



HAL
open science

Mayotte se prépare au risque tsunami : modélisations, alerte, évacuation, sensibilisation

Frédéric Leone, Monique Gherardi, Matthieu Péroche, Émilie Lagahé, Pierre Aumond, Jonathan Siliezar Montoya, Fahad Idaroussi Tsimas, Pablo Poulain, Anne Le Friant, Anne Mangeney, et al.

► To cite this version:

Frédéric Leone, Monique Gherardi, Matthieu Péroche, Émilie Lagahé, Pierre Aumond, et al.. Mayotte se prépare au risque tsunami : modélisations, alerte, évacuation, sensibilisation. *EchoGéo*, 2023, 64, 38 p. 10.4000/echogeo.25078 . hal-04316142

HAL Id: hal-04316142

<https://hal.science/hal-04316142>

Submitted on 1 Dec 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Mayotte se prépare au risque tsunami : modélisations, alerte, évacuation, sensibilisation

Tsunami risk in Mayotte: Assessment, warning, evacuation, preparedness

Frédéric Leone, Monique Gherardi, Matthieu Péroche, Émilie Lagahé, Pierre Aumond, Jonathan Siliezar Montoya, Fahad Idaroussi Tsimas, Pablo Poulain, Anne Le Friant, Anne Mangeney, Said Hachim Mogne et Valentin Roudier



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/echogeo/25078>

DOI : 10.4000/echogeo.25078

ISSN : 1963-1197

Éditeur

Pôle de recherche pour l'organisation et la diffusion de l'information géographique (CNRS UMR 8586)

Référence électronique

Frédéric Leone, Monique Gherardi, Matthieu Péroche, Émilie Lagahé, Pierre Aumond, Jonathan Siliezar Montoya, Fahad Idaroussi Tsimas, Pablo Poulain, Anne Le Friant, Anne Mangeney, Said Hachim Mogne et Valentin Roudier, « Mayotte se prépare au risque tsunami : modélisations, alerte, évacuation, sensibilisation », *EchoGéo* [En ligne], 64 | 2023, mis en ligne le 30 septembre 2023, consulté le 25 novembre 2023. URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/25078> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/echogeo.25078>

Ce document a été généré automatiquement le 25 novembre 2023.



Le texte seul est utilisable sous licence CC BY-NC-ND 4.0. Les autres éléments (illustrations, fichiers annexes importés) sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

Mayotte se prépare au risque tsunami : modélisations, alerte, évacuation, sensibilisation

Tsunami risk in Mayotte: Assessment, warning, evacuation, preparedness

Frédéric Leone, Monique Gherardi, Matthieu Péroche, Émilie Lagahé, Pierre Aumond, Jonathan Siliezar Montoya, Fahad Idaroussi Tsimas, Pablo Poulain, Anne Le Friant, Anne Mangeney, Said Hachim Mogne et Valentin Roudier

Les auteurs souhaitent remercier Arnaud Quiniou, Frédéric Mortier et Ilham Montacer de l'ex-Délégation Interministérielle aux Risques Majeurs Outre-Mer (DIRMOM), ainsi que Matthieu Le Duff du CUFR de Mayotte, et Hadiya Chadouli de la Préfecture de Mayotte pour leur soutien dans la mise en œuvre du Projet EVACTSU-Mayotte (2020-2022)¹.

Introduction

- 1 Les tsunamis sont des phénomènes naturels à fort potentiel destructeur, à l'origine des plus grandes catastrophes. Déclenchés par des séismes (81 %), des volcans (6 %), des mouvements gravitaires (4 %) ou encore des météorites (Péroche, 2016), ils sont initiés par le déplacement d'un grand volume d'eau marin ou lacustre et prennent la forme d'un train d'ondes de grande période qui entraîne une submersion du littoral par effet de déferlement. Leur vitesse de propagation étant proportionnelle à la profondeur d'eau en première estimation, celle-ci diminue au voisinage des côtes ainsi que l'énergie cinétique associée. Ainsi, pour conserver leur énergie totale, l'amplitude des vagues et leur pouvoir de pénétration dans les terres augmentent. De quelques centimètres à plusieurs mètres de hauteur, cette submersion se caractérise généralement par plusieurs trains de vagues et les premières arrivées ne sont pas forcément les plus importantes (Lavigne *et al.*, 2009 ; Péroche, 2016). La vitesse du courant associée est telle que la pression exercée sur les infrastructures littorales peut atteindre plusieurs tonnes au mètre carré (Leone *et al.*, 2011). La puissance des

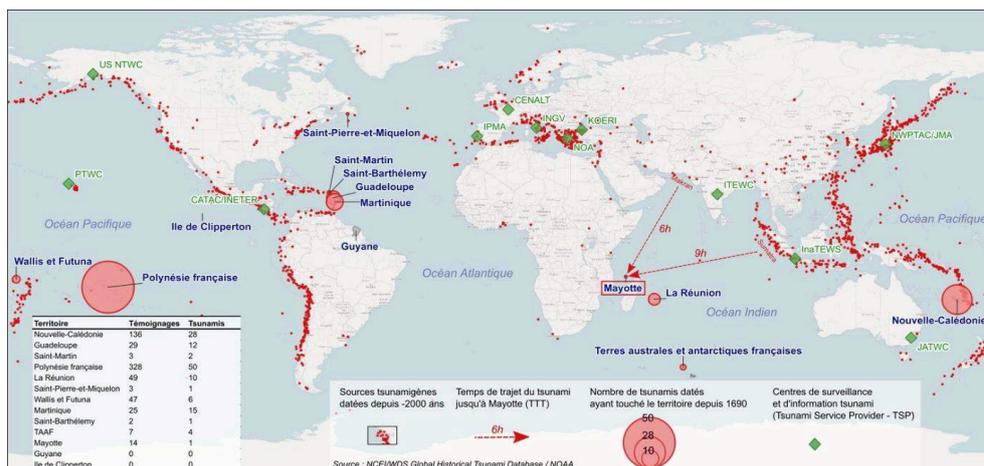
tsunamis, leur extension et leur caractère soudain, en font des phénomènes très meurtriers. A l'échelle mondiale, ils ont entraîné depuis 1970 le décès de 256 000 personnes, à l'occasion de 38 événements majeurs, et en particulier les 26 décembre 2004 (Indonésie et océan Indien) et 11 mars 2011 (Japon) (Source EM-DAT, CRED / UCLouvain, 2023).

- 2 Face à un tsunami, les dramatiques expériences indonésiennes (2004) et japonaises (2011) ont montré que la seule parade efficace pour augmenter les chances de survie était l'évacuation préventive, massive et rapide, des populations littorales (Lavigne et Paris, 2011 ; Suppasri *et al.*, 2013). Lors du tsunami de Sumatra du 26 décembre 2004, de nombreux habitants de l'île de Simeulue ont trouvé leur salut en rejoignant spontanément les hauteurs, gardant en mémoire un événement similaire qui s'était produit en 1907, contrairement à la ville de Banda Aceh où 70 000 personnes ont péri faute de comportements adaptés (Gaillard *et al.*, 2008). Couplées à un système d'alerte efficace, des entraînements répétés et une bonne préparation du territoire au moyen d'une signalétique dédiée, ces évacuations, spontanées ou organisées, ont permis de sauver 96 % des habitants du littoral japonais touché par le grand tsunami de la côte du Tōhoku le 11 mars 2011 (Ishiwatari et Arakida, 2012).
- 3 Ces expériences et leurs enseignements doivent profiter au développement de stratégies de prévention coordonnées. Cela est désormais le cas au niveau international avec le Programme Tsunami porté par la Commission Océanographique Intergouvernementale (IOC) de l'UNESCO dont « l'Unité de coordination pour les tsunamis aide les États membres de la COI à évaluer le risque de tsunami, à mettre en œuvre les systèmes d'alerte rapide aux tsunamis (TEW) et à éduquer les populations exposées pour qu'elles se préparent à affronter ce risque »².
- 4 La France participe à ce programme, en particulier pour ses territoires ultra-marins présents dans tous les océans du globe, et donc potentiellement tous concernés par le risque tsunami. Mayotte n'échappe pas à cet aléa naturel majeur, et aux risques induits par d'importants enjeux situés sur sa bande littorale. Depuis 2018, du fait de l'activité sismo-volcanique liée à l'apparition d'un nouveau volcan sous-marin (Mont Fani Maoré), une préoccupation pour le risque tsunami a brutalement refait surface à Mayotte, ce qui a conduit les auteurs de cet article, à évaluer finement le niveau de risque et à accompagner les services de l'État dans leur stratégie de prévention.
- 5 Ainsi, après une présentation de ce risque pour la France ultramarine, cet article développera le cas de Mayotte à travers les résultats de trois types de modélisations utiles pour la préparation des populations, et sur les conditions de mise en œuvre de cette préparation : simulations numériques de plusieurs tsunamis de sources locales au service du dimensionnement de plans d'évacuation, modélisation dans un environnement SIG (Système d'Information Géographique) des capacités d'évacuation, simulation de l'audibilité théorique des sirènes et donc de l'alerte, cartographie expérimentale des secteurs critiques (exposition élevée et déficit d'alerte et d'évacuation). Ces résultats amèneront une discussion sur les possibilités d'optimisation du délai global du processus d'évacuation qu'imposent des tsunamis de sources proches, en fondant une stratégie basée en priorité sur la préparation et la sensibilisation des populations, malgré des difficultés sociales d'acculturation au risque tsunami qui restent à surmonter dans le département le plus jeune et le plus pauvre de France.

Les outre-mers français face aux tsunamis

- 6 Depuis 1840, les tsunamis historiques sont principalement répertoriés au sein des bassins Pacifique (74 %), Méditerranéen (10,5 %), Atlantique/Caraïbes (8 %) et Indien (6,5 %) (Sahal, 2011). C'est le principal risque naturel majeur commun à l'ensemble des treize territoires français ultra-marins³ et des 111 îles principales et façades maritimes qui les composent. On constate que les outre-mers français (hormis la Guyane) ont été touchés par au moins 118 évènements tsunamigènes datés depuis 1690 (NGDC, 2023), ayant donné lieu à 643 témoignages recensés (*runups*) (illustration 1). Le tsunami le plus cité est celui du 11 mars 2011 de la côte Pacifique du Tōhoku (Japon, 79 témoignages), et le territoire national qui cumule le plus de témoignages de tsunamis sur ses côtes est la Polynésie française avec 328 *runups* recensés. C'est aussi et assez logiquement celui qui a été le plus souvent touché par des événements distincts (50 tsunamis), suivi par la Nouvelle Calédonie (28 tsunamis). L'évènement le plus récent a atteint la Nouvelle-Calédonie le 31 mars 2022.

Illustration 1 – Sources de tsunamis historiques dans le monde et témoignages d'effets (observations) pour les outre-mers français



Auteur : F. Leone.

- 7 Ainsi, on peut estimer la période de retour d'un tsunami, même mineur, venant toucher un territoire français d'outre-mer à 2,8 années, ce qui impose une attention toute particulière au regard des risques encourus pour les populations littorales exposées (environ 160 000 personnes en résidence principale aux Antilles françaises par exemple d'après Leone *et al.*, 2018). Même si l'aléa tsunami apparaît faible sur les outre-mers du fait des faibles amplitudes générées par la grande majorité des événements cités, certains tsunamis ont pu y donner des hauteurs d'eau dans les terres de plus de 15 m comme aux Îles Marquises le 1^{er} avril 1946 (séisme d'Alaska), et parfois des victimes comme à Lifou en Nouvelle Calédonie le 28 mars 1875 avec 25 morts et plusieurs centaines de blessés (Le Duff *et al.*, 2016).
- 8 Par ailleurs, n'oublions pas que sous l'égide de l'IOC-UNESCO⁴ des centres régionaux de surveillance et d'information tsunami (*Tsunami Service Provider*, TSP) sont désormais opérationnels à l'échelle mondiale. Ainsi, en cas de tsunami d'origine sismique en particulier, même mineur, ces centres sont désormais en capacité de diffuser une alerte

vers les autorités nationales dès la détection du séisme initiateur. Les États riverains de tout un bassin océanique sont ainsi encouragés à prendre les mesures de sauvegarde appropriées et à préparer leurs populations (IOC-UNESCO, 2008 et 2013). En France, y compris des outre-mers, l'information sur les risques majeurs naturels et sur les mesures de sauvegarde prend même une tournure réglementaire⁵, donc y compris à Mayotte où le risque tsunami est désormais bien identifié.

Mayotte (re)découvre le risque tsunami

- 9 Depuis le mois de mai 2018, l'île de Mayotte, la plus orientale des îles volcaniques de l'archipel des Comores, connaît une crise sismo-volcanique sans précédent qui a pris naissance à l'est de ce 101^{ème} département français d'outre-mer (Lemoine *et al.*, 2020a ; REVOSIMA, 2021 ; Van der Woerd *et al.*, 2022). En mai 2019, une campagne océanographique a permis la découverte d'un nouveau site éruptif sous-marin situé à 50 km à l'est de Mayotte et qui a formé un édifice d'environ 820 m de hauteur sur le plancher océanique situé à 3500 m de profondeur (Feuillet *et al.*, 2021 ; Masquelet *et al.*, 2022). Les campagnes suivantes ont mis en évidence de nouvelles coulées de lave, au sud, à l'ouest et au nord du nouveau site éruptif, désormais nommé « Mont Fani Maoré »⁶.
- 10 En lien avec ce contexte volcanique, une activité sismique affecte l'île de Mayotte depuis le début du mois de mai 2018. Entre le 1er et le 31 janvier 2021, le Réseau de surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte (REVOSIMA) a détecté un total de 397 séismes volcano-tectoniques localisés entre Mayotte et le nouveau site éruptif⁷. Ces séismes forment deux essaims, avec des épicentres regroupés en mer à des profondeurs comprises majoritairement entre 25 et 50 km. La majorité de ces séismes est de faible magnitude, mais plusieurs événements de magnitude modérée (max. Mw 5,9 le 15 mai 2018) ont été fortement ressentis par la population (Mori, 2022). Depuis juillet 2018 et la fin de la première phase intense de l'éruption, le nombre de séismes a diminué, mais une sismicité persiste.
- 11 Bien que la source de déformation soit profonde, on ne peut exclure la survenance brutale d'un tsunami de source proche provoqué par des effondrements sous-marins du toit du réservoir magmatique ou par des glissements sous-marins prenant naissance sur le talus récifal très escarpé de Mayotte, comme en témoignent les nombreuses et anciennes cicatrices d'arrachement visibles sur les cartes bathymétriques (Audru *et al.*, 2006). Un tel cas de figure entraînerait l'arrivée de vagues en quelques minutes sur Mayotte (Roger, 2019 ; Poulain, 2022 ; Poulain *et al.*, 2020 et 2022).
- 12 Cependant, Mayotte reste également exposée à des tsunamis plus distants avec au moins deux sources sismogènes potentielles majeures qui sont, la zone de subduction du Makran au Pakistan (temps de trajet modélisé d'environ 6 h) et la zone de subduction de Sumatra en Indonésie qui a généré le tsunami du 26 décembre 2004 (temps de trajet d'environ 9 h) (Lavigne *et al.*, 2012, p. 138) (illustration 1). En 2011, une campagne de recueil de témoignages avait pu mettre en évidence des effets du tsunami indonésien de 2004 sur Mayotte, avec des surcotes allant de 2,51 m (Mzouazia) à 4,46 m (Hamjago) (Sahal, 2011 ; Leone, 2014). Par ailleurs, la prospection de dépôts sédimentaires consécutifs à des tsunamis, réalisée dans le cadre du programme PREPARTOI (Lavigne *et al.*, 2012), avait révélé d'anciens dépôts de paléo-tsunamis à M'Tsamoudou et dans la baie de M'Bouini, villages situés à la pointe Sud de Grande-

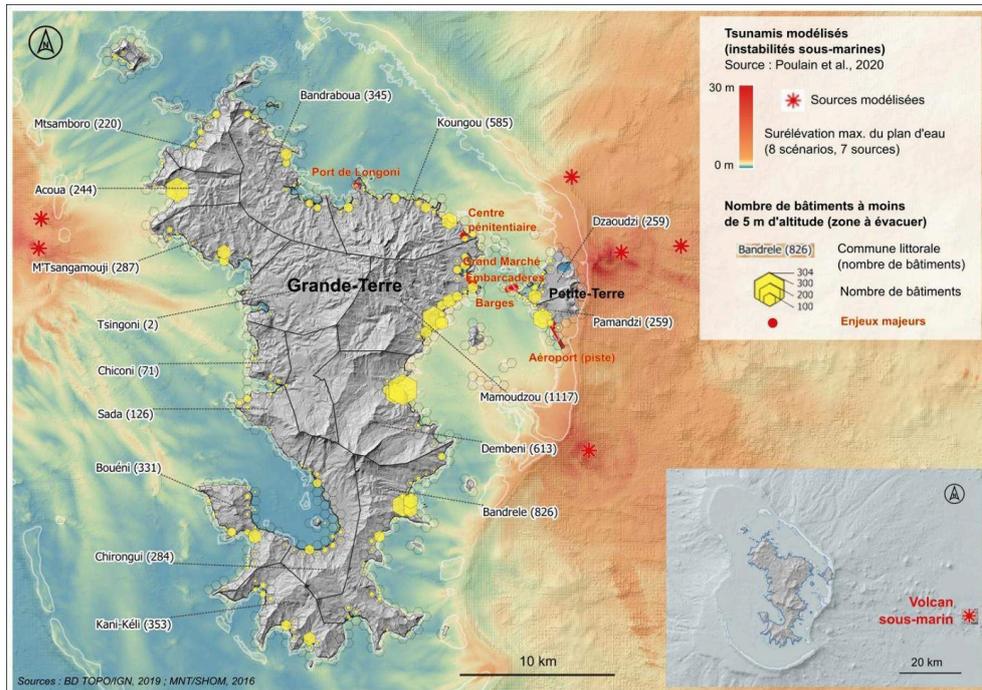
Terre. À l'échelle régionale, le volcan Karthala de Grande Comores constitue également une source possible de tsunami en cas de glissement sectoriel de l'édifice. Un tsunami de ce type arriverait à Mayotte en moins de 20 minutes.

- 13 En lien avec la nouvelle activité volcanique, la partie Est de l'île de Grande-Terre est également affectée par une subsidence provoquée par des circulations de fluides en profondeur. Cet affaissement du sol est estimé depuis le début de la crise entre 10 à 19 cm suivant les secteurs (Peltier *et al.*, 2022). Il s'agit d'un phénomène qui pourrait aggraver l'effet de submersion en cas de tsunami.

Modéliser les tsunamis

- 14 Les premiers modèles de propagation d'un tsunami transocéanique similaire à celui de 2004 fournis par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA/DASE) en 2012 (Lavigne *et al.*, 2012) mettaient en évidence des secteurs d'amplification des grandes longueurs d'ondes autour de Mayotte. Ces zones d'amplification correspondaient assez bien aux secteurs les plus affectés en 2004 avec des hauteurs maximales modélisées plus importantes dans la partie nord-ouest du lagon, là où la barrière de corail est discontinue. Dans le contexte de la crise actuelle, de nouvelles modélisations ont été produites avec un premier travail exploratoire réalisé par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) à l'automne 2019 afin d'estimer l'impact d'une trentaine de sources tsunamigènes liées à des instabilités, à des séismes et à des effondrements, tout en considérant des hypothèses de source simples pour les instabilités grâce à la mise en œuvre d'outils de simulation opérationnels (Lemoine *et al.*, 2020b). Cette étude a permis de discriminer, parmi les sources envisagées, celles qui seraient les plus impactantes et qui nécessiteraient la mise en œuvre d'outils de simulations des processus à la source plus fins.
- 15 Compte tenu de la localisation des séismes, de l'étude morphologique des pentes sous-marines au large de Mayotte et de ces premières simulations de tsunamis, une étude complémentaire a ensuite permis de modéliser six scénarios impactants prenant leur source à l'Est de Petite-Terre (Poulain *et al.*, 2020 et 2022). Elle a porté sur cinq scénarios d'instabilités proches de l'essaim sismique et un scénario d'instabilité du nouvel édifice volcanique. Les volumes d'instabilité considérés varient de 11,25 à 800 millions de m³. Bien que la crise sismo-volcanique affecte la partie est de Petite-Terre, des instabilités gravitaires pourraient aussi se produire à l'Ouest de l'île, comme en témoignent certaines structures d'instabilités. Même si ces scénarios semblent moins probables du fait de leur localisation, il est toutefois important de ne pas les ignorer. Pour compléter ce travail, Poulain *et al.* (2020) ont ainsi travaillé sur deux scénarios d'effondrement de la barrière récifale Ouest de Grande-Terre (CanyonOuest et PenteOuest), identifiés au préalable par Lemoine *et al.* (2020b).

Illustration 2 – Élévations maximales du plan d'eau modélisées pour huit sources de tsunamis locaux (instabilités sous-marines) et volume de bâtiments situés à moins de 5m d'altitude sur le littoral de Mayotte



Auteur : F. Leone d'après Poulain et al., 2020.

- 16 Parmi ces huit scénarios affinés, les simulations les plus pénalisantes impliquent des instabilités gravitaires sous-marines de 100 à 200 millions de m³ localisées à faible profondeur (300 m). Elles génèrent localement des surélévations du plan d'eau supérieures à un mètre et montrent que le récif joue un rôle essentiel de protection en dissipant une grande partie de l'énergie tout au long de la phase de propagation (illustration 2). Compte tenu des sources retenues dans cette étude, c'est la côte Est de Petite-Terre qui demeure la plus exposée aux effets d'un tsunami (sources proches et absence de récif protecteur). Les scénarios modélisés à l'est de Petite-Terre donnent des temps d'arrivée des vagues à la côte très courts, allant de quelques minutes à l'Est de Petite-Terre, à environ 20 minutes pour la côte Est de Grande-Terre. Pour les scénarios situés à l'Ouest de Mayotte, les temps d'arrivée sont du même ordre de grandeur, compris entre 6 et 20 minutes (Poulain et al., 2020).

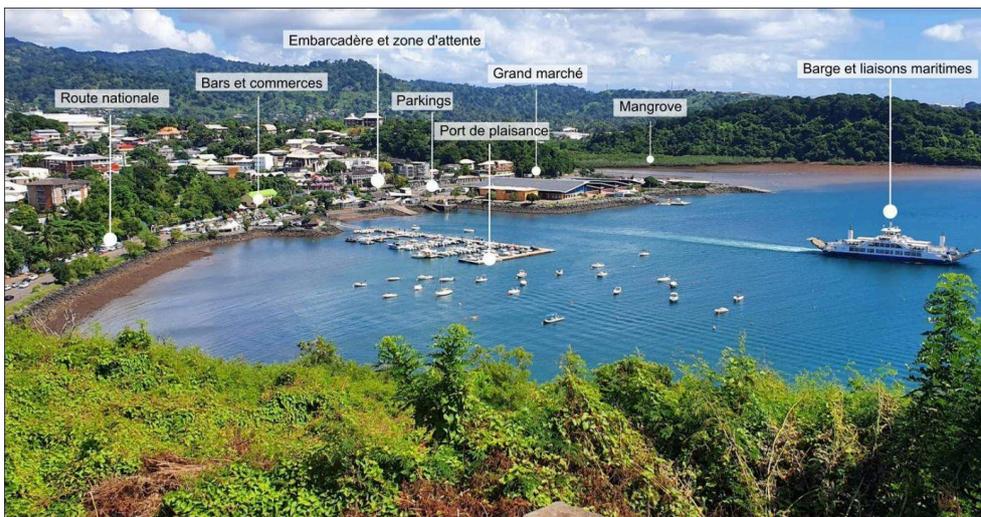
Exposition au risque tsunami à Mayotte

- 17 En complément de ces premiers travaux sur l'aléa, les premières études sur les risques induits par un tsunami à Mayotte demeurent relativement récentes (Sahal et al., 2011 ; Lavigne et al., 2012 ; Leone et al., 2013). Elles ont permis de montrer que pour un aléa de référence de 5 m d'altitude à la côte, l'accessibilité routière serait fortement dégradée avec près de 8 % du réseau routier submersible et environ 70 % des villages qui perdraient l'accès à plus de 90 % de leurs ressources territoriales en cas de tsunami. En 2013, sur la base des données de recensement de 2007, le nombre de personnes à sécuriser situées à moins de 10 m d'altitude sur le littoral de Mayotte avait été estimé à environ 52 500 individus, soit 28 % de la population de l'époque. Dans le cadre de la

présente étude, faute de données démographiques plus récentes à l'échelle infra communale⁸, on a pu estimer que 10 % du patrimoine bâti littoral de Mayotte étaient situés à moins de 5 m d'altitude et 23 % à moins de 10 mètres (BD TOPO[®], IGN 2019). Ces valeurs sont respectivement de 12 % et 26,5 % si on exploite les polygones bâtis de la BD OSM de 2021 (illustration 2, tableau 1).

- 18 Par ailleurs, en matière d'enjeux sensibles, on recense dans cette tranche d'altitude littorale de moins de 5 mètres, 21 écoles maternelles, 16 écoles primaires, le collège de M'Gombani (Mamoudzou) et le lycée de Chirongui. Cela fait un total de 39 établissements, soit 15 % des établissements scolaires de Mayotte. La très grande majorité de ces enjeux et 70 % du bâti total de Mayotte situé à moins de 5 m d'altitude se trouvent sur la façade Est de l'île, la plus exposée au risque de tsunami lié à la nouvelle activité sismo-volcanique. On y trouve également le centre pénitentiaire de Majicavo, la zone portuaire de Longoni et aéroportuaire de Pamandzi, les barges, les embarcadères et les zones d'attente des passagers, le marché principal de Mamoudzou, plusieurs stades, plages, et portions de routes littorales très souvent embouteillées (RN1, RN2, RN4) (illustration 3).

Illustration 3 – Quelques lieux fréquentés de la baie de Mamoudzou exposés au risque de tsunami (mars 2022)



Auteur : F. Leone.

Tableau 1 – Principaux enjeux situés à moins de 5 m d'altitude à Mayotte (à évacuer en cas de tsunami)

Enjeux à évacuer (0-5 m)	Total Mayotte	Nbr	%
Bâtiments (source IGN, 2019)	58540	5934	10,1
Bâtiments (source OSM, 2021)	76655	9049	11,8
Ecoles maternelles	91	21	23,1
Ecoles primaires	134	16	11,9
Collèges	22	1	4,5
Lycées	12	1	8,3
Centres de secours	6	1	16,7
Mosquées	248	54	21,8
Routes (km)	1830	139	7,6
Autres enjeux sensibles	Centre pénitentiaire (Majicavo), zone portuaire (Longoni) et aéroportuaire (piste de Pamandzi), barges, embarcadères et zones d'attente des passagers, marchés (Mamoudzou), plusieurs stades, plages, portions de route très fréquentées (RN1, RN2, RN4)		

Auteur : F. Leone.

Préparer le territoire et les populations aux évacuations préventives

- 19 Face à la recrudescence du risque de tsunami à Mayotte, il convient aujourd'hui d'unir sans plus tarder nos efforts pour développer une stratégie de prévention et de sécurisation des populations littorales. Une partie de cette stratégie a été portée par le projet EVACTSU-Mayotte (2020-2023), confiée par l'État au Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier (LAGAM) de l'Université Paul-Valéry Montpellier 3⁹. Cette stratégie, conforme aux recommandations de l'IOC-UNESCO (2008) en la matière, doit intégrer un plan d'alerte et d'évacuation des populations adapté au contexte territorial et socio-culturel local. Conformément aux engagements du Gouvernement français dans son Livre bleu Outre-mer, ce plan doit nécessairement impliquer une phase de concertation avec la population et les autorités locales lors de sa construction.
- 20 L'objectif des plans d'évacuation est de sécuriser en un minimum de temps les populations littorales en les guidant vers une altitude supérieure à celle des effets attendus d'un tsunami. On privilégie une évacuation pédestre dite horizontale (topographique, sur les reliefs naturels), réactive ou spontanée, selon les itinéraires les plus rapides, vers des sites extérieurs (topographiques) et temporaires (quelques heures) de mise en sécurité, validés par les autorités locales. Ces plans doivent être ensuite largement diffusés afin de soutenir l'acculturation au risque tsunami, et d'encourager les autorités à organiser des exercices d'évacuation (IOC-UNESCO, 2013 et 2023). Tout plan d'évacuation doit s'accompagner d'une campagne d'information et de sensibilisation des populations visant à faciliter l'appropriation locale de ce dispositif préventif, et à former les gens aux comportements permettant d'augmenter leurs

chances de survie (Scheer *et al.*, 2012). Mayotte dispose par ailleurs, depuis deux ans, de moyens d'alerte par sirène (23 équipements), dédiés au risque tsunami, mais compte tenu des délais très courts et possibles d'arrivée d'un tsunami de source proche (quelques minutes), il convient d'une part d'optimiser la couverture spatiale des sirènes, et d'autre part de sensibiliser les populations à des réactions immédiates en fonction des signaux reçus, qu'ils soient naturels ou technologiques¹⁰.

Méthodes

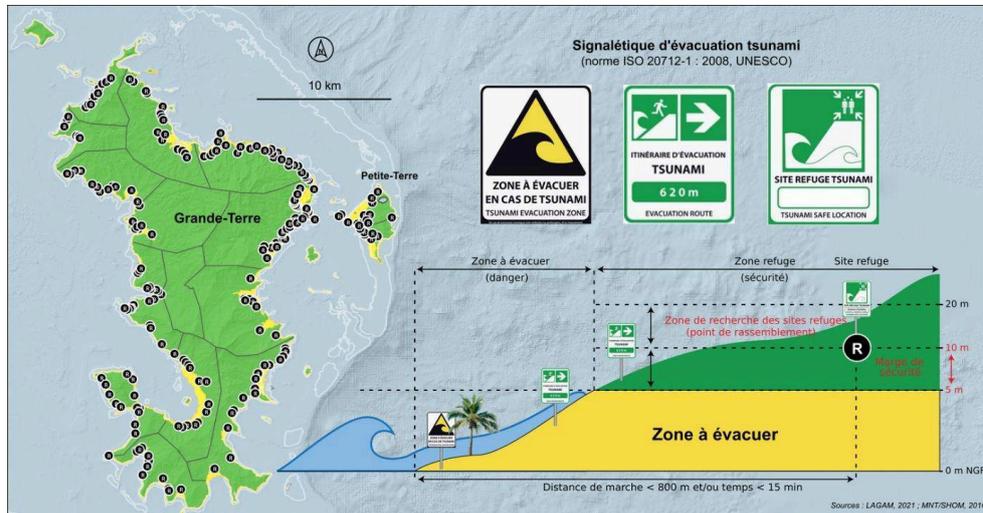
- 21 Pour réaliser les plans d'évacuation, une méthodologie comportant plusieurs étapes a été proposée et suivie. Cette méthode s'inspire de travaux antérieurs menés par notre équipe aux Antilles en collaboration avec les services de l'État et les collectivités locales, dans le cadre du projet EXPLOIT¹¹ (Leone *et al.*, 2014 ; Leone *et al.*, 2018).

Définition de la zone à évacuer

- 22 Afin d'éviter les confusions sur les zones à évacuer en fonction des secteurs, et en l'absence de modèle d'inondation/submersion par tsunami sur la totalité de Mayotte (seuls des modèles d'élévation du plan d'eau et donc de hauteur d'eau à la côte sont disponibles), il a été convenu de fixer un référentiel unique d'altitude maximale de la zone à évacuer pour l'ensemble du littoral mahorais fixé à + 5 m NGF au-dessus du niveau de la mer (illustration 4). La tranche hypsométrique correspondante a été extraite du RGE ALTI[®] de Mayotte au pas de 5 m fourni par l'IGN en 2013. Certaines corrections ont été apportées afin de gommer les micro-polygones générés par l'extraction automatique, de contrôler l'extension de certaines zones mal connectées au littoral (embouchures de cours d'eau), de compléter certains secteurs au niveau des mangroves non prises en compte dans le Modèle Numérique de Terrain (MNT) initial, et de lisser les contours définitifs de la zone à évacuer. Aucune limitation de distance de pénétration de cette zone à évacuer dans les terres n'a été introduite. Sa valeur maximale est d'environ 1 km au niveau de Dombéni, ce qui reste compatible avec le pouvoir de pénétration terrestre d'un tsunami. Ce référentiel englobe les zones de mangroves, parfois illégalement occupées, et donc tous les secteurs susceptibles d'être atteints par un tsunami proximal ou distal, tels que ceux modélisés par le BRGM et l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) (Lemoine *et al.*, 2020b ; Poulain *et al.*, 2020 et 2022) ou le CEA (Lavigne *et al.*, 2012). Cela inclut également les rares valeurs de *runups* disponibles sur Mayotte pour le tsunami transocéanique du 26 décembre 2004 (Sahal, 2011 ; Leone, 2014).
- 23 Cette valeur guide a été validée par la communauté scientifique du REVOSIMA ainsi que par la Préfecture de Mayotte qui en a fait le référentiel de zone de danger de son futur dispositif ORSEC spécialisé (Organisation de la Réponse de Sécurité Civile). Elle répond aussi aux attentes des autorités locales en matière de niveau de protection « crédible » et acceptable basé sur la recherche d'un compromis collectif entre capacités et sécurité, entre risque et protection. Elle prend également en considération le risque de démobilisation des populations en cas de fausses alertes répétées et certains freins à l'évacuation tels que la peur d'abandonner ses biens laissés sans surveillance durant l'évacuation. Comme on l'a souvent répété lors de nos interventions à Mayotte, « rien ne sert d'aller trop haut et donc trop loin si on peut se mettre en sécurité tout proche

de chez soi ». Il faut reconnaître que la topographie de Mayotte a favorisé nos hypothèses de travail grâce à un relief marqué très proche du littoral et donc particulièrement adapté à de l'évacuation horizontale.

Illustration 4 – Les sites refuges en cas de tsunami officiellement retenus pour Mayotte (2021), conditions, et signalétique d'évacuation normalisée



Auteur : F. Leone.

Identification et validation des sites refuges

- 24 La phase de terrain proprement dite consistait à trouver des sites de rassemblement temporaires (évacuation d'urgence) répondant à un certain nombre de critères d'éligibilité. Cette phase immersive¹², sans interaction particulière avec les autorités locales, a été précédée de repérages sur photographies aériennes et cartes topographiques. Certaines données SIG utiles ont été chargées sur l'application smartphone *SW Maps - GIS & Data Collector* : points d'entrée du réseau routier ou pédestre en zone refuge (PEZR), zone à évacuer (0-5 m d'altitude), zone de recherche privilégiée des sites refuges (10-20 m d'altitude). Ces données ont également été imprimées sur des dalles de photographies aériennes au 1 : 6000 faisant office de supports de terrain.
- 25 Une attention particulière a porté sur la recherche de sites publics, présentant une bonne accessibilité, disponibles 24h/24 et 7j/7, accessibles également dans le futur (pas de projets d'aménagement prévus), sécurisés, présentant si possible une vue sur la source de danger (la mer, pour 27 % des sites), bien identifiés et acceptés par la population (refus des cimetières par exemple), et offrant une capacité d'accueil adaptée au volume de personnes à évacuer. La majorité correspond à des portions de routes (66 %) offrant des bas-côtés relativement spacieux et aménagés, présentant par ailleurs l'avantage d'aller plus haut si besoin. Leur altitude moyenne est de 16,7 mètres.
- 26 La validation locale et participative des sites refuges a été réalisée durant trois semaines en mobilisant un comité de visite comprenant des membres de l'équipe scientifique accompagnés d'un représentant du SDIS (pompiers), d'un représentant de la Préfecture de Mayotte et d'un représentant du Conseil Départemental. Le comité s'est rendu auprès des 16 communes littorales et chaque visite durait de 2 à 3 heures,

en présence d'au moins un élu, d'un directeur général des services (DGS) ou de son adjoint technique (DST) et d'un policier municipal. La première partie de la séance était consacrée à une présentation du contexte de l'étude et de ses objectifs au moyen d'un diaporama et de questions-réponses. La seconde partie était réservée au travail de validation participative sur écran en projetant directement les données SIG. Les représentants de la commune étaient invités à conserver, déplacer ou supprimer les sites de rassemblement temporaires pré-identifiés à partir de leur connaissance du territoire. Ils devaient ensuite nommer les sites refuges et compléter certaines données attributaires (zones publique ou privée, disponibilité future en particulier). Des discussions ont également porté sur le choix des sites réservés aux établissements scolaires. Les séances participatives se sont ensuite poursuivies par des visites sur le terrain, notamment pour valider ou repositionner des sites refuges problématiques ou mal identifiés en salle. Cela fut également l'occasion de tester certains itinéraires et de chronométrer des temps d'évacuation (illustration 5).

Illustration 5 – Exemple de séances de validation collective et participative en salle et sur le terrain, des sites refuges proposés (août 2020)



Auteur : F. Leone.

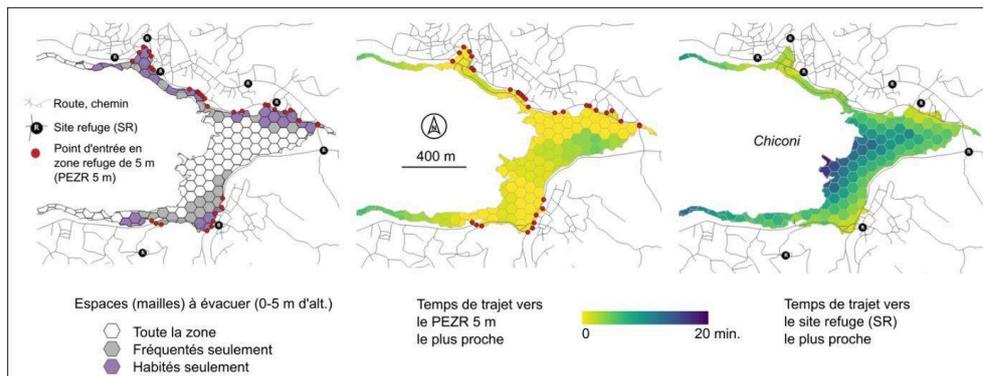
- 27 Au final et après concertation, 216 sites ont été validés par les comités puis par les services de l'État (illustration 4). La seule complication rencontrée a concerné un site sur terrain privé à Dombéni (secteur d'Ironi bé), mais la rencontre avec le propriétaire très compréhensif a permis de trouver rapidement un accord. Ces sites et les itinéraires d'évacuation ont ensuite été intégrés sur des cartes d'évacuation réalisées au sein de LAGAM puis fournies aux autorités et aux populations. Ces cartographies respectent une charte graphique spécifique, publiée par notre équipe et déjà appliquée aux Antilles (Girres *et al.*, 2018). Les itinéraires d'évacuation ont été modélisés selon les

chemins les plus rapides (*shortest least-cost modelling*) au moyen de l'algorithme de Dijkstra (1959) sur la base d'un graphe routier implanté dans un SIG (Sahal *et al.*, 2013).

Modéliser les capacités d'évacuation

- 28 Ce graphe a été construit à partir des routes de la BD TOPO® de l'IGN (2019) et complété par nos soins avec quelques tronçons pédestres, notamment des sentiers, repérés sur le terrain. Le paramétrage de la vitesse moyenne de marche (évacuation pédestre) a été fixé sur l'ensemble du réseau à 4,7 km/h (1,3 m/s), ce qui correspond à une marche dite de confort. Cette valeur correspond à la moyenne de 43 valeurs décrites dans la littérature et compilées par Fraser *et al.* (2014) pour différentes catégories de personnes. Cependant, afin de privilégier les voies principales au détriment de sentiers pédestres voisins, une vitesse moyenne dégradée de 3 km/h (0,8 m/s) a été appliquée aux voies les plus étroites (sentiers, chemins et escaliers). Une vitesse moyenne d'évacuation complémentaire hors réseau routier a été fixée à 1 km/h. Dans ces conditions, le modèle considère un itinéraire virtuel en ligne droite entre le centroïde de la maille de départ et le nœud du réseau le plus proche. Quelques tests de vitesse en groupe et *in situ* sur des itinéraires d'évacuation pressentis ont été réalisés avec certaines équipes municipales (à Acoua, Kani Kéli, Pamandzi) et ont abouti à des valeurs similaires. Dans le cadre d'une modélisation plus fine, ces valeurs pourraient être ajustées en fonction de la pente, de la largeur des voies, du type de revêtement et de la congestion du réseau.
- 29 Les itinéraires modélisés ont été générés entre chaque centroïde de maille de départ de la zone à évacuer (maille hexagonale régulière de 50 m de diamètre) et son site refuge le plus proche. Chaque itinéraire comporte un temps et une distance d'accès au site refuge et est orienté selon le sens de la marche. Afin de tester plusieurs environnements de calcul, deux outils ont été testés : *RouteFinder*® pour *MapInfo*® et *QNEAT* pour *QGIS*. Les résultats obtenus sont similaires. Ces itinéraires ont ensuite été vérifiés manuellement lors de la phase d'établissement du plan d'évacuation final (ajouts de tronçons, simplifications, combinaisons).
- 30 Les outils utilisés permettent de calculer des distances et des temps d'évacuation (de trajet) maximaux affectés à chaque maille de départ et de vérifier ainsi nos hypothèses et conditions d'évacuation, à savoir de pouvoir rejoindre un site refuge en moins de 800 m et/ou 15 minutes de marche. Ces deux valeurs seuils sont importantes afin de favoriser l'intention de mise en mouvement des populations vers les sites refuges à pied et ainsi limiter l'usage du véhicule pour évacuer (FEMA, 2009 ; Péroche, 2016).
- 31 Les temps d'évacuation ont été calculés pour plusieurs situations, en faisant varier les mailles de départ et les points d'arrivée (points d'entrée en zone refuge 5 m, ou sites refuges validés) (illustration 6).

Illustration 6 – Espaces (mailles) à évacuer et sites refuges retenus pour les différents calculs d'accessibilité en phase d'évacuation (extrait sur la commune de Chiconi)



Trois types d'espaces de départ (mailles) situés entre 0 et 5 m d'altitude ont été considérés pour ces calculs :

1. Toute la zone à évacuer, dont les mangroves (100 % des mailles) ;
2. Seulement les zones régulièrement fréquentées, c'est-à-dire correspondant aux espaces bâtis, aux plages, routes, quais, zones aéroportuaires, stades, etc. (41,5 %) ;
3. Uniquement les zones habitées, c'est-à-dire comportant des bâtiments (16,5 %).

Auteur : F. Leone.

Modéliser l'audibilité des sirènes

- 32 Depuis juillet 2021, le littoral de Mayotte a été doté par l'État d'un système d'alerte et d'information aux populations (SAIP) en cas de cyclone, ou encore de tsunami, comprenant 23 sirènes installées préférentiellement sur des bâtiments publics (mairies, établissements scolaires et une caserne du SDIS). Elles sont destinées à interrompre les activités sociales et à provoquer, à Mayotte, l'évacuation réactive des populations vers les sites refuges (Douvinet *et al.*, 2021). Toujours dans l'objectif d'optimiser le processus de sécurisation préventive des populations, nous avons tenté de modéliser la couverture spatiale et l'intensité de ce signal d'alerte sonore en appliquant un outil libre et *open source* nommé *NoiseModelling*¹³, prenant en compte les conditions locales d'occupation du sol (bâtiments, végétation), de relief, de vent, et les caractéristiques techniques des sirènes. L'outil a préalablement été confronté *in situ* à des mesures acoustiques mais aussi perceptives (test d'audibilité) en vue de son paramétrage et de son application à la modélisation d'un signal ponctuel par sirène (Siliézar *et al.*, 2022).¹⁴
- 33 Cette modélisation a permis ainsi de dépasser la seule application d'un rayon de portée homogène et empirique, généralement fixé autour de 800 m (2 400 m pour les distances maximales), de restituer la complexité de la propagation du son, et donc de cartographier avec plus de précision l'alerte théorique des populations. Nous verrons que cette première application permet de détecter des « zones silencieuses », pourtant peuplées, et d'en tirer des conclusions sur l'optimisation de l'alerte tsunami à Mayotte, ou ailleurs.

Résultats

- 34 Les plans d'évacuation finalisés ont été édités et officiellement diffusés en octobre 2021 dans deux formats :
1. En format .pdf pour la version figée destinée aux équipes municipales et aux

autorités locales en vue d'un futur balisage des itinéraires d'évacuation et/ou d'une annexation des cartes aux Plans Communaux de Sauvegarde (PCS). Cela représente 87 plans avec une légende en 3 langues sur 16 communes) (illustration 7).

2. Via une interface cartographique interactive développée sous ArcGIS Online® (illustration 8). Cette application grand public permet également d'afficher des informations sur les sites refuges (photo, nom, caractéristiques), des vues en 3D, et de télécharger les jeux de données SIG produits. Le choix de leur mise en ligne répond au besoin essentiel d'assurer la pérennisation de l'information produite. Cela garantit par ailleurs l'accès gratuit, permanent et sur différents supports (PC, tablette, smartphone) à d'autres supports d'information (vidéos, poster) et de préparation des populations et du territoire au risque tsunami¹⁵.

Illustration 7 – Exemple de plan d'évacuation tsunami finalisé (secteur du stade Cavani, Mamoudzou)



Auteurs : F. Leone, M. Gherardi, E. Lagahé.

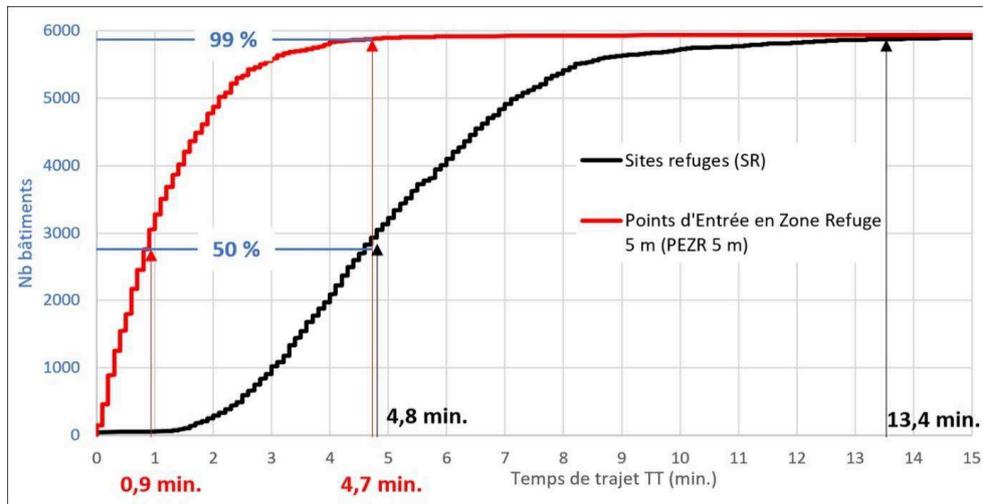
Illustration 8 – L'interface web-cartographique permettant de consulter les plans d'évacuation tsunami de Mayotte



Auteurs : F. Leone, M. Gherardi, E. Lagahé. Source : site Projet EVACTSU-Mayotte. *Le risque tsunami à Mayotte : se préparer à évacuer* (URL: <https://ar.cg.is/1be4iC0>)

- 35 Concernant les capacités d'évacuation, les calculs sur graphe de l'accessibilité spatiale et pédestre montrent que les sites refuges retenus permettent de sécuriser en moins de 15 minutes 97,6 % des zones habitées, 77,1 % des zones fréquentées et 54,9 % de la totalité du littoral de Mayotte situé à moins de 5 m d'altitude. Ce taux de sécurisation augmente fortement si on considère les points d'entrée en zone refuge situés sur le réseau routier ou pédestre (PEZR 5 m), pour atteindre 99,9 % des zones habitées, 95,8 % des zones fréquentées 94 % de la totalité de la zone littorale à évacuer, dont les mangroves. Mayotte est un territoire qui se prête bien à l'évacuation topographique et nos choix de sites refuges remplissent parfaitement les conditions préconisées, à savoir d'évacuer la très grande majorité de la population en moins de 800 m et/ou 15 minutes de marche.
- 36 Les courbes d'accessibilité des zones refuges au départ des bâtiments à évacuer permettent par ailleurs de visualiser le temps de trajet théorique nécessaire pour mettre en sécurité leurs occupants (illustration 9). Il en ressort que l'on peut mettre 50 % de la population résidente (nocturne) en sécurité vers les sites refuges en moins de 5 minutes et 99 % en moins de 13,4 minutes. Ces valeurs sont respectivement de 0,9 et 4,7 minutes si on considère l'accès à la zone refuge de 5 mètres d'altitude (PEZR 5m). Cela confirme les bonnes capacités d'évacuation topographique et une bonne répartition spatiale des sites refuges retenus.

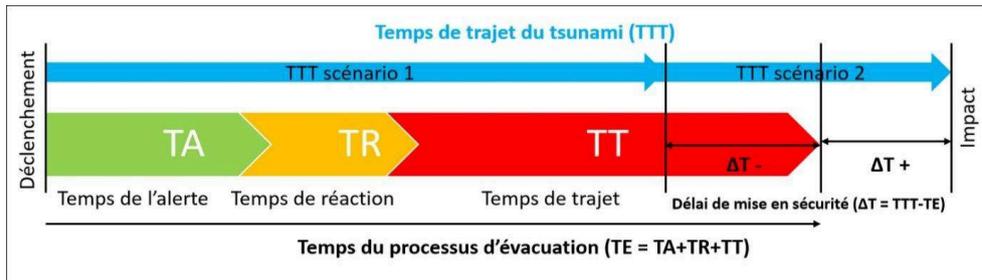
Illustration 9 – Courbes d'accessibilité représentant le nombre de bâtiments « évacuables » en fonction du temps de trajet modélisé des individus (TT) (avec une vitesse pédestre moyenne de 4,7 km/h sur réseau et 1 km/h hors réseau)



Auteur : F. Leone.

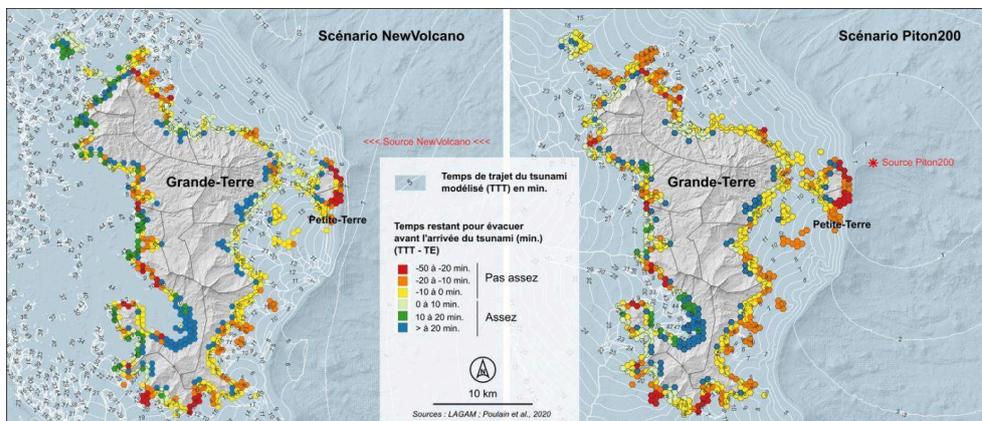
- 37 Afin de parfaire cette analyse des capacités d'évacuation, il conviendrait d'ajouter à ce délai modélisé de trajet sur le réseau (TT), un délai d'alerte (TA) et un délai de réaction ou de réponse (TR) des populations, afin de pouvoir comparer ce cumul (le temps du processus d'évacuation TE) au temps de propagation simulé du tsunami (TTT) pour différents scénarios (Dewi, 2012). Le différentiel temporel ($\Delta T = TTT - TE$), si négatif, permet d'en déduire le niveau de risque résiduel pour des populations toujours en cours d'évacuation au moment de l'arrivée du tsunami (illustration 10).
- 38 À titre expérimental et démonstratif, ce délai de mise en sécurité (ΔT) a été calculé pour chaque maille spatiale à évacuer en considérant deux simulations de temps de trajets (TTT) de tsunamis locaux induits par des glissements sous-marins (scénarii *NewVolcano* & *Piton200*). Pour ce calcul, la vitesse d'évacuation pédestre moyenne retenue (TT) a été de 4,7 km/h sur réseau et de 1 km/h hors réseau, les temps d'alerte (TA) par les autorités, et de réaction des populations (TR), ont été respectivement fixés à 10 et 5 minutes. Ces hypothèses ont été définies sur la base de valeurs décrites dans la littérature et seront discutées plus loin, également en tant qu'objectifs à atteindre dans le processus de préparation. Pour ce calcul, ce sont les points d'entrée en zone refuge (PEZR 5 m) qui ont été ciblés pour atteindre la mise en sécurité des populations. Le différentiel (ΔT) a été calculé pour chacun des scénarios et assez logiquement le scénario *Piton200* apparaît beaucoup plus pénalisant que celui lié au nouveau volcan (*NewVolcano*) du fait de temps d'arrivée du tsunami beaucoup plus courts. Dans les deux cas, la situation de Petite-Terre est très préoccupante (illustration 11). Sur l'ensemble de l'île, et suivant les scénarios, le pourcentage de bâtiments concernés par un différentiel négatif (faible capacité d'évacuation) est compris entre 34,8 et 51,4 % (tableau 2).

Illustration 10 – Principe de calcul du délai de mise en sécurité en cas d’alerte tsunami (capacités d’évacuation)



Auteur : F. Leone.

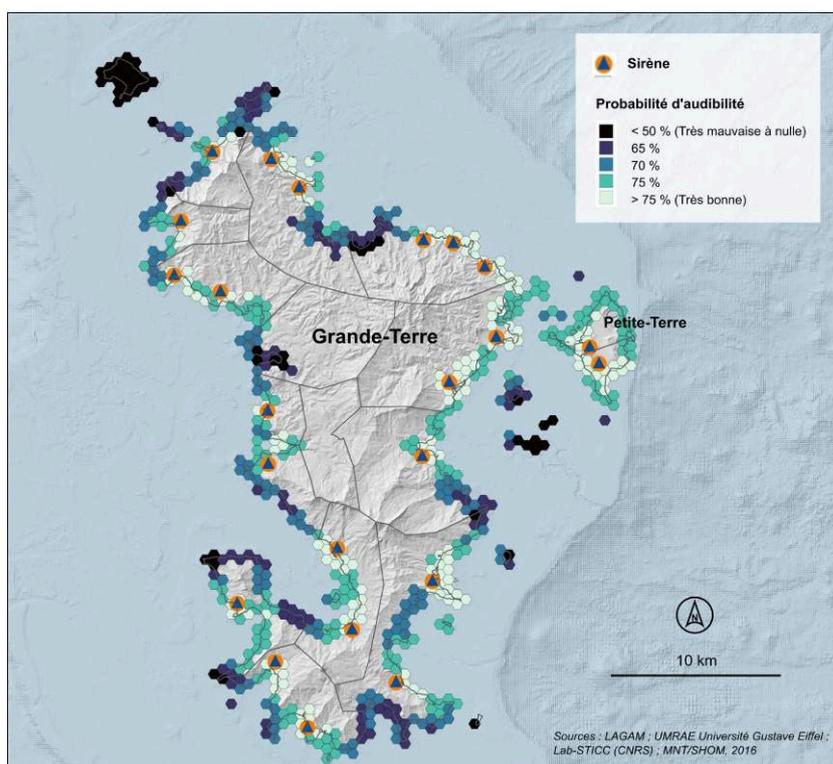
Illustration 11 – Modélisation des capacités d’évacuation (TE) avant l’arrivée du tsunami (TTT) pour deux scénarios de sources proches



Auteur : F. Leone.

- 39 Quant à lui, le modèle de propagation du signal sonore montre que certains secteurs sont difficilement « alertables » par sirènes, ce qui est d’ailleurs corroboré par les observations de plusieurs habitants interrogés sur le terrain (illustration 12). Actuellement et d’après nos calculs, 3,5 % de la zone à évacuer (2,4 % des bâtiments) sont très mal couverts par les 23 sirènes (probabilité d’audibilité très mauvaise à nulle < 50 %), et ce déficit passe à 16,4 % (8,3 % des bâtiments) pour une probabilité d’audibilité modérée (< 70 %). Les secteurs les plus critiques, en volume de personnes concernées, sont Hamourou (commune de Bandrélé), Bouyoni (commune de Bandraboua) et le village de Longoni (commune de Koungou). Conjugués à un déficit potentiel d’évacuation, ces secteurs difficilement « alertables » et « évacuables » deviennent des poches critiques, des foyers de risque humain en cas de tsunami, à privilégier en priorité dans l’exercice de préparation des populations.

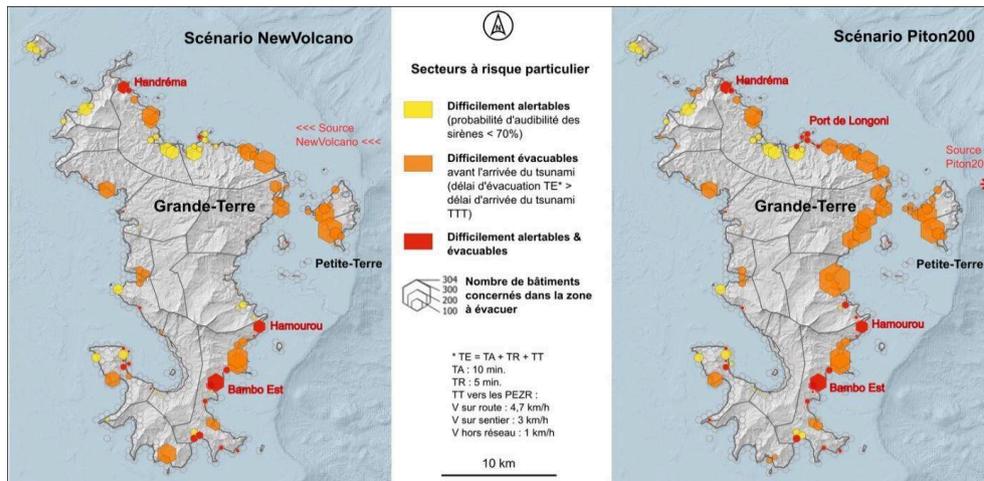
Illustration 12 – Modélisation de l’audibilité du signal sonore émis par les sirènes récemment installées à Mayotte



Auteurs : F. Leone, M. Péroche.

- 40 Suivant cette logique, ce cumul de conditions défavorables peut donner lieu à une cartographie expérimentale fondée sur le franchissement de deux seuils critiques ($\Delta T < 0$ et Probabilité d’audibilité des sirènes $< 70\%$), combinés au volume de bâtiments à évacuer¹⁶. Ces résultats sont présentés sur l’illustration 13, toujours pour les deux scénarios de tsunamis retenus précédemment. On distingue nettement quatre zones particulièrement critiques qui devraient faire l’objet d’une attention toute particulière des autorités en matière d’optimisation du processus d’alerte-évacuation : Handréma, Hamourou, Bambo Est, Port de Longoni. En fonction des scénarios, le pourcentage de bâtiments concernés oscille entre 5 et 5,4 % du total présent dans la zone à évacuer (tableau 2).

Illustration 13 – Modélisation des secteurs critiques en cas de tsunami à Mayotte prenant en compte trois variables (volume de population, faible capacité d’alerte par sirène, faible capacité d’évacuation avant l’arrivée du tsunami), pour deux scénarios de tsunami



Auteur : F. Leone.

Tableau 2 – Volume et pourcentage de bâtiments situés dans des secteurs critiques en cas de tsunami à Mayotte prenant

	Tsunamis modélisés (Poulain et al., 2020)			
	NewVolcano		Piton200	
Bâtiments à évacuer (0-5 m) (5934 au total, source IGN, 2019)	Nbr	%	Nbr	%
Difficilement alertables (probabilité d'audibilité des sirènes < 70%)	493	8,3	493	8,3
Difficilement évacuables avant l'arrivée du tsunami (délai d'évacuation TE* > délai d'arrivée du tsunami TTT, soit TTT-TE < 0)	2066	34,8	3053	51,4
Difficilement alertables & évacuables	295	5,0	323	5,4
Nom des secteurs critiques (poches de risque)	Handréma, Hamourou, Bambo Est, Port de Longoni			

* Hypothèses : TE = TA + TR + TT, avec délai d'alerte (TA) de 10 min., délai de réaction de 5 min (TR), temps de trajet (TT) vers les points d'entrée en zone refuge (PEZR) par les chemins les plus rapides suivant une vitesse de marche de 4,7 km/h sur route, 3 km/h sur sentier et 1 km/h hors réseau

Auteur : F. Leone.

Discussion : comment optimiser les évacuations

Une exposition humaine à affiner

- 41 On vient de le voir, les simulations de tsunamis à la côte apportent des informations déterminantes pour dimensionner la zone à évacuer et apprécier les temps d’arrivée des premières vagues. En complément, des données de vitesses et de profondeur de submersion simulées à haute résolution sur les terres permettraient de produire des modèles de dommages calibrés sur des courbes empiriques (fonctions de vulnérabilité) pour différents types d’infrastructures vulnérables, et sur les individus exposés en fonction de leur situation géographique au moment du tsunami (en extérieur, en intérieur, dans un véhicule, dans le lagon, sur les plages, etc.) (Leone et al., 2017).

L'exposition des navires et autres embarcations proches des côtes et des récifs, ou à quai, est un autre enjeu de l'analyse d'exposition humaine (Péroche *et al.*, 2019). Par exemple, la traversée maritime entre Petite-Terre et Grande-Terre représente annuellement plus de 5 millions de passagers (seuil franchi en 2019, la plus fréquentée de France), transportés par cinq barges entre 5h30 et minuit en semaine, jusqu'à 3h30 du matin le week-end ou la veille des jours fériés. Ce travail nécessiterait d'évaluer le volume de personnes exposées à différents moments de la journée (jour/nuit) ou de l'année (haute saison / basse saison) en développant en amont des modèles de fréquentation spatio-temporelle des types de lieux exposés et donc à évacuer (Mayaguezz *et al.*, 2017). Cela permettrait également de reprendre nos estimations en considérant non pas le nombre de bâtiments à évacuer, mais le volume de personnes correspondantes. Cependant, à Mayotte, les petits bâtiments ne sont pas les moins peuplés, tout au contraire, ce qui est le reflet du niveau de précarité et de pauvreté de la population migrante qui peuple massivement et souvent illégalement les franges littorales, dans de véritables bidonvilles¹⁷ (Idaroussi Tsimanda, 2022). La plage d'Hamourou (commune de Bandrélé), qui a été identifiée précédemment comme étant le secteur peuplé le plus critique en cas de tsunami, en est la parfaite démonstration (illustration 14). À Mayotte, l'estimation des personnes à risque, ou plus généralement de la population totale occupant l'île, reste un vrai défi.

Illustration 14 – La plage d'Hamourou (commune de Bandrélé, Mayotte), illégalement occupée, est un des secteurs les plus critiques en cas de tsunami (2021)



Auteur : F. Leone.

- 42 À Mayotte, les plans d'évacuation proposés ont cependant été conçus pour évacuer toutes les zones littorales, mêmes les moins peuplées ou illégalement occupées, en partant du constat évident d'une augmentation croissante de la fréquentation de ces espaces soumis à la pression démographique et migratoire que connaît l'île. Autrement dit, des sites refuges ont également été proposés et validés pour évacuer ces secteurs investis par les activités et l'habitat informel (mangroves en particulier), car on y trouve les personnes les plus vulnérables, les plus marginalisées et donc les moins ciblées par les campagnes d'information préventive sur les risques naturels.

- 43 Un autre défi pour Mayotte et d'arriver à réduire les temps cumulés du processus d'évacuation en jouant sur trois leviers : améliorer la diffusion de l'alerte montante et descendante (délais et efficacité), renforcer la préparation des populations (sensibilisation, exercices) et du territoire (balisage).

Réduire les délais d'alerte

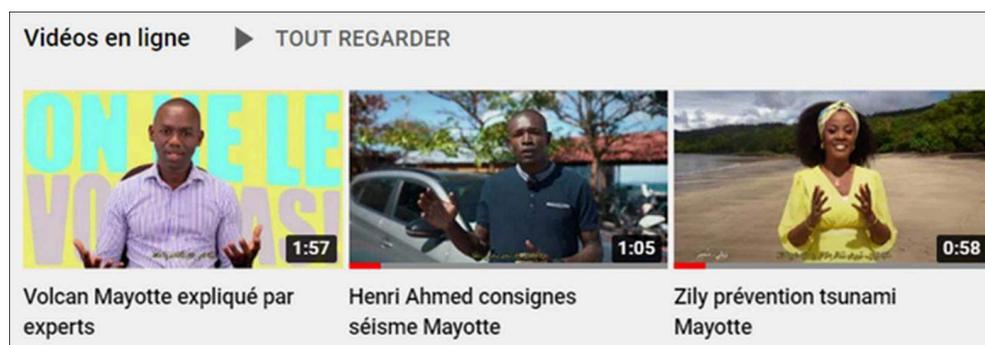
- 44 En partant de deux scénarios de tsunamis de sources proches et de plusieurs hypothèses de délai d'évacuation modélisés, nous avons pu voir que le différentiel de temps reste largement défavorable à Mayotte pour sécuriser les populations littorales, de surcroît dans les zones à faible audibilité des sirènes. Ce problème ne se pose pas pour les tsunamis distants pouvant être générés par les zones de subduction du Makran ou de Sumatra, vu les temps de trajets, évalués respectivement à environ 6 h et 9 h.
- 45 À Mayotte, comme aux Antilles ou à La Réunion, Météo-France est le point focal chargé de réceptionner et diffuser localement l'alerte montante en provenance de « fournisseurs de service tsunami » régionaux (*Tsunami Service Providers*, TSP) vers les Préfectures (illustration 1). En effet, ces territoires d'outre-mer ne sont pas couverts par le Centre d'ALerte aux Tsunami national (CENALT¹⁸), mais dépendent encore des TSP assurés par les Indiens (ITEWC), les Indonésiens (InaRTSP), les Australiens (JATWC), et les Américains (PTWC), qui sont dimensionnés pour émettre un message d'information ou d'avis de tsunami dans un délai maximal de 15 minutes après le déclenchement de la source.
- 46 Mais ce dispositif est conçu pour des tsunamis transocéaniques et ne peut répondre aux besoins de transmission d'une alerte en cas de tsunamis locaux, de surcroît d'origine gravitaire, tels que ceux modélisés à Mayotte. Pour répondre à cette nouvelle nécessité, l'État français a largement investi localement dans le développement d'un réseau de surveillance volcanologique et sismologique (le REVOSIMA)¹⁹, mais aucune procédure d'alerte officielle et préfectorale couplée à ce réseau n'est pour le moment opérationnelle à Mayotte. Le temps de transmission de l'alerte montante (vers les autorités locales) et descendante (vers les populations) pourra être optimisé en jouant sur plusieurs aspects, techniques (équipements, infrastructures) et organisationnels (procédures, exercices) et en particulier la détection automatique du glissement de terrain générant le tsunami, ce qui serait *a priori* possible en utilisant les premières ondes sismiques générées par le glissement de terrain (Moretti *et al.* 2020 ; Hibert *et al.* 2011). Mais cela nécessiterait le développement d'une méthode de détection automatique calibrée localement, ce qui n'est pas encore le cas à Mayotte.
- 47 Beaucoup d'incertitudes demeurent également à Mayotte sur la chaîne d'alerte descendante et son activation, malgré le déploiement de 23 sirènes dédiées, et du dispositif national FR-Alert²⁰, sachant par ailleurs que d'après nos observations et simulations, le signal des sirènes ne couvre pas la totalité du territoire. Ces modèles apportent cependant des éléments pour optimiser cette audibilité en précisant les secteurs qui restent à équiper, de jour et de nuit, en fonction de modèles de fréquentation humaine qui restent à développer dans la continuité de cette recherche.
- 48 Deux récents événements catastrophiques survenus en Indonésie en 2018 (Baie de Palu en Sulawesi et Détroit de la Sonde) ont souligné les difficultés, voire l'incapacité pour les autorités, d'alerter les populations en cas de tsunami de sources proches, qu'elles soient sismiques ou volcano-gravitaires, et arrivant en moins de 20 minutes sur les

côtes (Titov, 2021). D'après Wang *et al.* (2022), lors du tsunami de Palu, 65 % des individus ont réagi en moins de 5 minutes après la fin des secousses sismiques (76 % en moins de 10 min, 84 % en moins de 15 min et 95 % en moins de 30 min). Rappelons que dans nos modèles précédents nous avons supposé un temps de réaction des populations (TR) de 5 minutes après un délai d'alerte (TA) de 10 minutes. En l'état actuel de la prévention à Mayotte il s'agit de deux hypothèses très optimistes mais que l'on peut convertir en deux objectifs à atteindre dans le cadre du dispositif de préparation qui s'amorce à Mayotte.

Préparer les populations et le territoire (balisage)

- 49 Parallèlement à ces déploiements technologiques, et sans plus attendre, la préparation des populations doit rester une priorité absolue pour gagner du temps sur les phases d'alerte, de réaction et d'évacuation face à un tsunami. Ainsi, le projet EVACTSU-Mayotte a également initié un projet d'information préventive visant à sensibiliser les populations aux signes précurseurs d'un tsunami afin de favoriser les évacuations spontanées, et ceci avant même l'arrivée d'une hypothétique alerte officielle. Cela a donné lieu à trois vidéos co-construites avec une multitude de partenaires locaux et supervisées par les services de l'État dans le cadre d'une campagne dénommée « #On sera prêts²¹ ». Elles rappellent en plusieurs langues parlées à Mayotte (français, shimaoré, kibushi, et sous-titrage en alphabet arabe) les risques liés à ce nouveau volcan et les mesures individuelles de sauvegarde à suivre, en cas de séisme et de tsunami (illustration 15). Elles ont bénéficié du concours bénévole de personnalités locales bien identifiées par les jeunes (six mahorais sur dix ont moins de 25 ans), et de l'autorité religieuse et musulmane de Mayotte (Grand Cadi qui représente 95 % des Mahorais qui sont d'obédience musulmane et de rite sunnite). Elles sont diffusées sur les réseaux sociaux.

Illustration 15 – Les trois vidéos de prévention du risque sismo-tsunami-volcanique à Mayotte



Auteurs : DIRMOM *et al.* (ex. Délégation Interministérielle aux Risques Majeurs Outre-Mer). Source : documents du projet Evactsu-Mayotte sur Youtube. URL: <https://www.youtube.com/channel/UCEmqix6TlfQXY7n2rMDoVvkQ/featured>

- 50 Plans, cartographies, consignes et campagnes de sensibilisation participent certes à un début d'acculturation au risque tsunami à Mayotte, mais ces mesures doivent sans plus tarder se traduire dans le paysage par une signalétique adaptée et conforme aux normes en vigueur (norme ISO 20712-1 : 2008), telle que celle en cours de déploiement aux Antilles, et en particulier en Guadeloupe sur la commune de Deshaies, ou à Cannes en Métropole. Ces premiers balisages d'itinéraires permanents se font encore attendre

à Mayotte, même si le village de Poroani (commune de Chirongui) vient de donner l'exemple en posant ses premiers panneaux. Par ailleurs, les premiers exercices d'évacuation d'établissements scolaires menés par la Préfecture en juin 2022²², laissent entrevoir une véritable volonté politique de promouvoir la prévention de ce risque (illustration 16).

Illustration 16 – Le premier panneau permanent indiquant un site refuge tsunami à Mayotte (village de Poroani, commune de Chirongui, 2023) et un exercice d'évacuation impliquant des scolaires à Fougoujou (commune de Dzaoudzi), le 25/05/2022



Auteurs : F Idaroussi Tsimanda (panneau) et E. Dumas (évacuation).

Anticiper les comportements potentiels

- 51 Tous les sites refuges validés ont été soigneusement choisis pour limiter les temps de trajet, car deux freins peuvent démotiver les personnes, surtout en cas d'alertes répétées et de consignes d'évacuation pédestre : la distance à parcourir et le risque de cambriolage dans les habitations délaissées le temps de l'évacuation. Cette crainte du vol au domicile en cas de crise à Mayotte a d'ailleurs largement été mise en évidence lors d'une enquête assez récente menée pour le compte de la Croix Rouge de Mayotte (Cripps et Souffrin, 2020). Il a fallu également convaincre certains récalcitrants, arguments scientifiques à l'appui, qu'il n'est pas nécessaire de partir se réfugier sur les sommets de l'île en cas de tsunami, et donc de prendre sa voiture et son mobilier... L'analyse du comportement des habitants lors d'une l'alerte tsunami survenue le 22 mars 2005 (d'origine indonésienne), avait clairement mis en évidence une évacuation spontanée vers des zones refuges excessivement hautes et lointaines (Lavigne *et al.* 2012). Il s'agissait de La Vigie, point culminant de Petite-Terre (203 m d'altitude) et de la ligne de crête surmontant le lac Dziani (70 m). En Grande-Terre, certains avaient même cherché refuge sur le Mont Choungui à 593 m d'altitude ! Les deux tiers des personnes interrogées avaient évacué à pied, le reste en voiture ou en deux roues, en emportant souvent des objets de valeur et même une télévision pour l'un deux. D'autres comportements inadaptés ont été constatés lors de de la crise sismo-volcanique de mai 2018, et en particulier le 15 mai à 18h48 (Mb 5.6), veille du ramadan, quand s'est produit le plus fort séisme de la crise sismo-volcanique. Beaucoup de gens se sont regroupés sur des stades, des mosquées et des places publiques, parfois en bord de mer (Mori, 2022), avec le sentiment, ou pas, d'être en sécurité, faute de consignes claires des autorités sur les conduites à tenir, et d'une plus faible conscience

du risque de tsunami qu'actuellement. À Sada par exemple, les habitants se sont regroupés sur la place du marché artisanal, située à 5 m d'altitude, et même les gens des hauteurs y sont descendus !

Des difficultés d'acculturation au risque tsunami surmontables

- 52 De nombreuses études montrent que l'information appropriée des populations constitue aujourd'hui un des principaux leviers de progression vers une gestion plus efficiente des risques (Courant *et al.*, 2021). Mais la mise en place d'une politique de prévention et d'acculturation aux risques naturels est un processus complexe, long et coûteux, de plus à Mayotte, département le plus pauvre de France, en proie à de nombreuses difficultés socio-économiques, démographiques, environnementales et fonctionnelles. Mayotte connaît les nombreux symptômes d'un pays en développement (Idaroussi Tsimanda, 2022). 77 % de la population vivent sous le seuil de pauvreté et le niveau de vie médian des habitants de Mayotte est sept fois plus faible qu'au niveau national (source INSEE, 2021). Les autorités font face à une multitude de crises quotidiennes à gérer : pénurie en eau potable, pression démographique, immigration clandestine, accès au foncier, occupations illégales, habitat insalubre, insécurité, dégradation de l'environnement, éducation, *etc.* Dans ces conditions on peut comprendre que la prévention des tsunamis ne soit pas une priorité absolue des autorités locales et de la population. Ces vulnérabilités sociales et territoriales entrent dans l'équation du risque (Defossez *et al.*, 2017) et s'enracinent dans des causes profondes (Wisner *et al.*, 2004 ; Adger *et al.*, 2005 ; Gaillard, 2007 et 2010 ; Idaroussi Tsimanda, 2022 et 2023) qui viennent également freiner le processus d'acculturation aux risques « naturels » souhaité pour Mayotte, tant dans l'action des autorités que dans le niveau d'implication des populations (Buisson *et al.*, 2015 ; Rullier, 2022 ; Samson, 2022).
- 53 Aussi, sans prétendre à l'exhaustivité, nous souhaitons aborder un certain nombre d'obstacles existants ou potentiels qui méritent analyse et solutions afin de mieux préparer et sensibiliser les populations de Mayotte face au risque tsunami. Comme en témoigne cet article, ce risque est désormais bien caractérisé et son diagnostic doit être considéré comme un premier socle de connaissances scientifique et technique pour dimensionner des mesures de prévention. Fait assez rare en France pour être souligné, cette nouvelle capacité d'expertise pour Mayotte a pu se structurer autour d'un réseau pluridisciplinaire spécialement créé à l'initiative de l'État lors de la naissance du volcan Mont Fani Maoré. Malgré quelques initiatives louables (conférences publiques, bulletins d'information grand public), les compétences et avis de ce réseau d'experts devraient cependant être davantage mis au service des élus, des équipes municipales, des associations, des établissements scolaires, et donc des populations, soit directement, soit en s'appuyant sur des médiateurs scientifiques locaux écoutés par la population et/ou des journalistes formés à la gestion des risques et des crises (Devès *et al.*, 2002a et 2022b). Ce souhait de dialogue plus soutenu entre milieux scientifiques et population permettrait de mieux faire comprendre les risques et les incertitudes inhérentes à l'expertise, de réduire le risque de méfiance potentiel envers les scientifiques, mais aussi et surtout de favoriser une approche moins descendante de la gestion des risques en cernant les demandes et en favorisant la participation citoyenne dans la co-construction de solutions préventives.

- 54 Un premier facteur à prendre en compte préalablement à toute campagne de sensibilisation, et qui l'a été partiellement durant cette première expérience, est celui de la représentation sociale du risque et des comportements potentiels que cela peut générer. Une enquête réalisée par Dumas (2022) auprès des collégiens de Mamoudzou a montré que le risque tsunami était perçu comme « possible mais peu probable » par 75 % d'entre eux. Par ailleurs l'enquête commanditée par la Croix Rouge Française de Mayotte en 2020 (Cripps et Souffrin, 2020) a montré que les tsunamis représentaient le risque naturel le moins préoccupant pour les populations interrogées (9,4 %), loin derrière les séismes (28,8 %), comme si le lien de causalité entre séismes et tsunamis n'était pas systématiquement établi par les personnes interrogées. Par ailleurs, ce risque tsunami était jugé rare et très largement surestimé, par exemple pour la hauteur des vagues attendues (Cripps et Souffrin, 2020). Nos séances explicatives auprès des équipes municipales, les formations assurées dans les écoles par nos stagiaires (préparation aux exercices d'évacuation, lecture de cartes, jeux, cartes mentales) (Dumas, 2022 ; Bassompierre, 2023) et divers échanges informels avec des habitants ont permis de corriger certains de ces biais de représentations et de montrer dans un second temps qu'il était possible de se protéger d'un tsunami, en soulignant cependant que même un phénomène de faible amplitude pouvait entraîner des dommages corporels très graves. Clairement, la quasi inexpérience de vécu d'un tsunami à Mayotte, tout comme l'invisibilité de la source potentielle (volcan sous-marin) pèsent considérablement sur ces représentations trompeuses. Tout l'enjeu de la sensibilisation a été d'expliquer en images le phénomène attendu à Mayotte, la localisation du volcan, et de s'appuyer sur des vidéos de tsunamis modérés (par exemple celui du 30 octobre 2020 en Turquie et en Grèce) pour construire une représentation mentale du phénomène le plus probable pour Mayotte.
- 55 Un autre obstacle à l'acculturation au risque est celui de la barrière de la langue et de l'accès des populations marginalisées (4 personnes sur 10 vivent dans des quartiers informels) à l'information préventive (Idaroussi Tsimanda, 2022). Même si le français est la langue officielle, environ 37 % de la population ne le parle pas et la lecture en langue française est très difficile pour plus de 7 jeunes sur 10 (source INSEE, 2017). La culture orale est dominante et les langues parlées quotidiennement sont le shimaore et le kibushi. Une autre difficulté est d'intéresser une population souvent jeune (54 % de la population a moins de 20 ans), mal scolarisée pour une part, notamment dans les bidonvilles, et tournée vers d'autres préoccupations quotidiennes. Malgré une élévation du niveau de diplôme, les sorties du système scolaire sont précoces, et en 2017 seules 32 % des personnes de 15 ans ou plus sorties du système scolaire possédaient un diplôme qualifiant (contre 72 % en métropole). 39 % des femmes adultes n'avaient jamais été scolarisées (source INSEE, 2017).
- 56 Par conséquent les outils de sensibilisation doivent nécessairement être traduits et adaptés à ce contexte très particulier. Pour y répondre, au moins partiellement, la mise en pratique des évacuations semble bien fonctionner, en permettant de fixer des connaissances pratiques sur le tsunami et la mise en sécurité. D'après Alvarez (2021), 70 % de notre apprentissage se faisait lorsque nous agissons par nous même au quotidien en situation réelle. Nous encourageons ainsi les autorités mahoraises à organiser régulièrement ce type d'exercice, et à matérialiser durablement les itinéraires d'évacuation au moyen de panneaux et de marquages au sol.

- 57 Par ailleurs, force est de constater que le manque de formation de certains agents du SIDPC (Service Interministériel de la Défense et de la Protection Civile) de la préfecture de Mayotte, le fort renouvellement du personnel de nombreuses directions des services publics (trois directeurs de SIDPC le temps de notre projet par exemple), la faiblesse des effectifs, ne peuvent que compliquer la mise en place d'une stratégie locale cohérente, continue et coordonnée de prévention. D'après un audit menée pour le compte de deux ministères en 2015, « La situation d'isolement et de faible attractivité pour des cadres confirmés souvent mise en avant dans les outre-mers, est amplifiée à Mayotte, département proche en cela de celui de la Guyane » (Buisson *et al.*, 2015). Cette pénurie pourrait être compensée, au moins provisoirement, par l'accueil systématique de stagiaires issus de formations dédiée à la gestion des risques naturels, et dotés de bonnes compétences en cartographie.
- 58 Bien qu'impliquant dans sa phase de validation de nombreux représentants des communautés locales (équipes techniques municipales, élus, pompiers, police territoriale), l'approche souhaitée par l'État et conduite à Mayotte par notre équipe depuis trois ans, n'en reste pas moins descendante, centralisée et contrôlée par l'autorité scientifique et institutionnelle, sans implication directe des populations locales. L'enjeu futur est pourtant l'appropriation de ces plans par des populations qui n'ont pas été directement impliquées dans leur fabrication et à qui on demande d'appliquer des consignes de prévention et de maintenir un certain niveau de conscience du risque tsunami. Une manière d'y parvenir, lors de la révision des plans ou sur d'autres territoires à doter (à la Réunion par exemple) serait de faire appel à la cartographie participative, à l'instar des travaux menés aux Îles Loyautés (Le Duff, 2014 et 2018), au Chili (Cubelos *et al.*, 2019), à Java (Sabani et Trihatmoko, 2021) ou bien en Nouvelle Zélande avec des enfants (Le De *et al.*, 2020). En effet, selon Gaillard & Mercer (2013), afin d'obtenir des actions efficaces, « il est nécessaire de rejeter le rapport de force qui permet de juger les savoirs locaux à l'aune des connaissances scientifiques ». La recherche d'un équilibre de la relation pouvoir/connaissance nécessite une plateforme qui permette un dialogue sur un pied d'égalité entre toutes les parties prenantes (Cronin *et al.*, 2004). Les cartes participatives peuvent agir comme de telles plateformes de dialogue et de concertation (Gaillard *et al.*, 2015). Cela nous aurait par exemple évité de proposer des sites refuges à proximité de cimetières, solution systématiquement rejetée par nos interlocuteurs/validateurs des équipes municipales. L'objectif international fixé en 2021 par l'IOC-UNESCO (2022) de « préparer et de rendre résilientes 100 % des communautés exposées au risque de tsunami d'ici 2030 » soulève de tels besoins. Combiner les connaissances locales et scientifiques dans la planification de l'évacuation des tsunamis équivaut respectivement à combiner les approches ascendantes et descendantes pour la réduction des risques. Cependant, les approches participatives exigent un temps de préparation, de coordination, d'animation et d'implication sur le terrain pas toujours compatible avec le temps de la crise et de l'expertise.
- 59 Mais les difficultés de l'acculturation aux risques ne sont pas propres à Mayotte tant « la culture du risque et son appropriation restent complexes, tant ce concept revêt des acceptions diverses (culture de crise, culture de la sécurité, conscience du risque, culture de la prévention, *etc.*, ainsi qu'une image négative et anxiogène, notamment avec de nouveaux risques vécus au quotidien (terroristes, sanitaires, cyber) » (Courant *et al.*, 2021). Mais selon ces mêmes auteurs, « Les actions de sensibilisation, de

pédagogie et d'information adaptées et diversifiées dans les départements et territoires d'outre-mer, certes à renforcer, permettent d'enraciner la culture du risque ».

Conclusion

- 60 Le territoire de Mayotte comporte de bonnes prédispositions géographiques aux évacuations pédestres en cas de tsunami grâce à un littoral relativement escarpé. Ainsi, les itinéraires d'évacuation proposés et validés par les autorités permettent de sécuriser 97,6 % des zones habitées en moins de 15 minutes, 50 % de la population résidente en moins de 5 minutes et 99 % en moins de 13,4 minutes. Néanmoins ces valeurs sont théoriques et la confrontation de ces délais d'évacuation avec les temps d'arrivés supposés de tsunamis de sources proches laissent supposer un déficit critique de délais d'évacuation dans certains secteurs, qui plus est, mal couverts par les sirènes. Les différents modèles et analyses spatiales développés dans cette recherche permettent ainsi de cartographier ces zones critiques et de tester plusieurs hypothèses visant à évaluer le niveau de risque et les capacités d'alerte et d'évacuation pour différents scénarios. En cela ces résultats peuvent aider les autorités en charge de la prévention des risques à cibler des zones d'action prioritaires, en jouant sur l'amélioration des capacités d'alerte et d'évacuation, afin de compresser le délai global du processus d'évacuation. Ce gain de temps passera par des solutions techniques et des aménagements particuliers (balisage), mais c'est en préparant et sensibilisant les populations que ce gain sera le plus significatif pour réduire les pertes humaines en cas de tsunami.
- 61 Mayotte s'engage ainsi dans la voie de la prévention et les plans d'évacuation présentés dans cet article sont le premier socle tangible d'une acculturation au risque tsunami qui doit perdurer pour optimiser chaque étape du continuum spatial et temporel du processus « alerte-évacuation ». Ce dispositif est quasiment finalisé aux Antilles²³, partiellement réalisé en Nouvelle-Calédonie et en Polynésie, mais il tarde encore à venir en métropole et surtout à La Réunion. L'objectif prioritaire est de généraliser les exercices d'évacuation, pourquoi pas à la faveur des journées internationales *Indian Ocean-wide tsunami exercises (IOWAVE)* ou *World Tsunami Awareness Day*, et de satisfaire les conditions d'obtention de la reconnaissance internationale *Tsunami Ready Community*. Mayotte deviendrait ainsi la première communauté française à bénéficier de cette reconnaissance dans l'océan Indien, démontrant au passage que les bonnes pratiques viennent aussi de l'outre-mer, qu'elles s'enrichissent mutuellement entre territoires d'outre-mer, et que la métropole pourrait également bénéficier de cette expérience.

BIBLIOGRAPHIE

Adger W. N. et al., 2005. Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science*, vol. 309, n° 5737, p. 1036-1039.

- Alvarez J., 2021. *Livre Blanc. Analyse critique des modèles d'apprentissage* [En ligne]. Immersivefactory.com, 19p. URL: https://www.ludoscience.com/files/ressources/FR_Analyse_Critique_Modeles_Appr.pdf
- Audru J. C., Guennoc P., Thinon I., Abellard O., 2006. Bathymay : la structure sous-marine de Mayotte révélée par l'imagerie multifaisceaux. *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 338, n° 16, p. 1240-1249.
- Bassompierre L., 2023. *L'acculturation au risque tsunami chez les élèves Mahorais, un outil majeur en cas de catastrophe*. Mémoire de Master 1, GCRN, Université Montpellier 3, 129 p.
- Buisson B., Gautier M., Liger A., 2015. *Audit de la mise en œuvre de la politique nationale de prévention des risques naturels et technologiques à Mayotte*. Rapport n°009459-04 CGEDD - 2015/05/CGE/CI, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie & Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie. URL: <https://www.vie-publique.fr/rapport/35645-politique-prevention-risques-naturels-et-technologiques-mayotte>
- Courant F. et al., 2021. *Mission sur la transparence, l'information et la participation de tous à la gestion des risques majeurs, technologiques ou naturels*. Rapport n° 013606-01 établi pour le compte du Ministère de la Transition Ecologique, 68 p. URL: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/RAPPORT%20FINAL%20CULTURE%20DU%20RISQUE%20JUN%202021-1.pdf>
- Cripps A., Souffrin E., 2020. *Étude socio-anthropologique sur la perception des risques naturels à Mayotte. Rapport Final*. Étude déterminants socioculturels risques naturels Mayotte par le cabinet ESOI pour la CRF/PIROI, 131 p.
- Cronin S.J., Petterson M.G., Taylor P.W. et al., 2004. Maximising Multi-Stakeholder Participation in Government and Community Volcanic Hazard Management Programs. A Case Study from Savo, Solomon Islands. *Natural Hazards*, n° 33, p. 105-136.
- Cubelos C., Kularathna A.H.T.S., Bruno Valenzuela V.P., Iliopoulos N., Quiroz M., Yavar R., Henriquez P., Bacigalupe G., Onuki M., Mikami T., et al., 2019. Understanding Community-Level Flooding Awareness in Remote Coastal Towns in Northern Chile through Community Mapping. *Geosciences* [En ligne], vol. 9, n° 7, document 279. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences9070279>
- Defossez S., Vinet F., Leone F., 2017. Assessing Vulnerability to Flooding: Progress and Limitations. In Vinet F. (ed.), *Floods, volume 1 - Risk Knowledge*. ISTE Press & Elsevier, p. 241-257.
- Devès M., Lacassin R., Pécout H., and Robert G., 2022a. Risk communication during seismo-volcanic crises: the example of Mayotte, France. *Natural Hazards and Earth System Sciences* [En ligne], vol. 22, n° 6, p. 2001-2029. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2001-2022>
- Devès M., Moirand S., Le Vagueresse L., Robert G., 2022b. Mayotte's seismo-volcanic "crisis" in news accounts (2018–2021). *Comptes Rendus. Géoscience* [En ligne], tome 354, n° S2, p. 391-415. DOI: <https://doi.org/10.5802/crgeos.149>
- Dewi R.S., (2012). A-Gis based approach of an evacuation model for tsunami risk reduction. *Journal of Integrated Disaster Risk Management*, vol. 2, n° 2, p. 108-139.
- Dijkstra E.W., 1959. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, n° 1, p. 269-271.
- Douvinet J., Serra-Llobet A., Bopp E., and Kondolf G. M., 2021. Are sirens effective tools to alert the population in France? *Natural Hazards and Earth System Sciences* [En ligne], vol. 21, n° 10, p. 2899-2920. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2899-2021>

- Dumas E., 2022. *Le risque tsunami à Mayotte*. Rapport de stage réalisé au sein du Service Interministériel de la Défense et de la Protection Civile de Mayotte. Master 2 GCRN, Université Montpellier 3, 89 p
- EM-DAT, CRED / UCLouvain, 2023. *The CRED/OFDA International Disaster Database* [site web]. Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium. URL: www.emdat.be
- FEMA (Federal Emergency Management Agency), 2009. *Vertical Evacuation from Tsunamis: A Guide for Community Officials*. FEMA P646A, 64 p.
- Feuillet N., Jorry S., Crawford W. C., Deplus C., Thion I., Jacques E., *et al.*, 2021. Birth of a large volcanic edifice offshore Mayotte via lithosphere-scale dyke intrusion. *Nature Geoscience*, vol. 14, n° 10, p. 787-795.
- Fraser S.A., Wood N.J., Johnston D.M., Leonard G.S., Greening P.D., Rossetto T., 2014. Variable population exposure and distributed travel speeds in least-cost tsunami evacuation modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences* [En ligne], vol. 14, n° 11, p. 2975-2991. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2975-2014>
- Gaillard J.C., 2007. De l'origine des catastrophes : phénomènes extrêmes ou âpreté du quotidien ? *Natures Sciences Sociétés*, vol. 15, n° 1, p. 44-47.
- Gaillard J. C., 2010. Vulnerability, capacity and resilience: Perspectives for climate and development policy. *Journal of International Development*, vol. 22, n° 2, p. 218-232.
- Gaillard J. C., Clavé E., Vibert O., Denain J. C., Efendi Y., Grancher D., Setiawan R., 2008. Ethnic groups' response to the 26 December 2004 earthquake and tsunami in Aceh, Indonesia. *Natural Hazards*, n° 47, p. 17-38.
- Gaillard J. C., Mercer J., 2013. From knowledge to action: Bridging gaps in disaster risk reduction. *Progress in Human Geography*, vol. 37, n° 1, p. 93-114.
- Gaillard J.C., Hore K., Cadag J.R.D., 2015. Participatory mapping for disaster risk reduction: A Review. *The Globe*, vol. 76, p. 31-38.
- Girres J.F., Leone F., Péroche M., Gustave G., Gherardi M., 2018. Analysis of tsunami evacuation maps for a consensual symbolization rules proposal. *International Journal of Cartography*, vol. 4, n° 1, p. 4-24.
- Hibert C., Mangeney A., Grandjean G., Peltier A., DiMuro A., Shapiro N., Ferrazzini V., Boissier P., Durand V., Kowalski P., 2017. Spatio-temporal evolution of rockfall activity from 2007 to 2011 at the Piton de la Fournaise volcano inferred from seismic data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* [En ligne], n° 333-334, p. 36-52. URL: https://www.ipgp.fr/~mangeney/hibert_et_al_jvgr_rockfall_reunion_2017.pdf
- Idaroussi Tsimanda F. 2022. *Vulnérabilités différentielles des migrants à Mayotte : enjeux socio-politiques de la réduction des risques dans un département français insulaire en développement*. Thèse de doctorat, Géographie-Aménagement. Université Paul Valéry Montpellier 3, 608 p.
- Idaroussi Tsimanda F., 2023. Migrer pour un bidonville. La vulnérabilité socio-économique des migrants comoriens à Mayotte. *Géoconfluences* [En ligne]. URL: <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-thematiques/inegalites/articles/migrants-comores-mayotte>
- IOC-UNESCO, 2008. *Tsunami Preparedness – Information Guide for Disaster Planners* [En ligne]. IOC Manuals and Guides n° 49, 29 p. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000160002>

- IOC-UNESCO, 2013. *How to Plan, Conduct and Evaluate UNESCO/IOC Tsunami Wave Exercises* [En ligne]. IOC Manuals and Guides, n° 58, 86 p. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000218967>
- IOC-UNESCO, 2022. *Standard Guidelines for the Tsunami Ready Recognition Programme* [En ligne]. Manuals and Guides, n° 74, 62 p. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381353>
- IOC-UNESCO, 2023. *The North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and connected seas Tsunami Early Warning and Mitigation System (ICG/NEAMTWS) 2030 Strategy (summary)* [En ligne]. IOC Brochure 2023-2, 15 p. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000385120.locale=en>
- Ishiwatari M., Arakida M., 2012. *Evacuation, Knowledge Note 2-6 cluster 2: Nonstructural Measures*. The World Bank Institute, 16 p.
- 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., Fachrizal, 2009. Reconstruction of tsunami inland propagation on December 26, 2004 in Banda Aceh, Indonesia, through field investigations. *Pure and Applied Geophysics*, n° 166, p. 259-281.
- Lavigne F., Paris R. (dir.), 2011. *TSUNARISQUE. Le tsunami du 26 décembre 2004 à Aceh, Indonésie* [En ligne sur OpenEdition]. Éd. de la Sorbonne, 327 p. URL: <https://books.openedition.org/psorbonne/3790?lang=fr>
- Lavigne F. (dir.), Sahal A., Coquet M., Wassmer P., Goett H., Leone F., Péroche M., Lagahé E., Gherardi M., Vinet F., Hachim S., Drouet F., Quentel E., Loevenbruck A., Schindelé F., Hébert 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.
- Le De L., Gaillard J. C., Gampell A., Loodin N. & Cadag J., 2020. Participatory mapping 2.0: New ways for children's participation in disaster risk reduction. *Australian Journal of Emergency Management*, vol. 35, n° 2, p. 34-42.
- Le Duff M., Dumas P., Allenbach M., 2014. Quelle gouvernance des risques littoraux aux îles Loyauté (Nouvelle-Calédonie), dans le cadre du réchauffement climatique ? *Actes du Colloque international Cocorisco, Connaissance et compréhension des risques côtiers : aléas, enjeux, représentations, gestion*, juillet 2014, Brest.
- Le Duff M., Dumas P., Sabinot C., Allenbach M., 2016. Le risque tsunami en Nouvelle-Calédonie : Évolutions des facteurs de vulnérabilités et de résiliences à Lifou en territoire coutumier kanak. *Vertigo - La revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], vol. 16, n° 3. DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.17951>
- Le Duff M., 2018. *Les risques naturels côtiers en Nouvelle-Calédonie : contribution pour une gestion intégrée. De la caractérisation du risque à la participation citoyenne, quelques perspectives pour la prévention des risques aux îles Loyauté*. Thèse de doctorat. Université de la Nouvelle-Calédonie, 549 p.
- Lemoine A., Briole, P., Bertil D., Roullé, A., Foumelis M., Thinon I., Raucoules D., de Michele M., Valty P., Hoste Colomer R., 2020a. The 2018–2019 seismo-volcanic crisis east of Mayotte, Comoros islands: seismicity and ground deformation markers of an exceptional submarine eruption. *Geophysical Journal International* [En ligne], vol. 223, n° 1, p. 22-44. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa273>
- Lemoine A., Pedreros R., Filippini A., 2020b. *Scénarios d'impact des tsunamis pour Mayotte*. Rapport Final. BRGM/RP-69869-FR, 173 p.

- Leone F., Lavigne F., Paris R., Denain J.C., Vinet F., 2011. A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability. *Applied Geography*, vol. 31, n° 1, p. 363-375.
- Leone F., Péroche M., Lagahé E., Gherardi M., Sahal A., Vinet F., Hachim S., Lavigne F., 2013. Modélisation de l'accessibilité territoriale pour l'aide à la gestion de crise tsunami (Mayotte, France) - Territorial Accessibility Modeling for Tsunami Crisis Management in French-Administered Mayotte (Indian Ocean). *Annales de géographie*, vol. 5, n° 693, p. 502-524.
- Leone F. (dir.), 2014. *Atlas des risques naturels et des vulnérabilités territoriales de Mayotte* [consultable sur HAL]. Géorisques, hors-série. Montpellier, Ed. Presses Universitaires de la Méditerranée, 176 p. URL: <https://hal.science/hal-03137297>
- Leone F., Péroche M., Gutton R., 2014. 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], vol. 14, n° 2. URL: <http://vertigo.revues.org/15046> - DOI: <https://doi.org/10.4000/vertigo.15046>
- Leone F., Omira R., Péroche M., Mellas S., Meschiné de Richemond N., Gherardi-Leone M., Lavigne F., Zourarah B., Mehdi K., Baptista M.A., 2017. Apports des sciences géographiques à la prévention du risque tsunami au Maroc. *Hespéris-Tamuda*, vol. LII, n° 1, p. 383-414.
- Leone F. (dir), Péroche M., Robustelli M., Cargnelutti L., Perdrieau J.C., Coupin T., Gherardi M., 2018. *Planifier les évacuations en cas de tsunami : la méthode EXPLOIT*. Guide méthodologique. UMR GRED, Université Paul Valéry Montpellier 3 & IRD, 88 p.
- Marie C.V., Robin A., s.d. [c.2020]. *Diversité et précarité : Le double défi des univers ultramarins. Mayotte* [En ligne]. HCFEA, 42 p. URL: https://www.hcfea.fr/IMG/pdf/11_diversite_des_drom_mayotte.pdf
- Masquelet C., Leroy S., Delescluse M., Chamot-Rooke N., Thinon I., Lemoine A., et al., 2022. The East-Mayotte new volcano in the Comoros Archipelago: structure and timing of magmatic phases inferred from seismic reflection data. *Comptes Rendus. Géoscience* [En ligne], tome 354, n° S2, p. 65-79. URL: <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/articles/10.5802/crgeos.154/>
- Mayaguezz H., Plumejeaud-Perreau C., Leone F., Pouget F., 2017. Spatio-Temporal Modeling of Human Vulnerability in The Case of a Tsunami in Padang, Indonesia. *International Journal of Mass Emergencies & Disasters*, vol. 35, n° 3, p. 224-270.
- Moretti L., Mangeney A., Walter F., Capdeville Y., Bodin T., Stutzmann E., Le Friant A., 2020. Constraining landslide characteristics with Bayesian inversion of field and seismic data. *Geophysical Journal International* [En ligne], vol. 221, n° 2, p. 1341-1348. URL: https://www.ipgp.fr/~stutz/2020_moretti_al_stutzmann_landslide_GJI.pdf
- Mori M., 2022. Storytelling, language, and the earthquake swarm of May 2018: Insights into Shimaore and Kibushi from narrative analysis. *Comptes Rendus. Géoscience* [En ligne], tome 354, n° S2, p. 1-21. URL: <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/articles/10.5802/crgeos.131/>
- NGDC, 2023. *National Geophysical Data Center / World Data Service: NCEI/WDS Global Historical Tsunami Database*. NOAA National Centers for Environmental Information. DOI: <https://doi.org/10.7289/V5PN93H7>
- Peltier A., Saur S., Ballu V., Beauducel F., Briole P., Chanard K., et al., 2022. Ground deformation monitoring of the eruption offshore Mayotte. *Comptes Rendus. Géoscience* [En ligne], tome 354,

n° S2, p. 171-193. URL: <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/articles/10.5802/crgeos.176/>

Péroche M., 2016. La gestion de crise tsunami dans la Caraïbe : contribution géographique aux dispositifs d'alerte et d'évacuation des populations [consultable sur HAL]. Thèse de Doctorat, Université Paul-Valéry Montpellier 3, 409 p. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03129123>

Péroche M., Leone F., Granjon A., Aliaga B., 2019. Les navires de croisière face au risque tsunami dans la mer des Caraïbes. In Diop A., Gherardi M. (dir.), *Rivages et Horizons. Hommages au géographe Jean-Marie Miossec*. Paris, Editions L'Harmattan, p. 255-270.

Poulain P., Le Friant A., Mangeney A., Grandjean G., Pedreros R., Filippini A., Lemoine A. [2020]. *Scénarios d'impact de tsunamis liés à des instabilités potentielles de pentes sous-marines au large de Mayotte*. Travail réalisé dans le cadre de thèse de Pablo Poulain, cofinancement IPGP-BRGM, 15 juin 2020, 48 p.

Poulain P., 2022. *Apport de la modélisation numérique à l'étude des aléas liés aux instabilités gravitaires et aux tsunamis associés : Application en contexte volcanique (Martinique et Mayotte)*. Thèse de doctorat. Université Paris Cité.

Poulain P., Le Friant A., Pedreros R., Mangeney A., Filippini A.G., Grandjean G., Lemoine A., Fernández-Nieto E.D., Castro Díaz M.J., Peruzzetto M., 2022. Numerical simulation of submarine landslides and generated tsunamis: application to the on-going Mayotte seismo-volcanic crisis. *Comptes Rendus. Géoscience* [En ligne], tome 354, n° S2, p. 361-390. URL: <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/articles/10.5802/crgeos.138/>

REVOSIMA, 2021. *Bulletins mensuels de l'activité sismo-volcanique à Mayotte*. Site IGPD. URL: <https://www.ipgp.fr/actualites-du-revosima/>

Rullier M., 2022. *La politique de gestion des risques d'inondation à l'épreuve de l'île mahoraise*. Thèse de doctorat. Université Paris Est, 488 p.

Roger J., 2019. Potential tsunami hazard related to the seismic activity east of Mayotte island, Comoros Archipelago. *Science of Tsunami Hazards*, vol. 38, n° 3.

Sabani W., Trihatmoko E., 2021. Participatory Mapping of Tsunami Evacuation Routes (Case Study of Karangbenda Village Cilacap Regency). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, n° 884, n° 1. IOP Publishing. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/884/1/012033/pdf>

Sahal A., 2011. Le risque tsunami en France : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque. Thèse de doctorat. Université Paris 1 et LGP CNRS Meudon, 268 p.

Sahal A., Leone F., 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 modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences* [En ligne], vol. 13, n° 7, p. 1735-1743. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1735-2013>

Samson E., 2022. *Les risques naturels à Mayotte : quels enjeux pour un territoire vulnérable ?* Thèse professionnelle, Mastère Spécialisé Prévention et Gestion Territoriales des Risques. Strasbourg, INSP, 84 p.

Scheer S.J., Varela V., Eftychidis G., 2012. A generic framework for tsunami evacuation planning. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/B/C*, vol. 49, p. 79-91.

- Seguin S., Granjon M., Thibault P., Insee La Réunion-Mayotte, 2023. À Mayotte, un recensement adapté à une population aux évolutions hors normes. Site du *Blog de l'Insee*. URL: <https://blog.insee.fr/?s=Mayotte&submit=Recherche>
- Siliézar J., Aumond P., Chapron P., Péroche M., Can A., 2022. Méthode d'évaluation de l'audibilité d'un système d'alerte SAIP. In *Actes du 16ème Congrès Français d'Acoustique*, 11-15 Avril 2022, Marseille.
- Suppasri A., Shuto N., Imamura F. Koshimura S., Mas E., Yalciner A.C., 2013. Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Tsunami: Performance of Tsunami Countermeasures, Coastal Buildings, and Tsunami Evacuation in Japan [accessible en ligne]. *Pure and Applied Geophysics*, n° 170, p. 993-1018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0511-7>
- Titov V.V., 2021. Hard Lessons of the 2018 Indonesian Tsunamis. *Pure and Applied Geophysics*, n° 178, p. 1121-1133.
- Wang H., Lindell M., Siam M., Chen C., Husein R., 2022. Local residents' immediate responses to the 2018 Indonesia earthquake and tsunami. *Earthquake Spectra* [En ligne], vol. 38, n° 4, p. 2835-2865. DOI: <https://doi.org/10.1177/87552930221105104>
- Van der Woerd J., Famin V., Humler E., 2022. Special issue Comptes-Rendus Geoscience: The Mayotte seismo-volcanic crisis of 2018–2021 in the eastern Comoros archipelago (Mozambique channel). *Comptes Rendus. Géoscience* [En ligne], tome 354, n° S2, p. 1-6. URL: <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/articles/10.5802/crgeos.196/>
- Wisner B., Blaikie P., Cannon T., Davis I. 2004 (Second edition). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. Ed. Routledge.

NOTES

2. Site UNESCO-Tsunami Programme, *Qui sommes-nous ?*. URL: http://www.ioc-tsunami.org/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=2&lang=fr
3. Guyane, Martinique, Guadeloupe, Saint-Barthélemy, Saint-Martin, Saint-Pierre-et-Miquelon, La Réunion, Mayotte, Terres australes et antarctiques françaises, Nouvelle-Calédonie, Wallis-et-Futuna, Polynésie française, île de Clipperton.
4. Site UNESCO-Tsunami Programme. URL: <http://www.ioc-tsunami.org/>
5. Article L.125-2 du code de l'environnement. Cf. sur le site Géorisques [En ligne] du Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires et BRGM, *Les obligations réglementaires de l'information préventive*. URL: <https://www.georisques.gouv.fr/agir-sur-mon-territoire/les-obligations-reglementaires-de-linformation-preventive>
6. Nom adopté par la 10^{ème} réunion de la commission de toponomie de la direction technique, de la recherche et de l'innovation du Shom (Service hydrographique et océanographique de la Marine) et mentionné au préfet de Mayotte le 12 mai 2022 par sa présidente. Le toponyme sera porté, à leur prochaine édition, sur les cartes marines du Shom cartographiant cette zone. Par ordre d'échelle décroissante : 7677 Île Mayotte au 1 : 156 000 ; 7491 De Nosy Bé à la Baie d'Antsiranana au 1 : 350 000 ; 6672 De Maputo à Muqdiso - Madagascar au 1 : 3,5 M ; 6673 De Chagos Archipelago à Madagascar au 1 : 3,5 M.
7. Site de l'IPGP, Sciences pour la planète, onglet Observation / Infrastructures nationales hébergées / REVOSIMA - Actualités et Bulletins. URL: <https://www.ipgp.fr/actualites-du-revosima/>

8. Depuis 2021, le recensement prend à Mayotte la même forme que sur le reste du territoire français avec une enquête annuelle couvrant chaque année une partie différente du territoire, avec quelques adaptations aux spécificités mahoraises. C'est au bout d'un cycle de cinq ans, en 2025, qu'on disposera des résultats complets par commune. En janvier 2022 la population de Mayotte a été estimée par l'INSEE à 300 000 habitants (Seguin *et al.*, 2023).

9. Projet EVACTSU-Mayotte : réalisé dans le cadre d'une convention de collaboration et de financement avec la Préfecture de Mayotte, Le Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale (SGDSN) et l'ex. Délégation Interministérielle aux Risques Majeurs Outre-Mer (DIRMOM), en lien avec la Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises (DGSCGC), la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR), la mission d'appui aux politiques de prévention des risques naturels outre-mer (MAPPROM), et le Réseau de Surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte (REVOSIMA). Résultats du projet accessible sur le site du Projet EVACTSU-Mayotte, *Le risque tsunami à Mayotte : se préparer à évacuer*. URL: <https://arcg.is/1be4iC0>

10. Les signes annonciateurs d'un tsunami sont le plus souvent un séisme ressenti et/ou un mouvement anormal du niveau de la mer tel que le retrait rapide ou la montée brutale des eaux à une vitesse bien plus rapide que celle de la marée. D'autres signes précurseurs sont également rapportés : bruit anormal de la mer, écume, comportements anormaux des animaux. Les moyens d'alerte officielle en cours de déploiement à Mayotte sont les sirènes et le dispositif FR-Alert par SMS. Mais dans le cas de sources lointaines (Indonésie), l'alerte peut aussi être transmise via les réseaux sociaux ou les médias.

11. Projet EXPLOIT-Antilles, pour « EXPLOitation et Transfert vers les collectivités des Antilles françaises d'une méthode de planification des évacuations en cas d'alerte tsunami ». URL du site : <https://exploit.univ-montp3.fr/>

12. Environ 100 km à pied parcourus durant trois semaines pour effectuer les repérages de terrain (deux personnes).

13. *NoiseModelling* est principalement développé par l'Unité Mixte de Recherche en Acoustique Environnementale (UMRAE, Université Gustave Eiffel) et le Lab-STICC (CNRS). URL: <https://noise-planet.org/noisemodelling.html>

14. Cette opération a été conduite à plusieurs reprises par 10 à 25 observateurs afin de tenir compte des conditions météorologiques variables et des bruits ambiants.

15. Site Projet EVACTSU-Mayotte. *Le risque tsunami à Mayotte : se préparer à évacuer*. URL: <https://arcg.is/1be4iC0>

16. Sachant qu'une zone densément urbanisée peut également générer des flux de personnes importants avec des risques de congestion des chemins d'évacuation, donc avec une incidence sur les délais de mise en sécurité.

17. Selon l'INSEE, à Mayotte, en 2017, les constructions fragiles (principalement en tôles) constituaient près de quatre logements sur dix, comme vingt ans auparavant. Dans les 7 bidonvilles enquêtés durant sa thèse, Fahad Idaroussi Tsimanda (2022) a dénombré une moyenne de 8 personnes par foyer (case). Pour l'ensemble de l'île cette taille moyenne des ménages est de 4 personnes, contre 2,2 en métropole (Marie et Robin, s.d [c.2020]).

18. Le CENALT (CENTre d'Alerte aux Tsunamis) est hébergé par le CEA à Bruyères-le-Châtel (Essonne). Il surveille 24h/24 et 7j/7, depuis 2012, les forts séismes et les tsunamis survenant en Méditerranée occidentale et dans l'Atlantique nord-est (alerte montante). Il alerte le COGIC (Centre opérationnel de gestion interministérielle des crises) chargé d'avertir les communes

(alerte descendante) en cas de risque de tsunami (URL du site du CENALT: <https://www.info-tsunami.fr/>).

19. Le réseau est fondé sur au moins neuf Sismomètres, 17 « *raspberry shake* », neuf Stations GPS (*Global Positioning System*), une station CO₂, trois stations magnétotelluriques, six OBS (*Ocean Bottom Seismometer*), un capteur de déformation verticale.

20. « FR-Alert est le nouveau dispositif d'alerte et d'information des populations (SAIP), déployé sur le territoire national depuis fin juin 2022. Il permet de prévenir en temps réel toute personne détentriche d'un téléphone portable de sa présence dans une zone de danger afin de l'informer des comportements à adopter pour se protéger. Si vous vous trouvez dans l'une des zones concernées par un danger imminent, vous pourrez recevoir une notification accompagnée d'un signal sonore spécifique, même si votre téléphone portable est en mode silencieux » (Accueil du Site FR-Alert. URL: <https://www.fr-alert.gouv.fr/>).

21. Préfecture de Mayotte. Site *Les services de l'État à Mayotte* (URL: <https://www.mayotte.gouv.fr/Actualites/Risque-sismo-volcanique/On-fera-prets>) et vidéos sur les pages Evactsu-Mayotte sur Youtube (URL: <https://www.youtube.com/channel/UCemqix6TlfQXY7n2rMDovkQ>).

22. Depuis, quatre exercices d'évacuation ont été accompagnés par notre équipe auprès de trois écoles et un collège. Cela représente 1 560 élèves évacués et sensibilisés au risque tsunami ainsi que 106 membres du corps éducatif.

23. Il aura fallu attendre 2007 pour voir la première étude sur les tsunamis aux Antilles françaises (BRGM). En 2008, les premières alertes tsunami étaient émises par l'ICG-CARIBE EWS, en 2013 trois lycées seulement évacuaient lors de l'exercice annuel CARIBWAVE, mais en 2017 ce sont 1000 organisations et au moins 40 000 personnes des Antilles françaises qui simulaient des évacuations lors de l'exercice international RICHTER. La commune de Deshaies en Guadeloupe est la première commune française et européenne à bénéficier d'une reconnaissance IOC-UNESCO « *Tsunami Ready* » depuis le 30 juin 2023 (<https://la1ere.francetvinfo.fr/guadeloupe/basse-terre/deshaies/deshaies-1ere-ville-de-france-a-obtenir-la-reconnaissance-tsunami-ready-1410650.html>).

1. Site *Le risque tsunami à Mayotte : se préparer à évacuer*. URL: <https://arcg.is/1be4iC0>

RÉSUMÉS

Les territoires ultra-marins français sont quasiment tous concernés par le risque tsunami. Mayotte n'échappe pas à cet aléa majeur, et aux risques induits par d'importants enjeux situés sur sa bande littorale. Depuis 2018, du fait de l'activité sismo-volcanique liée à l'apparition d'un nouveau volcan sous-marin (Mont Fani Maoré), plusieurs simulations de tsunamis ont été produites sur Mayotte. Elles ont permis de dimensionner des plans d'évacuation validés par les autorités. Les capacités d'évacuation, mais aussi d'alerte, ont pu ensuite être évaluées et discutées, en modélisant à la fois les délais de mise en sécurité des populations et l'audibilité théorique des sirènes. Mayotte s'engage ainsi dans la gestion du risque tsunami mais la préparation des populations doit rester une priorité afin de réduire les délais d'évacuation malgré des difficultés inhérentes à toute nouvelle stratégie de prévention.

The French ultra-marine territories are almost all concerned by the tsunami risk. Mayotte does not escape this major hazard, and the risks induced by important issues located on its coastline.

Since 2018, due to the seismo-volcanic activity related to the appearance of a new submarine volcano (Mont Fani Maoré), several tsunami simulations have been produced on Mayotte. These models have been used to develop evacuation plans validated by the authorities. Evacuation and warning capacities could be evaluated and discussed, by modeling both the time needed to safe the population and the theoretical audibility of sirens. Mayotte is thus committed to tsunami risk management but the preparation of populations must remain a priority in order to reduce evacuation times despite the difficulties inherent in any new prevention strategy.

INDEX

Mots-clés : Mayotte, tsunami, modélisation, alerte, évacuation, préparation

Keywords : Mayotte, tsunami, modeling, warning, evacuation, preparedness

Thèmes : Sur le Champ

AUTEURS

FRÉDÉRIC LEONE

Frédéric Leone, frederic.leone@univ-montp3.fr, est professeur à l'Université Paul-Valéry Montpellier 3 et directeur du Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier (LAGAM).

MONIQUE GHERARDI

Monique Gherardi

MATTHIEU PÉROCHE

Matthieu Péroche, maître de conférences à l'Université Paul Valéry – Montpellier 3.

ÉMILIE LAGAHÉ

Émilie Lagahé, ingénieure à l'Université des Antilles et membre de l'EA AIHP-GEODE.

PIERRE AUMOND

Pierre Aumond, chargé de recherches Université Gustave Eiffel, UMRAE - UMR Acoustique Environnementale.

JONATHAN SILIEZAR MONTOYA

Jonathan Siliezar Montoya, doctorant, Université Gustave Eiffel.

FAHAD IDAROSSI TSIMA

Fahad Idaroussi Tsimas, chercheur associé au LAGAM (Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier)

PABLO POULAIN

Pablo Poulain, post-doctorant, Université Paris Cité.

ANNE LE FRIANT

Anne Le Friant, post-doctorante, Institut de Physique du Globe de Paris.

ANNE MANGENEY

Anne Mangeney, professeure à l'Université Paris Cité, Institut de Physique du Globe de Paris.

SAID HACHIM MOGNE

Said Hachim Mogne, géographe au Conseil départemental de Mayotte.

VALENTIN ROUDIER

Valentin Roudier, étudiant à l'Université Paul Valéry – Montpellier 3.