

Le risque tsunami en Martinique : planifier une évacuation préventive en optimisant l'accessibilité de sites refuges

Frédéric Leone, Mathieu Péroche and Rafaëlle Gutton

Volume 14, Number 2, September 2014

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1034694ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Leone, F., Péroche, M. & Gutton, R. (2014). Le risque tsunami en Martinique : planifier une évacuation préventive en optimisant l'accessibilité de sites refuges. *VertigO*, 14(2).

Article abstract

The risk of tsunami threatens the whole Caribbean coastline and especially the Lesser Antilles. The available models of tsunami propagation estimate that the travel time from the closest seismic sources would only take a few minutes to impact the Martinique Island. Considering this high threat, the most effective measure is a planned and organized evacuation of the coastal population. This requires an efficient regional warning system, estimation of the maximum expected tsunami flood height, preparation of the population to evacuate, and drawing up of local and regional emergency plans. In this context, this paper proposes a methodology directly addressed to decision makers in order to optimize and map the evacuation sites and route using a pedestrian accessibility modeling. It is based on a population database at a local scale, the development of connected graphs of roads, the identification of potential safe areas and the velocity setting for pedestrians. Evacuation routes are calculated using the Dijkstra's algorithm which gives the fastest path between areas at risk and designated evacuation sites. A first application allows us to map the theoretical times to keep safe the exposed population and to compare these with a tsunami travel time scenario for each commune of Martinique. A second application results in a local evacuation plan for the commune of Saint-Anne. This new prevention support was validated by an expert committee and constitute the first mapping of this kind in France. This calibrated and officially approved methodology will be asked to be developed on other countries, but as a priority on overseas french departments.



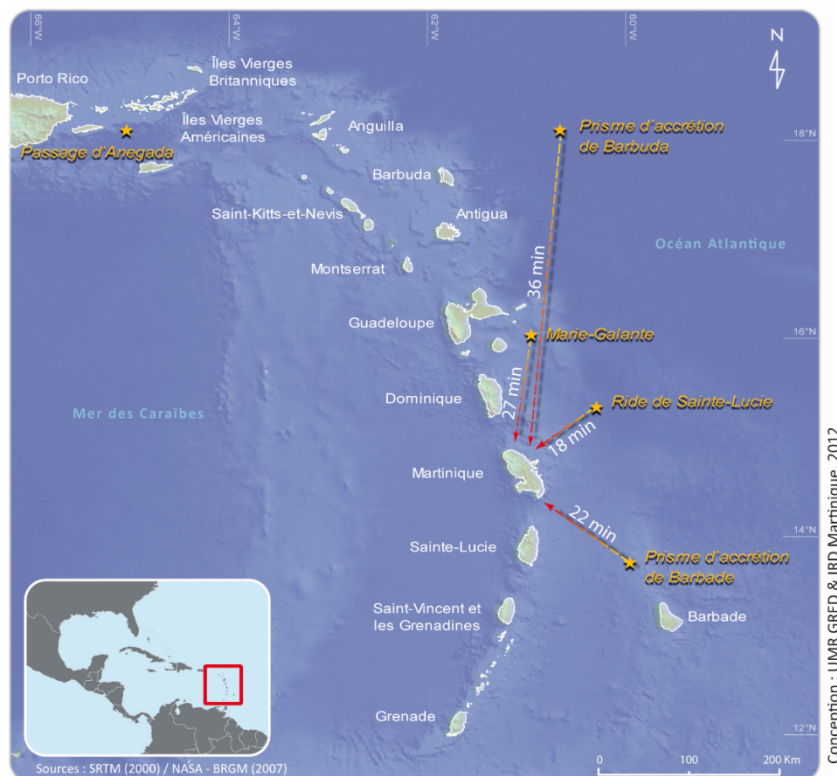
Frédéric Leone, Mathieu Péroche et Rafaëlle Gutton

Le risque tsunami en Martinique : planifier une évacuation préventive en optimisant l'accessibilité de sites refuges

Introduction: un aléa tsunami bien identifié

- 1 Qu'il soit d'origine sismique, volcanique ou gravitaire, de source locale, régionale ou transocéanique, l'aléa tsunami menace l'ensemble du littoral antillais, avec une plus forte propension pour les côtes au vent, directement exposées aux effets des séismes de la zone de subduction de l'arc des Petites Antilles. Au cours des 500 dernières années, près de 300 témoignages de tsunamis (*run-up*) ont été répertoriés dans cette région (NGDC-NOAA, consulté en janvier 2013), et les tsunamis y auraient fait au moins 3500 victimes depuis 1850 (Proenza et Maul, 2010). D'après Accary et Roger (2010), la Martinique a connu 28 tsunamis significatifs au cours des 500 dernières années, les événements majeurs étant ceux de 1er novembre 1755 (séisme de Lisbonne) et du 5 mai 1902 (lahar de la montagne Pelée).
- 2 Le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) a mené dans le cadre du plan séisme des études préliminaires pour caractériser cet aléa aux Antilles. En se basant sur plusieurs sources tsunamigènes potentielles et au moyen de simulations numériques, le BRGM (Pedreros et al., 2007; Poisson et Pedreros, 2007) a pu déterminer les temps de trajet et les amplitudes d'élévation maximales des hauteurs d'eau sur les côtes de Guadeloupe et de Martinique. Sur les cinq scénarios d'origine sismique proposés, quatre peuvent potentiellement impacter la Martinique en moins de 36 minutes (figure 1), ce qui laisse très peu de temps pour gérer une évacuation massive de population.

Figure 1. Sources sismiques tsunamigènes retenues par le BRGM et pouvant impacter la Martinique.



- 3 Pour anticiper et optimiser ces évacuations, il convient de développer localement une planification de crise qui réponde aux problématiques suivantes: comment évacuer? Où évacuer? Par quels itinéraires? Combien de personnes à évacuer? Combien de temps pour

évacuer? Afin de répondre à ces questions essentielles, nous présentons dans cet article un modèle d'accessibilité des sites refuges développé dans le cadre du projet CARIBSAT de l'IRD (Leone et al., 2012).

- 4 Ce modèle suit une trame méthodologique transposable à différents sites et représente un outil de concertation et d'aide à la décision utile pour les autorités en charge de cette planification d'évacuation, seule parade efficace face à un tsunami. Une première application de ce travail est visible depuis novembre 2013 sur la commune de Sainte-Anne. Un plan d'évacuation y a été validé par les autorités locales. Il s'est traduit sur le terrain par une signalétique officielle visant à guider les populations.

Modélisation de l'accessibilité des zones refuges au moyen de graphes routiers

Bref état de l'art sur les modèles d'évacuation

- 5 Il existe différents modèles de mobilité et d'accessibilité en cas d'évacuation qui se déclinent en fonction de l'échelle de travail et des variables prises en compte. On distingue deux grandes catégories, avec d'une part les modèles microscopiques et d'autre part les modèles macroscopiques. D'une manière très synthétique, les premiers permettent de simuler des comportements humains, en intégrant plusieurs caractéristiques individuelles associées à des entités virtuelles, ainsi que les interactions entre individus à une échelle très locale. Par opposition, les modèles macroscopiques sont basés sur des niveaux d'agrégation à une échelle plus 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...) selon une distribution zonale (Boulanger et Brechet, 2003; Hamacher et Tjandra, 2001). Dans le domaine des risques, les micro-simulations (système multi-agents, automates cellulaires...) sont principalement appliquées aux évacuations à l'intérieur de bâtiments (centres commerciaux, grands hôtels, stades...) ou encore de navires (Klumpf, 2000). Elles ont été utilisées récemment pour la modélisation dynamique d'évacuation de plages (Sahal, 2011) ou de villes en cas de tsunami. Ces outils performants nécessitent cependant des capacités et des temps de calcul très importants. Ils s'appuient sur des archétypes humains et font abstraction de la diversité des comportements (Valentin et al., 2011).
- 6 La méthode développée ici repose sur l'utilisation d'un outil de macro-simulation de type statique sur graphe (Hamacher et Tjandra, 2001). Cet outil d'analyse conçu initialement pour le calcul d'itinéraires routiers nous a permis de définir des temps d'évacuation et d'optimiser la recherche d'itinéraires de mise en sécurité des personnes en cas de tsunami. Des approches similaires ont été appliquées récemment au risque tsunami, notamment en Indonésie, à Mayotte (Leone et al., 2013) ou sur la Côte d'Azur (Sahal et al., 2013).

Objectifs

- 7 La problématique de l'accessibilité territoriale en lien avec la gestion de crise peut être analysée en fonction des différents moments de la crise: ante-crise (l'évacuation) ou post-crise (l'accès des secours et l'accès aux ressources). Dans le cas des évacuations préventives, un modèle d'accessibilité apporte les solutions suivantes:
- Mesurer les temps théoriques de mise en sécurité des personnes selon les itinéraires les plus rapides entre les zones de danger et les zones refuges les plus proches ;
 - Estimer au moyen de courbes d'accessibilité la quantité de personnes évacuées en fonction du temps, ce qui permet de déduire pour un scénario prédéfini le nombre de personnes « sécurisées » lors de l'arrivée du tsunami, et inversement ;
 - Sélectionner les sites refuges et les itinéraires les plus pertinents, en se basant sur le couple distance/temps de parcours le plus rapide et le nombre de personnes qui y convergent.

Hypothèses de travail

- 8 Il n'existe pas encore de zonage officiel de la submersion locale par tsunami en Martinique. Mais au regard des valeurs de run-up des catalogues historiques de tsunamis (Accary et Roger,

2010; Lander et al., 2002; Zahibo et Pelinovsky, 2001) et des récentes modélisations des amplitudes à la côte (Harbitz et al., 2012; Roger et al., 2010; Poisson et Pedreros, 2007), nous avons fait l'hypothèse d'une hauteur maximale d'inondation inférieure à 10 m pour un événement d'origine sismique. Nous avons ainsi considéré que les populations situées sous cette tranche d'altitude étaient exposées et qu'elles devraient être évacuées en priorité vers des zones refuges situées à plus de 20 m d'altitude.

- 9 Concernant le modèle, nous verrons que les vitesses de déplacement ont été définies pour une évacuation pédestre, conformément aux recommandations établies par l'UNESCO (COI UNESCO, 2008) et admises sur le plan international. Ce mode de déplacement est le plus efficace pour une évacuation rapide de populations dans des délais d'avertissement courts (Bolton, 2007). Le respect de cette consigne permet notamment de limiter le risque d'encombrement des réseaux routiers par les véhicules. L'expérience du tsunami du Japon du 11 mars 2011 a par ailleurs montré que les taux de mortalité ont été plus élevés dans les localités où la population n'avait pas respecté cette consigne (Fraser et al., 2012).
- 10 Comme dans tout modèle de macro-simulation, l'hétérogénéité des situations des personnes évacuées (localisation, activité, contraintes, opportunités) n'est pas prise en compte. On est supposé s'adresser à des individus informés, préparés, rationnels et identiques. Nous partons du postulat que l'intention et le besoin de la population sont de rejoindre les sites refuges les plus proches, le plus rapidement possible. Ce dernier point mérite néanmoins d'être validé par de futurs retours d'expérience même si ce comportement semble logique. L'objectif de notre travail est donc d'apprécier à travers ces premiers résultats les modalités et la faisabilité d'une évacuation planifiée, donc en conditions optimales, tel que l'on pourrait un jour l'imaginer en Martinique.

Outil de modélisation

- 11 Les calculs d'accessibilité ont été effectués à l'aide de l'application RouteFinder® dans une interface SIG MapInfo®. Le logiciel sélectionne les chemins les plus courts, en temps ou en distance, entre plusieurs points de départ et d'arrivée. Les résultats de la matrice origine/destination générée sont cartographiés au moyen d'isochrones (temps de trajets) et d'itinéraires optimaux. Ces chemins sont déterminés conformément à la théorie des graphes et en utilisant l'algorithme de Dijkstra. Cette application nécessite de créer et de paramétrer en amont, au sein d'un SIG :
- Des points d'origine représentés par les mailles du territoire situées à moins de 10 m d'altitude ;
 - Des effectifs de population résidente nocturne, agrégés sur les mailles du territoire exposées (≤ 10 m d'altitude) ;
 - Un graphe non-orienté des voies de communication paramétré par des vitesses de déplacement pédestres (en km/h) variables suivant la nature des voies (largeur, revêtement, pente) ;
 - Des points de destination correspondants soit aux points d'entrée en zone refuge (PEZR) implantés aux intersections entre l'isohypse 20 m et le réseau routier, soit à des sites refuges proches et préalablement validés par les autorités locales ;

Bases de données SIG constituées

- 12 Les données de **population résidente** ont été extraites après recoupement des fichiers fonciers de la base MAJIC II (2009) de la Direction générale des finances publiques (DGFIP) et des données démographiques du recensement général de la population (2006) de l'INSEE. Les fichiers fournis par la DGFIP apportent une information spatialisée sur l'usage des bâtiments. Il a été ainsi possible d'extraire la fonction de ces derniers (habitation, professionnel ou mixte) et d'obtenir le nombre de foyers par bâtiment. Nous avons pu ainsi estimer pour chaque parcelle cadastrale un nombre moyen d'occupants la nuit. Ces effectifs ont ensuite été réaggrégés sur des mailles de 50 m de côté qui représentent les lieux de départ du modèle. Pour l'ensemble de la Martinique, cette population résidente nocturne exposée, donc située à moins de 10 m d'altitude, correspond à 66 377 personnes.

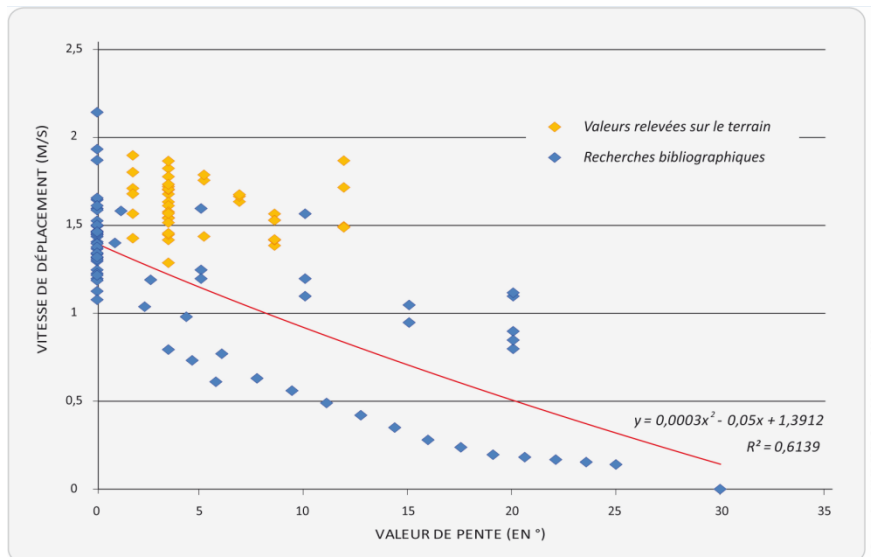
- 13 Le **réseau des voies de communication** utilisé pour construire le graphe d'évacuation provient de la BD TOPO® de l'IGN (2004). Les résultats des modèles d'accessibilité dépendent de la précision de ce graphe routier. Très peu d'erreurs ont été décelées dans cette base. La portion du réseau utilisée (entre 0 et 20 m d'altitude) est constituée de 61 600 tronçons pour une longueur totale de 1 625 km. Nous avons pu distinguer plusieurs classes de voies différentes: les routes carrossables à deux chaussées, ou à une chaussée, et les voies sans revêtement (pistes, sentiers). Ce réseau a été mis à jour sur les communes de Sainte-Anne et de Trinité, dans le cadre d'une application plus fine, au moyen de photo-interprétations et de relevés de terrain.
- 14 Les **sites refuges** ont été identifiés dans un premier temps automatiquement par recoupement des voies de communication avec l'isohypse 20 m. Ce sont ces dernières, nommées PEZR (pour Point d'Entrée en Zone refuge), qui ont permis de traiter les délais d'évacuation à l'échelle de la Martinique. Dans un second temps et dans l'objectif de proposer des plans d'évacuation locaux, elles ont été redéfinies empiriquement sur le terrain en respectant différents critères de sélection qui seront précisés plus loin. C'est cette seconde approche qui a été menée sur la commune de Sainte-Anne en collaboration avec les autorités locales. Dans les deux cas, il s'agit de sites refuges topographiques (dites « horizontales ») qui à l'exception des espaces enclavés de faible superficie présentent des capacités d'accueil supposées illimitées.

Paramétrage des vitesses d'évacuation

- 15 Les vitesses de déplacement des piétons en régime de marche ont été définies à partir des données bibliographiques disponibles et quelques tests in situ, en essayant de tenir compte de la pente et du type de voie (largeur, revêtement), mais sans considérer l'encombrement du réseau ou le profil physique et psychologique des personnes.
- 16 En l'absence d'interaction avec d'autres individus ou avec des obstacles présents dans l'environnement, un piéton se déplace à une vitesse, dite « de confort », de l'ordre de 1,3 m/s (soit près de 5 km/h). Cette valeur est naturellement soumise à une certaine variation. Les valeurs relevées dans la littérature s'étendent de 0,9 m/s à 1,5 m/s (Moussaid, 2010). À partir d'une synthèse des vitesses de déplacement des piétons sur 27 sources différentes, Daamen (2004) donne une valeur moyenne de 1,34 m/s. Quant à lui, Dewi (2010) retient comme vitesse d'évacuation face à un tsunami, une valeur moyenne de 0,751 m/s. Cela correspondrait à la vitesse de déplacement d'un groupe de personnes âgées.
- 17 Par définition, une évacuation face au risque de tsunami implique un dénivelé positif. Il convient donc de moduler la vitesse pédestre en fonction de la pente du terrain. Sur ce point, la bibliographie est beaucoup moins abondante. Les principales expériences citées ont été menées en laboratoire dans le cas d'évacuation de bateaux en détresse (Lee et al., 2003 et 2004). Ces vitesses ont généralement été mesurées sur de courtes distances et dans un couloir incliné. Les valeurs données par Lee et al. (2004) sont sensiblement plus rapides que celles de Bles et al. (2001). Nous avons complété ces données par des vitesses calculées à partir des coefficients de réduction donnés par Laghi et al. (2007). Nos simulations ont été bornées par une valeur de pente critique de 30° (58%) à partir de laquelle une évacuation à pied n'est plus envisageable. Dans la réalité, aucun tronçon routier n'atteint cette pente en Martinique.
- 18 Au final, les vitesses en fonction de la pente retenues pour notre modélisation sont issues d'une régression polynomiale effectuée sur 131 valeurs compilées à partir des différentes références bibliographiques citées plus haut (89 valeurs) et complétées par des mesures empiriques obtenues sur le terrain (42 valeurs). Ces données complémentaires ont été établies sur différents profils de pente en faisant marcher trois jeunes assistants de bonne condition physique. Les écarts maximaux de vitesse obtenus sur une pente de 5° sont d'environ 70% entre nos valeurs et peuvent aller jusqu'à 300% entre nos valeurs maximales et celles fournies par la littérature. Ces derniers peuvent s'expliquer par la diversité des profils des individus sollicités, mais la bibliographie n'apporte aucune précision sur ce point. On peut donc considérer qu'en situation réelle les vitesses d'évacuation peuvent aller du simple au triple en fonction du profil physique des individus; ces écarts s'accroissant en fonction de la pente du terrain et de la distance à parcourir (figure 2). Mais ces écarts vont être également modulés par la densité

de piétons, la largeur des voies et le type de revêtement, trois critères qui vont influencer la congestion du réseau et donc la vitesse de marche.

Figure 2. Vitesses de déplacement pédestre en fonction de la pente (sources diverses, dont tests in situ en orange).



Conception : UMIR GREED & IRD Martinique, 2012

- 19 Un grand nombre d'études cherche à définir une relation entre la vitesse de marche et la densité de piétons (Fruin, 1971; Moussaïd, 2010). Mais notre modèle sur graphe ne permet pas de prendre en compte directement cette variable, contrairement aux modèles multi-agents. Nous avons pu néanmoins intégrer indirectement les effets des densités de piétons sur la fluidité des déplacements au moyen d'un coefficient dit de friction. Ce coefficient a été défini à partir de la formule utilisée par Dewi (2010). Il dépend de la largeur des voies d'évacuation ainsi que de la nature de leur revêtement. Par contre, dans le cas des escaliers, nous nous sommes basés sur la valeur moyenne de 0,5 m/s donnée par Fruin (1971).
- 20 Afin de prendre en compte tous ces paramètres, le réseau a été découpé en 10 classes de pente extraites du MNT du Litto3D, d'un intervalle de 3%. En combinant ces classes de pente et les types de voies (largeur, revêtement), on a finalement retenu 30 classes de vitesses spécifiques, estimées pour un adulte en bonne forme physique et comprises entre 4,85 km/h (1,35 m/s) et 0,86 km/h (0,24 m/s). Par ailleurs, la vitesse pédestre hors graphe a été fixée à 1 km/h (0,28 m/s) pour intégrer les obstacles naturels ou artificiels sur des trajets par définition imprévisibles.

Des résultats utiles pour la planification des évacuations

Délais d'évacuation versus temps d'arrivée d'un tsunami sur la Martinique

- 21 Les temps maximaux d'évacuation pour atteindre les PEZR ont été calculés pour chaque commune et cartographiés localement sur deux secteurs à forts enjeux humains, économiques et touristiques, que sont l'agglomération de Fort-de-France et la commune de Sainte-Anne (figure 3). Ces cartes permettent de visualiser rapidement les secteurs les plus éloignés – en temps de parcours – des zones refuges topographiques. Il s'agit par exemple de la zone de l'aéroport du Lamentin ou de la plage des Salines à Sainte-Anne. À l'échelle de la Martinique, la courbe d'accessibilité obtenue – *volume de personnes pouvant atteindre les PEZR en fonction du temps* – indique un temps maximal théorique de mise en sécurité des personnes exposées (moins de 10 m d'altitude) de 104 minutes (figure 4). Mais il en ressort que près de 73% de ces personnes pourraient être évacués dans un délai inférieur à 10 minutes. L'analyse des temps théoriques de mise en sécurité des personnes par commune montre en fait une grande hétérogénéité spatiale (figure 5). D'une manière générale, ces temps sont plus faibles sur les communes du nord de la Martinique. Cette particularité s'explique par les distances à parcourir plus courtes du fait d'un relief plus proche du littoral. L'allure des courbes varie donc selon l'efficacité du réseau de communication et la proximité de zones refuges. Ainsi,

les courbes de Fort-de-France, des Trois Ilets ou de Saint-Pierre revêtent un aspect quasiment linéaire, laissant suggérer une certaine fluidité de l'évacuation, avec un temps d'accès aux zones refuges proportionnel à l'éloignement. À l'inverse, les courbes du Lamentin, de Ducos, du Robert, de Trinité ou encore de Sainte-Anne prennent une forme asymptotique suggérant une plus grande dispersion de la population à évacuer et un réseau plus étendu sur des secteurs plus plats. Les temps maximaux de mise en sécurité concernent les communes du Lamentin (104 min), de Ducos (69 min) et du Robert (67 min). Les volumes maximaux de personnes à évacuer s'appliquent quant à eux à Fort-de-France (15 413 personnes), le Lamentin (6 715), le Robert (5 751) et Trinité (4 774). À Fort-de-France, la durée d'évacuation maximale théorique est estimée à 23 minutes. Les durées théoriques minimales de mise en sécurité concernent Macouba (1 min pour 5 personnes à évacuer), Grand'Rivière (8 min pour 608 personnes), le Prêcheur et Saint-Pierre (14 min et respectivement 779 et 1 837 personnes). Les communes présentant le moins de personnes à évacuer sont représentées par Macouba (5 personnes), Basse-Pointe (212 personnes), le Marigot (236 personnes) et Bellefontaine (521 personnes). Rappelons que ces résultats considèrent les lieux d'habitation occupés seulement la nuit (scénario résidentiel nocturne).

Figure 3. Temps d'accès vers les zones refuges (PEZR à 20 m) les plus proches (en min): exemple de la conurbation de Fort-de-France (A) et de la commune touristique de Sainte-Anne (B).

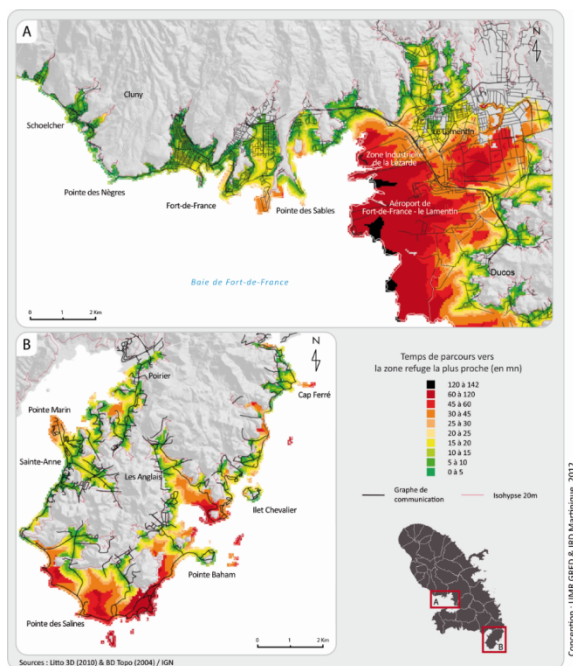


Figure 4. Courbe d'accessibilité des zones refuges pour l'ensemble de la Martinique (scénario de nuit, population située à moins de 10 m d'altitude, PEZR à 20 m).

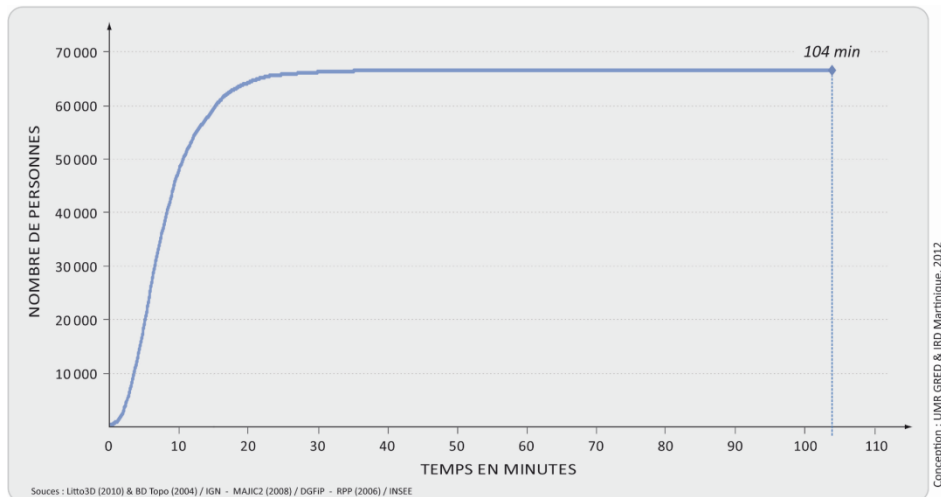
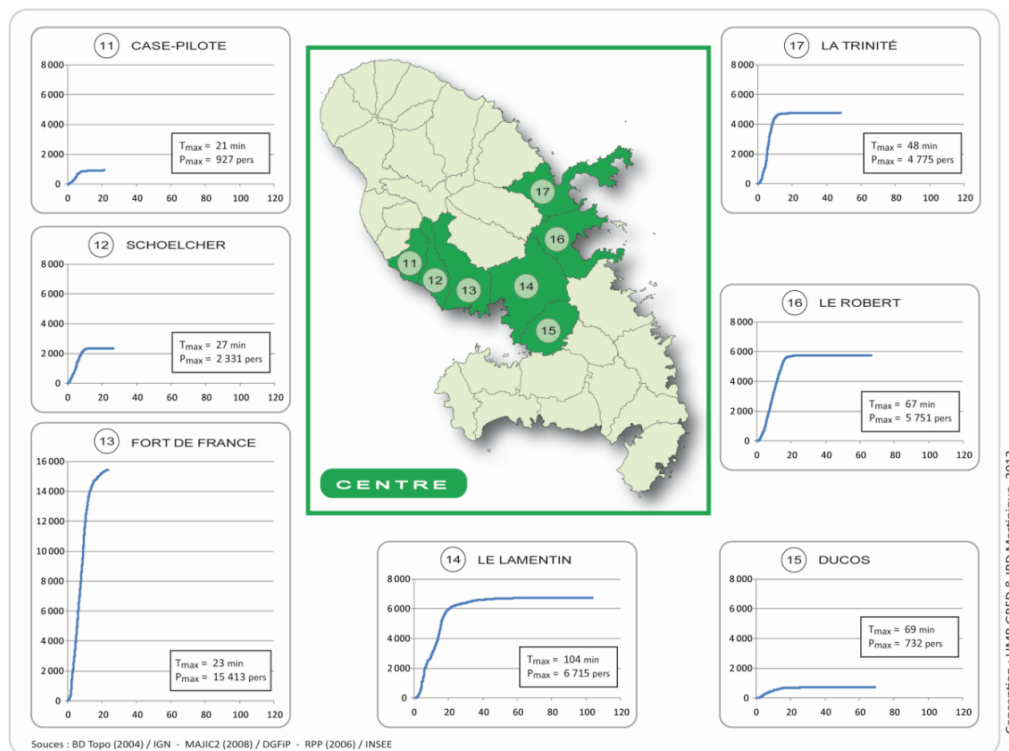


Figure 5. Courbes d'accessibilité des zones refuges des communes du centre de la Martinique.



22 Nous pouvons également analyser la faisabilité théorique d'une évacuation en confrontant les temps de mise en sécurité avec les temps de trajet des tsunamis modélisés pour plusieurs scénarios. À titre d'exemple, le temps minimum d'arrivée sur les côtes martiniquaises d'un tsunami engendré par un séisme de magnitude $mW=7.1$ au niveau du prisme d'accrétion de la Barbade a été évalué à 22 minutes à St-Luce (Poisson et Pedreros, 2007). D'après notre modèle et en retranchant à ce temps de propagation un délai de transmission de l'alerte de 15 min censé être garanti par le futur système d'alerte régional, plus de la moitié (50,5%) de la population nocturne exposée de la Martinique pourrait être mise à l'abri en moins de 7 min pour ce scénario. En revanche, près de 33 000 personnes n'auraient pas le temps de gagner une zone refuge et on constate que Fort-de-France, le Lamentin et le Robert seraient les communes les plus pénalisées avec respectivement 8 167, 4 656 et 3 870 personnes non « sécurisées » au moment de l'impact du tsunami (figure 6). Mais ces délais théoriques ne tiennent pas compte du temps de réaction des populations qui est très difficile à anticiper. D'après l'analyse des questionnaires menés suite au tsunami japonais du 11 mars 2011 auprès

de 870 rescapés, seulement 57% d'entre eux ont immédiatement évacué (Ishiwatari et Arakida, 2012). Dans le cadre d'une autre étude qui vise à modéliser une probabilité de pertes humaines face au risque de tsunami, Sugimoto et al. (2003) estiment à 15 min ce délai de réaction des populations. Ces chercheurs japonais se basent sur les réponses à des questionnaires proposés aux habitants exposés au risque de tsunami, dans la ville de Usa (île de Shikoku). Si l'on tient compte du même délai de réaction en Martinique, cela réduirait pour notre scénario le temps d'évacuation à 2 min! Dans de telles conditions, les trois autres scénarios de tsunamis proposés par le BRGM seraient tout aussi problématiques pour gérer une évacuation, avec des déficits théoriques de temps – pour mettre toute la population littorale en sûreté – compris entre 98 et 116 min (figure 7).

Figure 6. Quantité de personnes par commune pouvant (vert) ou non (rouge) atteindre une zone refuge en moins de 7 minutes de marche pour un scénario de tsunami généré au niveau du prisme d'accrétion de la Barbade (scénario de nuit, population située à moins de 10 m d'altitude, PEZR à 20 m).

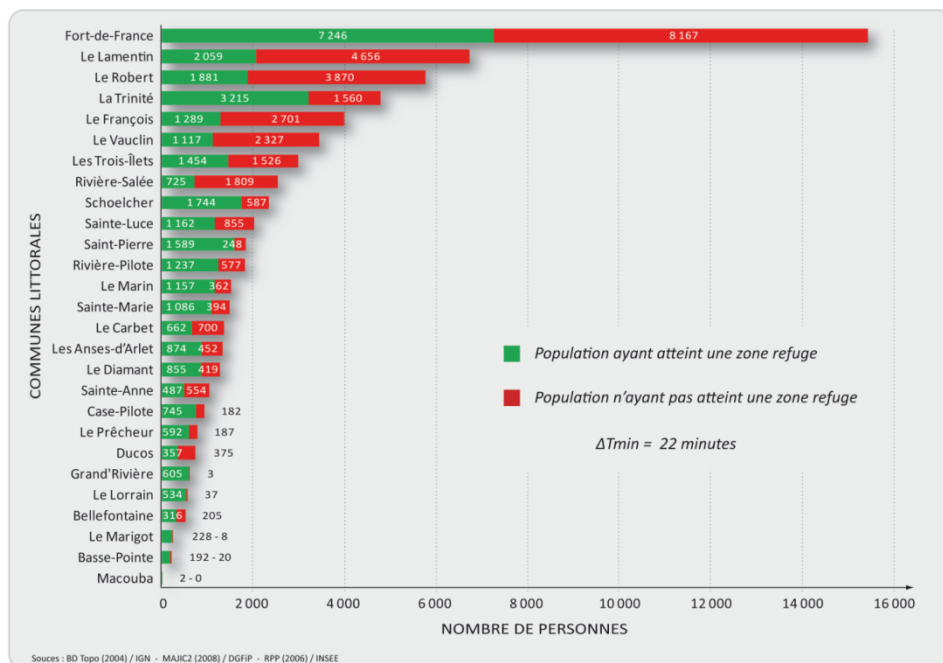
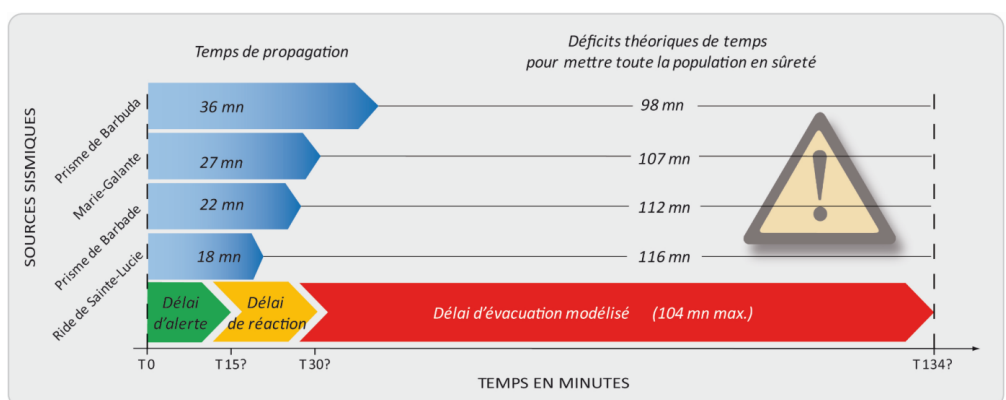


Figure 7. Délais théoriques d'évacuation vs délais d'arrivée de tsunamis selon les différents scénarios de propagation établis par le BRGM.



Il convient donc de réduire la part potentielle de victimes liées à ces difficultés d'évacuation en se préparant localement, et en suivant deux objectifs principaux: réduire le temps de réaction des populations par un effort de sensibilisation, et optimiser l'accès aux zones refuges au moyen d'itinéraires balisés et d'aménagements adaptés.

Aide à la planification locale d'une évacuation: le cas de Sainte-Anne

Ce modèle d'accessibilité permet par ailleurs de générer automatiquement les itinéraires d'évacuation optimisés en fonction du meilleur rapport distance/temps de parcours vers des

sites refuges préalablement sélectionnés. Ce travail complémentaire a été réalisé et validé sur la commune de Sainte-Anne située au sud de la Martinique. Ce territoire se caractérise par une topographie particulièrement basse dans sa partie sud, sur le secteur des Salines réputé pour la beauté de ses plages et sa forte fréquentation touristique. Les temps d'évacuation sont par contre plus faibles au niveau du bourg de Sainte-Anne en raison d'une topographie plus marquée (figure 3).

25 La première étape du travail a consisté à affiner la sélection de sites refuges potentiels sur ou à proximité des PEZR préalablement définis. Ces sites ont été hiérarchisés sur la base de cinq critères entrant dans la construction d'un indice de qualité construit à dire d'expert:

- L'altitude (supérieure à 15 m) ;
- L'accessibilité : basée sur le temps et la distance modélisés (si possible respectivement inférieurs à 15 min et 800 m) ;
- La capacité d'accueil (la plus grande possible) ;
- La sécurité (la meilleure possible) ;
- La disponibilité (si possible permanente).

26 Ces différents critères ont fait l'objet d'une cartographie intégrée au 1/10 000e afin de servir de base de discussion et d'accompagnement des autorités locales dans le choix des sites refuges et des itinéraires d'évacuation associés. Cette cartographie intermédiaire présentait trois types de sites refuges potentiels: validés (répondant à tous les critères d'éligibilité), à valider (éligibles, mais comportant au moins un critère fortement limitant), alternatifs (éligibles, mais comportant au moins deux critères fortement limitants).

27 Par ailleurs, les sites refuges situés sur des domaines privés ont été spécifiés, car ils doivent nécessairement faire l'objet d'une demande d'autorisation préalable pour pouvoir être intégrés à des plans d'évacuation officiels et être matérialisés sur le terrain. En complément, les secteurs trop éloignés d'un site refuge ont également été représentés par un aplat de couleur rouge sur cette carte. Ils sont considérés *a priori* comme problématiques car situés à plus de 15 min de marche d'après les vitesses implémentées dans le modèle. Dans ces secteurs particuliers, il a été convenu de proposer aux autorités locales des solutions particulières comme l'ouverture de nouveaux itinéraires vers des points hauts situés à proximité, ou encore l'aménagement de sites refuges verticaux dans des bâtiments existants ou à construire comme cela est pratiqué par exemple au Japon (FEMA, 2008).

28 Ainsi, chaque site sélectionné a fait l'objet d'une validation locale associant sur le terrain un comité d'experts constitué de représentants communaux (responsables sécurité et du Plan communal de sauvegarde, PCS), des services de l'État (BRGM, DEAL), du Conseil Général de la Martinique et des pompiers (SDIS). Ce processus de validation collégiale et participative a lui-même été supervisé et validé par la Préfecture de la Martinique (SIDPC) et l'État Major Interministériel de Zone Antilles (EMIZA), représentants locaux de l'autorité nationale et garants opérationnels de la méthode. La synthèse de ces choix s'est ensuite traduite par un plan d'évacuation local en cas de tsunami dont un extrait est présenté sur la figure 8. Cette cartographie opérationnelle répond aux principales conventions sémiologiques en matière de prévention des tsunamis, en proposant aux autorités locales et à la population des zones de danger (jaunes) et de refuge (vertes), ainsi que des itinéraires fléchés (en noirs) vers des sites refuges ou de mise en sécurité (points noirs R).

29 Ce modèle de carte a pour vocation de devenir le prochain référentiel français en matière de planification locale des évacuations en cas de tsunami et son déploiement ne saurait tarder, en priorité sur les autres communes des Antilles françaises. Un des itinéraires proposés sur ce plan a par ailleurs fait l'objet en novembre dernier d'un fléchage normalisé répondant aux exigences des normes internationales ISO 20712 définies par l'UNESCO en la matière (figure 9). Il appartient désormais aux communes dotées ou prochainement dotées de ces plans d'assurer l'affichage du risque tsunami et des consignes d'évacuation dans le cadre de la mise à jour de leurs PCS. Cela pourra prendre la forme de balisages sur le terrain, de panneaux d'information et de cartographies en lignes telles que celles proposées par l'État de l'Oregon aux USA (<http://nvs.nanoos.org/TsunamiEvac>).

Figure 8. Extrait du plan d'évacuation en cas de tsunami validé par les autorités françaises (Bourg de Sainte-Anne, Martinique).

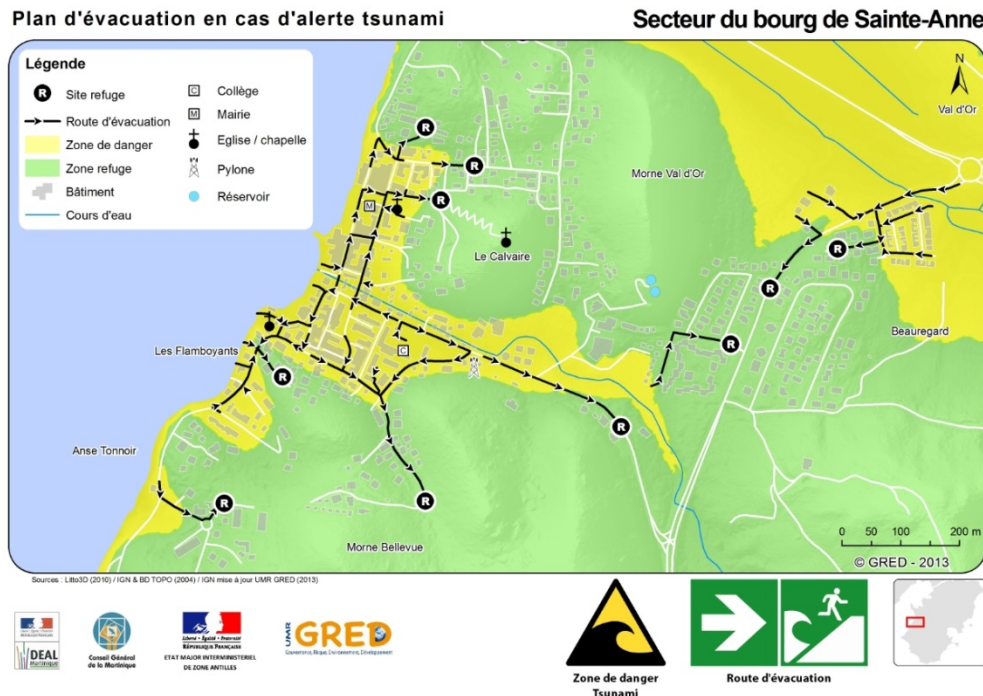


Figure 9: Signalétique « tsunami » (normes internationales) implantée sur la commune de Sainte-Anne, Martinique.



Photo M. Péroche, nov. 2013

Conclusion

La trame méthodologique déployée tout au long de ce travail se fonde sur un outil de macro-simulation sur graphe couplé à un SIG. Nous obtenons des résultats graphiques utiles pour sensibiliser et amorcer la planification d'une évacuation pédestre de population en cas de tsunami. L'avantage de cette méthode est d'être adaptable à différentes échelles d'étude du moment où les bases de données sont disponibles. Les principales améliorations à venir porteront sur la répartition spatiale des enjeux humains selon différentes temporalités et afin d'optimiser le dimensionnement, l'affichage et l'équipement des sites refuges et des itinéraires y conduisant. Cet aspect est important dans un milieu insulaire soumis à une forte variabilité des flux de vacanciers qui modifie la fréquentation des différents espaces de récréation et d'habitat. Ainsi, nous serons en mesure de quantifier plus précisément la population à évacuer suivant les saisons et les tsunamis de référence. Dans cet objectif, plusieurs scénarios d'évacuation pourront être réalisés, en modulant les effectifs de population (jour/nuit), les profils des personnes (adulte, enfant, personne à mobilité réduite), les sites refuges retenus, les temps d'alerte et de diffusion du message à la population, les délais de réaction des personnes, les temps de propagation et les distances de pénétration du tsunami. Les effectifs de population pourront être affinés au moyen d'un comptage *in situ*, en particulier sur certains sites touristiques et/ou fortement exposés.

- 31 Mais la mise en œuvre des mesures de prévention adéquates dépendra avant toute chose du degré d'implication des autorités et de la volonté politique d'afficher ce risque sans dégrader l'image touristique des lieux. Les territoires français des Petites Antilles demeurent très en retard sur ces questions. D'autres territoires des Petites Antilles, tels qu'Antigua et Barbuda, Trinidad et Tobago ou les îles Vierges Britanniques, ont déjà réalisé des plans d'évacuation et installé des panneaux d'information sur ce risque. L'île d'Anguilla et 22 villes de Puerto Rico ont obtenu le label « *Tsunami Ready Communities* » délivré par le *National Weather Service américain* de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Cette préparation locale s'inscrit dans le cadre d'une concertation régionale placée depuis 2006 sous l'égide de la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO, en vue de la mise en place d'un système d'alerte aux tsunamis fédérant 38 pays membres du bassin caribéen, dont la France (ICG/CARIBE EWS).
- 32 En attendant, face à des délais de réponse qui resteront toujours extrêmement courts, l'effort de prévention doit porter prioritairement sur l'éducation des populations, les consignes d'évacuation et la connaissance des itinéraires de fuite. La meilleure alerte reste celle fondée sur la capacité de tout un chacun à détecter les premières secousses sismiques et à interpréter un mouvement brutal du niveau marin comme un signe annonciateur de l'arrivée probable d'un tsunami.

Remerciements

- 33 Cette recherche a été initiée dans le cadre du projet CARIBSAT (INTERREG IV Caraïbes) cofinancé par la Commission européenne et dirigée par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Nous tenons à remercier tout particulièrement le directeur du projet, M. Marc Morell, pour cette opportunité de collaboration ainsi que M. Jean-Raphaël Gros-Désormeaux pour ses conseils et toute l'équipe de l'IRD Martinique, dont son directeur M. Quénéhervé. Le rapport complet est disponible sur le site internet du projet (<http://caribsat.teledetection.fr>) sous la référence Leone F. et al. (2012).
- 34 Ces travaux se poursuivent avec le soutien de la Fondation de France dans le cadre de l'appel d'offres « Quels littoraux pour demain? » (projet n° 1204), en collaboration avec l'État Major Interministériel de Zone Antilles (EMIZA). Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé aux processus de validation du plan d'évacuation de la commune de Sainte-Anne, à savoir M. Symphor et Mme Raveau du Conseil Général de la Martinique, M. Audru du BRGM Martinique, les lieutenants-colonels Lopez et Tyburn de l'État-major interministériel de zone Antilles, M. Raymond de la préfecture de Martinique, M. Derveaux, Mme Mouly et M. Rouillé de la DEAL, M. Malsa, ancien maire et M. Bingue de la commune de Sainte-Anne, les officiers et sous-officiers du centre d'incendie et de secours du Marin et Mme Triquet de la sous-préfecture du Marin.

Bibliographie

- Accary, F. et J. Roger, 2010, Tsunami catalog and vulnerability of Martinique (Lesser Antilles, France), *Science Of Tsunami Hazards*, vol. 29, No. 3, pp. 148-174.
- Bles, W., S. Nooy et L.C. Boer, 2001, Influence of ship listing and ship motion on walking speed, dans: *Proceedings of Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp. 437-452.
- Bolton, P.A., 2007, *Managing Pedestrians during Evacuations of Metropolitan Areas*, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 91 p.
- Boulanger, P.M. et T. Bréchet, 2003, *Une analyse comparative des classes de modèles « Modélisation et aide à la décision pour un développement durable »*, Action se support PADD I, SST, 32 p.
- Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO (COI UNESCO), 2008, *Préparation aux tsunamis – Guide d'information à l'intention des responsables de la planification en cas de catastrophe*, Manuels et guide de la COI N° 49, Paris, Unesco, 29 p. [En ligne] URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/0016/001600/160002f.pdf>. Consulté le 15 mai 2014.
- Daamen, W., 2004, *Modeling Passenger Flows in Public Transport Facilities*, Delft University of Technology, 403 p.

- 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*, Double Degree International Programme of Geo-Information for Spatial Planning and Risk Management, University of Twente (Netherlands) and Gadjah Mada University (Indonesia), 166p.
- Fang, Z., Q. Li, L.D. Han et D. Wang, 2011, A proposed pedestrian waiting-time model for improving space-time use efficiency in stadium evacuation scenarios. *Building and Environment* 46(9), pp. 1774-1784.
- FEMA (Federal Emergency Management Agency), 2008, Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, P646/June 2008, 175 p. [En ligne] URL: <http://www.fema.gov/media-library/assets/documents/14708>, Consulté le 15 mai 2014.
- Fraser, S., G.S. Leonard, I. Matsuo et H. Murakami, 2012, *Tsunami evacuation: Lessons from the Great East Japan earthquake and tsunami of March 11th 2011*, GNS Science Report 2012/17, 89 p.
- Fruin, J., 1971, *Pedestrian Planning and Design*, Metropolitan Association of Urban Design and Environmental Planners, Inc., New York, pp 42-50
- Harbitz, C.B., S. Glimsdal, S. Bazin, N. Zamora, F. Løvholt, H. Bungum, H. Smebye, P. Gauer et O. Kjekstad, 2012, Tsunami hazard in the Caribbean: Regional exposure derived from credible worst case scenarios, *Continental Shelf Research*, Volume 38, pp. 1-23.
- Hamacher, H.W. et S.A. Tjandra, 2001, *Mathematical Modelling of Evacuation Problems: A State of Art*, Berichte des Fraunhofer ITWM, Nr. 24, 45p.
- Ishiwatari, M. et M. Arakida, 2012, *Evacuation*, Knowledge Note 2-6 cluster 2: Nonstructural Measures, The World Bank Institute, 16 p. [En ligne] URL: http://wbi.worldbank.org/wbi/Data/wbi/wbicms/files/drupal-acquia/wbi/drm_kn2-6.pdf. Consulté le 15 mai 2014.
- Klüpfel, H., T. Meyer-König, J. Wahle et M. Schreckenberger, 2000, Microscopic simulation of evacuation processes on passenger ships, In: *Proceedings ACRI 2000*, vol. 2000, pp. 63-71.
- Laghi, M., A. Cavalletti et P. Polo, 2007, *Evacuation routes tools ArcGIS Toolbox*, Asian Disaster Preparedness Center, 98 p.
- Lee, D., H. Kim, J.H. Park, B.J. Park, 2003, The current status and future issues in human evacuation from ships, *Safety Science*, 41, pp. 861- 876.
- Lee, D., J-H. Park et H. Kim, 2004, A study on experiment of human behavior for evacuation simulation, *Ocean Engineering*, 31, pp. 931-941.
- Lämmel, G., D. Grether et K. Nagel, 2010, The representation and implementation of time-dependent inundation in large-scale microscopic evacuation simulations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 18(1), pp. 84-98.
- Lander, J.F., L.S. Whiteside et P.A. Lockridge, 2002, A brief history of tsunamis in the Caribbean sea, *Science of Tsunami Hazards*, vol. 20, No 1, pp. 57-94.
- Leone, F., M. Péroche, E. Lagahé, M. Gherardi, A. Sahal, F. Vinet, S. Hachim et F. Lavigne, 2013, Modélisation de l'accessibilité territoriale pour l'aide à la gestion de crise tsunami (Mayotte, France), *Annales de Géographie*, Ed. A. Colin, Paris, n° 693, pp. 502-524.
- Leone, F. (dir), R. Gutton et M. Péroche, 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)*, Rapport final, Projet Interreg CARIBSAT, IRD Martinique et UMR GRED, Montpellier, 111 p. [En ligne] URL: http://caribsat.teledetection.fr/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=310&lang=fr. Consulté le 15 mai 2014.
- Moussaïd, M., 2010, *Étude expérimentale et modélisation des déplacements collectifs de piétons*, Thèse de doctorat, Université Toulouse II - Paul Sabatier, 225 p.
- Pedrerros, R., M. Terrier et B. Poisson, 2007, *Tsunamis: étude de cas au niveau de la côte antillaise française*, Rapport de synthèse BRGM/RP 55795, Orléans, 77 p.
- Péroche M., F. Leone et R. Gutton, 2014, An accessibility graph-based model to optimize tsunami evacuation sites and routes in Martinique, France, *Advances in Geosciences*, 38, 1-8, doi:10.5194/adgeo-38-1-2014.
- Poisson, B. et R. Pedrerros, 2007, *Tsunamis: étude de cas au niveau de la côte antillaise française – Modélisation numérique*, Rapport BRGM/RP 55761, Orléans 111 p.
- Proenza, X. et A. Maul, 2010, Tsunami hazard and total risk in the Caribbean basin, *Science of Tsunami Hazards*, vol. 29, No. 2, pp. 70-77.

Roger, J., M.A. Baptista, A. Sahal, F. Accary, S. Allgeyer et H. Hebert, 2010, The Transoceanic 1755 Lisbon Tsunami in Martinique, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 168, Issue 6-7, pp. 1015-1031.

Sahal, A., 2011, *Le risque tsunami en France: contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque*, Thèse de doctorat de géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 268 p.

Sahal, A., F. Leone et M. Péroche, 2013, Complementary methods to plan pedestrian evacuation of the French Riviera's beaches in case of tsunami threat: graph- and multi-agent-based modeling - *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1735–1743, 2013, doi:10.5194/nhess-13-1735-2013.

Sugimoto, T., H. Murakami, Y. Kozuki, K. Nishikawa et T. Shimada, 2003, A human damage prediction method for tsunami disaster incorporating evacuation activities, *Natural Hazards*, vol. 29, Issue 3, pp 587-602.

Taubenböck, H., N. Goseberg, N. Setiadi, G. Lämmel, F. Moder, M. Oczipka, H. Klüpfel, R. Wahl, T. Schlurmann, G. Strunz, J. Birkmann, K. Nagel, F. Siegert, F. Lehmann, S. Dech, A. Gress et R. Klein, 2009, "Last-Mile" preparation for a potential disaster – Interdisciplinary approach towards tsunami early warning and an evacuation information system for the coastal city of Padang, Indonesia. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9(4): 1509-1528.

Valentin, J., F. Coudret, E. Gouardères et W. Lefer, 2011, Modélisation du comportement humain pour la simulation d'évacuation de bâtiment en feu. *Revue Electronique Francophone d'Informatique Graphique (REFIG)* 5(2), pp. 41-51.

Zahibo, N. et E.N. Pelinovsky, 2001, Evaluation of tsunami risk in the Lesser Antilles, *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 1, No. 4, pp. 221-231.

Pour citer cet article

Référence électronique

Frédéric Leone, Mathieu Péroche et Rafaëlle Gutton, « Le risque tsunami en Martinique : planifier une évacuation préventive en optimisant l'accessibilité de sites refuges », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 14 Numéro 2 | septembre 2014, mis en ligne le 16 septembre 2014, consulté le 08 octobre 2015. URL : <http://vertigo.revues.org/15046> ; DOI : 10.4000/vertigo.15046

À propos des auteurs

Frédéric Leone

Professeur, UMR GRED, Université Paul Valéry - Montpellier 3 et IRD, Centre IRD de Montpellier, BP 64501, 34 394 Montpellier cedex 5, France, courriel: frederic.leone@univ-montp3.fr

Mathieu Péroche

Doctorant, UMR GRED, Université Paul Valéry - Montpellier 3 et IRD, Centre IRD de Montpellier, BP 64501, 34 394 Montpellier cedex 5, France, courriel: mathieu.peroche@gmail.com

Rafaëlle Gutton

Ingénieur d'étude, UMR Espace-Dev, Centre IRD de Martinique, BP 8006, 97 259 Fort-de-France Cedex, France, courriel: rafaelle.gutton@gmail.com

Droits d'auteur

© Tous droits réservés

Résumés

Le risque de tsunami menace l'ensemble des côtes caribéennes et plus particulièrement les Petites Antilles. Les modèles de propagation disponibles évaluent à seulement quelques minutes les temps d'arrivée sur la Martinique pour les sources sismiques les plus proches. Face à cette menace élevée, la seule parade efficace est l'évacuation préventive et planifiée des populations littorales. Cette mesure de protection nécessite d'établir en amont un système d'alerte régional performant, de modéliser les tsunamis, de préparer les populations et d'établir

des plans de secours locaux et régionaux. Afin d'optimiser un plan d'évacuation, il convient d'évaluer les quantités de personnes exposées, les itinéraires d'évacuation possibles, les lieux de mise en sécurité et les délais pour évacuer ces populations menacées. Cet article propose une méthodologie directement destinée aux gestionnaires du risque et qui vise à optimiser et cartographier les sites et les routes d'évacuation à l'aide de calculs d'accessibilité pédestre. Elle repose sur la constitution de bases de données sur les enjeux humains, la construction de graphes routiers, la recherche de sites refuges et le paramétrage de vitesses pédestres. Les itinéraires d'évacuation sont calculés au moyen de l'algorithme de Dijkstra. Une première application donne des délais théoriques de mise en sécurité des populations pour chaque commune de Martinique. Une seconde application débouche sur un plan local d'évacuation pour la commune de Sainte-Anne. Ce nouveau support de prévention a été validé par un comité d'experts et constitue le premier document de ce type en France. Cette méthodologie calibrée et officiellement approuvée est destinée à être déployée sur d'autres territoires et en priorité sur les départements français d'outre-mer.

The risk of tsunami threatens the whole Caribbean coastline and especially the Lesser Antilles. The available models of tsunami propagation estimate that the travel time from the closest seismic sources would only take a few minutes to impact the Martinique Island. Considering this high threat, the most effective measure is a planned and organized evacuation of the coastal population. This requires an efficient regional warning system, estimation of the maximum expected tsunami flood height, preparation of the population to evacuate, and drawing up of local and regional emergency plans. In this context, this paper proposes a methodology directly addressed to decision makers in order to optimize and map the evacuation sites and route using a pedestrian accessibility modeling. It is based on a population database at a local scale, the development of connected graphs of roads, the identification of potential safe areas and the velocity setting for pedestrians. Evacuation routes are calculated using the Dijkstra's algorithm which gives the fastest path between areas at risk and designated evacuation sites. A first application allows us to map the theoretical times to keep safe the exposed population and to compare these with a tsunami travel time scenario for each commune of Martinique. A second application results in a local evacuation plan for the commune of Saint-Anne. This new prevention support was validated by an expert committee and constitute the first mapping of this kind in France. This calibrated and officially approved methodology will be asked to be developed on other countries, but as a priority on overseas french departments.

Entrées d'index

Mots-clés : risque, tsunami, évacuation, planification, modélisation, accessibilité, graphe, Martinique, Petites Antilles

Keywords : risk, tsunami, evacuation, planning, modelling, accessibility, graph, Martinique, Lesser Antilles

Lieux d'étude : Amérique centrale et Caraïbe

Notes de l'auteur

Cet article est une version plus longue et actualisée d'une version antérieure publiée dans la revue *Advances in Geosciences* sous la référence Péroche et al. (2014)