



HAL
open science

Approche intégrée du risque tsunami pour renforcer les capacités de résilience d'un territoire : l'exemple de la Martinique

Aude Nachbaur, Anne Lemoine, Sylvestre Leroy, Yoann Legendre, Caterina Negulescu, Frédéric Dondin, Yoann Legendre

► To cite this version:

Aude Nachbaur, Anne Lemoine, Sylvestre Leroy, Yoann Legendre, Caterina Negulescu, et al.. Approche intégrée du risque tsunami pour renforcer les capacités de résilience d'un territoire : l'exemple de la Martinique. 11e colloque national AFPS 2023, Association Française du Génie Parasismique, Nov 2023, Gosier (Guadeloupe), France. hal-04146301

HAL Id: hal-04146301

<https://brgm.hal.science/hal-04146301v1>

Submitted on 29 Jun 2023

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.

Approche intégrée du risque tsunami pour renforcer les capacités de résilience d'un territoire : l'exemple de la Martinique

Nachbaur A.^{1*}, Lemoine A.², Leroy S.³, Legendre Y.⁴, Negulescu C.⁵, Dondin F.⁶

¹ BRGM, Direction régionale de Martinique, France, A.Nachbaur@brgm.fr * Corresponding author

² BRGM, Direction risques et prévention, France, A.Lemoine@brgm.fr

³ BRGM, Direction régionale de Bretagne, France, S. Leroy@brgm.fr

⁴ BRGM, Direction risques et prévention, France, Y.Legendre@brgm.fr

⁵ BRGM, Direction risques et prévention, France, C. Negulescu @brgm.fr

⁶ BRGM, Direction régionale de Guadeloupe, France, F.Dondin@brgm.fr

Résumé. A la demande de la DEAL et de la Collectivité Territoriale de Martinique (CTM), le BRGM a mené une étude pour améliorer la connaissance de l'aléa tsunamis en Martinique. La démarche intègre l'ensemble de la chaîne depuis l'identification des sources tsunamigènes possibles jusqu'à leurs effets à terre en prenant en compte les conditions de bathymétrie à la côte et les obstacles à la submersion. Le cœur de la démarche réside dans le choix des scénarii majorants crédibles basé sur l'état de la connaissance scientifique à un instant donné. Ce catalogue des différents scénarii d'impact tsunami possibles nuance l'exposition du territoire et permet d'identifier sur chaque commune, les secteurs les plus vulnérables tous tsunamis confondus. Il permet de générer différents scénarii de risques et de renforcer les capacités de résilience du territoire en améliorant sa capacité à se préparer à la crise.

ABSTRACT. In response to a joint request from both DEAL of Martinique and the Collectivity of Martinique (CTM)'s request, the BRGM French National geological survey conducted an integrate study to improve tsunami hazard for Martinique island. The approach integrates the entire chain from the identification of possible tsunamigenic sources to their on-land effects by taking into account the bathymetric conditions and the flooding barriers. The core of the study aims to identify a « maximum credible case scenario » considering the state of scientific knowledge at a given time. Those flooding maps allow to qualify the territory exposure and to highlight the most vulnerable district. This new resource strengthens the territory resilience capacities by improving its preparedness for crisis.

Mots Clés : Risques naturels, Tsunami, submersion marine, séisme, simulation numérique, Inondation, Martinique

1. INTRODUCTION

Situées en zone de forte sismicité à l'aplomb d'une zone de subduction, les îles de la Caraïbes sont exposées au risque tsunami. Les derniers ayant affecté ces territoires sont ceux provoqués par le séisme de Lisbonne en 1755, le séisme de la Barbade en 1767 ou celui des îles Vierges en 1867. Dans des contextes d'éruptions volcaniques, l'arrivée en mer de matériaux peut également provoquer des tsunamis comme en témoignent les coulées de

débris de la Montagne Pelée en 1902 ou les déstabilisations du dôme de Montserrat de 1997 et de 2003.

En Martinique, une première appréciation de l'aléa avait été menée par le BRGM en 2007 dans le cadre du Plan Séisme 1. Depuis, de nouveaux codes de simulation et de nouvelles données permettent d'approfondir significativement la connaissance des phénomènes telluriques actifs, de l'aléa et de ces impacts sur l'île.

La présente étude s'inscrit dans le cadre des missions de Service Public du BRGM pour le compte de la DEAL et de la Collectivité Territoriale de Martinique et a été réalisée en concertation avec l'Etat-Major Zone Antilles (EMZA), le Service Interministériel de Défense et de Protection Civile (SIDPC) et l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de la Martinique (OVSM). L'objectif est d'améliorer la connaissance sur l'aléa tsunami en Martinique et notamment sur ces impacts à terre.

2. UNE APPROCHE INTEGREE DEPUIS LA SOURCE JUSQU'A LA SUBMERSION

2.1 Démarche générale

Sur le volet tsunami, l'approche statistique (basée sur un grand nombre de simulations quand les événements passés répertoriés sont peu nombreux) n'est pas envisagée car très coûteuse. L'approche déterministe déployée se base sur la sélection de « scénarii futurs crédibles » susceptibles de provoquer un tsunami sur les côtes martiniquaises. Les études précédentes [1-3] n'intégraient qu'un panel restreint des sources possibles. Tsunamis d'origine sismique ou gravitaire, généré localement ou en champ lointain, c'est l'ensemble des configurations possibles maximisantes (pouvant être associées à des périodes de retour longues) qui ont été considérées ici, l'hypothèse du « maximum credible case » étant largement retenue dans le cadre d'études sur l'aléa tsunami (ex. [2]).

15 sources tsunamigènes ont finalement été retenues dont 10 d'origine sismique et 5 d'origine volcano-gravitaire. Des échanges avec des spécialistes du contexte local (V. Clouard, OVSM ; J. Latchman, UWI ; F. Dondin, BRGM ; F. Leclerc, GEOAZUR, E. Buforn, Univ. Madrid) ont permis de garantir la prise en compte des dernières avancées scientifiques. Tous les scénarii identifiés ont ensuite fait l'objet de simulations numériques depuis la génération en mer jusqu'à la submersion à terre.

2.2 Une approche guidée par le choix des Scénarii futurs crédibles

La sélection et la caractérisation des « scénarii futurs crédibles » ou « maximum credible case » reste le point clé de l'approche déterministe, point d'autant plus délicat que la connaissance des structures actives reste partielle, en particulier aux Antilles. Chaque scénario retenu est donc associé à une période de retour spécifique particulièrement difficile à déterminer dans un contexte dans lequel peu d'événements majeurs sont répertoriés [4-6].

Pour chacune de ces sources tsunamigènes, les « scénarii futurs crédibles », soit les hypothèses géométriques les plus plausibles scientifiquement en fonction des structures géologiques actives considérées, ont ensuite été définies. L'identification du potentiel sismogène de chaque source sismique a été réalisée en combinant l'analyse du comportement mécanique des structures tectoniques potentiellement actives et l'analyse des catalogues de tsunamis et de sismicité historique et instrumentale. L'identification des sources gravitaires et des scénarii les plus crédibles (en terme de localisations, volumes, épaisseurs

et vitesses des écoulements, ...) ont été définies par expertise volcanologique. La caractérisation des sources potentiellement tsunamigènes pour les Petites Antilles a également fait l'objet d'un *expert meeting* de l'Unesco (ICG/Caribe EWS), organisé en Martinique en mars 2019 [7] et qui a confirmé les choix retenus dans la présente étude.

Le Potentiel sismogénique et tsunamigénique de la source « Interface de subduction » est fortement débattu dans la communauté scientifique notamment autour de la question du couplage. Les séismes de 1839 et 1843 (Mw~8 and ~8,5, [8] [9]) n'ont pas été suivis de tsunamis importants [4]. Le paléo tsunami décrit dans la baie de fort de France est le seul indice associé au séisme de 1839 [10]. Cependant, l'étude de dépôts sédimentaires permet à Cordrie et al. d'avancer qu'un « large megatrust ou outer-rise earthquake associé à un tsunami a déjà eu lieu dans les Petites Antilles et peut se reproduire dans le futur » [11]. La génération de séismes de magnitude Mw > 8.5 est vraisemblable d'après certaines hypothèses de couplage (e.g. [8] ; [11] ; [13]) mais aussi fortement critiquée par d'autres (e.g. [14]). Face à ce débat et de manière à prendre en compte ces divergences, [12] et [7] ont retenu une magnitude Mw 8.8 pour le scénario maximisant associé à l'interface de subduction bien que l'on ne puisse lui attribuer une vraisemblance, une probabilité d'occurrence ou une période de retour.

2.3 Une stratégie de grilles emboîtées

Pour chacune des 15 sources tsunamigènes retenues, des modélisations ont été menées en appliquant une stratégie de grilles emboîtées pour modéliser les impacts sur l'ensemble du littoral martiniquais en prenant en compte à la fois l'amplification possible à la côte liée aux conditions de bathymétrie et la présence d'obstacles à l'écoulement pour la grille de meilleure résolution spatiale [12]. Les modélisations des phases de propagation et de submersion ont été menées avec le code FUNWAVE-TVD [15].

3. LES RESULTATS : UNE CONNAISSANCE APPROFONDIE DE L'EXPOSITION DE LA MARTINIQUE

3.1 Une vue synthétique du champ des possibles

Pour chaque source considérée, on dispose désormais des temps d'arrivée du tsunami sur les côtes martiniquaises et d'une carte présentant, à 30 m de résolution, l'élévation maximale du plan d'eau et la hauteur d'inondation attendue à terre (cf. tableau 3.1. de synthèse ci-dessous). Ces cartes constituent l'ensemble des possibles en terme de menace, les incertitudes scientifiques et les divergences éventuelles dans la communauté scientifique ayant été prises en compte en intégrant un large panel d'hypothèses de scénarii (au total, 57 simulations sont annexées au rapport). En complément, dans une deuxième phase, des cartes de submersion ont été établies à une résolution de 2 à 5 m. Elles sont disponibles sur certaines communes comme Fort de France, Trinité ou Le Marin [16].

	Source	Altitude max à la côte (NGM)	Temps d'arrivée	Polarité
SOURCE SISMIQUE	Fosse de Muertos	NA : 0,2 à 1 m SA : 0,2 à 0,4 m NC : 0,1 à 0,2 m S : 0,2 à 0,8 m	Entre 01h05 et 01h15 du Nord-Ouest vers le Sud-Ouest	Pas de retrait initial significatif
	Passage d'Anegada	NA : 0,6 à 0,9 m SA : 0,2 à 0,5 m NC : 0,2 à 0,7 m S : 0,3 à 0,7 m	Entre 01h10 au Nord-Ouest et 01h40 au Sud Atlantique	Retrait initial potentiellement significatif (10 à 15 cm)
	Fosse de Puerto Rico	NA : 0,5 à 2,7 m SA : 0,5 à 2 m NC : 0,3 à 0,5 m S : 0,3 à 1,1 m	Entre 01h00 en façade Est et 01h30 en fond de la Baie de Fort-de-France	Retrait initial probablement imperceptible (centimétrique)

	Interface de Subduction des Petites Antilles	NA : 5 à 27 m SA : 6 à 15 m NC : 2 à 2,5 m S : 1,5 à 5 m	Entre 10-20 min en façade Atlantique (voire quelques minutes pour les sources les plus proches) et 40 à 50 min (façade Caraïbes et fonds de baies)	En général, retrait initial (possiblement absent / imperceptible)
	Ride de Sainte Lucie	NA : 2 à 8 m SA : 1 à 8 m NC : 0,5 à 1,5 m S : 0,2 à 1,5 m	Entre 15 min au Nord et 30 min au fond des baies	Retrait potentiellement perceptible (décimétrique en NC et potentiellement SC)
	Prisme de la Barbade	NA : 0,3 à 0,6 m SA : 0,2 à 0,6 m NC : 0,08 à 0,3 m S : 0,1 à 0,9 m	Entre 20 et 40 minutes du Sud-Est au Nord	Pas de retrait initial
	Graben de Marie-Galante	NA : 2,5 à 5 m SA : 0,6 à 1,5 m NC : 0,3 à 2,6 m S : 0,3 à 1,5 m	Entre 15-20 min au Nord et façade Atlantique et 20 à 40 min en façade Caraïbes et fonds de baies	Pas de retrait initial
	Structures crustales locales : Faille Sainte Luce	NA : 0,1 à 0,4 m SA : 0,1 à 0,3 m NC : 0,1 à 0,2 m S : 0,2 à 1,7 m	D'instantané au Sud-Est à 10 min en façade Caraïbes et à plus de 30 min en façade Atlantique	
	Nord Venezuela	NA : 1,5 à 4 m SA : 0,7 à 1,5 m NC : 1 à 2,7 m S : 1 à 2,5 m	Entre 01h30 en façade Ouest (01h45 au fond de la Baie de Fort-de-France) et 02h00 en façade Est	Retrait initial probablement imperceptible (centimétrique)
	Ouest Gibraltar	NA : 0,5 à 5 m SA : 0,6 à 2,5 m NC : 0,3 à 0,6 m S : 0,3 à 1 m	Entre 07h10 et 07h40, voire plus dans les fonds de baies	Pas de retrait initial significatif
SOURCE GRAVITAIRE	Kick'em Jenny	NA : 0,1 à 0,6 m SA : < 0,2 m NC : 1 à 2 m S : 0,1 à 2 m	25 à 35 min en façade Caraïbes	Pas de retrait initial significatif
	Montagne Pelée	NA : < 0,25 m SA : < 0,1 m NC : 0,4 à 1,6 m S : 0 à 0,8 m	0 à 4 min pour le NC, 4 à 10 min pour le SC	Pas de retrait
	Sainte Lucie – Soufrière Volcanic Center	NA : 0,3 à 0,6 m SA : 0 à 0,25 m NC : 0,3 à 1 m S : 0,1 à 1,5 m	De 10 min au SC jusqu'à 35 min à la Caravelle	Pas de retrait
	Dominique – Plat Pays Complex	NA : 0,6 à 1,8 m SA : 0,1 à 0,5 m NC : 0,4 à 2,3 m S : 0,3 à 2 m	5 à 10 min pour le NC, 15 min pour SC, 15 à 25 min pour NA	Pas de retrait
	La Palma	NA : 5 à 10 m SA : 3 à 7 m NC : 1 à 2 m S : 1 à 4,5 m	Environ 06h10	Pas de retrait initial

Tableau 3.1. Synthèse des résultats pour les différentes sources envisagées en termes d'élévation maximale du plan d'eau par façade (NA : Nord-Atlantique ; SA : Sud-Atlantique ; NC : Nord-Caraïbes ; S : Sud), de temps d'arrivée et de présence d'un éventuel retrait précurseur

3.2 Des impacts hétérogènes sur le territoire

Ces cartes permettent de préciser l'emprise des secteurs possiblement submergés en Martinique, toutes sources confondues (ex. Figure 3.1). L'impact s'avère en effet, très hétérogène sur le territoire. Du fait de sa position face à l'interface de subduction, de la largeur du plateau insulaire et de la configuration en entonnoir de la baie, la commune de Trinité est la plus impactée. A l'inverse, sur la côte Nord-Caraïbes, les effets sont nettement plus limités et restreints à la bande côtière (< 30 m du littoral).

Ces cartes permettent de nuancer les profondeurs de pénétration et les altitudes globalement atteintes par la submersion sur le territoire. Celle-ci reste limitée (inférieure à 5 m) sur les communes de la côte Nord-Caraïbes. L'altitude de 10 m (hypothèse retenue pour l'installation de zones refuge en Martinique [17]) n'est largement dépassée que sur la commune de Trinité.

3.3 Des impacts variables selon la source du tsunami

Les séismes les plus tsunamigènes pour la Martinique (et les îles des petites Antilles) sont, en champs proche (c'est-à-dire la zone des 10 à 100 premiers kilomètres de distance de la zone source du tsunami), les séismes de subduction et en champs lointain, les tsunamis liés à une déstabilisation de La Palma. Pour les séismes générés à l'interface de subduction, les temps d'arrivée estimés sont courts (entre 10 et 20 min sur la côte Atlantique et jusqu'à 50 min sur la côte Caraïbes) alors que les délais atteignent 6 h pour la Palma. Ces sources sont les deux seules qui puissent entraîner des inondations à des altitudes significativement supérieures à 10 m, notamment sur la côte atlantique.

L'exposition de chaque commune dépend de l'origine du tsunami. Citons la commune de Saint-Pierre peu impactée par les tsunamis d'origine sismique (quelques débordements sur quelques dizaines de mètres tout scénario confondu) mais fortement exposés aux tsunamis liés à l'activité de la Montagne Pelée (coulée pyroclastiques, déstabilisation de dôme [18]).

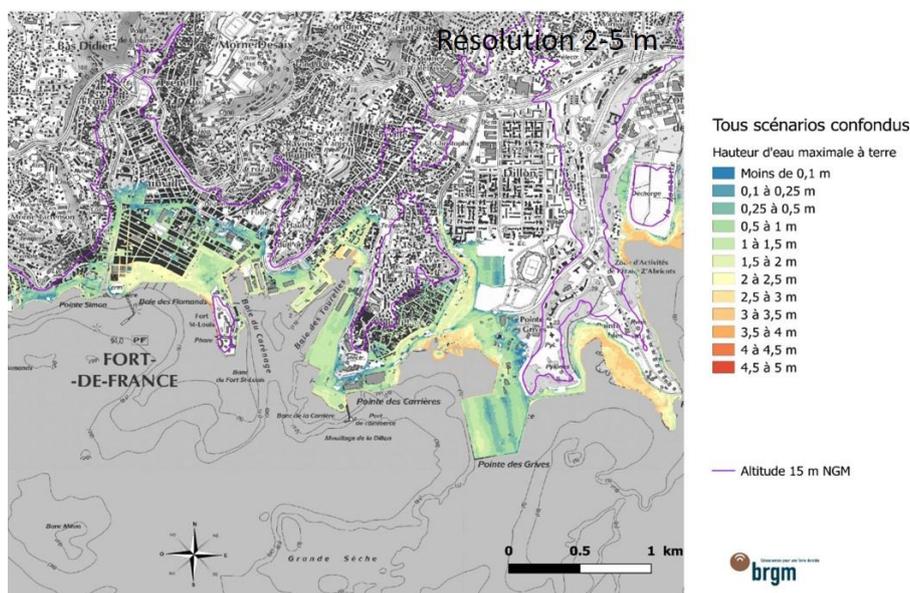


Figure 3.2. Emprise de la submersion et hauteur d'eau maximale attendu à terre sur le centre-ville de Fort de France à une résolution de 2-5 m. En violet, l'altitude 15 m NGM. [16].

4. SCENARIOS DE RISQUES

Ce catalogue des différents scénarii d'impact tsunami possibles permet de générer les scénarii de risques souhaités et de mesurer les dommages provoqués par un tsunami pour différents événements. Vigirisks [19] est une plateforme dont l'objectif est de faciliter la mise à disposition, la traçabilité et l'exécution de calculs, traitements et modélisations, dans le domaine du risque naturel (multi-aléa, multi-risque). En utilisant les méthodes de calcul implémentées dans Vigirisks (<https://vigrisks.fr>), les scénarii de risque en cascade (séisme suivi de tsunami) pour un événement de type 1839 permettent, par exemple, de mettre en évidence le niveau de risque relatif des quartiers à l'intérieur d'une commune [20], cf Figure 4.1.

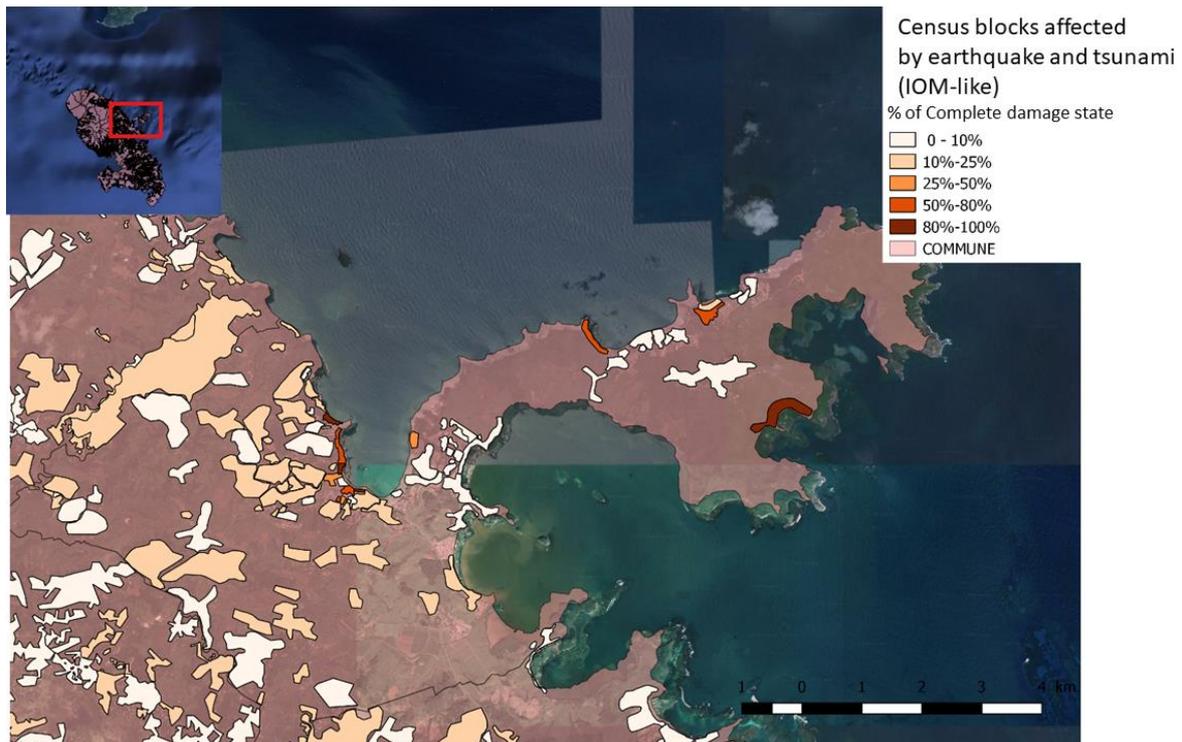


Figure 4.1: Pourcentage potentiel des dommages sur le bâtiment par quartier homogène, pour un scénario de type Séisme de 1839 tenant compte de l'effet cascade Séisme et Tsunami [20]

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce catalogue des différents scénarii d'Impact Tsunami possibles constitue un nouveau socle de connaissance renforçant les capacités de résilience du territoire. Plusieurs bénéfiques :

- Montée en compétence de la population permettant des réactions spontanées plus adaptées et désamorçant ainsi les mouvements de panique (cf. disproportion des inquiétudes vis-à-vis de la menace Kick`em-Jenny) ;
- Identification des quartiers à risques systématiquement touchés où cibler les mesures de prévention/gestion de crise (ex : Four à Chaux, Cité Lacroix, Pointe Marin...) ;
- Amélioration de la préparation des communes grâce à des Plans Communaux de Sauvegarde plus précis basés sur une connaissance de l'exposition communale à l'échelle des quartiers ;
- Appréciation de la vulnérabilité du bâti courant, celle d'enjeux patrimoniaux et des réseaux routiers en bordure littorale.

L'identification des scénarii étant le cœur de la démarche, les verrous sur lesquels poursuivre en priorité la recherche scientifique sont :

- la potentialité sismogénique et tsunamigénique de la source Interface de subduction (mega-thrust) et des ruptures de type « outer rise » (liée à un bombement de la plaque plongeante avant contact) ;
- les paléo-tsunamis pour repérer des scénarii plausibles sur le temps longs [11] ;
- l'intégration de descriptions plus réalistes et physiques des sources tsunmigènes (ex : considérer la variabilité potentielle de la rupture sismique, ex : Arpaia et al., in prep)
- des moyens statistiques d'encadrer la période de retour de ces événements.

Les auteurs tiennent à remercier la DEAL et la Collectivité Territoriale de Martinique pour le co-financement du projet ainsi que l'ensemble des experts consultés (V. Clouard, OVSM ; J. Latchman, UWI ; F. Dondin, BRGM ; F. Leclerc, GEOAZUR, E. Buforn, Univ. Madrid).

6. REFERENCES

- [1] Poisson B. et Pedreros R. (2007). Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte antillaise française - Modélisation numérique. Rapport intermédiaire BRGM/RP-55761-FR, 111 p., 73 fig., 24 tabl.
- [2] Harbitz C. B., Glimsdal S., Bazin S., Zamora N., Løvholt F., Bungum H., Smebye H., Gauer, P., and Kjekstad O. (2012). Tsunami hazard in the Caribbean: Regional exposure derived from credible worst case scenarios, *Continental Shelf Res.*, 38, 1–23., 2012.
- [3] Roger J., Dudon B. and Zahibo N. (2013). Tsunami hazard assessment of Guadeloupe Island (F.W.I.) related to a megathrust rupture on the Lesser Antilles subduction interface, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 1169-1183.
- [4] Lambert et Terrier (2011). Historical tsunami database for France and its overseas territories. *Natural Hazard and Earth System Science*.
- [5] Lambert. J. Base de données SisFrance.fr et SisFrance-Antilles, sites Internet. Année 2004. Rapport final. BRGM/RP-53333-FR (2004).
- [6] Massin F., Clouard V., Vorobieva I., Beauducel F., Saurel J.-M., Satriano C., Bouin M.-P., and Bertil D. (2021). Automatic picking and probabilistic location for earthquake assessment in the Lesser Antilles subduction zone (1972–2012). *Comptes Rendus Géoscience*, 353 (S1), 187-209. doi: 10.5802/crgeos.81
- [7] IOC-UNESCO (2020). Experts Meeting on Sources of Tsunamis in the Lesser Antilles. Fort-de-France, Martinique (France), 18–20 March 2019. Paris, UNESCO. (Workshop Reports, 291)
- [8] Feuillet N., F. Beauducel and P. Tapponnier (2011). Tectonic context of moderate to large historical earthquake in the Lesser Antilles and mechanical coupling with volcanoes, *J. Geophys. Res.*, 116, B10308, doi: 10.1029/2011JB008443.
- [9] Hough S.E. (2013), Missing great earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 118, 1098-1108, doi: 10.1002/jgrb.50083.
- [10] Clouard V., Roger J., Moizan E (2017). Tsunami deposits in Martinique related to the 1755 Lisbon earthquake. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-238>
- [11] Cordrie L., Feuillet N., Gailler A., Biguenet M., Chaumillon E., Sabatier P. (2022). A Megathrust earthquake as source of a Pre-Colombian tsunami in Lesser Antilles: Insight from sediment deposits and tsunami modeling. *Earth Science Reviews*. Volume 228, May 2022, 104018. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104018>
- [12] Le Roy S., Lemoine A., Nachbaur A., Legendre Y., Lambert J., Terrier M. (2017). Détermination de la submersion marine liée aux tsunamis en Martinique. Rapport BRGM/RP-66547-FR, 177 p., 105 ill., 7 Ann.
- [13] Gutscher M. A., Westbrook G. K., Marcaillou B., Graindorge D., Gailler A., Pichot T., & Maury R. C. (2013). How wide is the seismogenic zone of the Lesser Antilles forearc?. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 184(1-2), 47-59.
- [14] Van Rijnsingen E M, Calais E., Jolivet R., de Chaballier J-B., Robertson R., Ryan G A., Symithe S (2022). Ongoing tectonic subsidence in the Lesser Antilles subduction zone, *Geophysical Journal International*, Volume 231, Issue 1, October 2022, Pages 319–326, <https://doi.org/10.1093/gji/ggac192>
- [15] Shi F., Kirby J.T., Harris J.C., Geiman J. D. and Grilli S.T. (2012). A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation. *Ocean Modeling*, 43-44 36-51.
- [16] Le Roy S. et Nachbaur A. (2022). Détermination de la submersion marine liée aux tsunamis en Martinique : Zoom sur six sites à enjeux. Rapport final. BRGM/RP-71016-FR, 289 p., 22 ill., 16 ann., CD.
- [17] Péroche M. (2016). La gestion de crise tsunami dans la Caraïbe : contribution géographique aux dispositifs d'alerte et d'évacuation des populations, Thèse de doctorat, Université Paul-Valéry Montpellier 3., 409 p
- [18] Poulain P., Le Friant A., Mangeney A., Viroulet S., Fernandez-Nieto E., Castro Diaz M., Peruzetto M., Grandjean G., Bouchut F. Pedreros P., Komorowski J-C. (2023). Performance and limits of a shallow-water model for landslide-generated tsunamis: from laboratory experiments to simulations of flank collapses at Montagne Pelee (Martinique), *Geophys. J. Int.* (2023) 233, 796
- [19] Negulescu, C., Smay, F., Quique, R., Hohmann, A., Clain, U., Guidez, R., & Grandjean, G. (2023). VIGIRISKS platform, a web-tool for single and multi-hazard risk assessment. *Natural Hazards*, 115(1), 593-618.

- [20] Negulescu, C., Benaïchouche, A., Lemoine, A., Le Roy, S., & Pedreros, R. (2020). Negulescu, C., Benaïchouche, A., Lemoine, A. et al. Adjustability of exposed elements by updating their capacity for resistance after a damaging event: application to an earthquake–tsunami cascade scenario. *Nat Hazards* 104, 753–793 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04189-0>