs clichés selon différents niveaux de focale pour permettre le comptage des plagistes. L'intervention humaine est donc indispensable.

Nous avons compté l'ensemble des usagers présents : les baigneurs, les randonneurs pédestres, à vélo, les pratiquants de sport de glisse, etc. Seuls les individus à bord des bateaux au mouillage n'ont pas été comptabilisés. Cette méthode nécessite de disposer d'un espace dégagé avec un angle de vue propice à la prise de photos pour l'ensemble de la plage.



Figure 1 : Exemple d'une prise de vue panoramique utilisée pour le comptage de fréquentation

- Seconde méthode : comptage visuel du nombre de voitures

Au vu de la forte fréquentation de certaines plages ainsi que de leur étendue spatiale, nous avons mis en place une méthode basée sur le comptage visuel du nombre de voitures stationnées sur le parking de la plage des Salines. Cette méthode est réalisable car la plage est desservie par une route unique. De plus, le nombre d'emplacements pour se stationner est limité en capacité. Le comptage a été effectué vers 13h30. Un premier comptage des véhicules a été effectué, puis un second a permis de dénombrer

les individus présents sur le littoral en cohérence avec le potentiel de stationnement. Nous avons déduit un nombre moyen théorique de trois personnes par véhicule. Cette moyenne a été extrapolée à l'ensemble des voitures stationnées sur les parkings du secteur des Salines.

- Troisième méthode : comptage manuel

Le comptage est réalisé directement par un agent sur le site étudié. Il se déplace le long de la plage tout en comptant à la fois les individus présents dans l'eau, sur la plage et l'arrière plage. Seuls les individus à bords des bateaux au mouillage ne sont pas comptabilisés.

Ces trois méthodes ont été mises en œuvre à trois reprises au cours d'une journée en semaine en période de basse saison et une fois en week-end en période de basse saison sur la plage de Grande Anse des Salines. Un premier relevé photographique contenant environ 16 photos a été réalisé. Dans la foulée, un passage sur la plage d'une durée de 15 minutes a permis le comptage des individus *in situ*. Sur le retour, l'ensemble des voitures stationnées a été compté en moins de 10 minutes. Les moyens humains limités n'ont pas permis de déployer ces trois méthodes de manière simultanée.

Annexe 12. Présentation des outils employés pour le calcul sur graphe des temps d'évacuation des navires

- Préparation des données et calculs des temps d'évacuation des navires

La première opération à effectuer est d'affecter à chaque point d'une couche à traiter (position des navires, zones refuges) le nœud du réseau le plus proche. Ceci permet d'optimiser la phase de calcul.

Ensuite, pour chaque couche, le script recherche le refuge le plus proche et l'affecte à la table attributaire avec le coût de déplacement.

Le dernier point consiste à calculer la distance entre la position du navire et son point de refuge le plus proche puis de générer un tableau de statistiques simples (moyenne, max, min) d'évacuation des navires (poste_a_quai) pour chaque port.

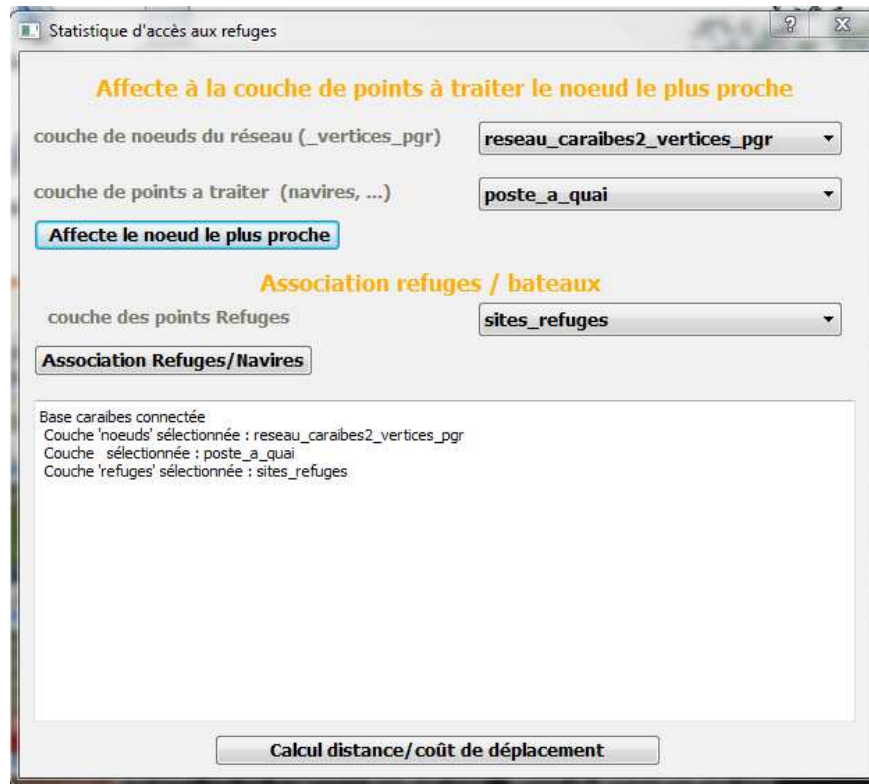


Figure 1: Capture d'écran de l'interface du script python

Tableau 1: Extrait d'une table de sortie du modèle classée selon le temps moyen de navigation

Port	Nombre de navires	Temps moyen (min)	Distance moyenne (km)
Basse_Terre(Guadeloupe)	2	8	2
Frederiksted(USVI)	2	9	1
Fort_de_France(Martinique)	15	27	7
Colon(Panama)	18	44	12
Santo_Tomas(Guatemala)	3	85	38
Tampa_Bay(USA)	30	213	74

- Exemple de calculs du plus court chemin au départ d'un navire à quai vers un site de mise en sécurité à partir d'une interface web (web mapping)

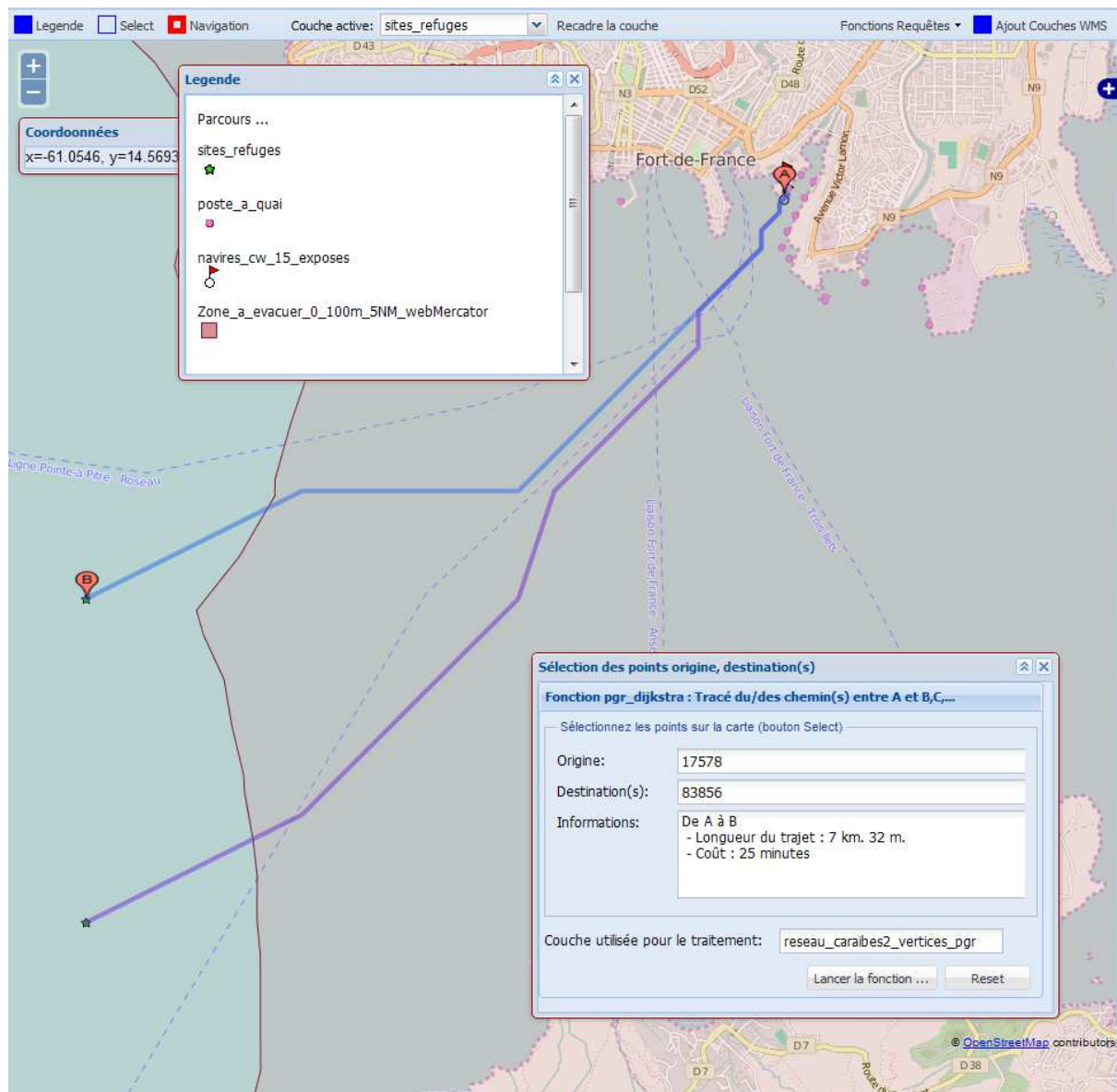


Figure 2: Parcours d'un navire vers une zone refuge

Sur un fond OSM on peut voir les postes à quai, les navires exposés et les sites de mise en sécurité.

La partie grisée représente la zone à évacuer en cas de tsunami.

Le calcul du chemin le plus court vers une zone refuge s'appuie sur un script PHP qui fait appel aux fonctions de géotraitement (*pg_routing: fonction pgr_dijkstra*) de postgresql/postgis.

Ces différentes couches géographiques et la couche réseau (*reseau_caribes2*) sont gérées par PostgreSQL. La vitesse moyenne pour rejoindre le point de refuge dépasse à peine les 16 km/h soit une vitesse moyenne légèrement inférieure à 10 Nœuds.

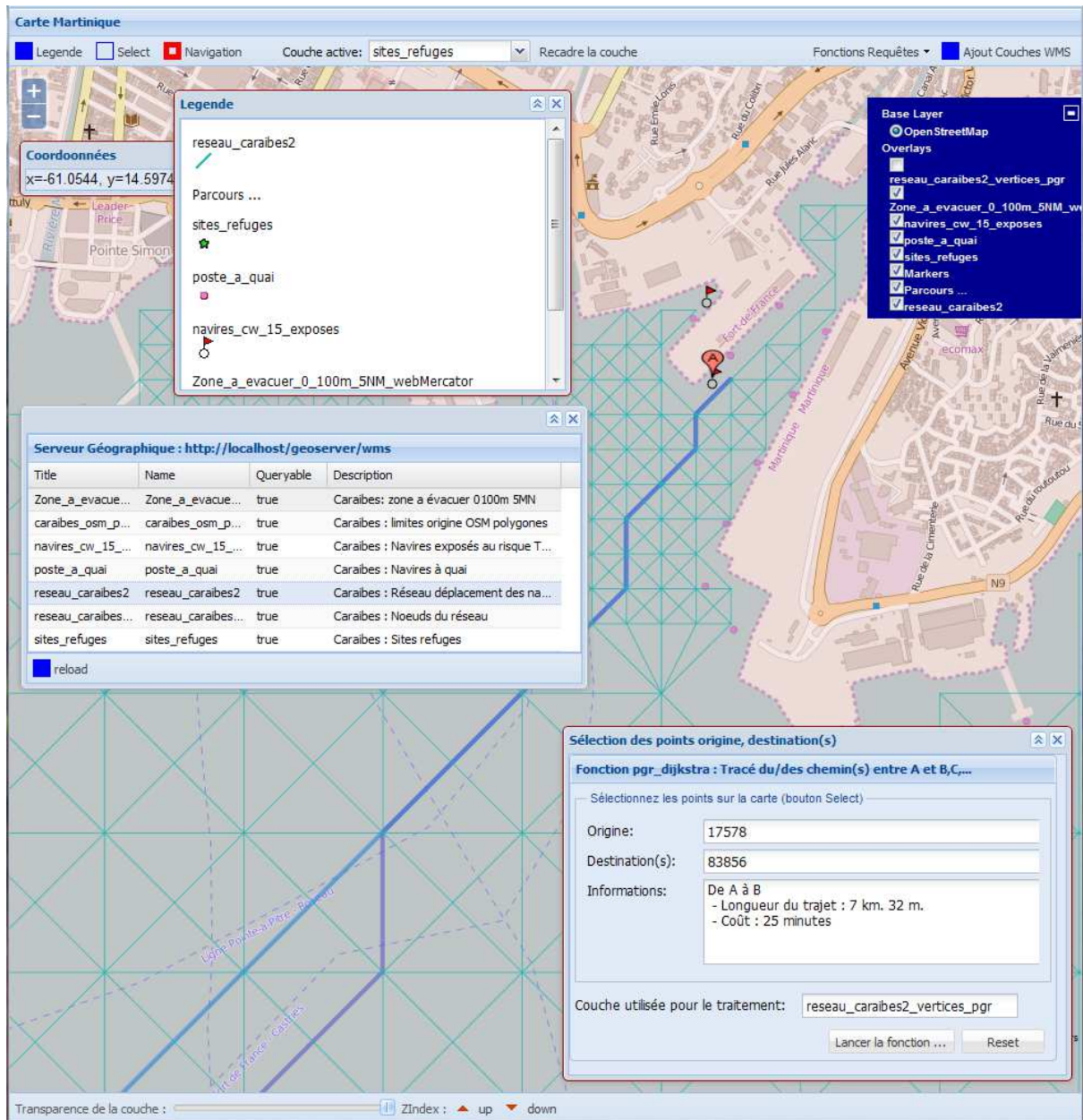


Figure 3: Détail du parcours effectué pour sortir du port.

Cette interface permet l'ajout « à la volée » de couches au format WMS provenant d'un serveur géographique (Geoserver 1.8).

Le réseau est affiché pour mieux voir les segments empruntés.

A chaque segment est affecté un coût calculé en fonction du pas auquel il appartient et de sa longueur. Ce coût est multiplié par deux pour les segments près des côtes ce qui éloigne le navire le plus possible des côtes.

- Exemple de calcul du plus court chemin au départ d'un navire à quai vers un site de mise en sécurité à partir du logiciel Qgis

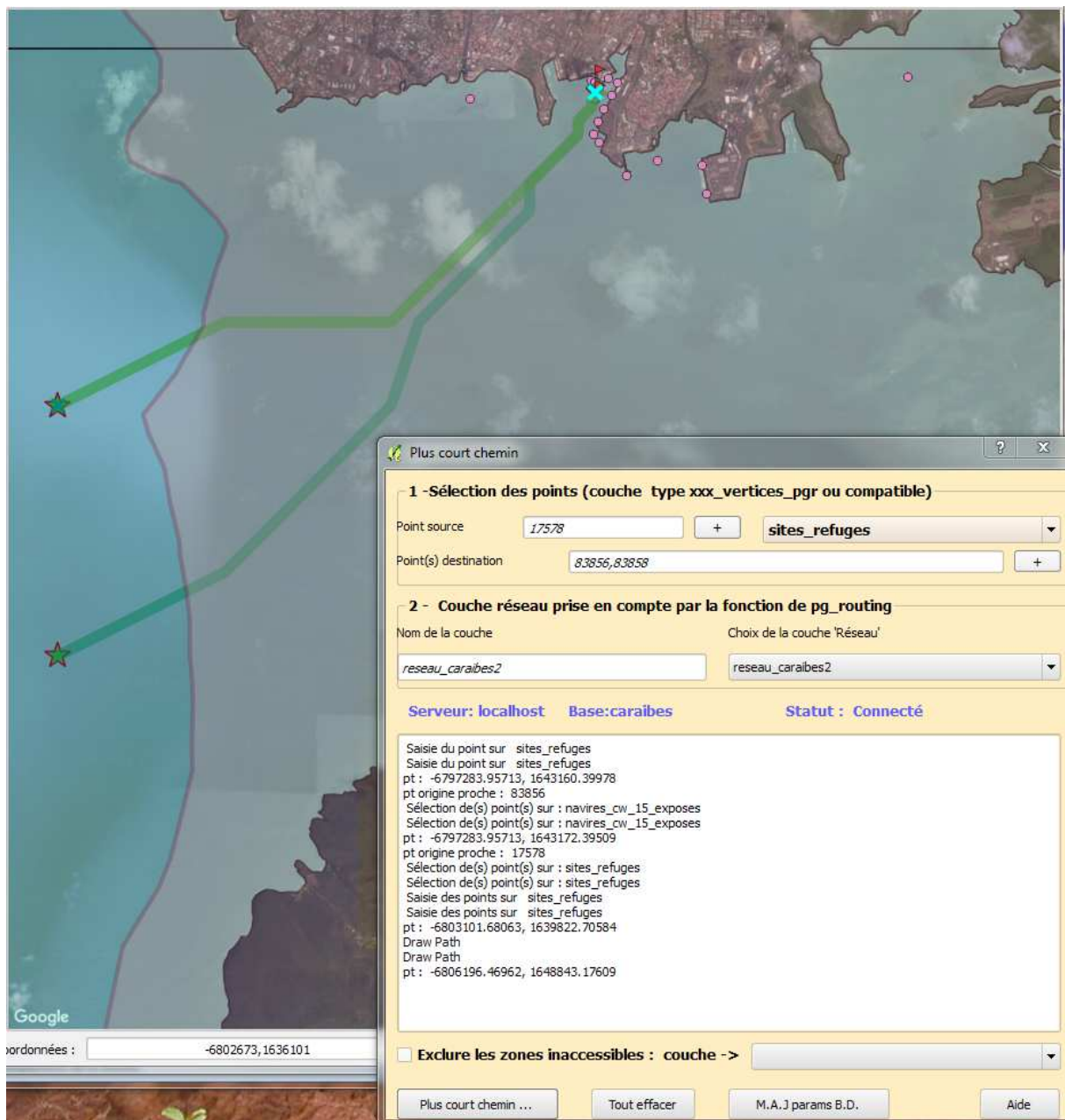


Figure 4 : Parcours d'un navire vers une zone refuge

Ici deux points refuges sont pris en compte. Le calcul est effectué par une fonction python (plug-in python) qui fait appel aux fonctions de géotraitement (pg_routing: fonction pgr_dijkstra) de PostgreSQL/postgis.

Le fond de carte est un fond Google et les couches sont chargées à partir de PostgreSQL.

Annexe 13. Extraits de la grille d'analyse sémiologique et graphique des plans d'évacuations existants à l'échelle mondiale

- Informations générales des plans d'évacuation analysés

ID	Nom	Adresse-web	Version web-mapping / Application mobile	Adresse web-mapping / application mobile	Autorité de prescription	Aire régionale	Pays	Localité
1	Mapa de Desajajo por Tsunami - Mayaguez	http://poseidon.uprm.edu/	Non		Federal Emergency Management Agency	Caraïbe	Porto-Rico	Mayaguez
2	Tsunami evacuation map - Astoria, Oregon	http://www.oregongeology.org/pubs/tsubrochures/AstoriaEvacBrochure-6-6-13_onscreen.pdf	Application mobile	https://play.google.com/store/apps/details?id=org.nanoos.tsunami&hl=en ou https://itunes.apple.com/us/app/tsunamievac-geocaching.com/id4220-86e0-655fe01c787a et https://itunes.apple.com/fr/app/	Department of Geology and Mineral Industries - Oregon	Côte pacifique de l'Am.Nord	Etats-Unis	Astoria, Oregon
3	Tsunami evacuation map of Waikiki - Honolulu, Hawaï	http://www.honolulu.gov/demevacuate/tsunamimaps.html	Web mapping et Application mobile	http://www.geocaching.com/geocache/GC32XEG_tsunami-in-waikiki?guid=2deac96a-dd4c-4220-86e0-655fe01c787a et https://itunes.apple.com/fr/app/	City and county of Honolulu	Pacifique	Hawaï, Etats-Unis	Waikiki, Oahu
4	Tsunami evacuation Maui Map 1	http://www.co.maui.hi.us/index.aspx?NID=261	Non		Maui County	Pacifique	Hawaï, Etats-Unis	Maui
5	Plan de proteccion civilante tsunami	http://repositoriodigitalonemi.cl/web/handle/123456789/1661	Non		Ministerio del Interior y Seguridad Publica	Côte pacifique de l'Am.Sud	Chili	Coquimbo

- Critères relatifs à la zone de danger

Zone / symbole de danger	Nombre de zone de danger	Appellation de la zone de danger 1	Appellation de la zone de danger 2	Appellation de la zone de danger 3	Mode de différenciation des zones	Couleur de la zone de danger 1 + Code RVB	Couleur de la zone de danger 2 + Code RVB	Couleur de la zone de danger 3 + Code RVB	Couleur des symboles + code RVB	Méthode de construction de la zone à évacuer (modélisation /tranche)	Altitude en m (Tranche d'altitude)
Zone	1	Zona de desalojo			Couleur	Jaune (R : 255, V : 255, B : 115)				Modélisation élargie	
Zone	2	Evacuation zone for a local cascadia earthquake and tsunami / Zona de evacuacion para un tsunami distante	Evacuation zone for a distant tsunami / Zona de evacuacion para un tsunami distante		Couleur	Jaune (R : 243, V : 234, B : 85)	Orange (R : 246, V : 182, B : 77)			Modélisation	
Zone	1	Tsunami evacuation zone			Couleur hachurée	Rouge				Modélisation élargie	
Zone	1				Couleur	Gris (R: 204, V: 204, B: 204)					
Zone	1	Area a evacuar			Couleur	Beige (R:255, V:234, B:190)				Modélisation	

- Critères relatifs aux informations spécifiques aux dispositifs d'évacuation

Zone / ligne de sécurité	Appellation	Couleur + code RVB	Site refuge horizontal	Appellation	Type de symbole	Désignation du site	Site refuge vertical	Appellation	Type de symbole	Désignation du site	Itinéraire d'évacuation	Nombre	Appellation de l'itinéraire d'évacuation 1	Appellation de l'itinéraire d'évacuation 2	Appellation de l'itinéraire d'évacuation 3	Type de symbole	Couleur de l'itinéraire d'évacuation 1 + code RVB	Couleur de l'itinéraire d'évacuation 2 + code RVB	Couleur de l'itinéraire d'évacuation 3 + code RVB
Zone	Zona segura	Vert (R : 115, V : 178, B : 115)	Oui	Lugar de asamblea	Ponctuel	Non	Non				Oui	1	Ruta de desalojo			Flèche	Rouge (R : 255, V : 0, B : 0)		
Zone	Outside hazard area / Zona de peligro exterior	Vert (R : 55, V : 170, B : 73)	Oui	Assembly area / Area reunion	Ponctuel	Non	Non				Oui	1	Evacuation route / Ruta de evacuacion			Flèche	Noir (R : 5, V : 5, B : 7)		
Ligne	Tsunami evacuation line	Rouge (R : 250, V : 52, B : 17)	Non				Non				Non								
Aucun			Non				Non				Non								
Ligne	Linea de seguridad	Vert (R : 112, V : 168, B : 0)	Oui	Punto de encuentro	Ponctuel	Non	Non				Oui	1	Vias de evacuacion			Tracé directionnel	Rouge (R : 228, V : 45, B : 34)		

- Caractérisation des éléments relatifs à l'habillage de la carte

Réseau routier	Bâtiments	Ponts	Point d'intérêt de gestion de crise	Point d'intérêt d'aide à la localisation	Localisation des sirènes	Echelle d'appréciation de la carte	Toponymie	Relief / Ombrage	Source d'informations complémentaires	Type de fonds de carte	Logo(s) d'identification de l'autorité de prescription et / ou des	Label "tsunami ready"	Label "tsunami evacuation route"
Oui	Non	Oui	Oui	Non	Non	Commune	Oui	Non	Non	Neutre	Non	Non	Non
Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Commune	Oui	Oui	Oui	Relief	Oui	Non	Oui
Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Quartier	Oui	Non	Non	Neutre	Oui	Non	Non
Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Plage	Oui	Non	Non	Neutre	Non	Non	Non
Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Ville	Oui	Non	Oui	Neutre	Oui	Non	Non

Critères relatifs aux informations contextuelles

Existence de légende	Niveau de détail global du texte	Existence d'une échelle	Existence de consignes	Mode d'évacuation préconisé	Nombre de langue
Oui	Moyennement précis	Oui	Non	Aucun	1
Oui	Très précis	Oui	Oui	Pédestre	2
Oui	Imprécis	Oui	Oui	Aucun	1
Non		Non	Non	Aucun	1
Oui	Imprécis	Non	Non	Aucun	1

Annexe 14. Questionnaire d'enquête réalisé pour l'évaluation des « capacités de réponse des navires face aux tsunamis dans le bassin caribéen »



QUESTIONNAIRE D'ENQUETE

Evaluation des capacités de réponse des navires face aux tsunamis dans le bassin caribéen

Avant-propos

Ce questionnaire est diffusé dans le cadre de recherches menées par M. Péroche, doctorant en 3^{ème} année à l'UMR GRED (Université Montpellier 3 / IRD), dont les travaux portent sur la planification et la gestion de crise tsunami en Martinique et dans les Caraïbes. Le questionnaire qui vous est proposé vise quatre objectifs :

- dresser un état des lieux sur la prise en compte du risque tsunami par les armateurs dont les navires croisent dans les Caraïbes ;
- comprendre l'organisation des alertes au sein de différentes compagnies (chaîne de diffusion des messages, systèmes de communication employés, type de messages retransmis) ;
- évaluer les attentes et les contraintes techniques des armateurs face au risque de tsunamis ;
- améliorer les consignes de mise en sécurité des navires dans les ports et assurer leur cohérence aux échelles départementale et régionale.

La diffusion de ce questionnaire est soutenue par la Commission Océanographique Intergouvernementale de l'Unesco, notamment par son rôle de coordinateur pour la mise en place d'un système régional d'alerte précoce aux tsunamis dans la Caraïbe. Les résultats de ces travaux feront l'objet de publications scientifiques communes et à terme d'un guide méthodologique destiné aux compagnies maritimes et capitaineries.

Localement, cette recherche est également soutenue par les institutions françaises en charge de la gestion des risques à l'échelle régionale :

- dans le domaine maritime par le CROSS-AG (Centre Régional Opérationnel de Surveillance et de Sauvetage aux Antilles et en Guyane) ;
- dans le domaine terrestre au travers d'une convention signée entre l'EMIZA (Etat-major Interministériel de Zone Antilles) et l'UMR GRED.

Les résultats agrégés issus de ce questionnaire seront exploités dans les travaux de thèse de M. Péroche ainsi que pour des publications scientifiques. Une demande d'accord par écrit vous sera adressée afin de pouvoir citer le nom de votre compagnie dans ces travaux le cas échéant.

UMR GRED – Mathieu Péroche
Centre IRD de Montpellier
34 394 Montpellier Cedex

mathieu.peroche@gmail.com
Téléphone : 06 96 52 28 99
06 84 77 37 50



IOC UNESCO – Bernardo Aliaga
1 rue Miollis
75 732 Paris Cedex 15

b.aliaga@unesco.org



Consignes

Veillez répondre aux questions en fonction des différentes situations du navire (en pleine mer, à l'approche des côtes, au mouillage, à quai) lorsque vous trouvez cela pertinent.

Ne limitez pas le texte de vos réponses aux contours des cadres gris, la mise en page n'a pas d'importance.

Les cases à cocher sont activables selon la procédure suivante : **Clic droit sur la case – Propriété – dans Valeur par défaut, sélectionner « Case activée » - OK.**

1) Informations générales

1. Nom de la compagnie :

2. Votre grade et/ou vos responsabilités au sein de la compagnie :

3. Activité commerciale principale de la compagnie :

4. Principales lignes d'activités commerciales de la compagnie (Veillez cocher la ou les réponses) :

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Mer des Caraïbes | <input type="checkbox"/> Océan Atlantique |
| <input type="checkbox"/> Mer Méditerranée | <input type="checkbox"/> Océan Indien |
| <input type="checkbox"/> Océan Atlantique | <input type="checkbox"/> Océan Arctique |
| <input type="checkbox"/> Océan Austral | |

5. Nombre de navires au sein de la flotte :

2) Capacité de gestion de crise tsunami au sein de la compagnie

6. Votre compagnie dispose-t-elle d'un moyen de suivi en temps réel des navires ?

- Oui
 Non

7. Votre compagnie dispose-t-elle d'une cellule de gestion de crise avec du personnel permanent en veille (24h/7j) ?

- Oui
 Non

8. Votre compagnie souscrit-elle aux services de fournisseurs de données météorologiques et marines ?

- Oui
 Non

9. Si oui, lesquels ?

10. Si oui, ce fournisseur propose-t-il un suivi des alertes tsunamis ?

- Oui
 Non

11. Quels systèmes de communication utilisez-vous pour communiquer avec les navires en situation normale ?

12. Disposez-vous d'un système de communication particulier avec les navires en situation de crise ?

- Oui
 Non

13. Si oui, lesquels ?

14. Le siège de votre compagnie, ou la cellule de suivi des navires, ont-ils déjà reçu des messages d'alerte tsunami ?

15. Si oui, par quel(s) organisme(s) ?

16. Si oui, selon quel(s) moyen(s) de communication ?

17. Si oui, pour quel(s) événement(s) ?

18. Au cours d'une alerte tsunami, y a-t-il une ou plusieurs personnes en charge du suivi en temps réel de l'événement au sein de la compagnie ?

- Oui
 Non

19. Souhaiteriez-vous que le siège de votre compagnie soit informé des mesures d'urgence prises par les ports de la Caraïbe en cas d'alerte tsunami ?

- Oui
 Non

20. Si oui, selon quels moyens de communication et/ou selon quels intermédiaires ?

3) Capacité de gestion de crise tsunami sur le navire

21. Votre compagnie dispose-t-elle de procédures opérationnelles de mise en sécurité des navires en cas d'alerte tsunami ?

- Oui
 Non

22. Si oui, pouvez-vous détailler la chaîne de diffusion du message d'alerte ?

23. Si oui, pouvez-vous détailler les principales procédures de mise en sécurité des navires ?

24. Une partie du personnel naviguant est-il formé au risque de tsunami ? (connaissance générale de l'aléa, dommages potentiels au navire, situation de danger des navires ...)

- Oui
 Non

25. Aujourd'hui, les capitaines de vos navires reçoivent-ils systématiquement un message en cas d'alerte tsunami ?

- Oui, où qu'ils soient dans le bassin caribéen
 Non, ça dépend de sa distance par rapport à la côte
 Non, ça dépend du pays d'escale
 Non, jamais
 Autre :

26. Si oui, selon quel(s) moyen(s) de communication reçoivent-ils le message ?

27. Selon vous, quels sont les organismes en charge de la diffusion des alertes tsunamis pour les navires ?

28. Selon vous, quels sont les organismes les mieux placés pour diffuser une alerte tsunami vers les navires ?

29. Selon vous, quels sont les systèmes de communication les mieux appropriés pour la diffusion d'un message d'alerte tsunami sur les navires ?

- Lorsqu'ils sont au port :

- Lorsqu'ils sont en mer :

30. Par quel autre système de communication, la redondance du message devrait-elle être assurée sur les navires ?

31. Souhaitez-vous que des consignes préventives face au risque de tsunami soient présentées aux capitaines dès leur entrée au port ?

- Oui
 Non

32. Si non, pourquoi ?

33. Souhaitez-vous que les capitaines reçoivent des consignes individualisées lors d'une alerte tsunami ?

- Oui quel que soit la situation du navire
 Oui, mais uniquement lorsque le navire est à quai
 Autre, veuillez détailler :

34. Pourquoi ?

35. Quelles sont les conséquences que vous craignez le plus en cas de tsunami pour les navires à quai ?

4) Retour d'expérience de la compagnie en termes d'alerte et de gestion de crise tsunami

Veillez répondre suivant l'expérience la plus récente de l'un de vos navires soumis à une alerte tsunami

36. Date de l'événement :

37. Type de navire :

38. Nom du port si le navire était à quai :

39. Nom du port de destination si le navire était en mer :

40. Le navire a-t-il subi des dommages ?

- Oui
 Non

41. Si oui, de quelles natures ?

42. Un message d'alerte a-t-il été diffusé au capitaine du navire ?

43. Si oui, par quel(s) organisme(s) ?

44. Selon quel(s) système(s) de communication ?

45. Des consignes de sécurité spécifiques ont-elles été diffusées au capitaine ?

46. Si oui, lesquelles et par qui ?

47. Le siège de la compagnie a-t-il été informé de l'alerte tsunami en temps réel ?

- Oui
 Non

48. Si oui, par quel(s) organisme(s) ?

49. Selon quel(s) système(s) de communication ?

50. Quelles ont été les principales actions à mener par l'équipage du navire ?

51. Un retour d'expérience au sein de votre compagnie a-t-il été réalisé suite à la présence de l'un de vos navires au cours d'un tsunami ?

52. D'après votre expérience et en fonction de l'organisation interne de votre compagnie, pouvez-vous proposer une organisation de l'alerte tsunami qui vous semble pertinente en fonction de la position du navire :

- lorsqu'il est en mer :

- lorsqu'il est à quai :

53. Souhaitez-vous être destinataire des résultats de cette étude ?

54. Accepteriez-vous d'apporter à nouveau votre collaboration à cette étude pour une éventuelle validation des mesures qui seront proposées ?

55. Si oui, à quelle adresse mail pouvons nous vous recontacter ?

Annexe 15. Fiche du projet EXPLOIT « EXPLOItation et Transfert vers les collectivités des Antilles françaises d'une méthode de planification des évacuations en cas d'alerte tsunami »



Fiche programme de recherche ou contrat

Intitulé du projet : EXPLOIT « EXPLOItation et Transfert vers les collectivités des Antilles françaises d'une méthode de planification des évacuations en cas d'alerte tsunami »

Responsable au sein de GRED : Frédéric LEONE

Durée : 3 ans

Dates début et fin des travaux : Janvier 2016 – Janvier 2019

Equipe mobilisée (noms des membres de GRED) : Frédéric LEONE, Mathieu PEROUCHE, Monique GHERARDI, Jean-François GIRRES, étudiants du Master GCRN

Partenaires locaux : EMIZA, CRPLC, GéoMartinique, Collectivités.

Financeurs : Fondation de France, UM3, UA

Montant financier du projet :

Territoire d'étude : Petites Antilles

Résumé du projet : Ce projet répond à un véritable défi et à une forte demande des pouvoirs publics aux Petites Antilles françaises : assurer la sécurité d'au moins 180 000 personnes exposées au risque de tsunami sur près de 60 communes littorales, en 3 ans. Pour ce faire, l'UMR GRED (UPVM & IRD), associée à des collaborateurs scientifiques locaux (UMR CRPLC/UA) et à l'Etat-Major Interministériel de la Zone de défense et sécurité Antilles (EMIZA), propose d'exploiter une méthodologie d'élaboration de plans d'évacuation spécifiquement dédiée aux tsunamis et cofinancée par un précédent appel à projet de la Fondation de France (2012-2015). Cette planification des évacuations relève d'une recherche-action car le transfert opérationnel de la méthode et l'accompagnement des collectivités dans cette démarche responsable, posent de nouvelles contraintes techniques et décisionnelles qu'il convient de lever par la concertation lors de la phase de validation proposée. Afin de garantir l'appropriation locale de ces plans, leur mise à jour régulière et leur expérimentation (simulacres d'évacuation), le projet propose, avec le soutien de l'EMIZA, de développer un cahier des charges pour l'obtention d'un label local de type « *tsunami ready* » et d'assurer la promotion de ces plans au moyen de différents supports et en particulier leur mise en ligne sur la plateforme *Webgis* GéoMartinique. La mise en place de ce dispositif opérationnel, accompagné par la Fondation de France, reposera sur des procédures et des affichages (cartes, panneaux), normalisés et adaptés au contexte local, conformément aux recommandations de l'UNESCO. Ce dispositif préventif constitue la dernière étape (*last mile*) du système d'alerte en cas de tsunami du bassin caribéen (CARIBE-EWS) et représente par sa couverture (60 communes), la première initiative de ce genre sur un archipel français.

Mots clés (5) : Tsunami, Plan évacuation, Gestion de crise, SIG, Antilles

Annexe 16. Fiche du projet MAPMUXING

MapMuxing : Multiplexage cartographique multi-dimensionnel

Grâce à des applications comme Google Maps, OpenStreetMap ou le Géoportail français, le grand public a facilement accès à de nombreuses données géographiques. Les opérations liées à la combinaison de données et de représentations, ainsi que celles plus basiques liées à la navigation, restent cependant difficiles. Par exemple, obtenir des détails sur un point d'intérêt tout en conservant une vue globale d'un itinéraire demande un nombre d'actions et un effort cognitif importants. Pour les spécialistes, les problèmes sont encore plus complexes et les exigences de performance plus grandes. Lors d'une crise liée à une catastrophe naturelle comme un tsunami, les analystes doivent identifier rapidement les zones exposées et communiquer efficacement avec les acteurs sur le terrain. MapMuxing réunit des chercheurs en IHM et en Géomatique afin de proposer de nouvelles méthodes pour combiner différentes représentations cartographiques et naviguer efficacement entre ces représentations. Ces méthodes combindraient des techniques de cartographie automatique comme la généralisation cartographique ou la stylisation cartographique, et des techniques IHM innovantes (comme la JellyLens permettant de combiner les représentations cartographiques). L'application principale du projet est la navigation dans les représentations cartographiques pour la gestion des risques de tsunamis.

Responsable du projet (au sein de Gred) : Jean-François Girres

Équipe mobilisée au sein de Gred : Jean-François Girres, Frédéric Leone, Mathieu Péroche, Jean-Paul Bord, Monique Gherardi

Dates début et fin des travaux : 2014-2018

Partenaires : IGN-COGIT, INRIA Saclay

Terrains d'étude : Martinique, zone Caraïbes

Mots clés : Géovisualisation, Multiplexage cartographique, interfaces homme-machine, tsunami, gestion de crise

Site internet : <http://mapmuxing.ign.fr/>

Annexe 17. Fiche du projet ASTARTE



Fiche programme de recherche ou contrat

Intitulé du projet : Assessment, Strategy And Risk reduction for Tsunamis in Europe (ASTARTE)

Responsable au sein de GRED : F. Leone

Dates début et fin des travaux : 2014-2018

Equipe mobilisée (noms des membres de GRED) : M. Gherardi, F. Leone, M. Péroche, étudiants du master GCRN (UPVM)

Partenaires : 27 institutions scientifiques européennes

Financeurs : Europe (FP7-ENV)

Montant financier du projet :

Terrains d'étude : 7 sites européens

Résumé du projet (en français et en anglais si disponible) :

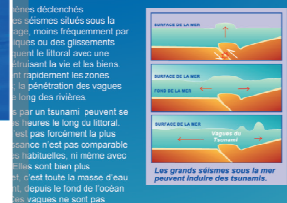
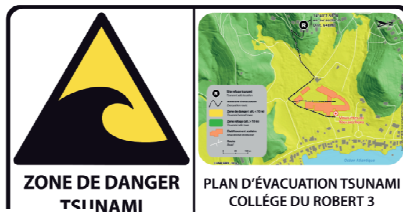
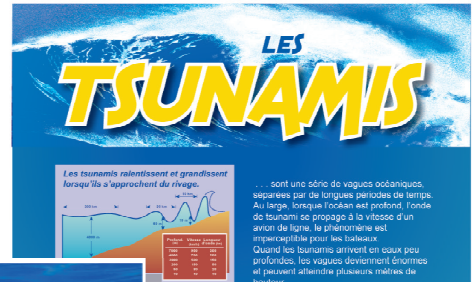
ASTARTE is organized to foster tsunami resilience in Europe, through innovative research on scientific problems critical to enhance forecast skills in terms of sources, propagation and impact. ASTARTE will employ lessons on coastal resilience learned from disaster surveys following tsunamis and hurricane surges. Within ASTARTE, we will acquire new information to complete the existing European knowledge base, and we will benefit from a stronger integration than ever attempted previously in the field. This will involve close cooperation with coastal populations, civil protection, emergency management and other local organizations.

GRED y assure, pour le compte et en partenariat avec l'UMR GLP de Meudon (CNRS, Paris 1), le développement de plans d'évacuation pédestre sur Tanger (Maroc) et Syracuse (Italie) en combinant une part de modélisation (itinéraires) et une part d'investigations *in situ* (approche multicritères de recherche de sites refuges). La méthode développée sera ensuite transposée par d'autres équipes sur les autres sites du projet.

Mots clés (5) : Tsunami, résilience, évacuation, perception, Méditerranée

Site internet : <http://www.astarte-project.eu/>

Annexe 18. Contribution à l'élaboration de posters pour l'information préventive tsunami



prenez à reconnaître les naturels d'un tsunami...

Le tsunami est l'un de ces signes naturels. Si vous êtes sur une plage, un phénomène de tsunami a pu se former. Il peut être précédé par une élévation anormale ou un rapide retrait de la mer.

Que faire en cas de danger...

En cas de tsunami, cherchez quelque chose pour flotter. Soyez toujours prêts à fuir. Ne restez pas en voiture. Ne tentez pas de fuir à pied. Ne retournez pas à la mer. Ne restez pas dans les zones basses vers des points de refuge. Les vagues peuvent remonter le lit. Si vous êtes en mer, saisissez un objet solide et possible de grimper à l'échelle le plus élevé ou sur le toit. A défaut, grimpez et agrippez-vous. Si vous êtes en mer, cherchez quelque chose pour flotter. Soyez toujours prêts à fuir. Ne restez pas en voiture. Ne tentez pas de fuir à pied. Ne retournez pas à la mer. Ne restez pas dans les zones basses vers des points de refuge. Les vagues peuvent remonter le lit. Si vous êtes en mer, saisissez un objet solide et possible de grimper à l'échelle le plus élevé ou sur le toit. A défaut, grimpez et agrippez-vous.

CONSIGNES DE SÉCURITÉ EN CAS DE TSUNAMI

- 1 SOYEZ TOUJOURS PRÊT, UN SÉISMES ET UN TSUNAMI PEUVENT SURVENIR À TOUT MOMENT**
 - Évaluez en plus facilité de mise en sécurité (PFAO)
 - Établissez un kit d'urgence avec du matériel de première nécessité (cartes de 1er soin, médicaments, moyen de communication, lampe à piles, ...)
 - Repérez les zones d'évacuation des zones de danger (barrages, ponts, etc.)
- 2 PENDANT LES SECOURS SISMQUES, PROTÉGEZ-VOUS**
 - Mettez-vous à terre
 - Abritez-vous
 - Tenez bon
- 3 DÈS LA FIN DES SECOURS, SOYEZ ATTENTIF AUX ALERTES OFFICIELLES, SOYEZ ATTENTIF AUX SIGNES NATURELS D'UN TSUNAMI**
 - En cas de diffusion d'une alerte officielle, respectez sans délai les consignes d'évacuation des autorités.
 - Si vous percevez l'un des signes naturels suivants, vous recevez un système très puissant ou prolongé (10-15m) vous devez immédiatement évacuer la zone de la mer vers un lieu sûr (barrage, pont, etc.)
- 4 METTEZ-VOUS EN SÉCURITÉ**
 - En cas de préférence en fonction de votre position et vos possibilités.
 - Éloignez-vous rapidement à pied des bords de mer, jusqu'à atteindre un point refuge.
 - Restez dans un lieu sûr et évitez de grimper ce dernier de nuit.
 - En dernier recours, grimpez à un arbre.
 - Si vous êtes en bateau, dirigez-vous vers le large jusqu'à atteindre une profondeur supérieure à 100 mètres.
- 5 Restez en lieu sûr jusqu'à ce que les autorités déclarent tout danger écarté, ce qui peut prendre de nombreuses heures.**

ZONE DE DANGER TSUNAMI

ITINÉRAIRE D'ÉVACUATION

ITINÉRAIRE D'ÉVACUATION TSUNAMI

430 m

620 m

Panneau du site refuge tsunami

Ce panneau indique un point de rassemblement sur les hauteurs dont l'altitude est supérieure à 15m. Il s'agit du site refuge à privilégier face au risque de tsunami pour un secteur donné.

Source des contributions : Programme d'alerte aux tsunamis dans les Caraïbes du Service météorologique national des Caraïbes. Réseau d'alerte aux tsunamis (MCCDR) Nouvelle-Zélande et Centre International d'Information sur les Tsunamis. Adaptation réalisée par les professionnels de la zone de diffusion de la sécurité civile.