

PREPARTOI

RAPPORT FINAL

Mars 2012



Résumé

Le programme de recherche PREPARTOI (*PRévention et REcherche Pour l'Atténuation du Risque Tsunami dans l'Océan Indien*, financé par la Fondation MAIF) propose une évaluation intégrée du risque tsunami dans les territoires français de l'Océan Indien (La Réunion et Mayotte). Son objectif réside dans le développement de méthodes d'évaluation des différentes composantes du risque (aléa, vulnérabilités, dommages potentiels) dans des sites exposés spécifiques (zones urbaines, d'activités industrielles, milieux naturels protégés, etc). De janvier 2010 à la fin 2011, le programme implique la participation d'une équipe d'experts français de l'évaluation et la gestion du risque tsunami. Les chercheurs étudient ainsi l'aléa historique dans les deux îles étudiées, modélisent la propagation et les effets hydrologiques à terre d'événements potentiels, et étudient les vulnérabilités humaines et structurelles associées dans le but de fournir aux autorités locales des scénarios d'endommagement et de pertes humaines, ainsi que des solutions d'évacuation, d'information et de réduction du risque.

Abstract

The PREPARTOI research program (*PRévention et REcherche Pour l'Atténuation du Risque Tsunami dans l'Océan Indien*, founded by the MAIF Foundation) proposes an integrated tsunami risk assessment in the French territories of the Indian Ocean (La Réunion and Mayotte Islands). Its objective is to develop methodologies to conduct tsunami risk assessments in specific areas (urban areas, areas of industrial activities, protected natural areas, etc). From January 2010 to the end of 2011, the project involves a team of French experts specialized in tsunami hazard and risk management. The researchers study historical tsunamis which have impacted the islands, model the propagation and potential hydrological effects of hypothetical events, and study human and structural vulnerabilities to provide local authorities with damages and human losses scenarios as well as evacuation solutions and risk awareness and preparedness tools.

Rapport final PREPARTOI

Introduction

Le projet de recherche **PREPARTOI** a permis d'effectuer une étude intégrée du **risque de tsunami** dans les deux principaux territoires français de l'Océan Indien que sont **La Réunion** et **Mayotte**.

Nous tenons à remercier chaleureusement tous les organismes et personnes aillant contribué de prêt ou de loin à la réalisation de ce projet :

1) En métropole :

- la Fondation MAIF, principal financeur du projet, et en particulier son directeur Hubert Oliviero et Bernard Massinon ;
- l'Université Paris 1 et le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), dont les services financiers ont assuré la gestion du programme pour chacun des co-traitants ;

2) A La Réunion

- Didier Paris et la Préfecture de La Réunion pour leur soutien et leur collaboration.
- Nicolas Villeneuve pour son accueil d'A. Sahal dans les locaux de l'IRD.
- la DIREN et DDE (puis DEAL), notamment Christian Léger et Bertrand Bouteilles, Mrs. Allaert, Bayle et Festin aux Phares et Balises, et à Marie-Christine Leroux aux routes.
- Pierre Tessier, Olivier Cartade et Hervé Lemahieu du Conseil Général.
- Météo France
- Karim Kelfoun et Andrea Di Muro pour leurs discussions sur le cas du 20 mars 2010.
- Michel Ropert pour sa contribution audiovisuelle.
- Thierry Kegler, Jean-François Lhemery et Olivier Morel à Saint-Paul, pour la mise à disposition de précieuses données cartographiques.

- Karine Pothin pour son accueil à la Réserve Marine de La Réunion.
- L'ensemble des autorités portuaires et de la SNSM, CROSS-RU et surveillants de baignade de la commune de Saint-Paul.
- la Plate forme d'Intervention Régionale de l'Océan Indien (Croix Rouge Française) et plus particulièrement Christian Paillet et Véronique Walbaum pour leur soutien au programme PREPARTOI.

3) A Mayotte

- Anthony Boukoucha, Nadia Toth et Jordan Mazado pour leur accueil au SIDPC et leur collaboration.
- Le Conseil Général de Mayotte, en particulier Saïd Hachim et à sa famille pour leur soutien logistique.
- Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

Les auteurs, sous la coordination de Franck Lavigne et Alexandre Sahal :

	Lavigne, F., Sahal A., Durand, P., Coquet, M., Wassmer, P. et Goett, H.
	Leone, F., Péroche, M., Lagahé, E., Gherardi, M., Vinet, F., Hachim, S. et Drouet, F.
	Quentel, E., Loevenbruck, A., Schindelé, F. et Hébert, H.
	Anselme, B.
	Gaultier-Gaillard, S., Pratlong, F. et Divialle, F.
	Morin, J.

Sommaire

RESUME	3
ABSTRACT	3
INTRODUCTION	5
CHAPITRE 1ER. HISTORIQUE DE L'ALEA ET MODELISATIONS.....	11
1.1 HISTORIQUE (LGP)	11
1.1.1 <i>Méthode</i>	11
1.1.2 <i>Résultats</i>	16
1.2 VALIDATION DES DONNEES LITTO3D EN VUE D'UNE MODELISATION DE L'ALEA TSUNAMI (PRODIG)	32
1.2.1 <i>Objectif</i>	32
1.2.2 <i>Calage des levés DGPS avec les données Litto3DTopo (MNT et MNE)</i>	32
1.2.3 <i>Modélisation</i>	36
1.3 MODELISATION MULTI-SCENARIOS (CEA)	38
1.3.1 <i>Méthode</i>	38
1.3.2 <i>Résultats de la modélisation</i>	47
1.3.3 <i>Conclusion</i>	64
CHAPITRE 2E. DIAGNOSTIC TERRITORIAL DES ENJEUX ET VULNERABILITES.....	67
2.1 EXPOSITION HUMAINE A L'ALEA (LGP-GRED)	67
2.1.1 <i>Méthode</i>	67
2.1.1 <i>Résistance des enjeux structurels face à l'aléa tsunami</i>	72
2.1.2 <i>Capacité de survie des individus et importance de la prise en compte des débris pour une interaction aléa/enjeux</i>	74
2.1.3 <i>Résultats à Mayotte et La Réunion</i>	76
2.2 PERCEPTION DU RISQUE A MAYOTTE : RETEX DES EVACUATIONS POST 2004 (LGP)	120
2.2.1 <i>Méthode</i>	120
2.2.2 <i>Résultats</i>	123
2.2.3 <i>Conclusion</i>	130
2.3 PERCEPTION DU RISQUE A LA REUNION : EVALUATION CONTINGENTE D'AMENITES ENVIRONNEMENTALES DE L'ILE (PRISME) 131	
2.3.1 <i>Méthode</i>	131
2.3.2 <i>Résultats</i>	138
2.4 MODELISATION DE L'ACCESSIBILITE TERRITORIALE ANTE ET POST TSUNAMI POUR L'AIDE A LA GESTION DE CRISE (GRED) 142	

2.4.1	<i>Introduction : risques, accessibilité et gestion de crise</i>	142
2.4.2	<i>Méthode</i>	148
2.4.3	<i>Résultats</i>	167
2.4.4	<i>Discussion</i>	180
2.4.5	<i>Conclusion</i>	187
CHAPITRE 3E. LA PLANIFICATION DE LA GESTION DE CRISE TSUNAMI (GRED/LGP)		189
3.1	ETAT ACTUEL DE LA GESTION DE CRISE A MAYOTTE ET A LA REUNION : DISPOSITIF EXISTANT ET VULNERABILITE INSTITUTIONNELLE	189
3.1.1	<i>Sources et méthodes</i>	189
3.1.2	<i>Une planification récente appliquée par analogie avec le risque cyclonique</i>	190
3.1.3	<i>La planification de gestion de crise à l'échelle locale</i>	191
3.1.4	<i>Enjeux et scénarios de crise potentiels</i>	192
3.2	L'INFORMATION PREVENTIVE ET L'INFORMATION DE CRISE DES POPULATIONS	192
3.2.1	<i>Comportement des populations au regard du manque d'information</i>	192
3.2.2	<i>Informers préventivement les populations</i>	194
3.2.3	<i>L'alerte des populations</i>	196
3.2.4	<i>La question de l'évacuation spontanée des populations</i>	204
3.3	LES RESSOURCES DE GESTION DE CRISE.....	204
3.3.1	<i>Positionnement et dimensionnement des moyens d'intervention</i>	205
3.3.2	<i>Les lieux de gestion de crise</i>	208
3.3.3	<i>Actions et moyens de la post-crise</i>	209
CHAPITRE 4E. IMPACT ET GESTION DE CRISE TSUNAMI A L'ECHELLE LOCALE : L'EXEMPLE DE LA COMMUNE DE DEMBENI (GRED).....		213
4.1	UN TSUNAMI A DEMBENI : CONTEXTE, SCENARIO, IMPACTS ATTENDUS	213
4.1.1	<i>Contexte et scénario retenu</i>	213
4.1.2	<i>Impacts attendus</i>	214
4.2	CAPACITES DE GESTION DE CRISE	215
4.2.1	<i>Alerte et mise en sécurité des populations</i>	215
4.2.2	<i>Moyens d'intervention et ressources de gestion de crise (Figure 123 et Figure 124)</i>	218
4.2.3	<i>Ressources post crise</i>	219
4.3	BILAN ET PROPOSITION D'AMELIORATION	220
4.4	CONCLUSIONS PARTIELLES SUR LE DISPOSITIF ET LES RESSOURCES DE GESTION DE CRISE A MAYOTTE.....	221
BIBLIOGRAPHIE		225
ANNEXE 1. PRINCIPALES RESSOURCES TERRITORIALES DE LA PHASE DE RECUPERATION.....		235

ANNEXE 2.	TEMPS DE PARCOURS MOYENS MESURES EN VOITURE	241
ANNEXE 3.	QUELQUES TRONÇONS ROUTIERS EXPOSES (MOINS DE 5 M D'ALTITUDE) ET DEVIATIONS POSSIBLES	243
ANNEXE 4.	TERRITOIRE ET POPULATION ACCESSIBLES AU DEPART DE CHAQUE CENTRE DE SECOURS (SITUATION DEGRADEE)	260
ANNEXE 5.	RESSOURCES TERRITORIALES POST-CRISE ENCORE ACCESSIBLES POUR CHAQUE VILLAGE	263

Chapitre 1er. Historique de l'aléa et modélisations

1.1 Historique (LGP)

1.1.1 Méthode

Trois approches complémentaires permettent de retracer l'histoire de l'aléa : la première concerne les événements contemporains pour lesquels des témoignages peuvent encore apporter des observations ; la seconde consiste en une recherche documentaire d'observations passées ; enfin, la troisième consiste à identifier et à analyser les dépôts consécutifs à des invasions marines de type tsunami (archives sédimentaires). Ces méthodes, complémentaires, permettent de quantifier les effets de tsunamis anciens comme récents.

1.1.1.1 L'apport des témoignages pour les événements contemporains (depuis 1946)

Le recueil d'observations nécessite l'identification de témoins des phénomènes étudiés, et par conséquent un travail de terrain afin d'entrer en contact avec ces personnes.

Ces études de terrain post-événementielles (*post-tsunami field surveys*) existent et donnent lieu à publication depuis bientôt plus de 20 ans. Dès 1998, l'UNESCO publie un guide de terrain pour la quantification des effets à la côte des tsunamis (UNESCO-IOC, 1998), proposant des protocoles d'interrogation des témoins ainsi que des protocoles de mesures des altitudes atteintes par les submersions (*runup*), etc. Ce guide synthétise les méthodes employées dans le cadre de travaux de terrain réalisés par Tsuji, Imamura et Synolakis (Synolakis *et al.*, 1995; Tsuji *et al.*, 1995), par Borrero (Borrero *et al.*, 1997), et plus récemment mises en œuvre par Okal et Fritz (Fritz & Okal, 2008; Okal *et al.*, 2006; Okal *et al.*, 2002), etc.

En plus des méthodes préconisées par l'UNESCO, un appel à témoin est lancé sur les côtes investiguées. Sur les côtes françaises, les témoins interrogés sont des riverains ou des usagers de la mer : bénévoles de la SNSM (Société Nationale de Sauvetage en Mer), maîtres de ports, pêcheurs professionnels, personnels travaillant dans des locaux situés en bord de mer ou encore plaisanciers. Il s'agit parfois de personnes vivant à proximité du littoral (moins de 50 m.). Ils ont tous une appréciation correcte des variations du niveau de la mer de par leurs activités.

Les témoins sont également identifiés au travers de l'étude d'archives diverses nommant des observateurs (presse, rapports), et/ou identifiés par des personnes interrogées qui indiquent à l'enquêteur « qui aller voir ».

La méthode utilisée dans ce programme propose, une fois les témoins identifiés, de les interroger dans le cadre d'entretiens semi-directifs personnalisés et adaptés à leur profil socioculturel, à leur relation avec le milieu marin (plaisanciers, pêcheurs, baigneurs, autorités, surveillants de baignade, etc.) et au contexte d'observation du phénomène (activité lors de l'observation). Ces témoins sont amenés sur les lieux d'observation et montrent aux enquêteurs les niveaux minimaux et maximaux des variations du niveau de la mer tel qu'observés. Les témoins précisent les horaires d'observation ainsi que le contexte dans lequel ces observations ont été faites (activité, distance par rapport aux repères). Les témoignages sont ensuite confrontés les uns aux autres afin de mettre en évidence des observations contradictoires.

Les *runups* et les surfaces inondées sont mesurés sur site à l'aide de télémètres laser, ou bien à l'aide de cartes anciennes pour les événements les plus anciens. Ces mesures sont ajustées en fonction du niveau de la mer lors de la mesure et lors de l'événement. Les mesures réalisées sont rapportées au 0 m. hydrologique, c'est à dire au niveau des plus basses marées. Les hauteurs d'eau maximales atteintes sont considérées comme hauteurs de *runup* au dessus du 0 m. hydrologique.

1.1.1.2 *L'apport des archives écrites pour les événements récents et contemporains (depuis 1850)*

La méthode employée ici a consisté à établir une liste des tsunamis ayant eu un impact dans le bassin étudié et des événements sismiques potentiellement tsunamigènes (forte magnitude) enregistrés à proximité. Cette liste préliminaire permet de cibler les recherches d'archives sur des dates bien précises : presse écrite, archives personnelles (journaux personnels ou professionnels), d'archives de la communauté religieuse (missions, archevêchés, etc.), archives administratives (interventions de services techniques, déblaiements, réparations, etc.), enregistrements marégraphiques. Ce type de source est limité dans sa capacité à remonter dans le temps car il est dépendant de la conservation et de communicabilité des sources d'information.

Les archives de presses anciennes et contemporaines et les archives administratives sont consultées aux dates correspondantes ainsi que pour les jours suivants, à la recherche de perturbations du niveau de la mer.

Cette démarche a notamment été utilisée par Soloviev, sans doute le premier grand catalogueur de tsunamis. Sa méthode est fondée sur le recueil d'archives décrivant les événements sismiques et les

phénomènes associés, et a permis la réalisation de deux grands catalogues qui font aujourd'hui références pour les événements antérieurs aux années 1990 dans l'Océan Pacifique (Soloviev *et al.*, 1992) et la Mer Méditerranée (Soloviev *et al.*, 2000).

1.1.1.3 *L'apport des archives sédimentaires pour les événements historiques*

La majorité des tsunamis qui inondent les côtes laisse en place des éléments mobilisés lors de la dissipation d'énergie qui suit la submersion par les flots. Les dépôts sont parfois conservés en place et ne sont pas remaniés. Ils atteignent parfois des tailles allant jusqu'aux blocs plurimétriques (Barthomeuf *et al.*, 2011; Mastronuzzi & Sanso, 2000; Mhammdi *et al.*, 2008; Spiske *et al.*, 2008). Lorsque ces deux conditions de conservation sont réunies, ces dépôts constituent des marqueurs pérennes dont l'étude permet de déduire les caractéristiques énergétiques et directionnelles des submersions qui les ont déposés.

La première phase de la submersion marine des côtes émergées (*uprush*) par ce flux turbulent est une période de prise en charge de matériaux dont la granulométrie varie de l'argile aux blocs. Dans des contextes de littoraux occupés, il s'agit parfois d'embarcations ou même d'habitations et autres structures bâties. Plus l'énergie du tsunami est importante, plus les matériaux pris en charge lors de la submersion seront nombreux et massifs.

C'est lors des phases de ralentissement puis de stagnation du flux (*flooding-slack*) que les matériaux précédemment pris en charge sont déposés selon une stratigraphie allant des matériaux grossiers (les premiers déposés) aux matériaux fins (les derniers déposés). Lors du reflux de la submersion (*backwash*), la ré-accélération des flux peut entraîner une remobilisation des matériaux précédemment déposés. On observe ainsi parfois une turbidité particulière à la côte après ce *backwash* (Prasetya & Borrero, 2010). La Figure 1 illustre cette turbidité et la manière dont les modèles peuvent la reconstituer.

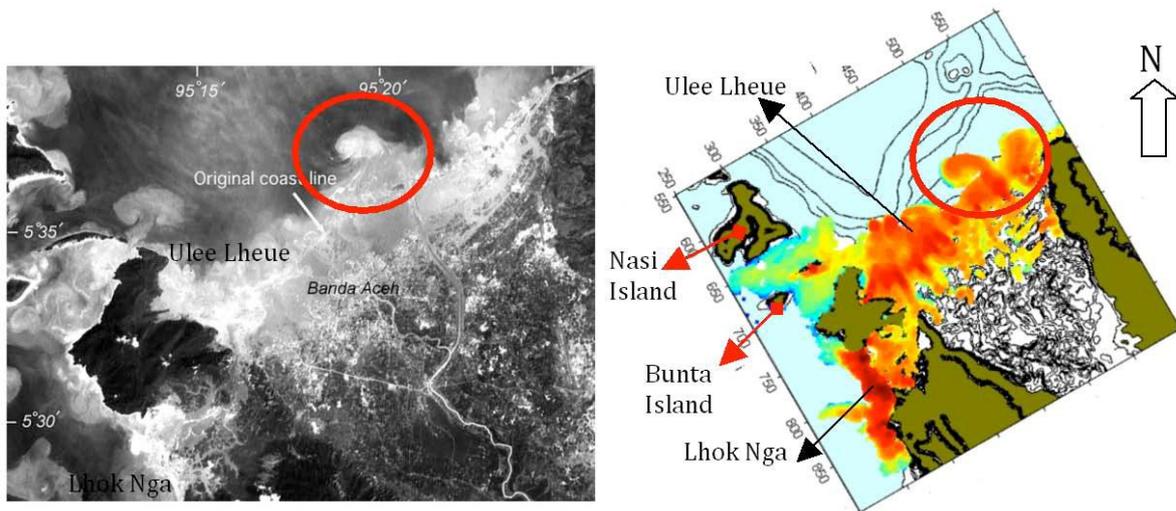


Figure 1. Image satellite (SPOT2) illustrant la répartition de la matière en suspension quatre heures post-séisme à Banda Aceh bien reproduite par le modèle de Prasetya et Borrero (2010).

On observe que la modélisation concorde bien avec les observations, comme l'illustre par exemple le tourbillon cerclé en rouge.

Cette approche sédimentologique consiste par conséquent à identifier les dépôts laissés en place par les submersions marines et à les caractériser pour en déduire une spatialisation des énergies et hauteurs d'eau propres à l'événement passé. En effet, les amplitudes, vitesses, directions et turbulences de la submersion marine de type tsunami, combinées avec la topographie et les contextes morpho-sédimentaires à la côte déterminent la répartition spatiale et les caractéristiques de ces dépôts (Paris *et al.*, 2011).

Paris *et al.* (2011) précisent qu'il est possible de différencier les dépôts de tsunami des dépôts liés à d'autres submersions marines comme les tempêtes par exemple.

Caractéristiques sédimentaires propres aux dépôts de tsunami : critères d'identification selon Paris *et al.* (2011).

Extension à toutes les côtes d'accumulation affectées par le tsunami ;

Taille décroissante avec l'altitude et la distance par rapport à la côte ;

Stratification interne avec des unités inférieures plus grossières ;

Discontinuité avec le substratum, ce dernier présentant parfois des formes d'érosion ;

Les auteurs précisent toutefois la limite principale de l'approche, qui réside dans la question de la temporalité du dépôt lors de l'événement et des séquences qui seront visibles dans l'enregistrement sédimentaire.

Une fois les dépôts identifiés, outre l'étude stratigraphique, granulométrique et morphoscopique classique et bien connues des sédimentologues (Bruzzi & Prone, 2000), l'étude de l'anisotropie de la susceptibilité magnétique des dépôts de section fine permet de caractériser l'orientation des flux ayant déposé des sédiments (Wassmer *et al.*, 2010). En caractérisant l'imbrication des grains tels qu'ils ont été déposés par la submersion (*uprush*) ou le retrait des flux (*backwash*), on est à même de reconstituer les caractéristiques hydrodynamiques (incluant vitesses et directions) des flux à terre, alimentant ainsi les modèles de submersion (Figure 1, p. 14). Ces approches ont été mises en œuvre dans le cadre du programme PREPARTOI.

1.1.1.4 Bilan méthodologique pour l'étude des tsunamis historiques

Les trois méthodes précitées (recueil de témoignages, archives écrites et archives sédimentaires) ne couvrent pas les mêmes intervalles de temps (Figure 2).

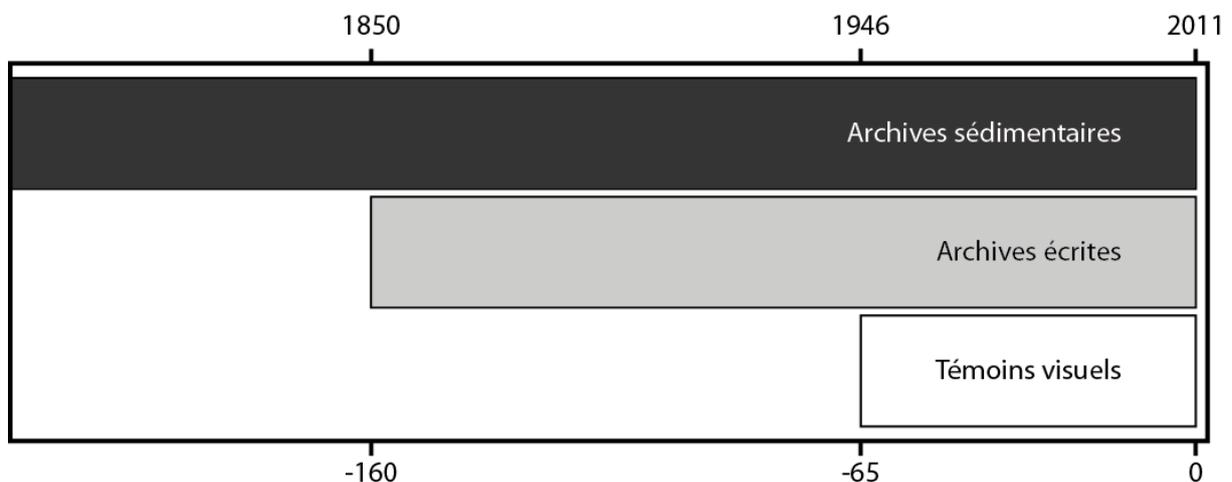


Figure 2. Intervalles de temps couverts par les différentes méthodes d'étude des tsunamis passés.

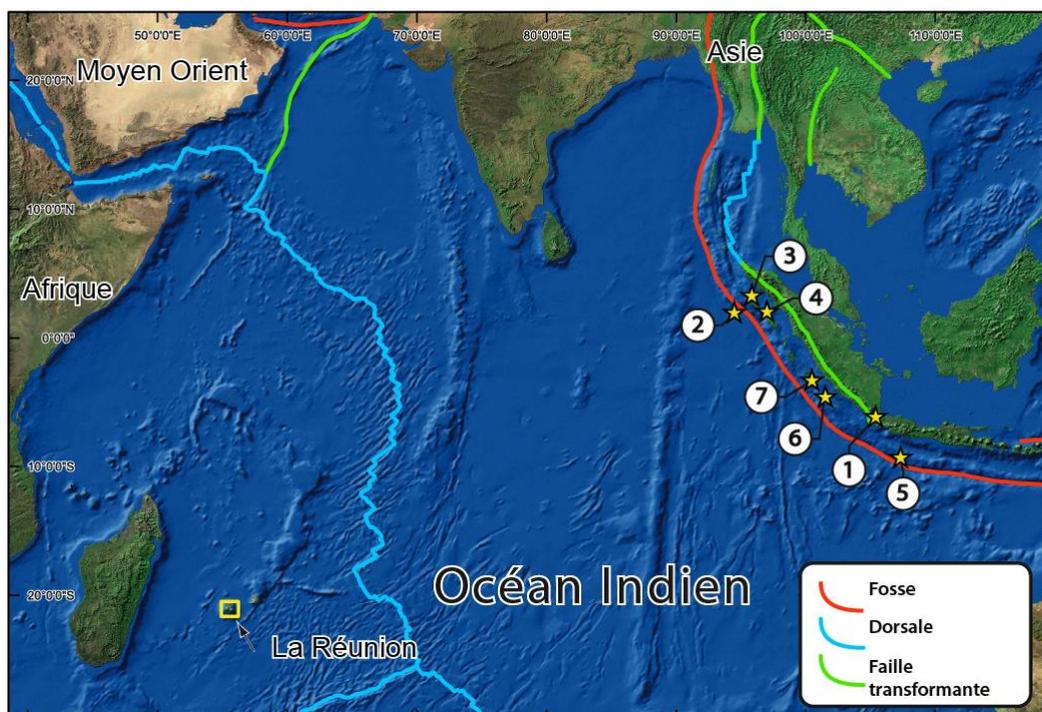
Tandis que les témoignages recueillis sur le terrain ne permettent que très rarement de quantifier des effets remontant à plus de 65 ans, les archives écrites permettent (selon leur état de conservation) de remonter à près de 160 ans, du moins pour la presse ancienne. Pour ce qui est de la quantification des effets de tsunamis plus anciens, seuls quelques écrits historiques miraculeusement conservés ou reproduits, ainsi que les archives sédimentaires demeurent des sources d'information exploitables. Ces approches sont donc parfaitement complémentaires. Ainsi plus on se rapproche du présent, plus les informations recueillies sont nombreuses, précises et permettent un croisement des sources et donc une vision claire des tsunamis du passé.

Par ailleurs, l'intérêt des marégraphes peut être rappelé pour constater *a posteriori* les effets enregistrés à la côte (jusque vers le milieu du XIX^{ème} siècle).

1.1.2 Résultats

1.1.2.1 *Catalogue des tsunamis à La Réunion*

Sept tsunamis transocéaniques ont été identifiés comme ayant impacté les côtes réunionnaises (Figure 3). Les sources de ces tsunamis sont localisées au large de l'Indonésie, le long de sa fosse. La Figure 4 localise les lieux cités dans le texte, ainsi que les effets observés localement.



	Date	Mw	Profondeur (km.)	Distance (km.)	TTT observé	Runup maximal (en m.)	Localisation runup max.
1	27/08/1883	Vol.		5623	7h39	7	Saint-Paul
2	04/01/1907	7,8	30 \approx	4956	7h29	~2	Saint-Pierre
3	26/12/2004	9,1	30	5162	8h55	2,74*	Port Est
4	28/03/2005	8,6	30	5196	9h	?	Sainte-Marie
5	17/07/2006	7,7	34	6940	8h26	0,51	Saint-Leu
6	12/09/2007	8,5	34	8680	8h40	1,13	Saint-Gilles
	21/03/2010	?	?	?	0h25 ?	5,70	Boucan Canot
7	25/10/2010	7,7	20.6	5203	7h20	1,72	Sainte-Marie

Figure 3. Localisation des sources des tsunamis historiques ayant eu un impact à La Réunion et quantification des effets à la côte ; l'événement du 21/03/2010 est incertain et pourrait être de source locale.

Sources : profondeur des séismes selon USGS ou \approx Kanamori *et al.* (2010), tectonique par Coffin *et al.* (1998) ; figure adaptée de Sahal *et al.* (2011; 2011).

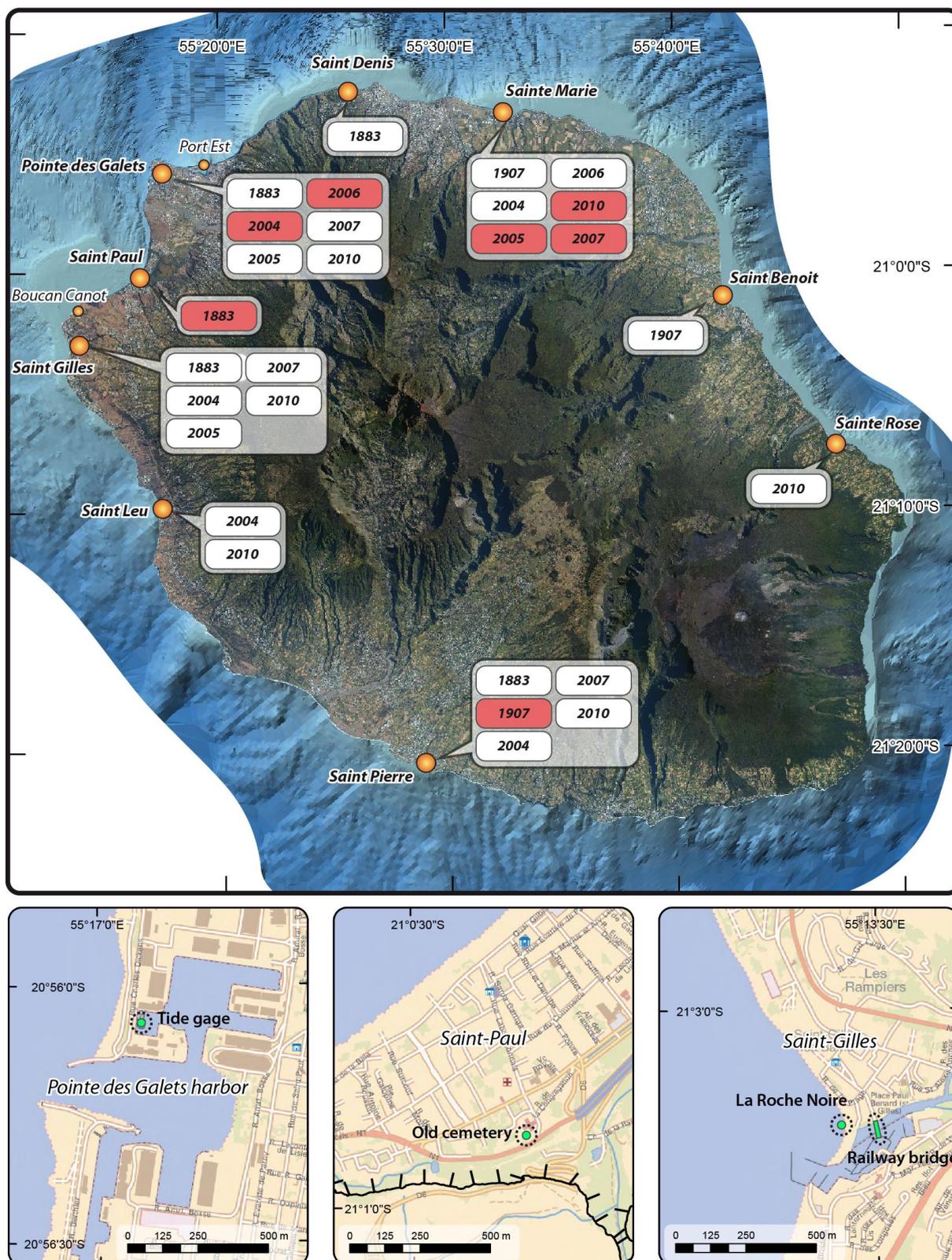


Figure 4. Île de La Réunion : lieux cités dans le texte et effets majeurs pour chaque événement transocéanique identifié (en rouge les localités les plus affectées par chaque événement).

Source : extrait de Sahal *et al.* (2011; 2011).

C'est le plus souvent sur la côte ouest de l'île que les effets sont les plus importants. Ce phénomène s'explique notamment par l'amplification résultant de la rencontre des trains de vagues qui s'enroulent autour de La Réunion (Hébert *et al.*, 2007).

Les temps de parcours des tsunamis (TTT) transocéaniques identifiés sont compris entre 7h20 et 9h. Ces temps de trajet restent incertains dans la mesure où ils ne se basent le plus souvent que sur des témoignages. Le marégraphe de la Pointe des Galets permet toutefois de confirmer ou de préciser ces temps de trajet.

1.1.2.2 *Tsunami du 27 août 1883*

Le 27 août 1883, à 9:58 locale en Indonésie (UTC+7:07:12), l'éruption du volcan Krakatoa (Indonésie) engendre un tsunami atteignant la hauteur de 30 m. dans le détroit de la Sonde, tuant 36 000 personnes (Pelinovsky *et al.*, 2005). Son impact est ressenti dans l'Océan Indien, notamment aux Seychelles où une élévation de 30 cm. du niveau de la mer est enregistrée (Dunbar, 2011).

A La Réunion, *Le Créole de l'île de la Réunion* du 29 août 1883 rapporte l'observation le 27 août d'un « mascaret » à Saint-Denis, entrant dans la ravine du Barachois avec une hauteur de plusieurs pieds pendant quelques minutes, puis un reflux générant un « courant de foudre » emportant des embarcations du bassin « malgré ancrés et chaînes ». Le mouvement s'est répété plusieurs fois, vidant le bassin et asséchant les plages lors des reflux. *La Malle* du 2 septembre 1883 évoque des effets dans d'autres localités, évaluant un accroissement des effets vers le sud de la côte ouest. On note ainsi, des effets à la Pointe des Galets, où la mer est rentrée avec assez de violence, à Saint-Gilles où la mer est montée jusqu'au pont de chemin de fer, emportant une passerelle. A Saint-Gilles une valeur minimale de *runup* de 3,5 m. est calculée (altitude du plancher du pont).

Les effets sont encore plus intenses à Saint-Pierre, où le phénomène, débuté par l'arrivée d'un « mascaret », a duré de 11h du matin à minuit. Toutes les 10 minutes, l'avant-port et le bassin de Saint-Pierre se remplissaient à une hauteur indéterminée pour se vider en moitié moins de temps, mettant à sec les fondations des jetées. Le courant correspondant aux variations est qualifié de « fort ».

A Saint-Paul, vers 15h, « La mer remontait ensuite tout aussi rapidement, traversant notamment toute la ville de Saint-Paul, emportant tombes et cercueils de l'ancien cimetière. Ce phénomène ne s'arrêtait qu'aux pieds des falaises laissant de grandes quantités de sable » d'après le *Journal de l'île de la Réunion* du mardi 28 août 1883. L'ancien cimetière se trouvait à l'époque entre l'église et la

cure, c'est-à-dire à l'église Rosalie Avouhey, localisée à 630 m. de la côte, à une altitude de 7 m. (Figure 4). Malheureusement, les dépôts consécutifs à ce tsunami n'ont pu être identifiés sur site.

C'est donc à 11h locale le 27 août que le phénomène est observé à Saint-Pierre de La Réunion. En 1883, l'heure locale réunionnaise est à UTC+3:41:52. Il est donc 7:18 UTC le 27 lorsque le phénomène se manifeste (soit T_0+4h16). Il paraît donc exclu compte tenu des temps de trajet estimés que ce soit la phase paroxysmique de l'éruption (9:58 UTC, troisième explosion (*blast*)) qui a déclenché le tsunami perçu à La Réunion. Les modèles (TsuDig, NGDC) estiment à environ 7h45 le temps de trajet d'un tsunami se propageant du Krakatau à La Réunion. On peut par conséquent poser l'hypothèse d'un tsunami déclenché aux alentours de 6:30 locale au Krakatoa. Cet horaire correspond à la deuxième explosion du Krakatoa et à l'effondrement du pic de Danan de 6:36 et la formation de sa caldeira (Choi *et al.*, 2003). En considérant cette explosion comme celle ayant déclenché le tsunami qui a impacté La Réunion, on en déduit une arrivée à **T_0+7h39** .

1.1.2.3 *Tsunami du 4 janvier 1907*

Le 4 janvier 1907, à 5:19 UTC (Dunbar, 2011), un séisme de magnitude estimée à $M_s=7.8$ génère un tsunami qui touche l'Indonésie et le Sri Lanka.

C'est vers 16:30 LT que des ouvriers de la darse de Saint-Pierre donnent l'alerte : on observe un niveau marin s'élevant de 2 m. dans le bassin. Le flux s'engouffre rapidement par le chenal pour s'étendre de manière « calme et sans remous » dans le port. Le reflux est semblable à un torrent. Cette « marée », qualifiée de « violente » demeure inférieure à celle observée en 1883. Le phénomène est toujours observé pendant la soirée du 4 janvier (*Le Journal de l'île de La Réunion* du 8 janvier). A Saint-Benoît, à la même heure, 16:30 LT, la mer se retire brusquement mais sans vagues se retirant à 100 m. derrière la chaîne de Caps qui forme le récif de Saint-Benoît. Certains témoins se précipitent pour ramasser les poissons échoués mais se voient contraints à abandonner leur butin : la houle vient déferler et envahir la terre ferme au-delà des niveaux atteints par les plus hautes marées. « Plusieurs vagues semblables se sont succédées à différents intervalles ». Ce n'est qu'à 21:00 LT que le phénomène s'estompe, la mer retrouvant son niveau normal (*Le Journal de l'île de La Réunion* du 8 janvier).

La Patrie Créole du 8 janvier confirme les observations, et les complète par l'observation d'un retrait de la mer à Sainte-Marie laissant à sec des rochers qui n'émergent jamais.

En 1907, La Réunion est toujours à UTC+3:41:52, il est donc environ 12:48 UTC lors de l'observation, ce qui correspond à un temps de trajet de **T_0+7h29** depuis la source du tsunami.

1.1.2.4 Tsunami du 26 décembre 2004

Le 26 décembre 2004, à 00:58 UTC, un séisme de magnitude $M_w = 9.1$ est enregistré en Indonésie (3.316°N, 95.854°E, USGS). Le tsunami qu'il génère aura un impact dans l'ensemble de l'Océan Indien, tuant plus de 270 000 personnes (Stein & Okal, 2005).

Peu après la catastrophe de décembre 2004, une mission ITST (International Tsunami Survey Team) a été dépêchée sur l'île de La Réunion. Les résultats de cette enquête (Okal *et al.*, 2006) montrent que l'ensemble de l'île a été touché, avec un maximum d'impact sur la côte nord-ouest, entre Saint-Gilles et Le Port. Les hauteurs maximales atteintes sont enregistrées à la plage de la Roche Noire, plage non protégée par une barrière de corail, avec une hauteur de *runup* mesurée à 2,44 m., et dans le bassin est du Port, avec une hauteur de *runup* mesurée à 2,74 m. (Okal *et al.*, 2006). 17 bateaux sont coulés au port de Sainte-Marie, les dégâts matériels des infrastructures portuaires sont estimés à 520 k€ (Okal *et al.*, 2006).

A Saint-Gilles, la mission PREPARTOI a permis de recueillir plusieurs témoignages d'une baisse du niveau marin de 1,8 m. (repérée grâce au tirant d'eau de l'embarcation d'un club de plongée). Le quai a été inondé par une marée très rapide. La hauteur d'eau atteinte par rapport au zéro hydro est 1,78 m. Sur le même site, un témoignage permet une autre mesure, dans une partie plus reculée du port où un ponton mobile a été surélevé par la montée du niveau marin. La hauteur atteinte, annotée sur la bitte d'amarrage sur laquelle coulisse le ponton indique une hauteur de *runup* de 1,72 m. A la plage des Roches Noires, située à la sortie du port de Saint-Gilles, les surveillants de baignade ont constaté un retrait de la mer sur 150-200 m., permettant de marcher jusqu'à l'entrée du port (Figure 2). A la plage de Boucan Canot, le platier a été à vif toutes les 10 min. environ (1 marée haute / 1 marée basse toutes les 10 min.). Au port de plaisance de Port Réunion, le maître de port constate un mascaret haut de 1 m. en face de la capitainerie à la hauteur du brise-houle. Le courant est supérieur à 10 nœuds. Le bassin se vidange ensuite en l'espace de 10 minutes.

Le marégraphe situé dans le bassin du Port montre l'arrivée du tsunami à 11:55 locale (soit 9:55 UTC, **T₀+8h55**). Le signal du tsunami est enregistré jusqu'en matinée du 28 décembre.

1.1.2.5 Tsunami du 28 mars 2005

Le 28 mars 2005 à 16:09 UTC, un séisme de magnitude $M_w = 8,6$ (USGS, 2.074°N, 97.013°E) est enregistré. Un *runup* de 3 m. est mesuré sur l'île de Simeulue.

C'est dans la nuit du 28 au 29, à 5:00 locale (1:00 UTC, soit **T₀+9h**) qu'une élévation du niveau de la mer de 0,4 m. est observée au port de Saint-Gilles. Le phénomène ne dure que jusqu'à 6:30. A

Sainte-Marie, le maître de port observe le même phénomène mais cette fois-ci avec une amplitude supérieure de 20 à 30 cm. par rapport aux hautes marées. Il observe également de petits tourbillons, des rides à la surface de l'eau, et constate que l'eau est particulièrement trouble (*Le Journal de l'île de La Réunion* du 30 mars 2005).

Le marégraphe situé dans le bassin du Port enregistre le phénomène de 3:20 à 7:00 GMT, soit de 5:20 à 9:00 locale.

1.1.2.6 Tsunami du 17 juillet 2006

A 8:19 UTC, un séisme de magnitude $M_w = 7,7$ (USGS) est enregistré au large de l'Indonésie (-9.254 ; 107.411).

Un auditeur de Radio FreeDom affirme avoir observé à 23:00 LT (19:00 UTC, soit $T_0+10h40$) des vagues inhabituelles dans le port de Sainte-Marie (*Le Journal de l'île de La Réunion* du 19 juillet). Aucune autre information n'a pu être retrouvée concernant des observations à la côte. A Saint-Leu, un *runup* de 0,51 m. est mesuré grâce au témoignage d'un plaisancier. Au Port Est, un « important ressac » est constaté. Il provoque à 6:30 LT la rupture d'une amarre du vraquier NAPOLI. Au Port Ouest, une montée des eaux de 80 cm. a été observée, avec un très fort courant à l'entrée du port, mais sans dégât aux bateaux. Au port de Saint-Pierre, une montée des eaux de 60 cm. à 80 cm. est observée.

Le marégraphe situé dans le bassin du Port enregistre le passage du tsunami du 17 à 20:45 au 18 à 19:00, soit une arrivée le 17 à 16:45 UTC, T_0+8h26 .

1.1.2.7 Tsunami du 12 septembre 2007

Le 12 septembre 2007, à 11:10 UTC, un séisme de magnitude $M_w = 8.5$ (USGS) est enregistré au large de l'Indonésie (-4.520 ; 101.374).

Les coefficients de marée sont très bas à cette période à La Réunion. A Sainte-Marie, c'est à partir de 21:50 qu'une hausse anormale du niveau marin de 50 à 70 cm. est observée en l'espace de deux minutes (soit 19:50 UTC, T_0+8h40). Le niveau reste haut pendant une minute, se retire en deux minutes, reste bas une minute, remonte en deux minutes, etc., le tout pendant 1h30 sans interruption, accompagné de courants de 3.5 à 4 nœuds selon la SNSM. Au niveau minimal atteint par la mer, le port est à sec. Entre 22:20 (Préfecture) et 22:45 (CCI) un marnage brutal de 30-40cm est observé au port de Saint-Gilles. Celui-ci se répète toutes les 5-10 minutes après une baisse de 20 cm. De très forts courants et tourbillons sont observés. Le phénomène dure jusqu'à minuit. Un *runup*

de 1,13 m. est mesuré grâce à un témoignage. Au port de la Pointe des Galets, une petite ondulation de 20-30 cm. est observée. On ne constatera aucun effet au Port Est. Tous les bateaux sont sortis. Autour de 23:00, les autorités notent une élévation anormale du niveau marin atteignant 60 cm. à Sainte-Marie.

1.1.2.8 *Tsunami du 26 octobre 2010*

Le 25 octobre 2010, à 14:42 UTC (18:42 LT¹ à La Réunion), un séisme de magnitude $M_w = 7,7$ est enregistré en Indonésie, à proximité de l'archipel Mentawai (Figure 5).

Quelques minutes après le séisme, le tsunami affecte les îles de Pagai avec des vagues de plus de 9 m., atteignant des hauteurs de *runup* de 7.3 m. (Satake *et al.*, 2011). A 16:00 UTC, le marégraphe des îles Cocos enregistre une perturbation d'une amplitude maximale de 32 cm. A 20:30 UTC, le marégraphe de Rodrigues enregistre à son tour une perturbation d'une amplitude de 75 cm. (Figure 6). Peu après 22:00 UTC (2:00 LT le 26 à La Réunion), c'est à dire à **T₀+ 7h20**, le marégraphe de la Pointe des Galets (PDG) enregistre l'arrivée du tsunami, perturbation qui dure jusqu'à 19:00 UTC le 26. L'amplitude maximale mesurée à la Pointe des Galets atteint 40 cm. (Figure 6).

Afin de recueillir un maximum d'informations sur les observations à la côte de ce tsunami un retour d'expérience (RETEX) sur la gestion de l'événement a été mené dans le cadre du programme PREPARTOI du 30 octobre au 8 novembre 2010, c'est-à-dire au lendemain de l'événement (Sahal & Morin, sous presse).

Au total, 20 témoignages significatifs ont été enregistrés pendant la mission de terrain : 7 à Saint-Gilles, 2 à Saint-Leu, 4 à Sainte-Marie, 4 à Saint-Pierre, 1 au Port Est (autorités portuaires) et 2 à Sainte-Rose. Ces témoignages une fois recoupés et synthétisés décrivent l'heure d'arrivée et d'impact de l'événement ainsi que les niveaux maximaux et minimaux atteints. La Figure 7 illustre les valeurs maximales de *runup* mesurées le long des côtes de La Réunion.

¹ LT pour *local time*, heure locale à La Réunion.

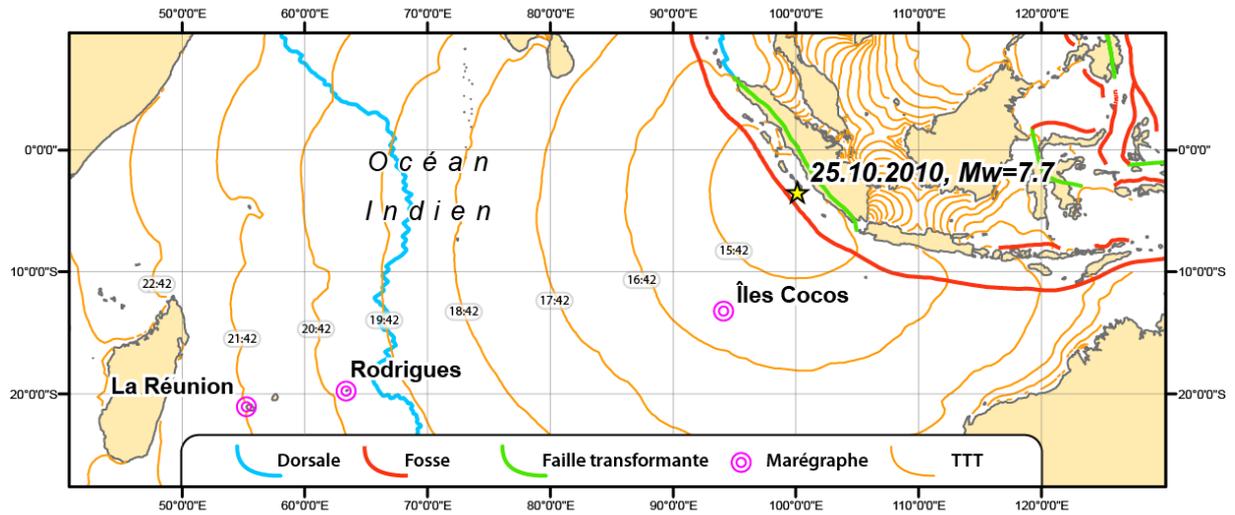


Figure 5. Localisation de la source du tsunami du 25.10.2010 et des marégraphes étudiés.

Sources : Sea Level Station Monitoring Facility, UNESCO-IOC, tectonique USGS, temps de trajet du tsunami (TTT) calculé avec TsuDig v. 1.1, septembre 2010, adapté de Sahal et Morin (sous presse).

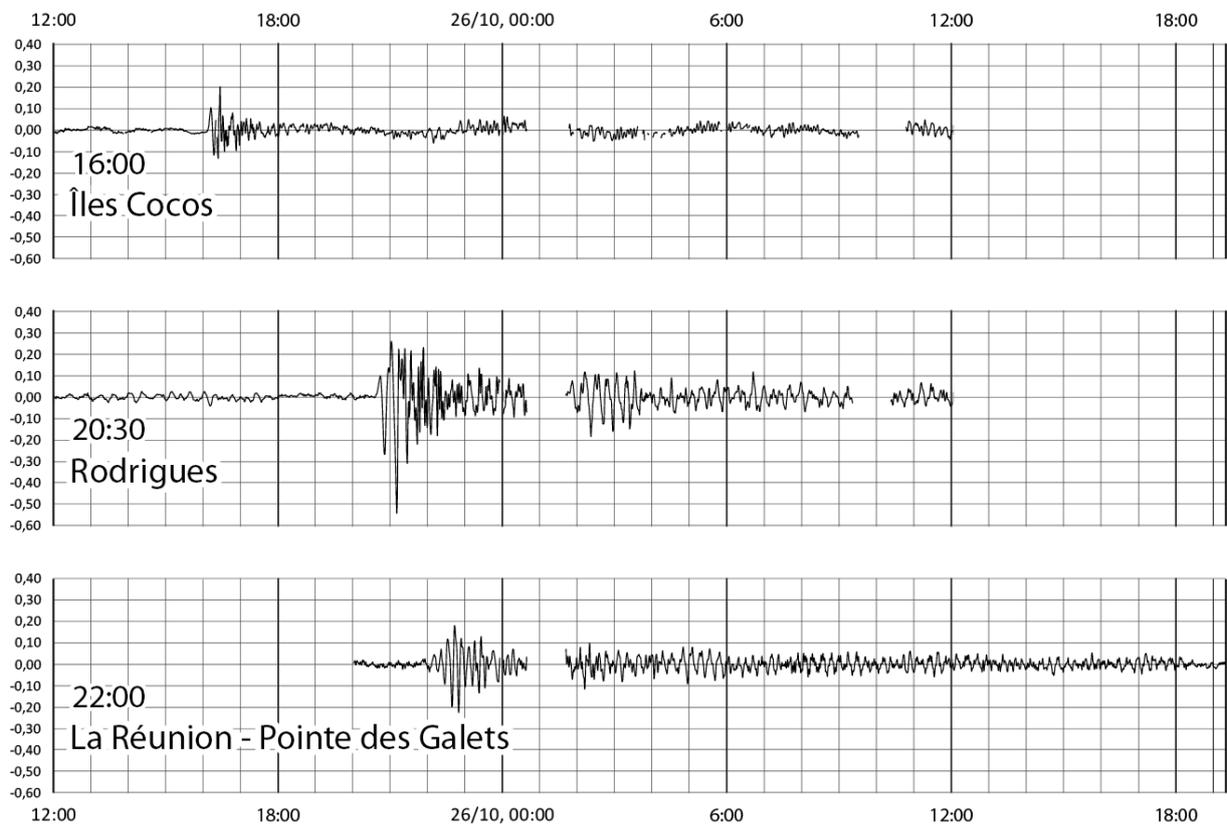
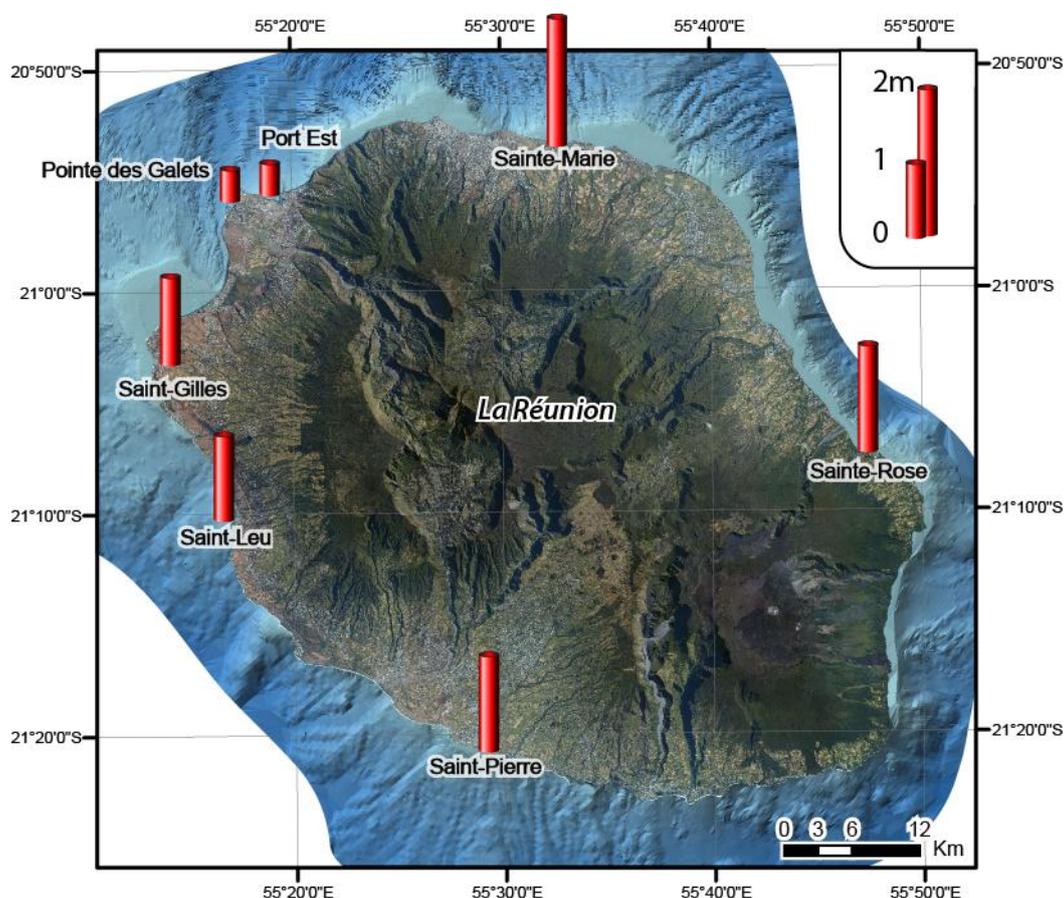


Figure 6. Marégraphes des îles Cocos, Rodrigues et de La Réunion (UTC) lors du passage du tsunami du 26.10.2010 (une régression polynomiale a été effectuée afin de retirer le signal de la marée normale).

Source : Sea Level Station Monitoring Facility, UNESCO-IOC, adapté de Sahal et Morin (sous presse).



Port	Runup (m)	Longitude	Latitude
Sainte-Marie	1,72	55,536684	-20,892577
Sainte-Rose	1,40	55,787435	-21,125409
Saint-Pierre	1,25	55,476837	-21,344565
Saint-Gilles	1,21	55,222552	-21,055192
Saint-Leu	1,16	55,285653	-21,168009
Pointe des Galets	0,40	55,284959	-20,934887
Port Est	0,40	55,321852	-20,931765

Figure 7. Runup mesurés dans les ports affectés par le tsunami du 26.12.2010 (date en LT).

Sources : données IGN et SHOM, adapté de Sahal et Morin (sous presse).

L'ensemble de l'île est affecté. A Sainte-Marie, les effets du tsunami sont perçus dès 2:30 LT. Une hausse de 1,06 m. du niveau dans le port est observée, correspondante à une valeur de *runup* de 1,72 m. Des courants de plus de 10 nœuds sont observés par la SNSM à la passe du port. Les dommages sont estimés à 40 k€ par les autorités portuaires. Ce montant exclut les 4 bateaux à moteur coulés pendant l'événement. Au Port Est, aucune amplification majeure n'est observée. L'élévation maximale observée atteint 40 cm. A Saint-Gilles, le phénomène est également observé à partir de 2:30 LT. Une élévation du niveau océanique de 0,55 m. et une baisse de 0,89 m. sont observées. La valeur de *runup* correspondante atteint 1,21 m. De légers dégâts affectent les structures portuaires, estimés à 3 k€ pour le port, et à peu près au même montant pour les propriétaires de bateaux. A Saint-Leu, les effets semblent avoir été d'une amplitude moindre : aucun

dommage n'est constaté, et seule une hausse de 0,5 m. est observée (correspondante à une valeur de *runup* de 1,16 m.). A Saint-Pierre, c'est aux alentours de 2:40 LT que des plaisanciers dormant dans leurs embarcations et réveillés par des écoulements anormaux le long de leurs coques constatent une élévation de 0,59 m. précédée d'un léger retrait. La valeur de *runup* correspondante atteint 1,25 m. Un bateau coule, mais il était peu entretenu et déjà endommagé avant l'événement. A Sainte-Rose, les effets ne sont constatés qu'à partir de 4:00 LT, lorsqu'un témoin (alerté par un ami présent au port de Saint-Pierre) observe que les quais, habituellement secs, sont mouillés. La valeur minimale de *runup* nécessaire pour mouiller le quai est mesurée à 1,4 m.

1.1.2.9 Synthèse historique

Une frise chronologique des *runups* maximaux mesurés pour chaque événement est construite (Figure 8).

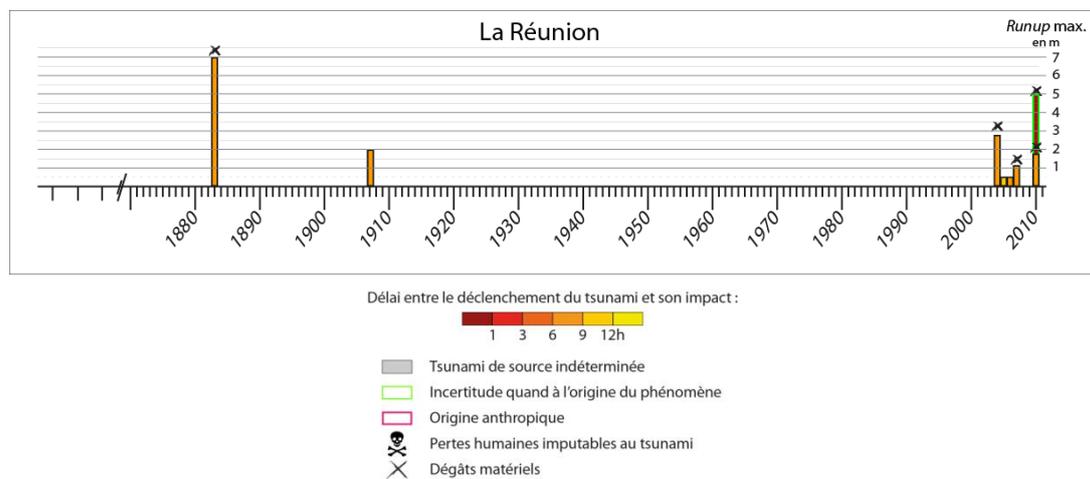


Figure 8. Frise chronologique des effets des tsunamis identifiés à La Réunion.

L'île de La Réunion a été affectée à de nombreuses reprises par des tsunamis d'origine transocéanique. L'observation des effets des événements post-2004 est sans doute attribuable à la sensibilisation des autorités et des populations au risque tsunami. Les événements antérieurs à 2004, mal documentés, ne permettent pas une prise en compte des autres sources de tsunamis qui pourraient affecter l'île. Il existe un risque de tsunamis d'origine locale, lié à des glissements des flancs sous-marins de l'île, ou encore à des effondrements gravitaires de l'édifice émergé du Piton de la Fournaise (Kelfoun *et al.*, 2010).

Le cas du tsunami du 24 novembre 1833, originaire de l'arc indonésien et dont la directivité est des plus favorables à la submersion des côtes réunionnaises (Hébert *et al.*, 2007; Okal *et al.*, 2006), n'a pu être documenté. Il est impossible de déterminer si cet événement a eu un impact, et si oui lequel, à La Réunion. Les prospections sédimentaires n'ont pas à ce jour permis de mettre en évidence des dépôts de tsunamis de façon nette.

1.1.2.10 *Catalogue des tsunamis à Mayotte*

L'île de Mayotte est équipée d'un marégraphe à transmission automatique depuis 2006. Le marnage qui affecte ses côtes atteint une amplitude moyenne de 4 m. Les mesures d'altitudes atteintes considèrent donc ici la marée prédite lors des événements pour lesquels des mesures sont faites. Les résultats de l'enquête réalisée en 2011 dans le cadre du programme PREPARTOI n'ont permis de recenser que les effets du tsunami du 26 décembre 2004.

1.1.2.11 *L'unique cas du tsunami transocéanique du 26 décembre 2004*

Le 26 décembre 2004, à 00:58 UTC, un séisme de magnitude $M_w = 9.1$ est enregistré en Indonésie.

De nombreuses observations ont été faites par des témoins présents sur le littoral mahorais. Compte tenu des fortes marées qui affectent l'île de Mayotte, il paraît plus judicieux de tenir compte des surcotes enregistrées lors de l'événement du 26 décembre 2004 plutôt que des *runups* mesurés par rapport aux plus basses mers. Lors des premières observations, il est 13h LT (heure locale) à Mayotte. La cote prévue par les SHOM est de 1,54 m. On retranche donc cette cote aux hauteurs de *runup* mesurées afin d'en déduire des surcotes (Tableau 1). Les effets du tsunami atteignent, selon les témoignages recueillis, une altitude de 6 m., correspondant à une surcote de 4,46 m. (Figure 9).

Tableau 1. Synthèse des observations du tsunami du 26 décembre 2004 à Mayotte (du nord au sud).

Localité	Coordonnées (WGS84)	Hauteur d'eau mesurée	Date et heure de la mesure	Cote lors de la mesure (GLOSS/SHO M)	Runup corrigé	Surcote
M'Tsahara	45,081420 ; -12,680964	3,55 m.	26.03.2011, 12:08 LT	1,72 m.	5,27 m.	3,73 m.
Hamjago	45,073375 ; -12,688091	4,4 m.	26.03.2011, 12:30 LT	1,6 m.	6 m.	4,46 m.
Acoua	45,056078 ; -12,724397	3,74 m.	26.03.2011, 13:10 LT	1,41 m.	5,15 m.	3,61 m.
Majikavo Koropa	45,220133 ; -12,744019	2,22 m.	26.03.2011, 8:39 LT	2,61 m.	4,83 m.	3,29 m.
Chiconi	45,112400 ; -12,836580	1,04 m.	06.04.2011, 17:33 LT	3,48 m.	4,52 m.	2,98 m.
Sada	45,100079 ; -12,847844	1,75 m.	06.04.2011, 17:55 LT	3,36 m.	5,11 m.	3,57 m.
Bouéni	45,078722 ; -12,908953	1,94 m.	23.03.2011, 17:10 LT	3,45 m.	5,39 m.	3,85 m.
Bambo Ouest	45,088583 ; -12,924083	3,63 m.	23.03.2011, 15:17 LT	1,99 m.	5,62 m.	4,08 m.
Mzouazia	45,101898 ; -12,927840	1,42 m.	23.03.2011, 16:00 LT	2,63 m.	4,05 m.	2,51 m.

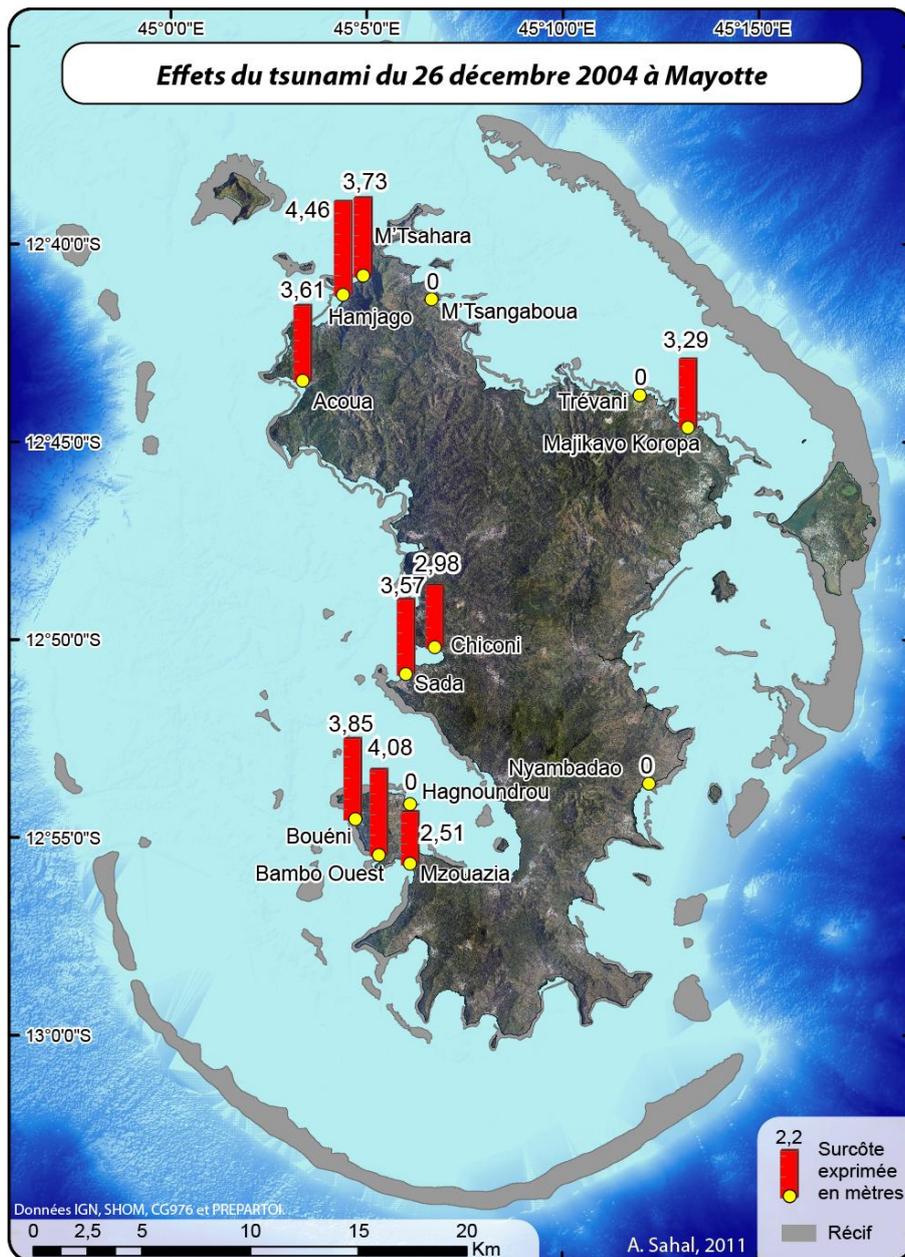


Figure 9. Effets du tsunami du 26 décembre 2004 à Mayotte.

Sources : fond de carte issu de données IGN BD Topo et Ortho et SHOM.

A M'Tsahara, un témoin dont la maison a été inondée montre le niveau atteint dans l'habitation par la surélévation du niveau de la mer. Un second témoin confirme l'inondation de la place du village. Une valeur de *runup* de 5,27 m. est mesurée, équivalente à une surcote de 3,73 m. A Hamjago, des témoins rapportent l'inondation de leurs habitations atteignant l'altitude record de 6 m. (Figure 10). Surpris par la submersion, les témoins n'ont pas eu l'occasion de constater un retrait particulier.



Figure 10. Hauteur de submersion atteinte par le tsunami de décembre 2004 à Hamjago, Mayotte.

Source : cliché A. Sahal, 2011.

A Acoua, un pêcheur vivant en bord de mer indique la limite de submersion à une altitude de 5,15 m. sans toutefois pouvoir préciser l'horaire d'occurrence du phénomène. A Majikavo Koropa, un premier témoin voit le niveau océanique descendre vers 13h. Il reste bas, au dessous des niveaux les plus bas, puis remonte au dessus de la route du bord de mer. L'altitude maximale atteinte est de 4,83 m. A Chiconi, plusieurs témoins propriétaires de boutiques témoignent de l'arrivée puis du retrait du flux sur la place du village. De nombreux débris ont été laissés (canettes, poubelles, débris végétaux). Les témoins indiquent une limite d'inondation mesurée à 4,52 m. au dessus du zéro hydrologique. A Sada, certains habitants voient leurs habitations inondées sur le bord de plage, atteignant l'altitude de 5,11 m. A Bouéni, un retrait du niveau marin est constaté par un témoin vers 13h locale le 26 (soit 10:00 UTC, T_0+9h00). Ce retrait est suivi d'une invasion marine atteignant 5,39 m. au dessus du zéro hydrologique (plus basses mers). A Bambo Ouest, deux témoins observent un niveau de l'eau descendant d'un coup, plus bas que les plus basses mers. Au bout de 5 à 10 minutes, le niveau remonte jusqu'à l'endroit indiqué par les deux témoins. Le courant étant important, les baigneurs, très inquiets sortent de l'eau en courant. Il y a eu 2-3 alternances durant 30 min à 1h. A Mzouazia, la mer se retire relativement loin (une centaine de mètres), laissant de nombreux poissons sur place. Elle revient doucement, puis le phénomène recommence, 3 fois en tout. Le niveau maximal atteint indiqué par un témoin permet une mesure de *runup* de 4,05 m. Un second témoin, Issouf Ahmadi Ibrahim, observe vers 12-13h que la mer qui baisse normalement descend plus bas que la marée

prévue. Elle remonte violemment puis redescend à nouveau. C'est la deuxième surcote qui touche le mur qui longe la route puis le submerge.

Enfin, des témoins présents dans d'autres localités au moment des faits n'ont rien constaté d'anormal, notamment à Hagnoundrou, Nyambadao, M'Tsangaboua et Trévani.

On peut constater que les effets sont contrastés à la côte. La côte ouest semble la plus impactée, avec des *runups* atteignant 6 m. localement. On peut poser l'hypothèse du rôle que joue la barrière de corail intacte à l'est et plus discontinue à l'ouest, et plus particulièrement au nord-ouest. La côte est étant moins peuplée, moins de témoins ont pu être interrogés sur celle-ci.

Cette surcote importante - relativement à celles généralement observées sur les littoraux français - aurait pu avoir des conséquences bien plus graves si la marée avait été haute lors de l'arrivée des trains de vagues à la côte.

1.1.2.12 *Synthèse historique de l'aléa : un manque de recul flagrant*

Le recul historique est très nettement insuffisant concernant Mayotte pour déterminer le moindre rapport fréquence/intensité des tsunamis qui affectent ce département.

Le risque pour Mayotte d'être affectée par des tsunamis transocéaniques est avéré. Les recherches concernant l'impact des tsunamis transocéaniques ayant affecté la région depuis 2004² se sont avérées infructueuses. On peut attribuer ce manque d'information, notamment dans la presse locale, à une absence de remontée d'information des populations vers les autorités et les médias. L'absence de recensement des effets du tsunami du 26 décembre 2004 par les administrations et la presse locale en est l'illustration : malgré l'importance des effets de ce tsunami à Mayotte, aucune indication des zones submergées n'y est disponible. Seule une campagne de recueil de témoignages a pu mettre en évidence ces effets. Les populations interrogées n'ont toutefois pas indiqué avoir subi de submersion comparable à celle de 2004 depuis cette date.

La campagne de prospection de dépôts sédimentaires consécutifs à des tsunamis réalisée dans le cadre du programme PREPARTOI (sous la direction de P. Wassmer, Université de Strasbourg) a permis la mise en évidence de quelques sites qui auraient pu être submergés par des tsunamis dans le passé, notamment à M'Tsamoudou et dans la baie de M'Bouini, villages situés à la pointe sud de Grande-Terre (Figure 11) (Goett, 2011).

² Tsunamis originaires de l'arc indonésien des 28 mars 2005, 17 juillet 2006, 12 septembre 2007 et 26 octobre 2010.



Figure 11. Sites où des dépôts soupçonnés d'avoir été laissés par des tsunamis ont été identifiés à Mayotte.

Sources : données GEBCO, SHOM et TerraModeler, fond de carte IGN BD Ortho 2008.

Compte tenu du temps accordé à cette campagne, il n'a pas été possible d'entreprendre de prospections sur Petite-Terre. La légende de la disparition de Pamandzi Keli, submergée par les flots pourrait être liée à une submersion par un tsunami (Hachim, 2004). Des datations des dépôts identifiés sur Grande-Terre sont en cours et devraient permettre d'en apprendre plus sur l'origine géographique des dépôts rencontrés sur les sites en question.

Le tsunami de décembre 2004 est d'origine transocéanique. Mais il existe par ailleurs un risque de tsunamis d'origine locale qui pourrait être lié au décrochement et au glissement de parties du récif qui entoure l'archipel. Un tel cas de figure entraînerait l'arrivée de vagues en quelques minutes à la côte. Par ailleurs, à l'échelle régionale, le Karthala constitue une source possible de tsunami (Hartnady, 2005a, 2005b; Morin *et al.*, 2009) en cas d'effondrement d'une partie de cet édifice volcanique situé en Grande Comore. Un tsunami de ce type arriverait à Mayotte en moins de 20 minutes³. Ces sources potentielles qui n'apparaissent pas dans l'historique connu des tsunamis qui ont affecté Mayotte restent à être considérés sérieusement.

³ Temps de trajet calculé avec le logiciel TsuDig v. 1.1, septembre 2010, NGDC.

1.2 Validation des données Litto3D en vue d'une modélisation de l'aléa tsunami (PRODIG)

1.2.1 Objectif

Acquisition de données topographiques et bathymétriques à Saint Paul, afin de caler les différents jeux de données disponibles (Litto3DTopo / BathyDDE / BathySHOM) en vue d'une modélisation des niveaux d'eau (Mike3D).

Les levés bathymétriques n'ont pas pu être réalisés en raison des mauvaises conditions météorologiques qui ont précédé la mission (houle résiduelle trop forte) et de l'importance de la charge sédimentaire dans la baie de Saint-Paul.

1.2.2 Calage des levés DGPS avec les données Litto3DTopo (MNT et MNE)

1.2.2.1 Démarche

- Relevés des points topographiques au DGPS
- Extraction des points correspondant sur le MNT et le MNE
- Calcul des corrélations

1.2.2.1.1 Répartition spatiale des relevés DGPS

Les levés topographiques réalisés dans la ville de Saint-Paul s'étendent depuis le cimetière marin au sud jusqu'au nord de l'écoquartier et du bas de plage à l'ouest jusqu'à la Chaussée Royale (parallèle à la route des Tamarins) à l'est de la ville. Ils ont été effectués à l'aide d'un DGPS Ashtec ZXtrem, aimablement prêté par l'Université de La Réunion (Nicolas Villeneuve).

Cent cinq points ont ainsi été levés, avec une acquisition moyennée sur un temps de 2 mn. (Figure 12).

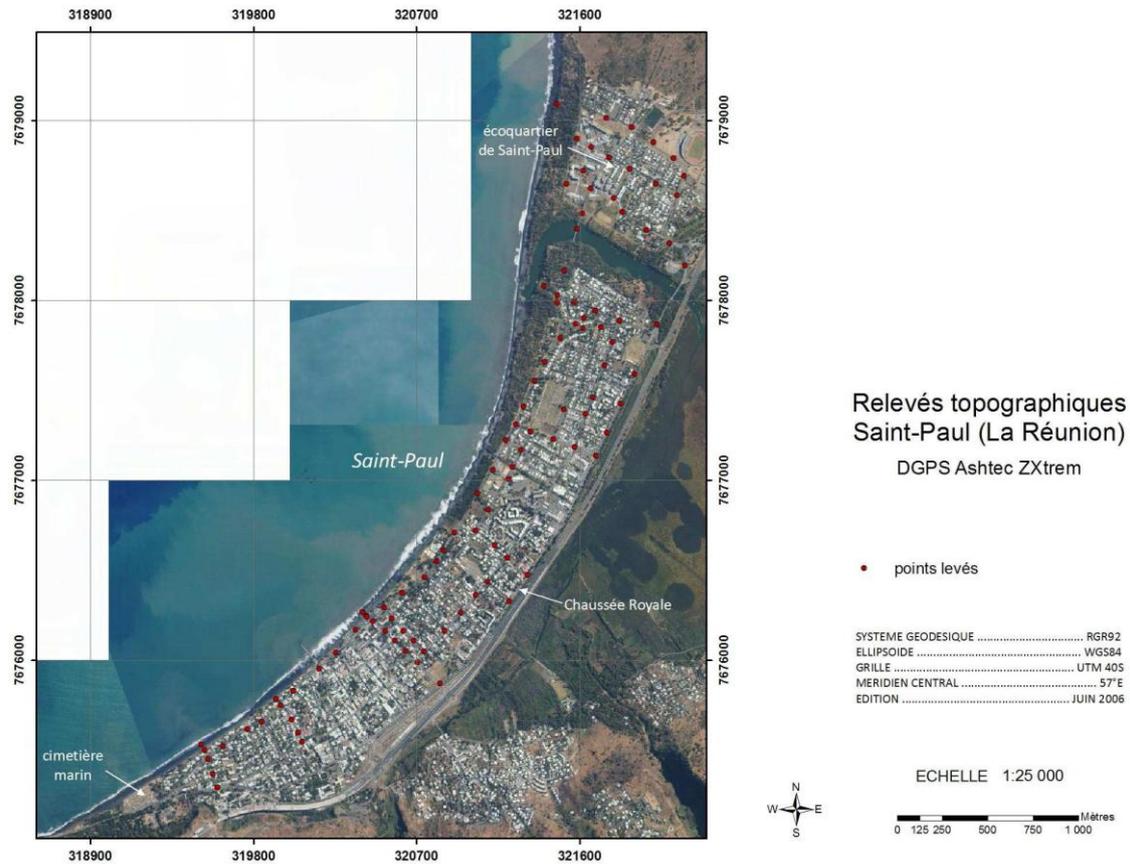


Figure 12. Répartition spatiale des levés au DGPS.

1.2.2.1.2 Extraction des points MNT et MNE et calcul des corrélations

Les points du MNT et du MNE correspondant aux levés GPS sont extraits directement à partir de ArcGis. La fonction d'analyse spatiale 'Extraction' permet de récupérer des points à partir d'un raster et d'un jeu de points références.

La Figure 13 permet de comparer les altitudes entre les points altimétriques levés au DGPS et les points correspondant extraits du MNE et du MNT. Les coefficients de corrélation calculés sont respectivement de 0,77 entre les points GPS et le MNT et de 0,68 entre les points GPS et le MNE.

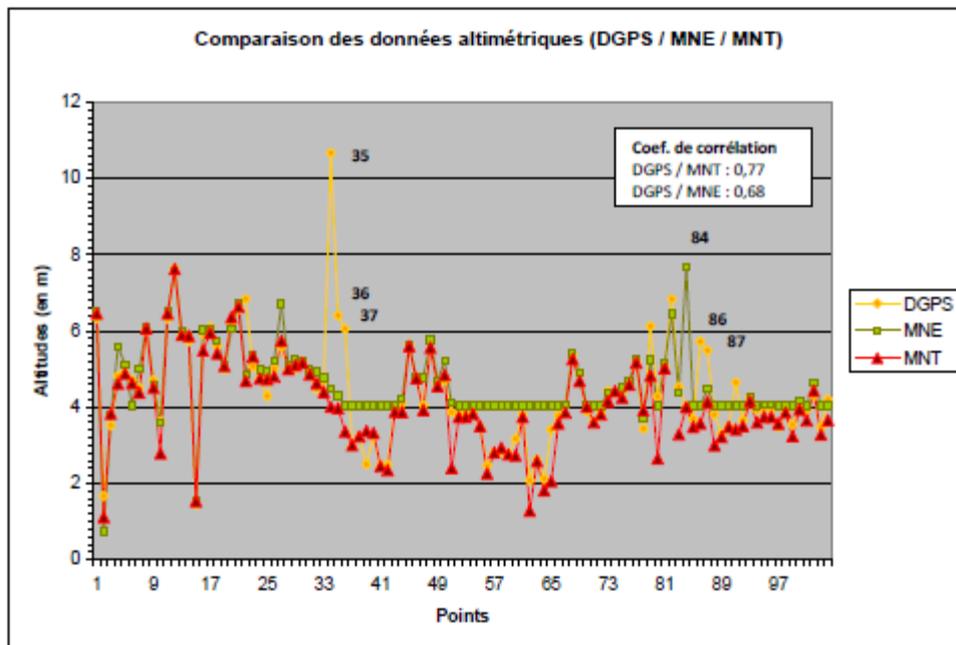


Figure 13. Comparaison des données altimétriques.

1.2.2.2 Résultats

1.2.2.2.1 Corrélation entre points GPS et MNT et points GPS et MNE

Les coefficients de corrélation ne sont pas très élevés, on note cependant une meilleure corrélation entre les points GPS et le MNT qu'avec le MNE. Toutefois, cinq points GPS (points 35 36 37 et 86 87) présentent des valeurs aberrantes comparées aux valeurs des points levés à proximité. Quatre de ces points (35 36 86 et 87) ont été acquis dans le voisinage d'arbres, ce qui peut expliquer les erreurs constatées. Nous n'avons pas d'explications en ce qui concerne le point 37. Un cinquième point (84) levé dans la végétation montre un écart très important avec le point MNE correspondant. En supprimant ces 5 points, les coefficients de corrélation augmentent considérablement et prennent respectivement les valeurs de 0,93 et 0,87 pour la corrélation entre points GPS et MNT et MNE. La corrélation reste tout de même meilleure entre les points GPS et le MNT qu'avec le MNE. On constate effectivement qu'un certain nombre de points MNE contigus possèdent tous la même valeur (34 à 40, 49 à 64, 80 à 85) qui diffère assez fortement des valeurs GPS et MNT, essentiellement dans le nord de la ville et notamment tout le long de la Chaussée Royale (Figure 14).

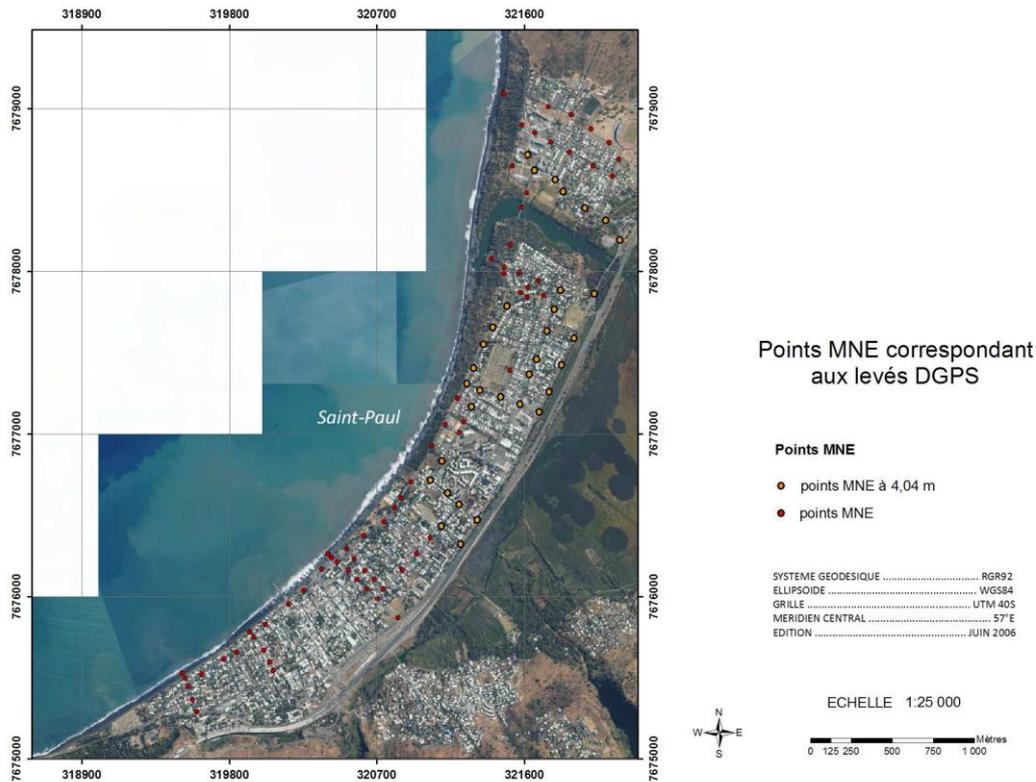


Figure 14. Points du MNE et points levés au DGPS.

1.2.2.2.2 Ecart entre les mesures DGPS et les valeurs MNT et MNE correspondantes

La figure ci-dessous représente les écarts mesurés entre d'une part, les points levés au DGPS et les points correspondant du MNT (en rouge) et d'autre part, les points GPS et les points MNE (en vert). Les écarts maximums en valeur absolue sont respectivement de 2,15 m pour le MNT et 2 m pour le MNE, avec une moyenne de 0,27 m pour le MNT et 0,43 m pour le MNE.

1.2.2.2.3 Répartition spatiale des écarts

Les deux figures qui suivent montrent la répartition spatiale des écarts entre les relevés DGPS et les points MNT et MNE. En ce qui concerne les écarts entre points GPS et MNT, nous n'observons aucune répartition spatiale particulière, si ce n'est que les écarts les plus significatifs sont localisés essentiellement dans le nord de Saint-Paul. En revanche, pour ce qui est des écarts entre levés GPS et MNE, nous observons que la plupart des écarts les plus importants sont localisés le long de la Chaussée Royale, où, comme nous l'avons spécifié plus haut, tous les points MNE ont la même valeur (4,04 m).

1.2.3 Modélisation

1.2.3.1 Principe du modèle

Sans données bathymétriques précises, il est impossible d'utiliser Mike 3D pour modéliser les niveaux d'eau. Nous avons utilisé un modèle beaucoup plus simple qui permet d'avoir une idée sur les zones les plus vulnérables en cas d'élévation du niveau marin. Ce modèle s'appuie sur un algorithme récursif qui effectue une analyse du MNT cellule par cellule. A l'initialisation du modèle, l'utilisateur spécifie une hauteur d'eau h_m en fonction d'un scénario choisi, ainsi qu'un incrément Δh_m pour l'élévation du niveau marin (Figure 15). A partir d'un point localisé en mer, le modèle va inonder tous les pixels contigus dont l'altitude ne dépasse pas la hauteur d'eau spécifiée. Cela permet de suivre pas à pas le cheminement emprunté par l'eau et d'identifier par conséquent quelles sont les zones à risque.

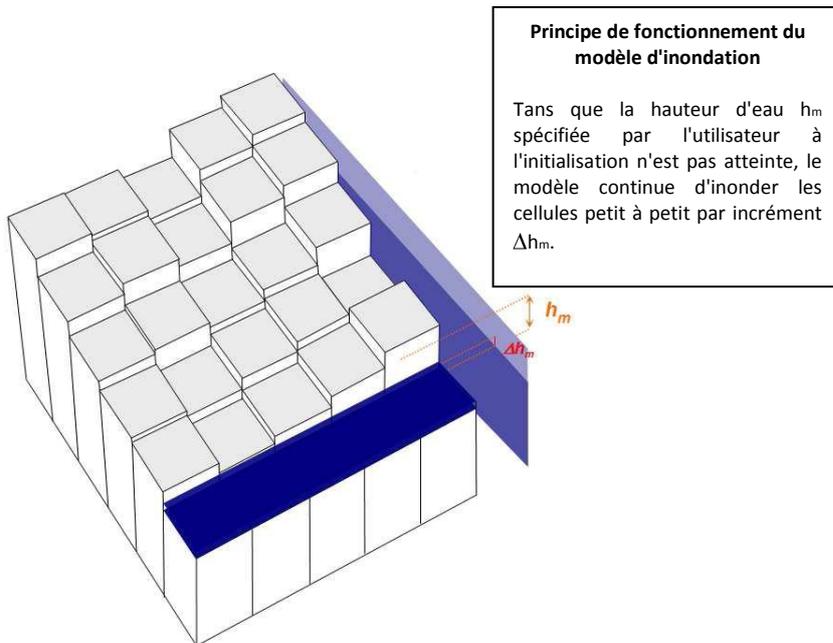


Figure 15. Principe de fonctionnement du modèle.

1.2.3.2 Exemple d'application

La Figure 16 illustre les résultats de simulation d'élévation du niveau marin pour trois niveaux choisis de façon totalement arbitraire. Nous constatons que les zones les plus vulnérables à une élévation du niveau de la mer ne sont pas forcément les habitations situées en bord de plage - qui se situent généralement à une altitude comprise entre 4 m et 6,50 m, mais plutôt les bâtis situés de part et d'autre de l'étang de Saint-Paul. Si le niveau d'eau atteint 2,50 m comme dans notre exemple, ce sont même les habitations localisées en arrière de la ville, le long de la Chaussée Royale qui semblent les plus exposées au risque submersion.

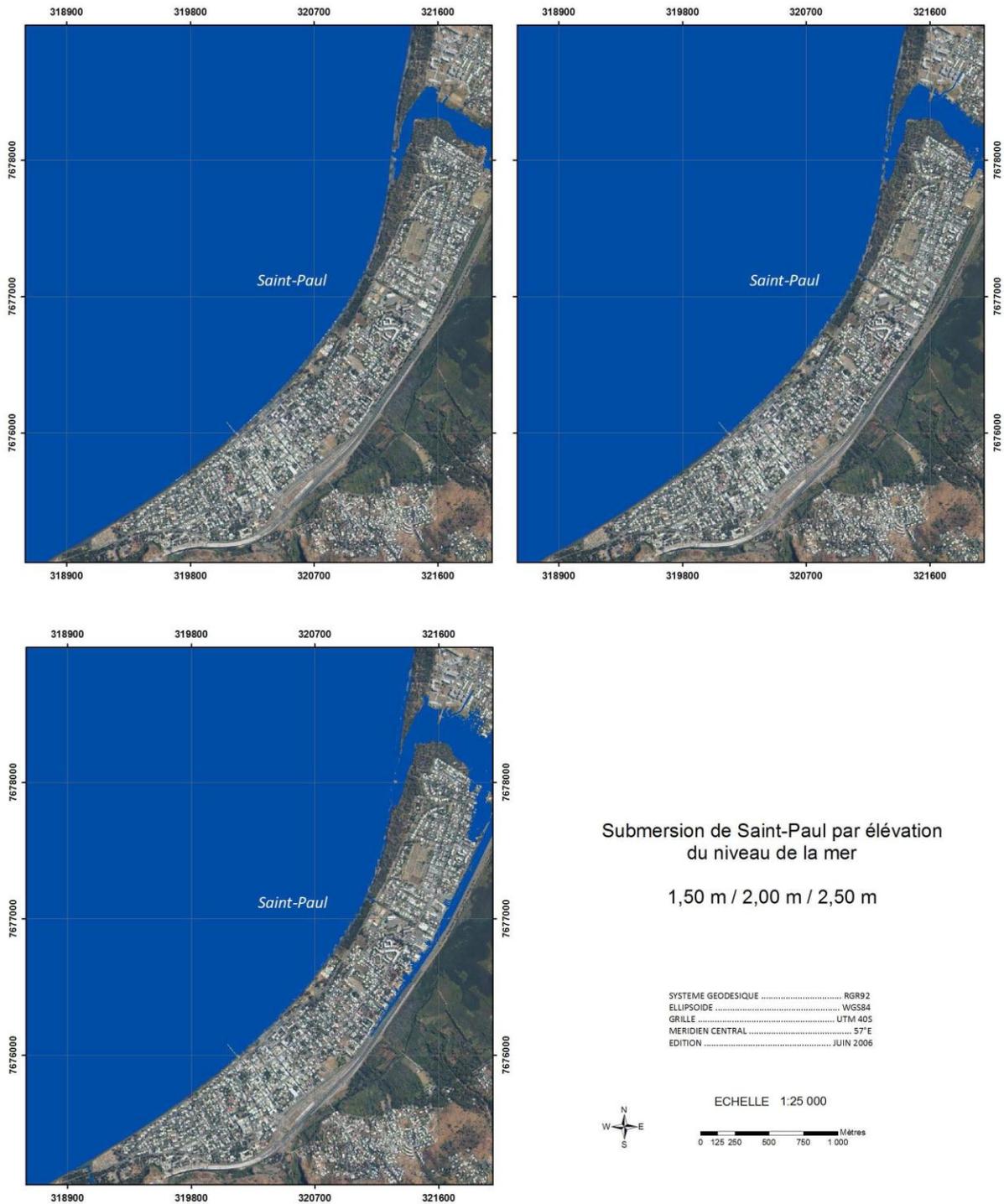


Figure 16. Simulation d'élévation du niveau océanique.

1.3 Modélisation multi-scenarios (CEA)

1.3.1 Méthode

1.3.1.1 Le code numérique de modélisation des tsunamis

Les codes de simulation numérique des tsunamis résolvent les équations de l'hydrodynamique. Dans cette étude, l'initiation des ondes est liée à des séismes. Le code numérique que nous utilisons a été développé au CEA. Il résout les équations de Saint-Venant ou équations dites d' « ondes longues ». Il repose sur un schéma de type différences finies du premier ordre de Crank et Nicolson (1947) qui est parallélisé avec la bibliothèque MPI. Le raffinement demandé pour calculer les impacts à la côte et les inondations nécessite d'utiliser des schémas de grilles imbriquées.

Le modèle de déformation élastique d'Okada (1985) est utilisé pour calculer la déformation du sol engendrée par un séisme. Les formules analytiques établies par Okada (1985) décrivent, en fonction de la géométrie de la faille et des paramètres de terre élastique, les déplacements en surface dus à des dislocations élastiques en profondeur représentant la rupture cosismique. Le code numérique est basé sur l'hypothèse que la déformation du sol est entièrement transmise à la tranche d'eau. Les paramètres de la faille et du moment sismique M_0 sont donnés par l'analyse du tenseur du moment des ondes sismiques et sont reliés par l'équation:

$$M_0 = \mu U.L.W \quad (1)$$

où μ est la rigidité, U est le glissement moyen, L est la longueur et W la largeur du plan de faille.

Les tsunamis sont des ondes suivant la théorie des ondes longues « shallow water » (Heinrich et al., 1998 ; Hébert et al., 2007). Selon ces hypothèses, les équations hydrodynamiques décrivant la conservation de la masse et du moment peuvent être moyennées sur les profondeurs. Ces équations sont les suivantes :

L'équation de conservation de la masse:

$$\frac{\partial(\eta + h)}{\partial t} + \nabla[v(\eta + h)] = 0 \quad (2)$$

L'équation de conservation du moment:

$$\frac{\partial(v)}{\partial t} + (v\nabla)v = -g\nabla\eta + \sum F \quad (3)$$

où h est la profondeur d'eau, η est l'élévation du niveau d'eau au-dessus du niveau moyen des eaux, v est le vecteur vitesse horizontale moyenné et F sont les forces extérieures suivantes:

$$\sum F = f_c + f_{chezy} + f_{atm} \quad (4)$$

avec f_c la force de Coriolis, f_{chezy} la force résultante des frottements selon les termes de Chezy et f_{atm} représentative des contraintes atmosphériques relatives aux vents et à la pression.

Dans le modèle actuel, seule la force extérieure de Coriolis est considérée (celle-ci est nulle en pratique).

Dans la théorie « shallow water », pour des amplitudes faibles et pour une propagation non-dispersive, la vitesse de la vague est donnée par:

$$c = \sqrt{g \cdot h} \quad (5)$$

Aux abords des côtes, la hauteur d'eau diminue (h) ainsi que la vitesse de la vague (c).

La propagation des ondes d'un tsunami est simulée dans des grilles régulières représentant la bathymétrie et la topographie. Les hauteurs de vagues γ sont estimées d'autant plus précisément que la bathymétrie et la topographie sont connues avec précision.

De plus, la méthode numérique prend en compte l'inondation des rivages et nous permet d'estimer les valeurs de *runup* (hauteur d'inondation du tsunami à l'intérieur des terres), en connaissant la topographie des premiers mètres des rivages. Les données topographiques et bathymétriques aussi précises que possible sont fusionnées pour nous permettre de calculer les valeurs de *runup*.

1.3.1.2 Les grilles bathymétriques et topographiques imbriquées

Les modélisations sont réalisées dans un système de grilles imbriquées permettant d'améliorer la résolution bathymétrique et topographique en approchant les sites d'étude situés le long des côtes de La Réunion et de Mayotte. Ces îles sont soumises à des tsunamis ayant pour origine des zones de déformation active de l'Océan Indien: la subduction de Sumatra, de Java et du Makran (MSZ sur la carte) (Figure 17).

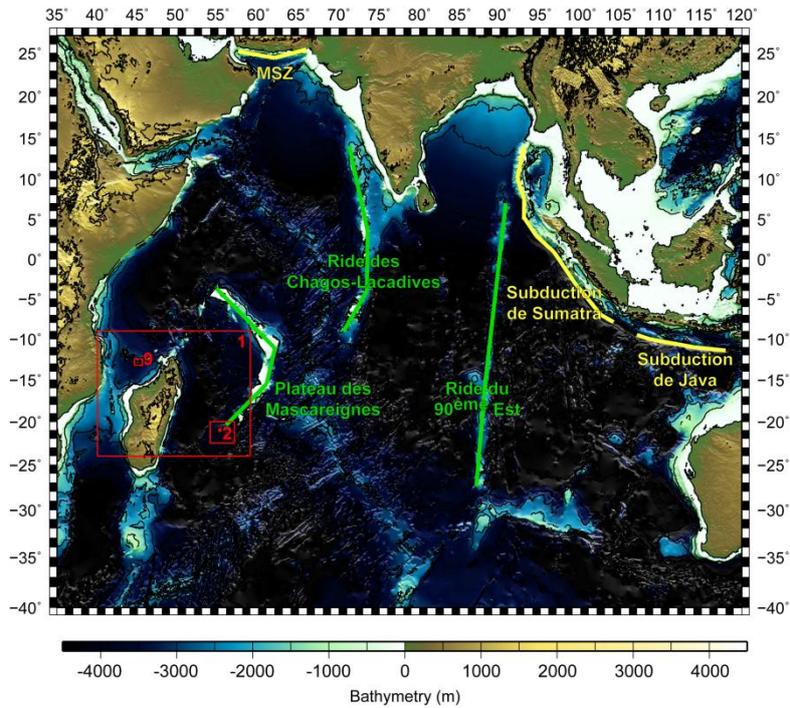


Figure 17. Carte de localisation de notre étude. En vert sont indiquées les structures bathymétriques de l'Océan Indien, en jaune, les zones de déformations et en rouge, la localisation des grilles.

La propagation des vagues de tsunamis est contrôlée par la bathymétrie des fonds océaniques, en effet, la vitesse du tsunami est directement liée à la hauteur d'eau par la **relation 5** présentée ci-dessus. Pour qu'un site d'étude soit modélisé de façon optimale (en hauteur d'eau et en inondation), il est nécessaire d'avoir une grande résolution bathymétrique, proche des côtes, mais également une bonne résolution topographique pour que l'inondation soit correctement simulée. Pour de fortes profondeurs d'eau la résolution des grilles n'a pas besoin d'être aussi précise que sur les zones d'étude. Ainsi nos premières grilles ont une résolution faible (3' pour la première) tandis que celle des grilles correspondant à nos sites d'étude est grande (environ 0.1'') (Figure 18).

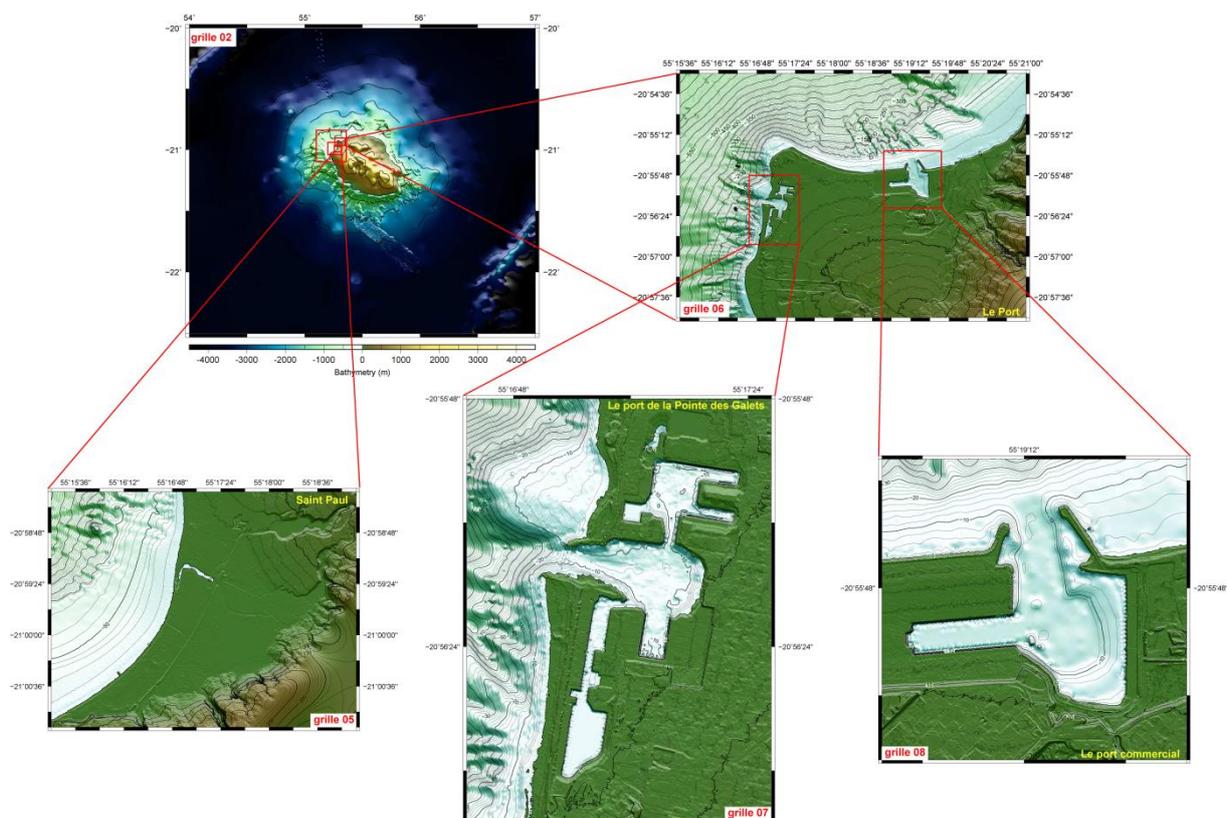


Figure 18. Carte de localisation des sites d'étude de La Réunion.

La grille 02 est centrée sur La Réunion. La grille 05 correspond à la ville de Saint Paul, la grille 06 aux deux sites du Port, le port de la Pointe des Galets correspond à la grille 07 et le port commercial à la grille 08. Pour la grille 05, la topographie au-delà de 150 m d'altitude n'est pas définie ce qui implique une interpolation hasardeuse à ne pas prendre en compte. Ce sera le cas pour nos figures suivantes relatives à cette grille.

Les grilles bathymétriques ont été réalisées à l'aide de données issues de la base GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans), du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) et de la DDE (Direction Départementale de l'Équipement) Phares et balises. Les données GEBCO ont une résolution d'une minute d'arc; elles n'incluent pas les détails des zones peu profondes. Les données du SHOM couvrent les abords des îles jusqu'à environ 30 km des côtes. Le maillage de ces données est de l'ordre de 100 m jusqu'à 300 m de profondeur puis 500 m au delà de 300 m de profondeur. Les données DDE ont une meilleure résolution (8 à 25 m) que les données du SHOM mais ne sont disponibles que pour La Réunion et localement.

Pour l'étude de l'île de Mayotte, les données numériques bathymétriques du SHOM disponibles étaient incomplètes pour notre zone d'étude : Petite Terre et Mamoudzou. Il a donc été nécessaire de numériser des cartes marines du SHOM pour compléter ces informations. La meilleure résolution que nous avons pu obtenir est de 15 m.

Pour les grilles fines dans lesquelles l'inondation est modélisée, la topographie est prise en compte. Pour les sites de la Réunion et de Mayotte, nous avons à notre disposition des données topographiques acquises dans le cadre du projet Litto 3D. Ces données ont une résolution très fine (1 m).

Les données ont été compilées de manière à obtenir la meilleure résolution possible en chaque point sur les grilles des sites d'étude.

Les paramètres des grilles sont présentés dans le Tableau 2 avec la localisation de chaque grille dans le Tableau 3.

N°	Rés. (s)	Région	dim. (pt)	Z max.	données utilisées	dx (m)
00	3'	35/120/-40/27	1701x1341	-7832	Gebco 1'	5556
01	45	40/59/-24/-9	1521x1201	-5753	Gebco, SHOM	1389
02	10	54/57/-22.5/-20	1081x901	-4845	Gebco, SHOM	308
03	2	55.1/55.36/-21.1/-20.84	469x469	-1650	Gebco, SHOM	62
04	0.5	55.2/55.32/-21.04/-20.94	865x721	-863	SHOM, DDE, Litto3D	15
05	0.15	55.255/55.318/-21.018/-20.972	1513x1105	-405	SHOM, DDE, Litto3D	4.63
06	0.4	55.26/55.35/-20.965/-20.905	811x541	-937	SHOM, DDE, Litto3D	12
07	0.1	55.278/55.291/-20.947/-20.93	469x613	-165	SHOM, DDE, Litto3D	3
08	0.1	55.313/55.328/-20.938/-20.924	541x505	-71	SHOM, DDE, Litto3D	3
09	10	44.6666/45.5/-13.1666/-12.5	301x241	-3497	Gebco, SHOM	308
10	2	45.1666/45.3333/-12.8666/-12.7166	301x271	-1285	Gebco, SHOM, Litto3D	61.7
11	0.5	45.2166/45.3083/-12.8166/-12.75	661x481	-469	SHOM, litto3D	15.43

Tableau 2 : Paramètres des grilles imbriquées.

Le paramètre Rés. correspond à la résolution des grilles en seconde. Pour la grille 00, la résolution est de 3 minutes. La région correspond aux emprises géographiques des grilles avec la longitude minimale puis maximale et la latitude minimale et maximale. Le dim. donne les dimensions des grilles en nombre de points. Le Z max. est la profondeur maximale atteinte dans la grille. Le paramètre dx correspond à la résolution de la grille en mètre.

N°	Localisation
00	Océan Indien
01	La Réunion + Mayotte
02	La Réunion
03	St Paul et Le Port
04	St Paul
05	St Paul
06	le port est et ouest
07	le port ouest
08	le port est
09	Mayotte
10	Mayotte nord-est
11	Petite Terre et Mamoudzou

Tableau 3 : Localisation géographique des grilles.

ne succession de 8 grilles a été choisie pour La Réunion et 6 pour Mayotte. La première grille notée 00, représente tout l'Océan Indien. La grille 01 englobe les deux îles de notre étude, puis les grilles de 02 à 08 se focalisent sur La Réunion. La grille 05 avec une résolution d'un peu moins de 5 m permet d'examiner l'impact d'une vague de tsunami sur la ville de Saint Paul. La grille 06 s'intéresse aux deux ports avec une résolution de 12 m puis la grille 07 avec une résolution de 3 m est centrée sur le port de la Pointe des Galets, la grille 08 avec la même résolution sur le port commercial. A noter que la bathymétrie utilisée pour réaliser nos cartes est celle des données actuelles. La bathymétrie du port commercial a en effet changé depuis le début de l'année 2010; la largeur d'entrée du port est passée de 130 à 160 m, le diamètre de la zone d'évitage de 350 à 480 m et le tirant d'eau de 13 à 16 m. Il faudra donc relativiser les effets dans ce port par rapport aux observations faites lors des évènements précédant ce réaménagement.

Les grilles de 09 à 11 ont pour emprise l'île de Mayotte (Figure 19). La ville de Mamoudzou et l'île de Petite Terre sont incluses dans la grille 11 avec une résolution de 15 m.

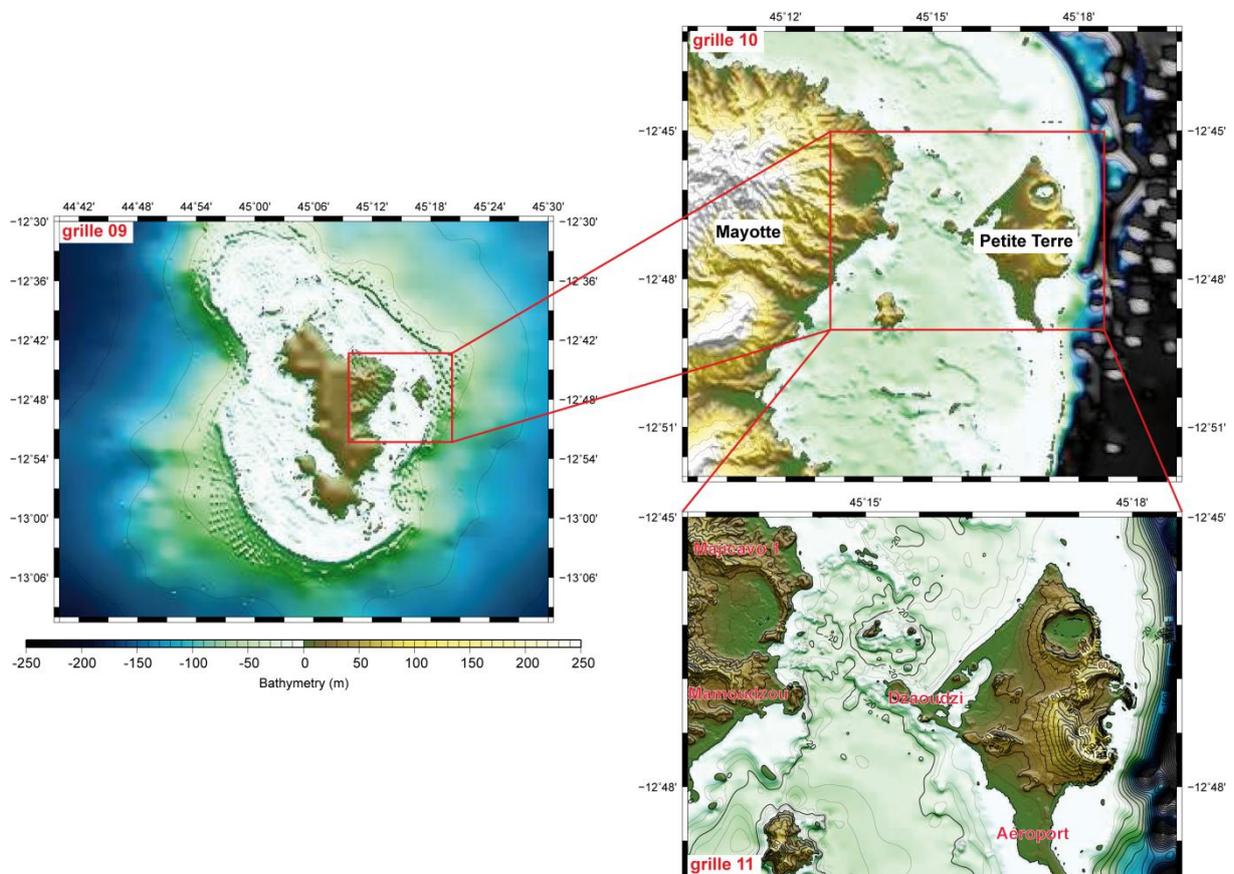


Figure 19. Carte de localisation des sites d'étude de Mayotte.

La grille 09 est centrée sur Mayotte, la grille 10 correspond à la côte nord-est de l'île, la grille 11 aux sites de Dzaoudzi (Petite Terre) et de la ville de Mamoudzou.

1.3.1.3 Les modèles de sources sismiques retenues

Nous avons retenu des modèles de sources des différentes zones de subduction de l'Océan Indien.

1.3.1.3.1 Zone de subduction de Sumatra

Pour la zone de subduction de Sumatra, nous avons choisi de traiter les évènements de 1833, 1907, 2004, 2005, 2007 et 2010.

- Le séisme de 24 Novembre 1833 a été étudié par de nombreux auteurs (Newcomb et McCann, 1987 ; Zachariassen et al., 1999 ; Natawidjaja et al., 2006 ; Jaiswal et al., 2008). Il s'agit d'un séisme localisé vers les îles de Pagai Nord et Sud et Sipora (estimée à : lat : 3° S, Long : 99.5° E) avec une profondeur estimée à 10 km, et une magnitude de moment entre Mw=8.8 et 9.2. Nous avons retenu deux modèles de sources proposées par ces auteurs. Le premier modèle comprend 3 sous-plans localisés sous les îles de Sipora, Pagai Nord et Sud à une profondeur de 25 km et un glissement moyen de 10 m pour une magnitude Mw=8.9 (Natawidjaja et al., 2006) (Tableau 4).

Long.	Lat.	z (km)	d (m)	strike	dip	rake	1/2 L (m)	W (m)	rigidité (N.m-2)	time
99.4	-2.7	25	9	325	15	90	12500	50000	2.5E+12	0.
99.65	-3	25	11	325	15	90	37500	50000	6.8E+11	0.
100.3	-4	18.5	18	325	15	90	90000	37000	2.35E+11	0.

Tableau 4 : Paramètres du modèle de source pour l'évènement de 1833 extrait de Natawidjaja et al. (2006).

Le deuxième modèle est celui de Zachariassen et al. (1999), comprenant un plan de faille d'une longueur de 550 km et d'une largeur de 250 km. La magnitude estimée est de 9.2 (Tableau 5). C'est un modèle correspondant à une source sismique très forte. Ce modèle pourra être utilisé comme un cas discriminant car sa magnitude et sa rigidité sont fortes. Ce modèle va nous donner une information sur l'impact maximal du tsunami sur les îles.

Long.	Lat.	z (km)	d (m)	strike	dip	rake	1/2 L (m)	W (m)	rigidité (N.m-2)	time
100.45	-3.25	35	26	322	14	90	27500	250000	2E+10	0.

Tableau 5 : Paramètres du modèle de source pour l'évènement de 1833 extrait de Zachariassen et al. (1999).

Ce séisme est considéré comme l'un des plus forts ayant affecté Sumatra. Les enregistrements de changements du niveau marin dans les coraux sur les îles de Sumatra ont permis de constater qu'une importante surrection et un basculement des îles avaient eu lieu lors de ce séisme. La surrection, estimée à 2.8 m, s'est étendue entre 2° et 3.2° S et peut-être jusqu'à 5° S. La surrection et le basculement seraient équivalents à ceux enregistrés pour le séisme de Nias-Simeulue en 2005 avec une surrection de 3 m et un basculement vers le continent.

Les observations ont permis à Natawidjaja et al. (2006) de constater qu'un tsunami provoqué par le séisme avait créé un *runup* de 3 à 4 m vers Padang (1° S).

Il n'existe qu'une seule observation du tsunami sur l'île de La Réunion : *runup* de 3.5 m à l'ouest de l'île. Aucune observation n'existe pour l'île de Mayotte. Compte tenu des observations faites pour des séismes équivalents en magnitude et en localisation, on suppose qu'un tsunami a pu toucher les côtes des deux îles.

- Le séisme de 1907 s'est produit le 4 Janvier 1907 (05:19 UTC). Il serait un séisme d'avant fosse (outer rise earthquake) situé à 30 km de profondeur selon Abe (1981). Il est mal connu mais serait équivalent à celui du 2 Novembre 2002 qui a eu lieu dans la même région. Ce dernier a une magnitude Mw7.9 à une profondeur de 23 km. Le plan de faille a pour paramètres 297/16/73 (strike/dip/rake), le tenseur du moment est de 4.5E26 dyn.cm selon le « Global CMT Catalog » disponible sur www.globalcmt.org.

Selon Gutenberg et Richter (1954), il était localisé à la latitude de 2°N et à la longitude de 94.5°E avec une profondeur de 50 km.

Dans une étude plus récente (Kanamori et al., 2010), la localisation du séisme a été réévaluée (Lat=2.48°N, Long=96.11°E) pour une longueur de plan de faille de 290 km et une largeur de 223 km. La magnitude est estimée à Mw7.6.

- Largement étudié, le séisme de Sumatra ayant eu lieu le 26 Décembre 2004, a créé un tsunami destructeur qui a ravagé de nombreux littoraux (Lay et al., 2005 ; Hébert et al., 2007 ; Sladen et Hébert, 2008).

La rupture s'étend sur plus d'un millier de kilomètres le long de la subduction de Sumatra.

Nous avons utilisé deux modèles de source pour simuler cet évènement. Le premier modèle de source est constitué de 6 sous-plans, il s'agit du modèle A décrit par Hébert et al. (2007) (Tableau 6). Ce modèle estime la magnitude à Mw=9.2. Le deuxième modèle de source utilisé est celui de Sladen et Hébert (2008), qui a également pour magnitude Mw=9.2.

Dans le modèle de Hébert et al. (2007), chaque sous-plan a une profondeur fixée à 20 km. Le déplacement est inhomogène et varie de 12 m à 3 m vers le nord. Ce modèle de source génère une onde pour former la vague initiale d'une amplitude de -3.84 m à 6.92 m. Dans le modèle de Sladen et Hébert (2008), la vague initiale a une amplitude de -3.26 m à 9.50 m.

Long.	Lat.	z (km)	d (m)	strike	dip	rake	1/2 L (m)	W (m)	rigidité (N.m-2)	time
92.9	13.0	20	3	10	15	100	75000	130000	45.E9	0.
92.8	10.3	20	5	359	14	98	225000	130000	45.E9	0.
93.1	7.3	20	12	345	13	95	120000	130000	45.E9	0.
93.75	5.4	20	16	337	12	92	100000	130000	45.E9	0.
94.5	3.8	20	12	325	12	92	100000	130000	45.E9	0.
95.6	2.9	20	3	300	12	92	60000	130000	45.E9	0.

Tableau 6 : Paramètres du modèle de source de l'évènement de 2004 extrait de Hébert et al. (2007).

- Le séisme du 28 Mars 2005 est localisé sur la subduction de Sumatra (lat=2.074°N, long=97.013°E, source NEIC) à une profondeur de 30 km. La source utilisée pour la modélisation est celle calculée par Caltech http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/.

- Le séisme du 12 Septembre 2007 d'une magnitude de 8.5 qui s'est produit le long des côtes de Sumatra (lat=3,78°S, long=100.99°E) a été localisé à une profondeur d'environ 25 km. Lorito et al. (2008) ont défini 28 sous-plans pour ce séisme (Mw=8.4). Nous avons préféré choisir une source plus résolue avec le modèle de l'USGS composé de 308 sous-plans (Mw=8.5) et celui de Caltech (575 sous-plans réduits à 169; Mw=8.4)

- Le 25 Octobre 2010 eut lieu un séisme de forte magnitude localisé sur la subduction de Sumatra au niveau de l'île de Mentawai. Il a été mesuré à une magnitude Mw=7.7 (lat=3.484°S, long=100.114°E) et a une profondeur d'environ 20 km. Nous avons utilisé la source calculée par le CEA et composée de 30 sous-plans. Le modèle de source défini par l'USGS que nous avons simulé comprend 350 sous-plans

1.3.1.3.2 Zone de subduction de Java

Pour la zone de subduction de Java, nous avons choisi de traiter l'évènement de 2006. Ce séisme s'est produit au large de Java le 17 Juillet 2006 et a créé un tsunami qui s'est propagé jusqu'à l'île de la Réunion. La localisation de ce séisme est : lat=10.28°S, long=107.78°E avec une profondeur de 34 km. Il s'agit d'un « tsunami earthquake », c'est à dire d'un séisme lent : magnitude sous estimée en proportion de sa capacité tsunamigénique. Nous avons utilisé les données calculées de Caltech et de l'USGS pour définir nos modèles de sources.

1.3.1.3.3 Zone de subduction du Makran

La zone de subduction du Makran (MSZ) est une région sismiquement active. Cette zone de subduction est connue pour être un décrochement majeur en transpression. La subduction est lente : 40 mm.an-1. L'angle de pendage est compris entre 2 et 8° (Kopp et al., 2000 ; Schlüter et al., 2002).

D'après Jackson et McKenzie (1984), les séismes du MSZ, localisés à moins de 20 km de profondeur, sont des séismes susceptibles de générer des tsunamis. Le séisme du 27 Novembre 1945 a généré un tsunami qui a touché le Pakistan et l'Inde et fait de nombreuses victimes (Pararas-carayannis, 2006). Nous avons utilisé les paramètres de la source issus des études de Rajendran et al. (2008) et de Heidarzadeh et al. (2007).

1.3.2 Résultats de la modélisation

1.3.2.1 Marégrammes réels et synthétiques

Les simulations permettent de calculer les signaux synthétiques pour le marégraphe de la Pointe des Galets situé dans le bassin nord-ouest. La comparaison de ces résultats avec les enregistrements disponibles contribue à valider les modèles.

Les données doivent tout d'abord être traitées afin de filtrer l'effet de la marée à l'aide d'un filtre butterworth. La fréquence de la marée est de l'ordre de 0.04 mHz.

Le traitement permet d'extraire le signal du tsunami. La Figure 20 représente le traitement pour les données du marégraphe de l'évènement de 2004.

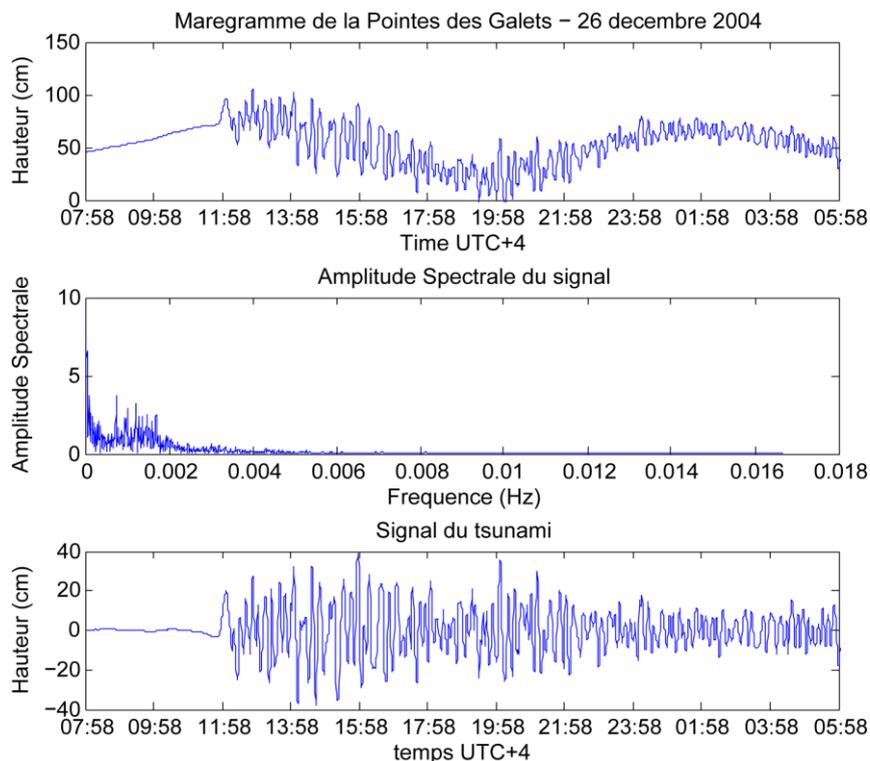


Figure 20 : Traitement du signal du marégraphe de la Pointe des Galets (évènement de 2004).

Les données traitées sont comparées avec les résultats des simulations. Nous utilisons les modèles de sources pour l'évènement de 2004 (Sladen et Hébert, 2008) et celui de 2010 (modèle CEA). Ces comparaisons sont montrées sur les Figure 21 et Figure 22.

La première vague est bien simulée en temps et en amplitude. Les vagues du tsunami, après la première, arrivent plus tôt qu'en réalité de 5 à 10 minutes.

Pour modéliser la rupture cosismique, le plan de faille est discrétisé en plusieurs sous-plans ce qui génère des hautes fréquences dans les marégrammes synthétiques, notamment pour l'évènement de 2010 modèle CEA (Figure 22) et USGS qui n'existent pas sur le marégramme réel. En raison de ces hautes fréquences et pour que nos données correspondent à la fréquence d'acquisition du marégraphe, nous avons filtré les données à une résolution de 2 minutes. Ce filtrage permet de réduire les hautes fréquences et de lisser le signal.

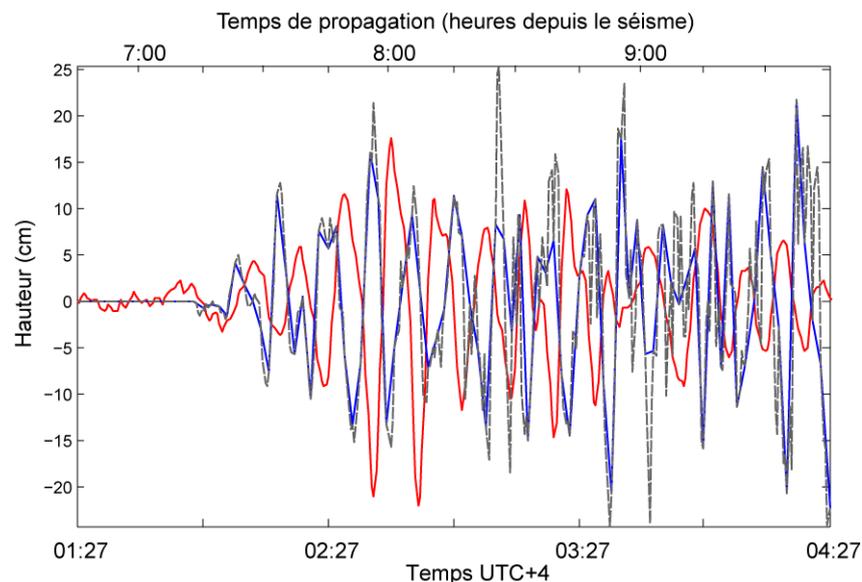


Figure 21 : Comparaison des marégrammes à l'île de La Réunion pour l'évènement de 2004 : modèle de Sladen et Hébert (2008). En rouge est affiché le marégramme réel de la Pointe des Galets, la courbe grise discontinue correspond au marégramme synthétique et en bleu au marégramme synthétique filtré à 2 minutes.

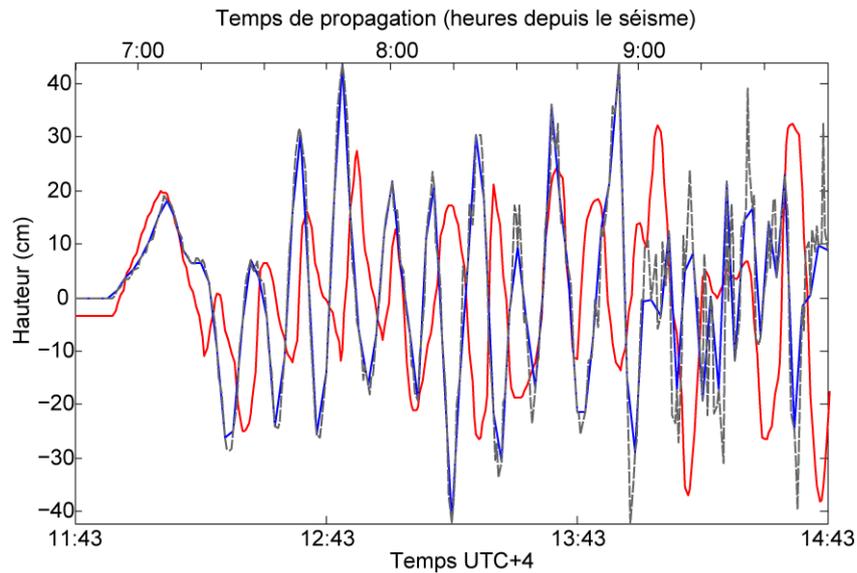


Figure 22 : Comparaison des marégrammes à l'île de La Réunion pour l'évènement de 2010 : modèle CEA. En rouge est affiché le marégramme réel de la Pointe des Galets, la courbe grise discontinue correspond au marégramme synthétique et en bleu au marégramme synthétique filtré à 2 minutes.

Les simulations montrent un bon accord avec les données jusqu'à 2 heures après la première arrivée. Deux à trois heures après l'arrivée de la première vague, le calage du signal observé/simulé est plus difficile voire impossible. Dans nos résultats, nous n'interprétons que les 3 premières heures après l'arrivée du tsunami. Le tsunami arrive à La Réunion, pour les séismes de la zone de subduction de Sumatra, au bout de 7 heures de propagation et de 8h15 à 8h30 pour Mayotte. Nous interprétons donc nos données de simulation jusqu'au 10 heures de simulation et 11 heures pour Mayotte.

1.3.2.2 *Les résultats des simulations*

Les tsunamis de la subduction du Sumatra se propagent dans l'Océan Indien vers le sud-ouest. Pour l'évènement de 2004, la Birmanie, le Sri Lanka, l'Inde et le Bangladesh sont touchés après 3 heures environ de propagation, l'Australie après 5 heures, puis l'Oman, le Yémen, la Somalie et le Pakistan entre 6 et 7 heures. La première vague arrive environ 7 heures après l'initiation du tsunami à La Réunion et environ 8h30 après le séisme à Mayotte (Figure 23).

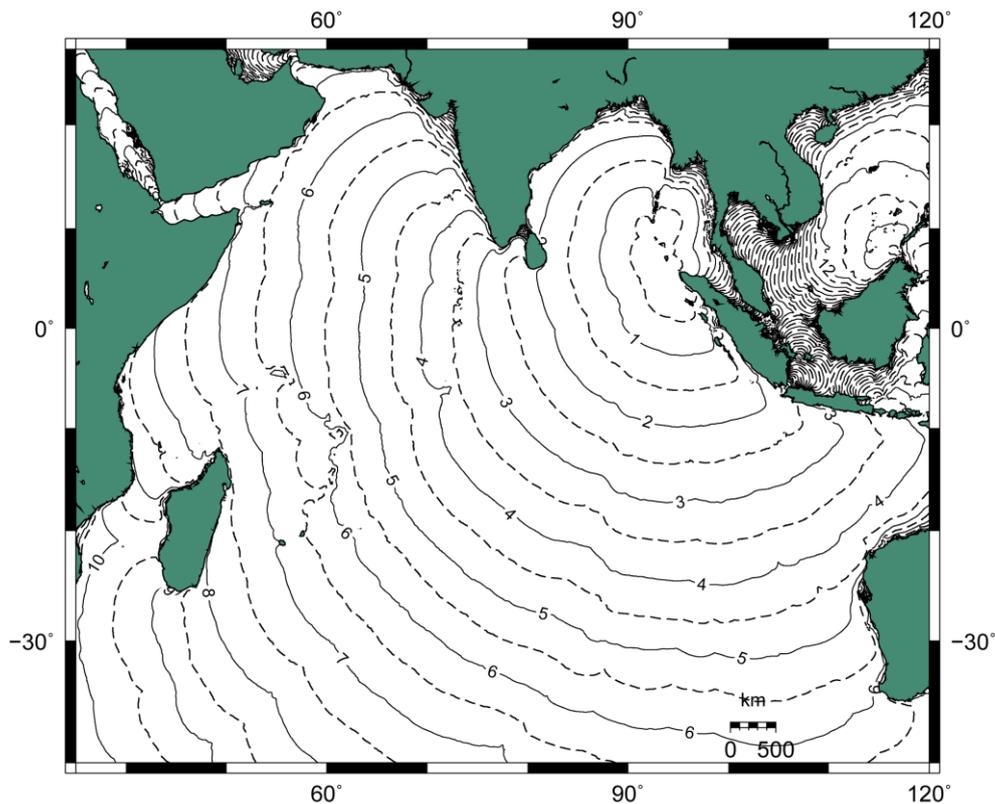


Figure 23 : Carte des temps de trajets du tsunami pour le séisme de 2004 : modèle de Hébert et al., 2007. Les isocontours sont affichés toutes les 30 minutes (heures en traits pleins, demi-heures en tirets). Les heures sont affichées sur les courbes pleines.

Pour l'évènement de 2006 à Java, le tsunami se propage vers le sud mais il est contraint par l'Australie à se développer vers le sud-ouest. Au bout de 4h de propagation à travers l'Océan Indien, la vague la plus forte ne fait plus qu'environ 15 cm. La vague atteint l'île de La Réunion au bout de 7h45 de propagation. La vague n'atteint pas Mayotte, elle semble protégée par les hauts reliefs présents entre les Seychelles et Madagascar.

Pour les évènements de la zone de subduction du Makran, la vague se propage vers le sud en direction de Madagascar et l'archipel des Comores. L'Iran, le Pakistan, l'Inde et l'Oman sont les premiers pays touchés. Le tsunami atteint l'île de Mayotte après environ 6h de propagation. Le tsunami ne semble pas atteindre La Réunion.

La hauteur d'eau initiale engendrée par le séisme est l'un des paramètres donnant un aperçu de l'ampleur du tsunami. Le Tableau 7 : Informations sur les simulations. TTT est le temps de propagation du tsunami. Les hauteurs d'eau de la déformation initiale sont données pour les différents modèles testés. Pour 1833, le modèle 1 est celui de Natawidjaja et al. (2006), le modèle 2 de Zachariassen et al. (1999). Pour l'évènement de 2004, le modèle 1 est celui de Hébert et al. (2007), le modèle 2 de Sladen et Hébert (2008). Pour l'évènement de 2010, le modèle 1 est celui de l'USGS et le modèle 2 du CEA. Tableau 7 récapitule pour les simulations effectuées, la hauteur d'eau de la

déformation initiale, le temps de propagation avant l'arrivée du tsunami à La Réunion et à Mayotte ainsi que la période des vagues.

Evènement	hauteur (m) (1ere vague)	TTT Réunion	& TTT Mayotte	Période (min)
24/11/1833	7 (modèle 1) à 11 (modèle 2)	6h50	8h30	20
04/01/1907	4.77	6h50	8h12	50 à 1h12
27/11/1945	2.7	7h30	6h	24
26/12/2004	4.1 (modèle 1) à 9.38 (modèle 2)	6h50	8h18 à 8h30	50 à 1h
28/03/2005	2.45	7h	8h24	40
17/07/2006	0.52	7h48	-	10
12/09/2007	1.12	7h	8h06	40
25/10/2010	0.31(modèle 1) à 2 (modèle 2)	6h54	8h50 à 9h12	12 à 10

Tableau 7 : Informations sur les simulations. TTT est le temps de propagation du tsunami. Les hauteurs d'eau de la déformation initiale sont données pour les différents modèles testés. Pour 1833, le modèle 1 est celui de Natawidjaja et al. (2006), le modèle 2 de Zachariassen et al. (1999). Pour l'évènement de 2004, le modèle 1 est celui de Hébert et al. (2007), le modèle 2 de Sladen et Hébert (2008). Pour l'évènement de 2010, le modèle 1 est celui de l'USGS et le modèle 2 du CEA.

1.3.2.2.1 Impact à l'île de La Réunion

Le tsunami arrive à La Réunion par l'est au bout de 7 heures de propagation. La vague s'enroule autour de l'île. Les fronts de l'onde se rencontrent à l'ouest de l'île au niveau de la ville de Saint Gilles. Pour les simulations des évènements de la subduction de Sumatra, les parties ouest, nord et sud de l'île sont celles où les plus importantes hauteurs d'eau sont enregistrées (Figure 24). Ce qui est conforme aux observations d'Okal et al. (2006) qui donnent les plus importantes valeurs de *runup* sur ces parties de l'île.

Le modèle de source de Zachariassen et al. (1999) pour l'évènement du 24 Novembre 1833, est celui qui provoque la plus importante vague de toutes nos simulations, de l'ordre de 10 m, alors que la vague du modèle de Natawidjaja et al. (2006) est de l'ordre de 7 m. Nous utiliserons préférentiellement les résultats du modèle de Zachariassen et al. (1999) pour déterminer les inondations maximales sur les sites d'études car il constitue le cas d'un tsunami dévastateur.

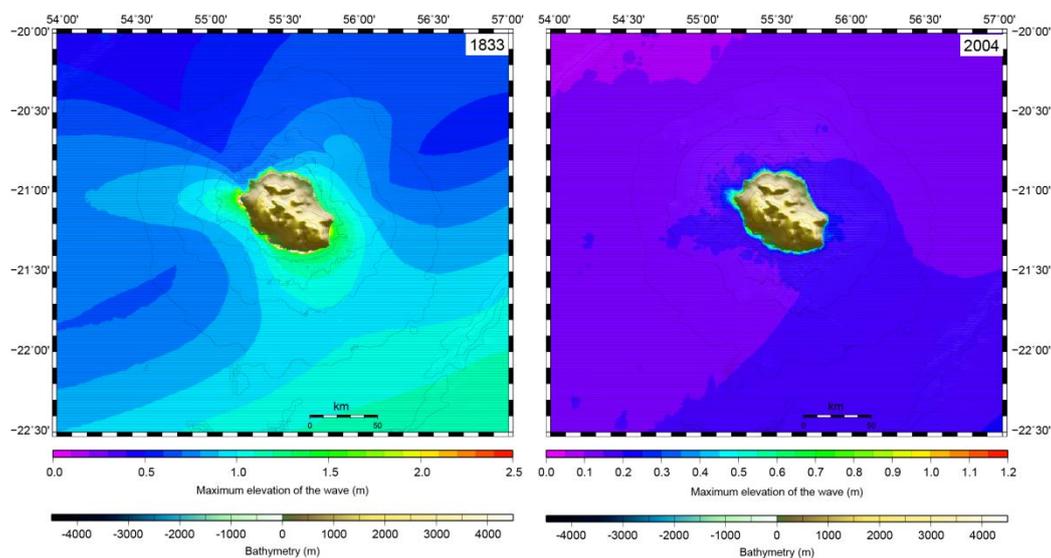


Figure 24 : Hauteurs d'eau maximales calculées au large de La Réunion pour les évènements de 1833 (Zachariasen et al., 1999) à droite et 2004 à gauche (Sladen et Hébert, 2008). Isocontours bathymétriques : 1000 m.

La côte à l'est du port commercial présente des hauteurs d'eau importantes. Cet effet est plus important à 2 km à l'est de l'entrée du port pour le modèle de Zachariasen et al. (1999) pour l'évènement de 1833 ainsi que pour le modèle de Sladen et Hébert (2008) pour l'évènement de 2004 (Figure 25). Les hauteurs d'eau maximales simulées atteignent 8 m pour 1833 et 4 m pour 2004.

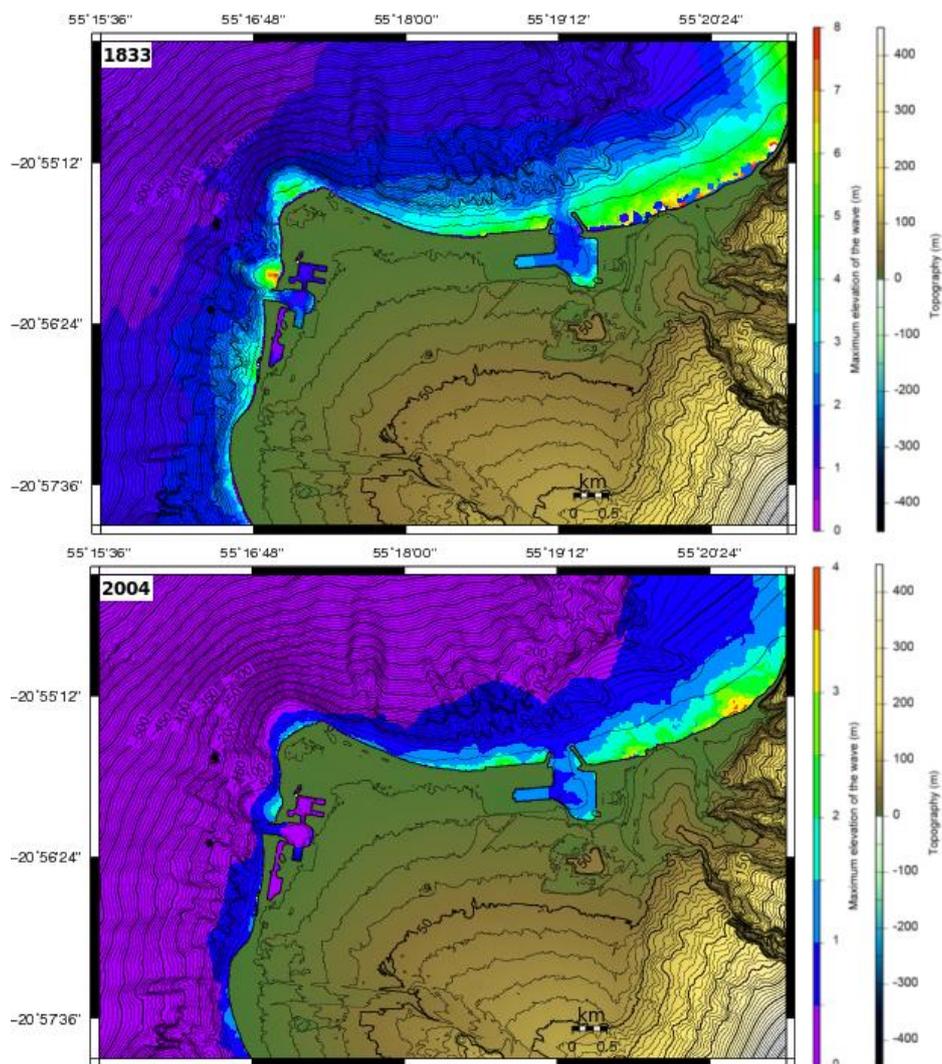


Figure 25 : Hauteurs d'eau maximales calculées au niveau de la localité du Port sur l'île de la Réunion pour l'évènement de 1833 (Zachariassen et al., 1999) et de 2004 (Sladen et Hébert, 2008). Amplification au niveau des hauts fonds : à l'est du port commercial.

Nos simulations montrent que les évènements de 1833, 1907, 2004, 2005 et 2010 ont provoqué des inondations sur les sites étudiés. L'inondation est visible le long des côtes est et ouest du port commercial et dans le sud de la ville de Saint Paul (Tableau 8). Les *runup* maximaux de nos simulations sont obtenus à Saint Paul à l'extrémité sud de la ville et dans le port commercial au fond du bassin (Tableau 8). Les évènements de 2006 et 2007 engendrent des inondations très faibles (< 50 cm de *runup*) qui se limitent aux plages. Pour les évènements de 2004, 2005 et 2010 les inondations sont faibles au niveau de la ville de Saint Paul (= 2 m de *runup*) car un cordon littoral de plus de 4 m d'altitude protège la ville. Seuls les tsunamis initiés par les évènements de 1833 et 1907 impliquent des vagues suffisamment importantes pour le franchir.

Evènement	Saint Paul			Le port commercial			Le port ouest
	R (m)	D (m)	H (m)	R (m)	D (m)	H (m)	H (m)
24/11/1833	7	600	8	6	50	5	6
04/01/1907	4	120	2.5	3	25	1.7	2.2
26/12/2004	2	50	1.5	2	20	1.2	2

28/03/2005	2	25	20 cm	2	20	1	1.1
17/07/2006	1	10	20 cm	1	20	30 cm	20 cm
12/09/2007	1	10	10 cm	2	20	1	50 cm
25/10/2010	2	25	1	3	20	1.5	1.6

Tableau 8 : Effets à la côte simulés. R le *Runup* max., D la distance max atteinte dans les terres et H la hauteur max. du niveau d'eau au rivage. Pour l'évènement de 1833, nous avons choisi le modèle de Zachariasen et al. (1999); Evènement de 2004: modèle de Sladen et Hébert (2008); Evènement de 2010 : modèle du CEA.

Nos simulations suggèrent que le tsunami tel que celui initié par le séisme du 24 Novembre 1833 inonderait les sites de Saint Paul, le port de la Pointe des Galets et le port commercial. On obtient des *runup* de 7 m pour Saint Paul, et 6 m pour le port commercial. A Saint Paul, les distances d'inondation sont importantes, jusqu'à 600 m au sud (Figure 26). (Les hauteurs maximales présentées sont des valeurs où la topographie y est retranchée. Toutes les figures suivantes de hauteurs maximales sont présentées de la même façon). Le sud de Saint Paul ainsi que l'estuaire sont fortement touchés par l'inondation. La côte à l'est du port commercial est également inondée avec un *runup* calculé de l'ordre de 5 m pour la grille 08. La côte ouest du port commercial est aussi soumise à de fortes hauteurs d'eau mais l'inondation est plus faible et ne dépasse pas environ 2 m de *runup*. Les fonds des bassins de ce port sont également inondés mais l'inondation est inférieure à 2 m de *runup*. Les hauteurs maximales observées pour le port de la Pointe des Galets sont de l'ordre de 10 m sur la côte nord et de 2 m sur la côte sud. La topographie est faible sur ces côtes ce qui implique de l'inondation sur les berges.

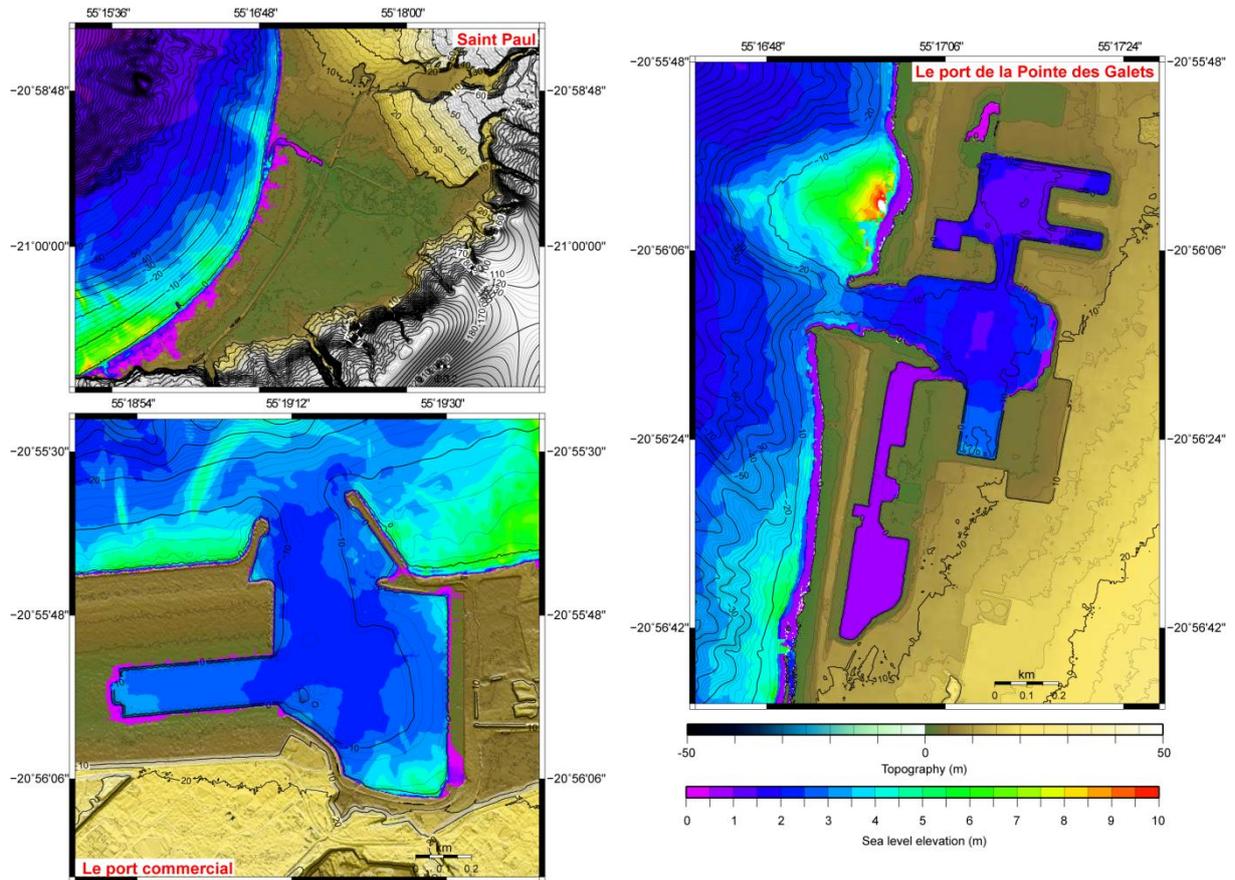


Figure 26 : Hauteurs d'eau maximales calculées dans les 3 sites d'études de La Réunion pour le modèle de Zachariassen et al. (1999) pour l'évènement du 24 Novembre 1833. Seuls les sites de Saint Paul et du port commercial sont simulés avec le calcul de l'inondation. Les hauteurs maximales présentées sont des valeurs où la topographie y est retranchée.

Les zones à fortes hauteurs d'eau sont également les zones où les vitesses sont les plus fortes (Figure 27). Les valeurs maximales simulées le long des côtes sont de l'ordre de 10 m.s^{-1} jusqu'à 15 m.s^{-1} dans le sud de la ville de Saint Paul. Nous pouvons également mettre en évidence l'effet dû aux entrées étroites des ports.

Les vitesses à l'entrée du port commercial montrent des effets liés aux digues qui canalisent le courant. Les vitesses maximales simulées sont plus fortes (environ 6 m.s^{-1}) que dans le bassin principal (environ 2 m.s^{-1}) (Figure 27). Les vitesses sont également plus fortes aux entrées des bassins (3 à 4 m.s^{-1}) que dans le reste des bassins (1 à 2 m.s^{-1}). Dans le port de la Pointe des Galets, les vitesses sont plus importantes (4 m.s^{-1}) à l'entrée des bassins que dans le reste des bassins (1 à 2 m.s^{-1}). Les vitesses montrent une rotation des courants dans le bassin nord.

L'inondation des berges des côtes nord et sud est renforcée par les vitesses maximales calculées en ces lieux qui sont de l'ordre de 6 m.s^{-1} .

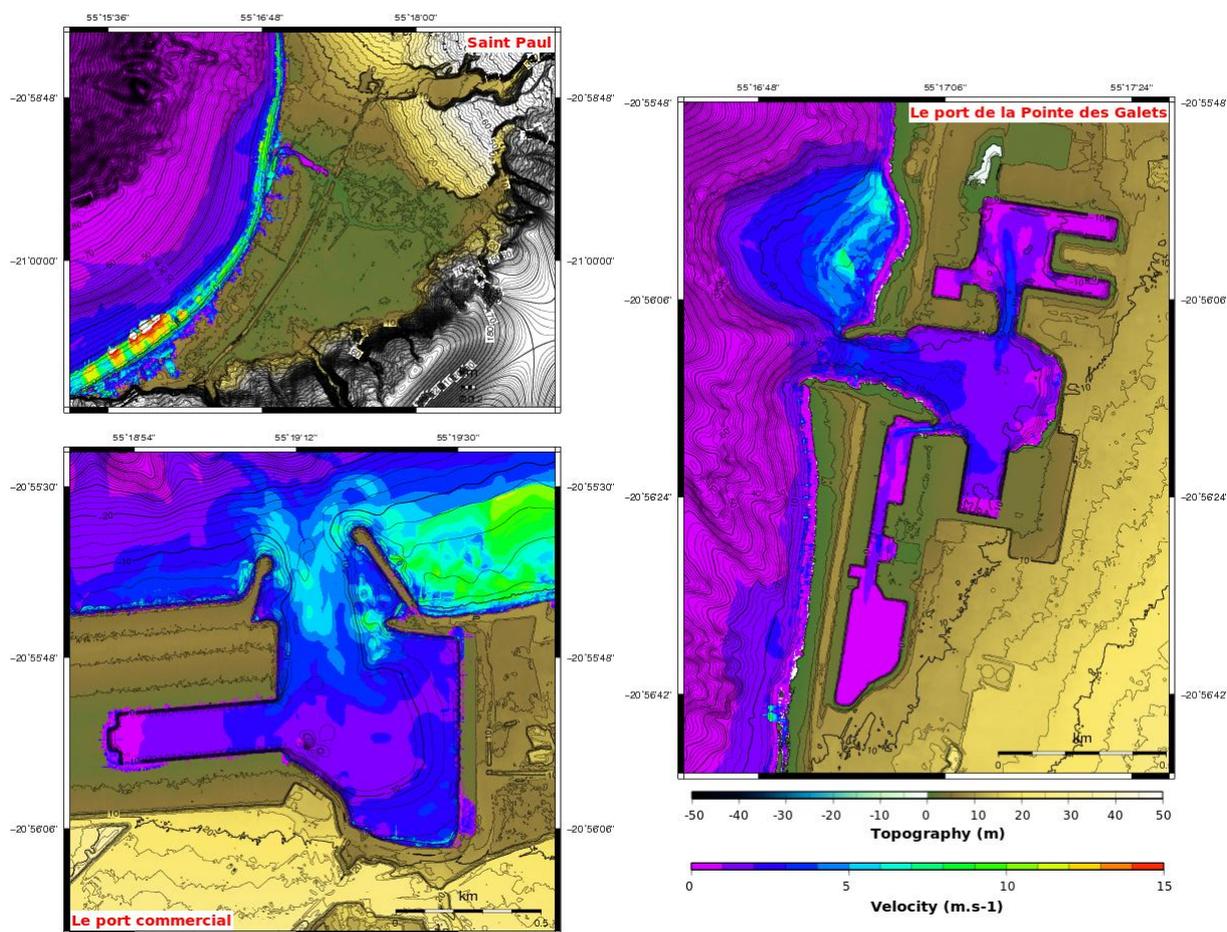


Figure 27 : Vitesses maximales calculées au niveau des 3 sites de La Réunion pour le modèle de Zachariassen et al. (1999) pour l'évènement du 24 Novembre 1833. Seuls les sites de Saint Paul et du port commercial sont simulés avec le calcul de l'inondation.

Impact à Saint Paul

Nous avons pu mettre en évidence que la ville de Saint Paul est très sensible à l'inondation. La ville de Saint Paul est étendue entre le front de mer et la Route Nationale 1 (distance d'environ 600 m) et entre les falaises au sud et la Ravine Bernica au nord (étang de Saint Paul). Au nord de l'étang se situe une zone industrielle. Le front de mer est constitué des plages et d'un cordon littoral de 4 mètres d'altitude. Le modèle de sources testé pour le tsunami de 1833 provoque une inondation d'une grande partie de la ville entre la côte et la route nationale 1 en particulier les quartiers situés au sud de la ville jusqu'à la digue présente sur le front de mer. L'embouchure de la Ravine Bernica est également inondée (Figure 28).

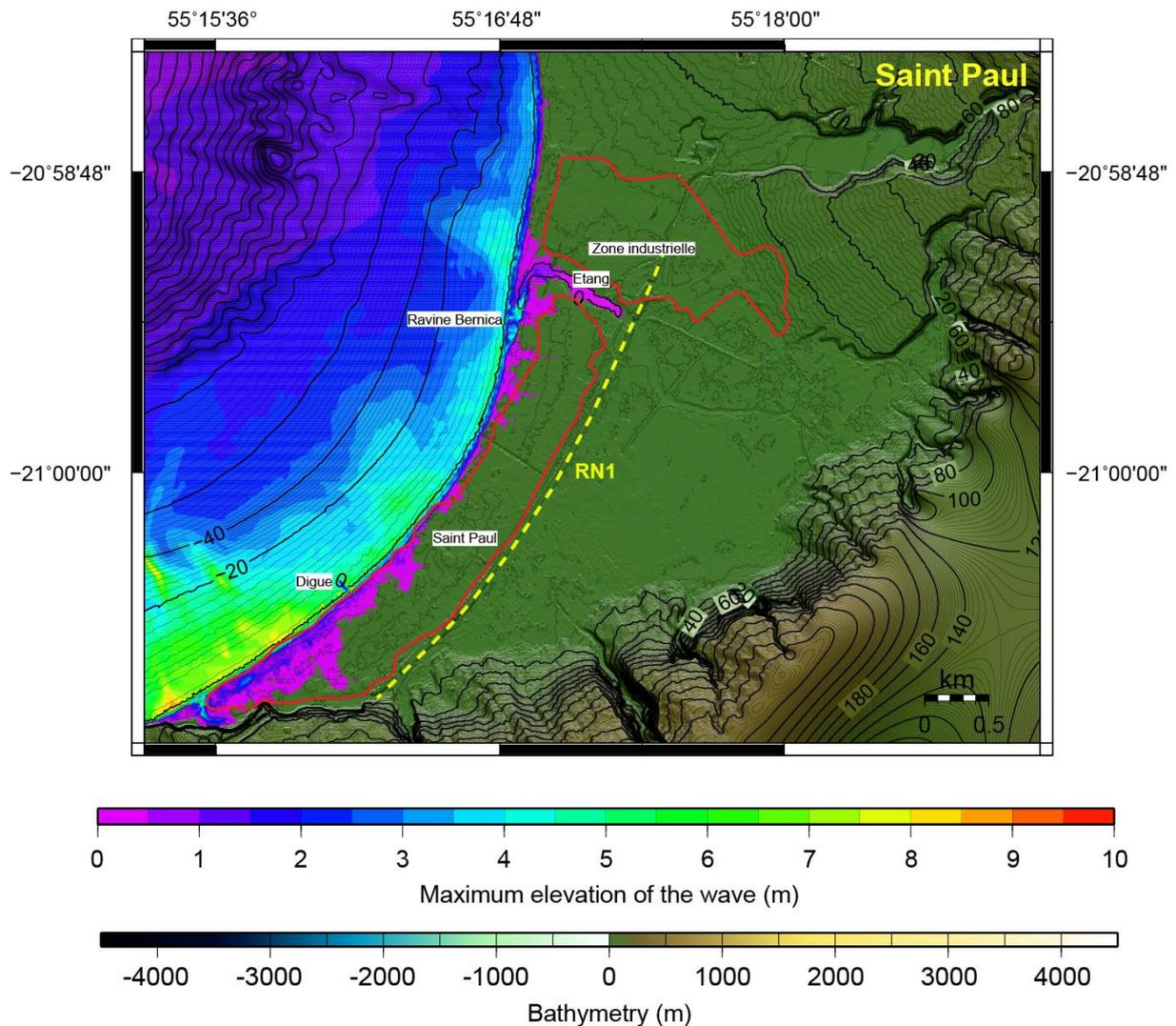


Figure 28 : Extension calculée de l'inondation sur la ville de Saint Paul pour l'évènement du 24 Novembre 1833. Le trait rouge correspond à l'extension actuelle de la ville de Saint Paul.

Impact au port de la Pointe des Galets

Le port de la Pointe des Galets est constitué d'une entrée étroite et de 3 bassins intérieurs. La Figure 29 des vitesses max. montre dans le bassin nord, un phénomène tourbillonnaire qui se développe.

Impact au port commercial

Les vitesses enregistrées dans le port commercial sont comprises entre 0.1 et 2 m.s-1 (Figure 29). L'observation des ruptures des amarres du MSC Uruguay deux fois de suite lors du tsunami qui a touché l'île de la Réunion le 26 Décembre 2004 est compatible avec les vitesses calculées. Le porte-conteneur a été soumis à de fortes tensions liées aux courants. Les vitesses sont de l'ordre de 0.8

m.s-1 et sont orientées vers l'extérieur du bassin au moment de la rupture des amarres (modèle de Sladen et Hébert (2008)).

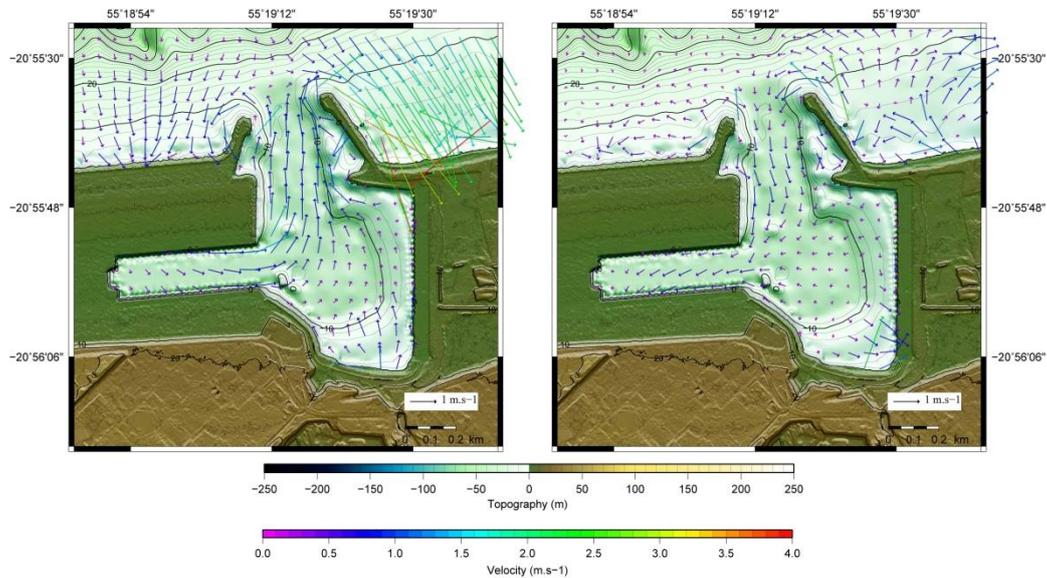


Figure 29 : Vitesses calculées dans le port commercial pour le modèle de Sladen et Hébert (2008) pour l'évènement du 26 Décembre 2004.

Dans le cas du modèle de Zachariassen et al. (1999) pour l'évènement de 1833, les vitesses dans le port sont plus importantes que pour le modèle de 2004. Elles sont comprises entre 0.5 et 1.5 m.s^{-1} dans le bassin principal. Un tourbillon se met en place dans le fond du bassin principal (Figure 30). Ce tourbillon a toujours un sens de rotation horaire, il se déplace dans le bassin principal au cours du temps. Nous ne voyons pas ce tourbillon se mettre en place pour nos modèles de 1907, 2004, 2005 et 2010; les vitesses ne sont pas assez importantes (limitées à 0.5 m.s^{-1}).

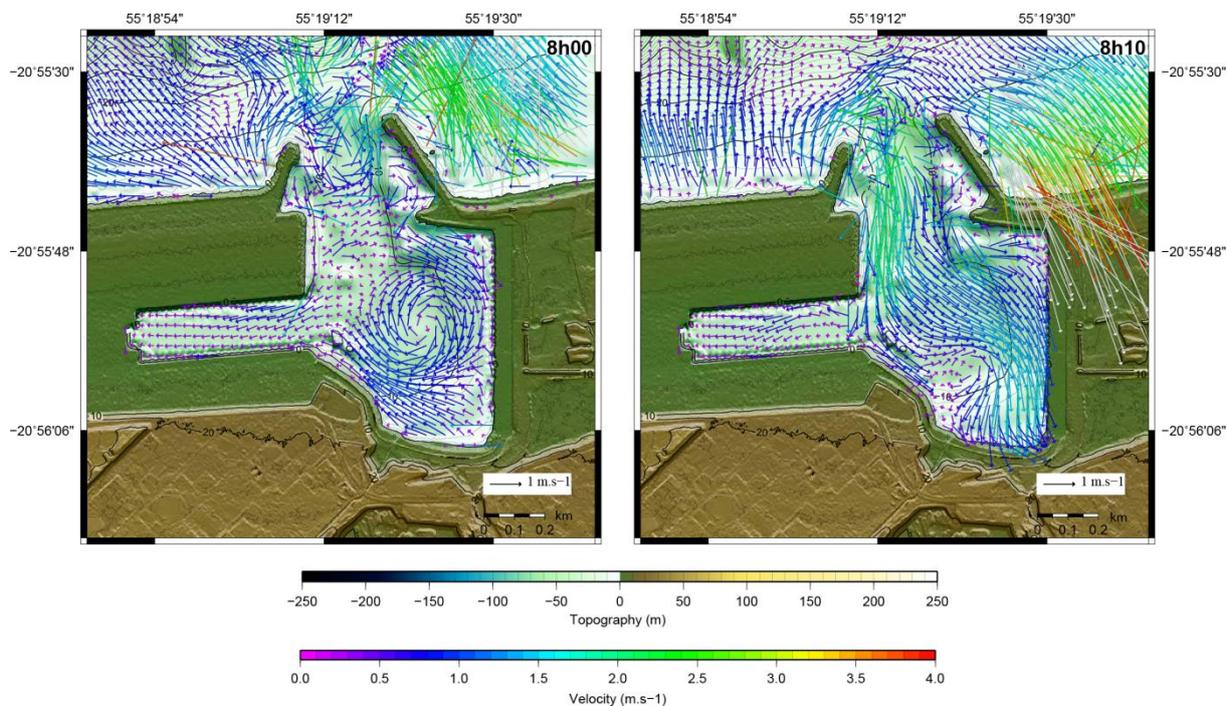


Figure 30 : Vitesses calculées dans le port commercial pour le modèle de Zachariasen et al. (1999) pour l'évènement du 24 Novembre 1833.

1.3.2.2.2 Impact sur l'île de Mayotte

Les modèles testés pour les évènements de 1833, 1907 et 2004 ont créé des tsunamis assez puissants pour atteindre l'île de Mayotte. L'île est touchée par le nord-est puis la vague enroule l'île jusqu'au sud-ouest. Les parties nord-est et sud de l'île sont celles où les hauteurs maximales sont les plus importantes : entre 0.5 et 0.8 m pour le modèle de 2004 (Figure 31) et entre 1 et 1.5 m pour le modèle de 1833 (Figure 32). Nos simulations montrent de fortes hauteurs d'eau au nord-est de l'île au delà du récif qui bloque une bonne partie de l'énergie du tsunami et présente donc un rôle protecteur pour les terres en arrière de lui. On peut noter de fortes hauteurs d'eau dans les baies du sud-ouest de l'île (Bouéni, Mzouazia) et dans les anses au sud-est de l'île. Au nord, l'île de Chissioua Mtsamboro enregistre les plus fortes hauteurs d'eau jusqu'à 1.5 m pour le modèle de 1833. A l'est de Petite Terre, les hauteurs d'eau sont supérieures au mètre. A l'ouest de Petite Terre et au niveau de la ville de Mamoudzou, les hauteurs d'eau sont faibles (Tableau 9). Les valeurs de *runup* maximales sont enregistrées dans l'anse de Majicavo 1, sur la côte au sud de Mamoudzou et sur la côte nord-est et sud-est de Petite Terre.

Ces données d'inondations et de hauteurs maximales calculées sont à relativiser en raison de la résolution de notre dernière grille qui est de 15 m comparée à celle de Saint Paul à La Réunion qui est de 4.63 m. Cela implique pour nos résultats que les valeurs d'inondations et de hauteurs maximales sont à prendre comme des ordres de grandeur. Nous pourrions donc conclure sur les zones à risques mais pas sur l'extension précise du risque sur ces zones.

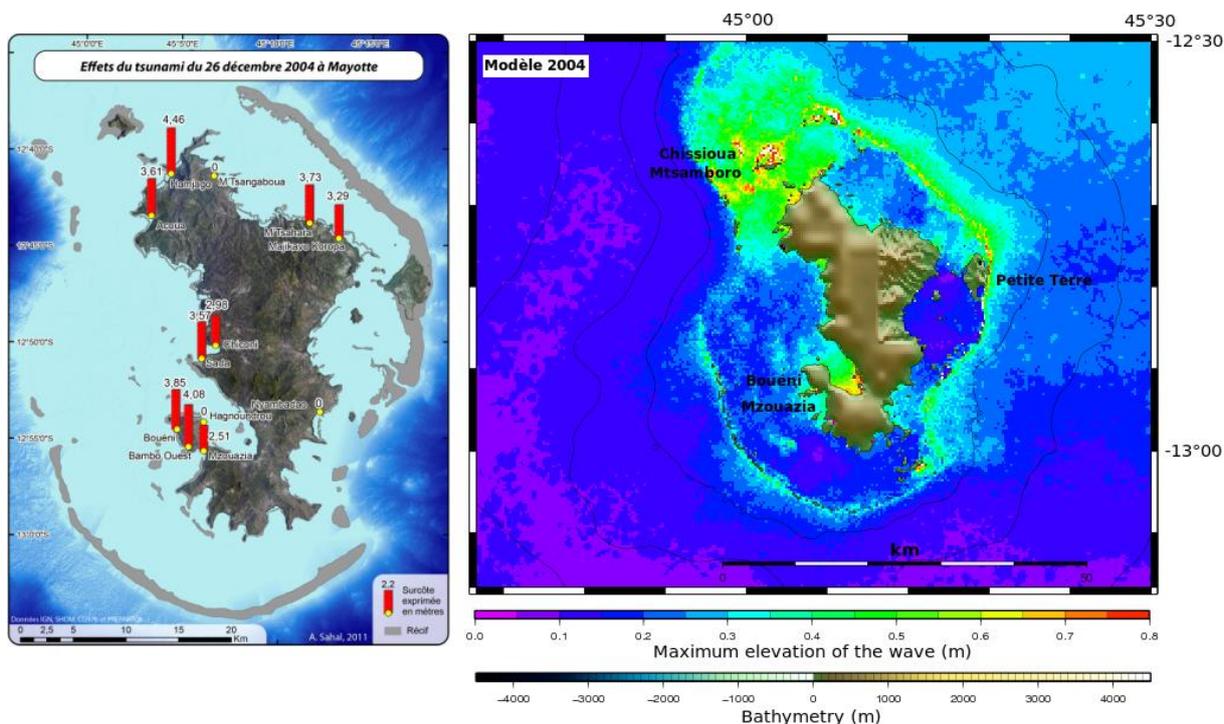


Figure 31 : Hauteurs maximales obtenues pour l'île de Mayotte pour le modèle de Sladen et Hébert (2008) pour l'évènement du 26 Décembre 2004. Comparaison avec les observations carte extraite de Sahal (2011).

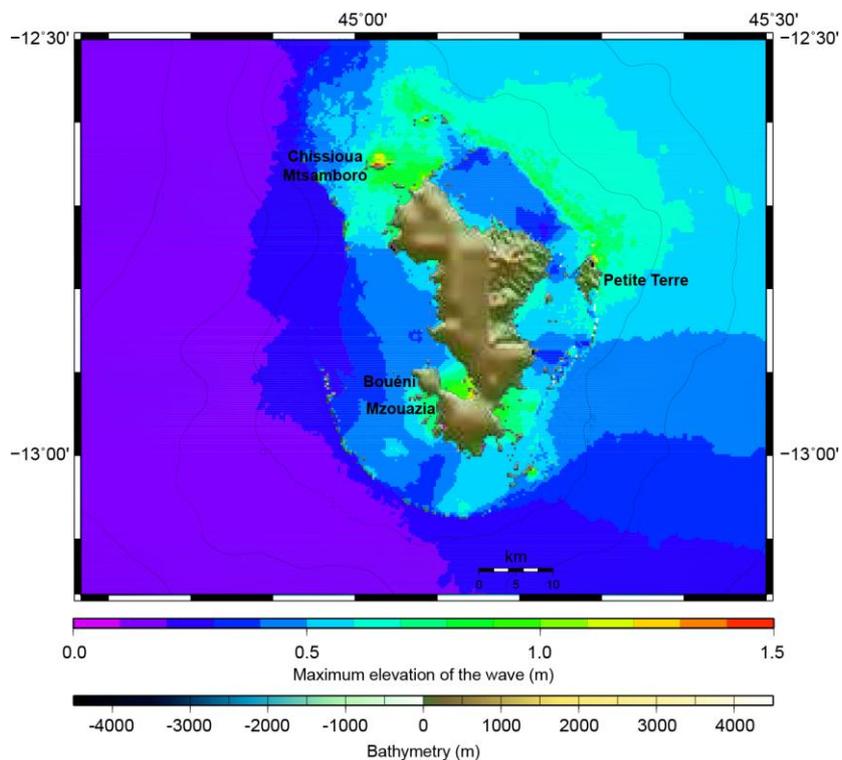


Figure 32 : Hauteurs maximales calculées pour l'île de Mayotte pour le modèle de Zachariasen et al. (1999) pour l'évènement du 24 Novembre 1833.

Evènement	Majicavo 1			Mamoudzou			Petite Terre nord			Petite Terre sud		
	R (m)	D (m)	H (m)	R	D	H	R	D	H	R	D	H
24/11/1833	2	150	0.8	2	100	0.8	2	150	1.3	2	150	1
26/12/2004	2	150	0.7	1	50	0.2	1	100	0.2	1	100	0.2

Tableau 9 : Effets à la côte simulés. R le *Runup* max., D la distance max atteinte dans les terres et H la hauteur max; du niveau d'eau au rivage. Pour l'évènement de 1833, nous avons choisi le modèle de Zachariassen et al. (1999); Evènement de 2004: modèle de Sladen et Hébert (2008).

Parmi les sites d'étude, l'île de Petite Terre est donc la plus exposée. Le nord-est et le sud-est de l'île présentent des vagues de plus d'un mètre aux abords du rivage. Entre les deux îles, les hauteurs d'eau maximales sont faibles et ne dépassent pas 70 cm. Les plages au nord-est et au sud-est (en contrebas de l'aéroport) de Petite Terre sont inondées, au nord de Mamoudzou le long des côtes de Majicavo 1 et au sud de Mamoudzou (Figure 33).

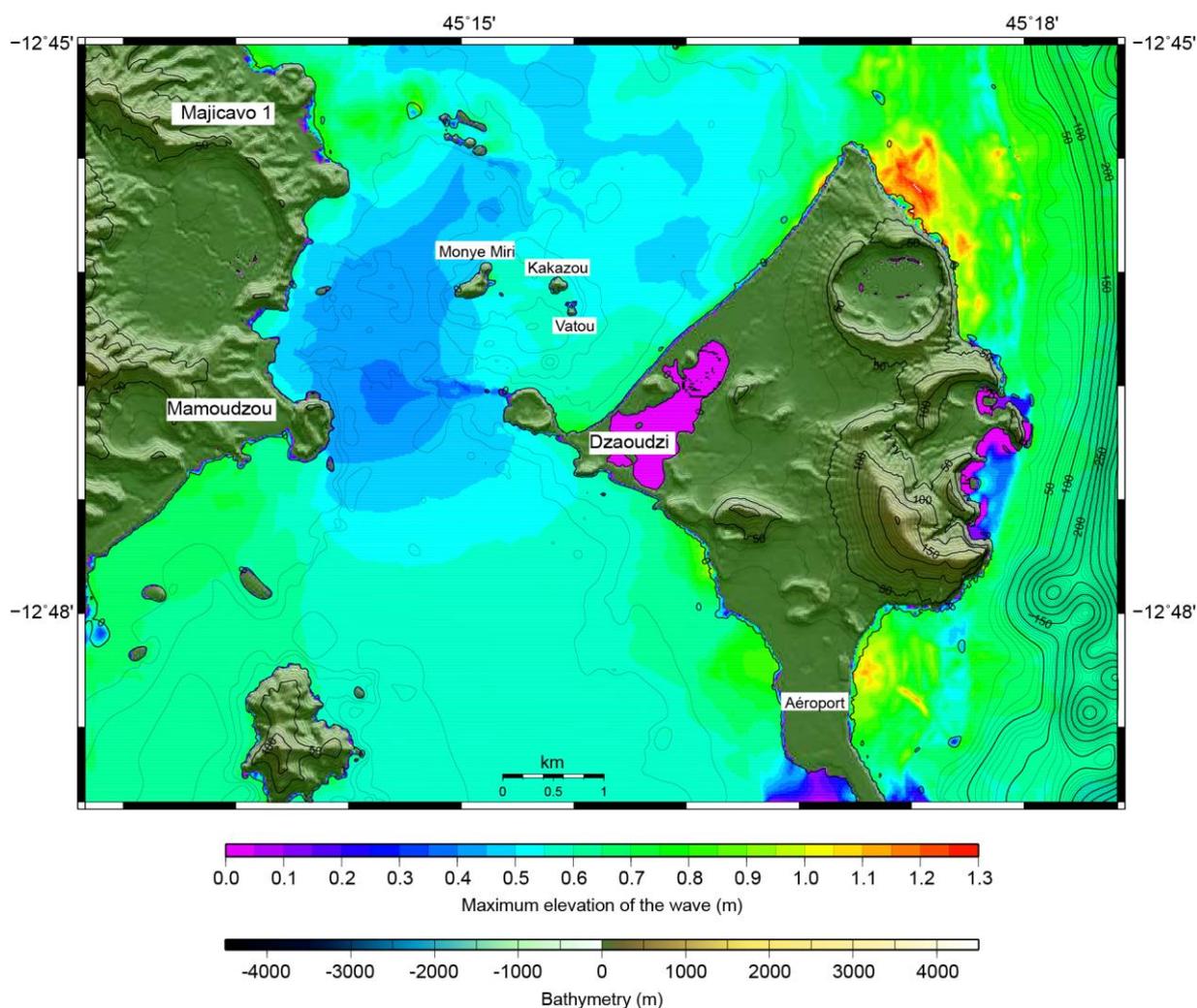


Figure 33 : Hauteurs maximales calculées pour les sites de Mayotte pour le modèle de Zachariassen et al. (1999) pour l'évènement du 24 Novembre 1833.

La ville de Mamoudzou ainsi que l'aéroport se situent suffisamment en hauteur et ne sont pas soumis à l'inondation. Les données de la simulation pour l'évènement de 2004 donnent des hauteurs

maximales au niveau du récif à l'est et sur le nord-ouest de Petite Terre. Les zones d'inondation sont les mêmes que pour l'évènement de 1833 (Figure 34) sauf pour la côte sud de Mamoudzou qui ne semble pas montrer de signe d'inondation.

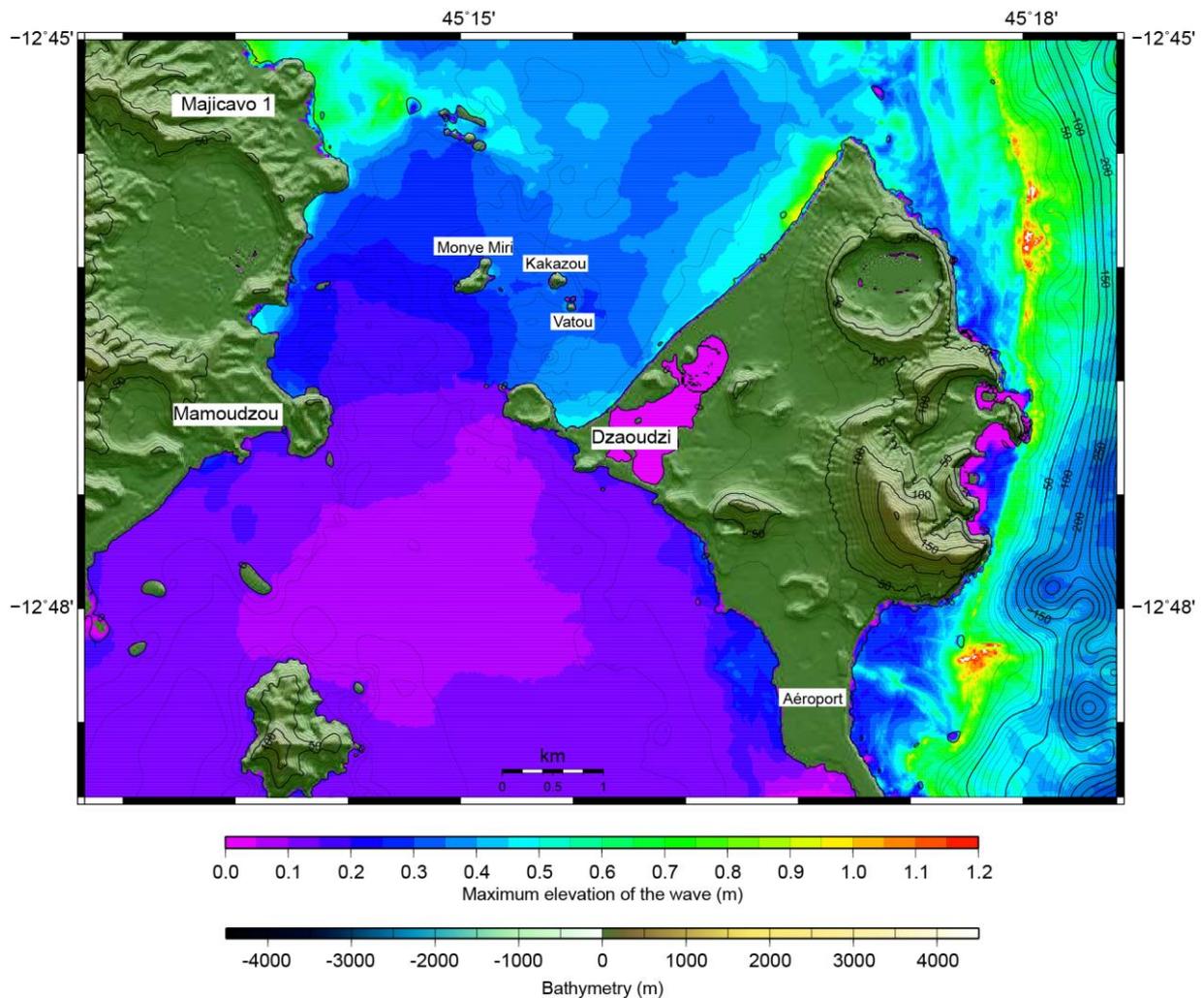


Figure 34 : Hauteurs maximales calculées pour les sites de Mayotte pour le modèle de Sladen et Hébert (2008) pour l'évènement du 26 Décembre 2004.

Les vitesses maximales (Figure 35) se situent le long du récif, autour de Petite Terre et au large des côtes de Majicavo 1 (entre 2 et 6 m.s-1). Les vitesses sont plus importantes entre les îles au nord de Dzaoudzi (îles Monye Amiri, Kakazou et Vatou) et au large de la Pointe de Dzaoudzi (2 à 3 m.s-1) que dans le reste du lagon (0.1 m.s-1).

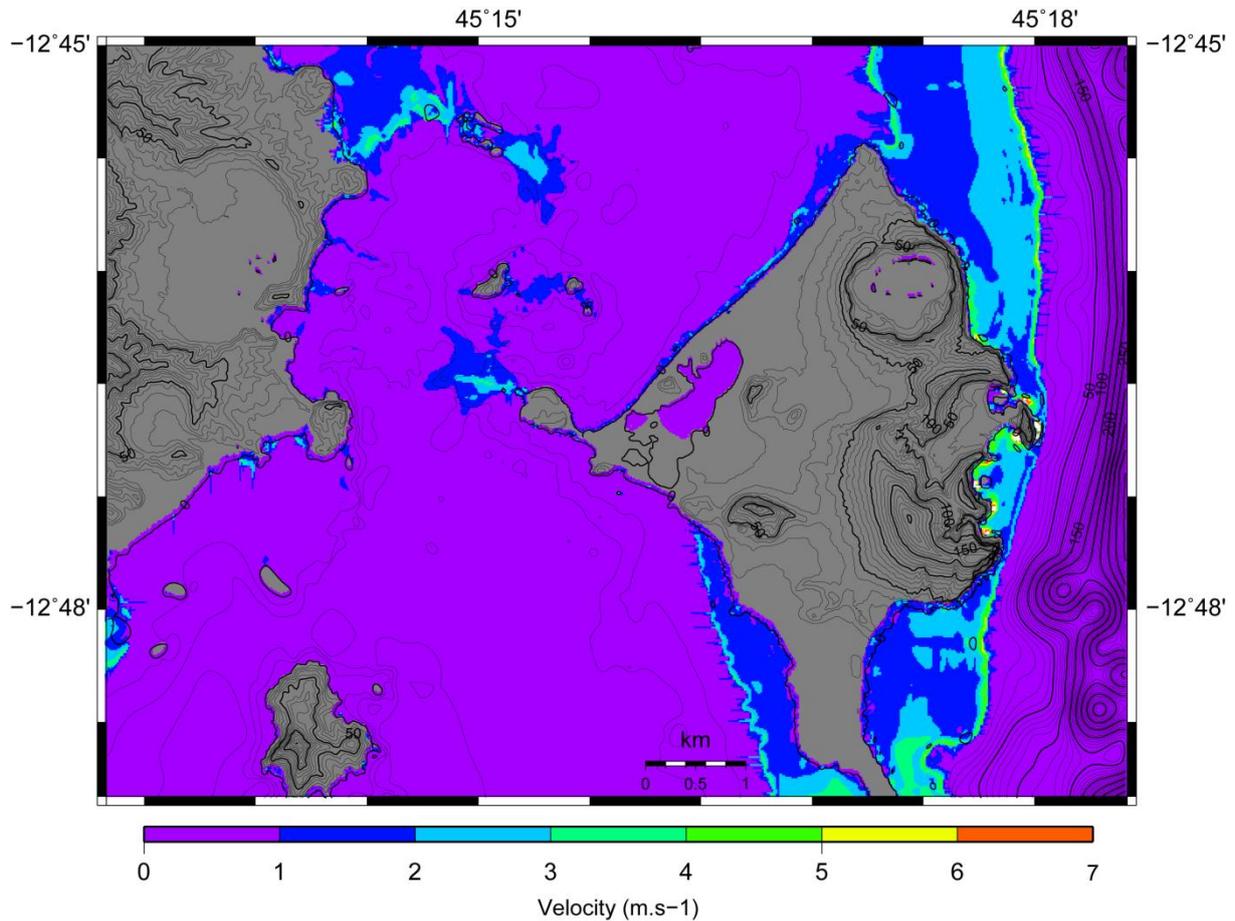


Figure 35 : Vitesses maximales calculées pour les sites de Mayotte pour le modèle de Zachariassen et al. (1999) pour l'évènement du 24 Novembre 1833.

Le courant contourne les petites îles au nord de Dzaoudzi et est amplifié à leur passage (Figure 36) pour nos modèles de 2004 et 1833. Les vitesses du lagon sont de l'ordre de 0.1 m.s-1 alors qu'autour des îles, elles sont de l'ordre de 0.5 m.s-1 à 1 m.s-1. Entre la Pointe de Dzaoudzi et les îles, nous pouvons voir le courant changer de direction. Quand il a une direction est, les vitesses sont plus faibles (0.3 m.s-1) alors qu'elles sont de plus de 1.5 m.s-1 quand il se dirige vers l'ouest. Les fortes vitesses sont directement liées à la directivité du courant.

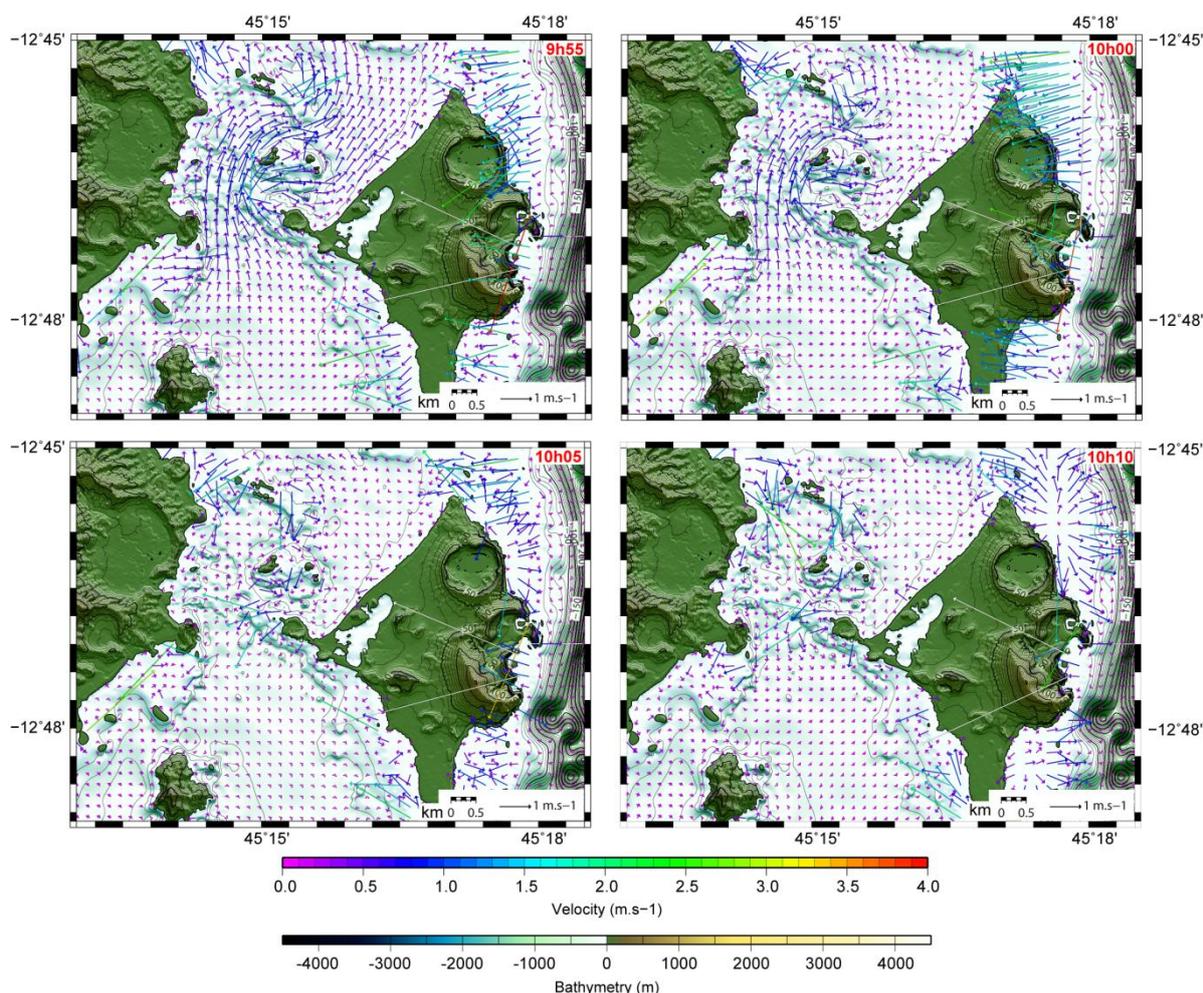


Figure 36 : Vitesses simulées sur les sites de Petite Terre et de Mamoudzou au niveau de l'île de Mayotte (modèle de Zachariassen et al. (1999)). Il s'agit de 4 instants à 5 minutes d'intervalles après 9h55 de propagation du tsunami.

1.3.3 Conclusion

Les simulations ont permis de mettre en évidence les modèles de sources pour les événements historiques des zones de subduction de Sumatra, de Java et du Makran qui provoquent un tsunami ayant engendré des inondations sur les sites de La Réunion et de Mayotte. Ces événements historiques sont ceux de 1833, 1907, 2004, et 2010. Les modèles de sources testés pour les séismes ayant eu lieu au niveau des subductions de Java et du Makran, n'ont pas généré de tsunami assez puissant pour atteindre et inonder les îles étudiées. Grâce à ces simulations, nous pouvons mettre en avant les sites les plus exposés en termes d'inondation.

C'est à l'ouest de l'île de La Réunion que les deux fronts du tsunami qui s'enroulent autour de l'île, se rejoignent. La Pointe de Saint Gilles est l'endroit de réunification des deux fronts ce qui provoque une augmentation de l'amplitude du tsunami. Ces simulations montrent une hauteur des vagues plus fortes à l'ouest de l'île. Nos simulations sont cohérentes avec les observations qui ont permis

d'enregistrer des valeurs de *runup* de 2.44 m à Saint Gilles et 2.7 m au port de la Pointe des Galets lors de l'évènement de 2004 (Okal et al., 2006).

A l'aide de nos simulations nous pouvons déterminer les zones inondables. Pour la ville de Saint Paul, les plages et l'embouchure de la Ravine Bernica sont systématiquement inondées. Lors d'un fort tsunami simulé (ici le modèle du 24/11/1833 de Zachariassen et al. (1999), les quartiers sud de la ville de Saint Paul sont inondés ainsi que le front de mer au niveau de la digue car la hauteur d'eau est supérieure à la hauteur du cordon littoral. La côte est du port commercial est inondée dans toutes nos simulations. Nous notons une inondation du rivage jusqu'à une distance de 50 m ce qui correspond à une zone inhabitée.

Les tsunamis qui atteignent Mayotte arrivent par le nord-est. Les hauteurs maximales enregistrées autour de l'île se situent au nord et au sud de l'île et au nord-est le long du récif. La côte est de l'île est protégée par ce récif ainsi que la côte ouest qui empêche les vagues d'atteindre les côtes. La côte est de l'île, Mamoudzou et Petite Terre sont protégés. Les inondations se limitent aux plages et à la mangrove qui occupe la plupart des baies de Mayotte. Les hauteurs maximales calculées sont de 50 cm à 1 m pour l'évènement de 1833 et de 50 à 80 cm pour l'évènement de 2004. Ces résultats vont donc dans le sens des observations faites lors de l'évènement de 2004 qui ont permis d'enregistrer des inondations au niveau des anses au Sud entre 2.5 et 4 m de *runup*. Le rivage proche de la ville de Majicavo 1 montre également de l'inondation assez importante mais cette inondation se fait au niveau d'une mangrove et n'atteint donc pas le rivage proprement dit.

Chapitre 2e. Diagnostic territorial des enjeux et vulnérabilités

2.1 Exposition humaine à l'aléa (LGP-GRED)

2.1.1 Méthode

2.1.1.1 Évaluation des enjeux structurels (bâtiments) et de leur vulnérabilité

L'événement de décembre 2004 a été l'occasion de nombreux RETEX sur les dégâts structurels occasionnés par ce tsunami de forte intensité : l'étendue des dégâts a permis de développer de nombreuses approches visant à évaluer la résistance de structures bâties face à cet aléa. Il s'agit dès lors de comparer la résistance de bâtiments en fonction de leurs caractéristiques structurelles.

Leone *et al.* (2011; 2011; 2011) ont développé une échelle de destruction propre à l'aléa tsunami, une échelle dite « macro-tsunami », fondée sur des méthodes employées dans le cas de cyclones (Stewart, 2003), d'ouragans (Friedland *et al.*, 2008), de séismes (Combesure *et al.*, 2005) ou de crises volcaniques (Spence *et al.*, 2005). Cette échelle de destruction a permis dans le cadre du programme TSUNARISQUE⁴ d'établir une typologie des bâtiments en fonction de leur vulnérabilité structurelle, dépendante de la qualité architecturale et des matériaux utilisés pour leur construction (Figure 37).

Building classification by decreasing vulnerability.

	Vulnerability class of buildings (tsunami – Banda Aceh)					
	A	B	C	D	E	
Identification criteria on the field	Individual building with wood structure, completion of wood or bricks, roof of red tiles or raw sheet steels, no floor, sometimes on piles	Individual building with concrete structure hardly strengthened (20 cm posts * 20 cm), masonry of bricks or rubble stones, 0 in 1 floor, roof of raw or painted sheet steel, or red or grey panels-tiles	Individual building with structure strengthened by concrete, masonry of bricks, rubble stones or concrete, 1 floor, roof of red, blue, grey or green panels-tiles or red tiles	Collective building with concrete structure not strengthened, 1 in 3 floors, cover of sheet steels or panels-tiles	Collective building with concrete structure strengthened, 1 in 3 or more floors, various roofs	
Field view						
Identification criterion by aerial photographs	Geometry in simple plan (rectangle or square). Flat, rusty roofs. Small dimension	Geometry in simple plan (rectangle or square). Flat roofs rarely rusty and more often of grey or red uniform color. Small or mean dimension	Geometry in more complex plan. Several levels of roofs. Oblique roofs with lively colors. Mean or big dimension	Geometry in simple plan (rectangle). Flat or oblique, rusty roofs mostly. Big dimension	Geometry in more or less simple plan. Various terraces or roofs. Great dimension.	Mosques present a simple geometry (square) with a flat or four sides roof surmounted by a dome
Aerial view (different scales)				 scale reduction by 1/8	 scale reduction by 2	

Figure 37. Typologie de la vulnérabilité structurelle du bâti proposée par Leone *et al.* à Banda Aceh, Indonésie.

⁴ <http://www.tsunarisque.cnrs.fr/>

Source : extrait de Leone *et al.* (2011).

Cette typologie permet une analyse *a priori* des dommages selon une approche spatiale et quantitative des destructions potentielles. Cette méthode est par conséquent adoptée dans le cadre de l'évaluation des dommages structurels potentiels sur les territoires français étudiés dans la mesure où elle est spécifiquement adaptée au risque tsunami et où elle est, d'après ses auteurs, facilement transposable aux territoires français.

D'autres approches existent par ailleurs. Certains auteurs, comme Miura *et al.* (2006), ont développé une approche de quantification des dégâts occasionnés par le tsunami de décembre 2004 basée sur l'échelle macrosismique européenne (EMS) en l'appliquant au Sri Lanka. Cette approche n'est donc pas spécifique au cas des tsunamis, aléas dont les contraintes sur les structures bâties sont bien différentes des séismes (Frédéric Leone, Franck Lavigne, *et al.*, 2011).

2.1.1.2 *L'approche combinée : vulnérabilité physique des bâtiments et pertes humaines associées, et prise en compte des dynamiques spatio-temporelles*

Leone *et al.* (2011; 2011; 2011) ont mis au point une méthode basée sur deux étapes : (1) l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments, validée sur le terrain à Banda Aceh suite au tsunami de décembre 2004, et (2) l'évaluation de la répartition spatiale des individus au cours de la journée en intérieur comme en extérieur. Cette évaluation dynamique qui tient compte des activités d'un espace urbain fournit une cartographie horaire de la densité de population à un maillage très fin (50 à 100 m). Cette méthode fait ainsi le lien avec le vécu et les observations tirées du tsunami de décembre 2004 à Banda Aceh. Cette approche est ici retenue, sous réserve d'une adaptation au concept de scénario de risque.

D'autres approches existent pour l'évaluation des vulnérabilités d'un territoire face au risque tsunami. Papathoma et Dominey-Howes (Dominey-Howes *et al.*, 2009; Dominey-Howes & Papathoma, 2006; Papathoma & Dominey-Howes, 2003; Papathoma *et al.*, 2003), par exemple, conjuguent la résistance d'un bâtiment avec le nombre de personnes qu'il accueille à un instant précis. Cette méthode par pondération de facteurs ne vise pas spécifiquement les enjeux humains, et ne considère pas ceux présents hors des bâtiments contrairement à celle de Leone *et al.* (2011; 2011). Sugimoto *et al.* (2003) proposent quant à eux une évaluation des pertes humaines consécutives à des tsunamis en tenant compte des évacuations mais se basant uniquement sur une distribution homogène des populations dans leurs foyers. L'ensemble des activités de la ville sur laquelle la méthode est appliquée n'est pas pris en compte, bien que ces activités influent fortement sur la répartition spatiale des enjeux humains.

On distingue ainsi différentes méthodes et échelles de modélisation des pertes humaines : (1) les modèles basés sur la télédétection, sans validation de terrain (Strunz *et al.*, 2011) ; (2) les modèles « semi-validés », basés sur un échantillonnage et une extrapolation de la localisation des individus sur un territoire (Sugimoto *et al.*, 2003) ; enfin (3) les modèles « terrain » tenant compte de la localisation de l'ensemble des enjeux humains et des caractéristiques propres à chaque espace (Frédéric Leone, Franck Lavigne, *et al.*, 2011; 2011), modèle qui est suivi et adapté dans cette thèse.

2.1.1.3 *Adaptation de la méthode de Leone et al. à des scénarios d'enjeux dans des contextes locaux spécifiques*

Ainsi, Leone *et al.* (2011; 2011) s'intéressent à une quantification des enjeux humains face au risque tsunami basée sur la répartition spatio-temporelle des individus exposés à l'échelle journalière et horaire. La méthode, précédemment initiée en 2009 à El Jadida (Maroc) (Frédéric Leone, Franck Lavigne, *et al.*, 2011) permet, par un fastidieux travail de terrain, de quantifier la répartition spatiale des individus présents dans une ville. Elle fournit une cartographie des enjeux humains pour un jour type et heure par heure, ainsi qu'une classification de la résistance des structures bâties. Une submersion marine est modélisée, et on étudie la capacité de survie des individus en fonction de la profondeur et de la vitesse du flux, aboutissant à une quantification des pertes humaines potentielles en fonction de l'heure de submersion par l'aléa. La répartition spatio-temporelle des individus dans une ville est le plus souvent rythmée par des activités spécifiques régulières (marché, événements réguliers) ou non (concerts, événements ponctuels) qui conditionnent et structurent la répartition spatiale des individus.

Il est ici proposé non pas de s'intéresser à une répartition horaire « typique » des individus, représentative de n'importe quel jour de l'année, mais de choisir plusieurs scénarios de répartitions « spécifiques », correspondant à des périodes rythmant la vie de la ville ou du quartier, tels que les heures et jours de marché, de prières, etc. Ainsi, dans chaque ville étudiée, un diagnostic est réalisé sur le terrain et auprès des autorités municipales afin de « saisir » ces événements déterminants de la répartition spatio-temporelle des individus. Ces événements particuliers mais répétitifs dans la vie de la ville constituent des scénarios de distribution spatiale des enjeux humains.

Trois scénarios sont ainsi choisis : un scénario nocturne (SC1), un scénario « jour ouvrable » (SC2) et un scénario « événement particulier » (SC3). Pour le scénario SC1 d'enjeux humains nocturnes, toutes les habitations ont un taux de remplissage égal à 1, c'est-à-dire que l'on considère que tous les résidents sont à leur domicile. À l'inverse, les autres bâtiments sont considérés comme vides, à l'exception des bâtiments occupés 24/24h, et pour lesquels l'effectif permanent est renseigné lors de l'enquête de terrain. Le scénario SC2 varie selon la localité mais décrit systématiquement un horaire

de forte activité en semaine, représentatif des jours ouvrés. Enfin, le scénario SC3, dit « événement particulier », varie également selon les localités et décrit un événement hebdomadaire influant particulièrement la répartition spatio-temporelle des individus dans l'agglomération.

On distingue la quantification des personnes présentes dans les immeubles de celles présentes en extérieur. On considère que les personnes présentes aux étages ne sont pas exposées dans la mesure où les territoires étudiés sont sujets à un aléa de faible amplitude à la côte et dont le *runup* n'excède pas 10 mètres d'altitude.

Concernant la quantification des personnes présentes dans les bâtiments, et plus particulièrement aux rez-de-chaussée, l'approche consiste à identifier le type d'utilisation des bâtiments afin d'en déduire des taux d'occupation horaires et journaliers. En effet, un bâtiment résidentiel, un bureau ou un poste de police présentent des courbes de fréquentation bien différentes au cours de la journée et de la semaine.

Une base de données cartographique est constituée pour décrire chaque bâtiment par son type d'affectation (Tableau 10, distinction des fonctions principales et secondaires des rez-de-chaussée et de celle des étages), sa surface au sol, sa surface utile (SU), etc. Un taux d'occupation (TX) est déterminé de manière empirique pour certains bâtiments, ou bien par le calcul suite à un échantillonnage, et est multiplié par la capacité d'accueil maximale crédible de chaque bâtiment (CAMC). Pour les bâtiments échantillonnés, on calcule une densité de population (D) qui sera propre à chaque bâtiment de même fonction. Pour les autres bâtiments, une quantification est faite à l'horaire correspondant à chaque scénario, voire de manière systématique pour chaque heure d'une journée. Cette quantification est alors propre à chaque bâtiment (par exemple pour les administrations, bureaux dont la CAMC n'est pas proportionnelle à la SU du bâtiment).

On a donc comme population (POP) pour un scénario « 1 » (SC1) :

$$POP_{SC1} = CAMC \times TX_{SC1}$$

Avec, pour les bâtiments dont la CAMC est déduite :

$$CAMC = SU \times D$$

La population présente dans chaque bâtiment est calculée.

Tableau 10. Typologie de la fonction des bâtiments et méthode de quantification de leur occupation.

Type	Description	Méthode de quantification
HINDIV	Habitat individuel	Densité calculée par (population îlot / surface totale habitable dans l'îlot), ou distribution par classe de bâtiment.
HCOL	Habitat collectif, immeuble	Densité calculée par (population îlot / surface totale habitable dans l'îlot), ou distribution par classe de bâtiment.
INAB	Habitat abandonné, inhabité	Vides.
ADMI_0	Service administratif ne recevant aucun public	Personnel permanent compté individuellement.
ADMI_1	Service administratif recevant du public	Personnel permanent compté individuellement + fréquentation propre à chaque bâtiment.
PCOM	Petit commerce, épicerie, marchand	Echantillonnage, comptage puis extrapolation. A Mayotte, 1 personnel + 6 clients, sauf nuit.
MOL	Grande surface, super marché, centre commercial	Echantillonnage, comptage puis extrapolation, ou comptage individuel si l'effectif est réduit.
BANK	Assurance, banque, service privé	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.
BAR	Café, bar, restaurant	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.
HOTEL	Hôtel	Personnel permanent compté + nombre de lits (lit double=2).
INDU	Locaux industriels, usine, entrepôt	Personnel permanent compté + fréquentation propre à chaque bâtiment.
ESSO	Station essence	3 salariés + 4 clients aux horaires d'ouverture.
HAN	Hangar	Vides.
CULT	Lieu de culte	Personnel permanent compté + fréquentation propre à chaque bâtiment.
SPORT	Bâtiment lié à un terrain de sport	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.
EDUC	Ecole, collège, lycée	Personnel permanent compté + fréquentation propre à chaque bâtiment.
LOISIR	Faré utilisé pour les rencontres, jardins publics, jeu de dominos à Mayotte...	Comptage individuel.
SANTE	Hôpitaux, centre médical	Personnel permanent compté + fréquentation propre à chaque bâtiment.
SECU	Caserne de pompier, poste de police, de sécurité, prison	Personnel permanent compté + fréquentation propre à chaque bâtiment.
ATTENTE	Espace attente embarcadère	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.
BATO	Bateau à quai (transport public)	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.
AERO	Bâtiment aéroportuaire	Personnel permanent compté + fréquentation propre à chaque bâtiment.
STAND	Stand de marché forain	1,2 personne par stand aux horaires de marché.

Afin de peupler l'habitat individuel et collectif, on calcule la surface habitée de chaque bâtiment (surface au sol x nombre de niveaux, soit surface au sol x (nombre d'étages + 1)). On divise ensuite la population de chaque îlot par sa surface habitée totale. On obtient ainsi une densité de population que l'on considèrera comme identique à l'habitat collectif et individuel. On se sert ensuite de cette densité pour calculer la population théorique présente dans chaque bâtiment. La méthode peut être adaptée en fonction des données disponibles. On distingue dans ce peuplement les RDC des étages. On renseigne ainsi le nombre de personnes en RDC et en étage pour chaque bâtiment habité.

Une typologie des surfaces de plein air a également été réalisée pour la quantification des personnes qui les occupent (Tableau 11).

Tableau 11. Typologie des espaces de plein air et méthode de peuplement.

Type	Description	Méthode de peuplement	
RP	Principal axe routier	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.	
RS	Axe routier secondaire	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.	
RM	Rue de marché	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.	
RC	Rue commerçante	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.	
RRC	Rue résidentielle et commerçante	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.	
RR	Rue résidentielle	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.	
TROT	Trottoir	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.	
PARK	Parking	Vides.	
COUR	Cour piétonne	Vides.	
JARDIN	Jardin privé (parcelles privées fermées)	Vides : on considère la population du bâtiment implanté.	
PLEIN AIR	ESPN	Espace de plein air végétalisé	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.
PLAGE	Plage	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.	
SPORT	Terrain de sport	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.	
RECRE	Récréation des établissements d'enseignement	Vides : on considère la population du bâtiment implanté.	
AIRJEU	Air de jeu pour enfants	Echantillonnage, comptage puis extrapolation.	
ACTI	Zone d'activité spécifique diurne	Vides : on considère la population du bâtiment implanté.	
TVAG	Terrain vague	Vides.	
ESTRAN	Estran	Vides.	
CIME	Cimetière	Vides.	

On aboutit ainsi à une quantification spatio-temporelle des enjeux humains dans les espaces bâtis et dans les espaces extérieurs.

2.1.1 Résistance des enjeux structurels face à l'aléa tsunami

Leone *et al.* (2011; 2011) ont évalué cette résistance du bâti en fonction de ses caractéristiques structurelles. Le rapport entre classes de bâti et hauteur de la submersion est présenté en Figure 38. Plus la structure est légère et moins elle résistera à un flux haut. Ainsi, les auteurs proposent des niveaux de dommage proportionnels à la qualité structurelle du bâtiment et à la hauteur du flux (Figure 39). Les auteurs proposent ainsi des seuils de destruction des bâtiments en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse du flux (Tableau 12), correspondant à la classe D5.

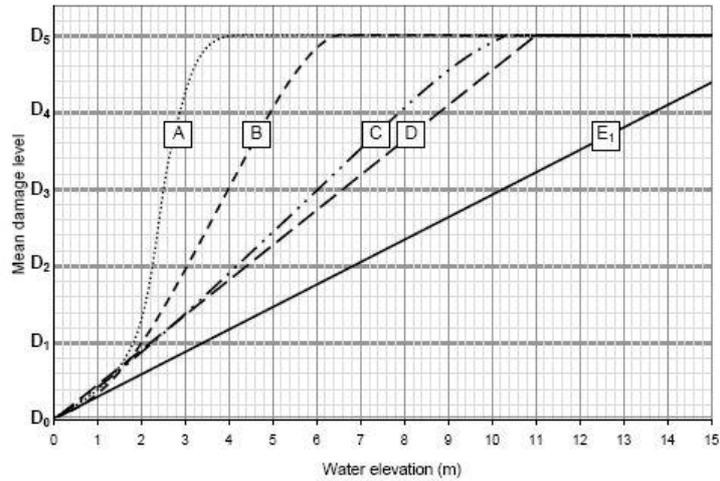


Figure 38. Corrélation entre niveau de dommage et hauteur d'eau en fonction de la classe structurelle du bâti (courbes de fragilité).

Source : extrait de Leone *et al.* (2011).

	D0	D1	D2
Critères d'identification terrain	Aucun dommage ou dommages imperceptibles un an après	Dommages négligeables à légers sans affectation des structures (meubles, abords et toitures abîmés, débris déposés dans les bâtiments)	Dommages importants mais sans affectation des structures (murs et cloisons défoncés ou perforés, fenêtres et portes arrachées, toitures partiellement arrachées)
Photo terrain			
Classe de bâti illustrée	A	C	C

	D3	D4	D5
Critères d'identification terrain	Dommages aux structures pouvant affecter la stabilité du bâtiment (fracturation des piliers, effondrement partiel des planchers)	Dommages lourds aux structures avec effondrement partiel du bâtiment	Destruction totale du bâtiment avec ou sans arasement
Photo terrain			
Classe de bâti illustrée	B	C	B

Figure 39. Niveaux de dommage des bâtiments.

Source : adapté de Gauraz *et al.* (2009).

Tableau 12. Seuils de destruction totale des bâtiments selon leur classe de vulnérabilité structurelle.

Source : adapté de Leone *et al.* (2011) et de Koshimura *et al.* (2009).

Classe	Hauteur d'eau (m)	Vitesse du flux (m/s)
A	3	2
B	6	2 à 3,5
C	10	3,5 à 4
D	11	4 à 6
E	> 11	> 6

À titre de comparaison, Koshimura *et al.* (2009) ont également établi une relation directe entre résistance des bâtiments et caractéristiques de l'aléa tsunami (Figure 40).

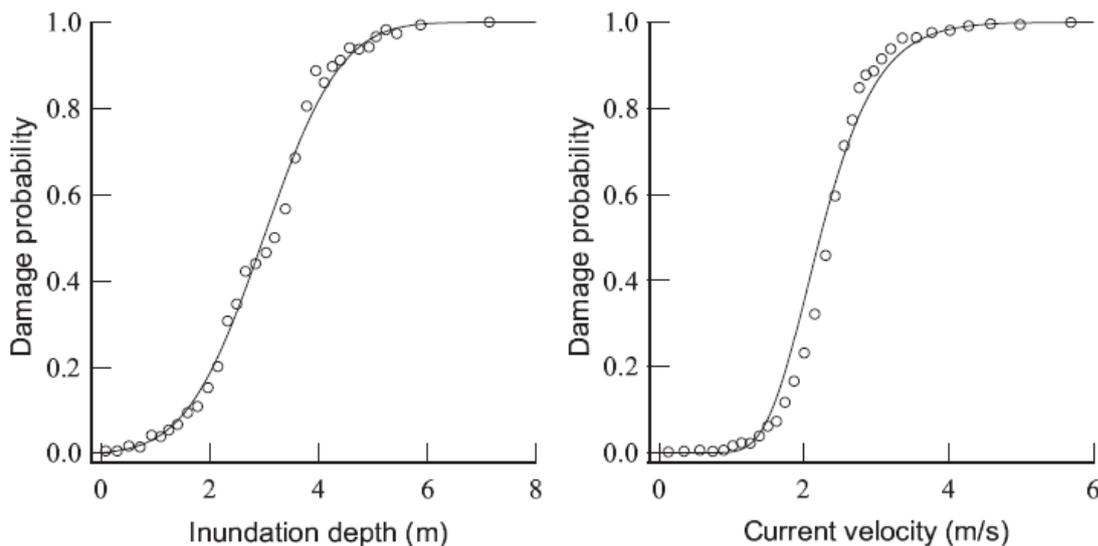


Figure 40. Rapport entre probabilité de dommage (*damage probability*), profondeur d'inondation (*inundation depth*) et vitesse de courant (*current velocity*).

Source : Extrait de Koshimura *et al.* (2009).

On observe une très bonne corrélation entre probabilité de dommage et caractéristiques de la submersion (vitesse et hauteur du flux), mais les auteurs ne font pas de distinction en fonction des caractéristiques structurelles des bâtiments, contrairement à Leone *et al.* (2011; 2011) et Gauraz *et al.* (2009). Or, il apparaît évident qu'une habitation construite en tôle ne présente pas les mêmes capacités de résistance à un tsunami qu'un bâtiment de plusieurs étages construit en béton armé.

2.1.2 Capacité de survie des individus et importance de la prise en compte des débris pour une interaction aléa/enjeux.

Dans le cadre du programme MAREMOTI, des matrices de probabilité de décès ont été développées pour chaque classe de bâti ainsi que pour les espaces de plein air, intégrant hauteurs et vitesses de flux en se basant sur les retours d'expériences du programme TSUNARISQUE .

Des travaux ont été réalisés par les services de l'État français sur la capacité de résistance des individus face à une lame d'eau plus ou moins haute et plus ou moins rapide dans un contexte d'inondations (Figure 41). Ces travaux ont contribué au développement des matrices de résistance des individus aux submersions par des tsunamis dans les espaces de plein air.

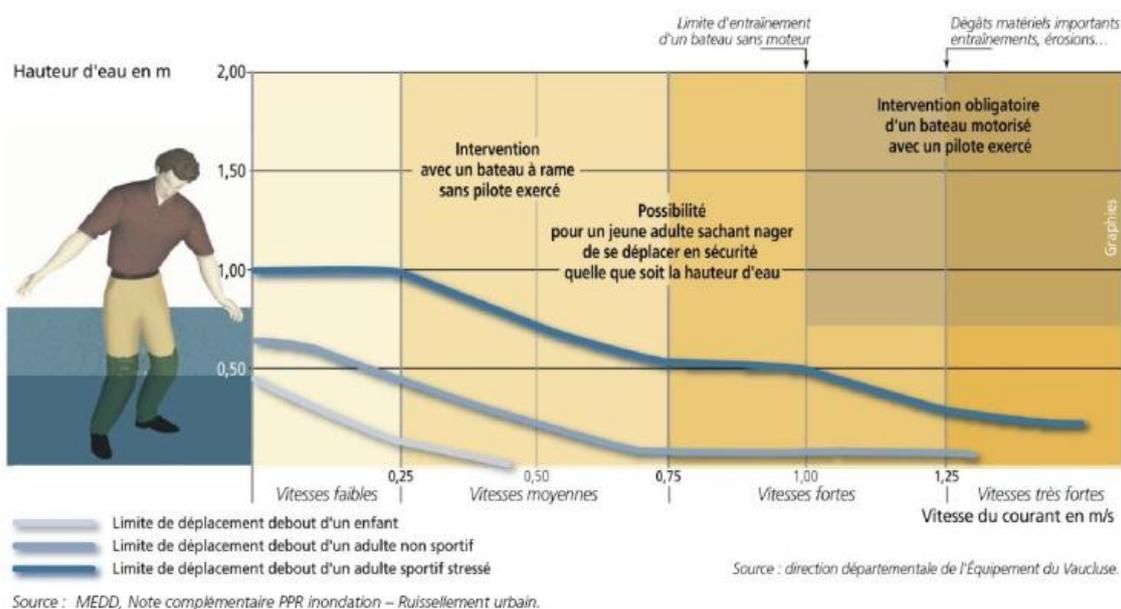


Figure 41. Limites de déplacements d'individus en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau (contexte d'inondation).

La vulnérabilité de l'individu est fonction de sa taille et de sa force physique, et varie donc considérablement. Il apparaît ainsi essentiel de qualifier la taille et la force physique des individus afin d'affiner leur propension à survivre à une submersion marine. Ainsi, pour chaque espace de plein air étudié, une distinction est faite dans le comptage entre enfants en bas âge, enfants, adolescents, adultes de corpulence normale, adultes de forte corpulence, personnes âgées et sportifs (Tableau 13).

Tableau 13. Typologie qualitative des individus.

Code	Description
BB	Enfant en bas âge ne marchant pas encore
ENF	Enfant marchant, d'âge inférieur à 12 ans
ADO	Enfants d'âge compris entre 12 et 17 ans
ADU	Adultes
GRO	Adultes de forte corpulence
VIE	Adultes de plus de 65 ans
SPO	Adultes de gabarit svelte équipés de vêtements de sport

Dans le cas du risque tsunami, la prise en compte des débris mobilisables apparaît indispensable comme facteur de vulnérabilité supplémentaire (Gomez & Wassmer, 2011). Afin de quantifier la présence de débris, plusieurs méthodes automatisées sont mises en place. Ainsi, l'entourage des

bâtiments de classe « A » est caractérisé par une forte densité de débris (5 m. autour des bâtiments). Il en est de même pour ceux de type « BAR » - le plus souvent entourés de chaises et tables constituant des débris potentiellement pris en charge lors de la submersion - et de type « HANGAR ». On exclut de ces zones tampon les bâtiments, les routes et les parcelles fermées. L'entourage des bâtiments industriels et les stations de services sont, quant à eux, caractérisés par une densité de débris moyenne à un rayon de 5 m. Concernant les espaces de plein air, parkings, terrains vagues, routes de marchés, espaces boisés et cimetières, on les considère comme des espaces où les débris sont denses. Pour les routes commerçantes, aires de jeux, zones d'activité, plages et estrans, on considère que leur densité en débris est moyenne. Enfin, on considère les autres espaces comme faiblement denses en débris. Lorsque ces différentes surfaces se chevauchent, la priorité a été donnée aux espaces les plus denses en débris.

La densité de débris propre à chaque espace est ainsi considérée comme facteur aggravant de la vulnérabilité des individus. Ce facteur aggravant augmente ainsi la probabilité de décès telle que définie par les matrices de vulnérabilité physique des individus.

2.1.3 Résultats à Mayotte et La Réunion

2.1.3.1 A Mayotte

Les travaux effectués à Mayotte ont été réalisés avec l'appui d'un étudiant stagiaire de l'Université Montpellier 3 (Master GCRN), Florent Drouet, encadré par nos soins pour mener à bien l'évaluation des enjeux bâtis et humains à Petite-Terre (2011).

A Mayotte, la quantification des enjeux humains s'est faite en deçà de 10 mètres d'altitude compte tenu des données historiques sur l'aléa (cf. 1.1.2.12, p. 30).

Le scénario SC1 repose sur une occupation nocturne des enjeux humains. Le scénario SC2 décrit un jour ouvrable à 17h30, là où la majorité des personnes se concentrent sur les routes, dans les aires de loisir et au voisinage des barges pour transiter vers Grande-Terre. Enfin, le scénario SC3, nommé « événement particulier », décrit à Mayotte un vendredi à l'heure à laquelle les enfants quittent l'école pour aller déjeuner en famille et où les hommes se concentrent à la mosquée principale de chaque village, soit entre 12h et 12h30.

Chaque bâtiment est caractérisé par la résistance potentielle de sa structure à un tsunami, conformément à la méthode précédemment exposée (Figure 42).

Type de bâtiment	Individuel			Collectif	
Classes	A	B	C	D	E
Critères d'identification sur le terrain	Habitat précaire auto-construit en bois, en tôle et matériaux de récupération. style "Banga". Bâti petit, léger et très peu résistant.	Habitat traditionnelle auto-construit avec structure en béton peu renforcée (poteaux 20*20 cm). Toit en béton ou en tôle. Bâti de taille modeste et de faible résistance.	Habitat individuel maçonné avec structure en béton renforcée (poteaux > 20*20 cm). Présence systématique d'un étage. Toit en tôle. Bâti de taille importante et résistant.	Habitat collectif maçonné de bonne conception. Structure géométrique simple. Toit en tôle. Présence de 1 ou 2 étages. Bâti de grande taille et de bonne résistance.	Habitat collectif massif avec structure renforcée en béton. Présence de plusieurs étages, immeuble. Toit en tôle. Bâti de grande surface et très résistant.
Vue terrain					
Exemple de bâtiment (typologie de la commune de Dzaoudzi-Labattoir)					
Nom Attribué par la commune dans le PLU	Habitat précaire	Case en beton	Pavillon intermédiaire ou de standing	Habitat collectif	Hôpital de Dzaoudzi

Figure 42. Typologie de la vulnérabilité structurelle du bâti sur Petite-Terre (Mayotte).

Source : extrait de Drouet (2011).

Cette typologie est adaptée aux structures rencontrées sur le terrain. Chaque bâtiment est ainsi caractérisé dans le SIG par sa classe de résistance (Figure 43) et par la fonction principale de son rez-de-chaussée (Figure 44) selon la typologie précédemment exposée (cf. 2.1.1.2, p. 68).

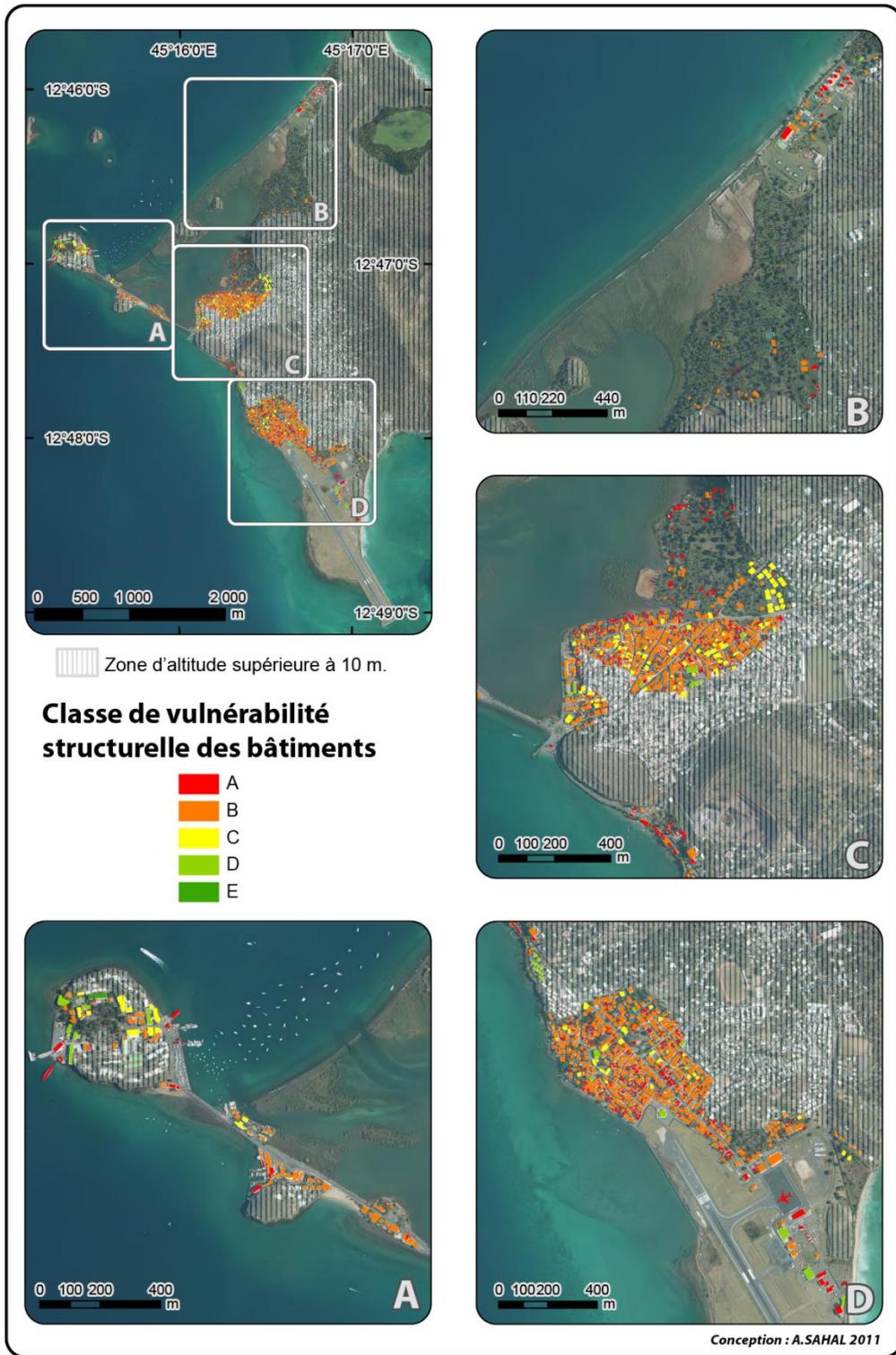


Figure 43. Vulnérabilité structurelle du bâti sur Petite-Terre (Mayotte).

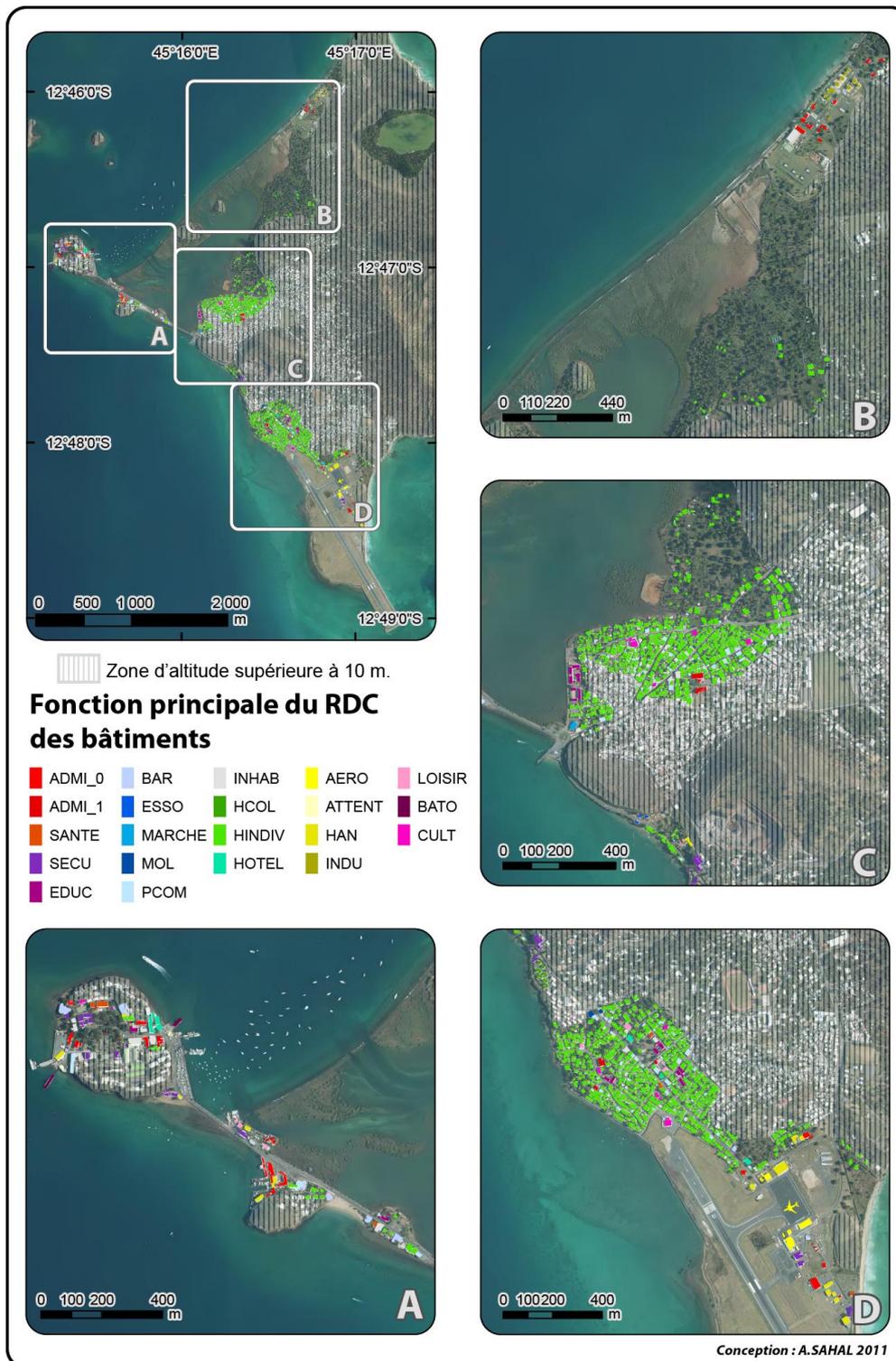


Figure 44. Fonction principale du RDC du bâti sur Petite-Terre (Mayotte).

Peu de différences apparaissent entre les villes de Labattoir (cadre C) et de Pamanzi (cadre D), majoritairement résidentielles et aux structures de faible résistance potentielle (classes A et B). La presqu'île de Dzaoudzi (cadre A) se détache en terme de fonctionnalités des bâtiments (essentiellement administratives) et de résistance potentielle des structures (classes C, D et E). Dans

le détail, quelques quartiers se distinguent, par exemple certains regroupements de logements de construction récente et de bonne résistance structurelle (nord-est du cadre C).

Les données INSEE sont utilisées pour estimer la population présente dans chaque bâtiment. Le maillage des îlots INSEE rend la tâche délicate dans la mesure où certaines parties de la zone d'étude contiennent des logements qui ne représentent qu'une portion limitée d'îlots. Aussi il apparaît nécessaire de déduire une densité de population à partir des îlots pour lesquels l'ensemble des bâtiments est étudié. Ainsi, certains îlots sont échantillonnés pour calculer une densité de population par logement. Le Tableau 14 présente les îlots pour lesquels la population totale des logements recensés est connue.

Tableau 14. Population des IRIS échantillonnés à Petite Terre.

Source : données INSEE, 2007.

IRIS	Commune	Population en 2007 (INSEE)	Surface habitée (m ²)	Densité par m ² habité
985082260	Labattoir	361	7112	0,0508
985082252	Labattoir	353	5987	0,0590
985082182	Labattoir	376	8333	0,0451
985082240	Labattoir	392	9726	0,0403
985151020	Pamanzi	386	6250	0,0618
985151030	Pamanzi	163	7060	0,0231
985151040	Pamanzi	190	3598	0,0528
985151050	Pamanzi	292	6400	0,0456
985151060	Pamanzi	299	6058	0,0494
985151070	Pamanzi	191	5195	0,0368
985151080	Pamanzi	105	2166	0,0485
985151090	Pamanzi	172	4450	0,0387

On attribut aux îlots non échantillonnés une densité correspondante aux îlots échantillonnés en fonction de leur similitude dans le type de bâti et dans le niveau de développement. La population théorique présente dans chaque bâtiment est calculée en multipliant la surface habitée par la densité ainsi calculée. On obtient par cumul de ces populations résidentes la population résidente totale de la zone d'étude : 7415 personnes (Tableau 15).

Tableau 15. Calcul de la densité de population dans les surfaces habitées à Mayotte par classe de résistance du bâti.

CLASSE	Nombre de bâtiments	Surface totale habitée	Nombre d'habitants	Surface moyenne par logement	Nombre d'habitants moyen par logement
A	776	24983,05	1124,94	32,19	1,45
B	1123	110876,51	4818	98,73	4,29
C	134	33895,23	1273,86	247,41	9,51
D	14	7009,56	197,71	107,84	12,91
TOTAL			7414,51		

Dans le cas de Mayotte, on ne peut se permettre d'adopter un raisonnement aussi simpliste pour peupler les habitations dans la mesure où pour les habitats de classe « A », c'est-à-dire les plus

précaires, la densité de population est bien supérieure à celle des bâtiments de classe supérieure. On pourrait expliquer cette spécificité par le bas niveau de salaire des populations mahoraises (Burnod & Sourisseau, 2007) et la présence d'un habitat informel occupé par des populations clandestines. Le raisonnement dit « simpliste » permet toutefois de calculer la population présente dans la zone afin de la redistribuer en conservant l'effectif total déduit des valeurs INSEE.

On propose ainsi de redistribuer la population calculée en se basant sur la classe du bâti. On calcule pour ce faire le nombre de logements par bâtiment. Chaque HINDIV correspond à 1 logement. S'il possède un RDC et un étage, alors on considère qu'il possède un demi-logement en RDC et un demi-logement en étage. Sur le terrain, on renseigne le nombre de logements présents dans les bâtiments d'habitat collectif. On obtient ainsi le nombre de logements par classe de bâtiment.

On ajuste le nombre moyen d'habitants par logement corrigé à partir du postulat « les logements précaires sont plus denses que les logements de qualité » : on se base sur les données INSEE et plus particulièrement sur le taux de fécondité. On fixe ainsi un nombre d'habitants par logement, décroissant à mesure que la classe du bâti s'améliore. Le total de personnes obtenu (nombre moyen corrigé x nombre de logements) atteint la valeur déduite des données INSEE c'est-à-dire 7414 individus (Tableau 16).

Tableau 16. Ajustement de la distribution des populations dans les foyers de Mayotte.

CLASSE	Nombre de bâtiments	Surface totale habitée	Nombre d'hab.	Surface moyenne par logement	Nombre d'hab. moyen par logement	Nombre de logements	Nombre moyen d'hab. par logement corrigé	Nombre d'hab. total corrigé
A	776	24983,05	1124,94	32,19	1,45	776	4,60	3569,60
B	1124	110876,51	4818	98,64	4,29	1124	3	3372
C	134	33895,23	1273,86	247,41	9,51	137	2,50	342,50
D	14	7009,56	197,71	107,84	12,91	65	2	130
TOTAL			7414,51					7414,10

Chaque logement est ainsi peuplé. Pour chaque scénario d'enjeu, on a fixé un taux d'occupation des logements en se basant sur les données INSEE qui décrivent l'activité des habitants (Tableau 17).

Tableau 17. Occupation professionnelle des habitants de Mayotte.

Source : INSEE, 1999 et 2006.

POP T5 - Population de 15 ans ou plus selon la catégorie socioprofessionnelle

	2006	%	1999	%
Ensemble	73 796	100,0	62 787	100,0
Agriculteurs exploitants	566	0,8	708	1,1
Artisans, commerçants, chefs d'entreprise	2 853	3,9	2 248	3,6
Cadres et professions intellectuelles supérieures	4 232	5,7	2 831	4,5
Professions intermédiaires	8 558	11,6	6 080	9,7
Employés	13 232	17,9	11 334	18,1
Ouvriers	10 522	14,3	9 061	14,4
Retraités	8 975	12,2	5 076	8,1
Autres personnes sans activité professionnelle	24 858	33,7	25 449	40,5

Sources : Insee, RP1999 et RP2006 exploitations complémentaires.

Ainsi pour le SC1, les logements sont pleins (coefficient 1) ; pour le SC2 seuls les inactifs sont dans leur logement (0,459), pour le SC3 la moitié des inactifs sont considérés comme étant à l'extérieur, faisant leurs courses dans des commerces ou bien au marché (0,2295). Concernant les petits commerces, en se basant sur les observations faites sur le terrain, on considère que chacun est peuplé d'1 personne à Mayotte. Le public accueilli est de 6 personnes en journée. Pour les autres types de bâtiments, un comptage est réalisé. On obtient ainsi une cartographie de l'occupation des bâtiments pour les scénarios SC1 (Figure 45), SC2 (Figure 46) et SC3 (Figure 47).

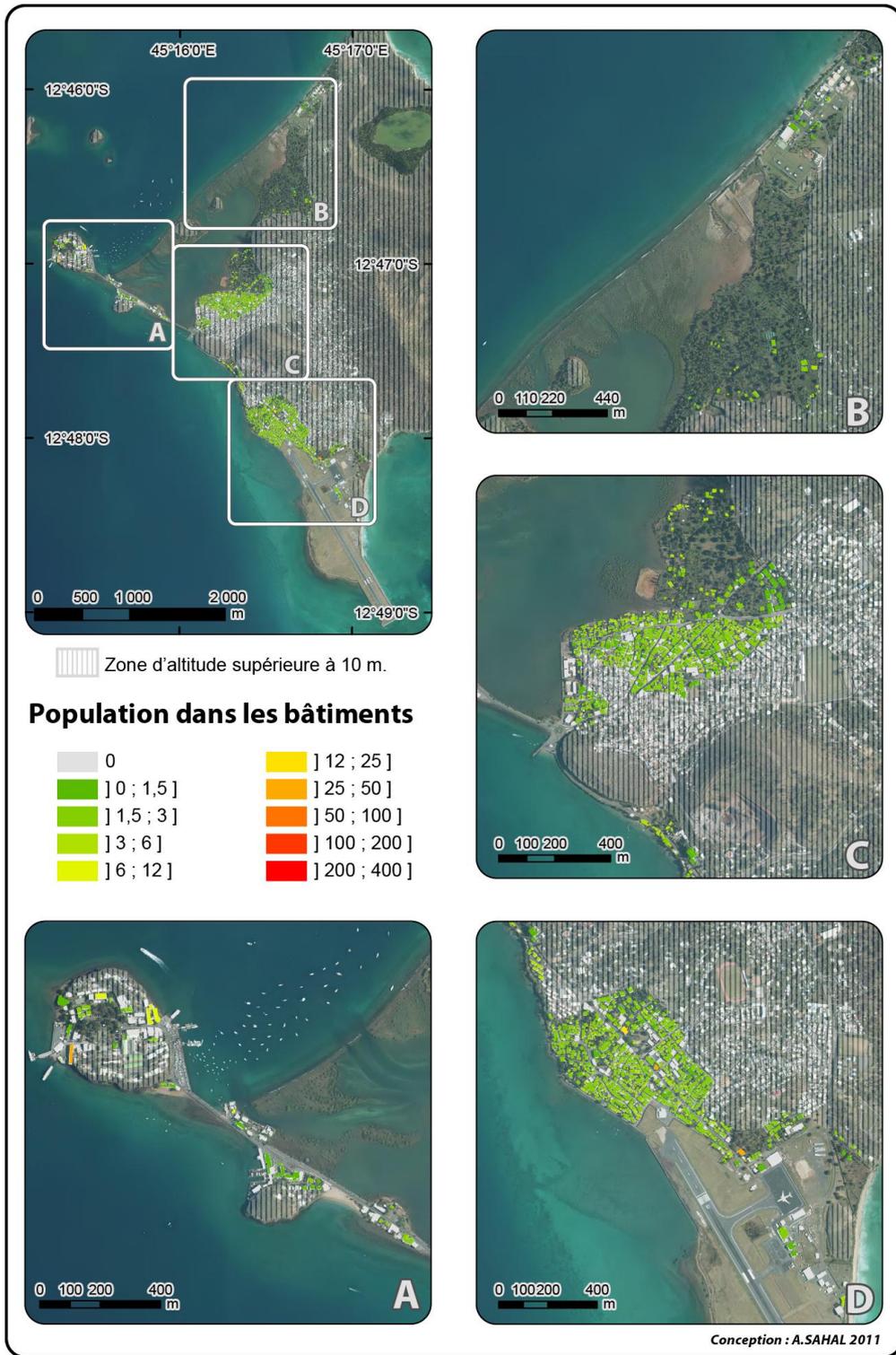


Figure 45. Populations présentes dans les bâtiments pour le scénario nocturne (SC1) sur Petite-Terre (Mayotte).

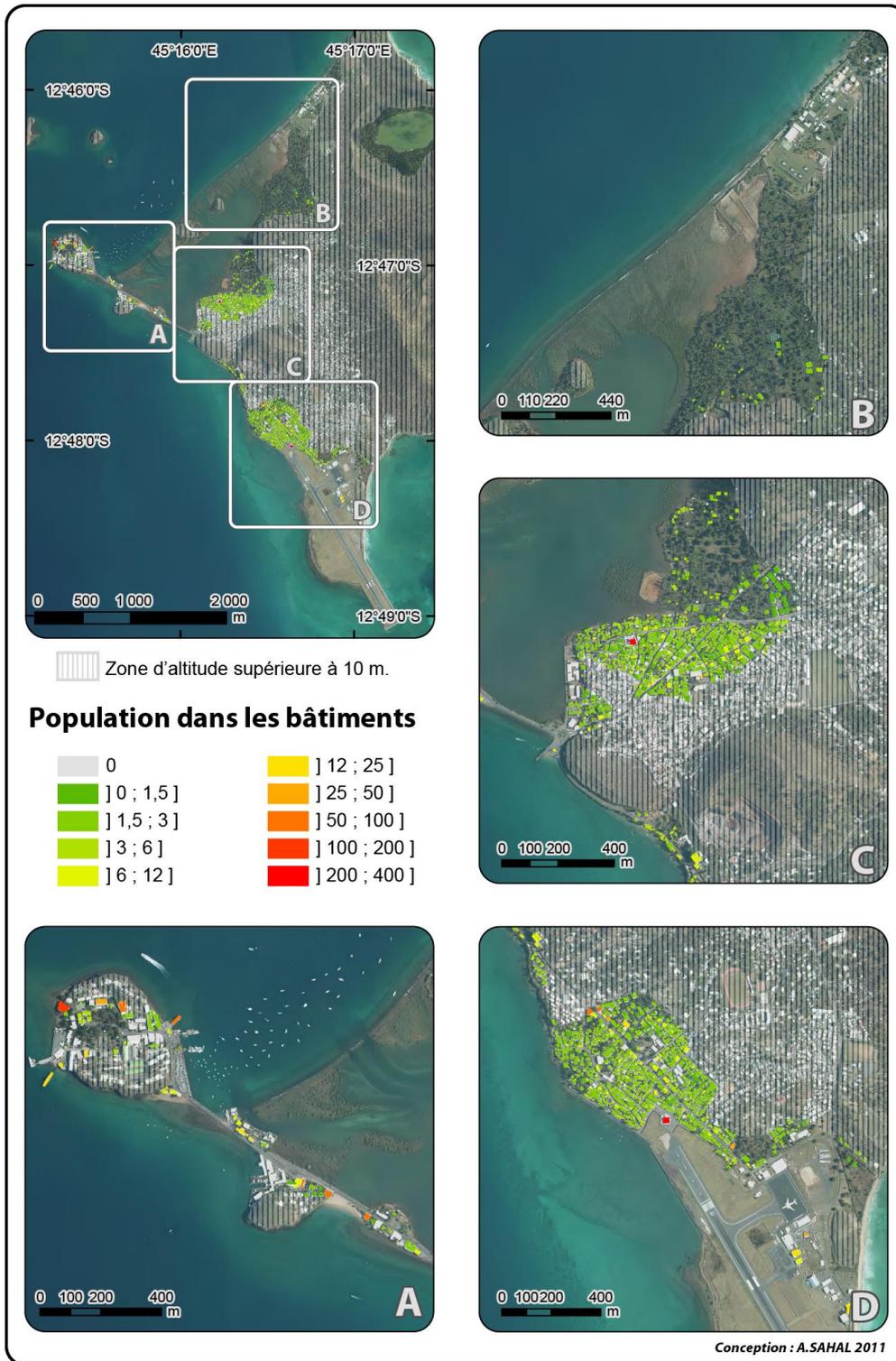


Figure 46. Populations présentes dans les bâtiments pour le scénario « jour ouvrable à 17h30 » (SC2) sur Petite-Terre (Mayotte).

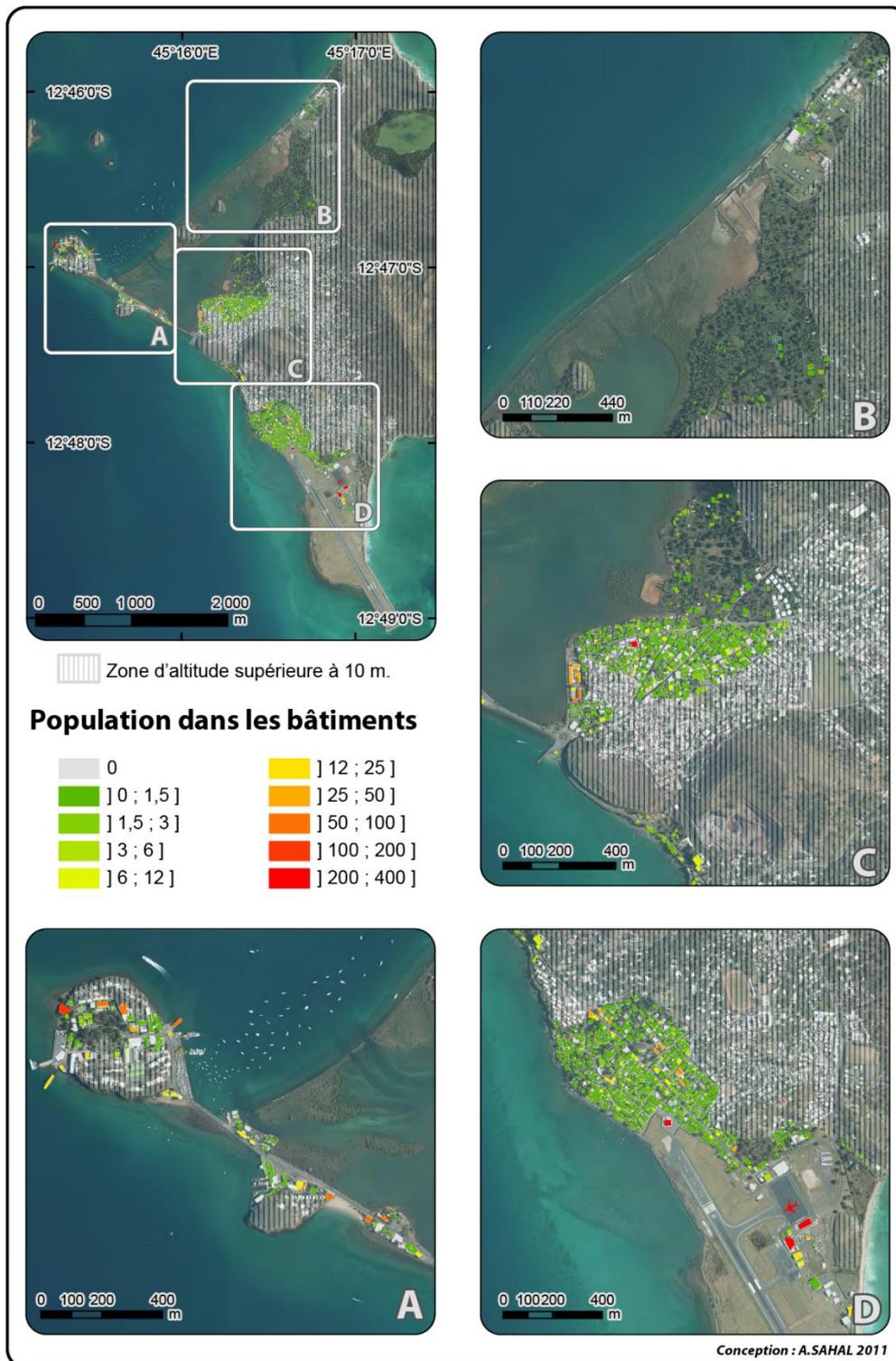


Figure 47. Populations présentes dans les bâtiments pour le scénario « vendredi entre 12h et 12h30 » (SC3) sur Petite-Terre (Mayotte).

On constate que le scénario SC3 illustre le cas de figure maximisant les enjeux dans les bâtiments, avec des écoles remplies (cadre C, en orange), des mosquées et des structures aéroportuaires au maximum de leur fréquentation (cadre D, mosquée en rouge au nord de la piste, avion et terminaux en rouge au sud-est du cadre).

2.1.3.2 Description des espaces de plein air et enjeux humains associés

Un diagnostic de l'affectation des espaces de plein air est mené (tout espace autre que bâti), aboutissant à une cartographie exhaustive de leur utilisation (Figure 48).

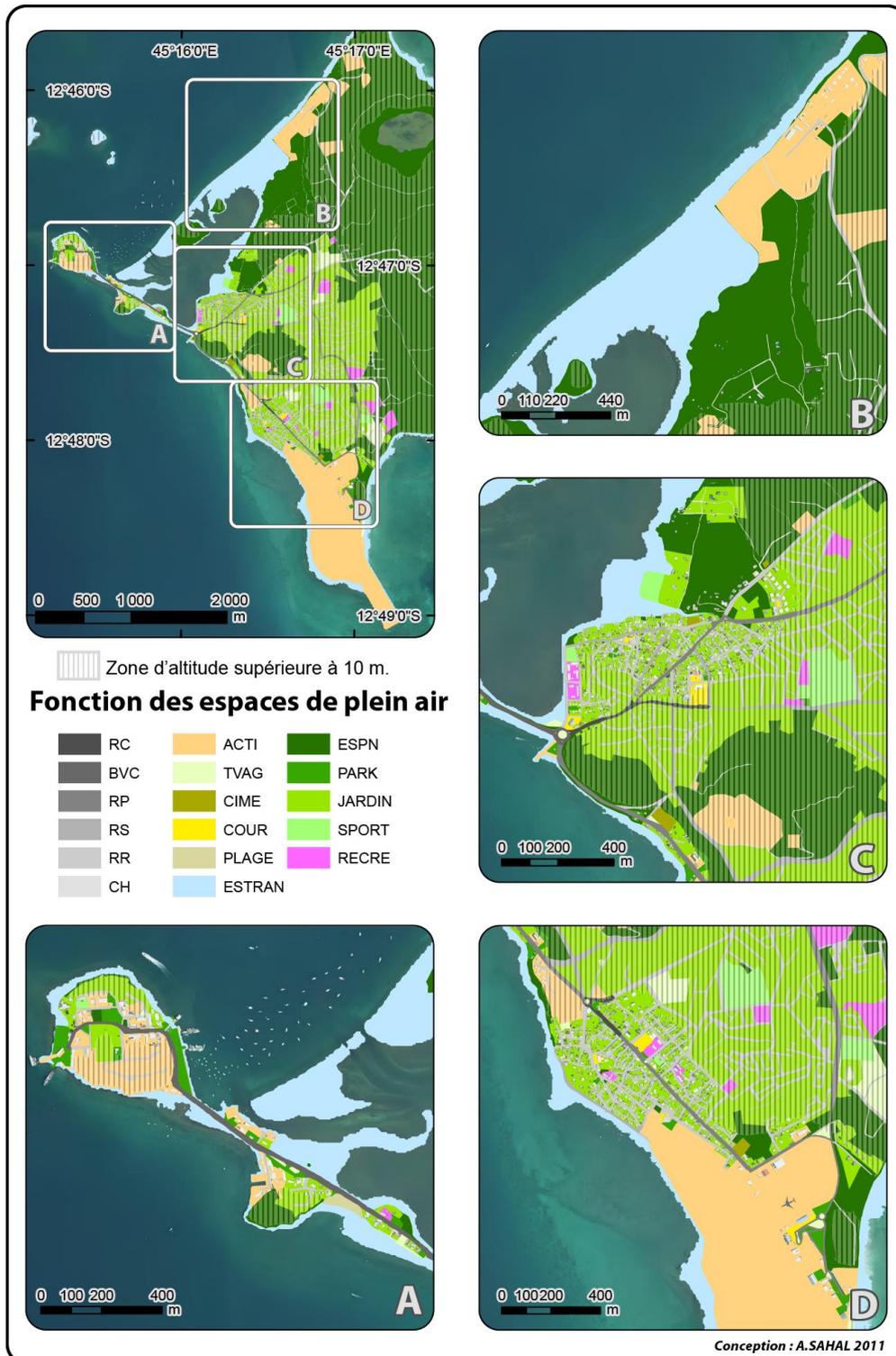


Figure 48. Fonction des espaces de plein air de Petite-Terre (Mayotte).

L'île apparaît essentiellement végétalisée en son centre. Les littoraux des extrémités nord, sud et ouest de l'île sont dédiés aux activités stratégiques (respectivement industrielles, aéroportuaires et administratives). La plupart des surfaces affectées aux scolaires (RECRE) sont au dessus de 10m. Quelques écoles se trouvent toutefois en bord de mer comme à Labattoir (partie ouest du cadre C).

On considère les espaces de plein air vides pour le scénario nocturne SC1. Pour les scénarios SC2 et SC3, on effectue un comptage des piétons afin de « peupler » les routes. Des tronçons routiers sont échantillonnés sur deux des principales agglomérations (cadres C et D de la Figure 49), et un comptage est réalisé aux heures des scénarios choisis.

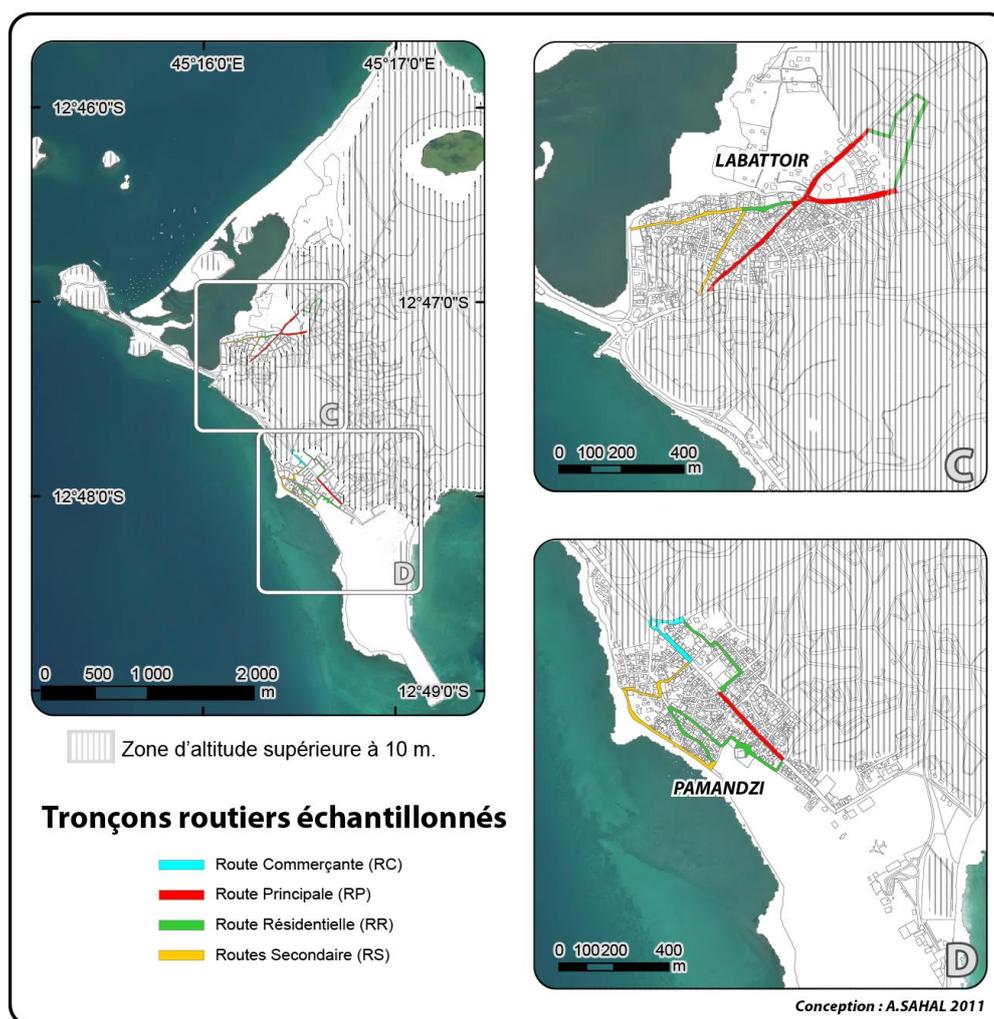


Figure 49. Tronçons routiers échantillonnés pour l'évaluation de la fréquentation des routes de Petite-Terre (Mayotte).

On aboutit à une densité de population des tronçons routiers échantillonnés que l'on extrapole à l'ensemble du réseau (Figure 50). Le cas du Boulevard des Crabes, axe reliant la presqu'île de Dzaoudzi au reste de Petite-Terre a fait l'objet d'une étude spécifique de sa fréquentation.

Type de route	Critères d'identification terrain	Vue terrain	Densité SC1	Densité SC2 Et SC3
CH: Chemin	Chemin ou piste en Terre. Impraticable en voiture apart pour des véhicules type 4X4 (sauf pour les sentiers de randonnées à l'Est de l'île). Fréquentation très faible à toute heure de la journée.		0	0,005
RR: Route Résidentielle	Route de quartier. Pas toujours praticable en voiture (ruelles). Fréquentation piétonne moyenne la journée, plus forte le midi et en fin d'après midi.		0	0,01
RS: Route Secondaire	Route secondaire d'accès à une route principale ou commerçante. Route à double sens emprunté majoritairement par des voitures. Fréquentation relative, moyenne ou forte selon l'heure.		0	0,02
RP: Route Principale	Route majeure à double sens. Fréquentation moyenne par les piétons. Emprunté principalement par des voitures (Taxi). Dessert les routes secondaires, résidentielles et commerçantes.		0	0,015
RC: Route Commerçante	Route principale de centre ville. Route à double sens très fréquentée et bordée de commerces de toutes sortes.		0	0,025
BVC: Boulevard des Crabes	Route maritime reliant le rocher de Dzaoudzi à Petite Terre. S'étend du rond point de four à Chaux jusqu'à la barge piétonne. Trafic Rythmé par les flux de taxi (barge-centre ville/aéroport)		0	0,01

Figure 50. Densité de population calculée pour les routes de Petite-Terre (Mayotte).

Source : extrait de Drouet (2011).

Pour SC3 on quantifie les personnes présentes avant l'afflux de piétons (équivalent de SC2). On distribue ensuite les populations des écoles aux alentours des établissements (départ de l'école) et celle des mosquées du vendredi à leurs alentours. On considère $\frac{1}{2}$ effectif dans le bâtiment et $\frac{1}{2}$ effectif en approche, sur les routes alentour.

Pour les autres espaces on utilise la méthode exposée précédemment (2.1.1.3, p. 69). On obtient ainsi une cartographie de la distribution des individus dans les espaces de plein air pour SC2 (Figure 51) et SC3 (Figure 52).

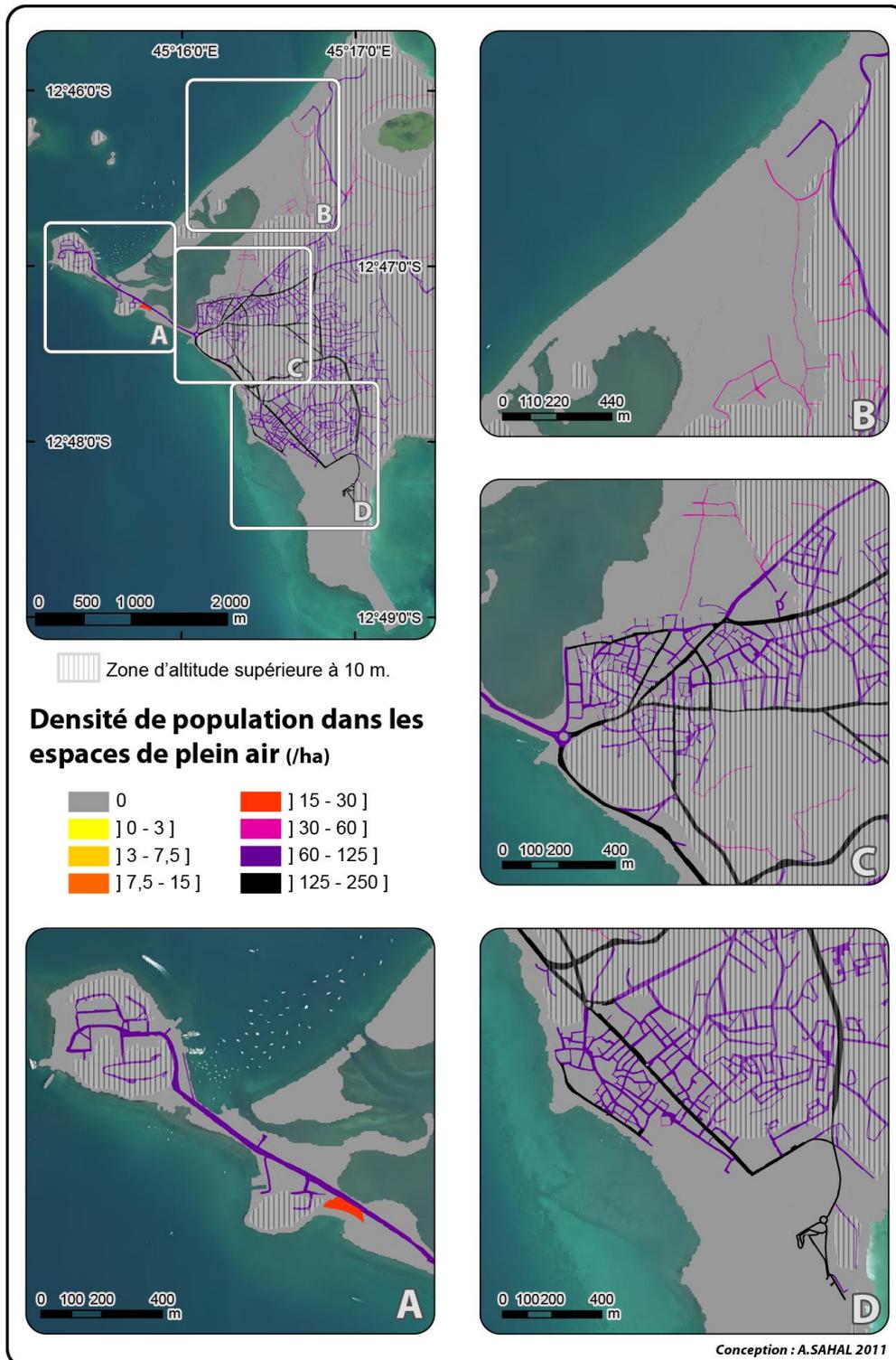


Figure 51. Densité de population dans les espaces de plein air de Petite-Terre (Mayotte) pour le scénario SC2.

Source : données issues de Drouet (2011).

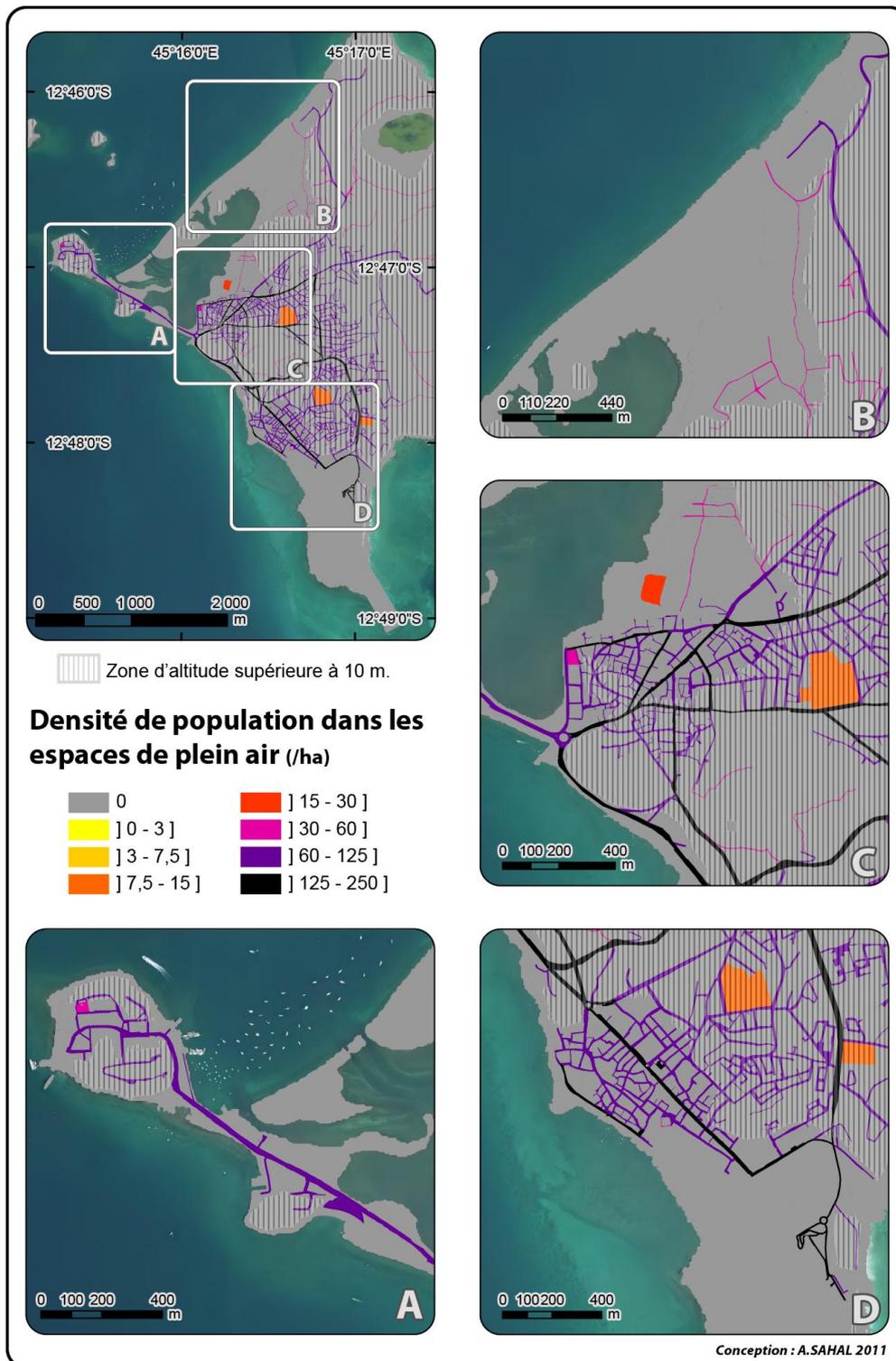


Figure 52. Densité de population dans les espaces de plein air de Petite-Terre (Mayotte) pour le scénario SC3.

Source : données issues de Drouet (2011).

Le scénario SC3 montre une fréquentation importante des routes mais également des terrains de sport. Les routes apparaissent densément peuplées en journée (SC2 et SC3). Enfin, une cartographie de la densité de débris est réalisée sur la zone d'étude en se basant sur les observations de terrain (Figure 53).

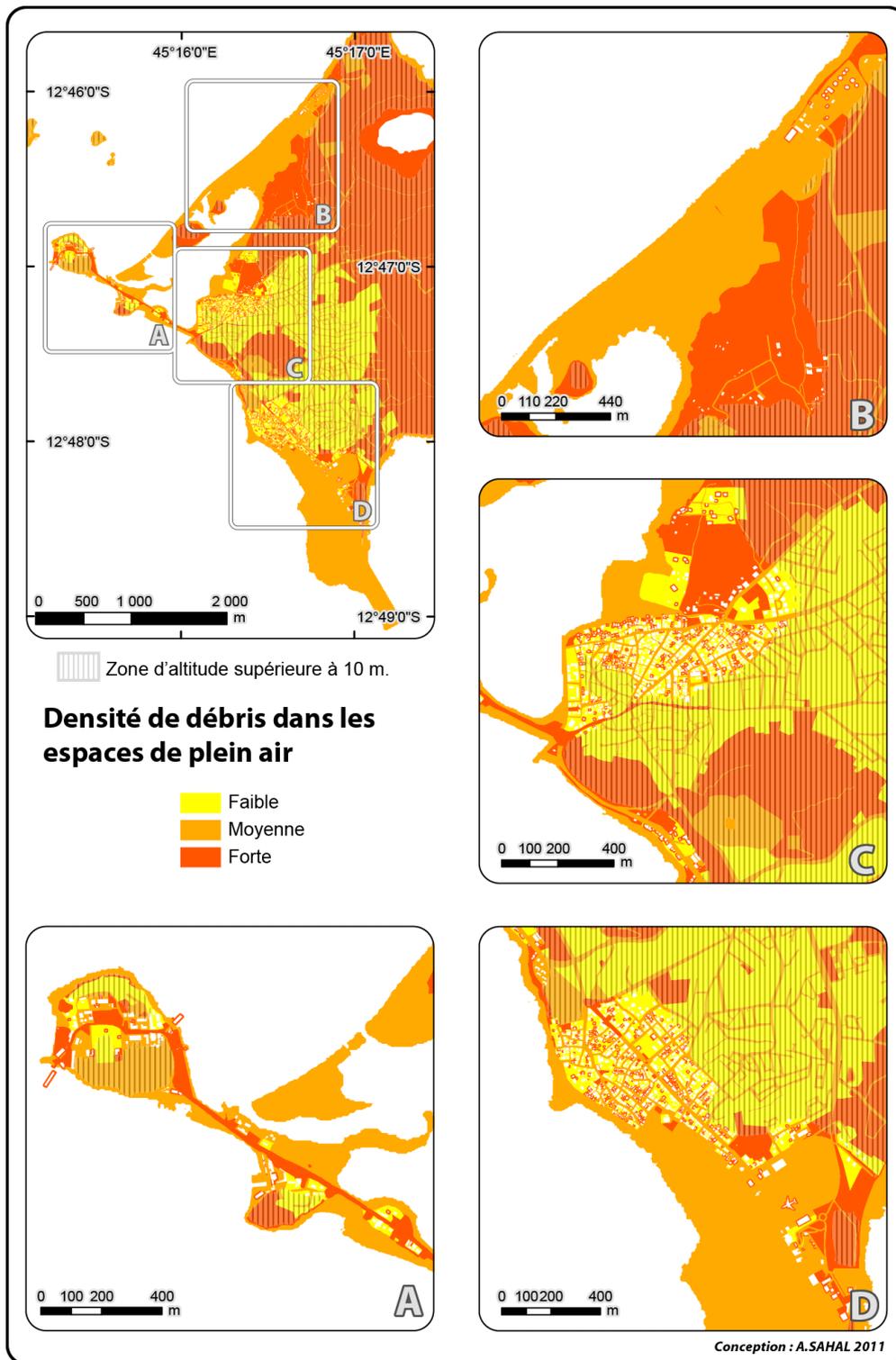


Figure 53. Densité de débris potentiellement mobilisables dans les espaces de plein air de Petite-Terre (Mayotte).

Source : données issues de Drouet (2011).

On observe que les densités de débris (cf. 2.1.2, p. 74) sont relativement importantes sur les littoraux de Petite-Terre.

Lorsque la modélisation de l'aléa sera disponible, l'ensemble des cartographies produites permettra l'évaluation des pertes humaines potentielles et de l'endommagement potentiel des structures par la combinaison des caractéristiques de l'aléa et des densités de débris.

2.1.3.3 A La Réunion

Les diagnostics de vulnérabilité réalisés à La Réunion ont été menés avec l'appui d'une étudiante stagiaire de l'Université Montpellier 3 (Master GCRN), Morgane Fautrero, également encadrée par nos soins pour mener à bien l'évaluation des enjeux bâtis et humains à Saint Paul (Fautrero, 2010). A Saint-Paul, l'ensemble de l'agglomération a fait l'objet de cette quantification dans la mesure où elle est entièrement située à une altitude inférieure à 10 m.

La méthode est appliquée à l'ensemble de l'agglomération de Saint-Paul, aboutissant à une cartographie des fonctions de chaque bâtiment (Figure 54).

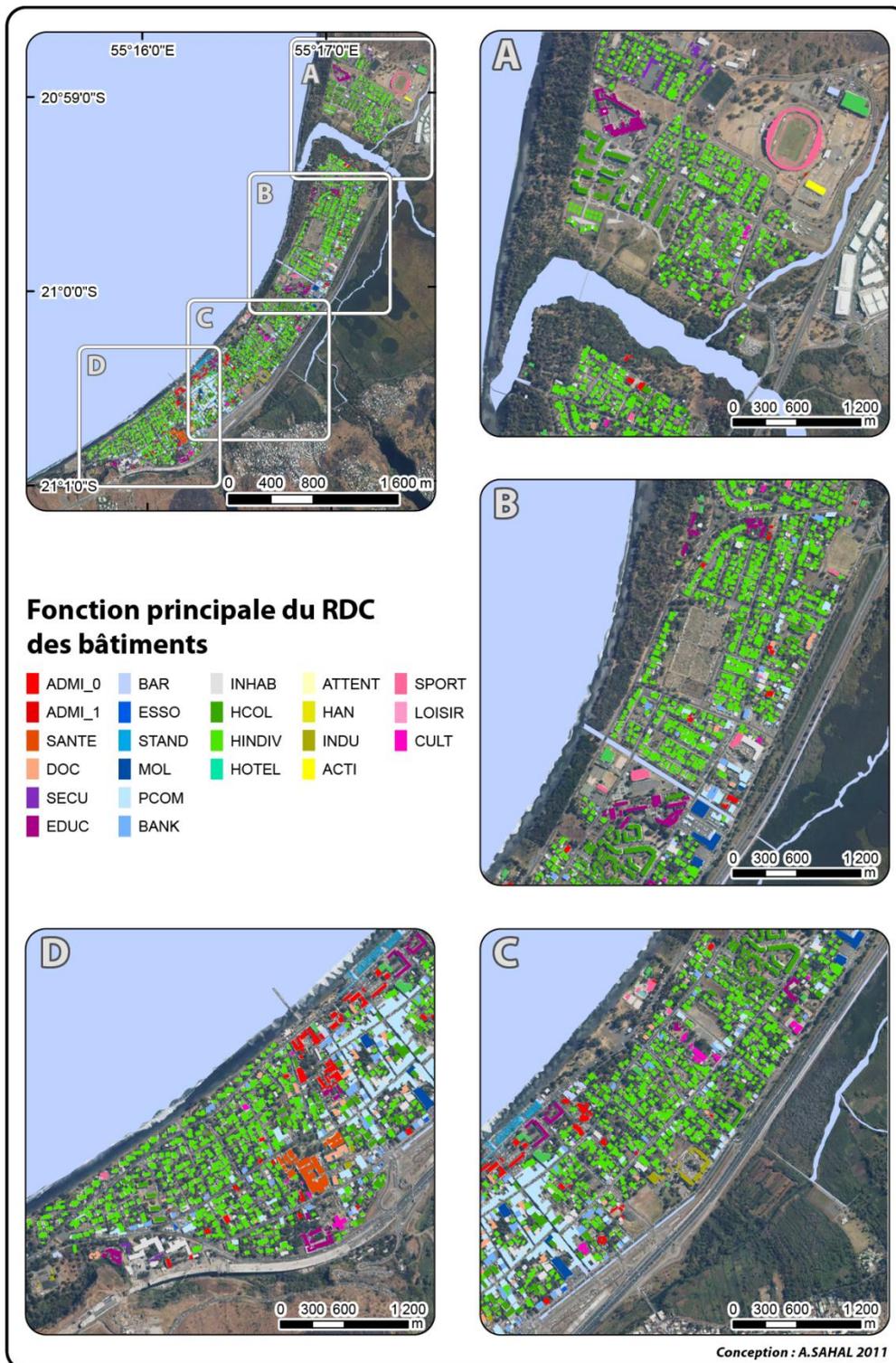


Figure 54. Fonction principale du RDC du bâti à Saint-Paul (La Réunion).

Source : données de Fautrero (2010) mises à jour en 2011, fond de carte IGN BD Ortho 2008.

La Figure 54 C-D montre le centre ville de Saint-Paul, cœur de son activité de commerces et de services publics. On peut observer le marché à la limite des cadres C et D sur le front de mer. Le reste de l'agglomération est essentiellement occupé par des habitations.

La méthode d'évaluation de la vulnérabilité structurelle des bâtiments est adaptée aux spécificités architecturales de La Réunion (Figure 55). On notera l'apparition d'une classe inédite : la classe F qui décrit des bâtiments sur pilotis (Figure 56). L'adaptation de cette typologie à l'architecture locale permet une cartographie de la vulnérabilité structurelle des bâtiments de l'agglomération (Figure 57).

Classe	A	B	C
	Bâtiment individuel très léger (structure bois ou tôle). Petit et non résistant.	Bâtiment individuel maçonné (béton, briques) peu ou moyennement renforcé. Poteaux de 20 x 20 cm maximum.	Bâtiment individuel en dur avec structure renforcée solide, architecture sophistiquée de bonne conception. "Style villa"
Critères d'identification terrain			
Vue terrain			
Classe	D	E	F
	Bâtiment collectif (bloc), structure moyennement renforcée, géométrie simple. Le plus souvent à étages.	Bâtiment collectif massif avec structure renforcée solide, de bonne conception. Le plus souvent à étages.	Bâtiment collectif ou individuel sur pilotis, laissant un espace d'un mètre ou plus sous le bâtiment pour permettre à l'eau de circuler. Bâtiment maçonné avec structure renforcée solide.
Critères d'identification terrain			
Vue terrain			

Figure 55. Typologie structurelle du bâti à Saint-Paul (La Réunion).

Source : extrait de Fautrero (2010).



Figure 56. Habitat récent (individuel et collectif) construit sur pilotis à Saint-Paul (La Réunion).

Source : clichés A. Sahal, 2010.

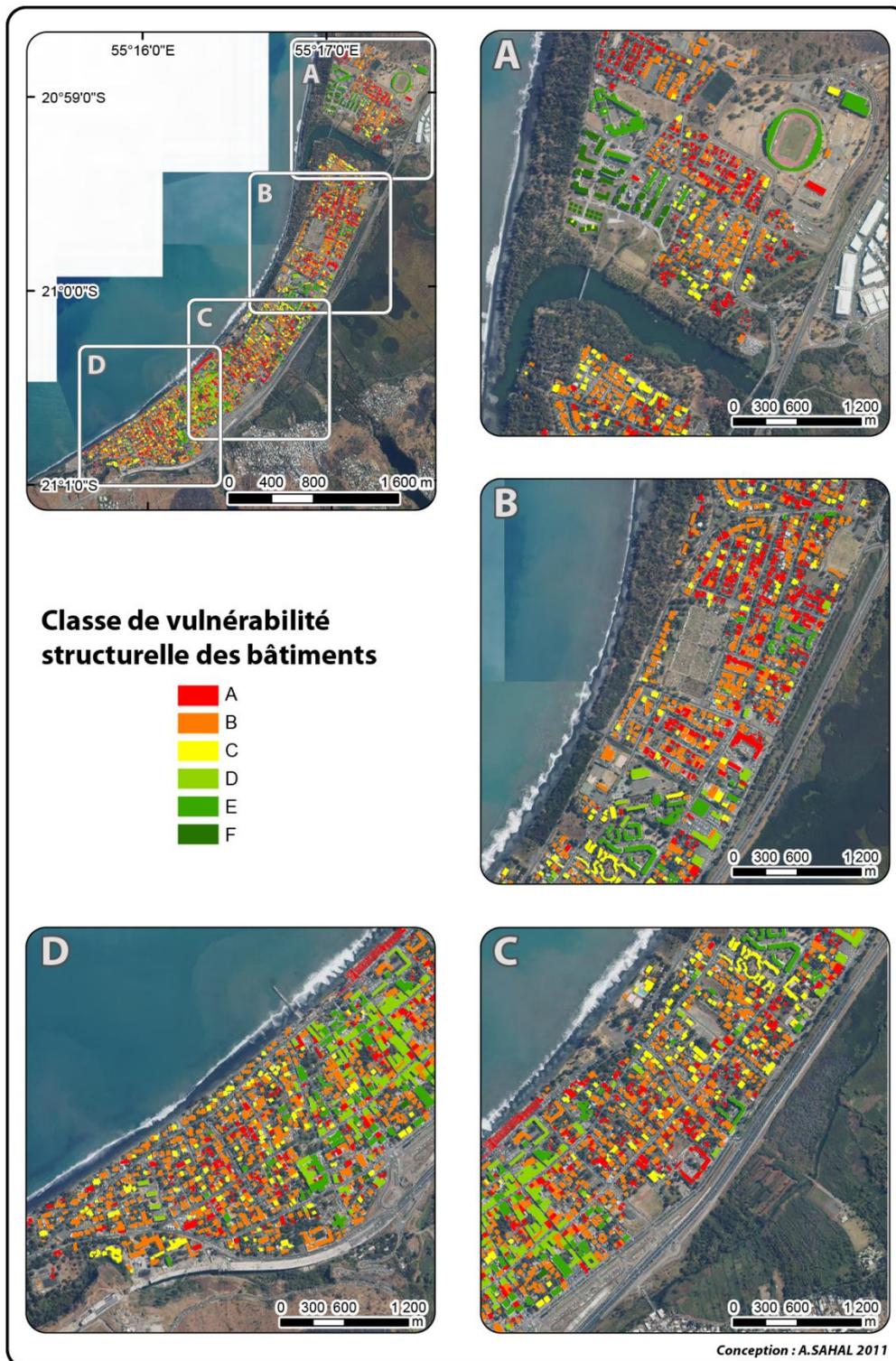


Figure 57. Vulnérabilité structurelle du bâti à Saint-Paul (La Réunion).

Source : données de Fautrero (2010) mises à jour en 2011, fond de carte IGN BD Ortho 2008.

Le centre-ville apparaît comme la partie de l'agglomération dont les bâtiments sont les moins vulnérables. Les habitations, essentiellement individuelles, appartiennent aux classes les moins résistantes. On notera dans la partie ouest du cadre A, sur la rive droite de la ravine, la présence d'un quartier d'habitats individuels et collectifs récents de classe F. On considère ce type de bâtiments

comme le plus résistant à Saint-Paul dans la mesure où les flux inondant peuvent circuler en dessous sans qu'une pression importante soit exercée sur la structure.

Le scénario SC1 décrit le scénario d'enjeux humains nocturnes. Le scénario SC2 décrit un jour ouvrable à 15h, lorsque l'activité économique est à son paroxysme : tous les commerces et les administrations sont ouverts, les écoles pleines. Enfin, le scénario SC3, dit « événement particulier », s'est porté sur un jour ouvrable alors que le marché de bord de mer est à son taux de remplissage le plus important, à savoir un vendredi à 10 h. Afin de répartir les populations résidentes dans les logements, les densités de population par unité de surface des IRIS 101, 102 et 201 sont calculées (Tableau 18). Concernant l'IRIS 202, étant donné que la surface habitée est inconnue (délimitation intersectant la zone d'étude), on peuple les habitations en utilisant la densité moyenne des îlots 101, 102 et 201. On fixe un taux d'occupation des logements en fonction des scénarios en se basant sur les données INSEE concernant l'activité des habitants (Tableau 19).

Tableau 18. Population des IRIS de Saint-Paul (La Réunion).

Source : données INSEE, 2006.

IRIS	Population en 2006 (INSEE)	Surface habitée (m ²)	Densité par m ² habité
101	3135	170280	0,0184
102	2700	182554	0,0147
201	2169	141888	0,0152
202	2615	n +(107100)	0,0161 (moyenne)

Tableau 19. Occupation professionnelle des habitants de Saint-Paul (La Réunion).

Source : INSEE, 1999 et 2006.

POP T5 - Population de 15 ans ou plus selon la catégorie socioprofessionnelle

	2006	%	1999	%
Ensemble	73 796	100,0	62 787	100,0
Agriculteurs exploitants	566	0,8	708	1,1
Artisans, commerçants, chefs d'entreprise	2 853	3,9	2 248	3,6
Cadres et professions intellectuelles supérieures	4 232	5,7	2 831	4,5
Professions intermédiaires	8 558	11,6	6 080	9,7
Employés	13 232	17,9	11 334	18,1
Ouvriers	10 522	14,3	9 061	14,4
Retraités	8 975	12,2	5 076	8,1
Autres personnes sans activité professionnelle	24 858	33,7	25 449	40,5

Sources : Insee, RP1999 et RP2006 exploitations complémentaires.

Ainsi pour le SC1, les habitations sont pleines (coefficient 1), pour le SC2 seuls les inactifs sont dans leur logement (0,459), pour le SC3 la moitié des inactifs sont considérés comme étant à l'extérieur,

faisant leurs courses dans des commerces ou bien au marché (0,2295). Concernant les petits commerces, on considère que chacun est peuplé de 2 personnes aux heures d'ouverture à La Réunion, en se basant sur les observations faites sur le terrain. Le public accueilli est de 6 personnes en journée (variable PUBL_JOUR dans la table attributaire des bâtiments). Concernant les bars et restaurants, une étude de fréquentation spécifique a été faite au *Quai Gilbert*, ERP de type bar/restaurant localisé sur le parking du *Quai Gilbert*, parking dédié au marché de Saint-Paul. Des comptages y sont réalisés afin de quantifier la fréquentation des bars/restaurants aux horaires et jours des différents scénarios. De même que pour les appels à témoin, une affiche informe les passants et clients de l'établissement (Figure 58).

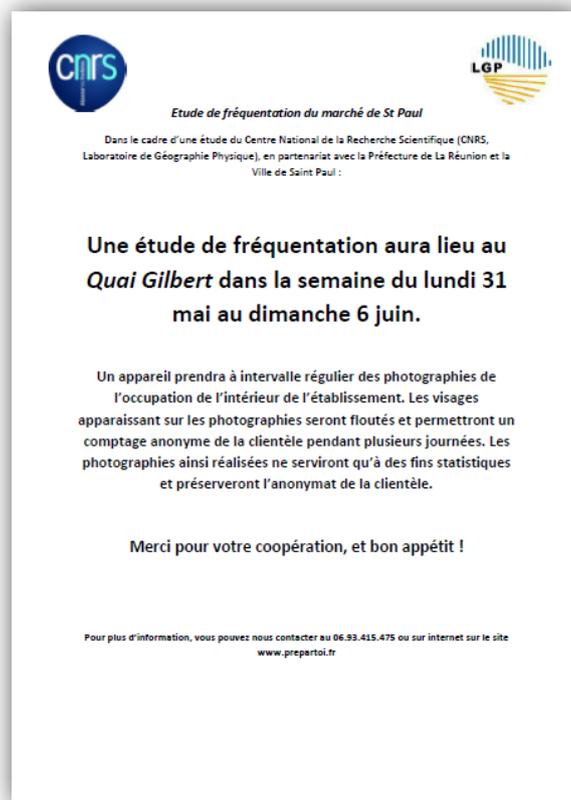


Figure 58. Affiche à l'attention des clients du Quai Gilbert les informant de la réalisation d'une étude de fréquentation par photographie.

En l'occurrence, l'affiche indique la présence d'un appareil photo dont les clichés ne seront utilisés qu'à des fins statistiques, et que l'identité des usagers sera préservée en floutant les visages. Dans la réalité, les visages sont « pastillés » pour faciliter leur comptage.

Un appareil photo est installé à l'intérieur de l'établissement et prend des clichés toutes les 15 minutes, et ce pendant deux semaines. Un comptage est réalisé à partir des clichés, permettant le dénombrement des individus. La Figure 59 illustre quelques clichés utilisés pour ce comptage ainsi que la localisation du *Quai Gilbert*.

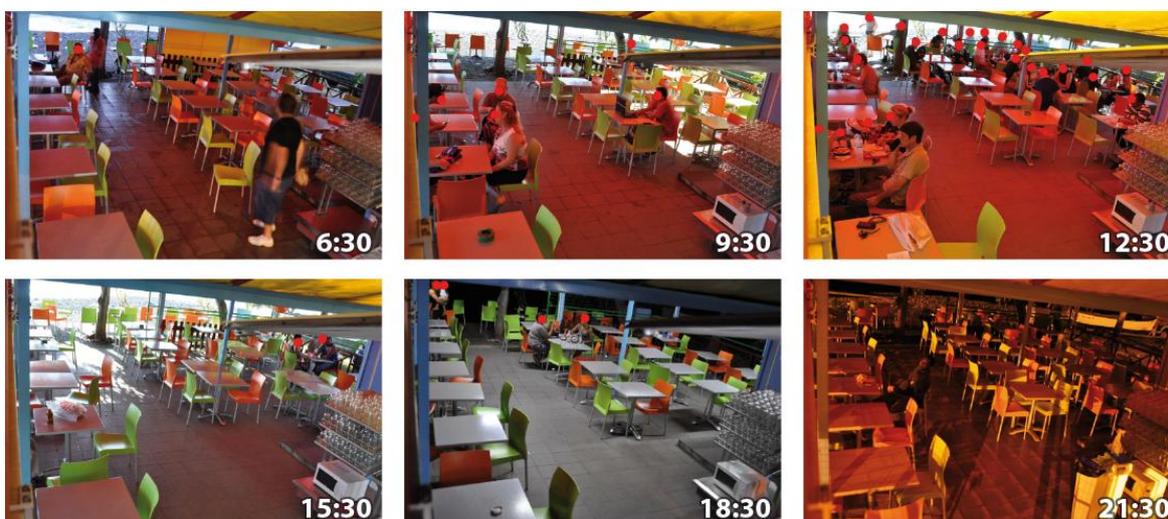
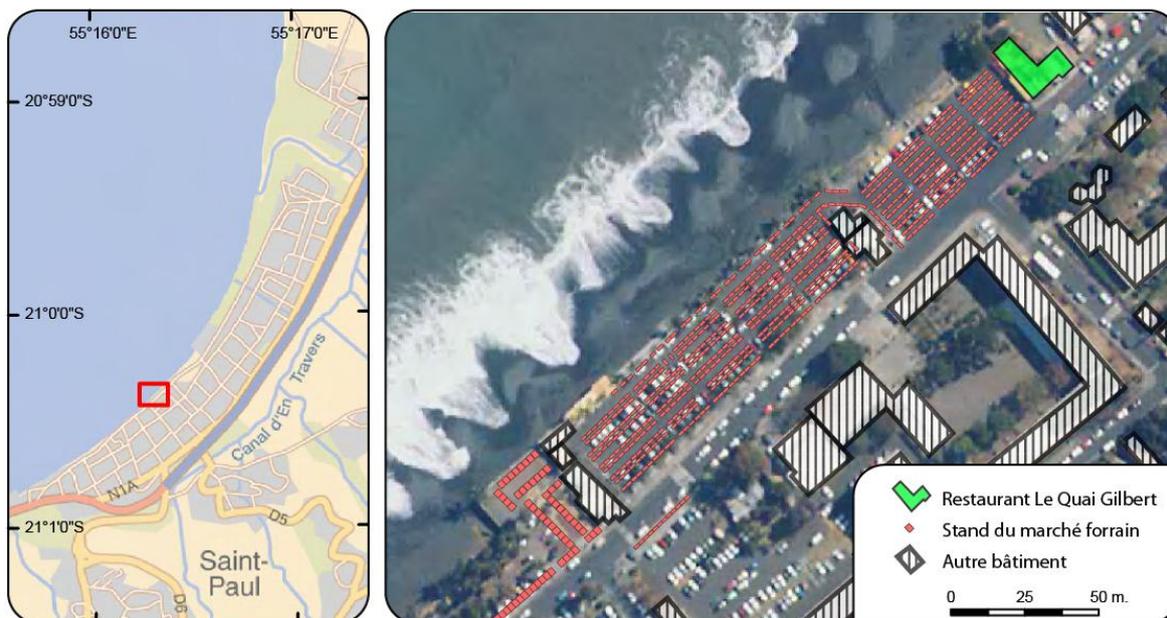


Figure 59. Localisation du Quai Gilbert dans le marché de Saint-Paul (La Réunion) et exemples de clichés (un vendredi).

Sources : données IGN BD Carto modifiées et Mairie de Saint-Paul, clichés A. Sahal 2011, fonds de carte IGN BD Raster et BD Ortho 2008.

On produit des courbes de fréquentation horaires moyennes pour cet ERP (Figure 60).

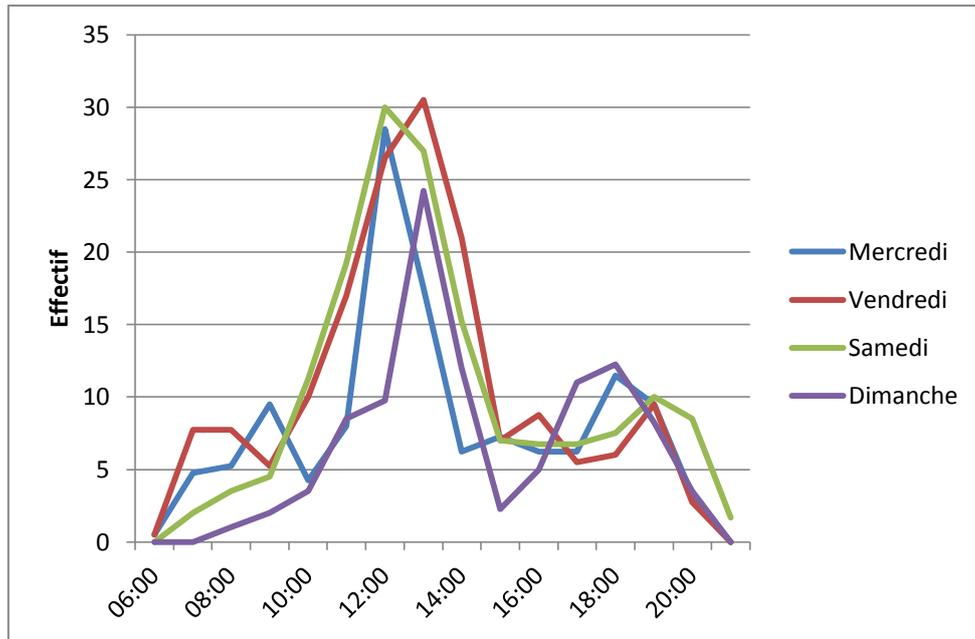


Figure 60. Fréquentation horaire moyenne du Quai Gilbert.

Source : comptage toutes les 15 minutes par photographie sur deux semaines.

On quantifie ainsi la fréquentation de cet ERP que l'on rapporte à sa surface commerciale. La densité de population ainsi obtenue est utilisée pour peupler les autres ERP de la catégorie « BAR ». Le scénario SC2 à Saint-Paul se situe dans le temps lors d'un jour ouvrable à 15h. Dans le cas du Quai Gilbert il s'agira d'un mercredi. Le scénario SC3, dit « événement particulier » est un vendredi à 10h.

Les fréquentations échantillonnées au Quai Gilbert sont ainsi adoptées pour l'ensemble des bâtiments de même fonction (Figure 61 et Tableau 20).

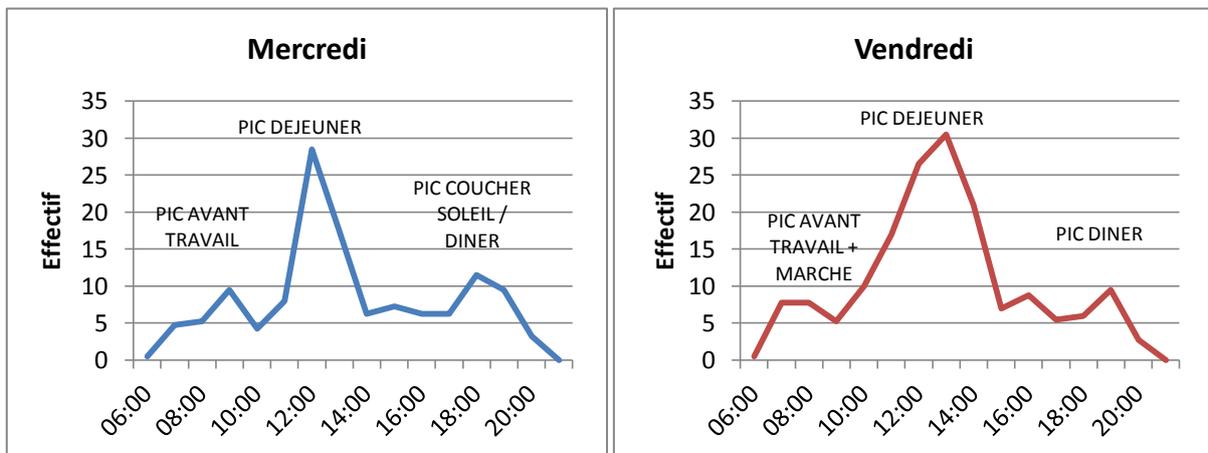


Figure 61. Courbes de fréquentation des bars/restaurants adoptées pour les scénarios diurnes (horaire en abscisses, effectif compté en ordonnées).

Source : comptage toutes les 15 minutes par photographie sur deux semaines.

Tableau 20. Densités de populations adoptées pour la catégorie bars/restaurants.

Scénario	Population	Surface (m ²)	Densité pour le scénario (pop/m ²)
SC2	7,25	241,942	0,03
SC3	10	241,942	0,04

Pour les autres types de bâtiments, un comptage est réalisé.

On aboutit à une cartographie des enjeux humains présents dans les RDC des bâtiments pour les scénarios SC1 (Figure 62), SC2 (Figure 63) et SC3 (Figure 64).

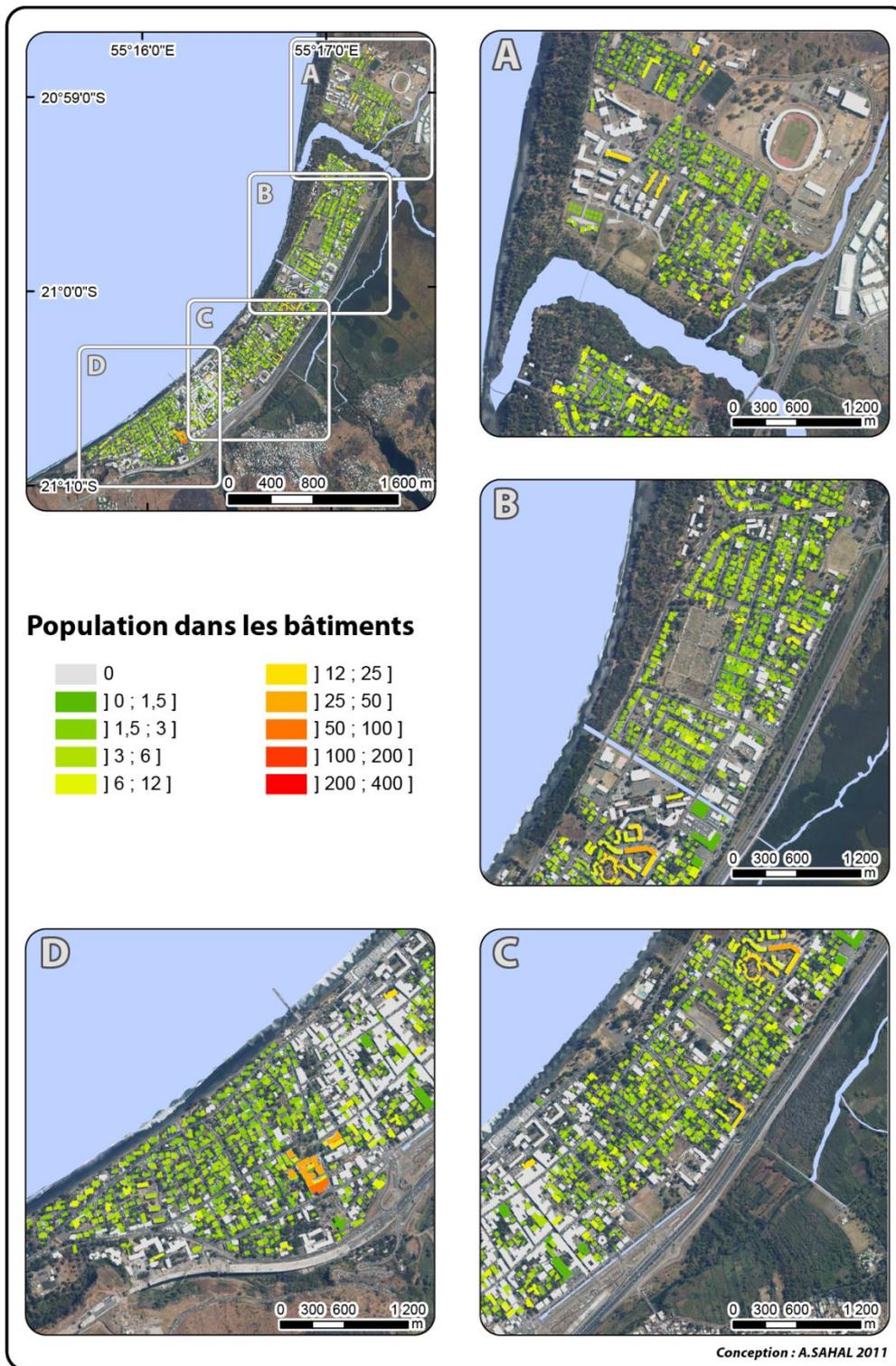


Figure 62. Populations présentes dans les RDC des bâtiments pour le scénario nocturne SC1 à Saint-Paul (La Réunion).

Source : fond de carte IGN BD Ortho 2008.

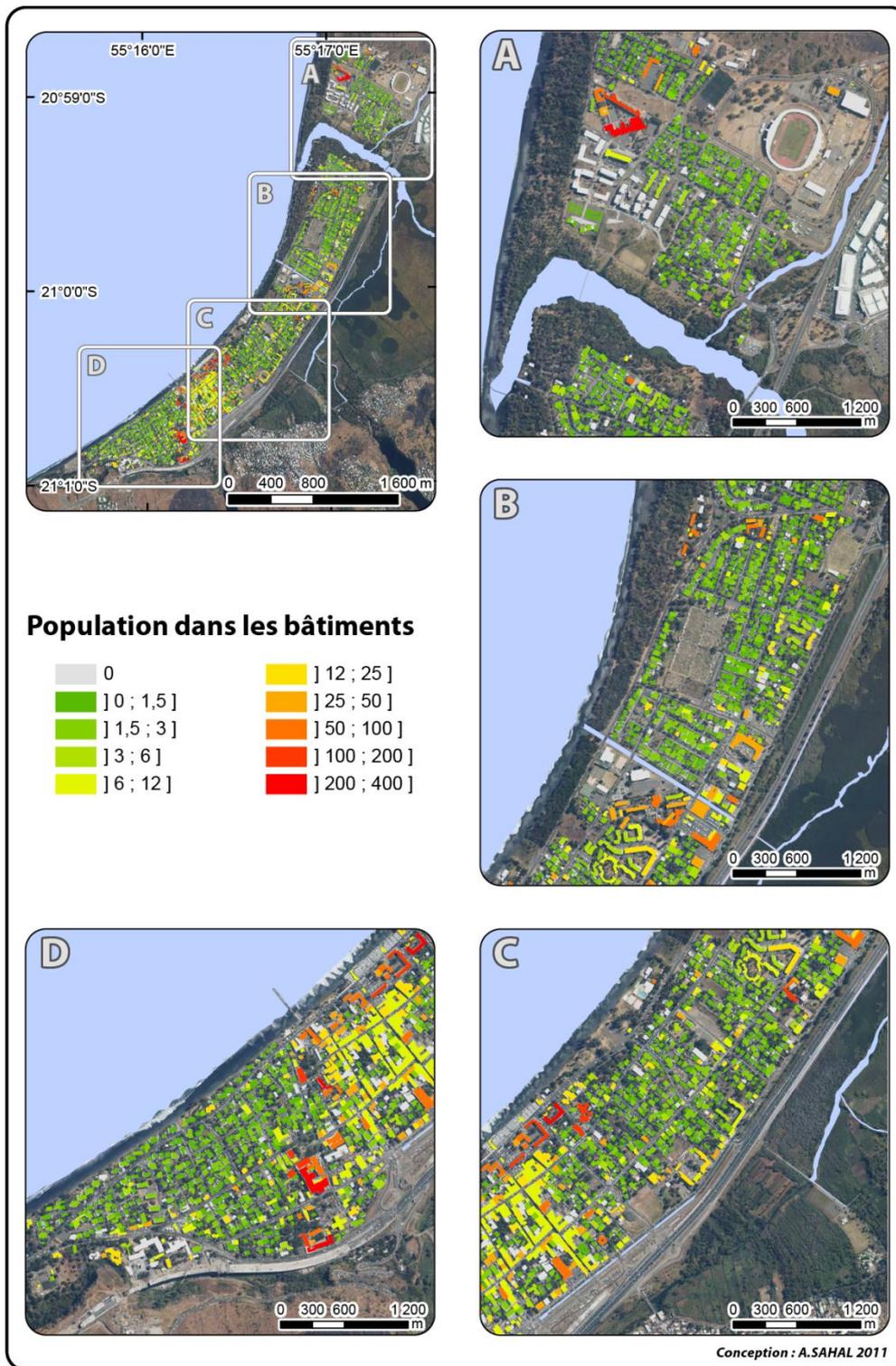


Figure 63. Populations présentes dans les RDC des bâtiments pour le scénario SC2 (jour ouvrable 15h) à Saint-Paul (La Réunion).

Source : fond de carte IGN BD Ortho 2008.

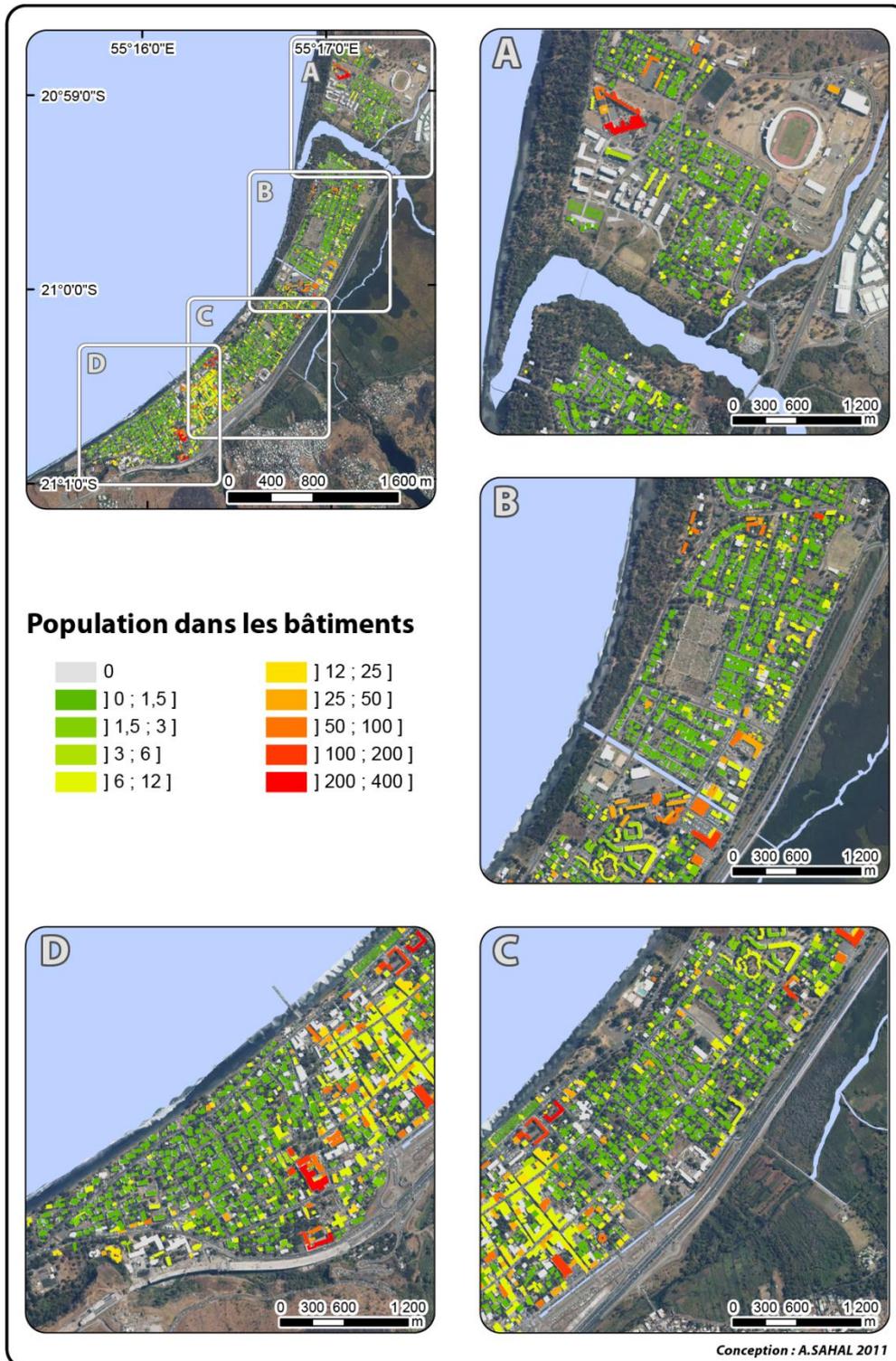


Figure 64. Populations présentes dans les RDC des bâtiments pour le scénario SC3 (vendredi, jour de marché à 10h) à Saint-Paul (La Réunion).

Source : fond de carte IGN BD Ortho 2008.

Le centre ville apparaît comme la partie de la ville dont les bâtiments abritent le plus de populations en journée, tandis qu'il se vide la nuit (activités de commerce essentiellement). Les groupements

scolaires se distinguent nettement dans les scénarios diurnes : situés en bord de mer (nord ouest du cadre A, nord est du cadre D), leurs bâtiments regroupent chacun plus de 200 personnes.

En ce qui concerne la quantification des personnes présentes dans les espaces de plein air (autres que le marché de Saint-Paul) une typologie est également appliquée à l'ensemble des espaces (Figure 65).

Afin de « peupler » les trottoirs, un tampon de 10 m. est créé autour des routes. Le type de la route est attribué au trottoir correspondant, et une étude de fréquentation est entreprise sur des tronçons représentatifs échantillonnés (Figure 66).

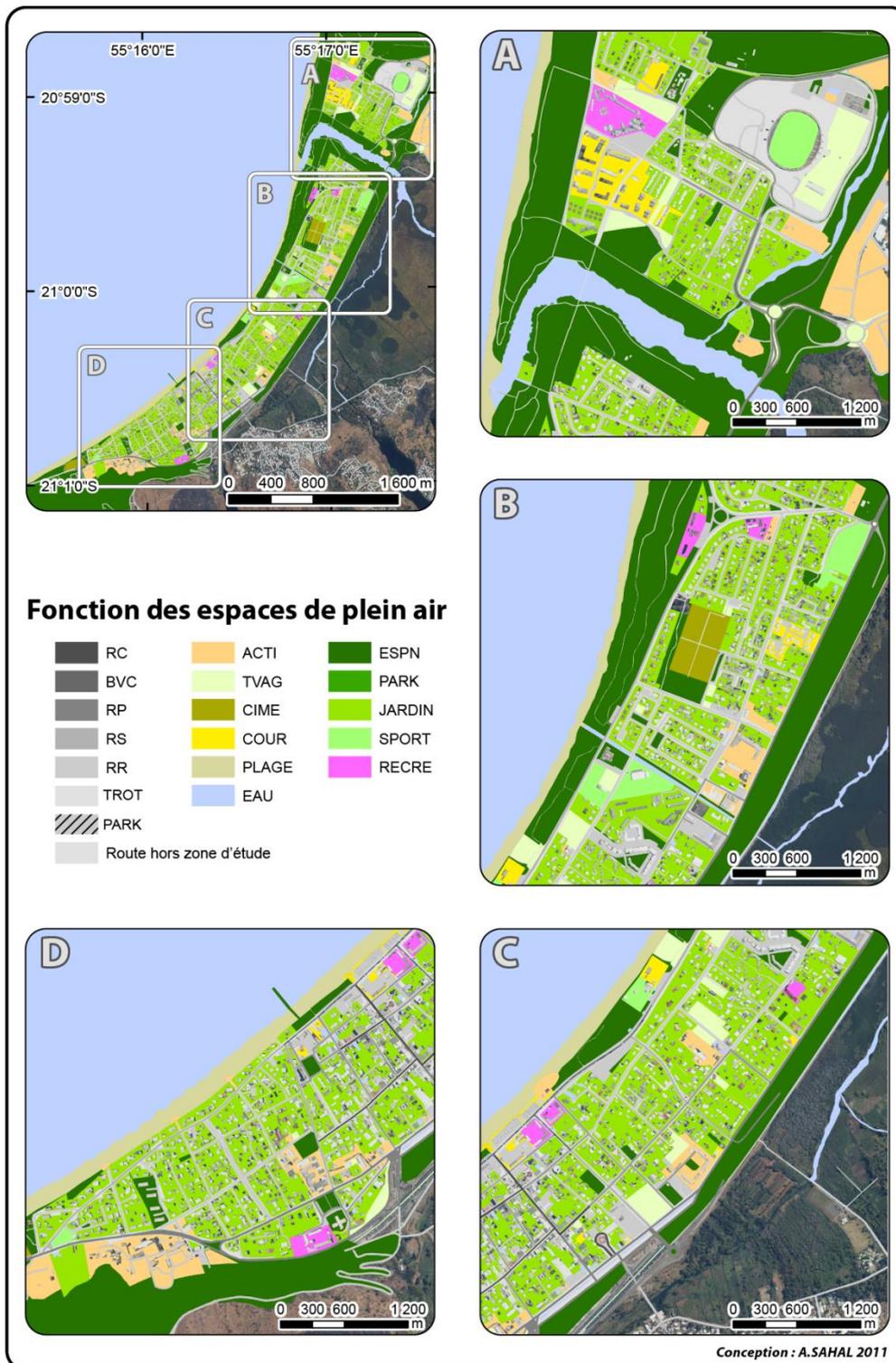


Figure 65. Fonction des espaces de plein air de Saint-Paul.

Source : fond de carte IGN BD Ortho 2008.

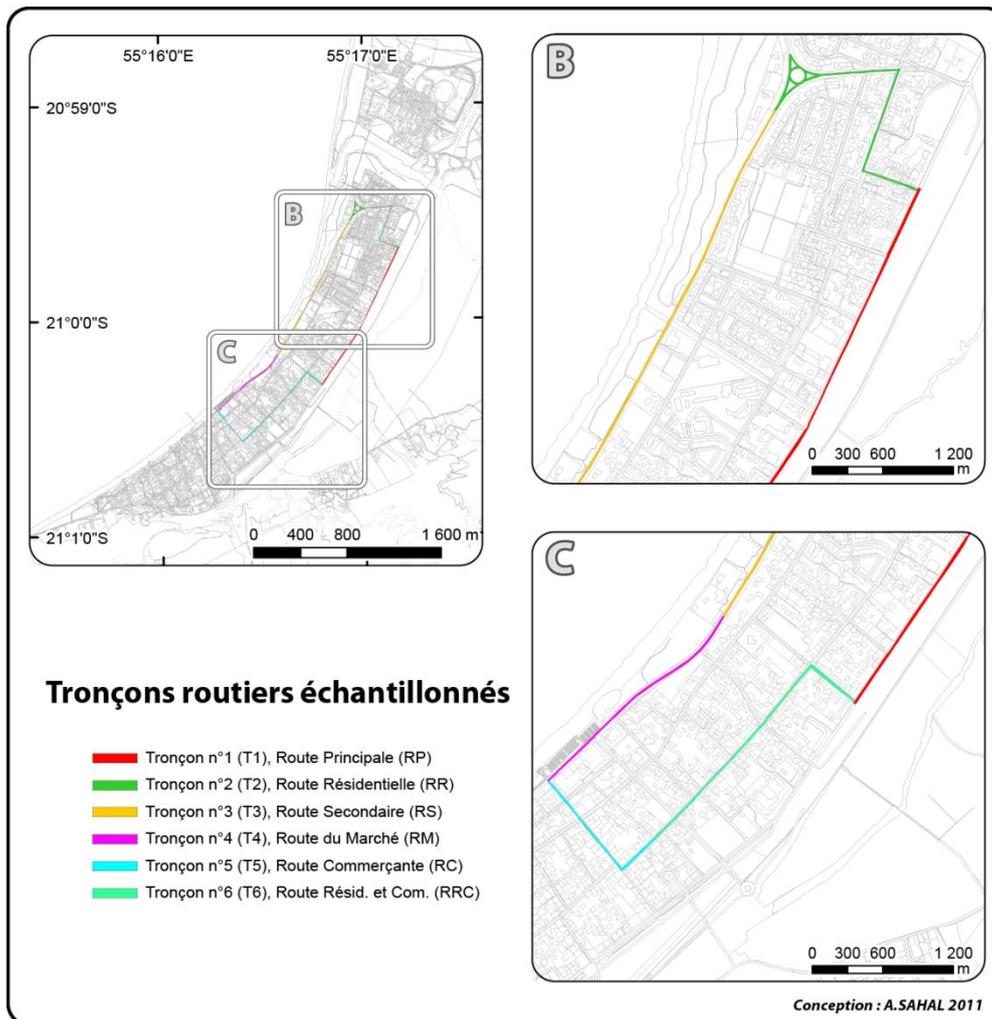


Figure 66. Tronçons routiers échantillonnés à Saint-Paul pour le peuplement des trottoirs.

Sur le terrain, on sillonne les tronçons échantillonnés, ainsi que certains ERP que l'on considère comme représentatifs. On obtient une fréquentation moyenne pour chaque tronçon et pour chaque type d'ERP échantillonné, intégrant une caractérisation qualitative des individus (Tableau 21).

Tableau 21. Fréquentation moyenne des tronçons et des ERP échantillonnés aux jours et horaires des scénarios d'enjeu SC2 et SC3.

MOYENNE PASSAGE (N-1, N, N+1) SUR 2 JOURS DE SEMAINE (SC2)												
Quantification et qualification de la fréquentation des échantillons												
Tronçon		VOIT	CAR	UTI	BB	ENF	ADO	ADU	GRO	VIEU	SPORT	TOTAL piétons
T1	RP	36,50	1,00	0,83	0,00	0,17	1,17	5,33	0,33	1,50	0,20	8,70
	Arrêt de bus		1,00		0,00	0,00	4,33	9,00	0,33	0,00	0,00	13,67
T2	RR	7,17	0,33	0,17	0,33	1,00	0,67	6,33	3,67	1,83	0,17	14,00
T3	RS	14,67	0,17	0,50	0,33	0,33	2,33	5,50	0,33	0,83	0,33	10,00
	AIRJEU				0,50	1,83	0,50	2,00	0,33	0,17	0,00	5,33
	ESPN	15,00			0,20	17,20	0,40	3,00	0,80	1,00	1,20	23,80
	SPORT (tennis)				0,00	4,33	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	4,50
	SPORT (piscine)				0,00	39,83	2,00	3,83	0,00	0,00	0,00	45,67
T4	RM	12,33	0,33	0,50	2,00	0,67	1,17	17,83	2,67	2,33	0,20	26,87
	BAR				0,00	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00	0,00	2,50
	ESPN				0,40	12,17	0,60	24,50	0,00	2,60	0,00	40,27
T5	RC	10,00	0,17	0,17	4,00	2,00	7,33	54,50	5,83	14,00	1,00	88,67
T6	RRC	8,83	0,17	0,00	0,67	0,67	2,00	10,67	1,83	3,00	0,50	19,33
	TOTAL	104,50	3,17	2,17	8,43	80,20	22,50	145,17	16,13	27,27	3,60	
												TOTAL piétons
												303,30

MOYENNE PASSAGE (N-1, N, N+1) SUR 2 VENDREDIS (SC3)												
Quantification et qualification de la fréquentation des échantillons												
Tronçon		VOIT	CAR	UTI	BB	ENF	ADO	ADU	GRO	VIEU	SPORT	TOTAL piétons
T1	RP	40	1	1	0,33	0,33	0	5,67	1	0,83	0,17	8,33
	Arrêt de bus		1		0	0	1,50	1	1	0	0	3,50
T2	RR	7,50	0	0,67	0,33	0,67	0,50	12,50	1,67	3,67	0,50	19,83
T3	RS	20,17	0,17	1	0,33	4	1,50	12,33	1,17	1,83	1,67	22,83
	AIRJEU	0	0	0	0,60	1,40	0	2,40	0,20	0,40	0	5
	ESPN	15			1	64	37	36	0	0	44	182
	SPORT (tennis)				0	0	0	2	0,50	0	2,33	4,83
	SPORT (piscine)				0	29,17	0	6,17	0	0	0,50	35,83
T4	RM	QAQ	0,17	3,33	4	4,33	3,83	88,17	8,33	20,50	0,67	129,83
	BAR				0	0,33	0	7	0	0	0	7,33
	ESPN				0,33	0,17	0,50	11,83	0,50	1,17	0	14,50
T5	RC	QAQ	0	0	7,33	8	8	102,67	21,17	32,17	0,67	180
T6	RRC	9	0,80	0	0,50	0,50	6,67	15	3,83	3,50	0,33	30,33
	TOTAL	91,67	3,13	6	14,77	112,90	59,50	302,73	39,37	64,07	50,83	
												TOTAL piétons
												644,17

Une synthèse graphique des effectifs et de leurs caractéristiques physiques (qualification) est produite (Figure 67).

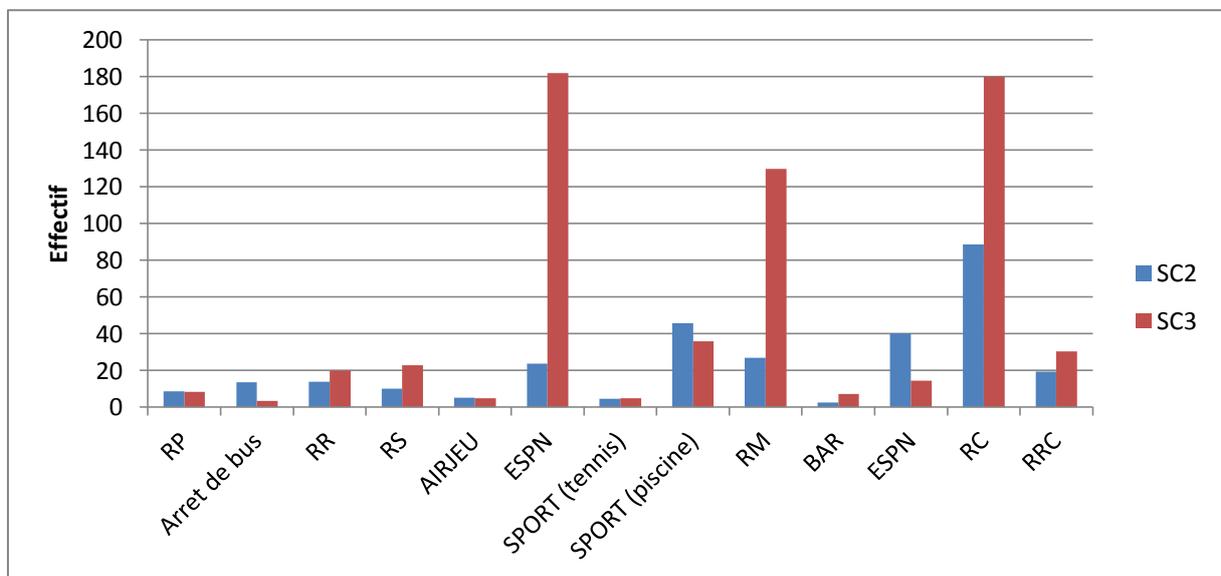
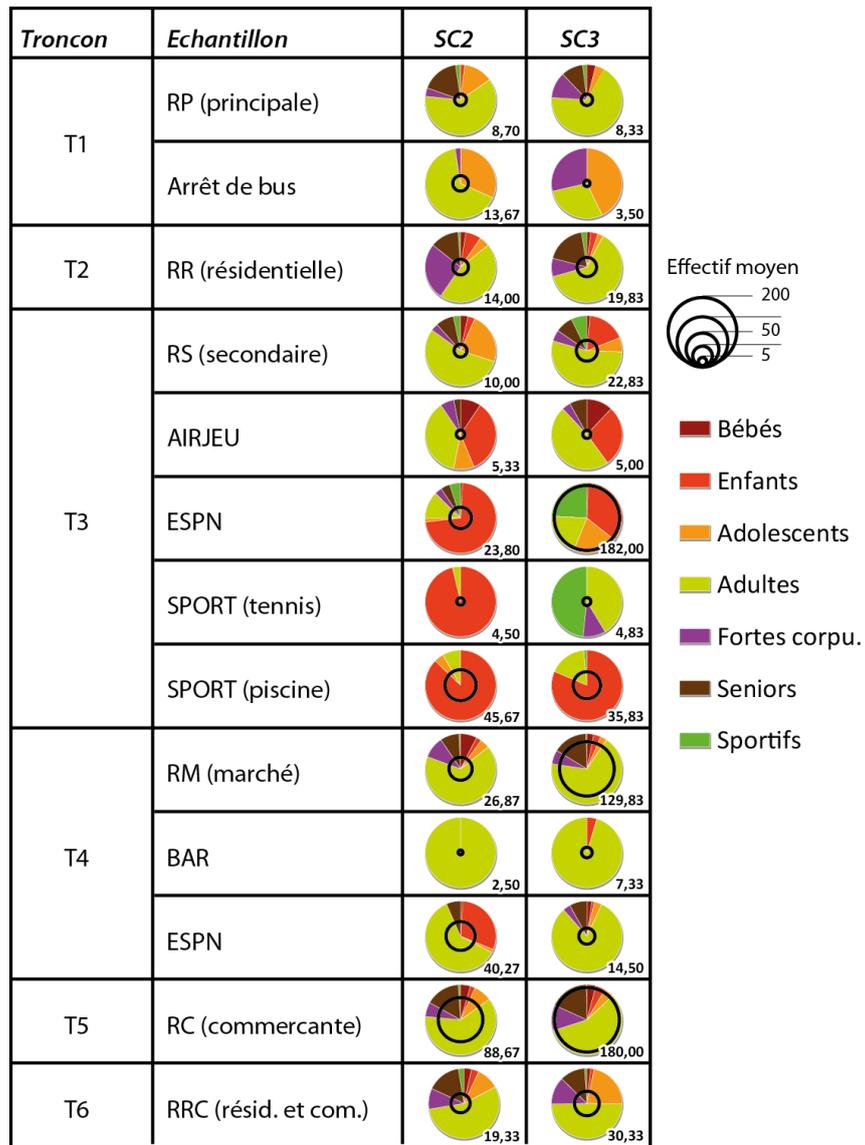


Figure 67. Comparatif quantitatif et qualitatif des effectifs comptés pour les deux scénarios diurnes.

En termes qualitatifs, le tronçon T3, situé en bord de mer (cf. Figure 66, p. 106) est celui qui rassemble le plus d'enfants, population la plus vulnérable. En termes quantitatifs, on observe clairement une hausse importante de la fréquentation des espaces de plein air littoraux, de la rue du marché (Quai Gilbert) et des rues commerçantes lors des comptages le vendredi à 10h (SC3).

Sur le terrain, on observe que le marché est le lieu où la densité des enjeux humains est la plus importante pour SC3 (c'est d'ailleurs cette spécificité qui a conduit au choix de ce scénario). Afin de calculer cette densité, on utilise la méthode photographique utilisée dans le restaurant *Quai Gilbert* (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, p. **Erreur ! Signet non défini.**) : un appareil photo est installé sur le toit d'un des restaurants du marché (Figure 68) et photographie toutes les 15 minutes un secteur dont la surface est connue (95m²).

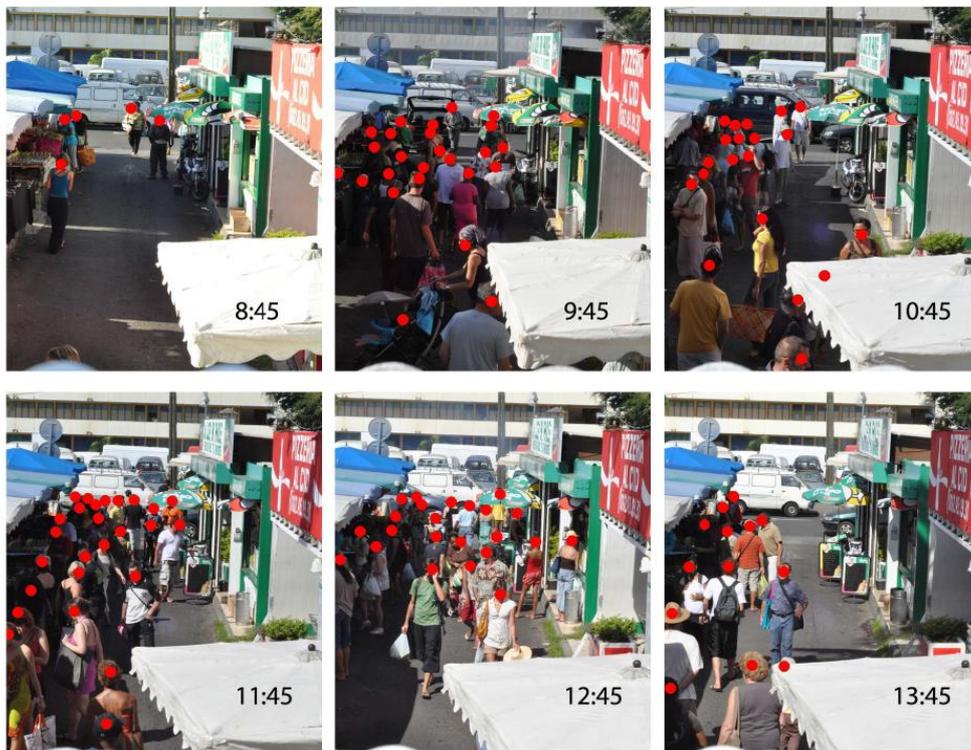


Figure 68. Localisation du toit utilisé pour la mesure de la densité de population sur le marché de Saint-Paul et exemples de clichés obtenus.

Sources : données IGN BD Carto modifiées et Mairie de Saint-Paul, clichés A. Sahal 2010, fonds de carte IGN BD Raster et BD Ortho 2008.

Les courbes de fréquentation obtenues sont en accord avec celles du Quai Gilbert, illustrant le transfert des populations de l'espace forain vers les restaurants à l'heure du déjeuner (Figure 69).

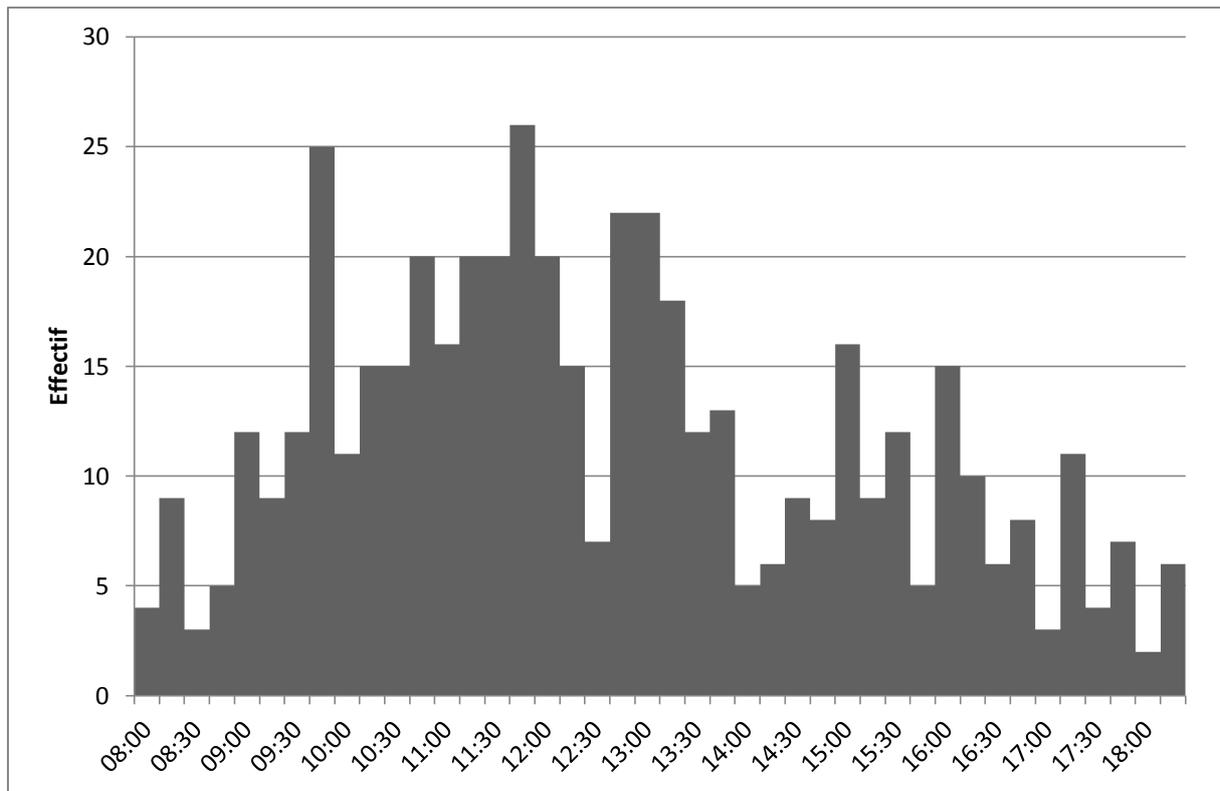


Figure 69. Fréquentation humaine dans la zone échantillonnée du marché de Saint-Paul (exemple de la journée du vendredi 21 mai 2010).

Une densité moyenne horaire est calculée en se basant sur trois jours de comptage (vendredis). La densité moyenne à 10h est appliquée à l'ensemble des espaces piétons du marché.

On aboutit à un peuplement des espaces de plein air pour les scénarios SC2 (Figure 70) et SC3 (Figure 71). Concernant le scénario de nuit SC1, les espaces de plein air sont considérés comme vides.

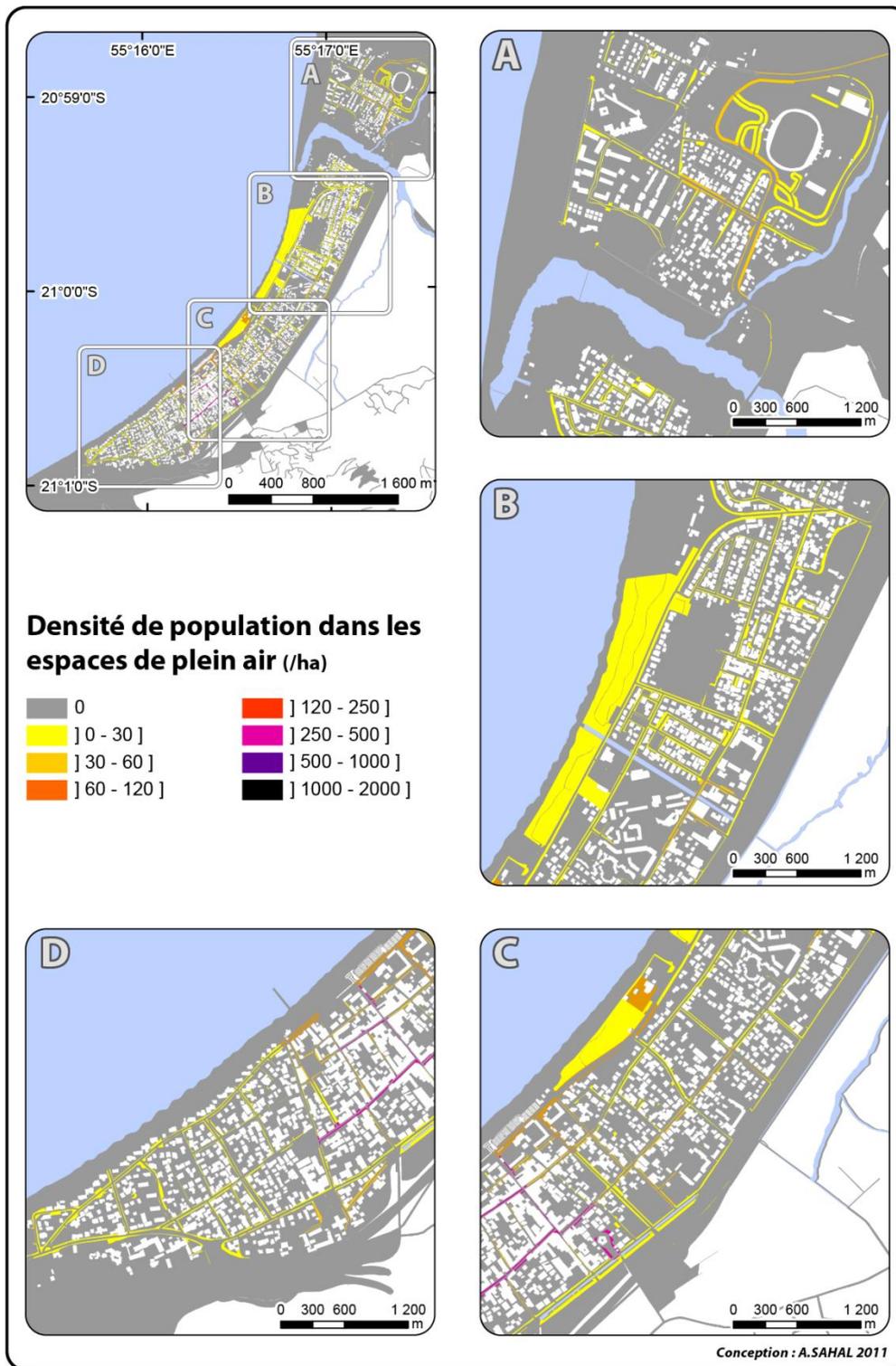


Figure 70. Densité de population dans les espaces de plein air de Saint-Paul pour le scénario SC2 (jour ouvrable, 15h) à Saint-Paul (La Réunion).

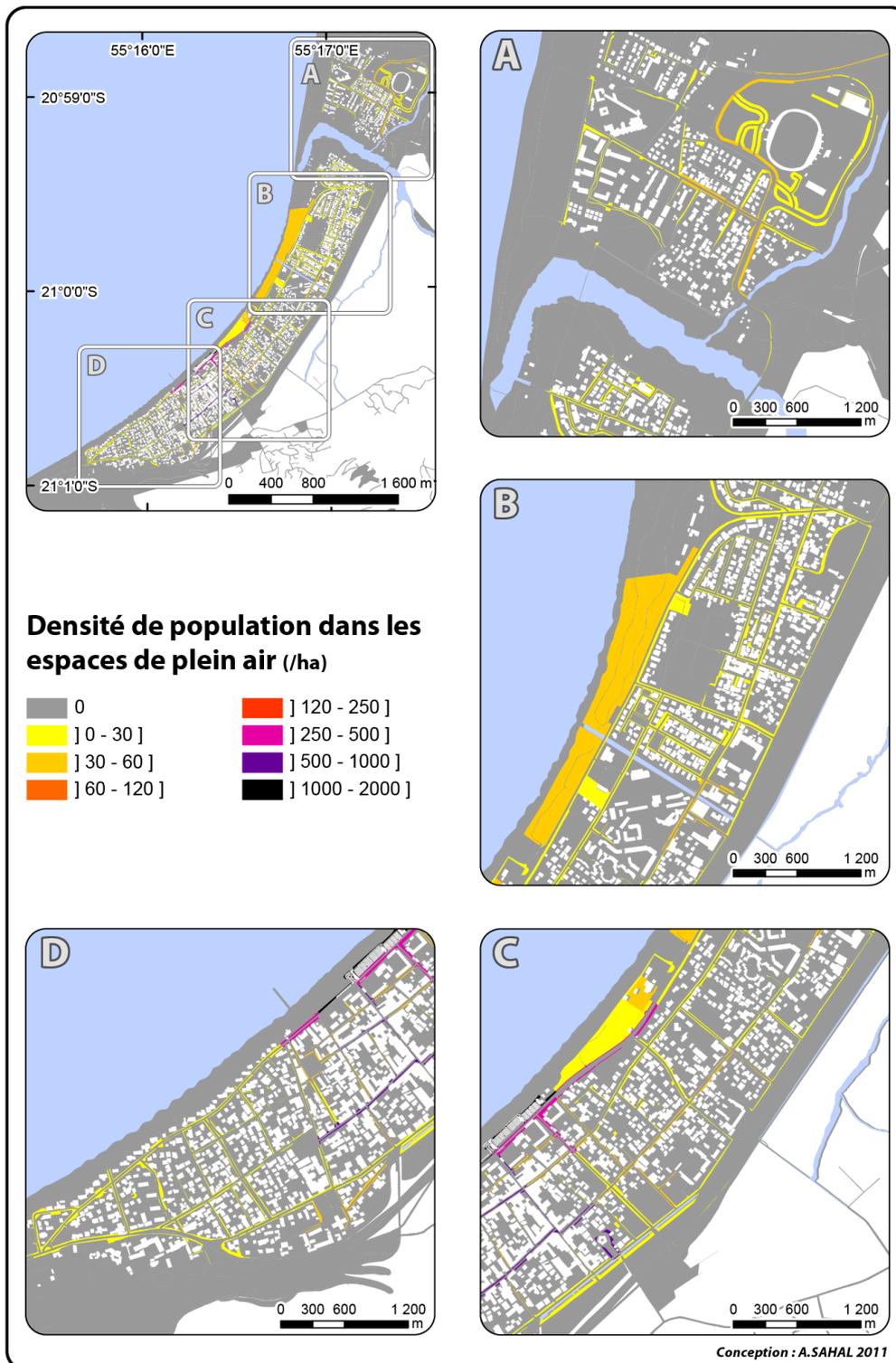


Figure 71. Densité de population dans les espaces de plein air de Saint-Paul pour le scénario SC3 (vendredi, jour de marché, 10h) à Saint-Paul (La Réunion).

On peut désormais cartographier l'ensemble des enjeux humains présents dans les bâtiments et dans les espaces de plein air pour les différents scénarios (Figure 72).

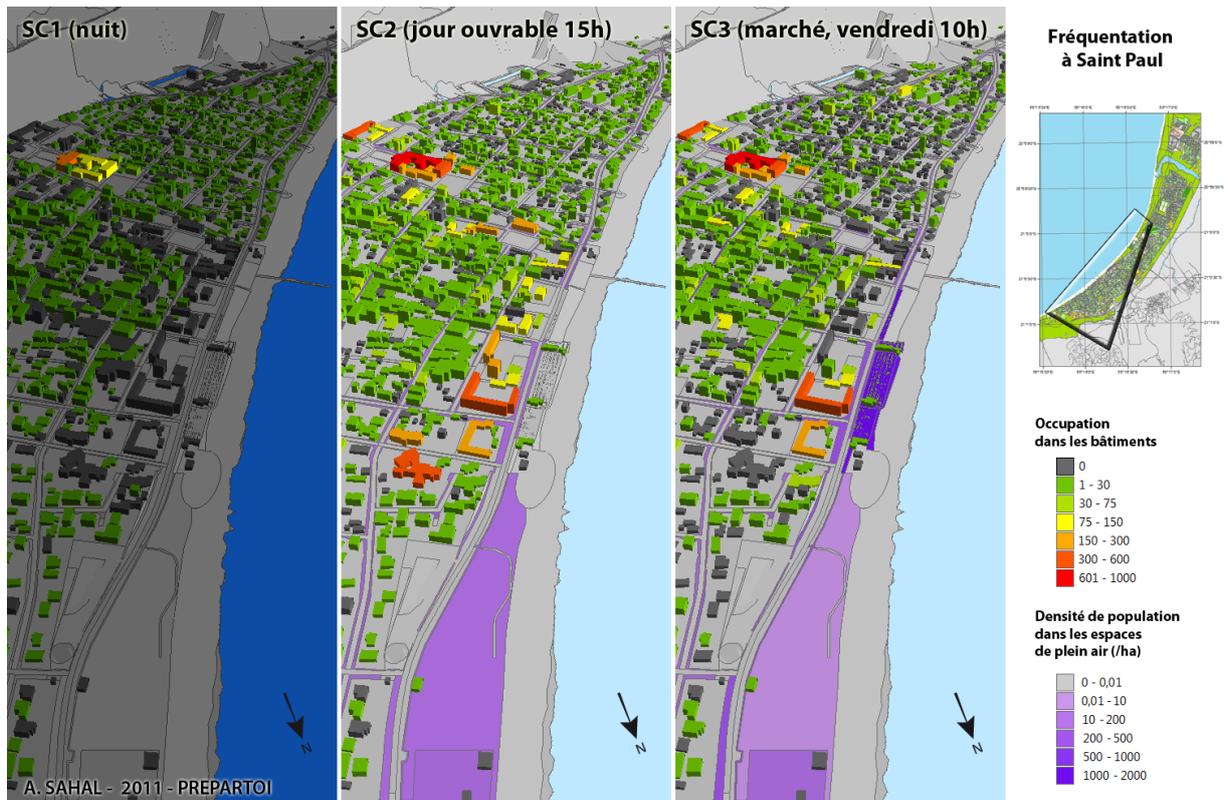


Figure 72. Vue 3D de la fréquentation des bâtiments et des espaces de plein air selon les 3 scénarios d'enjeux (zoom sur le centre ville de l'agglomération de Saint-Paul).

L'hôpital de Saint-Paul ressort clairement sur cette visualisation du centre-ville : quelque soit le scénario, il rassemble une population nombreuse (en orange et jaune sur la cartographie SC1). Le scénario SC3 montre des bâtiments moins pleins qu'un jour ouvrable « normal », mais présente des espaces de plein air bien plus denses.

Enfin, on caractérise chaque espace par sa densité en débris au titre de facteur aggravant des vulnérabilités humaine et structurelle en se basant sur les observations faites sur le terrain (Figure 73).

2.1.3.4 La prise en compte des débris



Figure 73. Densité de débris dans les espaces de plein air de Saint-Paul.

L'agglomération de Saint-Paul apparaît globalement dense en débris : les nombreux espaces boisés qui entourent la ville en constituent la source principale, tout comme sa plage de galets.

On attribue la valeur moyenne des Hmax et des Vmax à chaque bâtiment (valeurs des pixels intersectant le contour du bâtiment).

En utilisant les matrices d'endommagement du bâti on réalise une cartographie du taux de destruction des bâtiments dans le cas d'un tsunami comparable à celui de 1833 (Figure 74).

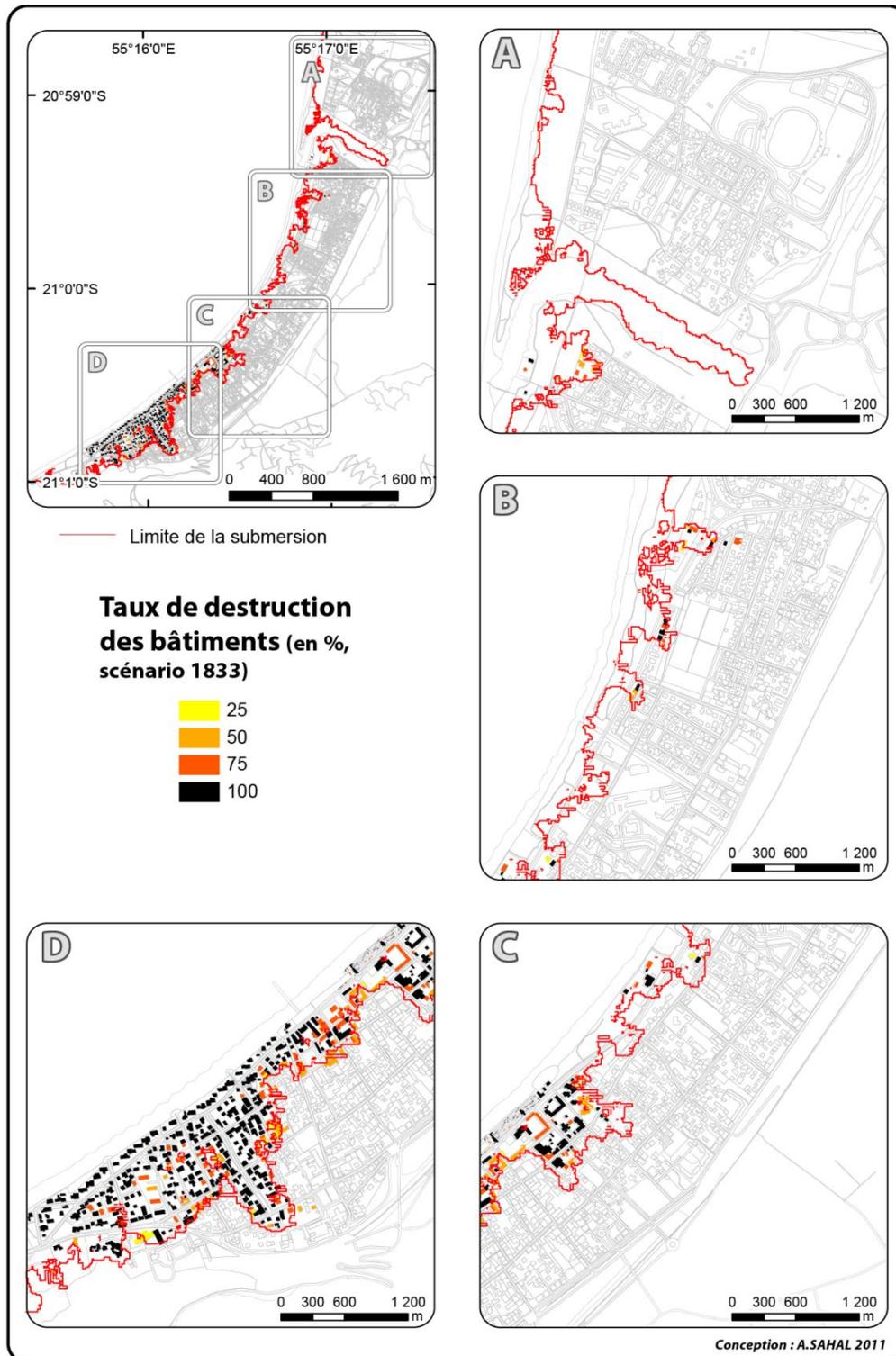


Figure 74. Taux de destruction des bâtiments pour un aléa de type 1833 à Saint-Paul.

Selon ce scénario d'aléa, les logements individuels du littoral apparaissent les plus affectés par cette submersion. Si la plupart des habitations sont complètement détruites, le taux de destruction ne décroît pas de manière régulière vers l'intérieur des terres. Même si l'énergie du tsunami diminue au cours de sa propagation à terre, son intensité demeure ici importante. Seuls quelques bâtiments de grande taille semblent résister à l'aléa (par exemple l'école en face du marché, en rouge dans l'angle nord-est du cadre D). Aucun bâtiment présent dans la zone submergée n'apparaît complètement indemne.

On multiplie la probabilité de décès dans les bâtiments par la population présente dans ces derniers pour le scénario d'enjeux SC3 (Figure 75) afin d'obtenir un indice de risque.

La cartographie de cet indice de risque montre que certains bâtiments de vulnérabilité structurelle faible présentent une vulnérabilité humaine importante. C'est notamment le cas de l'école précitée : bien que sa destruction ne soit pas totale (75%), les pertes humaines potentielles associées représentent entre 200 et 350 individus.

Concernant les espaces de plein air, une grille au maillage identique à celle utilisée pour la modélisation est créée ($\sim 20 \text{ m}^2$). Chaque pixel est peuplé par la population qui y est présente selon le scénario SC3 (densité de population multipliée par la surface du pixel). On mesure la probabilité de décès dans chaque pixel avec les matrices de probabilité de décès. Enfin, on multiplie la probabilité de décès par le nombre d'individus présents dans chaque pixel au titre d'indice de risque. On aboutit à une cartographie des pertes humaines potentielles pour les espaces de plein air (Figure 76). Par souci de clarté, la densité pour 20 m^2 (surface d'un pixel) est rapportée à une densité par hectare.

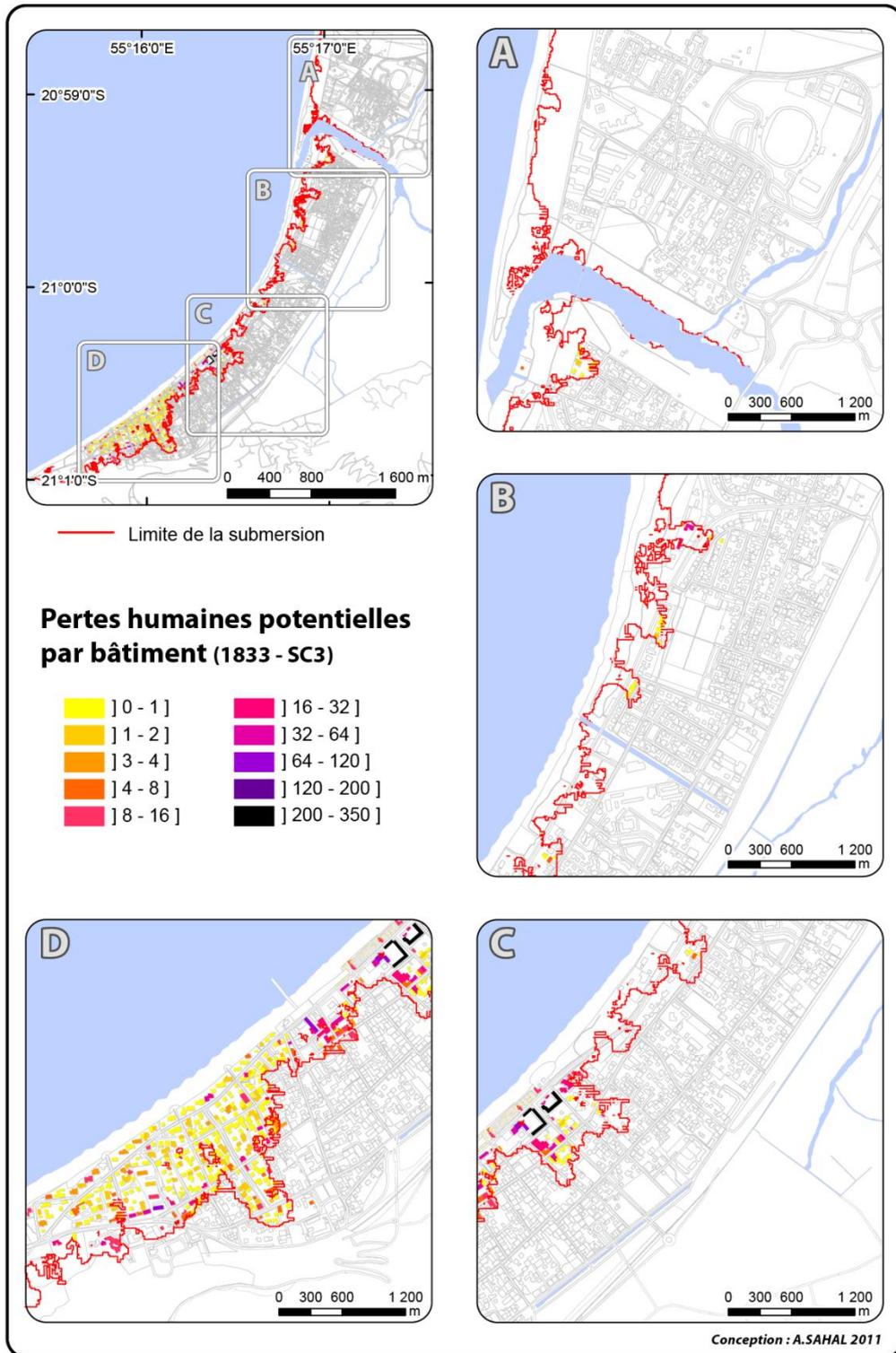


Figure 75. Pertes humaines potentielles par bâtiment pour un aléa de type 1833 et un scénario d'enjeu SC3 (vendredi, jour de marché à 10h) à Saint-Paul (La Réunion).

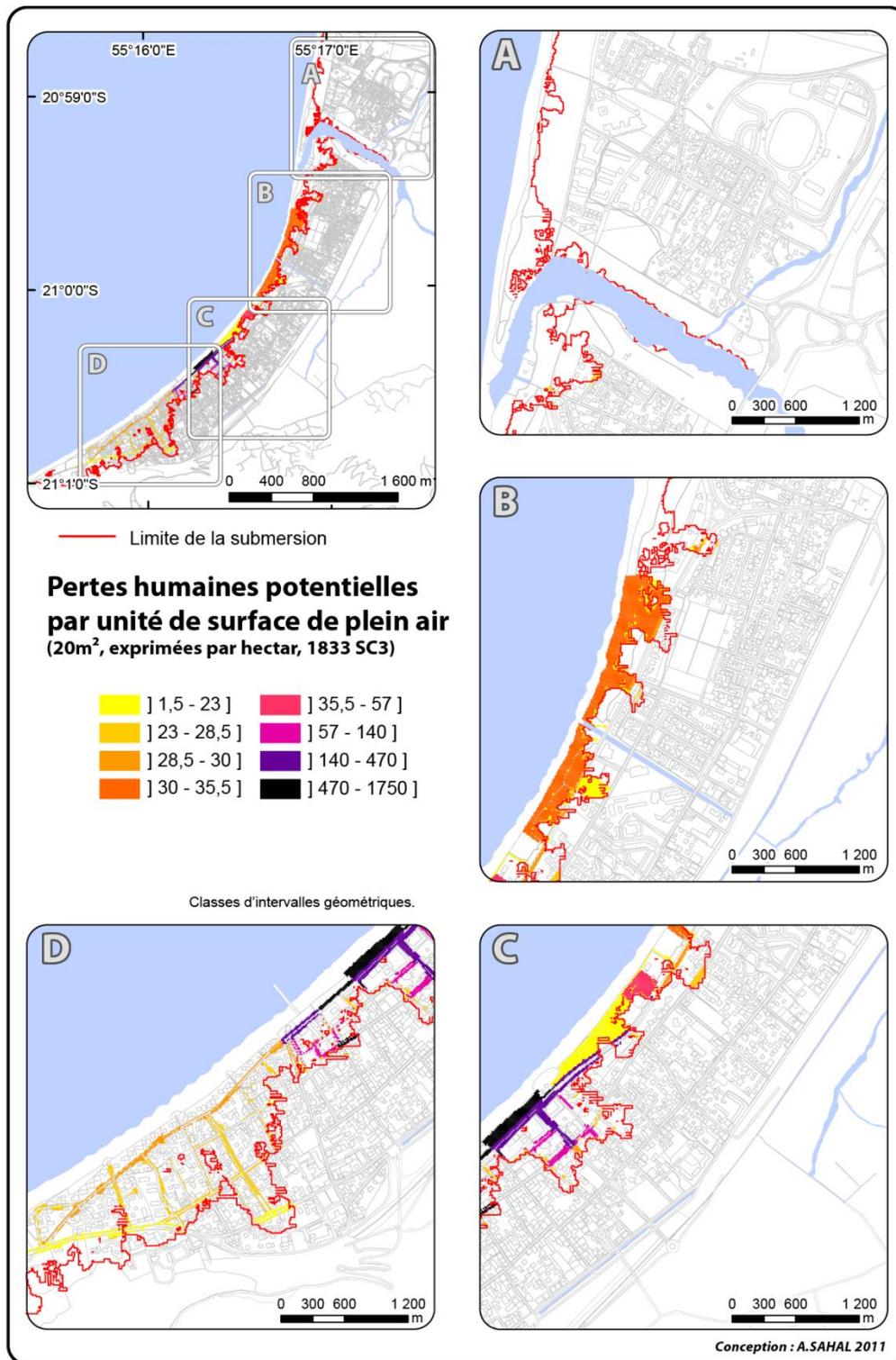


Figure 76. Pertes humaines potentielles dans les espaces de plein air pour un aléa de type 1833 et un scénario d'enjeu SC3 (vendredi, jour de marché à 10h) à Saint-Paul (La Réunion).

Cette quantification spatiale des pertes humaines potentielles ne doit pas être considérée comme telle compte tenu des nombreuses incertitudes inhérentes à son évaluation. Il s'agit ici de mettre en évidence la variabilité spatiale du risque et d'évaluer les contrastes de niveaux de risque à travers un

indice de risque. Un bilan des probabilités de décès pour ce scénario permet toutefois d’avoir une idée des pertes humaines possibles intégrant cette incertitude (Tableau 22).

Tableau 22. Nombre d’individus potentiellement affectés par classe de probabilité de décès pour un événement de type 1833 un jour de marché à Saint-Paul.

Probabilité de décès	Individus dans les bâtiments	Individus dans les espaces de plein air
100%	2096	2369
75%	859	34
50%	206	76
25%	105	21

Les probabilités de décès apparaissent moins nuancées dans les espaces de plein air, illustrant le rôle protecteur des bâtiments.

2.2 Perception du risque à Mayotte : RETEX des évacuations post 2004 (LGP)

Cette étude a suivi trois grands objectifs :

1. Evaluer le comportement des habitants de Mayotte face au risque de tsunami ;
2. Comparer ces comportements au risque évalué par les scientifiques ;
3. Intégrer ces comportements dans les plans de secours.

2.2.1 Méthode

Cette étude a été réalisée en deux phases :

Une première phase **d’acquisition des données**, sous par deux approches complémentaires :

(i) Cartographie participative

Celle-ci a répondu à une double démarche :

- rétrospective : les habitants sont invités à un retour d’expérience en représentant les trajets qu’ils ont empruntés lors des évacuations du 28 mars 2005.
- prospective : les habitants sont ensuite invités à représenter les trajets qu’ils pourraient emprunter depuis leur lieu de travail et depuis leur domicile en cas de nouvelle alerte au tsunami. Il s’agit ici d’étudier le gain d’expérience des habitants.

Une carte schématique a d’abord été réalisée. C’est sur elle que les habitants pouvaient tracer les trajets qu’ils avaient empruntés lors des évacuations du 28 mars 2005 mais aussi ceux qu’ils emprunteraient en cas de nouvelle alerte depuis leur domicile et depuis leur lieu de travail. C’est la raison pour laquelle cette carte devait être lue facilement même par les habitants qui avaient

peu l'habitude de lire des cartes. Elle devait également contenir des informations permettant aux habitants de se repérer rapidement.

(ii) Approche par questionnaire. Il s'agissait de concevoir un questionnaire relativement court afin de compléter la carte schématique. Cependant il devait également permettre de comprendre la perception du risque des 214 habitants interrogés. Le logiciel Sphinx a été utilisé pour concevoir le questionnaire. Il permet de le créer et de le modifier en ajoutant des variables, ce qui a été nécessaire après le test du questionnaire sur le terrain. De plus, Sphinx permet de saisir les réponses récoltées sur le terrain sous plusieurs modes (manuel ou rapide). Enfin, ce logiciel permet un traitement statistique des données et la réalisation de graphiques et autres tableaux.

La version finale du questionnaire (Tableau 23) présentait un bon équilibre entre les questions concernant la perception du risque de tsunami qu'entretenaient les habitants et les questions qui permettaient de compléter la carte schématique. A savoir, les questions concernant les points de départs et les points d'arrivées des trajets, les principales voies empruntées, quand les habitants éprouvaient des difficultés à se remémorer avec exactitude les trajets qu'ils avaient effectué.

Tableau 23. Questionnaire de perception du risque tsunami à Petite-Terre.

Vulnérabilité au risque de tsunami à Petite-Terre, Mayotte

Mars-Avril 2011 - PREPARTOI

Marie Coquet

1. Date de l'interview

La réponse est obligatoire.

2. Depuis combien de temps habitez vous à Petite Terre?

3. Pensez vous qu'un tsunami puisse engendrer des dommages à Mayotte?
 1. Oui 2. Non 3. Ne sais pas

4. Selon vous, est ce qu'un tsunami a déjà provoqué des dommages à Mayotte?
 1. Oui 2. Non 3. Ne sais pas

5. Avez vous peur des tsunamis à Mayotte?
 1. Pas du tout 2. Un peu 3. Modérément 4. Beaucoup

6. Avez vous déjà évacué suite à une alerte au tsunami à Petite Terre?
 1. Oui 2. Non

7. Si non, pourquoi?
 1. Je ne savais pas où me réfugier
 2. On ne peut rien faire contre un tsunami
 3. Le risque n'était pas assez important
 4. J'habite déjà suffisamment haut
 5. Je n'étais pas là
 6. Raison religieuse
 7. Ne sais pas

8. En quelle année?
 1. 2004 2. 2005 3. Autre 4. Ne sais pas
Vous pouvez cocher plusieurs cases (3 au maximum).

9. A quelle moment de la journée avez vous été alerté?
 1. Matin 2. Après Midi 3. Soir
 4. Nuit 5. Ne sais pas

10. Où étiez vous lors de l'alerte? Localisez sur la carte

11. Comment avez vous évacué?
 1. A pieds 2. En 2 roues 3. En voiture
 4. Autre

12. Au moment de l'évacuation, qu'avez vous emporté?
 1. Effets personnels 2. Argent 3. Matelas
 4. Nourriture 5. Tente 6. Autre
 7. Rien
Vous pouvez cocher plusieurs cases.

13. Où avez vous évacué? Indiquez les principales voies empruntées et le point d'arrivée sur la carte.

14. A partir de quelle altitude pensez vous être en sécurité?
 1. <5m
 2. 5-10
 3. 10-15
 4. 15-20
 5. 20-25
 6. 25-30
 7. >30m
 8. Plus je monte haut plus je suis en sécurité
 9. Ne sais pas

15. En cas de nouvelle alerte, où vous rendriez vous depuis votre lieu de travail? Indiquez les principales voies empruntées et le point d'arrivée sur la carte.

16. En cas de nouvelle alerte, où vous rendriez vous depuis votre domicile? Indiquez les principales voies empruntées et le point d'arrivée sur la carte.

17. Pensez vous qu'un système d'alerte au tsunami existe à Mayotte?
 1. Oui 2. Non 3. Ne sais pas

18. Si vous avez répondu oui à la question précédente, connaissez vous les consignes à suivre en cas d'alerte?
 1. Oui 2. Non

19. Par qui et comment aimeriez vous être alerté?

20. Adresse

21. Sexe
 1. Masculin 2. Féminin

22. Quelle est votre année de naissance ?

23. Catégorie socio-professionnelle
 1. Agriculteur
 2. Commerçant, artisan
 3. Cadre.Prof.Intellectuelle.Sup.
 4. Prof.Intermédiaire
 5. Employé
 6. Ouvrier
 7. Retraité
 8. Inactif, Autre

24. Echelle d'intérêt risque
 1. Pas du tout intéressé 2. Peu intéressé
 3. Assez intéressé 4. Très intéressé

La seconde phase a été celle du traitement des données et de leur représentation.

Les résultats des cartes participatives réalisées par les habitants sur support papier ont été numérisés et intégrés dans un Système d'Informations Géographiques (SIG) : points de départ et d'arrivées (représentation ponctuelle) et tronçons routiers suivis (linéaire) (Figure 77).

Les résultats des questionnaires ont été traités statistiquement puis représentés sous forme graphique.

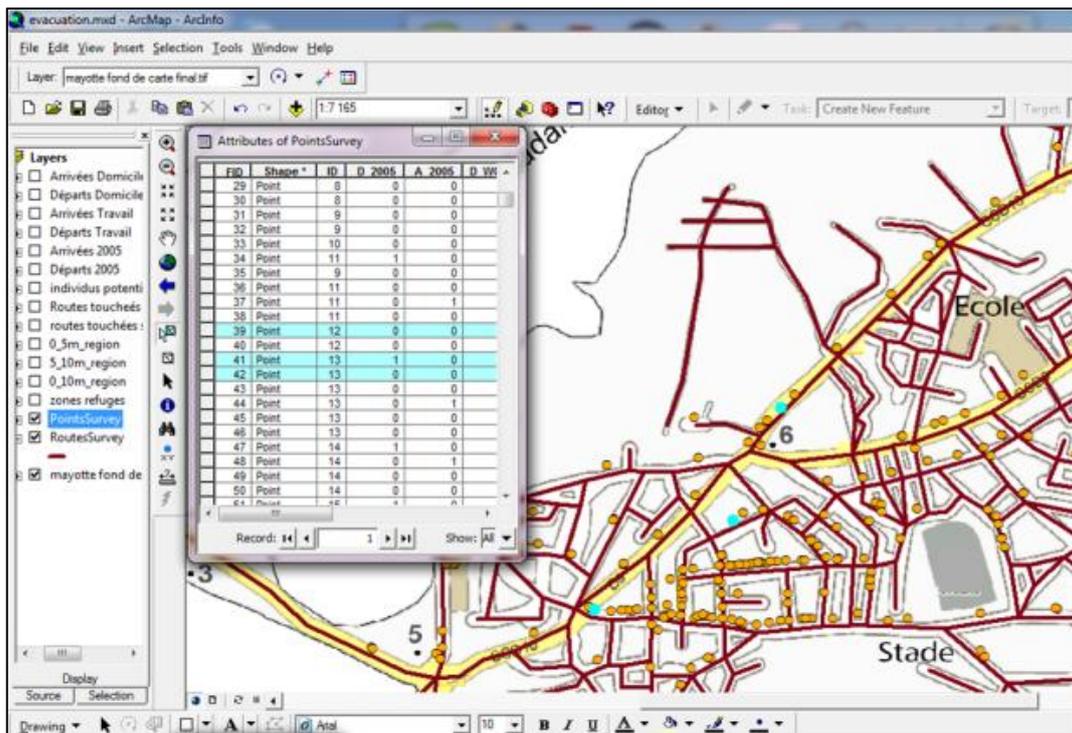


Figure 77. Points de départ et d'arrivée et tronçons routiers.

2.2.2 Résultats

2.2.2.1 Perception des risques par les populations

D'une manière générale, la perception du risque de tsunami à Mayotte n'est pas bonne. Cependant le risque n'est pas sous-évalué voire inconnu, comme c'est souvent le cas ailleurs, mais ce dernier est au contraire surévalué, induisant des réactions inappropriées.

En premier lieu, la très grande majorité des 214 personnes interrogées (85%) est consciente qu'un tsunami puisse engendrer des dommages à Mayotte (Figure 78A). En revanche, seulement 10% des répondants savent que des dommages ont déjà eu lieu dans cet archipel (Figure 78B).

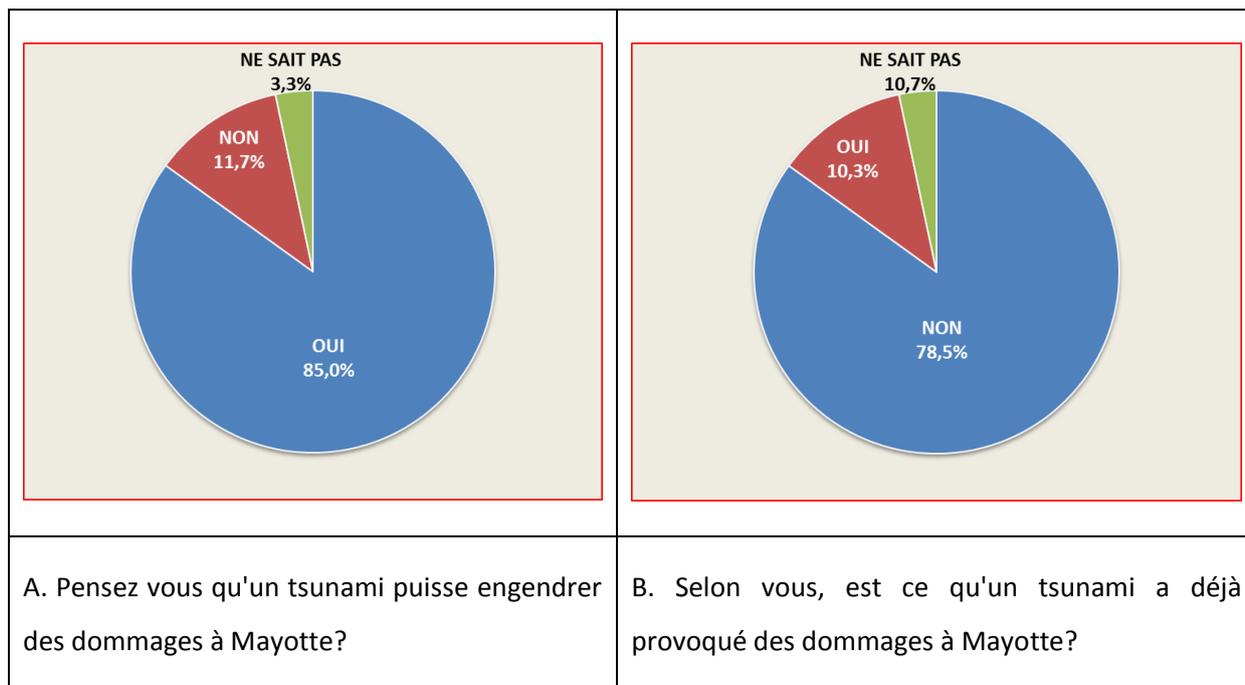


Figure 78. Perception du risque (A) et connaissance des impacts des tsunamis passés (B) à Mayotte.

Seulement 26,2% des habitants interrogés, soit un peu plus d'une cinquantaine de personnes, ont déjà évacué suite à une alerte au tsunami à Petite Terre, la plupart après le séisme de Nias en mars 2005. Les raisons de la non-évacuation évoquées par autres personnes interrogées sont synthétisées sur la Figure 79. Un tiers de celles-ci n'ont pas su quoi répondre car beaucoup ont oublié et un bon quart n'était pas présent sur l'île au moment de l'alerte. Un bon quart a jugé – à juste titre – que le risque n'était pas assez important ou qu'ils étaient suffisamment hauts pour être en sécurité. Des réactions de fatalisme ont été aussi relevées (« on ne peut rien faire contre un tsunami », raisons religieuses). Enfin, près de 8% des personnes n'ont pas évacué par un manque d'information, ne sachant pas où se réfugier.

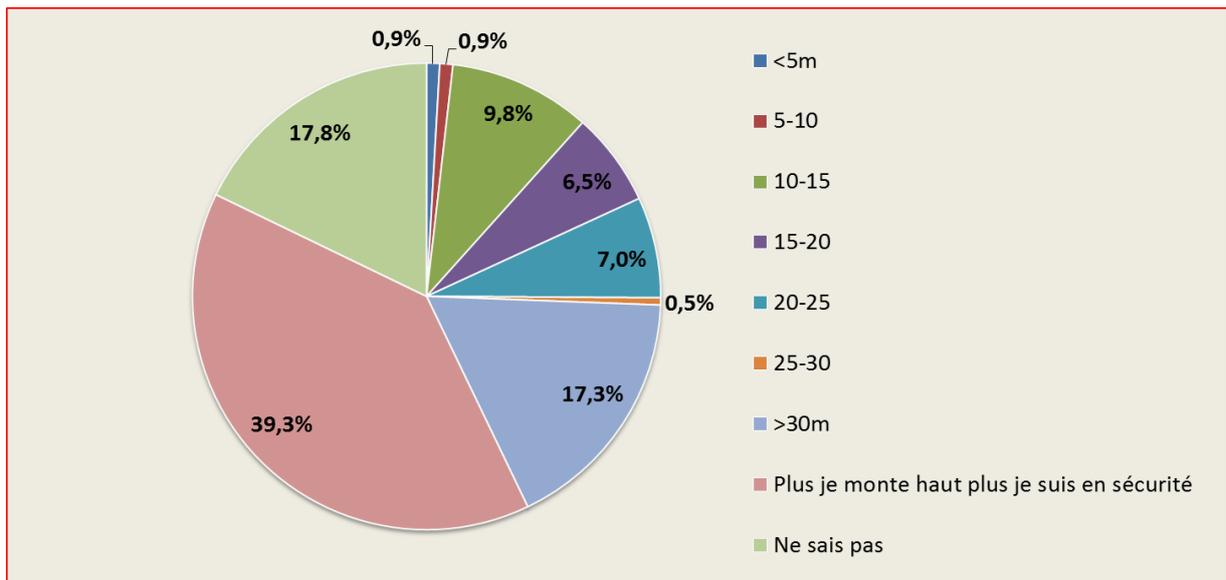
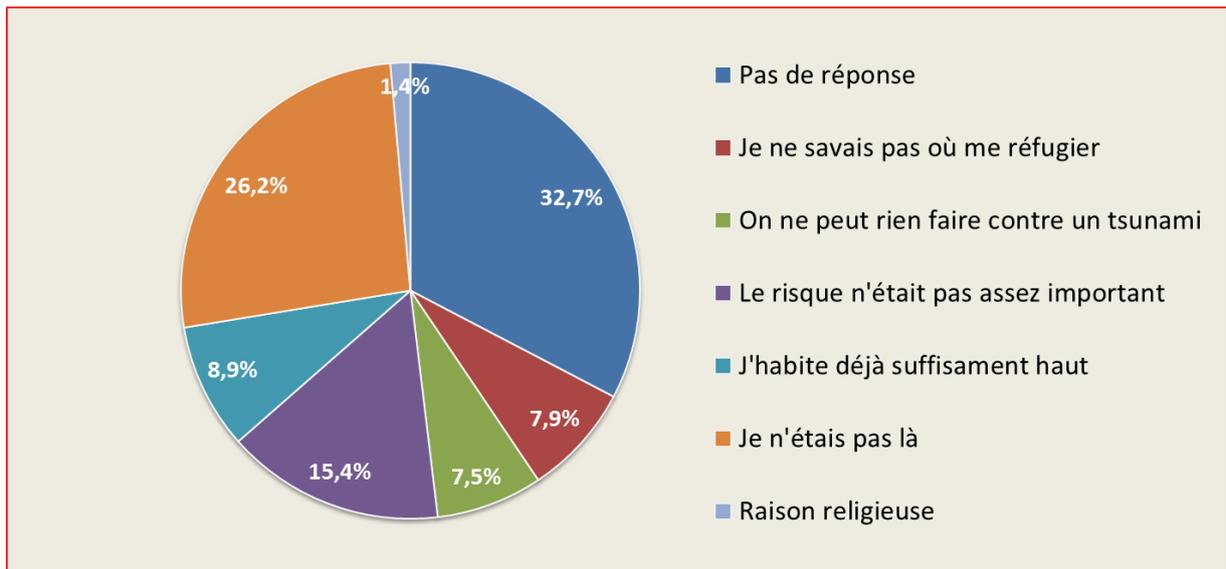


Figure 79. Altitude minimale pour être en sécurité selon les habitants de Petite-Terre.

La question « A partir de quelle altitude pensez-vous être en sécurité ? » a été très révélatrice de la connaissance et de la perception du phénomène tsunami par les habitants de Petite-Terre (Fig. X). La grosse majorité (près de 40%) a répondu avoir ou vouloir monter le plus haut possible pour se sentir en sécurité, et plus de 17% à plus de 30 m de haut. En se basant sur une évaluation scientifique de l'aléa tsunami, par modélisation ou fondée sur les événements passés, l'aléa est clairement surestimé par les populations locales (sauf en cas d'événement de récurrence plurimillénaire comme un effondrement de flanc du volcan Karthala en Grande-Comores). A l'opposé, les quelques personnes pensant être en sécurité à moins de 5 m d'altitude se mettraient clairement en danger.

2.2.2.2 Cartographie des déplacements en cas d'alerte au tsunami

L'analyse du comportement des habitants lors de l'alerte au tsunami du 22 mars 2005 met clairement en évidence l'existence de zones de refuges spontanées privilégiées (Figure 80). Celles-ci

correspondent tout d'abord à la butte de La Vigie, le point culminant de l'île à 203 m d'altitude. Cette réaction est à mettre en parallèle avec les réponses du questionnaire, qui montrent que les habitants de Mayotte cherchent avant tout les points les plus élevés. A Grande-Terre, certains ont même cherché refuge su Mont Choungui à... 594 m d'altitude ! La seconde zone ayant fait l'objet de refuge spontané à Petite-Terre sont les deux collines séparant Pamandzi de Labattoir, culminant respectivement à 64 et 135 m d'altitude. Enfin la troisième grande zone de refuge fut les rebords du lac Dziani, situé à 70 m d'altitude au nord de l'île. L'accès à tous ces sites a nécessité de nombreux efforts, les 2/3 des personnes interrogées ayant évacué à pied (contre 30% en voiture et les autres en deux roues), en emportant souvent des objets de valeur (parfois même une télévision !).

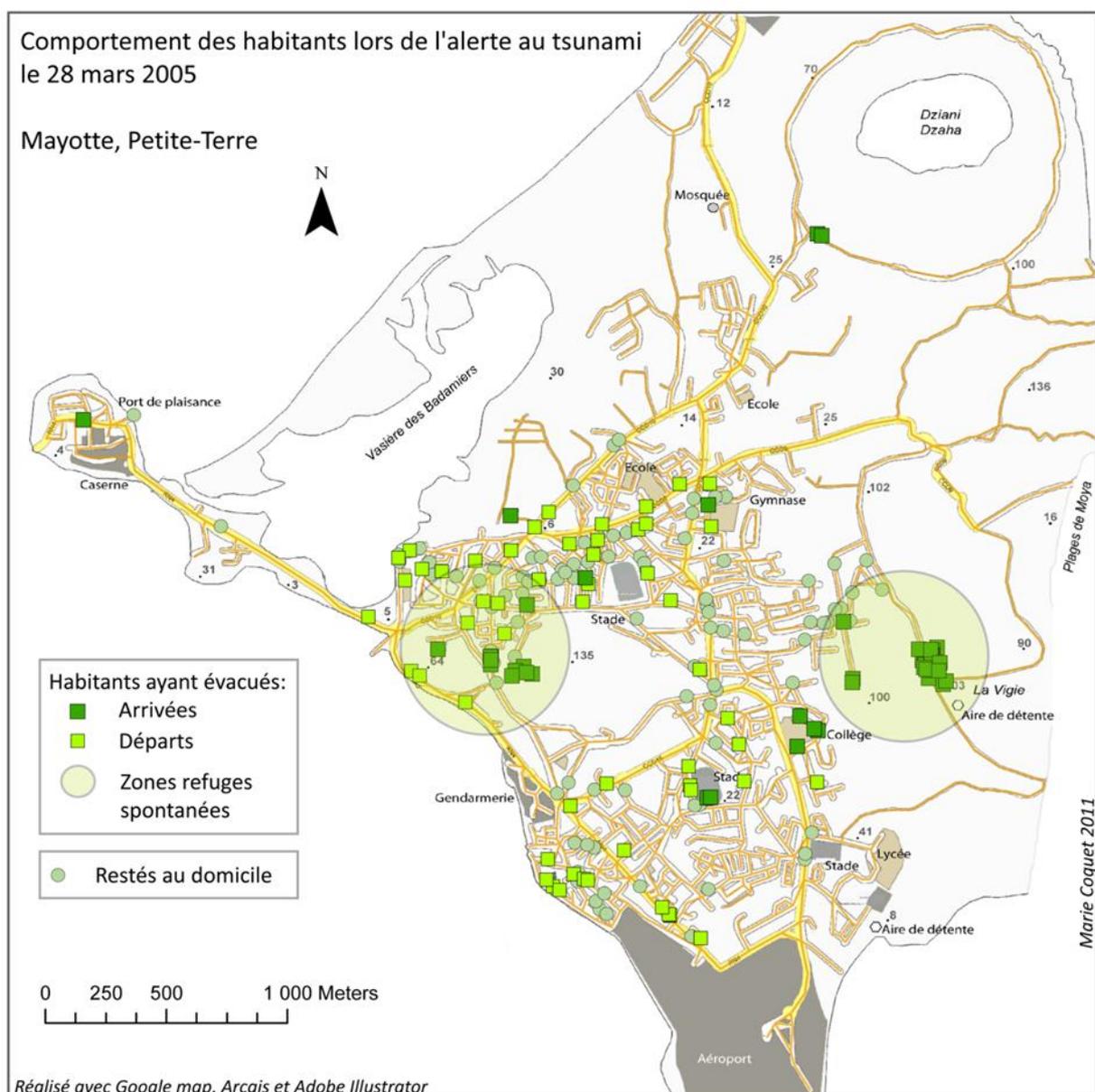


Figure 80. Localisation des zones de départ et des points de refuge spontanément sélectionnés par les habitants de Petite-Terre lors de l'alerte au tsunami du 22 mars 2005.

La cartographie des sites vers lesquels les habitants ont l'intention de se réfugier en cas de nouvelle alerte au tsunami montre des résultats semblables à la précédente. Si une alerte intervient en pleine nuit ou un jour où les habitants sont à leur domicile (Figure 81), les trois sites de refuge principaux seraient, par ordre décroissant de priorité : La Vigie, les collines entre Pamandzi de Labattoir, et enfin les rebords du lac Dziani.

Si une alerte au tsunami intervient en plein jour ouvrable lorsque les gens sont au travail, les sites sélectionnés seraient sensiblement les mêmes (Figure 82), à l'exception du lac Dziani, trop éloigné des lieux de travail. Plus de gens se réfugieraient en plein centre-ville, notamment dans le stade.

Dans les deux cas, les habitants resteront donc fidèles à leur réaction passée, même si celle-ci n'est pas la plus adaptée, car ils n'ont pas encore reçu d'informations concernant les zones de refuge les plus adaptées.

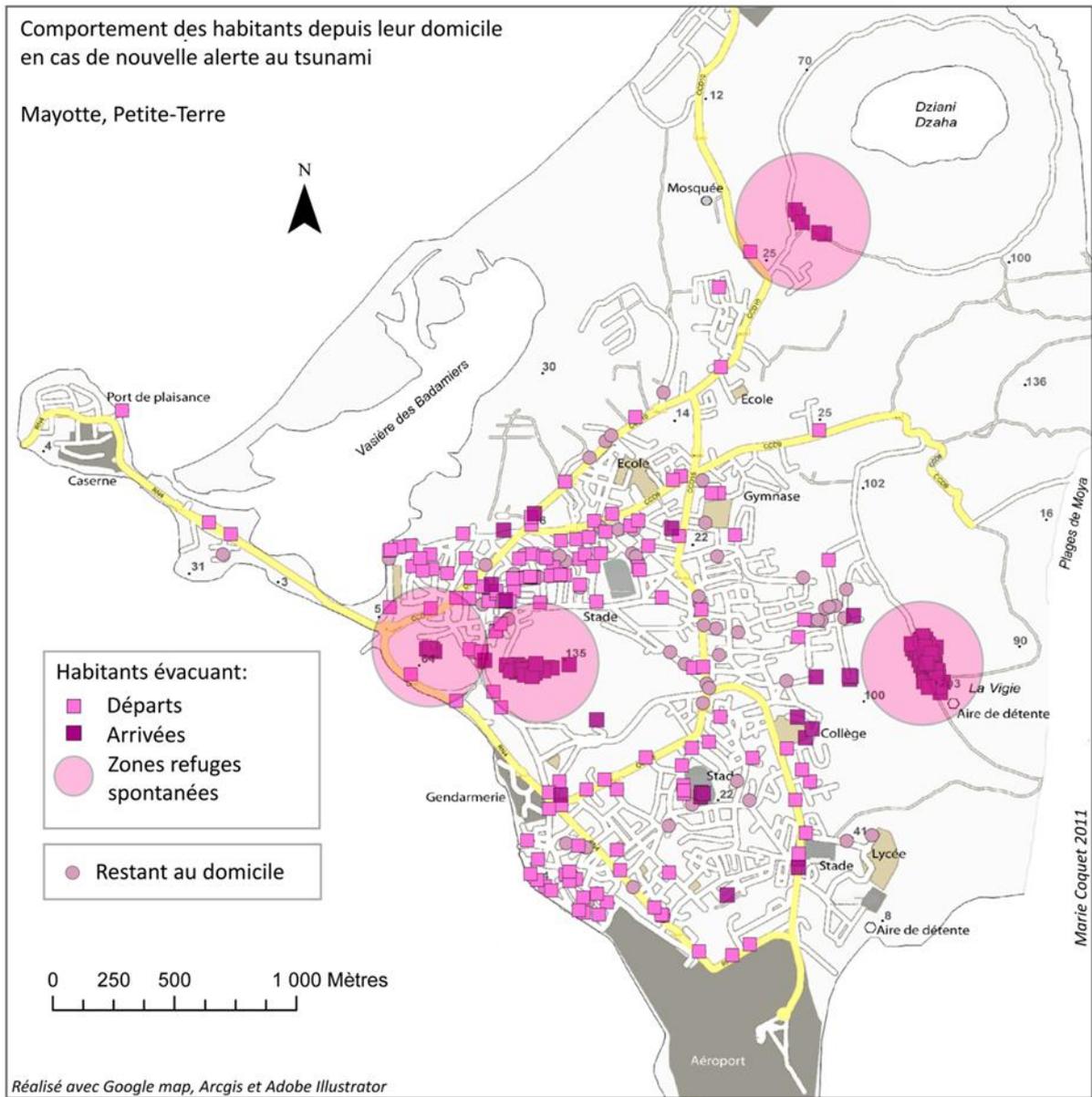


Figure 81. Sites vers lesquels les habitants ont l'intention de se réfugier depuis leur domicile en cas de nouvelle alerte au tsunami.

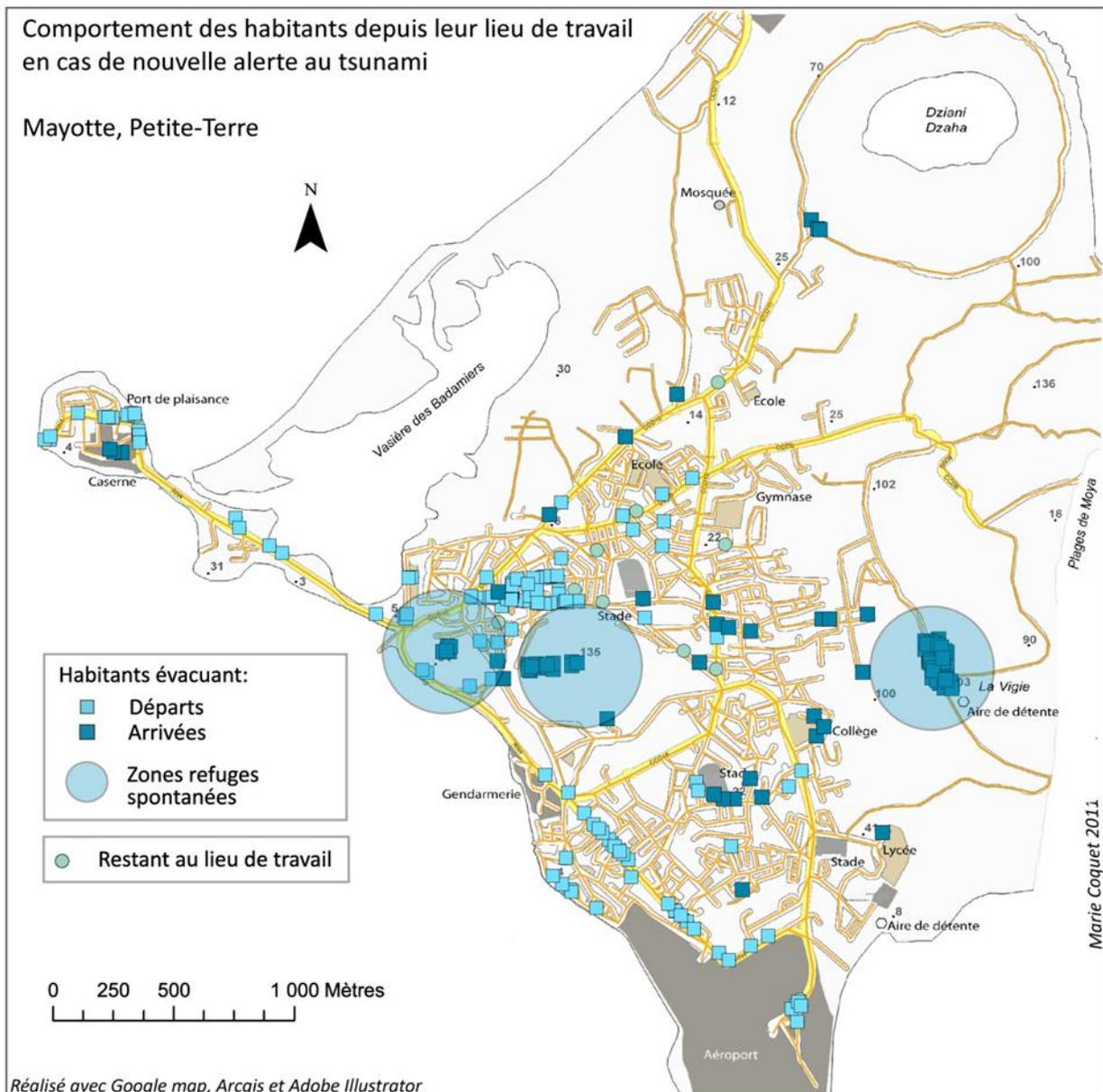


Figure 82. Sites vers lesquels les habitants ont l'intention de se réfugier depuis leur lieu de travail en cas de nouvelle alerte au tsunami.

La carte de localisation des zones de refuge « vécues » ou potentielles a été complétée par une carte des flux de personnes. Le nombre de passages sur chaque tronçon de route a été calculé à partir des résultats de la cartographie participative (Figure 83). En cas de nouvelle alerte au tsunami, quelle que soit la localisation du lieu de départ, certaines routes seraient engorgées. Celle menant à La Vigie devrait notamment absorber entre 121 et 163 passages (56 à 76%) sur les 214 personnes interrogées. Certains axes pourtant très pratiques et qui permettraient de désengorger les axes principaux ont été très peu mentionnés par les habitants pendant l'enquête.

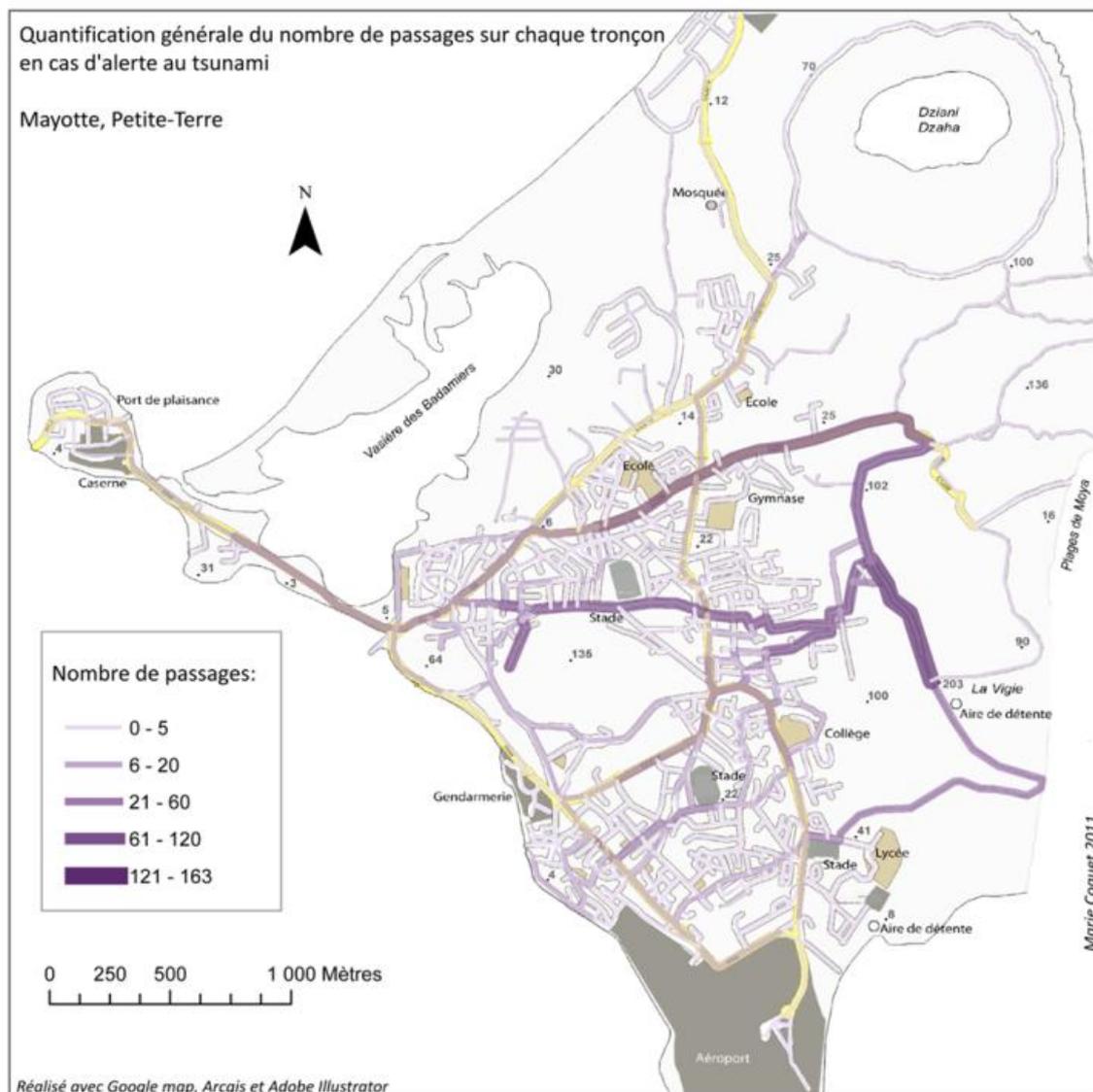


Figure 83. Quantification générale du nombre de passages sur chaque tronçon en cas d'alerte au tsunami pour un total de 214 personnes.

2.2.3 Conclusion

- La mauvaise perception des risques est caractérisée par une crainte exagérée ;
- Les zones refuges spontanées sont inadaptées à la « réalité » du risque ;
- De nouvelles zones refuges seront proposées aux autorités dans le cadre du programme PREPARTOI à partir de modélisations d'évacuations pédestres ;
- A terme, il est envisagé une comparaison de l'ensemble des cartes participatives traitées avec les modélisations d'évacuation pédestre réalisées par le GRED.

2.3 Perception du risque à La Réunion : évaluation contingente d'aménités environnementales de l'île (PRISME)

2.3.1 Méthode

La méthode d'évaluation contingente, largement utilisée dans l'évaluation des actifs environnementaux non marchands (Amigues et al., 1996 ; Mitchell et Carson, 1989 ; Bishop et al., 1995 ; Garrod et Willis, 1999 ; Nunes, 2002), peut être employée pour estimer la valeur économique des attributs du littoral face au risque de tsunami. Il s'agit d'interroger directement les individus sur leur consentement à payer (CAP) à partir de scénarios hypothétiques. Un scénario correspond à un changement dans un ou plusieurs attributs de trame verte auquel est associé un véhicule de paiement. Cette méthode ressemble ainsi à une d'enquête d'opinion dans laquelle sont sollicités des personnes interviewées pour savoir combien elles seraient disposées à payer pour éviter une dégradation de l'environnement suite à un tsunami. Cette valorisation monétaire est déterminée par le calcul du CAP, qui représente la somme maximum d'argent qu'un individu est prêt à payer pour bénéficier des attributs écologiques et esthétiques du littoral en contrepartie de la mise en place de mesures préventives pour lutter contre un risque de tsunami. Ce CAP exprime ici la préférence des individus sous la forme d'un indice de satisfaction relatif à leur appréhension de la vulnérabilité au risque de tsunami, qui remplit chacune de ces valeurs en fonction des utilisateurs et/ou des non utilisateurs. Pour ceux qui y pratiquent des activités sportives ou récréatives (promenade, pêche, plongée, activités nautiques,...), il est possible d'affirmer que la valeur d'usage existe de façon *directe*.

La méthode d'évaluation contingente constitue un puissant outil d'analyse, dont le succès tient essentiellement dans la souplesse de sa mise en œuvre. Il s'agit d'une méthode qui, par l'interrogation directe des individus, permet de générer une estimation de mesures compensées de leur variation de bien-être relatif à la valorisation par les individus de la protection contre le risque de tsunamis. Un questionnaire d'évaluation a été proposé, par interview directe sur plusieurs sites représentatifs de l'île, à un échantillon de visiteurs ou d'utilisateurs et d'institutionnels. Les sites de St Paul, St Denis et St Gilles ont été choisis en se basant sur l'historique de l'aléa précédemment mis en évidence dans le cadre du programme PREPARTOI. Nous disposons de 372 questionnaires. Les données, ainsi recueillies, ont fait l'objet d'un traitement économétrique permettant de mieux connaître les raisons d'un consentement à payer positif ou nul, grâce à une régression Log-linéaire. Un modèle Tobit a été utilisé en complément afin d'expliquer la probabilité d'annoncer un CAP positif en fonction des autres variables.

La mise en place et la gestion du questionnaire s'avère être décisif dans la méthode d'évaluation contingente. L'objet de cette étude est de proposer une évaluation contingente de certains attributs de littoral qui sont pris en compte dans la valorisation de la protection contre le risque de tsunami par les individus. Chaque site possède des caractéristiques assez similaires, mais les individus interrogés proviennent de catégories socio professionnelles et de milieux culturels forts différents, caractéristique de la population de l'île. C'est pourquoi il est important de les distinguer spécifiquement dans les résultats de l'étude. Les enquêteurs ont dû faire preuve de diplomatie, et parfois adapter le questionnaire à toutes les catégories socioculturelles pour une plus grande accessibilité.

Le questionnaire, en lui-même, est composé de cinq parties.

La première porte sur l'usage de l'espace et les activités qui y sont pratiquées. Une distinction a été opérée entre ses activités principales et ses activités secondaires. Nous nous sommes intéressés à la fréquence d'utilisation du site ;

La deuxième partie s'intéresse au degré de sensibilisation des individus à propos du concept de risque de tsunami sur l'île;

La troisième partie valorise l'appréhension de la vulnérabilité au risque de tsunami de chaque individu. Le consentement à payer des individus (CAP) a été demandé dans cette troisième partie ;

La quatrième partie concerne la valorisation de la protection contre le risque de tsunami et traite des moyens financiers envisageables pour mettre en place des mesures préventives ;

La cinquième partie de l'enquête concerne les données socio-économiques. L'objectif était de mieux connaître, certes, les motivations des individus, mais aussi de chercher à savoir si ces caractéristiques socio-économiques n'influençaient pas le fait de donner ou non un consentement à payer positif. Ces données étaient nécessaires à la construction d'un modèle explicatif du CAP. Cette dernière partie s'est attachée à recueillir des informations telles que : la ville d'origine, l'âge, la CSP, la tranche du revenu, etc. ;

De telles informations sont riches d'enseignements pour la détermination du CAP. Il est bon de rappeler que les individus ont exprimé leur préférence avec intérêt, car ils pensaient que leur comportement pourrait influencer sur l'évaluation des bénéfices, des coûts d'entretien et de préservation de l'environnement. Cette question d'élicitations des préférences a dû être formulée de façon à minimiser les biais introduits dans la réponse. La culture face au risque de tsunami sur l'île

est totalement inexistante. La population utilise rarement la mer pour pratiquer des activités récréatives du fait du peu de plages exploitable sur l'île mais surtout en raison de la dangerosité de la mer. Les habitudes des autochtones sont davantage d'utiliser le littoral comme aires de pique nique et de sortir observer la hauteur des vagues par grande houle ou tsunami. Les habitants ne font pas la différence entre les deux phénomènes naturels. Il s'agit d'un beau spectacle. La solution retenue dans cette étude, après analyse des solutions socialement envisageables sur l'île en fonction de la culture face au risque, était de proposer aux différentes enquêtes deux véhicules de paiement :

une assurance spécifique au tsunami qui permet aux individus d'être dédommagé des coûts matériels, du préjudice financier et d'un éventuel préjudice physique ou moral,

la création d'une structure intercommunale qui réaliserait les travaux et l'entretien nécessaire (balises, aménagement du littoral, alarmes,...). Cette structure serait financée de manière volontaire par les usagers du littoral et les sommes récoltées serviraient exclusivement au littoral. Ces travaux ne seraient envisagés que si la population accepte d'y contribuer financièrement.

Tous les utilisateurs du site devraient donc verser une contribution, à parts égales, pour que la somme globale ainsi collectée puisse servir exclusivement au financement du coût supplémentaire. Le rôle de l'enquêteur a été, entre autres, de faire prendre conscience, à ceux qui ne participeraient pas à l'effort collectif qu'aucune mesure préventive de protection ne serait engagée.

Dans le cas où la réponse a été égale à 0 ($CAP = 0$), il nous a fallu distinguer les « vrais zéros » des légitimés par une non-variation de la fonction d'utilité des « faux zéros ». Pour ce faire, quand la réponse a été nulle, une question supplémentaire a été posée pour connaître les raisons de cette réponse nulle. Concernant le mode de paiement, la question était ouverte, l'individu a été libre de choisir le mode de règlement qui lui paraissait le plus approprié ; l'avantage de cette formule étant d'éviter un biais conceptuel. L'analyse des données et les résultats des procédures économétriques seront présentés dans la suite des développements.

2.3.1.1 *Dépouillement*

Au total, nous disposons de 348 observations.

Les résultats présentés par la méthode d'évaluation contingente sont fondés uniquement sur ceux obtenus à partir du questionnaire et validés par une analyse économétrique. Ils reflètent le comportement réel des individus et pas forcément la structure INSEE de la population de l'île. Cela correspondrait sinon à une analyse purement descriptive, qui ne permettrait pas de déduire des profils quant à l'implication ou la perception des individus. Le recours à la méthode d'évaluation

contingente se fonde ainsi sur la révélation de préférences individuelles de personnes interrogées, quand à la valorisation individuelle du risque de tsunami. Il s'agit de bien ici d'apprécier les déterminants des caractéristiques du CAP, c'est-à-dire de voir comment telle ou telle variable influence sur cette valorisation par les individus interrogés.

Au regard des chiffres mentionnés dans le Tableau 24 et le Tableau 25 ci-dessus, on constate que exception des non réponses :

ceux interrogés qui fréquentent le plus le littoral, sont, en majorité ceux qui exercent une profession de cadres moyens, avec un revenu mensuel pour toute la famille, selon le critère de la médiane, compris entre 2134 euros/mois et 2287 euros/mois.

Il est important de noter que 17,20% des individus interrogés n'ont pas souhaité se prononcer sur leurs revenus mensuels et que ceux qui ont accepté de répondre ont des revenus très hétérogènes, ce qui est un avantage en termes de représentativité de notre échantillon.

Tableau 24 : Catégories socioprofessionnelles (en %)

CSP	
Agriculteurs	0,00%
Artisans, Commerçants	23,53%
Professions Libérales	4,90%
Cadres supérieurs	2,94%
Cadres moyens	51,96%
Employés	2,94%
Etudiants	3,92%
Ouvriers	5,88%
Retraités	1,96%
Chômeurs	0,00%
Autre	

Tableau 25 : Revenus mensuel net par foyer des usagers (en %)

Revenu	
Moins de 457 €/mois	2,15%
De 457 à 610 €/mois	2,15%
De 610 à 762 €/mois	2,15%
De 762 à 991 €/mois	4,30%
De 991 à 1220 €/mois	9,68%
De 1220 à 1448 €/mois	5,38%
De 1 448 à 1 677 €/mois	9,68%
De 1 677 à 1906 €/mois	6,45%
De à 1 906 à 2 134 €/mois	6,45%
De 2 134 à 2 287 €/mois	2,15%
De 2 287 à 2 439 €/mois	4,30%
De 2 439 à 2 744 €/mois	5,38%

De 2 744 à 3 049 €/mois	3,23%
De 3 049 à 3 354 €/mois	3,23%
De 3 354 à 3 811 €/mois	8,60%
Plus de 3 800 €/mois	7,53%
Pas de réponse	17,20%

2.3.1.2 Les déterminants théoriques du CAP

En premier lieu, représentons une fonction d'utilité d'un individu i comme :

$$U_i(X_i, E) \quad (1)$$

avec X_i est le vecteur de n biens marchands et E est le vecteur des l biens environnementaux.

En partant de la théorie classique du consommateur, supposons que les individus vont maximiser leur utilité en choisissant parmi les biens marchands. Alors les choix d'un consommateur i peut être établi à partir du programme d'optimisation suivant :

$$\begin{cases} \text{Max} U_i(X_i, E) \\ \text{S.c.} P X_i = Y_i \end{cases} \quad (2)$$

où P est un vecteur de prix et Y_i son revenu.

Ce programme d'optimisation sous contrainte de revenu conduit à définir les fonctions de demande classiques :

$$X_i = (P, E, Y_i) \quad (3)$$

Sur la base de ces fonctions de demande, il est possible maintenant définir la fonction d'utilité indirecte d'un individu i comme :

$$V_i(P, E, Y_i) = U_i \left((P, E, Y_i), E^- \right) \quad (4)$$

L'utilité est représentée comme une fonction des prix, du revenu et également, dans le cas envisagé ici, des biens environnementaux. Supposons maintenant qu'au moins un des éléments de E s'accroît, avec aucune décroissance des autres éléments. Soit E_0 le vecteur initial des biens environnementaux.

Considérons un vecteur E_1 pour lequel il y a eu un accroissement d'au moins un élément et un seul. On $E_1 > E_0$ et :

$$U_i = V_i(P, E_1, Y_i) \geq V_i(P, E_0, Y_i) \quad (5)$$

La variation compensatrice est le montant de monnaie CAP_i qui, s'il est prélevé auprès de l'individu après le changement du vecteur des biens environnementaux de l'état E_0 à E_1 , le laissera à un niveau de bien-être identique à celui qui prévalait avant le changement. Cette variation compensatrice peut être considérée comme le CAP pour l'accroissement d'un bien environnemental particulier du vecteur E .

Ce CAP correspond donc à la diminution du revenu qui laisse le niveau initial d'utilité inchangé après l'accroissement de quantité, ou de qualité, d'un bien environnemental.

$$\text{Bénéfices} = \sum CAP_i \quad (7)$$

Cette analyse conduit donc à associer aux biens environnementaux une valeur monétaire. C'est donc bien une théorie de la valeur qui est ici en cause.

2.3.1.3 *La spécification économétrique du CAP*

À partir de l'ensemble des informations sur les individus interrogés figurant dans l'échantillon, il est important de cerner les facteurs influençant le fait de donner un CAP positif. L'interprétation des résultats pourra être double :

d'une part, déterminer la probabilité pour un individu interrogé d'accepter d'apporter une contribution financière ($CAP > 0$) ;

d'autre part, comprendre comment les caractéristiques individuelles influencent la valeur du CAP.

Afin de mieux connaître les facteurs augmentant la probabilité d'exprimer un CAP positif, l'analyse économétrique a été réalisée en deux temps : dans un premier temps identifier les variables significatives expliquant la décision ou non de participer au programme de préservation à travers l'estimation d'un modèle log-linéaire, ensuite, nous avons estimé les mêmes variables grâce à un Tobit afin de déterminer la probabilité d'annoncer un CAP en fonction des autres variables. Cela permet notamment d'identifier les facteurs explicatifs de cette décision en gommant les effets de structure, et donc en isolant les effets propres de chacun d'eux. Tout ceci a pour objectif de déterminer les facteurs qui vont influencer le choix de l'individu dans sa participation financière ou non au programme de préservation de la trame verte en milieu urbain, comme proposé dans le questionnaire.

Posons que $CAP_i = f(S_i, V_i)$ où $f(.)$ est la fonction de répartition du terme d'erreur ε_i

$$CAP_i^* = \alpha_0 + \alpha_1 S_{1i} + \dots + \alpha_k S_{ki} + \beta_1 V_{1i} + \dots + \beta_k V_{ki} + \gamma_1 A_{1i} + \dots + \gamma_k A_{ki} + \varepsilon_i$$

CAP_i^* est la variable dépendante représentant le consentement à payer de l'individu, avec :

S_i , les caractéristiques socioéconomiques de l'individu

V_i , les variables de sensibilité à la cause environnementale,

A_i , les autres variables explicatives du CAP_i

α_i, β_i , les paramètres à estimer

ε_i , les erreurs de spécification du modèle et de mesure des paramètres

La transformation en log des valeurs permet de débiaiser la moyenne, ainsi, la distribution des erreurs tend vers une distribution normale (Desaigues B. & Point, P, 1993). Dans ce cas de figure, le modèle à estimer devient :

$$\log(CAP_i^* + 1) = \alpha_0 + \alpha_1 S_{1i} + \dots + \alpha_k S_{ki} + \beta_1 V_{1i} + \dots + \beta_k V_{ki} + \gamma_1 A_{1i} + \dots + \gamma_k A_{ki} + \varepsilon_i$$

Il est aussi possible de définir le seuil, qui détermine le niveau d'erreur accepté dans le modèle d'évaluation du CAP : 1% correspond à 99% de fiabilité et 5% correspond à 95% de fiabilité. Plus la valeur des coefficients est positive et plus elle explique la motivation de l'individu de choisir ce mode de paiement pour exprimer un CAP positif, en d'autres termes pour que l'individu interrogé retire une satisfaction de la trame verte. Plus cette valeur est négative et plus la variable explique le refus de l'individu d'exprimer un CAP positif pour la trame verte. Etant donné la spécificité et l'hétérogénéité de la trame verte sur les trois communes, les résultats sont donnés par lieux, et par mode de paiement, en fonction de taux de significativité (1% et 5%).

Une méthode d'estimation robuste de ce type de modèle consiste à utiliser successivement les parties qualitative et quantitative du modèle. La partie quantitative modélise ici le niveau du CAP des personnes qui sont prêtes à payer : elle met ainsi en évidence les principaux déterminants du niveau de CAP déclaré, en tenant compte du biais de sélection lié au fait que l'on ne considère alors qu'une fraction de l'échantillon.

Les variables indépendantes du modèle retenu pour l'analyse de la valeur d'usage du site, sont des variables dichotomiques et se définissent comme suit:

Variable Endogène	
CAP_i^*	Exprime le consentement à payer (trois véhicules de paiements)
Variables Exogènes	
<i>caractéristiques socioéconomiques de l'individu</i>	
S_1	Exprime le revenu de la personne interrogée. divisé en 10 classes par ordre croissant ;
S_2	Définit la composition du foyer
S_3	Exprime la catégorie socioprofessionnelle de la personne interrogée. divisé en 11 classes par ordre croissant ;
S_4	Exprime l'âge de la personne interrogée.
S_5	Exprime le sexe de la personne interrogée. Prends les valeurs 0 pour les femmes, 1 pour les hommes ;
S_6	Exprime la possession ou non par l'individu d'une police d'assurance face au risque
S_7	Exprime l'aversion ou non de l'individu face au risque (peur du risque ou non)
S_8	Exprime la distance entre le domicile et le littoral.
S_9	Exprime le montant des dépenses effectuées sur le site.
S_{10}	Exprime le degré d'information de l'individu face aux risques.
S_{11}	Définit si l'individu a déjà été témoin d'un tsunami ou non
<i>Variable de sensibilité à la cause environnementale</i>	
V_1	Exprime la sensibilité globale de l'individu à la protection de l'environnement
<i>Autres variables explicatives du CAP_i</i>	
A_1 à A_3	Expriment les variables qui favorisent la fréquentation, ainsi que la fréquentation du littoral
A_4	Exprime la motivation de l'individu pour se rendre sur le site.
A_5	Définit la caractéristique du site (zone à risque ou non)
A_6	Définit la prise en compte des alertes provenant des pouvoirs publics
A_7	Exprime le fait que l'individu soit ou non favorable aux mesures prises.
α_0	Constante

2.3.2 Résultats

Les coefficients présentés dans le Tableau 26 expriment l'élasticité de chaque variable par rapport au CAP. Le coefficient ainsi déterminé donne le pourcentage de variation du CAP attendu pour une variation de la variable considérée. En d'autres termes, cela représente la sensibilité du CAP relatif à la modification de la variable. Par exemple, ce coefficient permet de mesurer la variation du CAP pour une augmentation de +1% du revenu. L'idée est d'exprimer ici la variation en CAP en grandeur monétaire, ce qui correspond à la modification de satisfaction perçue par l'individu interrogé. Cela permet notamment d'établir des corrélations entre la valorisation du littoral (déterminé par le CAP)

et différentes caractéristiques individuelles (socioéconomiques, sensibilité à l'environnement et autres).

Tableau 26. Estimation du Consentement à Payer

Variables	OLS Coefficient	
	Scénario 1	Scénario 2
S_1 (Revenu)	-0,0734 * (-1,57)	-0,0429 *** (-2,64)
S_2 (Composition foyer)	0,0394 (0,21)	0,0263 0,50
S_3 (PCS)	-0,0018 (-0,01)	-0,2310 *** (-5,36)
S_4 (Age)	0,0394 (0,21)	-0,1417 *** (-2,34)
S_5 (Sexe)	-0,4599 (-0,98)	0,0168 (0,11)
S_6 (Assurance)	-0,3001 * (-1,72)	-0,0844 *** (-2,74)
S_7 (Peur du risque)	-0,0453 (-0,17)	-1,1244 * (-1,61)
S_8 (Distance)	0,0064 (0,18)	-0,0134 (-0,32)
S_9 (Dépenses)	0,0011 (0,13)	0,0077 *** (3,50)
S_{10} (Information face au risques)	-0,0074 (-0,04)	0,075 (1,05)
S_{11} (Antécédents)	0,2338 (0,45)	0,2569 (1,43)
V_1 (Sensibilité environnementale)	1,0995 *** (2,36)	0,4773 *** (3,42)
A_1 (Fréquentation globale)	0,0388 (0,34)	-0,1833 (-0,78)
A_2 (Fréquence fréquentation)	0,2666 (0,57)	-0,3780 *** (-2,40)
A_3 (Fréquentation sur un an)	-0,4667 * (-1,45)	0,0841 (0,75)
A_4 (Motivation)	-0,1321 (-1,28)	0,0744 * (1,89)
A_5 (Zone à risque)	0,6047 (1,21)	-0,1319 (-0,94)
A_6 (Alerte pouvoirs publics)	-0,2138 (-0,34)	-0,8097 *** (-3,85)
A_7 (Favorable aux mesures)	0,0477 (0,19)	0,2593 *** (3,16)
α_0 (constante)	3,3519 (1,16)	4,9937 *** (4,76)
Nombre d'observations	348	348
R ²	0,1318	0,2127
F-statistic	1,63	4,95

Sources : Calculs de l'auteur à partir des données d'enquêtes issues du questionnaire.

*** : Significatives à 1%,

** Variable significatives à 5%,

* Variable significatives à 10%

Nous cherchons dans un premier temps à comprendre quelles sont les variables qui influencent le consentement à payer des individus. Les *** du tableau mettent en avant la significativité individuelle, sachant que la significativité globale est bonne pour le scénario 2 (mais pas pour le 1), seul ce deuxième scénario sera retenu pour l'explicativité du CAP.

Nous pouvons en déduire les conclusions suivantes :

L'effet « revenu » est négatif sur le CAP. Plus les personnes ont un revenu élevé (plus la tranche de leur revenu est haute) moins ils sont enclins à payer.

L'effet « catégorie socio professionnelle » est négatif sur le CAP. Plus les individus appartiennent à une CSP élevée, moins ils sont enclins à payer.

L'effet « âge » est négatif sur le CAP. Plus l'individu est âgé moins il est enclin à payer. Ce phénomène peut s'expliquer par les habitudes des réunionnais plus âgés qui font rarement la différence entre tsunami et forte houle, qui n'ont pas subi de pertes humaines importantes lors de ces événements, mais des décès isolés, bien que réguliers, lors de fortes houles, notamment de pêcheurs. Ils n'ont pas conscience du risque potentiel de submersion sur certaine partie du littoral, comme la ville de St Paul car le tsunami de 1883 est trop ancien pour que l'un d'entre eux ne l'aient vécu. Ils en ont perdu la mémoire et donc la crainte également.

L'effet « Assurance » est négatif sur le CAP. Plus l'individu possède une assurance complète, moins il est enclin à payer. Il faut remarquer que sur l'île très peu d'individus sont assurés, aussi bien pour leurs voitures, que pour leurs bateaux. Par conséquent les quelques individus qui ont souscrit une assurance semblent se reposer sur cette dernière pour tout risque engendré par un potentiel tsunami.

L'effet « distance » est positif sur le CAP. Plus l'individu habite loin du littoral plus il est enclin à payer. Il est assez classique, en théorie, de redouter davantage un risque que l'on connaît mal.

L'effet « sensibilité environnementale » est positif sur le CAP. Plus l'individu est sensible aux valeurs environnementales, plus il est enclin à payer.

L'effet « fréquentation » est négatif sur le CAP. Plus l'individu fréquente le site moins il est enclin à payer. En théorie ce phénomène est assez classique car l'individu est habitué au site, habitué aux aléas climatiques et ainsi il redoute moins un risque avec lequel il est habitué à cohabiter.

L'effet « motivation » est positif sur le CAP. Plus l'individu se considère comme concerné, plus il est enclin à payer.

L'effet « alerte pouvoirs publics » est négatif sur le CAP. L'individu ne se sent pas concerné par les alertes des pouvoirs publics.

L'effet « mesures » est positif sur le CAP. Plus l'individu estime que des mesures peuvent être prises, plus il se sent enclin à payer.

Le scénario 1 propose, à chaque individu interrogé, de souscrire ou non un contrat d'assurance, qui constitue son seul système d'indemnisation pour les sinistres liés aux risques de tsunamis, quelles que soient l'importance et la fréquence de ces risques. Pour les autres types de sinistres leur assurance actuelle reste valable. L'assurance spécifique tsunami permet d'être totalement dédommagé des coûts matériels, du préjudice financier, et d'un éventuel préjudice physique et moral. Si l'individu n'y souscrit pas, il ne sera pas couvert. En cas de question à l'enquêteur, ce dernier pouvait préciser que le montant de la couverture était estimé à 300 €/j de tsunami pour un préjudice moral non chiffrable. Suite au traitement économétrique, il ressort que ce scénario n'est absolument pas significatif, et par conséquent qu'aucun individu ne souhaite l'adopter. Nous ne l'avons donc ni retenu, ni commenté davantage.

Le scénario 2 propose, à chaque individu interrogé, la création d'une structure intercommunale afin de réaliser les travaux et l'entretien nécessaire (digue, aménagement du littoral, alarme, etc.) et ainsi appliquer des mesures de protection contre les risques de tsunamis. Cette structure serait financée de manière volontaire par les usagers du littoral et l'argent ainsi récolté servirait exclusivement au littoral. Ces travaux ne seraient engagés que si l'ensemble de la population concernée accepte d'y contribuer financièrement. Les résultats sont très évocateurs car la somme moyenne que l'individu est prêt à déboursier est de 2,25€, par an et par foyer. Autrement dit, les individus ne se sentent pas concernés par le risque de tsunami et ne sont pas prêts à payer directement ou indirectement (impôts, taxes,...) pour se prémunir contre ce risque. Il serait intéressant dans une recherche future de déterminer une valorisation de ce risque par les assureurs et de le comparer avec celui de la population afin de mieux comprendre les divergences potentielles entre les deux catégories d'acteurs.

2.4 Modélisation de l'accessibilité territoriale ante et post tsunami pour l'aide à la gestion de crise (GRED)

2.4.1 Introduction : risques, accessibilité et gestion de crise

2.4.1.1 Risque tsunami direct vs risque indirect à Mayotte

Le territoire de Mayotte, 101^{ième} département français, peuplé officiellement de 186 500 personnes (RGP, INSEE, 2007), est composé des îles de Grande Terre, de Petite Terre et d'une trentaine d'îlots. Sa position géographique au sein de l'archipel des Comores (13°Sud, 45°Ouest), son insularité et son relief escarpé, en font un espace particulièrement exposé aux aléas naturels d'origine géodynamique, morpho-dynamique et hydro-climatique (sismicité, tsunamis, cyclones, submersion marine, inondations, mouvements de terrain) (Figure 84). L'exposition aux aléas naturels de niveau élevé, cartographiés localement dans le cadre des atlas produits par le BRGM (Audru, 2010) concerne près de 60% du territoire (îlots non compris) et 50% du bâti (Figure 85). A titre de comparaison ces valeurs sont supérieures à celles obtenues pour la Martinique à partir des mêmes types et seuils de zonage des aléas naturels, avec respectivement 50 et 30% d'exposition (Leone, 2002).

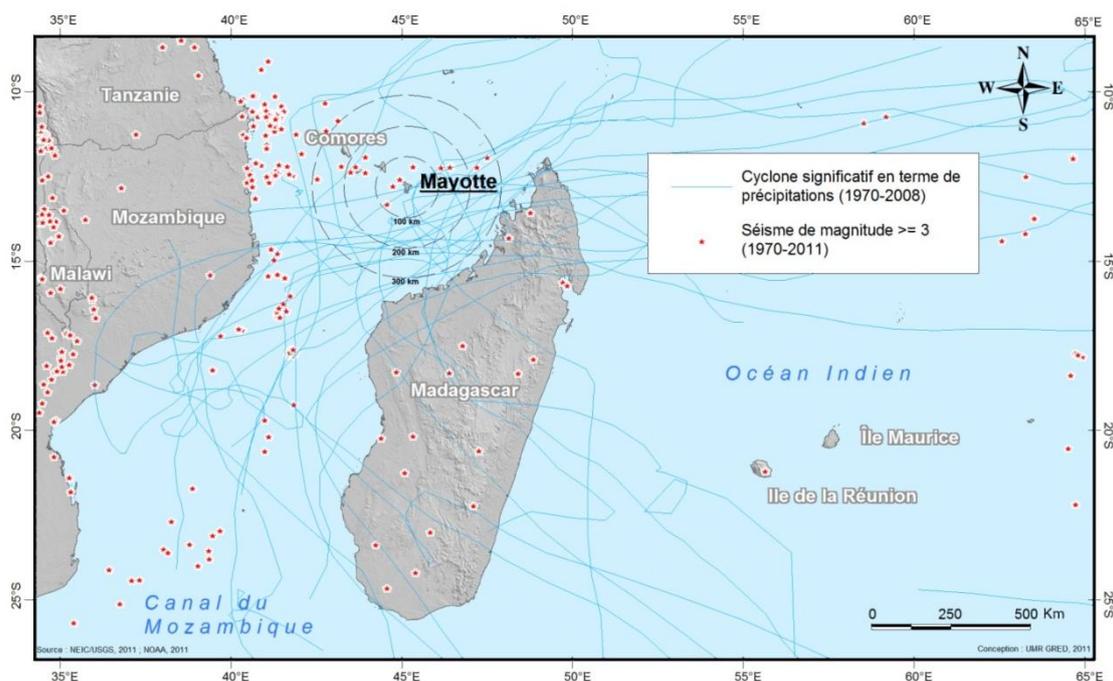


Figure 84. Mayotte dans son contexte d'aléas naturels.

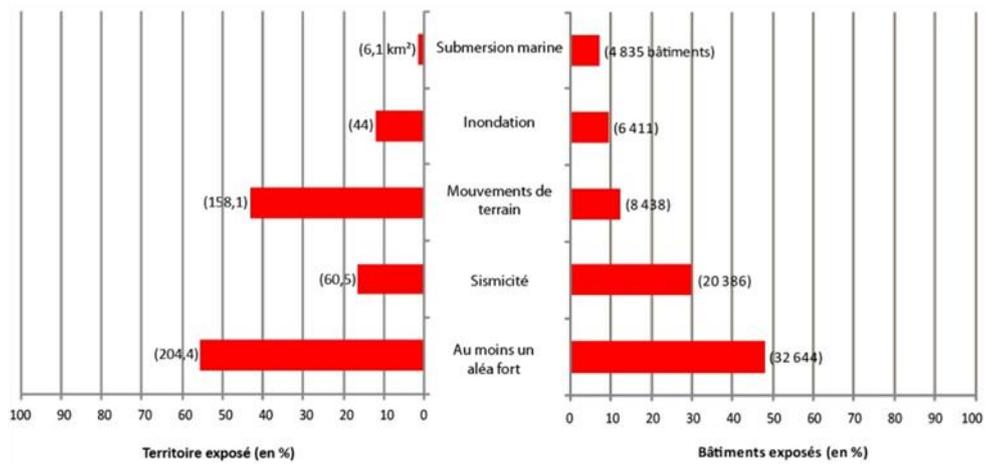
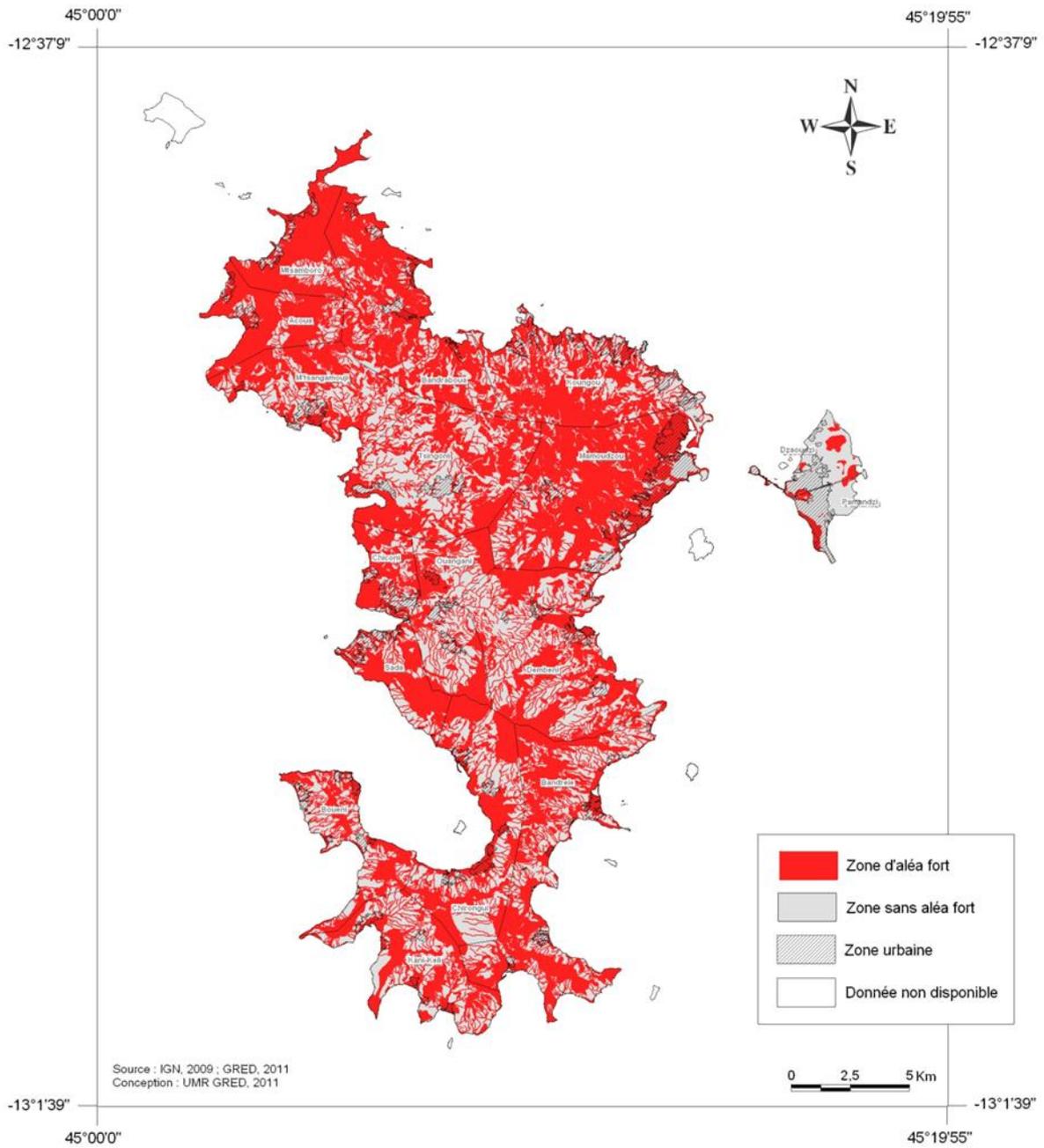


Figure 85. Mayotte : une très forte exposition aux aléas naturels locaux.

Cette première estimation du risque direct, appréhendée par la conjonction spatiale d'enjeux majeurs et d'aléas locaux, est aggravée par de nombreux facteurs de vulnérabilité : population informelle et non recensée, manque de ressources lié à l'exiguïté, isolement géographique, etc.. Sur cet espace restreint et fortement polarisé autour de Mamoudzou et du port de Longoni (Grande Terre) (pour la vie économique), de Dzaoudzi (pour les services administratifs), et de l'aéroport de Pamandzi (Petite Terre), la question de l'accessibilité territoriale par voie routière revêt un caractère essentiel pour la mobilité des populations et le maintien des activités. En cas de dégradation par divers agents naturels, cette accessibilité spatiale peut devenir une cause de risque indirect (ou reporté), en retardant les opérations de secours, en réduisant les ressources post-crise et en isolant des populations livrées à elles-mêmes dans les heures ou journées qui suivent un sinistre. Au contraire, une bonne accessibilité favorisera la résilience territoriale et la gestion d'une crise, en accélérant le retour à la normale, mais en facilitant également des évacuations de population en cas d'alerte. En résumé, le **risque direct** implique la conjonction spatiale et temporelle d'un danger (aléa) et d'éléments exposés (enjeux) affectés d'une certaine vulnérabilité ; le **risque indirect** est quant à lui induit par la perte d'un lien fonctionnel entre des enjeux (Figure 86).

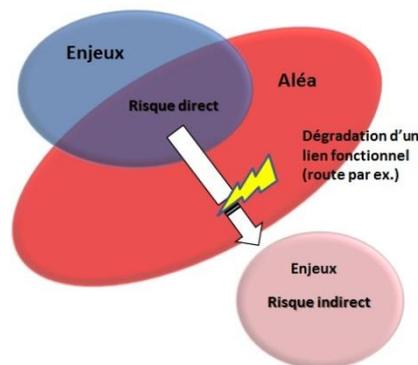


Figure 86. Les différents espaces du risque (direct et indirect).

2.4.1.2 Différentes formes d'accessibilité territoriale en lien avec une crise tsunami

Cette problématique éminemment géographique de l'accessibilité territoriale en lien avec la gestion de crise est ici développée pour le cas particulier des tsunamis, et donc de la submersion marine, sur les côtes mahoraises et pour l'ensemble des deux îles concernées. Elle repose sur plusieurs notions, propres à la géographie des risques ou empruntées à la géographie des transports, ce qui permet d'opérer par la même occasion un couplage entre différentes approches qui apparaît encore sous exploité dans une perspective d'aide à la gestion de crise. On peut néanmoins citer les travaux de géographes de l'IRD qui ont cherché à analyser l'accessibilité en tant que composante incontournable de la vulnérabilité territoriale face aux crises, mais sans pour autant développer des méthodes d'évaluation quantitatives basées par exemple sur la théorie des graphes (D'Ercole & Metzger, 2009 ;

Demoraes & D'Ercole, 2009 ; Metzger *et al.*, 2011). *A contrario*, d'autres chercheurs ont appliqué tout aussi récemment ces théories aux risques naturels (Chang, 2003 ; Gleyze, 2005 ; Nabaa, 2011), mais sans une conception territoriale du risque confrontant par le biais de l'accessibilité, la notion d'*espace du risque* (ou de la catastrophe) à celle d'*espace ressource*, ou même *refuge*, en lien avec les phases d'une crise, comme nous allons le voir.

L'accessibilité (d'un lieu) est la plus ou moins grande facilité avec laquelle ce lieu peut être atteint à partir d'un ou plusieurs autres lieux, à l'aide de tout ou partie des moyens de transport existants (Bavoux *et al.*, 2005). Dans ce travail, la perte d'accessibilité est définie par une dégradation partielle ou totale de l'accessibilité de divers enjeux constitutifs d'un territoire (personnes, biens, activités, fonctions diverses) qui constituent autant de ressources vitales pour la gestion d'une crise. Elle peut être mesurée et cartographiée, avant et après un tsunami, au moyen d'itinéraires et d'indicateurs tels que les temps ou pertes de temps de parcours, le volume ou le pourcentage d'enjeux accessibles, et ce pour plusieurs scénarios de submersion marine affectant le réseau routier.

En fonction des enjeux (populations exposées, ressources vitales, centres de secours), des lieux de départ et d'arrivée (espaces à risque, refuges ou ressources), mais également en fonction des phases habituelles d'une crise tsunami, plusieurs types d'accessibilité territoriale peuvent être définis et analysés (Figure 87) : (1) entre les zones à risque et les zones refuges en phase d'évacuation préventive, (2) entre les zones ressources et les zones à risque (ou d'impact) en phase de secours, (3) entre les zones refuges et les zones ressources en phase de récupération. Il convient également d'y ajouter les accessibilités et mobilités internes à chaque espace de la crise.

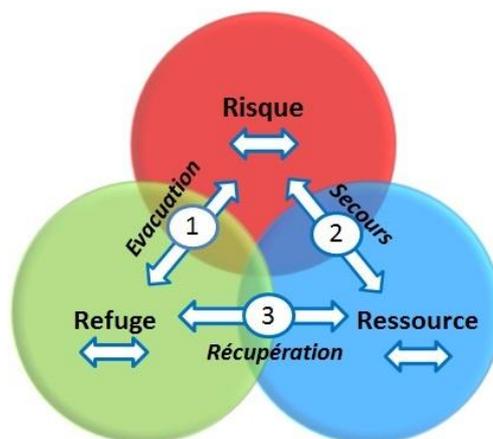


Figure 87. Les différents types d'accessibilité territoriale en lien avec une gestion de crise tsunami.

L'objectif de notre travail a été d'explorer des protocoles méthodologiques reproductibles pour modéliser, cartographier et quantifier ces différentes formes d'accessibilité et les rendre utiles pour l'aide à la gestion de crise. En cela, le territoire de Mayotte offre plusieurs avantages pour

expérimenter de telles applications : une forte demande locale de prévention, des enjeux humains importants sur le littoral avec près de 28 % de la population totale situés à moins de 10 m d'altitude, un aléa tsunami probable, un espace bien renseigné sur le plan géographique avec de nombreuses bases de données, un territoire exigu aux faibles ressources alternatives, des routes principales à majorité littorales, un fort risque d'enclavement territorial.

Ces accessibilités ont été modélisées au sein d'un SIG en exploitant la théorie des graphes et des outils de calcul d'itinéraires par les plus courts chemins. Cette modélisation repose en amont sur la constitution de graphes routiers avec différenciation des types de voies, sur le paramétrage des vitesses de déplacement, sur l'identification des tronçons vulnérables, sur l'évaluation des enjeux vitaux (populations exposées et ressources pour la gestion de crise), sur la délimitation des zones de submersion (danger) et de protection (refuge) et l'estimation des temps d'arrivée d'un tsunami (aléa de référence).

2.4.1.3 *Quelques particularités du réseau routier de Mayotte*

2.4.1.3.1 Organisation spatiale

L'accessibilité routière d'un territoire dépend avant tout de la densité, de la qualité, de l'organisation spatiale et de la connectivité de son réseau. Le réseau routier de Mayotte est relativement récent. Les premières routes revêtues, réalisées sur Mamoudzou, datent de la fin des années 70. D'après la DEAL, le réseau routier comptait en 1977 seulement 177 km de pistes. D'après la BD TOPO® IGN (2009), le réseau routier se compose aujourd'hui de 511 km de routes revêtues dont 142 km de routes départementales et 90 km de routes nationales (Figure 88). Les communes disposent d'un réseau important de voies secondaires communales et privées construites au fur et à mesure de l'urbanisation. Mais les communes ne disposent pas des ressources nécessaires pour en assurer l'entretien régulier et ce réseau secondaire est en mauvais état, voire dangereux pour la sécurité (Licoine, 2008).

L'organisation spatiale générale du réseau routier de Mayotte est fortement contrainte par le relief. En effet, l'île est compartimentée par plusieurs chaînes de collines érodées et dominées par quelques massifs basaltiques (point culminant : Mt Bénara à 660 m alt.). L'essentiel du réseau principal (routes nationales et départementales) est à proximité du littoral, ce qui permet de faire la quasi-totalité du tour de Grande-Terre. Il existe également quatre axes transversaux représentés par 2 nationales et 2 départementales, et une portion de piste (chemin) entre Bouyouni et la retenue collinaire de Combani. Ces axes transversaux offrent des itinéraires de contournement (délestage) en théorie appréciables en cas de coupures de portions littorales. En effet, près de 8% du réseau routier (74,7

km) se trouvent à moins de 5 m d'altitude (source BD TOPO® IGN), ce qui le rend d'autant plus vulnérable à des phénomènes de submersion marine. Mais c'est sans compter d'autres autres aléas naturels qui peuvent l'affecter (mouvements de terrain, inondations).

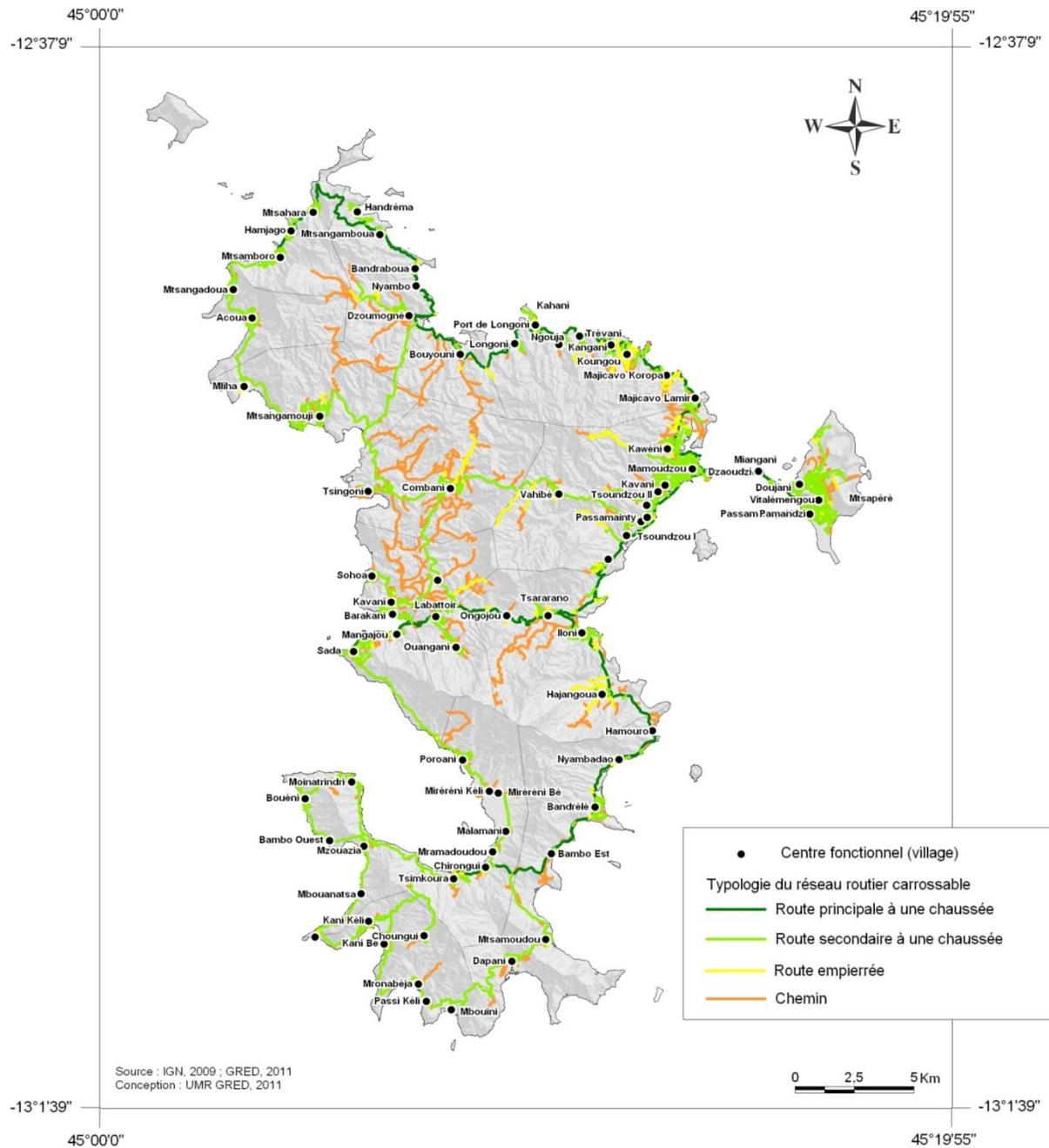


Figure 88. Le réseau routier de Mayotte (BD TOPO®, 2009) et les 74 centres fonctionnels sélectionnés pour modéliser l'accessibilité des ressources post-tsunami.

2.4.1.3.2 Vulnérabilité du réseau

Les atteintes passées au réseau routier ont souvent eu lieu lors d'évènements cycloniques. En 1985, pendant le cyclone Félixsa, un mouvement de terrain obstrua la route d'accès au port de commerce

de Longoni, entraînant 10 heures de coupure. Au même moment, la rivière la Koualé inonda toute la plaine environnante, isolant le village de Koualé (Préfecture de Mayotte & BRGM, 2010).

L'une des principales causes de dégradation des routes est la fragilité des canalisations et la destruction, lors d'inondations, de buses en métal qui datent de plus de 20 ans. Lors du passage de l'épisode dépressionnaire Fame en 2008, certaines buses cédèrent et la route fut entièrement coupée au niveau de Tahiti Plage, privant l'accès aux secours. Il fallut une semaine pour rétablir la circulation (communication personnelle, Direction de l'équipement de Mayotte, 2011). Toujours lors de la tempête tropicale Fame (2008), un grand nombre de petits glissements ou éboulements de talus coupèrent les routes. Il fallut 3h pour dégager la route allant de Mamoudzou à Longoni et plus de 5h pour atteindre M'tsamboro. Lors de ce même épisode pluvieux, 94 mouvements de terrain furent répertoriés et 90% d'entre eux se déclarèrent dans des secteurs anthropisés (talus routiers, travaux d'aménagements, anciennes carrières) (BRGM, 2011).

Par ailleurs, les inondations provoquent fréquemment des phénomènes d'embâcles. Inversement, en 1998 un embâcle boucha un fossé à proximité du rond-point de Pamandzi, ce qui entraîna l'inondation de toute cette zone et l'interruption du trafic routier. Un an plus tard, de fortes inondations provoquèrent de nouveau des embâcles, notamment dans le village de Kangani où le pont fut obstrué par des branchages et des carcasses de voitures (Préfecture de Mayotte & BRGM, 2010).

Les dysfonctionnements du réseau routier sont aussi liés à quelques points de congestion récurrents sur Mamoudzou, ce qui peut aggraver l'accessibilité en cas de crise. On peut citer en particulier, à l'entrée nord, le rond-point « SFR » de la zone industrielle de Kawéni, et à l'entrée sud, les ronds-points de Passamainty et du Baobab. En effet, la capitale de l'île concentre l'essentiel de l'activité économique, administrative et commerciale, ce qui engendre des difficultés de circulation liées aux migrations pendulaires. De plus, le nombre grandissant de voitures individuelles sur l'île ne fait que renforcer ce phénomène. D'une manière générale la circulation à l'intérieur même de la ville est rendue difficile par l'étroitesse et la sinuosité des routes ainsi que par les modes de conduite locale.

2.4.2 Méthode

2.4.2.1 *Choix d'un scénario de tsunami de référence sur Mayotte*

Le risque pour Mayotte d'être affecté par des tsunamis transocéaniques d'origine sismique est avéré, avec au moins deux sources potentielles majeures : la zone de subduction du Makran au Pakistan (temps de trajet modélisé d'environ 6 heures) et la zone de subduction de Sumatra en Indonésie qui

a généré le tsunami du 26 décembre 2004 (temps de trajet modélisé et reconstitué d'environ 9 heures jusqu'à Mayotte). Néanmoins, les recherches documentaires concernant l'impact des tsunamis transocéaniques à Mayotte depuis 2004 se sont avérées infructueuses. Seule une campagne de recueils de témoignages a pu mettre en évidence des effets pour le tsunami de 2004 avec des surcôtes allant de 2,51 (Mzouazia) à 4,46 m (Hamjago) (Sahal, 2011). Par ailleurs, la campagne de prospection de dépôts sédimentaires consécutifs à des tsunamis réalisée dans le cadre du programme PREPARTOI a mis en évidence quelques sites qui auraient pu être submergés par des tsunamis dans le passé, notamment à M'Tsamoudou et dans la baie de M'Bouini, villages situés à la pointe sud de Grande-Terre.

Mais il existe aussi un risque de tsunami d'origine locale qui pourrait être induit par un glissement de parties du récif qui entoure l'archipel. Un tel cas de figure entraînerait l'arrivée de vagues en quelques minutes sur la côte. Par ailleurs, à l'échelle régionale, le volcan Karthala de Grande Comore constitue 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.

Les tous premiers modèles de propagation d'un tsunami de type 2004 fournis par le CEA/DASE sur Mayotte mettent en évidence des secteurs d'amplification des grandes longueurs d'ondes autour de Mayotte. On peut constater que les zones d'amplification correspondent assez bien aux secteurs les plus affectés en 2004 et que les hauteurs maximales (Hmax) sont plus importantes dans la partie nord-ouest du lagon, là où la barrière de corail est endommagée. En revanche les Hmax (qui plafonnent à 1,35 m) sont bien en deçà des mesures de surcotes de près de 4,5 m obtenues sur le terrain (Sahal, 2011).

En attendant une modélisation plus fine des amplifications locales et de la submersion, nous avons fait le choix de retenir un zonage de l'aléa de référence « submersion marine par tsunami » basé sur l'altimétrie des côtes, en considérant toutes les zones littorales situées à moins de 5 m d'altitude. Cette tranche hypsométrique a été extraite du MNT de la BD litto3D fournie par le CG de Mayotte (résolution de 1m, précision altimétrique de 20 cm). On considère donc que ce zonage de référence enveloppe les effets maximaux d'un tsunami de référence de type 26 décembre 2004, mais qu'il peut être localement dépassé par un scénario d'origine locale, avec des temps de parcours qui passeraient de 9h à quelques minutes. Dans tous les cas, on peut néanmoins considérer que les zones situées à plus de 10 m d'altitude sont hors d'atteinte d'un tsunami, compte tenu de la protection rapprochée jouée par la barrière de corail.

2.4.2.2 Préparation des bases de données SIG

L'évaluation des risques directs, mesurés par l'exposition de divers types d'enjeux, et indirects, induits par les pertes d'accessibilité, repose sur la constitution de plusieurs bases de données géoréférencées. Ces bases sont issues de différents services de la collectivité locale (Conseil Général de Mayotte), de l'Etat (Préfecture de Mayotte et services associés), de l'INSEE. Elles ont fait l'objet d'un important travail de collecte, d'harmonisation (tris, recoupements, géo-référencement), de validation sur le terrain, de mise en forme et de réagréments, à la fois dans le cadre du projet PREPARTOI (fondation MAIF) mais également au sein du projet en cours d'Atlas des risques et des vulnérabilités de Mayotte porté par l'UMR GRED (Université Montpellier 3 & IRD) et le Conseil Général de Mayotte.

2.4.2.2.1 Graphe des voies de communication routières et vitesses associées

Le réseau routier et pédestre utilisé pour la modélisation provient de la BD TOPO® de l'IGN (2009) qui contient une description vectorielle des éléments du territoire et des infrastructures. Cette base sert de référentiel cartographique national à grande échelle (RGE, précision métrique) pour la localisation de l'information thématique relative aux problématiques d'aménagement, d'environnement ou d'urbanisme. Le réseau des voies y est modélisé par un graphe orienté où chaque arc représente une voie de la chaussée sur un tronçon de route (1068,54 km, 6403 arcs). Ce réseau comprend les voies de communications (revêtues ou non), une sélection de chemins, sentiers et escaliers, et une hiérarchisation du réseau revêtu selon l'importance des tronçons pour le trafic routier et non pas sur des critères administratifs. Cette typologie propre au territoire mahorais est illustrée dans le Tableau 27. Elle comprend 6 classes de voies auxquelles nous avons attribué des vitesses moyennes de déplacement en fonction des vecteurs (voiture et piéton). La majorité du réseau (39%) est constituée de routes secondaires revêtues à une chaussée (Figure 88, Figure 89 et Figure 90). Seules les 4 premières classes par ordre d'importance sont carrossables (780,6 km). Enfin, ce réseau a été redécoupé et renseigné selon 6 classes de pente de même amplitude générées à partir de la BD Litto3D de l'IGN.

Tableau 27. Typologie des voies de communication de Mayotte selon la BD TOPO® IGN (2009) et vitesses moyennes associées de déplacement d'une voiture (VMV).

Type de voie	Nature et fonction	VMV	Identification terrain
Route principale à 1 chaussée	Routes comportant 1 chaussée goudronnée Assurent les liaisons à fort trafic à caractère prioritaire entre agglomérations importantes	50 km/h	
Route secondaire à 1 chaussée	Routes comportant 1 chaussée goudronnée Relient les communes de moindre importance entre elles et permettent de se déplacer rapidement à l'intérieur d'une commune, dans les zones rurales, et de relier le bourg aux hameaux proches	40 km/h	
Route empierrée	Routes sommairement revêtues (pas de revêtement de surface ou revêtement très dégradé), mais permettant la circulation de véhicules automobiles de tourisme par tout temps. Toutes les routes empierrées sont incluses.	10 km/h	
Chemin	Les chemins sont prévus pour la circulation de véhicules ou d'engins d'exploitation. Ils ne sont pas forcément carrossables pour tous les véhicules et par tout temps (voir aussi "route empierrée").	5 km/h	
Sentier	Chemins étroits ne permettant pas le passage de véhicules. Seuls les principaux sentiers sont inclus.		
Escalier	Escaliers directement reliés au réseau routier supportant une allée, assurant la jonction entre deux voies de communication ou entre le réseau routier et un élément adressable.		

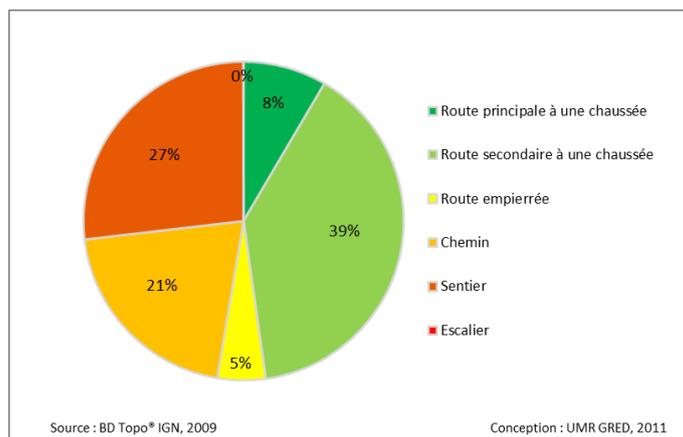


Figure 89. Répartition des types de voies selon la BD TOPO® IGN (2009) (en km).

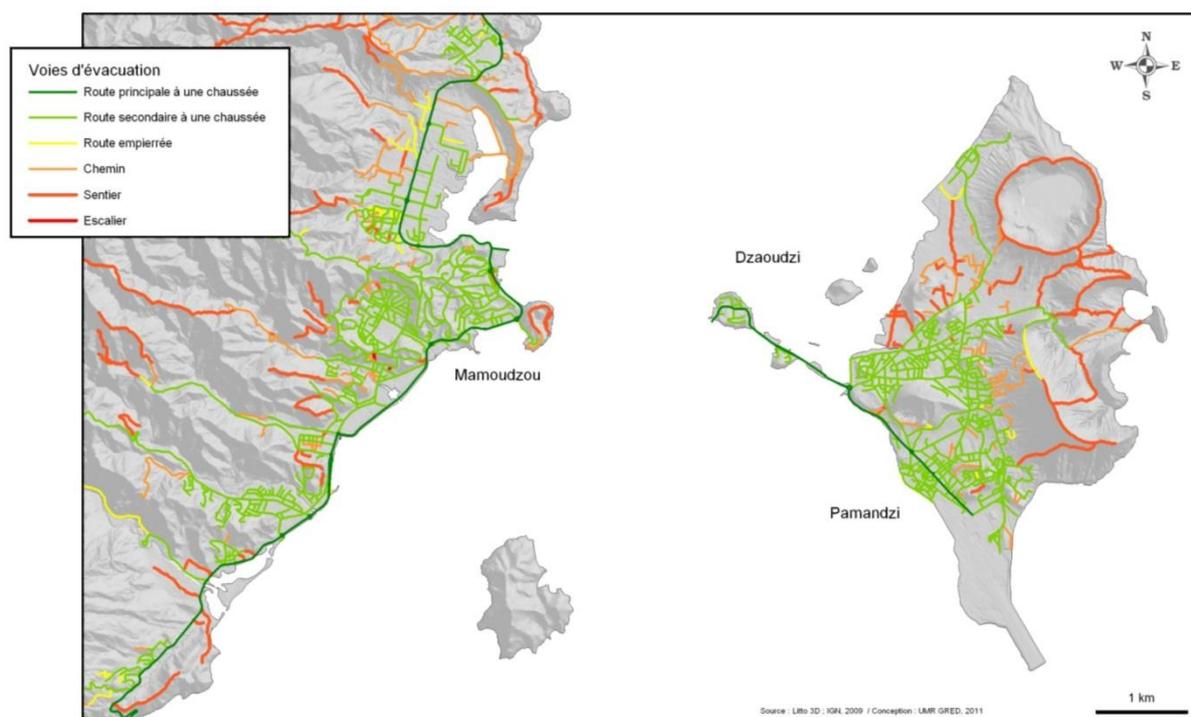


Figure 90. Extrait du réseau routier et pédestre de Mayotte selon la typologie de l'IGN (BD TOPO®, 2009).

2.4.2.2.2 Bâtiments et population nocturne associée

Les données sur le bâti proviennent du fond cadastral vectoriel fourni par la Préfecture de Mayotte en mars 2011. Les données attributaires renseignent l'état d'occupation des bâtiments : « habité » ou « non habité », ce qui a permis de sélectionner les bâtiments théoriquement occupés durant la nuit (68 600 bâtiments dont 51 300 habités, 75 %). Précisons que cette base de données est beaucoup plus précise et complète que la couche « bâti » de la BD TOPO® IGN de 2009.

L'affectation des densités de personnes par bâtiment habité (occupation nocturne) s'est faite au moyen du dernier recensement de population (RGP, INSEE, 2007). Pour ceci, les données de population disponibles par district de recensement ont été désagrégées sur chaque bâtiment en utilisant les surfaces au sol et en fixant des densités moyennes au m² par bâtiment identiques pour chaque zone IRIS. Nous avons ainsi pu estimer pour chaque habitation un nombre moyen d'occupants. Ces effectifs ont ensuite été réagregés sur des mailles de 50 m de côté (Figure 91). Cette représentation en carroyage permet une meilleure visualisation de la donnée démographique à une échelle infra communale adaptée à une analyse fine des enjeux humains. Dans le modèle d'évacuation qui suit, nous avons retenu uniquement les données de population située à moins de 10 m d'altitude, en considérant qu'au-delà le risque de submersion était insignifiant (Figure 92).

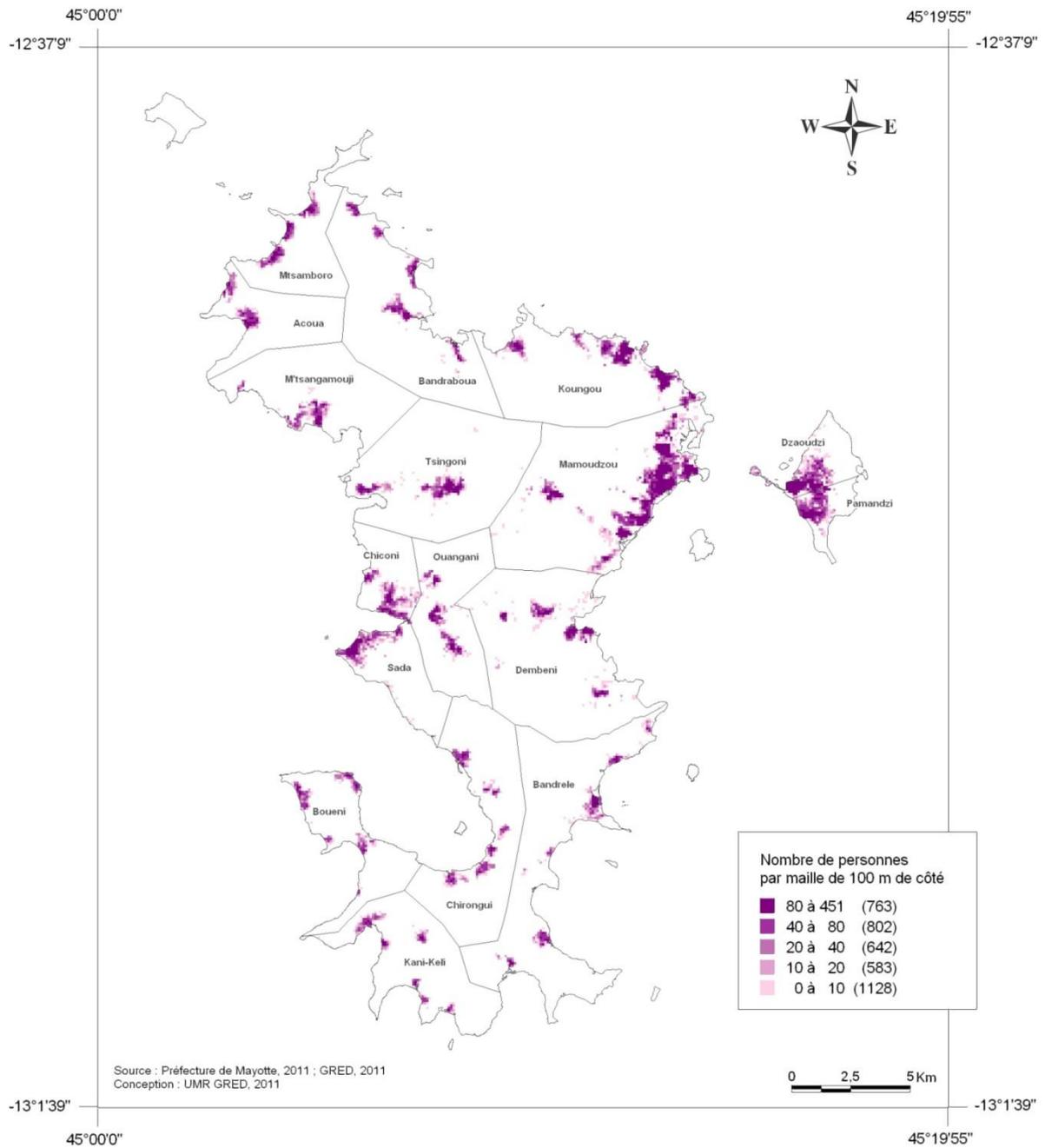


Figure 91. Densité de population nocturne à Mayotte (bâtiments habités) (sources Préfecture de Mayotte et INSEE, 2007).

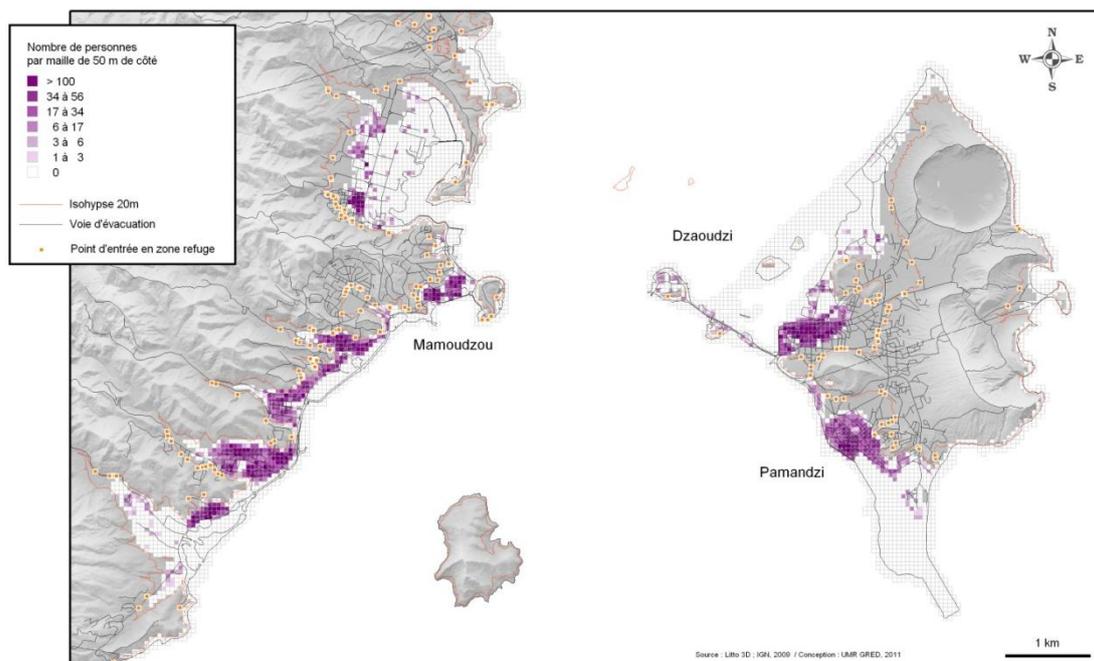


Figure 92. Extrait des densités de population nocturne situées à moins de 10 m d'altitude (sources Préfecture de Mayotte et INSEE, 2007). Données utilisées pour le modèle d'évacuation.

2.4.2.2.3 Points d'entrée des zones refuges

Nous avons considéré dans notre modèle d'accessibilité pédestre, non pas des zones refuges, mais des points d'entrée en zones refuges. Les zones refuges correspondent à tous les espaces situés à plus de 20 m d'altitude. Ces points ont été extraits par recouplement automatique du réseau des voies de communication avec l'isohypse 20 m calculée à partir du MNT de résolution 5 m de la BD litto3D de l'IGN. En effet, nous faisons l'hypothèse que les populations exposées (situées à moins de 10 m d'altitude) sont en sécurité totale du moment où elles atteignent ces points d'altitude situés au plus proche du réseau routier. Ces zones refuges horizontales présentent en théorie des capacités d'accueil illimitées pour les populations à évacuer (Figure 93). La zone intermédiaire comprise entre 10 et 20 m d'altitude correspond ainsi à une zone de transit, entre les espaces à risque et les espaces refuges.

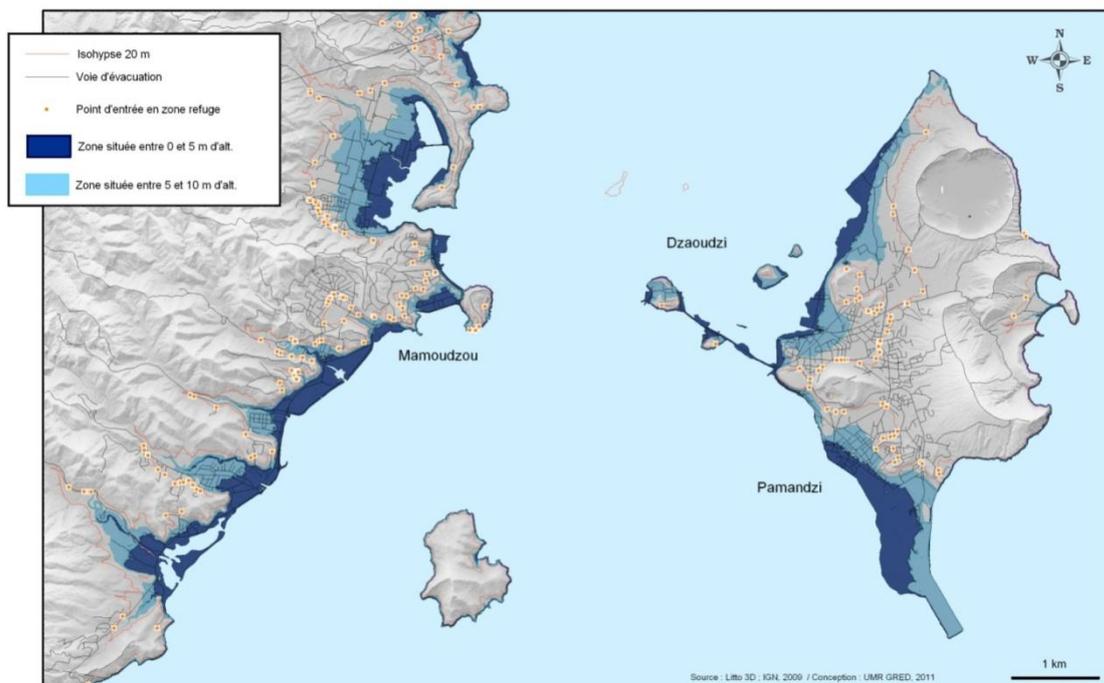


Figure 93. Extrait des zones refuges (points d'entrée en orange) sélectionnées pour la modélisation des évacuations pédestres.

2.4.2.2.4 Ressources territoriales

Nous considérons sous ce terme de ressources territoriales, l'ensemble des infrastructures et des capacités locales vitales pour le fonctionnement des deux îles (D'Ercole & Metzger, 2009 ; Metzger, 2011). Nous avons fait le choix de classer ces ressources par nature des besoins, mais également par niveau d'importance en fonction des phases d'une crise. Ces ressources n'ont pas pu être hiérarchisées sur des critères de valeur d'usage (nombre d'utilisateurs), mais nous avons par contre accordé une attention toute particulière à leur recensement et à leur localisation précise au sein du SIG. Nous définissons ainsi 6 familles de ressources vitales pour gérer une situation de crise et post-crise : hydriques, énergétiques, administratives et scolaires, sécuritaires et médicales, commerciales et agro-industrielles, et extérieures (port et aéroport). Cela représente au total 7410 implantations ponctuelles dans le SIG (7059 sur GT et 351 sur PT) (Tableau 28, Figure 94, 0). Il va de soi que la possibilité d'accès, notamment routier, à ces ressources en situation post-tsunami est une condition essentielle de la résilience territoriale de Mayotte. Dans les analyses qui suivent, les personnes et les bâtiments sont également considérés comme des ressources vitales pour le territoire. Nous attirons l'attention sur le fait que l'insularité dédoublée de Mayotte (Grande et Petite Terre) produit déjà en situation normale un très fort déséquilibre spatial des ressources (en quantité et en qualité) qui ne peut que retarder la récupération post-crise en cas d'interruption des flux entre les deux îles. Par conséquent et dans l'hypothèse d'une interruption de ces échanges, en particulier

du trafic de barges, nous avons considéré ces deux îles comme indépendantes dans l'accès aux ressources.

Tableau 28. Classement des ressources territoriales de Mayotte (sources multiples, dont INSEE, IGN, Préfecture et CG de Mayotte). (X : ressource prise en compte pour la phase de restauration post-crise).

Ressources majeures	Nom de la couche	Champs intéressants	Nombre d'objets	Sources	Commentaires	Ressources post-crise					
						Ressource en eau	Ressource énergétique	Ressource administrative et scolaire	Ressource sécuritaire et médicale	Ressource commerciale	Ressource extérieure
Moyens d'alerte	Sirènes_point		17	Préfecture	Une par commune	Non pris en compte pour la phase post-crise					
	Antenne	Altitude	22	IGN							
	Pai religieux mayotte	Culte islamique	183	IGN							
		Culte catholique et orthodoxe	2								
Enjeux majeurs	Dépôts carburants et centrale électrique		2	IGN		X					
	Aéroport		1	IGN							X
	Port de Longoni		1	IGN							X
	Pai_gestion_eau_mayotte	Usines de traitement des eaux	6	IGN		X					
	Débarquement_Secours_point	Quais et pontons	17	Préfecture				X			
	Réservoirs_point		83	GRED	Créé à partir des réservoirs polygone de l'IGN et Préfecture	X					
	Stations services		5	GRED	Créé à partir scan 25	X					
Enjeux structurels et ERP	Dispensaires		16						X		
	Hôpital		4						X		
	ERP administratif		13				X				
	Mairie		23				X				
	Préfecture		2		Mise à jour Gherardi		X				
	Etablissements scolaires		198	IGN			X				
Ressources gestion de crise	Sécurité nationale	Gendarmerie, casernes							X		
	SDIS_Mayotte	Caserne pompier et centre de secours	7	GRED	A partir du doc SDIS 2009				X		
Ressources post-crise	Hydrant	Borne incendie	586	Préfecture		X					
	Poste_EDM	Transfo électrique	337	Préfecture			X				
	Branchmt_export-pref-SIG-SIEAM_092010_point	Branchement eau	5895	Préfecture		X					
	Batiments_commercial_agricole ou industriel		95	GRED	Extrait des données Préfecture					X	
	UsinesAEP_MAY_point	Donne les m3/j	6	Préfecture		X					
	POINTS_AEP_point	Captage et forage eau	100	Préfecture		X					

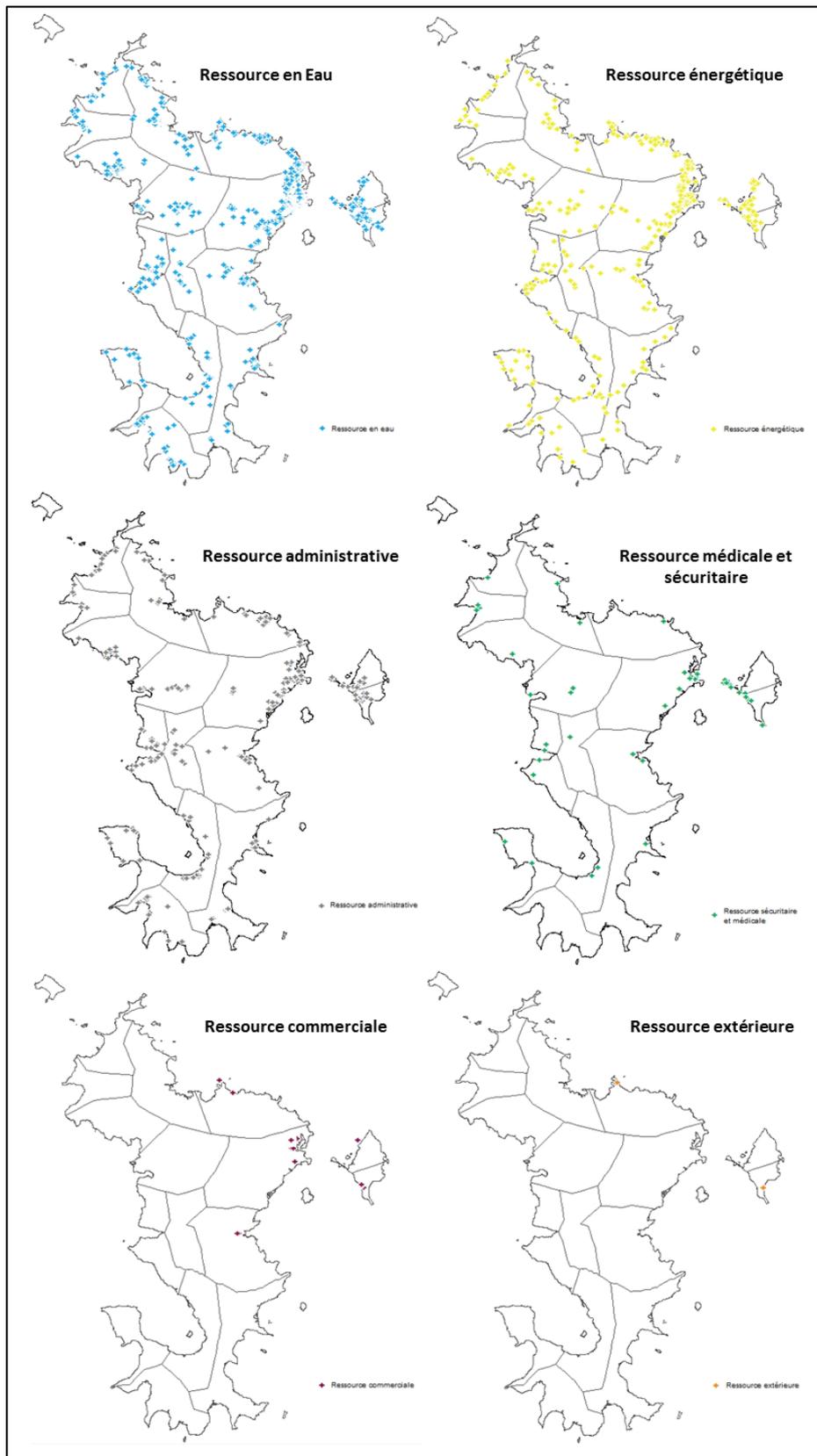


Figure 94. Localisation des différentes familles de ressources territoriales de Mayotte (sources multiples, dont INSEE, IGN, Préfecture et CG de Mayotte).

2.4.2.2.5 Centres fonctionnels (villages)

L'accessibilité des ressources se conçoit au départ des principaux foyers de population bénéficiaires. N'ayant pas la possibilité informatique de modéliser l'accessibilité au départ de chaque maille du territoire, nous avons fait le choix de retenir seulement 74 foyers principaux de population, matérialisés dans le SIG sous forme de points appelés « centres fonctionnels ». Ces points ont été localisés manuellement en faisant en sorte de les fixer sur un nœud stratégique du réseau routier intra-urbain (carrefour, rond-point) et de prendre en compte les risques d'enclavement. Ainsi, certains villages ou agglomérations sont représentés par plusieurs centres fonctionnels qui peuvent se retrouver isolés en cas de coupures du réseau routier, comme à Chiconi, Passamainty et M'Tsapéré (Figure 88).

2.4.2.3 *Modéliser et cartographier l'accessibilité routière au moyen de graphes*

2.4.2.3.1 Théorie des graphes

C'est Euler en 1737 qui est à l'origine de la théorie des graphes. Utilisée aujourd'hui en informatique ou en économie, la théorie des graphes trouve tout particulièrement son intérêt dans le domaine des transports et des mobilités. En effet, la transformation d'un réseau routier « réel » en graphe offre la possibilité de multiples applications. Si la théorie des graphes permet de simplifier le réseau visuellement, c'est avant tout dans les calculs et les représentations graphiques de l'accessibilité que la théorie des graphes devient la plus utile. Tout d'abord il faut transformer le réseau en graphe c'est-à-dire en un objet mathématique composé de sommets et d'arcs. Les sommets (les points) peuvent être associés aux nœuds du réseau, et les arcs (les liaisons entre les points) sont associés aux tronçons routiers.

Le graphe doit rendre compte fidèlement de la hiérarchie routière urbaine et donc distinguer les différents types de voies qui composent le réseau (Appert et Chapelon, 2006). Dans le cadre des réseaux routiers il est important d'attribuer des valeurs aux graphes (graphe valué). En effet, les lieux de départ et d'arrivée sont situés dans l'espace et n'ont pas forcément le même poids : les routes ont des vitesses et des capacités différentes. Chaque arc est caractérisé par sa longueur en kilomètres (caractéristiques morphologiques) et par la vitesse de déplacement permise sur l'infrastructure qu'il représente (caractéristiques qualitatives).

Grâce à la théorie des graphes, il est possible d'intégrer la notion d'accessibilité dans les systèmes d'information géographique. La représentation graphique d'un réseau couplée aux nombreux calculs d'accessibilité permet d'insérer la perte d'accessibilité dans la visualisation géographique de la vulnérabilité des réseaux routiers.

Les problèmes de cheminement sont des problèmes anciens de la théorie des graphes. Il existe de nombreux algorithmes de recherche des plus courts chemins dans un graphe : algorithmes de Ford, de Bellman, de Moore, de Floyd et de Dijkstra (1959) avec ses variantes (Dantzig, Whiting & Hillier).

2.4.2.3.2 Choix de la distance-temps comme valuation du graphe

- Pour les véhicules

Un réseau peut être plus ou moins bien prédisposé à répondre à un incident survenant sur tel ou tel de ses liens. Outre la morphologie (profil en long, pente), la qualité des voies (profil en travers) influence grandement cette prédisposition. Afin de prendre en compte ces deux critères simultanément dans les calculs d'accessibilité, nous utilisons le temps comme valuation du graphe. En effet, le temps de parcours dépend à la fois du profil en long et du profil en travers des infrastructures. Cette valuation temporelle des arcs du graphe nécessite l'utilisation de vitesses spécifiques. Ainsi, à chaque classe d'infrastructure est associée une vitesse moyenne de déplacement, aussi bien pour un véhicule que pour un piéton.

Les vitesses retenues pour notre étude sont précisées dans le Tableau 27 pour les véhicules et le Tableau 30 pour les personnes. Les vitesses moyennes de circulation en voiture ont été déduites de tests effectués sur plusieurs classes de voies au mois de mars 2011 au volant d'une Renault Clio (cf. 0). Les valeurs mesurées s'étendent de 17,5 km/h en agglomération (Mamoudzou) à 42 km/h en rase campagne. Ces vitesses, très faibles comparativement aux moyennes nationales, sont très variables en fonction de la topographie (sinuosité, pente), de l'état de la route, et du moment de la journée (congestion du réseau, encombrement des bas-côtés). Nous avons finalement ajusté ces valeurs moyennes en fonction de nos tests et des références bibliographiques disponibles (Chapelon, 1996) selon une gamme s'étendant de 5 à 50 km/h.

- Pour les piétons

Les vitesses de déplacement des piétons en régime de marche ont à ce stade de l'étude été définies à partir des données bibliographiques disponibles et quelques tests *in situ*, en essayant de tenir compte de la pente et du type de voie (largeur), mais sans considérer l'encombrement du réseau ou le profil physique et psychologique des personnes.

En l'absence d'interaction avec d'autres individus ou avec des obstacles présents dans l'environnement, un piéton se déplace à une vitesse, dite « de confort », de l'ordre de 1,3 mètres par seconde (soit près de 5 km/h). Cette valeur est naturellement soumise à une certaine variation. Les valeurs relevées dans la littérature s'étendent de 0,9 m/s à 1,5 m/s (Moussaid, 2010). A partir d'une

synthèse des vitesses de déplacement des piétons sur 27 sources différentes, Daamen (2004) donne une valeur moyenne de 1,34 m/s. Quant à lui, Dewi (2010) retient comme vitesse d'évacuation face à un tsunami, une valeur moyenne de 0,751 m/s. Cela correspondrait à la vitesse de déplacement d'un groupe de personnes âgées. Nous avons complété cet état de l'art par des valeurs standardisées, couramment utilisées pour des calculs de mobilité urbaine, ainsi que par des valeurs directement mesurées sur le terrain.

Par définition, une évacuation face au risque de tsunami implique un dénivelé positif. Il convient donc de moduler la vitesse pédestre en fonction de la pente du terrain. Sur ce point, la bibliographie est beaucoup moins abondante. Les principales expériences citées ont été menées en laboratoire dans le cas d'évacuation de bateaux en détresse (Lee *et al.*, 2003 et 2004). Ces vitesses ont généralement été mesurées sur des courtes distances et dans un couloir incliné. Les valeurs données par Lee *et al.* (2004) sont sensiblement plus rapides que celles de Bles *et al.* (2001). Nous avons complété ces données par des vitesses, calculées à partir des coefficients de réduction donnés par Laghi *et al.* (2007). Nos simulations ont été bornées par une valeur de pente critique de 30° (58 %) à partir de laquelle une évacuation à pied n'est plus envisageable. Dans la réalité aucun tronçon routier n'atteint cette pente à Mayotte.

Un grand nombre d'études cherche à définir une relation entre la vitesse de marche et la densité de piétons (Fruin, 1971 ; Polus *et al.*, 1983, Tanaboriboon & Guyano, 1989, Paris, 2007, Shi *et al.*, 2007 in Moussaïd, 2010). Mais notre modèle sur graphe ne permet pas de prendre en compte directement cette variable, contrairement aux modèles multi-agents. Nous avons pu néanmoins intégrer indirectement les effets des densités de piétons sur la fluidité des déplacements au moyen d'un coefficient dit de friction (CF). Ce coefficient a été défini au moyen de la formule utilisée par Dewi (2010). Il dépend de la largeur des voies d'évacuation ainsi que de la nature de leur revêtement. Par contre, dans le cas des escaliers, nous nous sommes basés sur la valeur moyenne de 0,5m/s donnée par Fruin (1971).

Au final, les valeurs retenues pour notre modélisation ont été obtenues au moyen d'une régression polynomiale (Figure 95) effectuée sur 89 valeurs de vitesse compilées à partir des différentes références bibliographiques citées plus haut et rappelées dans le Tableau 29. La vitesse sur le plat a été fixée à 5,01 km/h (1,39 m/s) sur les voies existantes. Une première simulation (SIMU 1) utilise seulement cette valeur dite « de confort ». Dans une seconde simulation (SIMU 2) cette vitesse a été modulée en fonction de la pente en utilisant notre courbe de régression et retenant la vitesse médiane des cinq classes de pente considérées. Les vitesses retenues s'étendent ainsi de 5,01 à 0,32 km/h. Une troisième simulation (SIMU 3), encore plus proche des conditions réelles, introduit le

coefficient de réduction des vitesses (friction CF) variable suivant la nature de la voie empruntée, et plus particulièrement sa largeur. Dans les trois simulations, la vitesse pédestre hors graphe a été fixée à 1 km/h (0,28 m/s) pour intégrer les obstacles naturels ou artificiels sur des trajets par définition imprévisibles.

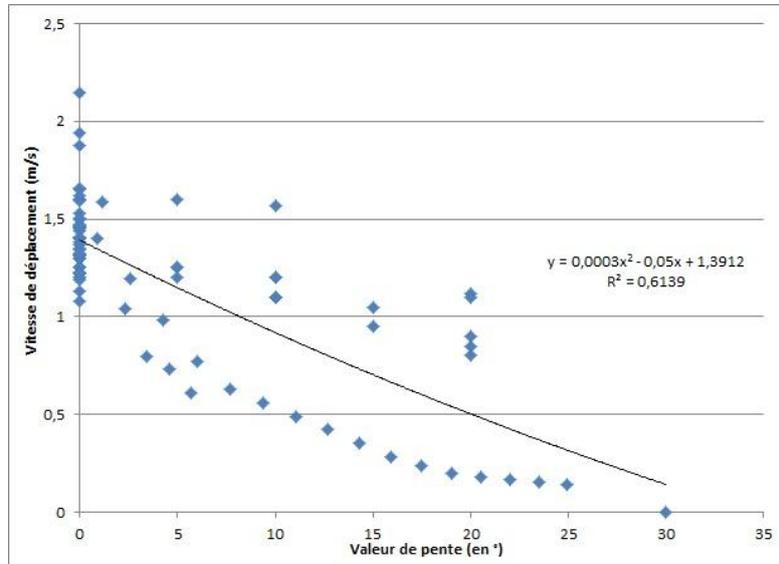


Figure 95. Variation de la vitesse pédestre en fonction de la pente du terrain. Synthèse graphique des données bibliographiques et fonction utilisée.

Tableau 29. Règles de calcul des différentes vitesses pédestres introduites dans les simulations d'évacuation.

	Simulation 1	Simulation 2	Simulation 3
Vitesses appliquées (km/h)	V1 = 5,01	V2 = 0,0003x ² - 0,05x + 1,3912 (avec x = pente en degrés)	V3=V2*CR
Remarques	vitesse dite de "confort"	Les valeurs utilisées correspondent aux médianes de chaque classe de pente	Application d'un coefficient de réduction CR (friction)
Références exploitées	Kim H. (2004)	Kim H. (2004)	Dewi R.S. (2010)
	Lee D. et al. (2003)	Lee D. et al. (2003)	
	Lee D. et al. (2004)	Lee D. et al. (2004)	
	Transplan Associates (1996)	Victor N. et al. (2010)	
	Knoblauch et al. (nd)	Laghi M. et al. (2007)	
	Fischer D. et al. (2010)		
	Daamen W. et al. (2006)		
	ANR MAREMOTI (2010)		
	Moussaïd M. (2010)		
	Daamen W. (2004)		
	Victor N. et al. (2010)		
Laghi M. et al. (2007)			

Tableau 30. Vitesses pédestres retenues pour les trois simulations d'évacuation (en km/h).

Type de voie	Largeur (m)	Classes de pente (en %)						Coefficient de friction
		0	0-15	15-30	30-45	45-60	>60%	
Sans distinction	-	5,01						
		5,01	4,26	2,90	1,76	0,88	0,00	
Route principale à une chaussée	12	4,76	4,04	2,76	1,67	0,86	0,00	0,95
Route secondaire à une chaussée	8	4,62	3,93	2,68	1,62	0,83	0,00	0,92
Route empierrée	3	4,01	3,41	2,32	1,40	0,72	0,00	0,80
Chemin	2	3,76	3,19	2,18	1,31	0,68	0,00	0,75
Sentier	1	2,50	2,13	1,45	0,88	0,45	0,00	0,50
Escalier (en montée)	-	-	1,53	1,04	0,63	0,32	0,00	0,36
Hors graphe	-	1 km/h						-
		Simulation 1	Simulation 2	Simulation 3				

2.4.2.3.3 Les matrices d'accessibilité

Les matrices Origine-Destination (OD) permettent de calculer l'accessibilité et plus particulièrement les pertes ou dégradations d'accessibilité. Il est important de souligner deux aspects : les distances-temps sont toujours calculées entre couples de lieux et toute mesure d'accessibilité se rapporte à un instant donné et à un seul (Bavoux *et al.*, 2005). La perte d'accessibilité se calcule donc entre deux matrices du même graphe, l'une à l'état normal et l'autre à l'état altéré. On peut de la sorte calculer des accessibilités unipolaires et/ou multipolaires (Tableau 31). Si le calcul de cette différence entre la matrice à l'état normal et la matrice à l'état altéré montre une dégradation de l'accessibilité, cela signifie que le réseau a perdu une partie de sa connectivité, c'est-à-dire que le nombre d'itinéraires pour rejoindre un même lieu a diminué. De plus, si une partie du réseau se retrouve isolée, on peut dire que le réseau global a perdu de sa connexité. Un réseau avec une bonne connectivité permet de maintenir sa connexité.

Tableau 31. Extrait de la matrice OD (origine-destination) entre les 6 centres de secours de Mayotte et les villages (centres fonctionnels). Capture d'écran.

	FromID	ToID	Time	Dist
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	MTsangamouji	10,788	8,99
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Boueni	65,156	54,296
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Acoua	0,525	0,437
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Acoua	3,177	2,648
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Mtsanboro	8,032	6,694
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Mtsanboro	9,377	7,814
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Mtsanboro	11,337	9,448
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Bandraboua	19,701	16,418
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Bandraboua	19,382	16,151
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Bandraboua	22,31	18,591
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Bandraboua	23,333	19,444
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Bandraboua	25,35	21,125
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Koungou	29,601	24,668
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Koungou	34,73	28,942
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Koungou	37,142	30,951
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Koungou	39,08	32,567
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Koungou	41,946	34,955
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Koungou	44,091	36,742
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Dembeni	37,548	31,29
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Dembeni	39,598	32,998
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Dembeni	43,592	36,327
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Bandrele	47,243	39,369
<input type="checkbox"/>	SDIS_Acoua	Bandrele	49,678	41,398

2.4.2.3.4 Paramétrage et fonctionnalités de RouteFinder

RouteFinder est un utilitaire SIG conçu pour la création et l'exploitation de cartes d'accessibilité. Il permet ainsi de raisonner en temps, en distance, en coût, et de générer des itinéraires (<http://www.routeware.dk>). Les calculs d'accessibilité peuvent se faire à partir d'un ou de plusieurs points et en utilisant tout type de moyen de locomotion. Il permet de rechercher automatiquement les plus courts chemins (en temps ou en distance) d'un graphe en utilisant l'algorithme de Dijkstra (1959) (Figure 96). *Routefinder* requiert dans un premier temps de préparer la table du réseau routier. Cela se traduit par l'ajout de trois nouveaux champs qui vont accueillir plusieurs types de données, en particulier les vitesses de circulation (Figure 97). Les codes « vitesses » sont inscrits dans une colonne spécifique de la table réseau routier. Il suffit de faire correspondre dans les options de vitesse de *Routefinder*, le code « vitesse » à la vitesse voulue (Figure 98).

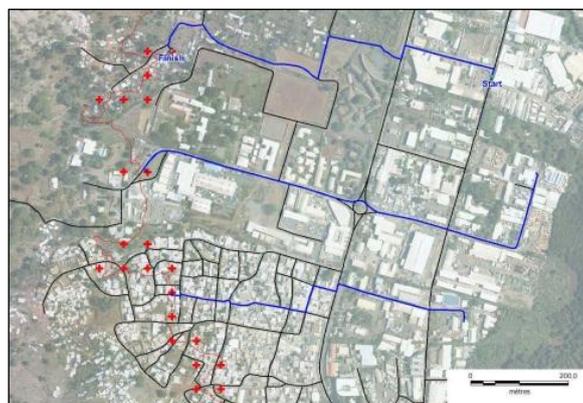


Figure 96. Exemples d'itinéraires (en bleu) par les plus courts chemins (en distance) générés par RouteFinder. Application à l'accessibilité des zones refuges (croix rouges). Capture d'écran. Orthophoto IGN, 2008.

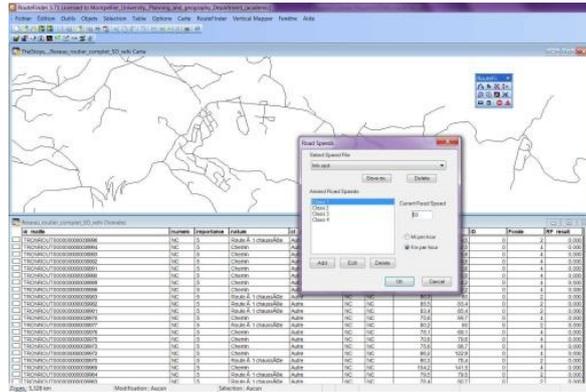


Figure 97. Paramétrage des vitesses pour l'accessibilité des secours dans RouteFinder. Capture d'écran.

Routefinder permet entre autre :

- Des calculs d'itinéraires en fonction de la distance,
- Des calculs d'itinéraires en fonction de la durée,
- De calculer des matrices d'accessibilité entre tous les lieux,
- De cartographier l'accessibilité soit par des isochrone (surface), soit par des *isolinks* (objets linéaires du réseau).

Les calculs d'accessibilité peuvent se faire selon deux modes : selon la distance la plus courte (mode « *Shortest* »), ou selon le temps de trajet le plus court (mode « *Fastest* »). Le premier mode a été choisi pour l'accessibilité des zones refuges tandis que le second a été réservé à celle des secours et des ressources territoriales. Dans les deux cas la distance et la durée du parcours sont calculées.

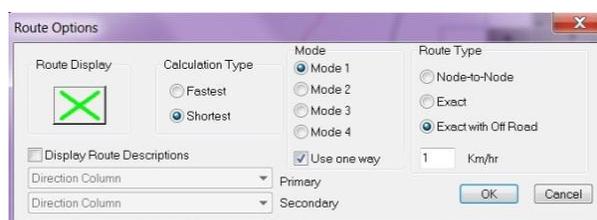


Figure 98. Sélection du mode de calcul pour l'accessibilité pédestre des zones refuges. Capture d'écran.

Un autre point important est la sélection des lieux de départ et/ou d'arrivée. Là encore plusieurs solutions nous sont offertes. La plus simple consiste à placer ces lieux sur un nœud du réseau. Le cas échéant, *Routefinder* prendra automatiquement le nœud le plus proche comme point de départ ou d'arrivée. Dans ce cas de figure on peut aussi rentrer une vitesse moyenne hors réseau (mode « *Exact with Off Road* »). Le logiciel établira alors un itinéraire « invisible » utilisant cette vitesse entre le lieu choisi et le nœud le plus proche. Ce mode a été appliqué pour les calculs pédestres et la

vitesse *off road* établie à 1 km/h, pour intégrer tous les obstacles et éventuelles pentes très fortes pouvant entraver la mobilité d'un piéton sur ces itinéraires hors réseau.

2.4.2.3.5 Restitutions cartographiques et graphiques des résultats

La représentation cartographique s'avère être un des meilleurs moyens de visualiser les temps et itinéraires de l'accessibilité. Mais il faut pour cela prendre en considération les contraintes liées aux logiciels qui supportent le SIG. Ainsi, MapInfo couplé à *Routefinder* permet de produire trois types de cartes pour représenter des temps et des itinéraires d'accès ante et post-tsunami :

Cartes en symboles proportionnels (ponctuel) : il s'agit de sélectionner des lieux de départs et des lieux d'arrivées entre lesquels on calcule les durées de trajets (matrice OD). Les temps d'arrivée vers chaque point de destination sont ensuite représentés au moyen de cercles proportionnels. Il en va de même pour les pertes d'accès qui sont données par le différentiel de temps d'arrivée entre un réseau à l'état normal et un réseau à l'état altéré. Ce type de représentation est particulièrement adapté aux lieux d'arrivée implantés géographiquement sous forme de points, et si possible ancrés sur des nœuds du réseau. Il n'a pas été utilisé dans cette étude.

Carte en *isolinks* (linéaire) : sur ces cartes, les temps d'accès sont représentés en implantation linéaire sur les tronçons routiers. Une variation de couleur est attribuée à chaque classe de temps de trajets pour atteindre chaque extrémité d'un tronçon. Ce type de visualisation est intéressant lorsque les lieux à mesurer se trouvent sur le réseau ou lorsque l'on s'intéresse uniquement à l'accessibilité le long du réseau routier. Ce mode a été retenu pour calculer les ressources accessibles. Les *isolinks* ont été d'abord générés à partir de chaque centre fonctionnel (74) sur un réseau dégradé (suppression des tronçons sous 5 m d'altitude), puis assemblés. Une zone tampon (buffer) de 100 m a ensuite été créée autour de chaque *isolink* pour calculer les ressources territoriales situées à proximité (Figure 99). Ces quantités de ressources ont ensuite été réaffectées à chaque centre fonctionnel, puis représentées par des cercles proportionnels exprimant le pourcentage de la ressource encore accessible après un tsunami. On suppose que pour chaque île, c'est la totalité de la ressource qui est accessible depuis chaque localité en situation normale (réseau non dégradé, avant tsunami).

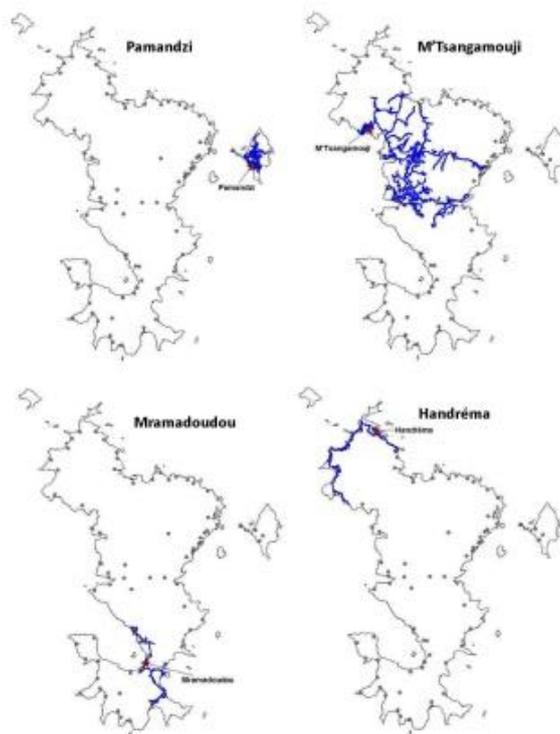


Figure 99. Exemples d'isolinks (en bleu) matérialisant le réseau routier post-tsunami accessible au départ de 4 villages (en rouge). Captures d'écrans.

Carte en carroyage (surfactive) : la méthode consiste à appliquer les temps de trajet modélisés à chaque maille d'une grille. La grille est construite sur toute la zone d'étude ou uniquement sur les portions du territoire effectivement traversées par le réseau routier. La taille des mailles peut être adaptée suivant l'échelle d'étude et/ou le format des cartes à produire. Dans les applications qui suivent, nous avons retenu des mailles de 1 hectare (100 x 100 m) pour représenter l'accessibilité des secours et des mailles de 2 500 m² (50 x 50 m) pour traiter l'accessibilité des zones refuges (évacuation). Toutes les mailles qui ne sont pas traversées par un tronçon de route sont considérées comme naturellement isolées. On calcule les temps d'accès entre les lieux de départ et les centroïdes de chaque maille. Les résultats obtenus sont ensuite discrétisés en classes de couleurs. Cette méthode offre des avantages importants pour mesurer l'accessibilité territoriale. En effet, elle permet par le jeu des agrégations spatiales d'affecter des données à ces mailles : bâti, population, etc. Les données d'accessibilité obtenues peuvent ainsi être exportées dans un tableur pour construire des **courbes d'accessibilité**. Ces courbes expriment le volume d'enjeux accessibles en fonction du temps. Le passage aux courbes permet d'apprécier l'impact territorial d'un scénario en superposant sur un même graphique les courbes d'accessibilité à l'état normal et celles obtenues pour un réseau altéré. Ces courbes ont été établies pour chaque commune afin de quantifier l'évacuation des populations, et pour chaque centre de secours dans le cadre de l'accessibilité routière des populations.

2.4.3 Résultats

2.4.3.1 Exposition directe à l'aléa tsunami

L'exposition directe a été calculée par commune, pour chaque famille de ressource majeure, pour le bâti et pour la population. On a cartographié cette exposition au moyen du pourcentage de l'effectif total communal en considérant tous les enjeux situés à moins de 5 m d'altitude (aléa de référence) (figures).

Environ 28% de la population totale de Mayotte (52 500 personnes) vivent dans une tranche d'altitude comprise entre 0 et 10 m dont 12,6% (23 600 personnes) qui sont situés à moins de 5 m d'altitude (Figure 100). C'est la commune de Mamoudzou qui présente l'exposition humaine la plus élevée en valeur absolue avec environ 6000 personnes situées à moins de 5 m, suivie des communes de Koungou et Bandréle avec respectivement 3000 et 2000 personnes en zone submersible. En valeur relative, ce sont Pamandzi et Dzaoudzi qui connaissent les expositions les plus élevées (respectivement 60 et 40%). L'exposition du bâti est proportionnelle à celle de la population avec près de 9000 bâtiments situés à moins de 5 m (13%). En cas de tsunami les dommages au bâti peuvent être très variables. Leur intensité sera fonction des vitesses et hauteurs d'eau, et bien entendu du niveau de résistance des constructions face aux effets de pression latérale basale et d'impact provoqués par les débris flottants (Leone *et al.*, 2010b). Ces intensités probables de dommages pourront être estimées prochainement avec les premiers modèles d'inondation du CEA, tout comme les probabilités de décès, en utilisant des matrices et des courbes d'endommagement développées par notre équipe sur d'autres sites (Leone *et al.*, 2011a ; Sahal, 2011).

Pour ce qui est des ressources majeures, le degré d'exposition est variable suivant leur nature (Figure 101). Ce sont 12,8% des ressources globales post-crise qui sont directement exposés à de la submersion marine (13% à Grande Terre et 11% à Petite Terre). Les communes les plus critiques sont celles de Petite Terre si on raisonne en ressources propres, avec 50% des ressources totales exposées pour Pamandzi et Dzaoudzi, suivies pour Grande Terre des communes de Mamoudzou (37%), Kani-Keli (20%) et Acoua (12%). Les familles les plus exposées sont les ressources extérieures (port et aéroport entièrement submersibles : 100%), suivi des ressources médicales et sécuritaires (21,8 %), administratives (14,8 %), hydriques (13 %) et commerciales (11,6 %) et énergétiques (5,8 %).

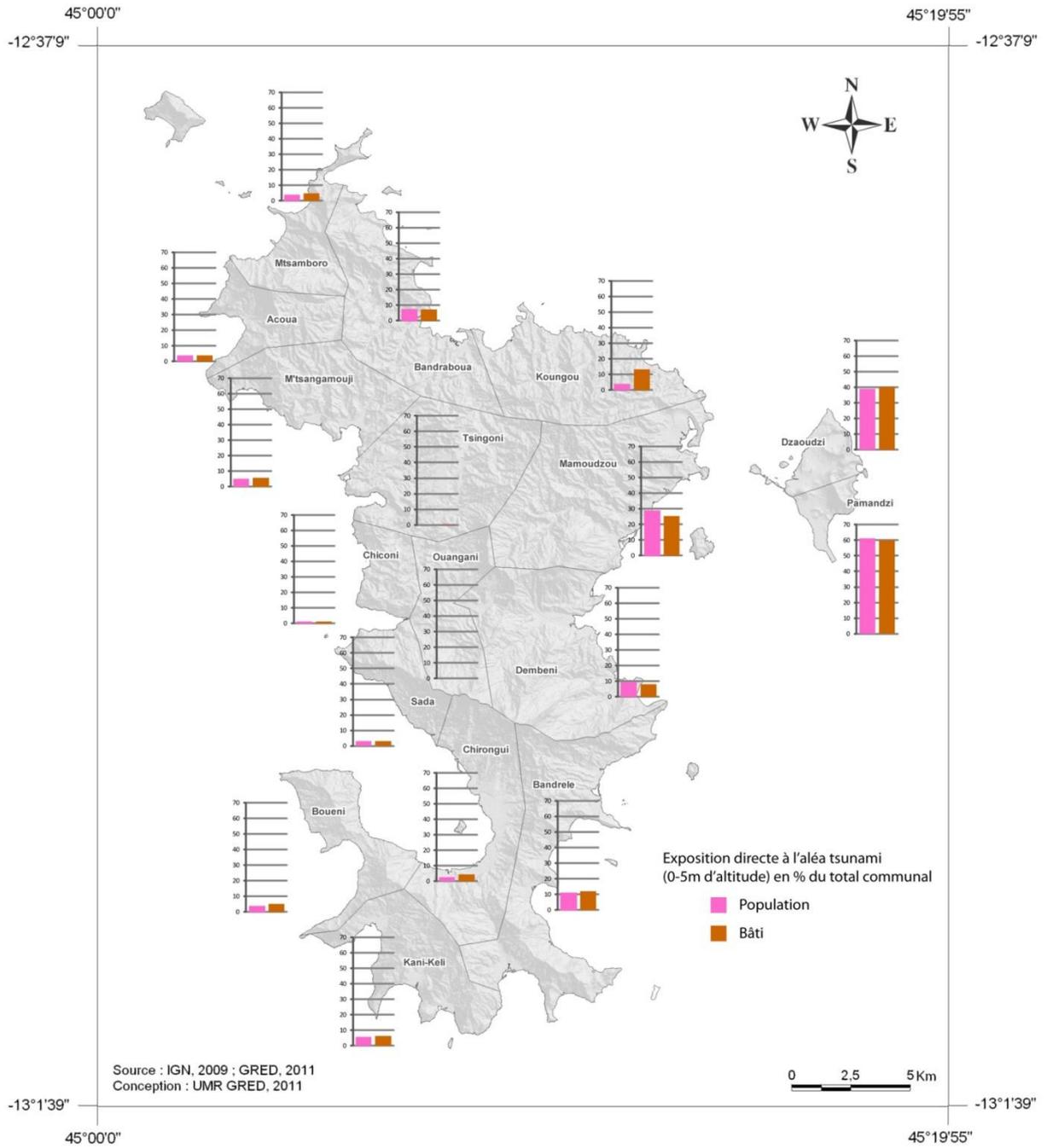


Figure 100. Exposition directe des ressources bâti et humaines à l'aléa tsunami (moins de 5 m d'altitude, en pourcentage du total communal).

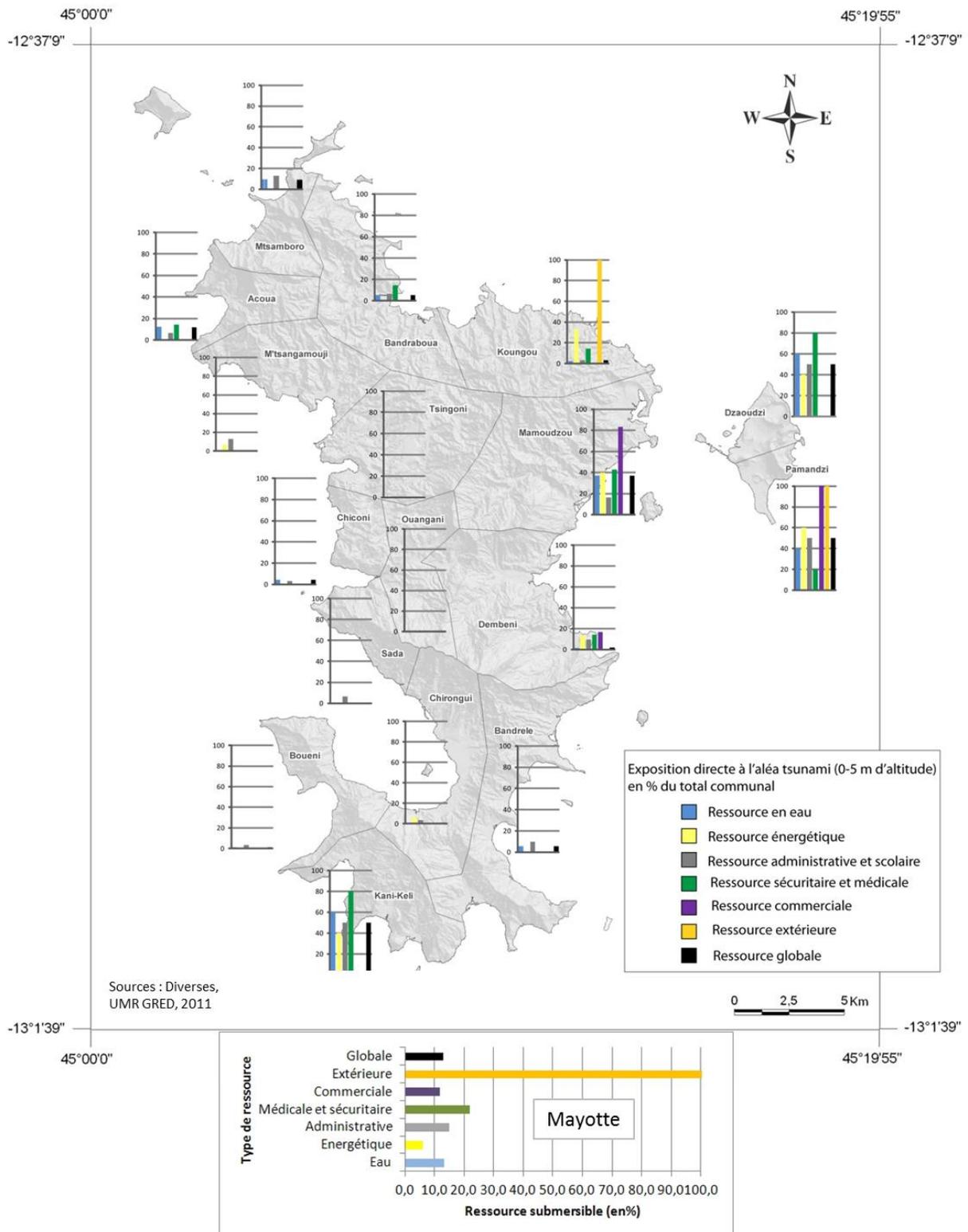


Figure 101. Exposition directe des ressources territoriales à l'aléa tsunami (moins de 5 m d'altitude, en pourcentage du total communal).

2.4.3.2 Risque de dysfonctionnement du réseau routier

Près de 8% du réseau routier (carrossable) de Mayotte (74,7 km) se trouvent à moins de 5 m d'altitude, ce qui rend ces routes vulnérables à des phénomènes de submersion marine (Figure 102).

Ce sont les routes secondaires à une chaussée qui sont majoritairement concernées (58%, 43,6 km) (Figure 103).

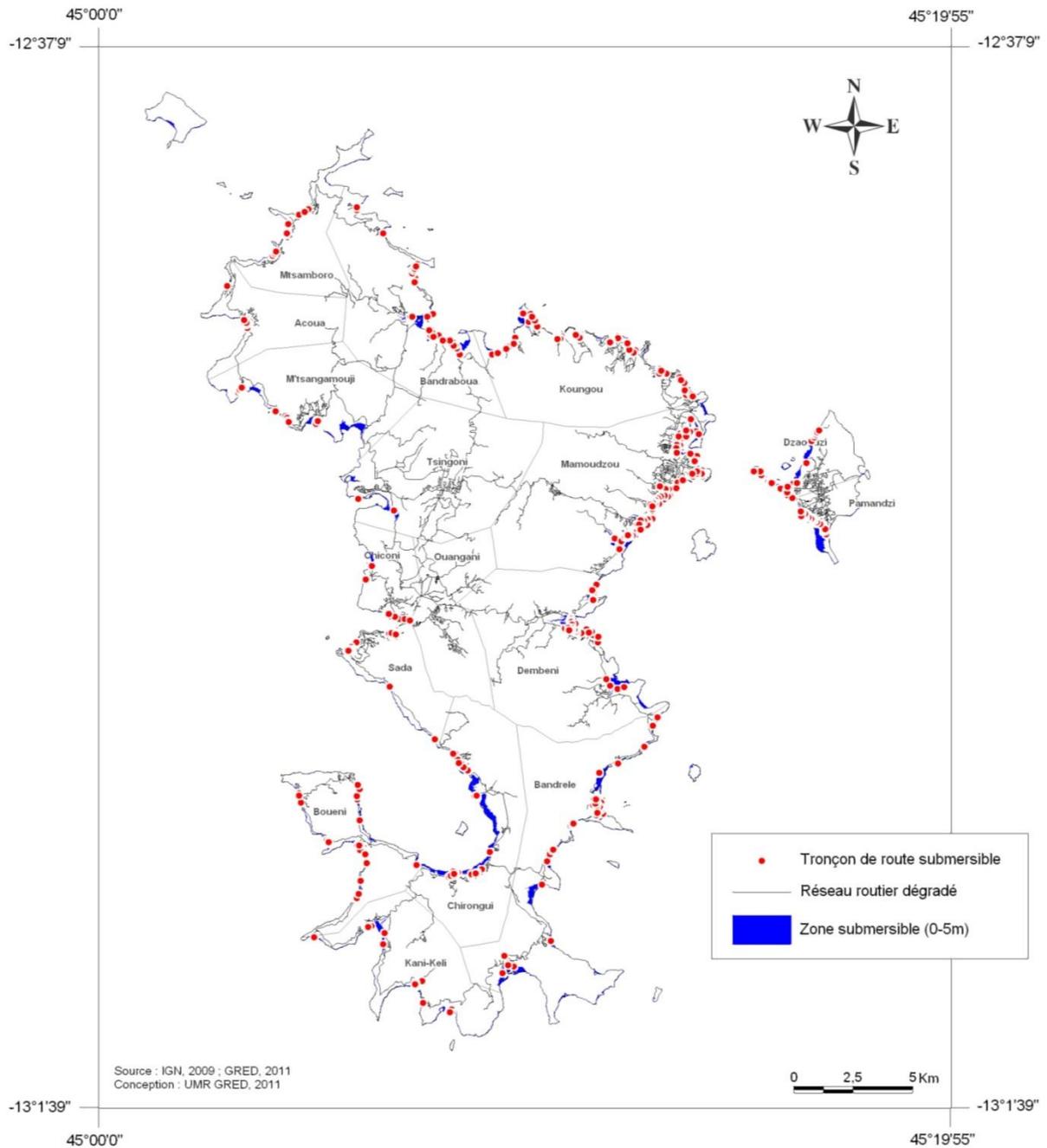


Figure 102. Tronçons routiers situés à moins de 5 m d'altitude et pouvant être coupés en cas de tsunami.

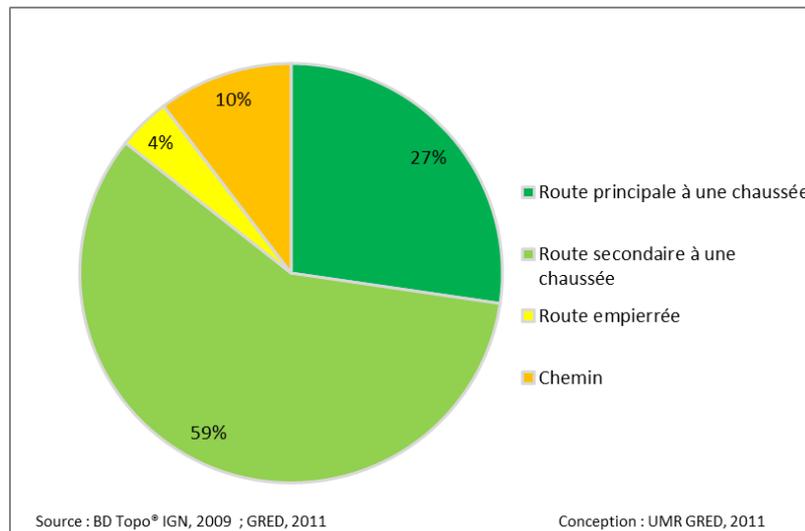


Figure 103. Répartition des types de routes situées à moins de 5 m d'altitude (source BD TOPO® IGN, 2009).

En cas de tsunami, le mode d'endommagement prédominant pour un tronçon routier est l'obstruction par des dépôts de matériaux divers, mais des effets d'affouillement peuvent conduire à l'érosion partielle ou totale des chaussées, en particulier celles situées au plus proche du trait de côte. Par ailleurs, les nombreux ouvrages de franchissement peuvent être également emportés par les effets d'impact sur les tabliers des ponts (Gauraz, 2008). Pour un tsunami de même magnitude avec la même charge solide, on peut considérer que la probabilité de coupure d'un tronçon routier dépend de la longueur du tronçon exposée et de sa distance à la côte. Les dysfonctionnements induits par cette coupure vont se traduire par des limitations de gabarit et/ou des limitations de vitesse de circulation en cas de dégradation partielle de la chaussée, jusqu'à des interruptions de trafic de quelques heures à plusieurs semaines en fonction de l'intensité des dommages et des capacités locales d'intervention. Dans tous les cas il faudra envisager et aménager des itinéraires de déviation. 97 tronçons exposés (84 sur Grande Terre et 13 sur Petite Terre GT) ont fait l'objet d'un diagnostic sur le terrain, comportant des prises de vue et un calcul de la distance minimale de contournement (déviation) au moyen du logiciel *RouteFinder* (Figure 104, 0). Trente-sept des 97 tronçons étudiés présentent des distances de déviation de plus de 36 km en cas de coupure. Ils se situent majoritairement entre Passmaïnti et Dzoumonyé sur la façade nord-est de Grande Terre (Figure 105). Dans une démarche analytique visant à mesurer le risque de dysfonctionnement d'un tronçon routier, cette distance de déviation peut devenir un critère de valeur fonctionnelle entrant dans la définition d'un indice de risque qui combine une probabilité de coupure, un degré de vulnérabilité et cette valeur fonctionnelle (Leone *et al.*, 2011b).



Tronçons exposés (N1)



Itinéraire de déviation

Id tronçon BD Topo IGN : 37546
N° ou nom Route : N1
Commune : Majikavo (Koungou)

Commune : Majikavo (Koungou)
Longueur exposée : 14 m
Distance de déviation : 41 km

Figure 104. Exemple de fiche de diagnostic des tronçons routiers exposés (moins de 5 m d'altitude).

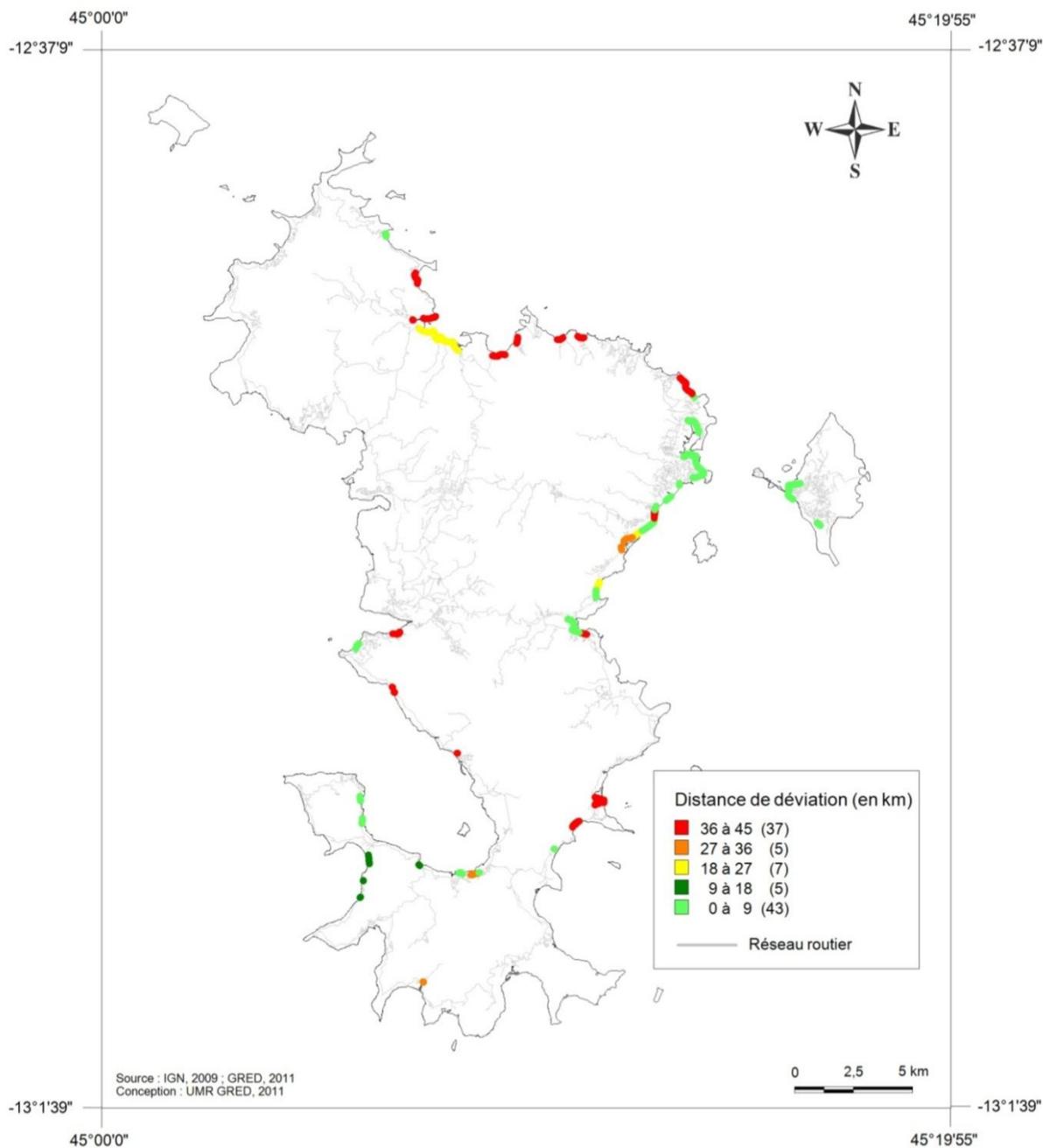


Figure 105. Classification des tronçons exposés étudiés en fonction de leur distance de déviation par le plus court chemin.

2.4.3.3 *L'accessibilité des zones refuges en phase d'alerte (évacuation, ante)*

En cas de tsunami la consigne habituelle est d'évacuer à pied, dans le calme, par ses propres moyens, vers les zones refuges les plus proches et en suivant la signalétique en vigueur conformément aux directives de l'UNESCO (IOC-UNESCO (2008)). Ce sont ces conditions que nous avons retenues dans nos simulations, faisant donc l'hypothèse d'itinéraires préalablement fléchés, selon les chemins les plus courts, avec une population préparée. Autant de conditions qui ne sont actuellement pas

réunies sur Mayotte mais qui permettent de modéliser les délais d'évacuation théoriques qu'elles pourraient garantir si elles étaient correctement mises en œuvre.

L'accessibilité pédestre des zones refuges a été modélisée au départ des mailles du territoire (50x50m) situées à moins de 10 m d'altitude, en utilisant la totalité des voies de communication disponibles et pour les 3 simulations de vitesses décrites précédemment. Les temps d'accès théoriques obtenus pour chaque maille du territoire sont illustrés sur la Figure 106 pour la simulation n°3 (la plus fine) qui intègre la pente et le type de voie. L'extrait de carte présenté permet de mettre en évidence les secteurs les plus éloignés des points d'entrée en zones refuges situées à plus de 20 m d'altitude. Sur cet extrait, ils concernent Petite Terre, avec des temps maximaux de près de 90 mn dans certains secteurs de l'île peu desservis en voies d'évacuation et/ou en zones refuges.

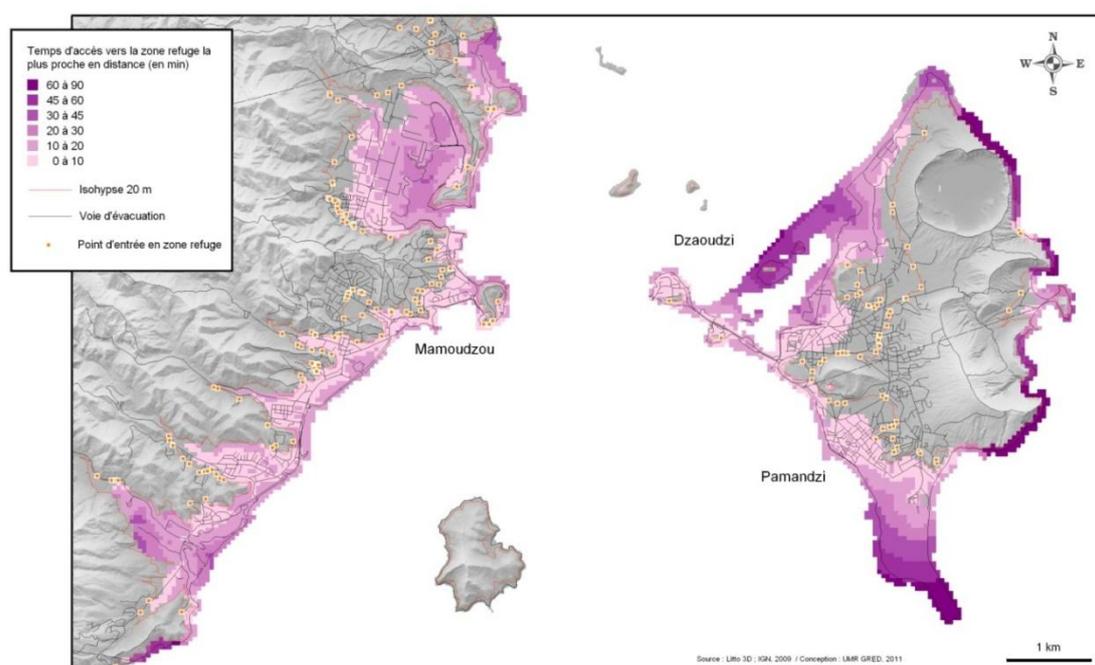


Figure 106. Temps d'accès théoriques (des zones d'altitude inférieure à 10 m) pour gagner les points d'entrée en zones refuges les plus proches (simulation n°3). Extrait de la carte de Mayotte.

Pour réduire les temps de calcul à l'échelle de Mayotte nous avons considéré l'accessibilité uniquement au départ des mailles habitées et pour lesquelles nous possédions une estimation de la population nocturne. Cela représente néanmoins une matrice OD de 1,65 millions de trajets dont nous avons extrait les temps de parcours minimaux. Les courbes d'accessibilité obtenues pour chaque simulation permettront d'apprécier la qualité du modèle et d'ajuster son paramétrage après de futurs tests in situ. La simulation n° 3 est logiquement la plus lente (Figure 107). Elle donne pour l'ensemble de Mayotte un temps maximum théorique de mise en sécurité des 52 500 personnes vivant à moins de 10 m d'altitude de 34 mn (34 mn à Grande Terre et 23 minutes à Petite Terre). Suivant les communes, ces délais varient fortement, de 10 mn pour Chiconi (780 personnes) à 34 mn

pour Mamoudzou (13 800 personnes) (Figure 108). Ce temps de trajet implique que les personnes soient déjà sur le réseau au moment d'évacuer.

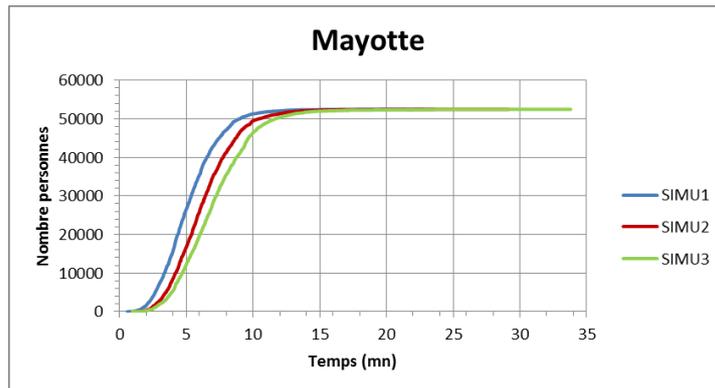


Figure 107. Comparaison des courbes d'accessibilité des zones refuges pour les 3 simulations (Mayotte).

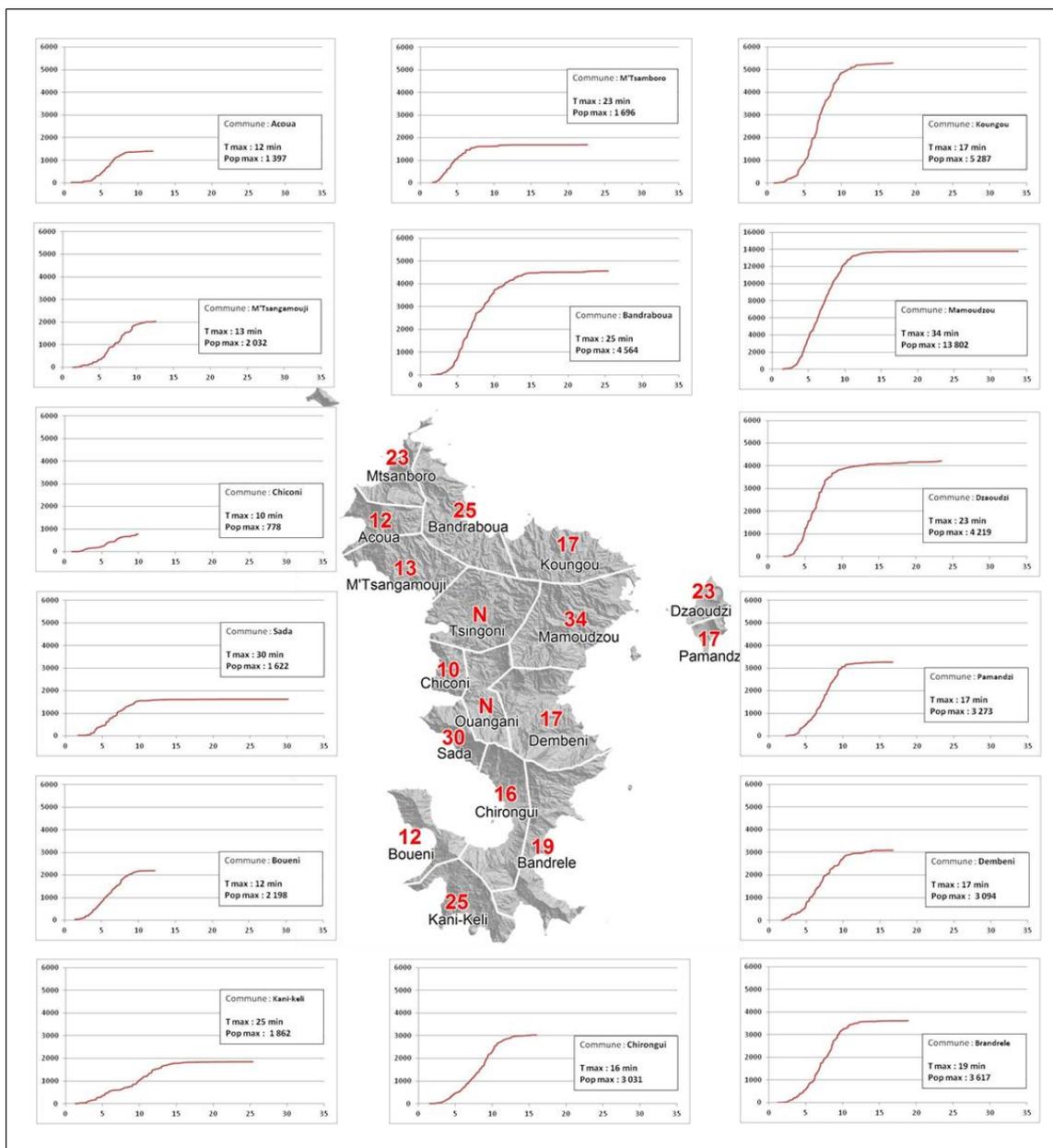


Figure 108. Comparaison des courbes d'accessibilité des zones refuges pour chaque commune à partir de secteurs peuplés la nuit. Temps maximal en rouge sur la carte (en mn). N : aucune personne à évacuer. Simulation n°3.

2.4.3.4 L'accessibilité des secours en phase d'urgence (post)

L'accessibilité routière et théorique des secours (en véhicule) a été traitée au départ des 6 casernes de pompiers existantes vers l'ensemble du territoire, avant et après tsunami. Les vitesses moyennes de circulation appliquées sont celles mentionnées dans le Tableau 27. La Figure 109 représente l'accessibilité multipolaire en situation normale au moyen des itinéraires et des temps minimum d'intervention en utilisant les trajets les plus courts en temps de parcours pour une voiture. Ce modèle donne un temps d'intervention maximal théorique de 21 mn pour atteindre l'ensemble du territoire mahorais par voie routière. Un seuil de 14 minutes proche du temps minimum réglementaire des services de secours en France permet d'identifier les secteurs les plus enclavés en situation normale. On identifie ainsi sur Grande Terre six zones principales situées à plus de 14 mn d'un centre de secours en voiture, mais qui ne représentent que 2% de la population officielle de Mayotte. Notons que 3 de ces zones sont en situation littorale (secteurs de Mbouini au Sud, Hajangoua à l'Est, et Handréma au Nord). Quant à elle, Petite Terre est desservie en moins de 7 mn depuis la caserne de Pamandzi. Cette accessibilité devrait être améliorée avec le projet de nouvelle caserne prévu à Dembeni en 2012.

L'accessibilité routière dégradée a été modélisée selon le scénario d'aléa de référence retenu et l'hypothèse d'une coupure de toutes les routes situées à moins de 5 m d'altitude. Ces coupures multiples (8% du réseau routier total et carrossable de Mayotte) introduisent une forte dégradation de l'accessibilité territoriale post-tsunami. Cette dégradation a été traitée au départ de chacune des casernes existantes (Figure 110 et 0). C'est le centre de secours principal de Mamoudzou qui génère la plus faible accessibilité car bien que hors d'eau (plus de 5 m), tous ses accès immédiats sont inondables. Il s'agit d'une situation d'enclavement total très critique qui pourrait compromettre l'intervention des secours sur tout le quart nord-est de Grande Terre où se trouvent les enjeux humains littoraux les plus importants. Il en va de même pour la majorité du littoral, excepté pour le quart nord-ouest de Grande Terre bien desservi par la caserne d'Acoua. Mais cette dernière est implantée en zone submersible. Les courbes d'accessibilité produites permettent de hiérarchiser l'importance de ces centres au regard du nombre de personnes accessibles en fonction du temps (Figure 110). On peut voir que ce sont les centres de Longoni, Chiconi et de Pamandzi qui offrent la meilleure accessibilité post-tsunami (en volume de personnes) sur Grande Terre. Par contre, les temps d'accès sont très dégradés (plusieurs heures) du fait de l'utilisation du réseau de pistes secondaires pour traverser l'île. *A contrario*, l'accessibilité est fortement réduite au départ des casernes de Chirongui et d'Acoua, si on raisonne toujours en volume de personnes. Par contre, cette

accessibilité post-tsunami est assez bien préservée sur Petite-Terre, avec néanmoins pour principale difficulté, l'impossibilité de rejoindre Dzaouzi depuis le centre de secours de Pamandzi en raison de la très probable coupure de la RN4 sur le tombolo reliant ces deux points.

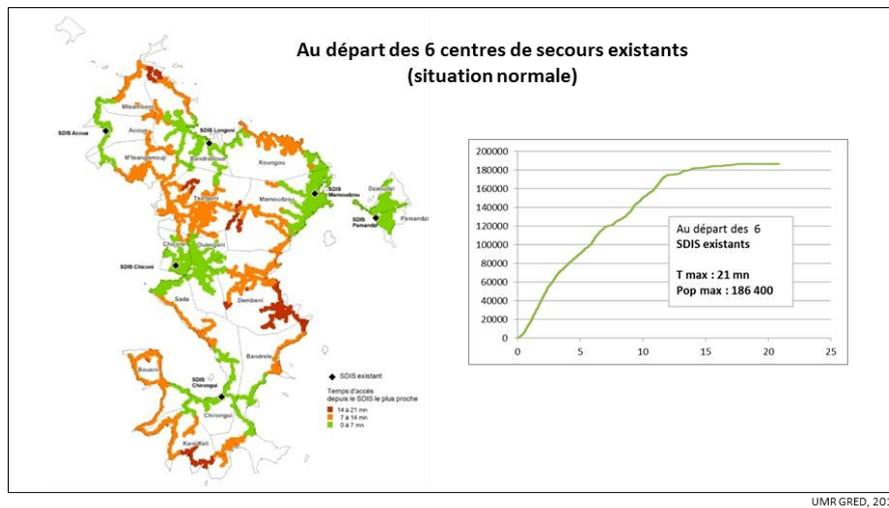


Figure 109. Accessibilité multipolaire de Mayotte au départ des 6 centres de secours existants (SDIS). Situation normale ante-tsunami.

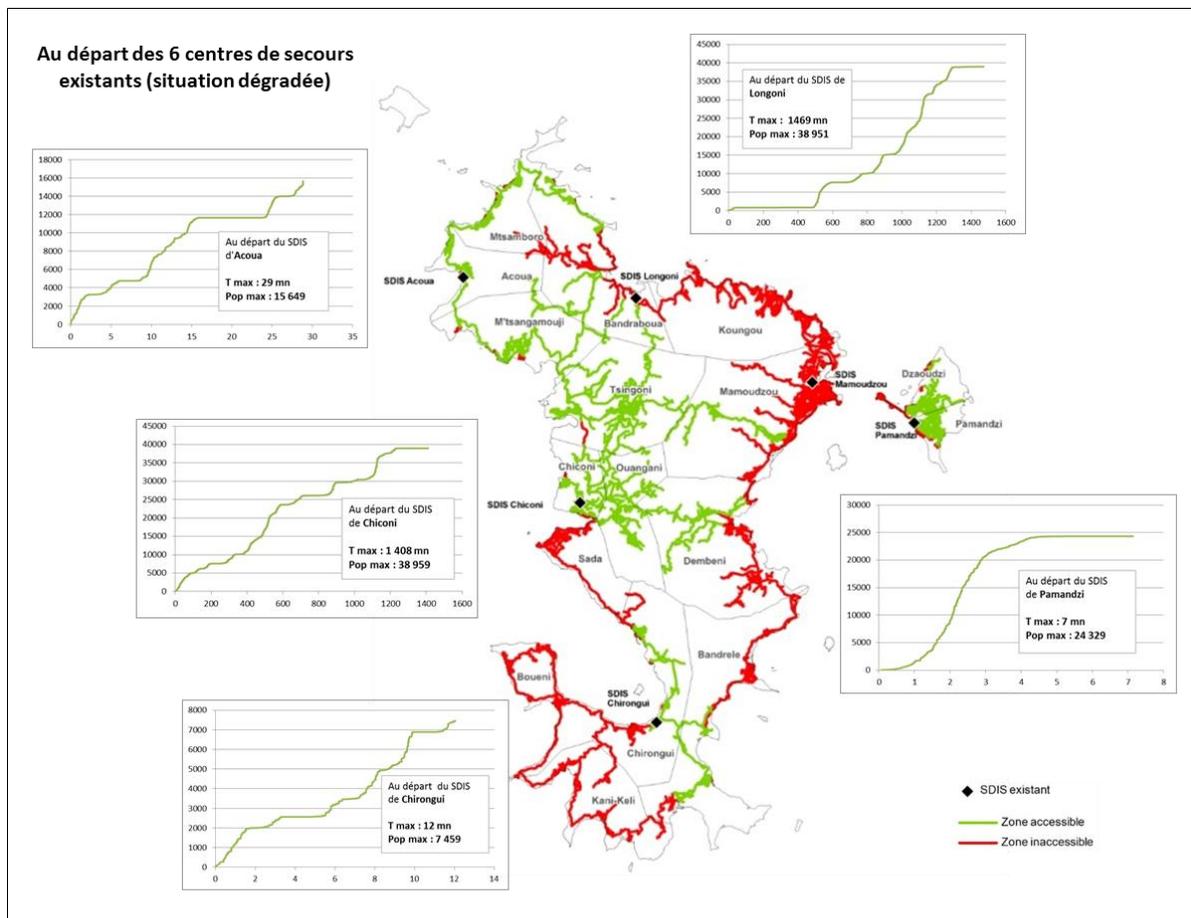


Figure 110. Accessibilité multipolaire (en mn) au départ des 6 centres de secours existants. Situation dégradée post-tsunami. (Accessibilité nulle au départ du centre de secours principal de Mamoudzou).

2.4.3.5 *L'accessibilité des ressources en phase de récupération (post)*

L'accessibilité des ressources post-crise a été considérée par voie routière au départ des 74 villages de Mayotte (centres fonctionnels) en appliquant la méthode des isolinks décrite précédemment. Elle est cartographiée et mesurée au moyen d'un indicateur donnant le pourcentage de ressources encore accessibles après dégradation du réseau routier par un tsunami. Les points de ressources retenus sont ceux situés dans un périmètre de 100 m de part et d'autre du réseau routier et on suppose que la totalité de ces ressources vitales est accessible en situation normale (100%). Les cartes obtenues pour chaque famille de ressource donnent un aperçu des capacités de récupération post-tsunami des différents villages (Figure 111 et 0). Ces capacités sont très variables suivant les types de ressources et les villages. A l'échelle des deux îles, et en se basant sur le nombre de villages totalement privés de ressources (points rouges), les ressources les moins accessibles sont l'aéroport et le port, totalement enclavés, suivies des ressources commerciales, des ressources médicales et sécuritaires, des ressources énergétiques, administratives et hydriques. La carte (Figure 112) d'accessibilité des ressources globales (6 familles réunies) permet de différencier la part des ressources exposées (submersible) de celles qui ne le sont pas. C'est pour les villages du Nord-Ouest et du Sud-Ouest que ces taux de ressources exposées sont les plus élevés. Cette même carte nous apprend qu'au regard de l'ensemble des ressources de chaque île, près de 70% des villages recensés perdent l'accès à plus de 90% de leurs ressources en cas de tsunami. Les plus pénalisés (perte totale) sont Mbouanatsa, Miangani, Nyambo, Mangajou, Tsoundzou II et Passamainty Cim. Au contraire, trois villages seulement conserveraient l'accès à plus de 90% de leurs ressources globales : Labattoir, Pamandzi et Vitalémengou sur Petite Terre.

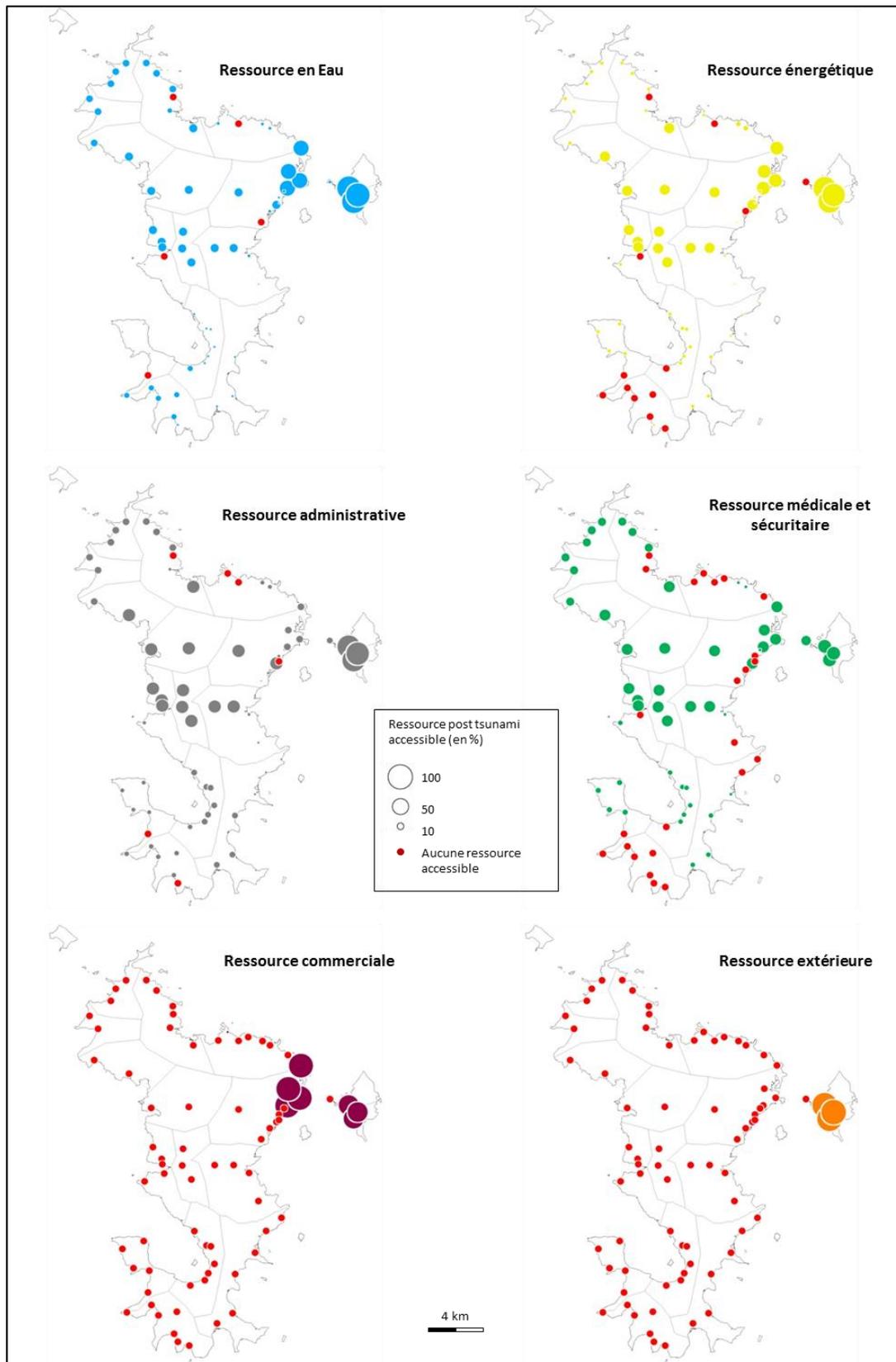


Figure 111. Pourcentages de ressources post-tsunami accessibles par centre fonctionnel (villages).

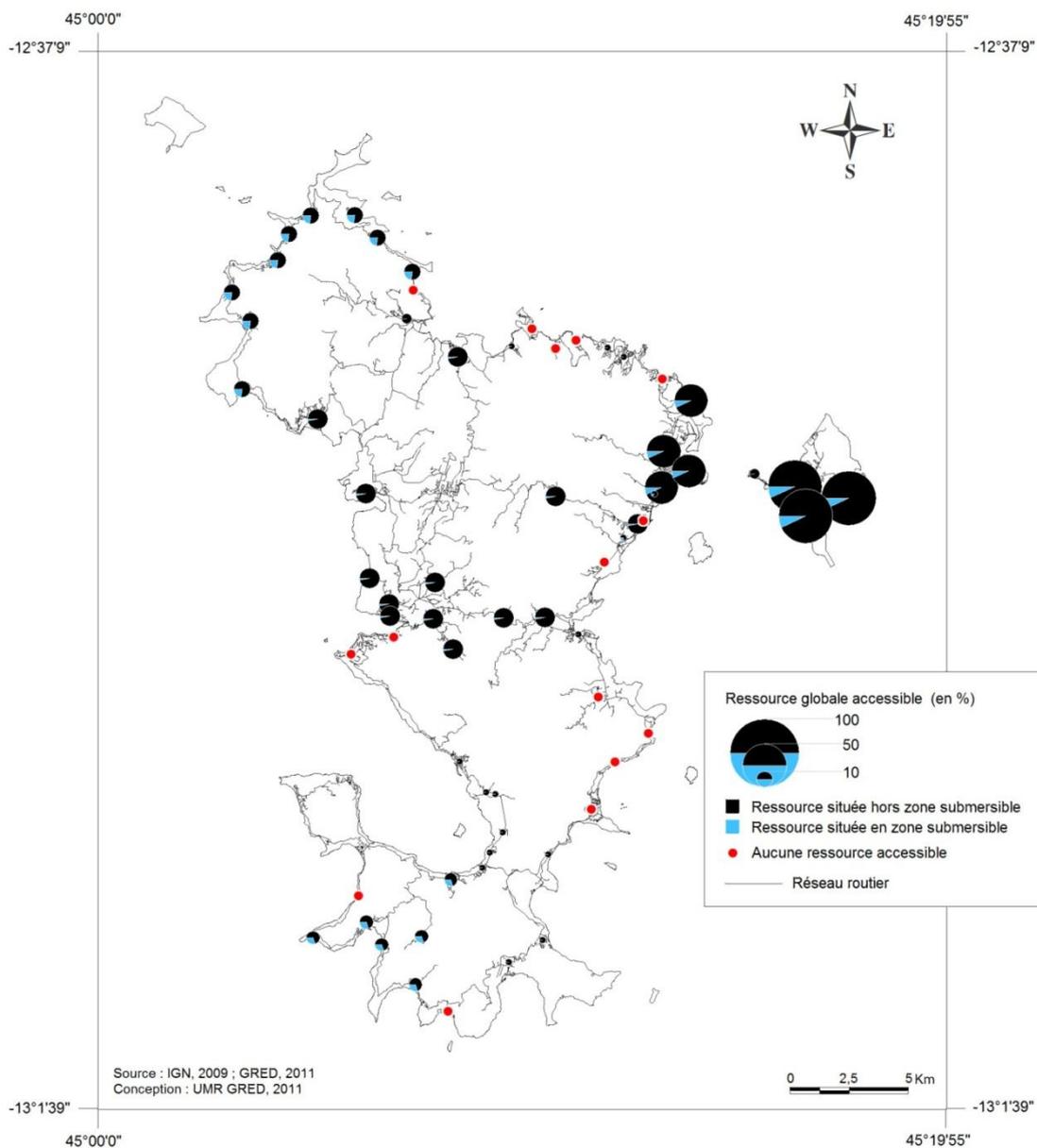


Figure 112. Pourcentages de ressources globales post-tsunami encore accessibles par centre fonctionnel (villages) avec différenciation des ressources inondables (moins de 5 m).

2.4.4 Discussion

2.4.4.1 Perspectives d'amélioration des modèles d'accessibilité et de cartographie du risque

Les modèles d'accessibilité développés dans cet article présentent plusieurs améliorations possibles à la fois sur le plan du paramétrage et sur les bases de données utilisées pour quantifier les enjeux accessibles. Ils sont basés sur un graphe routier de très bonne qualité topologique fourni par l'IGN et qui a le mérite d'être facilement exploitable dans un environnement SIG pour une application à l'échelle de Mayotte. Néanmoins, le paramétrage de ce graphe peut être amélioré sur divers aspects : affinage des typologies des voies, mise à jour dans des secteurs qui s'urbanisent, correction

des classes de pente. A l'avenir, le modèle d'accessibilité pédestre vers des zones refuge sera amélioré avec de nouvelles gammes de vitesse obtenues sur le terrain sur des itinéraires de longueur, de largeur, de revêtement et de pente variables, pour des individus se déplaçant seuls ou en groupe. L'objectif serait de pouvoir se rapprocher de conditions que seuls des modèles multi-agents peuvent gérer (Sahal, 2011). En effet, notre macro-simulateur suppose que le flux de piéton est unidirectionnel et selon un chemin planifié. Chaque individu a la même intention qui est de rejoindre la zone refuge la plus proche. Le modèle ignore les interactions entre individus dans les conditions de plus forte densité comme l'évitement, la bousculade, l'imitation... ainsi que les effets liés aux dynamiques de hautes densités comme l'effet « stop and go », les turbulences ou encore les mouvements de panique (Moussaid, 2010). Mais ces effets peuvent être globalement intégrés dans notre modèle au moyen de coefficients de variation des vitesses de déplacement, au même titre que la pente, la largeur des voies, la rugosité du terrain ou la distance à parcourir. Cela suppose au préalable de bien cerner les profils comportementaux des populations en phase d'évacuation et de mener des retours d'expériences sur ces aspects.

Un autre aspect important de nos modèles et des indicateurs produits concerne la qualité des bases de données utilisées sur les enjeux. Le recensement des ressources territoriales stratégiques a pu être optimisé grâce à la collaboration active de la Préfecture de Mayotte, du Conseil Général et de divers services locaux. Mais toutes ces informations, déjà géoréférencées pour la plupart n'ont pu être validées sur le terrain faute de moyens suffisants.

L'aspect le plus préoccupant concerne le recensement et la localisation des populations exposées, à évacuer ou secourir. La limite principale de notre méthode de calcul des densités de personnes par bâtiment est d'être basée sur la surface au sol des bâtiments et de considérer le nombre d'habitants comme étant proportionnel à la taille du bâti. Or dans le contexte socio-économique très particulier de Mayotte, et d'après nos observations de terrain, on constate que les habitats précaires, de petites tailles et auto-construits, abritent au moins un ménage, soit en moyenne 4,1 personnes (RGP, INSEE, 2007). Il conviendrait donc de distinguer ces habitats précaires des autres habitations tout en intégrant pour certains bâtiments le nombre d'étages occupés. Ces données n'existent pas à l'échelle de Mayotte, bien qu'elles aient été partiellement consolidées sur Petite Terre dans le cadre du projet PREPARTOI au moyen d'un important diagnostic de vulnérabilité du bâti situé à moins de 10 m d'altitude (Drouet, 2011).

Ces estimations de densités infra-communales ne prennent donc pas vraiment compte les populations clandestines, très vulnérables par nature. Cette population clandestine s'intègre totalement à la population mahoraise et ne peut être dénombrée avec précision. Il n'existe d'ailleurs

aucun chiffre officiel sur cette tranche de population à Mayotte. Le sujet reste très tabou sur l'île. Le nombre de clandestins a été estimé par les autorités entre 50 000 et 55 000 (Frétigné, 2008). En 2005, la Commission d'enquête du Sénat sur l'immigration clandestine indiquait que « près de 40% des 160 000 habitants de Mayotte, soit environ 60 000 personnes, étaient des étrangers, dont trois quarts étaient en situation irrégulière » (soit environ 48 000) (Collectif Migrants de Mayotte, 2008). Le recensement de l'INSEE de 2007 inclut la population en situation irrégulière, estimée à un peu plus d'un tiers aujourd'hui alors que cette proportion s'établissait à 14% en 1991. Si cette tendance devait se prolonger, la population clandestine pourrait représenter 60% de la population totale en 2012 (Dosière & Quentin, 2006 in Bensoussan 2009). Il paraît tout aussi difficile de déterminer des lieux « d'habitat illégal clandestin » sans des enquêtes de terrain. D'une part, « les clandestins se fondent à la population locale, souvent logés au rez-de-chaussée ou dans les jardins de mahorais » (Boukoucha, 2011 communication personnelle), d'autre part l'habitat illégal n'est pas uniquement habité par des personnes en situation irrégulière. Néanmoins, la population locale évoque le quartier de Kawéni comme étant « le plus grand bidonville de France ». Mayotte est aujourd'hui confrontée à un défi démographique de taille. Sa population a augmenté de 26 000 habitants en l'espace de cinq ans. Ce phénomène démographique a provoqué l'accélération et l'amplification de la dynamique urbaine, particulièrement sur la bordure littorale anciennement occupée par les villages de pêcheurs. En 10 ans la population communale de Mamoudzou est passée de 32 774 à 53 022 habitants (INSEE, 2010).

Une autre variable de nos modèles qui pourrait être approfondie est celle de la localisation des enjeux humains en fonction du temps. Cette mobilité spatio-temporelle peut être modélisée au moyen de comptages et de courbes de fréquentation selon diverses typologies des lieux de vie, bâtis ou extérieurs. Ce travail implique de s'imprégner des rythmes de vie propres à Mayotte. Il a été amorcé sur Petite Terre dans le cadre du projet de recherche PREPARTOI (Sahal, 2011 et Drouet, 2011) en retenant trois scénarios d'occupation de l'espace : la nuit, un jour ouvrable à 17h30, et un vendredi entre 12h et 12h30 au moment des sorties d'école et du regroupement autour des mosquées principales. Ces scénarios d'occupation reposent sur des méthodologies développées par notre équipe sur Saint-Paul (La Réunion), Antibes (France) et El Jadida (Maroc) (Leone, 2011a). Les résultats attendus permettront de construire des cartographies du risque tsunami multi-temporelles et d'estimer les volumes de personnes à évacuer à d'autres moments, en particulier le jour et aux heures de pleine activité. Enfin, la dernière composante du risque qui manque dans ce travail concerne l'aléa local et ses dynamiques de submersion en fonction des configurations topographiques et bathymétriques proches. Les futurs modèles du CEA attendus sur Mayotte permettront de caractériser l'aléa au moyen de hauteurs, de vitesses et d'enveloppes de submersion marine et de mieux caractériser les coupures de réseaux et l'impact sur d'autres infrastructures ou

sur les personnes au moyen de courbes et matrices d'endommagement (Leone, 2007 & Valencia, 2011).

2.4.4.2 *Utilité des résultats pour la gestion de crise tsunami*

Cette recherche apporte un certain nombre de résultats utiles pour l'évaluation des risques et la gestion de crise tsunami. Outre la quantification des enjeux directement exposés aux tsunamis et susceptibles d'être perdus en cas de crise, la modélisation spatiale de l'accessibilité terrestre, à la fois pédestre et routière, ante et post tsunami, permet de répondre aux demandes actuelles des gestionnaires locaux du risque (pompiers, préfecture, DEAL, gestionnaires de réseaux, etc.). Le modèle d'évacuation pédestre ante-tsunami répond partiellement mais utilement à un certain nombre de questionnements qui doivent se poser pour préparer une évacuation massive de population : Où évacuer ? ; Selon quel itinéraire ? ; Combien de personnes à évacuer ? ; Combien de temps dispose-t-on pour mettre toutes ces personnes en sécurité ? Combien de personnes seront sécurisées avant l'arrivée du tsunami ?

Notre modèle permet de calculer des itinéraires d'évacuation optimisés qui peuvent aider la mise en place d'un fléchage sur le terrain des routes d'évacuation avec une signalétique adaptée. Il se rapproche en cela d'applications similaires menées récemment en métropole (Lemahieu, 2009 ; Sahal, 2011), à la Réunion (Sahal, 2011), au Maroc (Heymann, 2011 ; Leone *et al.*, 2011) et en Indonésie (Strunz *et al.*, 2009 ; Post *et al.*, 2009 ; Dewi, 2010). Le volume minimal de personnes à sécuriser a été estimé autour de 52 500 individus (28% de la population). Les temps de trajet maximaux et théoriques sont de 34 minutes, auxquels il faut ajouter un temps de réaction des populations qui peut être très variable en fonction de l'organisation de la réponse, notamment de la qualité de l'alerte, de la perception du risque, des comportements individuels ou collectifs et donc du niveau de préparation global face au risque de tsunami (Sorensen, 2000 ; Post *et al.*, 2009). Néanmoins, on reste bien en deçà des temps de trajet de tsunamis lointains (6 à 9 h) comparables à celui du 26 décembre 2004, ce qui laisse théoriquement le temps de gérer une évacuation totale du littoral du moment où elle a été planifiée et que l'alerte est donnée. Sur ce point, le réseau de surveillance et d'alerte actuellement en cours de développement sur l'Océan indien devrait pouvoir garantir une alerte 15 mn après le déclenchement du séisme générateur. Mais *a contrario* ce délai de mise en sécurité n'est pas suffisant pour des sources proches (éruption du Kartala ou glissement sous-marin) qui pourraient générer un tsunami sur les côtes mahoraises en moins de 30 minutes. A titre d'exemple, une alerte locale donnée 15 mn après le déclenchement d'une source sismique, suivie d'un temps de réaction des populations de 15 mn et d'un temps de trajet de 34 mn pour atteindre les zones refuges topographiques définies dans cette étude donne un cumul de 64 minutes.

En conditions réelles il semble tout à fait plausible de devoir doubler ce délai total de mise en sécurité pour Mayotte (2 heures environ) et à condition d'avoir préparé les populations, les institutions et le territoire pour cela... En effet, les cartes de temps d'accès de chaque maille du territoire mettent en évidence des secteurs éloignés des zones refuges horizontales les plus proches. Il s'agit donc de documents forts utiles pour améliorer l'accessibilité en réduisant les temps de trajet, via un aménagement adapté du territoire, soit en introduisant de nouveaux itinéraires d'évacuation, soit en améliorant ceux existants, soit en définissant de nouvelles zones refuges verticales, dans certains bâtiments publics élevés et résistants, dans des secteurs à forts enjeux humains. Sur ce dernier point, la Figure 113 permet de localiser les mailles du territoire (de 50 m de côté) à équiper en priorité de zones refuges verticales. Cette cartographie a été obtenue en croisant les temps d'accès les plus longs de la simulation n°3 (supérieurs à 15 mn) et occupées officiellement par plus de 30 personnes durant la nuit. On y recense 40 secteurs d'implantation potentielle de nouvelles zones refuges verticales (en bleu sur la carte), à aménager dans des bâtiments existants, ou bien à créer (FEMA, 2008).

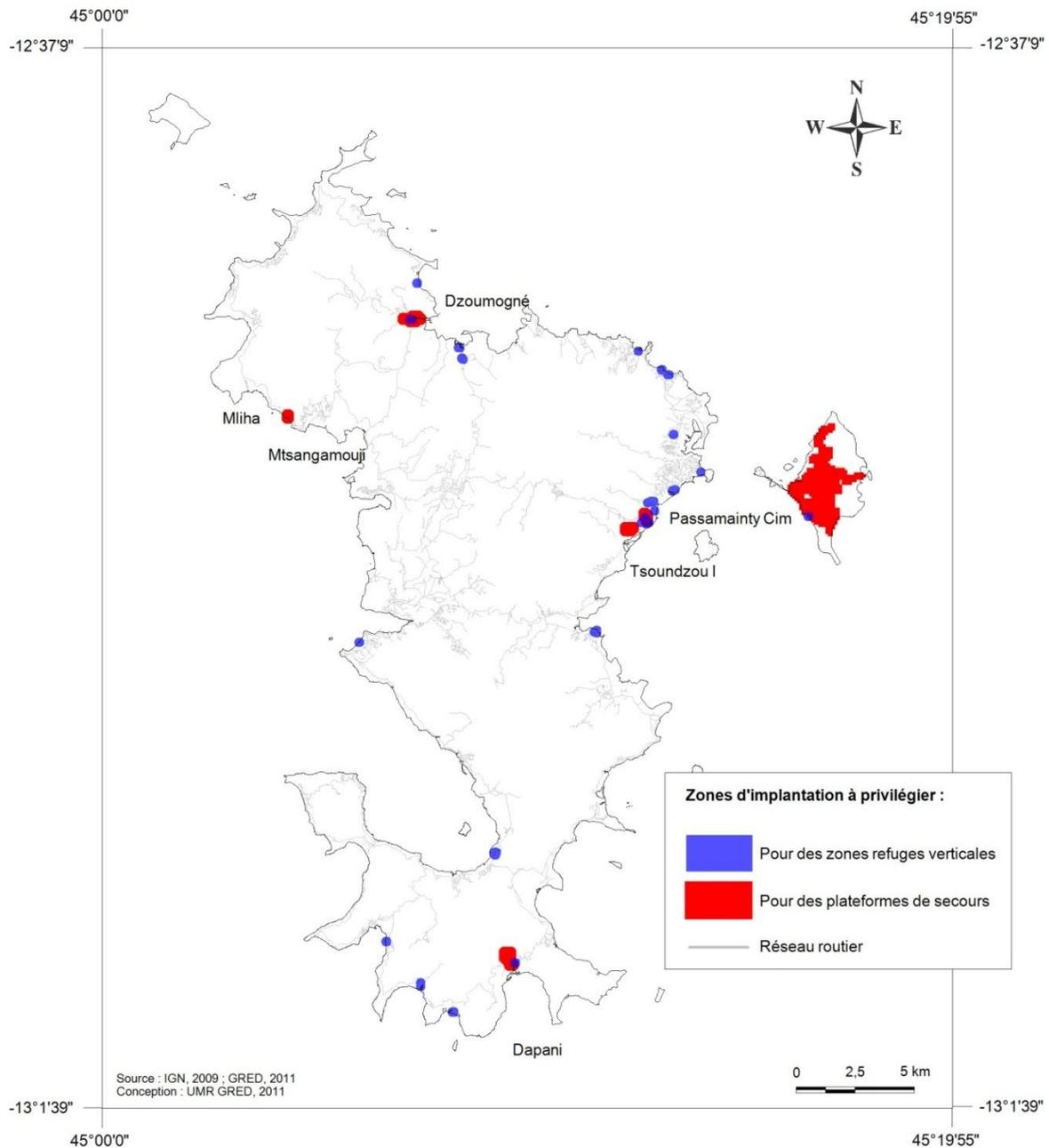


Figure 113. Proposition d'implantations de zones refuges verticales et de plateformes de secours pour améliorer la gestion d'une crise tsunami.

Une autre application directe de notre modèle concerne l'accessibilité terrestre des secours. Par recouplement des itinéraires encore viables après un tsunami au départ des différents villages de Mayotte, on peut déterminer les secteurs qui offriraient la meilleur accessibilité routière, autrement dit qui permettraient de desservir le plus de villages possibles, en particulier sur le littoral. Ces secteurs sont au nombre de 5 pour Grande Terre si on retient un seuil d'au moins 15 villages accessibles (sur 70 au total) depuis chaque secteur. Ils sont plus nombreux sur Petite Terre si on retient un seuil de 3 villages (sur 4 au total) (Figure 113). Ces secteurs, en rouge sur la carte, peuvent

ainsi constituer des zones d'implantation privilégiées de plateformes logistiques ou de secours qu'il conviendrait d'aménager préventivement ou en tout cas d'étudier plus en détail dans le cadre d'un plan de secours « submersion marine ».

Bien que ne disposant pas encore de modèles d'inondation par tsunami sur Mayotte, la tranche d'altitude de 0- 5 m retenue pour qualifier cet aléa représente sans aucun doute une zone de danger élevé où les enjeux présents, en particulier les routes, peuvent être directement endommagés. En cas de submersion, il faudra donc composer avec des infrastructures stratégiques hors-service ou isolées par voie routière. La résilience territoriale en sera d'autant plus affaiblie et les phases d'urgence et de récupération affectées. Les cartes d'exposition et d'accessibilité des ressources vitales et des secours pour ces deux phases de la crise illustrent des scénarios discutables, mais dont l'intérêt est justement d'être discuté et amélioré en fonction de la demande des acteurs locaux du risque. Leur expression cartographique, privilégiée dans ce travail, peut être considérée comme une valeur ajoutée de nos modèles pour en favoriser l'appropriation et motiver la concertation interservices.

Nos modèles permettent de spatialiser et quantifier le risque mais ne peuvent pas prévoir les conditions de récupération du système territorial et en particulier routier. En termes d'impacts directs, on peut seulement supposer que plus la longueur de route exposée sera élevée et plus sa probabilité de coupure sera forte. C'est encore plus vrai en se rapprochant de la côte au regard de l'énergie des vagues. A l'échelle du tronçon routier, la durée d'interruption du trafic va être conditionnée par le nombre de points de coupure par tronçon et pas seulement par l'intensité des dommages en un point donné. Par ailleurs, la valeur fonctionnelle de la route (son importance stratégique par exemple) est un facteur influençant les moyens mobilisés pour rétablir son ouverture. Par conséquent, à des dommages physiques de même importance vont souvent correspondre des durées d'interruption très variables et difficiles à modéliser compte tenu des nombreuses variables (géographiques, décisionnelles, organisationnelles et souvent politiques) qui entrent en jeu.

Enfin, on ne saurait trop insister sur la relative facilité de mise en œuvre de ces modèles d'accessibilité sur graphe, peu gourmands en ressources informatiques et qui permettent de traiter assez rapidement un vaste territoire, du moment où les bases de données sont disponibles.

2.4.5 Conclusion

Cet article propose une analyse spatiale du risque indirect et de la vulnérabilité territoriale à travers la notion d'accessibilité des différents espaces et temporalités de la gestion de crise. La modélisation sur graphe développée nous semble totalement transposable à d'autres territoires du risque. Les résultats obtenus présentent une certaine utilité pour Mayotte et devraient trouver quelques échos lors de l'actualisation des « dispositifs spécifiques tsunami » du plan ORSEC de Mayotte (Organisation de la Réponse de Sécurité Civile) et la mise en œuvre du nouveau dispositif d'alerte tsunami intergouvernemental de l'Océan Indien prévu en 2012. Mais la qualité de cette alerte, dans sa phase descendante, va dépendre localement des capacités de transmission aux populations. Sur ce point, Mayotte dispose d'un réseau de 183 mosquées qui pourrait être habilement utilisé pour informer une population à 95% musulmane.

En cas d'impact de tsunami ou de fortes houles cycloniques, nous avons pu démontrer que l'accessibilité terrestre de Mayotte serait fortement dégradée par les coupures de routes. Mais il en serait de même sur le plan maritime avec une vingtaine d'appontements rendus hors d'usage, ou bien sur le plan aérien avec un aéroport totalement inondable. Autant d'éléments qui pourraient fortement compromettre le débarquement des moyens de secours extérieurs après un tsunami. Par ailleurs, le très fort déséquilibre spatial qui existe actuellement dans la répartition des centres de décision, concentrés à Petite-Terre et totalement déconnectés de Grande Terre, ne ferait que compliquer la gestion d'une crise future.

En conclusion, les recherches actuelles en géographie des risques privilégient une entrée enjeux-centrée des vulnérabilités territoriales et humaines dont l'intérêt majeur n'est plus à démontrer pour nos sociétés (Leone *et al.*, 2010a ; Wisner *et al.*, 2011). Mais la notion de risque reporté (ou indirect) liée en particulier aux pertes d'accessibilité spatiale est très peu explorée pour le moment. Sa prise en compte dans la prévention des risques et des crises ouvre un formidable champ de recherche appliquée. On ne saurait trop inciter les géographes à mobiliser leurs savoirs et leurs outils pour explorer cette nouvelle approche intégrée, utile et spatialisée du risque.

Chapitre 3e. **La planification de la gestion de crise tsunami (GRED/LGP)**

Le risque tsunami bien qu'inédit à Mayotte et relativement modéré à La Réunion doit être pris en compte afin de préparer institutions organisations et populations à une crise éventuelle. Des dispositifs existent et sont principalement greffés sur la gestion des risques cycloniques. Même si ces deux risques présentent des ressemblances ils ne sont pas similaires. Ce paragraphe vise donc à diagnostiquer les spécificités du risque tsunami et à apporter de l'aide à la planification de gestion de crise. Pour cela, on évaluera d'abord les dispositifs de gestion de crise existant à Mayotte. Puis à partir d'un scénario d'aléa donné, l'estimation des impacts potentiels d'un tsunami sur les côtes mahoraise nous permettra d'aborder la question de la capacité de réponse de l'île. Un sort particulier est réservé à la question de l'alerte et de l'information des populations qui est un sujet crucial pour ce type de risque à Mayotte. Nous terminons en examinant à partir de l'exemple d'une commune mahoraise (Dembeni) les enjeux et les difficultés de la gestion de crise au niveau local.

L'objectif de ce paragraphe n'est pas de critiquer le dispositif de gestion de crise mais de contribuer à l'amélioration des plans existants

3.1 Etat actuel de la gestion de crise à Mayotte et à la Réunion : dispositif existant et vulnérabilité institutionnelle

3.1.1 Sources et méthodes

Les membres de la mission PREPARTOI ont procédé à la collecte et à l'examen des documents existant concernant la gestion de crise et des retours d'expérience ou d'exercice de gestion de crise à Mayotte et à la Réunion notamment le PSS plan de secours spécialisé Tsunami et les différents plans d'intervention jusqu'au PCS (plans communaux de sauvegarde) mis à disposition par la préfecture de Mayotte. Il faut souligner la forte coopération rencontrée auprès de la préfecture (SIRACEDPC) et des services de l'Etat en général. En revanche, malgré les nombreuses relances, nous n'avons pas pu obtenir de renseignements précis auprès du Détachement de Légion Etrangère de Mayotte sur ses ressources mobilisables en cas de crise.

Outre l'examen les documents existants, cette évaluation s'appuie sur des entretiens individuels avec des différents acteurs de la gestion de crise au cours d'une mission à Mayotte du 7 au 20 mars 2011

(Sapeurs-pompiers, préfecture, service déconcentrés de l'Etat, services municipaux, opérateurs téléphoniques, Croix Rouge...).

Une réunion tenue à la préfecture de Mayotte le 16 mars 2011 a réuni la plupart des acteurs de la gestion de crise. Elle visait à mesurer l'appréciation d'une crise tsunami par les différents acteurs en charge de la gestion de crise et à évaluer les moyens disponibles en cas de crise tsunami. Une grille d'analyse du plan de gestion de crise inspirée de Lumbroso et al. (2011) est donnée en annexe 2. Elle n'a pu, faute de temps, être remplie complètement mais a servi de guide aux débats et à la récolte d'information auprès des responsables interviewés. Enfin, l'évaluation de la planification de gestion de crise s'est appuyée sur un travail cartographique approfondi en collaboration avec les services de l'Etat et les collectivités territoriales.

3.1.2 Une planification récente appliquée par analogie avec le risque cyclonique

Depuis quelques années, en particulier depuis la perspective de la mise en place de la départementalisation, de gros efforts ont été faits pour améliorer la planification de gestion de crise à Mayotte et mettre l'archipel en conformité réglementaire. On s'intéressera ici à la capacité de réponse des autorités à Mayotte dans un contexte de scénario de crise correspondant à un tsunami atteignant la cote 5 m. Quelles seraient les réactions des autorités et celles des populations en cas de menace ?

Mayotte, dépendante de l'EMZPCOI⁵ situé à La Réunion, possède son propre dispositif ORSEC validé en 2008 et décliné ensuite en plans Orsec spécialisés pour les différents risques naturels, sanitaires et technologiques susceptibles d'affecter les îles : plan cyclone, plan grippe ou chikungunya (prévention), plan polmar. Le plan TMD (transport de matières dangereuses) est en cours d'élaboration en 2011. Les dispositifs spécifiques « tsunami » actuels datent de mars 2009.

Le Tableau 32 donne l'état actuel de la planification de gestion de crise tsunami à Mayotte. Sont recensés les plans spécifiques au risque tsunami et les plans non spécifiques pouvant être mis en place en cas de tsunami. Des plans rouges existent ou sont en cours d'élaboration pour les ressources en eau, la fourniture en carburant ou en électricité. Un plan spécial concerne la perte d'utilisation partielle ou totale de l'usage de l'aéroport en cas de crise cyclonique (2010). Ces plans s'appuient sur une connaissance croissante des phénomènes naturels affectant l'île grâce aux efforts

⁵ État-major de zone Océan Indien

de la DEAL et du BRGM. Ils s'appuient aussi sur le SACR (schéma d'analyse et de couverture des risques) élaboré en 2009 par le Service d'incendie et de secours (SIS).

Tableau 32. Etat d'avancement de la planification de gestion de crise tsunami à Mayotte (source SIDPC, préfecture Mayotte mars 2011).

Document	Organisme producteur	Date approbation	observation
Plan ORSEC dispositions générales	Préfecture Mayotte	Mars 2008	Comprend des volets spécifiques comme un plan hébergement, un plan ressources hydrocarbures, eau potable, afflux de nombreuses victimes...
Plan Orsec Tsunami	Préfecture Mayotte	2009	Document le plus abouti pour la gestion de crise tsunami à l'échelle de l'île. Il s'inspire fortement du plan de gestion de crise cyclone
Plan Orsec cyclone	Préfecture Mayotte	Janv. 2008	Considéré comme la principale menace. Inclut le risque submersion marine pour surcote et houle cyclonique
Plan Orsec aérodrome	Préfecture Mayotte	Fév. 2008	En cours de mise à jour pour le risque tsunami qui pourrait menacer cet enjeu
Plan Orsec Inondations	Préfecture Mayotte	Mai 2010	Incluant inondations côtières (voir cyclone)
Plans communaux de sauvegarde 17 communes	communes	Dates variées	Documents existants parfois depuis 2000 ; ils sont minimalistes pour la plupart des communes. En 2010, la préfecture de Mayotte a organisé une Remontée d'information afin de connaître l'état d'avancement de ces plans. Les PCS jusqu'en 2011 ne prenaient pas spécifiquement en compte la menace tsunami.
DICRIM	Communes	2008	Les DICRIM n'incluent pas le risque tsunami (en 2011)
SACR Schéma d'analyse et de couverture des risques	SDIS	2009	Les risques y sont peu détaillés. Le risque tsunami est seulement mentionné. Le SACR concerne surtout les moyens à disposition.

3.1.3 La planification de gestion de crise à l'échelle locale

Au niveau local, des plans communaux de sauvegarde (PCS) ont été élaborés depuis une dizaine d'années. Ils ont été répertoriés en 2009 et 2010 dans une enquête effectuée par les services préfectoraux auprès des municipalités. Les 17 communes sont officiellement dotées de PCS mais le contenu, le degré d'appropriation et l'opérationnalité de ces PCS sont assez faibles en général et surtout très inégaux d'une commune à l'autre.

Dans ce contexte, la mission PREPARTOI se propose d'apporter des compléments de connaissances aptes à améliorer la planification de gestion de crise au niveau départemental et communal. Ces connaissances concernent le risque tsunami mais peuvent être utiles à la gestion d'autres risques. A

l'échelle locale, il est nécessaire de cibler les ressources de gestion de crise en fonction des différents aléas. Par exemple, l'école du four à chaud au carrefour Pamandzi /Labbatoir est inondable en cas de tsunami mais utilisable en cas de cyclone. De même, il faut étudier des scénarios multirisques associant cyclone/glissement de terrain/inondation voire plus rare mais possible un scénario combinant tsunami et séisme local.

3.1.4 Enjeux et scénarios de crise potentiels

La population totale à Mayotte est officiellement recensée à 186 000 personnes mais les estimations officielles évoquent la présence d'une population totale de 300 000 personnes sur l'île. La population recensée a plus que doublé en 20 ans. Selon l'Atlas du BRGM, 70 à 80% de la population est exposée à un aléa d'origine naturelle fort. Il y a 72 villages sur toute l'île dont 60 en bord de mer (souvent les plus peuplés). Mayotte a la densité de population la plus forte des territoires ultramarins français : plus de 500 hab/km².

En l'absence de modélisation de l'aléa tsunami sur les côtes de l'île, les scénarios retenus dans cette étude proposent la prise en compte d'une onde de submersion tsunami uniforme sur le pourtour de l'île jusqu'à une altitude de 5 mètres d'altitude. Le marnage, qui est d'environ 4 mètres en marée de vives eaux à Mayotte, joue un grand rôle dans la détermination du scénario d'aléa. En effet un tsunami de 5m de hauteur n'aurait guère de conséquences s'il se produisait en basses mer de vives eaux ; en revanche, les conséquences seraient beaucoup plus graves pour un même tsunami qui se produirait en haute mer de vives eaux : dans ce cas des points névralgiques du fonctionnement économique de l'île seraient touchés à commencer par l'aéroport. De même l'heure de déclenchement et d'arrivée du tsunami ont un grand impact sur le scénario de crise possible. La question se pose pour l'alerte et l'évacuation des populations beaucoup plus difficile la nuit.

3.2 L'information préventive et l'information de crise des populations

3.2.1 Comportement des populations au regard du manque d'information

Lors du RETEX réalisé suite à l'événement du 25 octobre 2010 à La Réunion (Sahal & Morin, 2012), de nombreux témoins se sont plaints de la manière dont la crise a été gérée. Il y a eu des préalables à cette contestation : les études consécutives à la gestion de la crise du chikungunya (Watin, 2009) ont montré dans quelle mesure, durant la crise de 2005, la négation par les experts et autorités de

l'importance de l'épidémie avait été la source d'une perte de confiance des insulaires. Selon Watin (2009), cette défiance encourage les médias à devenir incisifs et à adopter un registre polémique dans un contexte insulaire où la pression médiatique est souvent importante quand des aléas naturels se produisent, qu'il s'agisse de l'épidémie du chikungunya (Péton-Klein & Chaize, 2007; Watin, 2009) ou des éruptions volcaniques. Ainsi, le 27 octobre 2010, un quotidien (Clicanoo.re) titre ironiquement : « Tsunami : une faille dans le plan de secours ». Le manque de communication par les autorités encourage également la prise de paroles d'« experts autoproclamés » (Watin, 2009) entraînant des mésinterprétations et la diffusion de rumeurs. Sur les forums en ligne du même quotidien, la rumeur d'une grève de Météo-France ayant provoqué l'absence d'alerte tsunami a été largement adoptée par les populations. Au même moment, le site internet du quotidien *20 Minutes* (20 Minutes, 2010) indique que le jour de ce « mini-tsunami » affectant La Réunion, des milliers de personnes paniquées ont fui vers les hauteurs, citant le quotidien local *zinfo974.com*. Les journalistes ont vraisemblablement confondu les réactions en Indonésie avec celles des Réunionnais. Morin *et al.* (2008) soulignent le rôle fondamental des médias dans la transmission de l'alerte de la manière la plus juste, précoce et précise possible, ainsi que la nécessité de mesures d'information adaptées. De telles suggestions sont tout à fait valides dans le contexte réunionnais et doivent être considérées.

Le problème majeur, concomitant avec la perte de crédibilité des autorités, est le risque d'une mauvaise estimation des futures alertes par les populations, quel que soit le type de crise, rendant la gestion de crise d'autant plus complexe, ou encore d'une opposition de principe à suivre les recommandations des autorités.

Les témoignages et clichés recueillis à La Réunion révèlent des comportements inadaptés face au risque tsunami, notamment dictés par la curiosité des populations. La répétition de phénomènes de faible amplitude non-meurtriers a fait des tsunamis un sujet de curiosité à La Réunion : chaque alerte engendre le déplacement de personnes sur les quais des ports, attendant avec engouement de voir le tsunami arriver (Photographie 1 Des comportements encore plus dangereux ont été constatés à La Réunion : des surfeurs allant en mer à l'approche du tsunami dans l'espoir de surfer "la" vague en 2004. De tels comportement ont également été constatés à Honolulu en 1960 (Keating, 2006). En Nouvelle-Calédonie, ce type de comportement a également été observé lors du tsunami du 2 avril 2007: à Hienghène, les populations se sont précipitées sur les ponts afin de mieux observer les effets du tsunami remontant *La Hienghène*.



Figure 114. Photographie prise le 26 décembre 2004 au port de Saint-Gilles (La Réunion) montrant un grand nombre d'individus s'exposant « volontairement » aux effets du tsunami par curiosité. Photographie P. Steinmetz.

On peut aujourd'hui constater deux réactions extrêmes : (1) le comportement des curieux qui se précipitent dans les ports (La Réunion, 2004) ou sur les ponts (Nouvelle-Calédonie, 2007) pour observer le phénomène, quitte à s'exposer inutilement et à l'inverse (2) le comportement paniqué des individus fuyant à des hauteurs démesurées alors qu'ils étaient déjà à l'abri, encombrant ainsi inutilement les routes (Mayotte, 2004) ou encore se réfugiant en hauteur pendant des durées de plusieurs jours (Futuna, 1993, 2007). Dans les deux cas, qu'il s'agisse d'un défaut ou d'un excès de précaution, ces comportements révèlent un manque flagrant d'information préventive, composante de la gestion de crise qui pourrait permettre une mise à l'abri efficace des individus.

3.2.2 Informer préventivement les populations

Seuls des efforts minimes ont été faits par les autorités gouvernementales dans les collectivités étudiées pour informer les populations. Ces efforts ont été fait exclusivement par le biais des médias : ce n'est qu'à la lueur des événements qui ont touché l'Indonésie en 2004 ou le Japon en 2011 que les journalistes se sont intéressés au cas français, qu'ils ont sollicité les autorités et les scientifiques et ont ainsi joué leur rôle éducatif, fournissant infographies et explications sur le phénomène et les risques associés en France. Mais ces effets d'aubaine ne sont pas suffisants : une démarche éducative doit être entreprise, et celle-ci, par définition, doit être répétée et donc inscrite dans la durée. L'éducation est pourtant unanimement considérée comme la clé du développement de la résilience des sociétés face aux catastrophes naturelles (Aswathanarayana, 2005; Darienzo *et al.*, 2005; Dengler, 2005; Dudley & Lee, 1998; Farreras *et al.*, 2007; Gregg *et al.*, 2007; Joku *et al.*, 2007; Jonientz-Trisler *et al.*, 2005; Morin *et al.*, 2011; Morin *et al.*, 2008; Prasad *et al.*, 2000; Priest *et al.*, 1996; Satake *et al.*, 2007).

Dans l'Océan Indien, la PIROI (antenne régionale de la Croix Rouge Française) entreprend actuellement la mise en place d'une campagne de prévention « Paré / Pas paré » pour sensibiliser

l'ensemble de la population réunionnaise aux risques majeurs, tsunami inclus. La préparation de cette campagne a été faite avec notre appui scientifique. De telles initiatives se développent heureusement grâce aux ONG. Ces initiatives comblent un manque : le manque de moyens dont les Sécurités Civiles souffrent pour mener à bien des campagnes de prévention efficaces avec l'appui de la communauté scientifique, parfois doublé d'une relative absence de volonté de ces mêmes autorités.

Il apparaît essentiel d'adapter les campagnes d'information des populations à la perception qu'elles se font du risque (Gaillard & Dibben, 2008). Des campagnes d'évaluation de perception doivent donc être conduites en amont de la production d'outils d'information et de préparation. Des travaux ont été réalisés dans le cadre des programmes MAREMOTI et PREPARTOI afin d'évaluer cette perception. On peut notamment citer une étude de perception à Cannes et Antibes (Alpes-Maritimes) qui est en cours, des travaux sur la hiérarchisation des risques naturels perçus à La Réunion réalisés en partenariat avec la Plateforme d'Intervention Régionale Océan Indien de la Croix Rouge Française, ainsi que différentes études sur la perception du risque tsunami par les populations de Mayotte et sur leurs réactions lors de tsunamis passés, également en cours. Cette connaissance de la perception du risque tsunami pourra ainsi dans un avenir proche permettre aux autorités de mieux comprendre les causes des réactions populaires inadaptées. C'est une condition essentielle pour être à même de procurer aux populations une information adaptée à leurs préoccupations et plus généralement aux contextes locaux des collectivités françaises exposées. Cette adaptation doit notamment passer par le rappel aux populations des effets que des tsunamis passés ont pu avoir dans leurs collectivités : en Nouvelle-Calédonie, rappeler l'événement meurtrier de 1875 à Lifou qui a tué 25 personnes dont 15 enfants ; à la Réunion, rappeler les événements de 2004, 2007 et 2011 qui ont engendré la perte de nombreuses embarcations ; à Mayotte, rappeler aux populations que le tsunami de 2004 a inondé de nombreuses habitations, etc.

Enfin, concernant les populations les plus jeunes, il est indispensable d'entreprendre des mesures d'information dans les écoles, comme cela a pu être fait en Nouvelle-Calédonie en 2008, ou plus récemment, en 2010, par la PIROPS (équivalent de la PIROI pour l'Océanie et le Pacifique Sud) dans les tribus du territoire en s'appuyant sur l'utilisation de maquettes. Enfin, c'est au Ministère de l'Éducation Nationale et aux rectorats que revient le rôle d'intégrer aux programmes scolaires les consignes de prévention des risques majeurs, en ciblant et hiérarchisant ces derniers de manière spécifique à chaque territoire. Les Nations-Unies ont encouragé ce type d'initiatives depuis 2005, faisant de l'intégration des risques de catastrophe aux programmes scolaires et de la protection des écoles deux grandes priorités du Cadre d'Action de Hyogo. Cela s'est traduit en 2006-2007 par une

campagne mondiale de sensibilisation intitulée « *La réduction des risques de catastrophe commence à l'école* » (UNESCO, 2007). Si la thématique des risques a été renforcée dans les programmes scolaires français (notamment en classe de 5ème), elle reste uniformisée, peu adaptée aux contextes locaux, donc relativement abstraite pour de nombreux écoliers. La conception de programmes scolaires adaptés aux contextes locaux étant difficilement envisageable, l'intégration des spécificités locales à l'enseignement doit être prise en charge par les équipes éducatives, qui doivent par conséquent y être formées.

L'éducation et l'information sont aussi des conditions préalables à la compréhension des alertes.

3.2.3 L'alerte des populations

3.2.3.1 Contexte et objectifs d'un dispositif d'alerte tsunami

En cas de tsunami, les bulletins d'alerte du TWC sont transmis à la Préfecture (SIDPC) par Météo-France. La teneur du message est importante comme on a pu en juger le 25 octobre 2010 à la Réunion où l'alerte a été défailante (Sahal et Morin, 2012). Le 25 octobre 2010, la préfecture de Mayotte a été prévenue par mail par Météo-France signalant que Mayotte ne courrait pas de risque contrairement à la Réunion où le tsunami a finalement fait quelques dégâts. Le rôle de Météo-France est un rôle de transmission d'alerte mais il doit y avoir une interprétation locale de l'alerte qui nécessite une expertise, des critères spécifiques ayant été définis notamment dans les dispositifs spécifiques à La Réunion. La préfecture de Mayotte a téléphoné à Météo-France pour se faire confirmer l'absence de danger. Le SIDPC informe ensuite les services de l'Etat et les principaux acteurs (voir plan orsec tsunami).

Le Préfet décide ou non d'évacuer les zones d'habitation exposées. Deux niveaux d'alerte existent : (1) la pré-alerte, déclenchée lorsque la genèse d'un tsunami est soupçonnée, (2) l'alerte, déclenchée lorsqu'un tsunami est avéré et qu'il s'apprête à toucher Mayotte. La pré-alerte prévoit la transmission de consignes aux populations, telles que « *surveillez les enfants, ne vous approchez pas du bord de mer, protégez vos biens, fermez hermétiquement portes et fenêtres, etc.* », tandis que l'alerte prévoit la transmission de consignes telles que « *évacuez immédiatement les zones littorales, menez les embarcations au large ou arrimez les solidement avec une amarre longue, gagnez au plus vite un point en hauteur, suivez les instructions des secouristes, ne montez pas dans un cocotier car ces derniers se plieront au contact de la vague* ».

L'information est transmise aux communes en charge d'informer leurs habitants, de mobiliser leurs services techniques et de préparer leurs moyens de secours, d'organiser l'évacuation des

populations, et d'assurer la logistique et la prise en charge des sinistrés. Gendarmerie et services de police organisent des rondes, recensent les populations et enfin, établissent un périmètre de sécurité. Liaisons maritimes et aériennes peuvent être interrompues.

Le plan Orsec tsunami prévoit une diffusion de l'alerte aux populations par les maires mais également par les médias (RFO, presse écrite et radiodiffusion), par Météo-France via son répondeur téléphonique, par le SIDPC (4x4 équipés de hauts parleurs), et enfin par la capitainerie à l'aide de panneaux d'information. Des communiqués de presse sont prévus pour les deux niveaux d'alerte et pour la fin d'alerte.

De nouveaux moyens de transmission aux populations sont en cours de négociation avec certains opérateurs téléphoniques afin de transmettre l'alerte par SMS. Ces dispositions ne sont pas inscrites au plan ORSEC, mais le seront lors de la prochaine actualisation du plan.

Mayotte apparaît ainsi préparée institutionnellement à une alerte des populations en cas de menace.

Toutefois, la question cruciale de l'alerte de la population n'est pas réglée et cette question a occupé une partie du débat lors de la réunion consacrée à la gestion de crise en préfecture de Mayotte.

Les objectifs et conditions d'une alerte réussie auprès des populations peuvent être synthétisés comme suit :

- **toucher le plus de personnes possible,**
- **le plus rapidement possible,**
- **à un coût raisonnable (coût financier mais aussi humain en termes de moyens déployés)**
- **diffuser un message clair, bien compris et bien interprété par la population**
- **avoir un système robuste qui ne subit pas de saturation**

Outre le contenu des messages (des messages types sont consignés dans le plan Orsec tsunami), la question majeure concerne le choix des vecteurs les plus efficaces. Plusieurs vecteurs sont disponibles et parfois déjà adoptés par les autorités préfectorales : sirènes, SMS, etc. Les sirènes constituent un moyen privilégié d'alerte des populations. Autonomes en terme d'énergie et de capacité de communication en Nouvelle-Calédonie et à Wallis-et-Futuna, les sirènes adoptées dans ces collectivités sont reliées par satellites. Elles sont déclenchées individuellement depuis Nouméa par la Direction de la Sécurité Civile ou sur place par un technicien. L'utilisation de sirènes

pose quelques questions, notamment lors de leur utilisation pour différents risques (tsunami, mais aussi cyclone) : sonnerie de tonalité et de fréquence spécifiques à chaque aléa, déclenchement automatique par des marégraphes localisés au Vanuatu dans le cas de tsunamis d'origines locales ou régionales. En Nouvelle-Calédonie, l'idée de « référents » a été adoptée : une ou plusieurs personnes sont identifiées dans chaque tribu et sont alertées par SMS ou par téléphone afin de préciser les délais estimés avant l'arrivée du tsunami, ou en cas de défaillance d'une sirène. Le Tableau 33 liste les différents types de systèmes de communication, précisant leurs avantages et limites.

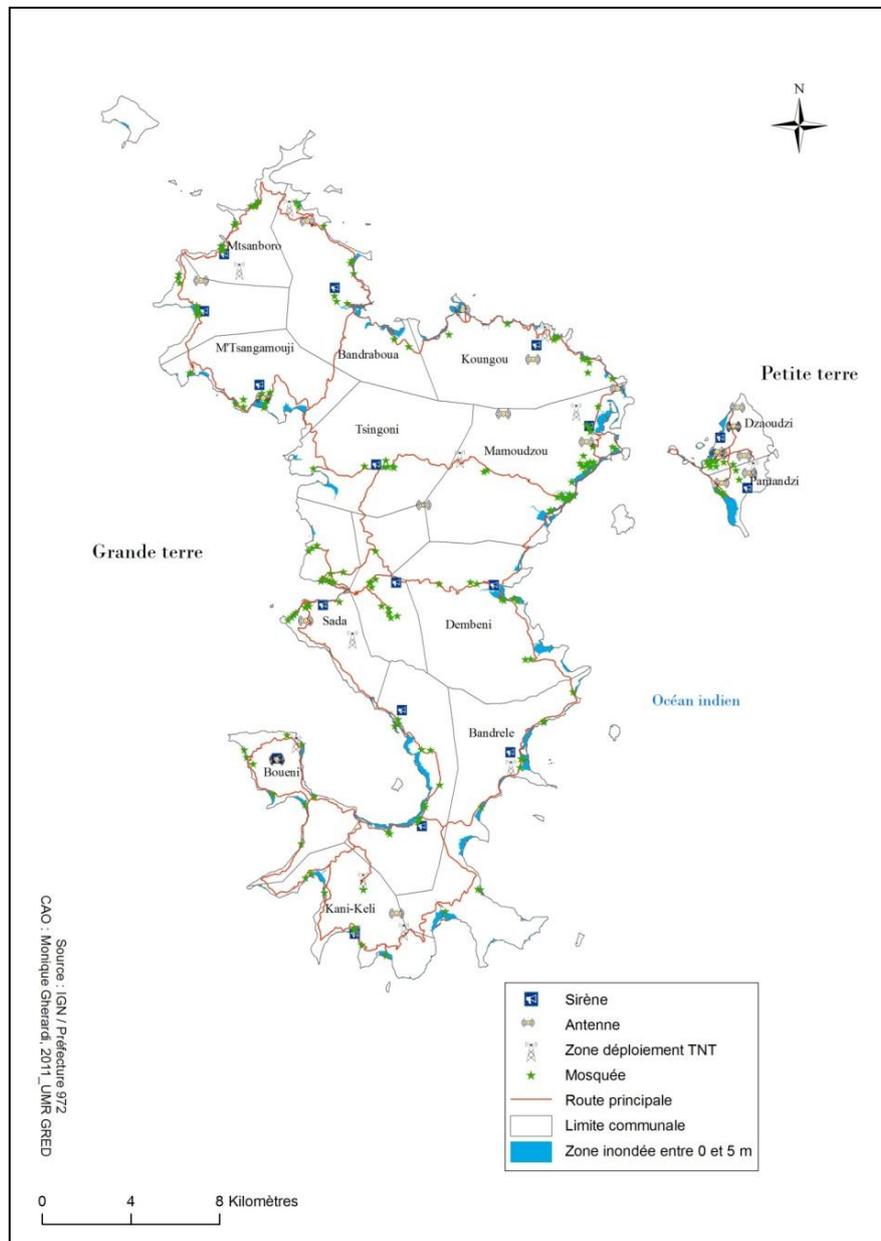


Figure 115. Répartition spatiale des moyens d'alerte à Mayotte

Tableau 33. Avantages et limites comparés des systèmes d'alerte aux populations.

Moyen d'alerte	Avantages	Limites	Couverture temporelle
Sirènes	Alerte générale ou locale possible même sans réseaux de télécom (liaison satellitaire). Automatisation possible (couplage avec des marégraphes).	Coût d'installation et d'entretien très élevé, vandalisme possible : besoin d'une sécurisation des sites. Coopération des collectivités locales nécessaires (cofinancement, mise à disposition de sites d'installation). Dysfonctionnements possibles compte tenu du niveau de technicité. Ne contient pas de message. Nécessite information et exercices préalables Vieillesse du parc en France métropolitaine	100 % (efficacité plus faible la nuit)
SMS	Taux d'équipement des populations croissant. Automatisation possible via les opérateurs de téléphonie mobile ou via des logiciels de gestion de base de données communicants. Possibilité de diffusion sur critères géographiques. Renouvellement « automatique » des listes de diffusion par opérateurs Délais compatibles avec aléa tsunami ou cyclonique.	Pas toujours sous tension de nuit, dépendance vis-à-vis des opérateurs et de leurs couverture, nécessité d'identification de « référents » et tenue à jour de la liste des destinataires. Possibilité de saturation du réseau (tester un 1er Janvier à minuit). Problème de l'alerte de nuit : extinction probable ou mode « vibreur ». dans ce cas nécessité d'une « préalerte » ou d'une information préalable. Pb du coût (pb de la publicité si l'alerte est considérée comme un « service »	25 % Uniquement heures ouvrables dans l'état actuel des essais
Fax	Possibilité de messages précis.	Ne peut s'adresser aux particuliers, dépendance vis-à-vis des réseaux de télécom. S'appuie sur une nécessaire veille. Possibilité de saturation du réseau.	25 à 30 % heures ouvrables si fax professionnel + si astreinte
Téléphone	Possibilité de messages précis.	Dépendance vis-à-vis des réseaux de télécom. Temps et ressources humaines nécessaires très importants. Possibilité de saturation du réseau. Coût de la remise à jour des listes d'appel	66 % (6 H – 22 H) difficile d'utilisation la nuit
Mosquées (dans les collectivités densément équipées)	Possibilité de messages précis. Couverture de l'ensemble des littoraux occupés dans les territoires à dominante musulmane. Confiance des populations Pas de coût	Nécessité d'une coopération des communautés religieuses, éventuellement d'autonomie électrique.	100 % en théorie mais difficile la nuit
Hauts-parleurs (mobiles, fixes)	Diffusion d'un message clair. Faible coût si amorti par publicité (à réglementer)	Faible portée géographique. Intéressant Pb de la couverture du message en cas de conditions météo défavorable (pluie, vent) ou de nuit	100 % en théorie mais difficile la nuit
Médias (télévision, radio)	Excellente réactivité, diffusion simultanée, messages précis.	Efficacité entièrement dépendante de l'audience. Problème de l'alerte de nuit.	100 % en théorie mais efficacité entre 18 et 22 h voir entre 12 h ET 22 h (40 %)

Les sirènes apparaissent comme le moyen d'alerte le plus efficace : elles permettent de toucher l'ensemble des populations concernées de jour comme de nuit, à condition que leur entretien soit

régulier. Elles permettent par ailleurs, par des tests réguliers, de rappeler à la population l'existence d'un risque, et de la rassurer quant à la capacité des autorités à la prévenir en cas de danger. Le principal problème des sirènes est qu'elles ne véhiculent pas de consignes de sécurité. Elles nécessitent donc une information préalable de la population et si possible des exercices afin de faire connaître le signal et de lui associer des conduites de sécurité adéquates.

3.2.3.2 *L'alerte par envoi massif de SMS à la population : une expérimentation à Mayotte*

Les SMS apparaissent comme le second moyen d'alerte privilégié, malgré des limites liées à la couverture GSM et à la saturation possible des réseaux. Sans investissements importants, cette technologie permet soit d'alerter des listes prédéfinies de « référents » comme c'est le cas en Nouvelle-Calédonie, ou bien de cibler les destinataires géographiquement : après négociation avec les opérateurs, il est possible d'émettre un message à l'ensemble des téléphones mobiles présents dans une certaine zone (relais spécifiques du réseau) quel que soit leur opérateur. Toutes les populations équipées d'un GSM et présentes dans la zone sont alors informées (*cell broadcast*).

A Mayotte, un test grandeur nature⁶ a été réalisé par la Préfecture en décembre 2010 pour le risque cyclonique. La procédure est la suivante :

Un message test a été envoyé aux opérateurs qui relaient à leurs clients. Deux opérateurs ont participé au test (Orange et SRR). Compte tenu du caractère insulaire de Mayotte il n'est pas nécessaire de cibler géographiquement le message qui est envoyé à tous les abonnés.

Environ 10000 SMS ont été envoyés par orange en 1 h30 et les quelques 111000 SMS par SRR en 2h30 après un temps de latence de 3 h entre la réception du message de la préfecture par les opérateurs et la diffusion du premier SMS. IL n'a pas été possible de connaître le taux de réception des messages par les clients

L'avantage de cette méthode est d'abord la rapidité. Le temps de réaction des opérateurs et de transmission des messages est donc compatible avec le délai d'arrivée d'un tsunami ou d'une onde de tempête cyclonique sur Mayotte. De plus, cette méthode évite les frais de mise à jour des annuaires téléphoniques par les services responsables de l'alerte en l'occurrence la préfecture. Le taux de renouvellement des annuaires téléphoniques étant d'environ 10 % par an, les annuaires de personnes à alerter nécessite une mise à jour constante fort coûteuse. Pour l'exercice mentionné en référence à Mayotte, une convention préfecture/opérateurs incluait la prise en charge des envois de sms en masse aux opérateurs.

⁶ Les informations nous ont été données par la préfecture de Mayotte et les deux opérateurs majeurs sur le territoire mahorais : SRR et Orange.

Toutefois cette gratuité n'est pas acquise en cas de systématisation du procédé. Le principal obstacle de cette méthode est la rétribution du service. En effet, si les opérateurs étaient rétribués pour diffuser des alertes ciblées géographiquement, la jurisprudence pourrait rapidement permettre aux publicités d'utiliser les mêmes procédés. On devine alors les possibles dérives qui conduiraient entre autres à noyer les messages d'alerte dans un flot de publicité SMS ce qui contrarierait fortement leur efficacité.

Une autre limite apparue lors de l'exercice fait à Mayotte est liée aux alertes hors des heures ouvrables. En effet, par convention, le service ne fonctionnait que du lundi au vendredi de 9 h à 17 h ce qui ne couvre que 40 heures soit 24 % du temps hebdomadaire.

Compte tenu de la diffusion des téléphones portables, ce vecteur d'alerte est sans doute appelé à se développer. D'ailleurs, la rénovation en cours du réseau d'alerte national français intègre l'usage de ce vecteur d'alerte⁷. Il reste toutefois de nombreux problèmes à régler notamment le problème des coûts (qui en prend la charge ?) et celui de l'efficacité douteuse d'une alerte nocturne par ce vecteur sans une information préalable de la population.

Par ailleurs, il est primordial de connaître le taux de réception des messages, et en combien de temps il a été nécessaire avant réception par l'utilisateur. Il pourrait être intéressant de tester cet outil un 1er janvier à minuit pour éprouver la fiabilité du réseau et de transmission en situation saturée.

3.2.3.3 *Nouvelles technologies*

De nouvelles technologies sont en cours de développement, notamment au Japon, où les autorités développent des systèmes d'alerte VHF ou FM permettant l'affichage sur un GPS automobile ou sur un téléphone portable des messages d'alerte et des zones refuge les plus proches. Compte tenu du récent engouement pour les *Smartphones*, de plus en plus fréquemment équipés d'une fonction GPS, on peut également imaginer des applications ayant les mêmes fonctions (message et indication de la zone refuge la plus proche) à destination des personnes pratiquant des activités sur les littoraux, qu'ils soient des touristes ou des usagers fréquents.

Le contenu du message transmis doit indiquer l'heure prévue d'arrivée du tsunami, l'importance des effets attendus, et, en fin d'alerte, un message spécifique doit être émis pour indiquer aux populations que le risque n'est plus.

⁷ Pour plus d'informations : http://www.interieur.gouv.fr/sections/a_la_une/toute_l_actualite/securite-civile/nouveau-systeme-alerte

3.2.3.4 *La possible alerte par les mosquées : un cas discuté à Mayotte*

La transmission de l'information et la préparation des usagers de la mer et des riverains devraient être entreprises par le biais de ces canaux et s'appuyer sur les structures sociales existantes : associations de pêcheurs, de plaisanciers et de plongeurs à La Réunion, mosquées à Mayotte, maisons communes et chefs coutumiers en Nouvelle-Calédonie, etc.

Lors de la réunion du 16 mars 2011 en préfecture de Mayotte, les acteurs locaux et la Croix Rouge ont évoqué le relais intéressant que peuvent constituer localement les mosquées : les muezzins sont des personnes connues de la population et en qui cette dernière a confiance. La pratique musulmane étant très répandue à Mayotte, le réseau de mosquées est très dense (Figure 115 et Figure 116) et leurs haut-parleurs sont déjà utilisés dans certaines communes pour des informations à caractère non religieux. A Dembeni, commune sur la côte est de Grande Terre, les muezzins sont utilisés pour relayer de l'information locale (réunions...) et l'ont été en 2006 pour relayer des consignes préventives lors de l'épidémie de chikungunya (plus de 1000 cas dans l'île en quelques semaines).

Le réseau des mosquées avait été avancé pour pallier l'absence de réseau de sirène à Mayotte. Il n'est cependant pas intégré actuellement dans le dispositif officiel de la préfecture qui conformément aux consignes du ministère de l'Intérieur préfère privilégier les moyens « modernes » comme le SMS. La question du contenu du message doit être tranchée au préalable. La portée de l'appel par les mosquées en particulier la nuit n'est pas connue avec précision en fonction du relief et du vent (nonobstant la puissance du haut-parleur). Des simulations ont été faites pour estimer la population située à différentes portées des mosquées (Tableau 34). Si l'on prend une zone de portée de 200 m, on s'aperçoit que plus de 1000 personnes ne seraient pas atteintes par l'appel.

Des questions se posent pour avertir la nuit par haut-parleurs. Un responsable local souligne lors de la réunion du 16 mars 2011 que les muezzins peuvent intervenir y compris la nuit mais nous n'avons pas de cas avéré.

Tableau 34. Des zones tampons autour des mosquées.

Zone de couverture appel mosquée (en mètres)	Nombre de personnes non couvertes
200	1074
400	236
600	125
800	56
1000	17
1200	11
1400	10

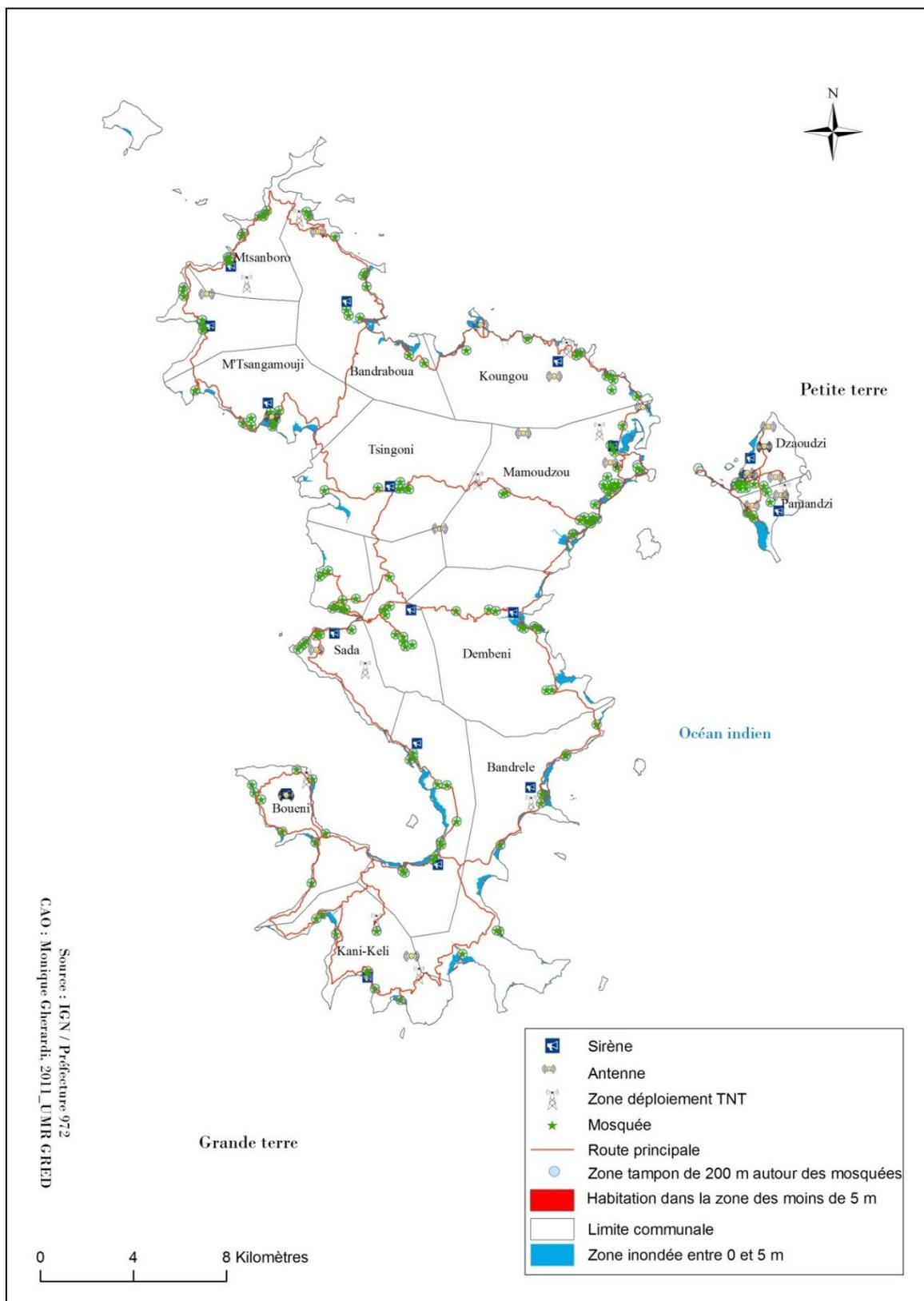


Figure 116. Carte des zones de diffusion des éventuels vecteurs d'alerte tsunami

3.2.3.5 *Radio et télédiffusion*

A Mayotte, radios et télévisions locales (Mayotte première, RFO) sont très écoutées par la population. Elles constituent un bon relais des communiqués de presse et des consignes de sécurité diffusés par les autorités en charge de l'alerte. Radio RFO possède 9 émetteurs sur le territoire mahorais. Se pose comme pour d'autres vecteurs d'alerte le problème des alertes nocturnes.

3.2.3.6 *Autres moyens de diffusion de l'alerte*

La gendarmerie et la police nationale disposent de véhicules avec micro et porte-voix qui sont les moyens *a priori* les plus efficaces en cas d'alerte nocturne avec le porte-à-porte. Les municipalités disposent également parfois de ce type de moyens qui ne sont pour l'instant pas recensés mais qui le seront dans le cadre des PCS. On rappellera à ce titre que les heures ouvrables (personnel, alerte par SMS ...) couvrent 40 heures à 50 heures dans une semaine qui en compte 168 Il y a donc 3 chances sur 4 que le tsunami n'ait pas lieu pendant les heures ouvrables.

Lors du Workshop « gestion de crise » à Mayotte le 16 mars 2011, les participants ont admis que les « systèmes s'additionnent » et qu'il fallait compter sur l'effet « toile d'araignée » et « bouche à oreille ». A La Réunion, lors de l'événement des 25-26 octobre 2010, la plupart des personnes concernées ont été averties par le bouche à oreille et ont correctement réagi. Cette réaction a été possible grâce au développement de puissants réseaux entre « gens de la mer », et grâce à l'expérience acquise depuis 2004, renforçant l'efficacité organisationnelle des usagers de la mer, professionnels ou non.

3.2.4 **La question de l'évacuation spontanée des populations**

En cas de tsunami, il s'avère que l'évacuation pédestre spontanée des populations est la méthode la plus efficace pour extraire des populations relativement nombreuses de la zone à risque (IOC-UNESCO, 2008 p.8). Cette méthode est particulièrement indiquée sur une île à relief vigoureux comme Mayotte. Ce point a été traité par une modélisation empirique des trajets d'évacuation et de la localisation des zones de refuge dans un paragraphe précédent.

3.3 **Les ressources de gestion de crise**

Faute de temps et faute de collaboration d'un certain nombre d'acteurs, un recensement exhaustif des moyens opérationnels de gestion de crise tsunami à Mayotte n'a pu être fait. Sous réserve d'un bilan plus précis, la mission PREPARTOI a étendu ses investigations aux ressources de gestion de crise

c'est-à-dire aux matériels, services et personnels mobilisables en cas de crise tsunami mais aussi aux lieux de gestion de crise à l'échelle de l'île et à l'échelle communale. Un troisième volet concerne les ressources de gestion de la post-crise.

L'objectif a été d'évaluer – dans la mesure des informations fournies – le dimensionnement et l'adéquation des moyens mais aussi l'exposition des lieux de gestion de crise face à l'aléa tsunami défini plus haut.

3.3.1 Positionnement et dimensionnement des moyens d'intervention

Ont été recensés d'abord comme ressources de gestion de crise les moyens opérationnels de gestion de crise : matériels, lieux de stockage du matériel de secours, prise en charge d'éventuels blessés c'est-à-dire les moyens du dispositif Orsec auxquels s'ajoutent les moyens locaux lorsqu'ils sont connus (Figure 117).

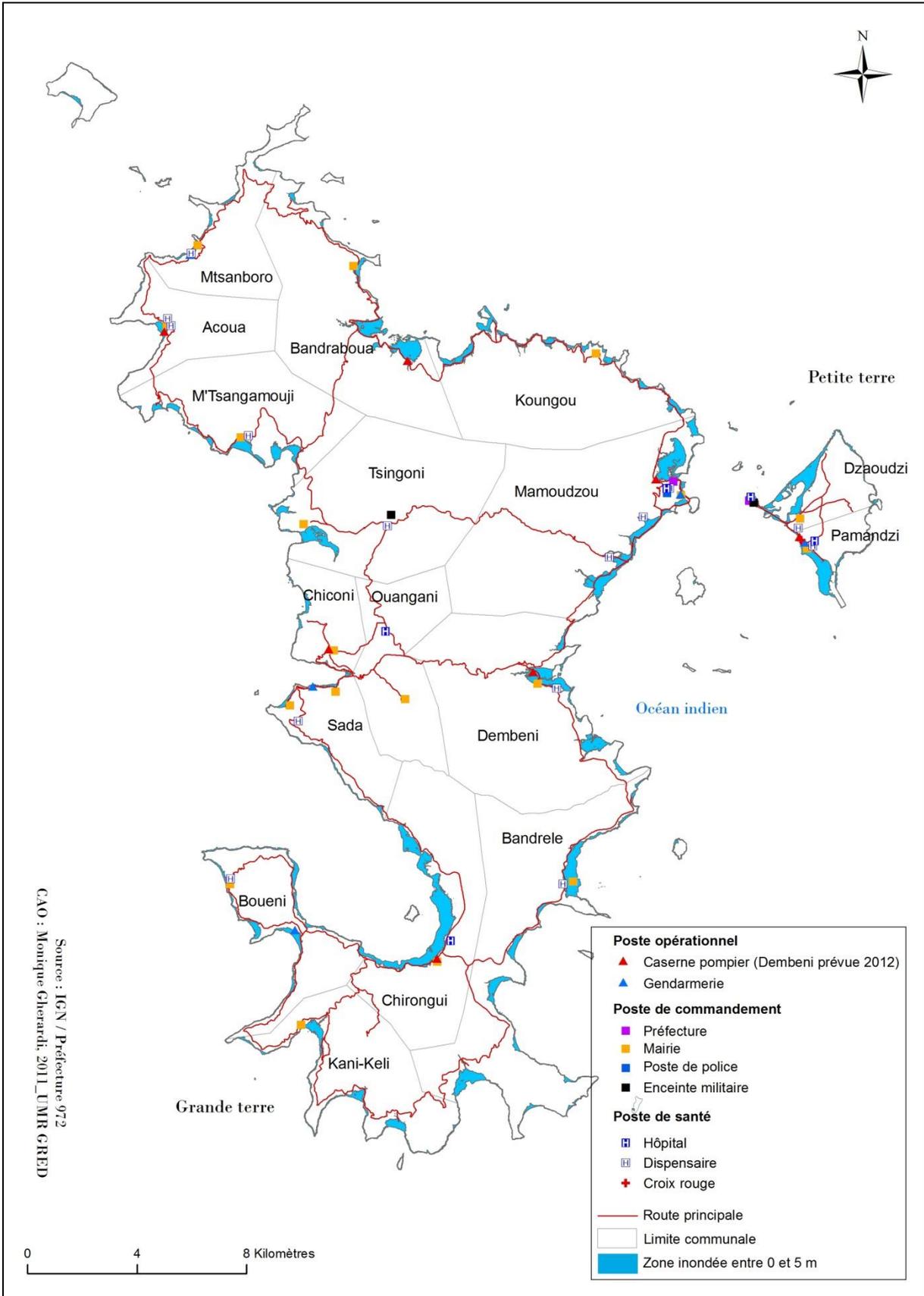


Figure 117. Ressources et lieux de gestion de crise.

En termes de moyens d'évacuation, les sapeurs-pompiers disposent de 14 ambulances mais l'île ne dispose que d'un seul hélicoptère de la gendarmerie. En cas de dommages massifs, la priorisation de l'affectation de ce type de moyen serait difficile. Les moyens maritimes sont un point faible. Hormis quelques zodiacs, un chaland de transport de 15 m et les moyens normalement dévolus à la lutte contre les clandestins, les moyens d'apporter assistance aux zones touchées par la mer sont quasi inexistantes d'autant plus toutes les cales (hors Mamoudzou Dzaoudzi et Longoni) sont à sec à marée basse. La disponibilité de ces faibles moyens suppose qu'en cas d'alerte tsunami, ils aient été protégés et mis en sécurité.

Concernant la capacité des hôpitaux et établissements de santé, les responsables présents lors de la réunion du 16 mars 2011 estiment que les capacités d'accueil ne seront pas dépassées lors d'une crise « tsunami ». Les dispositifs actuels sont calés pour faire face à une pandémie grippale d'ampleur moyenne. Pour les événements « naturels » l'événement majeur retenu combinerait un cyclone et des glissements de terrain en nombre important.

La Croix Rouge nous a fourni la liste du matériel dont elle dispose en cas de crise. Ce matériel est stocké dans un hangar sur Petite Terre – situé en zone inondable- : Tentes, kit (eau), laboratoire, réservoir, habitat d'urgence. Les moyens sont plus conséquents sur l'île de la Réunion. - Les moyens militaires sur place (Légion) ne nous sont pas connus en détail ni les moyens qui pourraient provenir de l'île de la Réunion ou de métropole. Les moyens extérieurs pourraient parvenir par avion militaire dans un délai de 5 heures à condition que l'aéroport ne soit pas touché (une partie de la piste est exposée en cas de tsunami 5 m à marée haute) et à condition aussi que ces moyens extérieurs notamment ceux de La Réunion soient disponibles c'est-à-dire non mobilisés sur d'autres théâtres d'opération.

Une question à poser qui n'a pu être débattue faute de temps lors de la réunion du 16 mars 2011 concerne le personnel mobilisable : les équipes de gestion de crise d'assistance aux sinistrés peuvent-elles être relevées lors d'une crise qui durerait plus de deux jours ? Les personnels ne seraient ils pas eux-mêmes sinistrés ? Quelle est la part du personnel des services de secours et de gestion de crise en général située en zone à risque ?

3.3.2 Les lieux de gestion de crise

En cas d'alerte et de crise tsunami, le poste de commandement sur l'île serait situé à la préfecture sur l'île de Dzaoudzi. Une antenne de la préfecture existe aussi à Mamoudzou sur Grande Terre.

Les centres de secours sont au nombre de deux dont 1 sur Grande terre à Kawéni et 1 sur Petite Terre à Pamandzi. Le centre du SDIS de Kawéni est proche du niveau de la mer et il n'est pas exclu que l'accès en soit compromis en cas de forte surcote marine liée à un tsunami ou un cyclone. Comme le souligne le SACR, les interventions des centres de secours ont fortement augmenté ces dernières années. Aussi, la création de 5 centres de secours à Longoni, Acoua, Kahani, Dembeni et Chirongui en 2012 améliorera les secours dans la partie sud de Grande Terre. Sous réserve d'un inventaire plus précis, on note que deux des futurs centres de secours de l'île (Acoua et Dembeni) et deux dispensaires (Bandraboua et Koungou) sont situés à moins de 5 mètres d'altitude (Tableau 35).

La gestion locale de la crise reposerait aussi sur les moyens municipaux. Les mairies sont supposées être les centres névralgiques de gestion de crise à l'échelle locale. Mais sur les 17 mairies de l'archipel, on en recense 3 en zone d'aléa (Pamandzi, Mtsanboro et Brandélé). Par ailleurs, il conviendrait d'étudier plus précisément l'adéquation des locaux à la gestion de crise. Il peut être plus pertinent de placer la cellule de gestion de crise dans un local plus vaste, non exposé, plus accessible et plus proche des ressources de gestion de crise que la mairie elle-même. Les Plans communaux de sauvegarde doivent préciser ces lieux de gestion de crise qui peuvent être différents en fonction du type d'aléa ou devoir être déplacés en cours de crise.

Tableau 35. Situation des enjeux et ressources de gestion de crise par rapport à l'aléa tsunami.

		En zone d'aléa tsunami 0-5 m	Hors zone d'aléa
Établissement de santé	Dispensaire	2	15
	Mairie	3	14
Lieux de Gestion de crise	Centre de secours	2	7
	Préfecture	0	2

Dans un scénario de risque, l'alerte serait transmise aux populations qui évacueraient vers les hauteurs. A ce jour, aucune zone refuge n'est toutefois clairement identifiée par les autorités. Dans le cadre de la rédaction des PCS, certaines mairies ont fait l'effort de recenser les ERP qui seraient en mesure d'abriter des populations mais on est loin d'un recensement systématique ni d'une intégration de ces moyens locaux aux dispositifs de gestion de crise. A titre d'exemple, à l'échelle de l'île, 92 mosquées (sur 185) et 65 établissements scolaires (sur 199) sont situés à moins de 10 m d'altitude.

3.3.3 Actions et moyens de la post-crise

Le recensement, le dimensionnement et le positionnement des moyens nécessaires pour rétablir les fonctions vitales de la vie socioéconomique sont des tâches souvent négligées qui ne peuvent être traitées de façon exhaustive ici. Elles doivent être particulièrement détaillées à l'échelle locale (plan communal de sauvegarde) au vu des nombreuses tâches qui incombent aux autorités dans les heures et les jours qui suivent un sinistre majeur (Tableau 36).

La vulnérabilité des réseaux est à évaluer en particulier les réseaux d'alimentation en eau potable et le réseau électrique. Pour ce dernier, la situation de certains éléments comme le poste de distribution à Pamandzi (Figure 118 page suivante) qui sont très proches du niveau moyen des mers. Nul doute qu'une submersion à + 5 m endommagerait sérieusement ces points névralgiques pour l'économie et la vie quotidienne à Mayotte.



Figure 118. Le poste de redistribution électrique de Dzaoudzi exposé à l'aléa tsunami (en haut carte de situation (cercle rouge) (cliché M. Peroche)

Une ressource essentielle n'a pu être recensée à savoir les moyens de déblaiement et de réfection temporaire des routes (moyens de déblaiement, tronçonneuses, ponts provisoires...), point crucial

puisque plusieurs routes seraient coupées ou endommagées en cas de houle cyclonique ou en cas de tsunami montant à 5 m.

Tableau 36. Les tâches de la poste crise.

Les tâches de la post-crise	Première urgence	Deuxième urgence
Répondre aux besoins matériels de la population :	Alimentation, eau potable, relogement	Vêtement, mobilier
Soutenir les populations	Assistance médicale, soutien psychologique	Aide juridique pour la constitution des dossiers d'assurance et d'aide financière
Rétablir les fonctions vitales de la société	Communications routières, téléphoniques, rétablir électricité	Rétablir les réseaux d'assainissement
Aider à la reprise de la vie économique et sociale	Reloger les commerces vitaux, rétablir les services administratifs.	Rétablir transports scolaires et écoles,
Organiser la solidarité	Loger, nourrir et équiper les secouristes	Collecter et répartir les aides dans la population
Assurer l'ordre	Surveiller les habitations et les commerces inoccupés	
Assurer hygiène et propreté	Nettoyer les rues, évacuer les déchets	Traiter les déchets

D'après Vinet, 2010

Les scénarios de crise prévoient la coupure de certains axes routiers majeurs à l'échelle de l'île notamment entre la préfecture Mamoudzou et le sud de Grande Terre sans parler d'une interruption momentanée possible des liaisons par barge entre Grande Terre et Petite Terre.

Ceci pose la question du prépositionnement des moyens qui est essentiel en matière de gestion de crise.

Cette question des ressources de la post crise ne peut être traitée en détail qu'au niveau local et sera examinée pour le cas pratique de la commune de Dembeni (Figure 119).

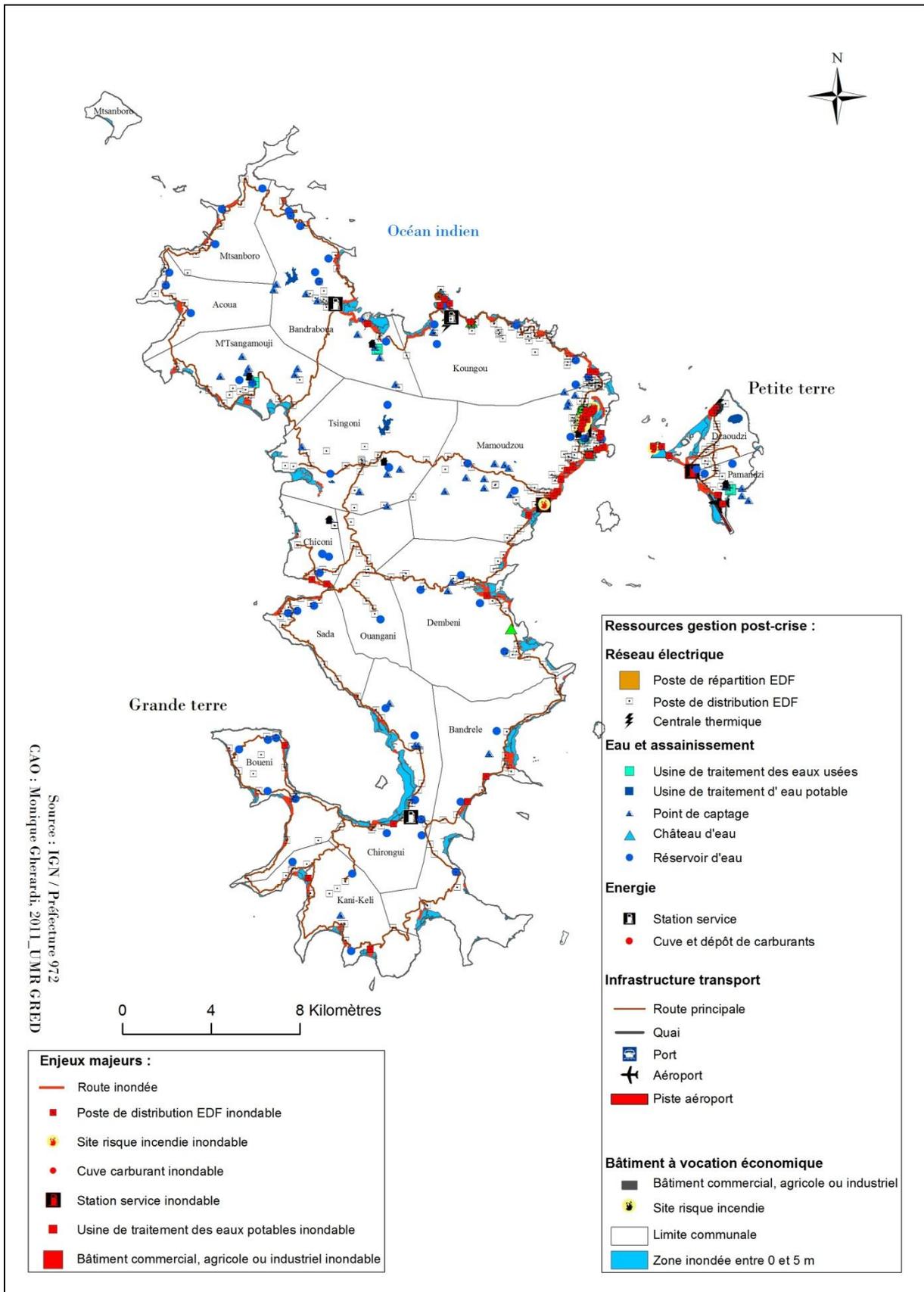


Figure 119. Enjeux et ressources post-crise en cas de tsunami à Mayotte.

Chapitre 4e. **Impact et gestion de crise tsunami à l'échelle locale : l'exemple de la commune de Dembeni (GRED)**

Afin de tester les scénarios tsunami à l'échelle locale et de mesurer les capacités de gestion de crise à l'échelle locale, la méthode développée par l'équipe Prepartoi a été déclinée sur la commune de Dembeni. Cette commune est particulièrement exposée à l'aléa tsunami puisque près de 2000 personnes vivent dans la zone inférieure à 5m d'altitude. En plus du travail cartographique effectué à l'échelle de Mayotte, des relevés spécifiques et des entretiens avec les autorités locales ont complété la connaissance des capacités de gestion de crise locales.

Après une brève présentation du contexte, cette étude de cas aborde les impacts possibles d'un tsunami puis les ressources de gestion de crise et post crise.

4.1 Un tsunami à Dembeni : contexte, scénario, impacts attendus

4.1.1 Contexte et scénario retenu

La commune de Dembeni est située à 10 km au sud de Mamoudzou sur la côté est de Grande Terre. Elle regroupe 10050 habitants se répartissant sur les noyaux villageois de Hajangoua, Iloni, Tsararano, Ongojou et Dembeni. Les deux localités exposées à l'aléa tsunami sont Dembeni-centre et Iloni. Le littoral est bordé d'une zone de mangrove qui constitue une protection mais abrite une population clandestine nombreuse fortement exposée à un éventuel tsunami.

La commune est exposée à de nombreuses menaces naturelles (coulée de boue, inondations) dont la plus prégnante est le risque cyclonique. Un Plan de prévention des risques (PPR), en cours d'élaboration, prendra en compte les risques inondations, les mouvements de terrain et le risque de submersion marine par surcote cyclonique.

Le scénario d'aléa tsunami retenu est une submersion jusqu'à une altitude de 5 mètres (voir plus haut dans cette étude) par un tsunami provenant d'Indonésie ou du Makran ce qui laisse un délai de 6 à 8 heures pour préparer l'arrivée de l'onde sur les côtes mahoraises.

4.1.2 Impacts attendus

Sur la base de ce scénario 0-5 m, on dénombrerait 512 bâtiments touchés à Dembeni ce qui correspond à 1948 personnes (un peu moins de 20 % de la population) auxquelles il faut ajouter les personnes vivant clandestinement dans la mangrove sans que leur nombre soit connu. La zone touchée engloberait également les enjeux suivants : 5890 m de voirie, un bureau de poste, deux écoles primaires et une mosquée. Un quart des zones urbaines de la commune de Dembeni sont exposées à l'aléa tsunami 0-5 m (Figure 120). Les cartes de la Figure 123 et de la Figure 124 localisent les principaux enjeux. Un scénario de crise majeur entraînerait la rupture de la route entre Mamoudzou et Dembeni en plusieurs points ce qui se traduirait par l'isolement de la commune pour une durée indéterminée et la priverait des appuis extérieurs (Figure 121).

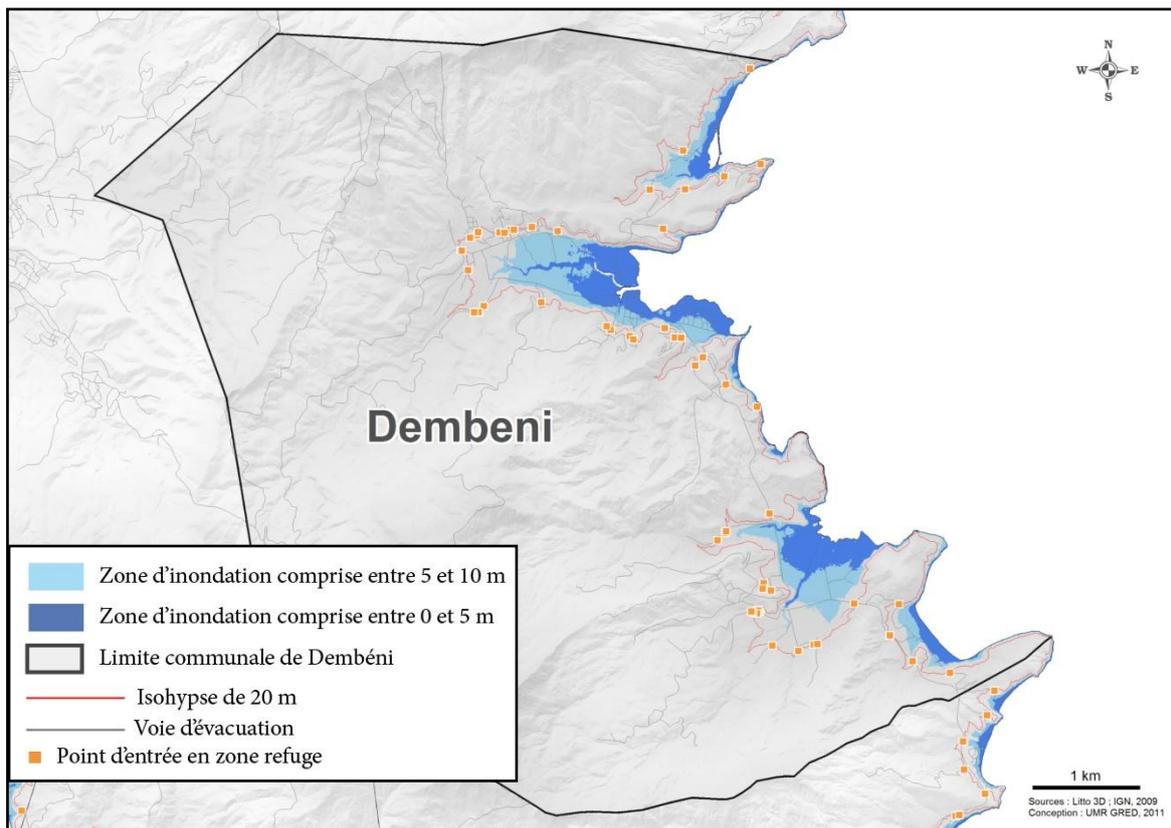


Figure 120. Les zones exposées à l'aléa tsunami à Dembeni.

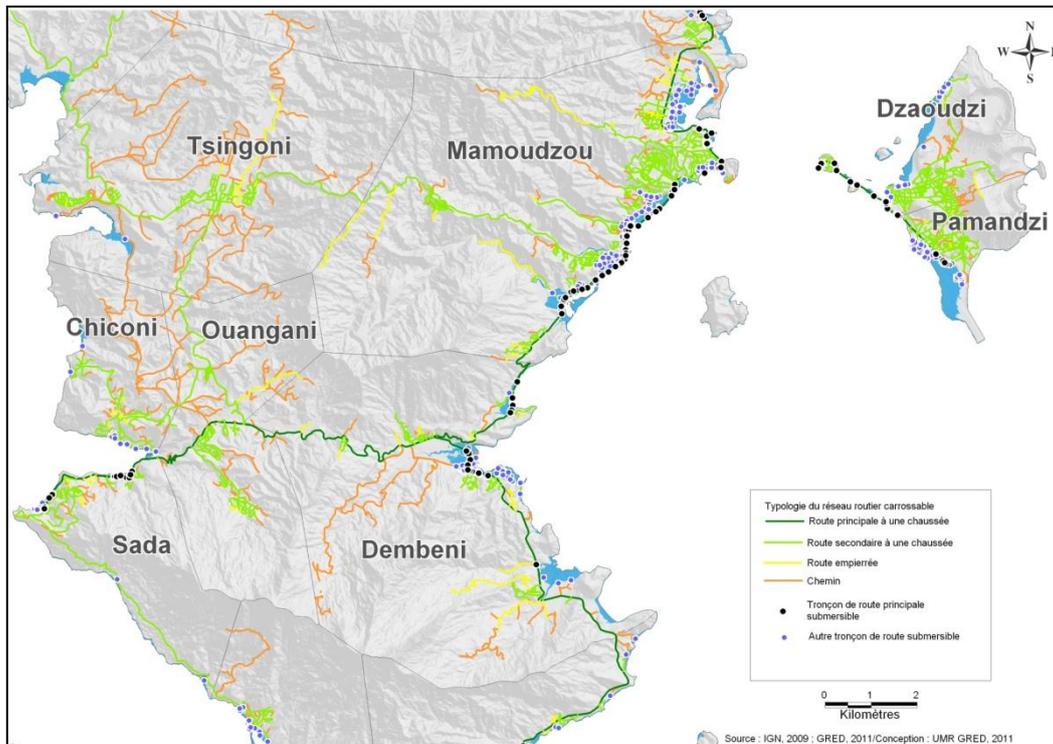


Figure 121. Prévisions de rupture du réseau routier en cas de tsunami à Mayotte (en bleu, les zones inondables par tsunami + 5 m).

4.2 Capacités de gestion de crise

4.2.1 Alerte et mise en sécurité des populations

Outre les vecteurs d'alerte évoqués à l'échelle de l'île (voir plus haut) et détaillés dans le PSS tsunami, les muezzins de Dembeni ont coutume d'être utilisés pour relayer de l'information locale (réunions...) et l'ont été en 2006 pour relayer des consignes préventives lors de l'épidémie de chikungunya qui toucha plus de 1000 personnes dans l'île en quelques semaines. Ils peuvent constituer un bon relai pour l'alerte d'évènements naturels majeurs. Il existe 183 mosquées à Mayotte dont 5 à Dembeni.

Le délai étant de 6 à 8 heures entre le séisme et l'arrivée du tsunami sur les côtes de Mayotte, la mise en sécurité de la population peut se faire sur les zones identifiées comme zones refuges.

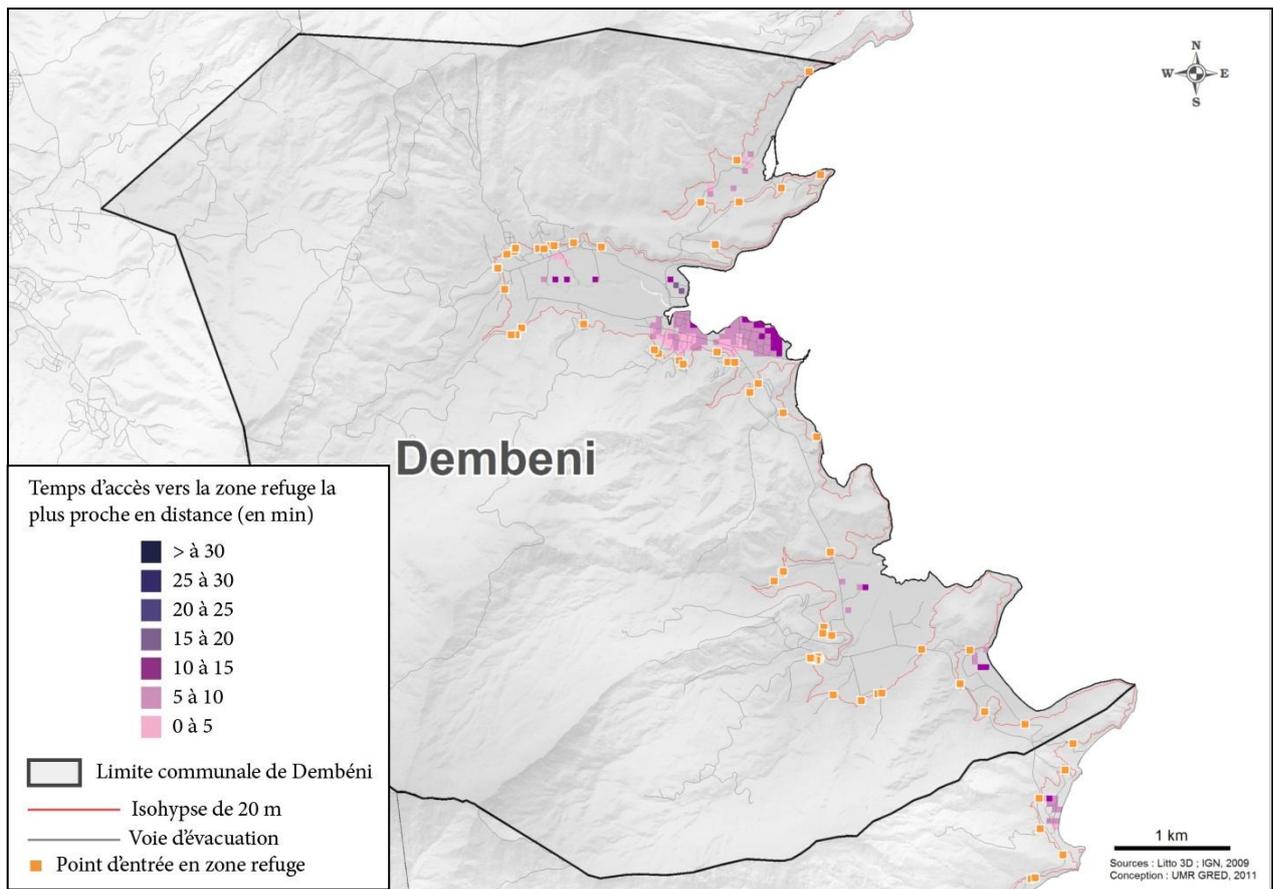


Figure 122. Temps d'accès aux zones de refuge extérieures temporaires en cas d'évacuation pédestre spontanée

Les zones refuges extérieures temporaires pour une période courte (quelques heures) sont des zones extérieures aisément accessibles comme des parcs des places ou des rues larges (Figure 122). L'hypothèse retenue est celle de zones refuges situées à 20 mètres d'altitude. A Dembeni, compte tenu du relief assez vigoureux, les délais maxima sont de 15 minutes pour un trajet pédestre entre les zones les plus proches de la mer et les zones refuges les plus accessibles ce qui confirme que l'évacuation pédestre préventive spontanée est tout à fait gérable et possible dans le cas d'un tsunami qui serait annoncé.

Ceci confirme également que, plus que l'évacuation, c'est l'alerte aux populations qui est le point crucial en cas de tsunami à Mayotte (voir plus haut ce débat sur les vecteurs d'alerte, le contenu des messages, les délais d'alerte...).

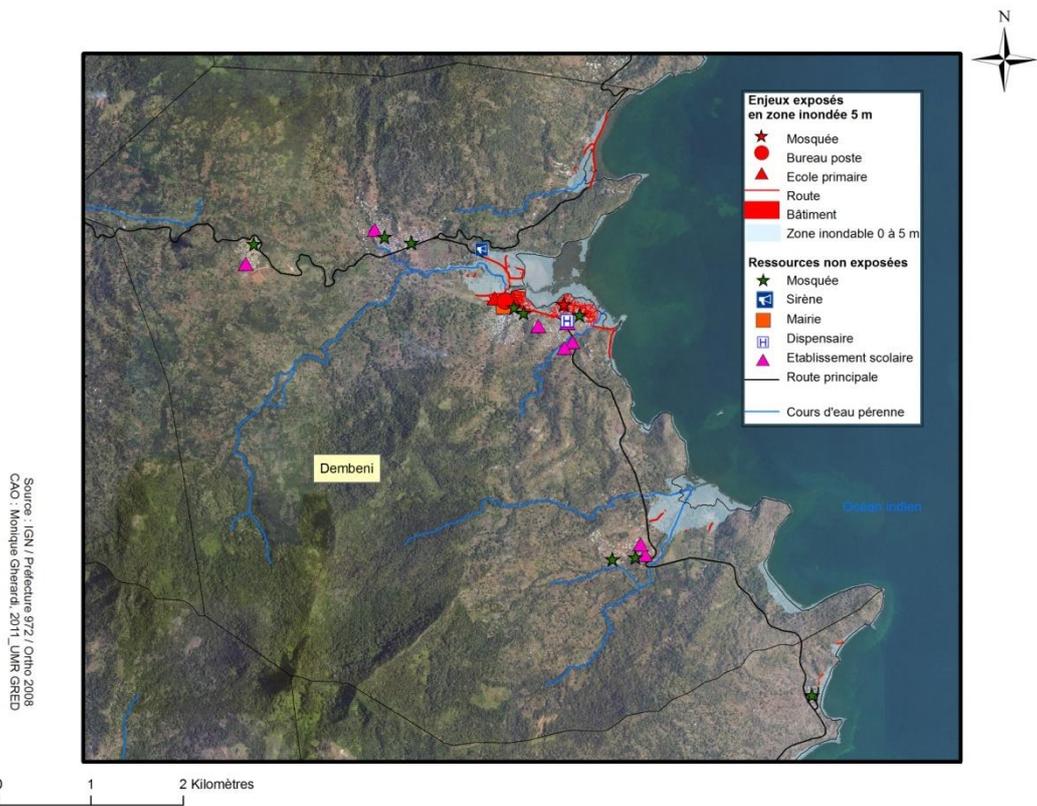


Figure 123. La répartition des enjeux exposés au tsunami et des lieux de gestion de crise sur la commune de Dembeni.

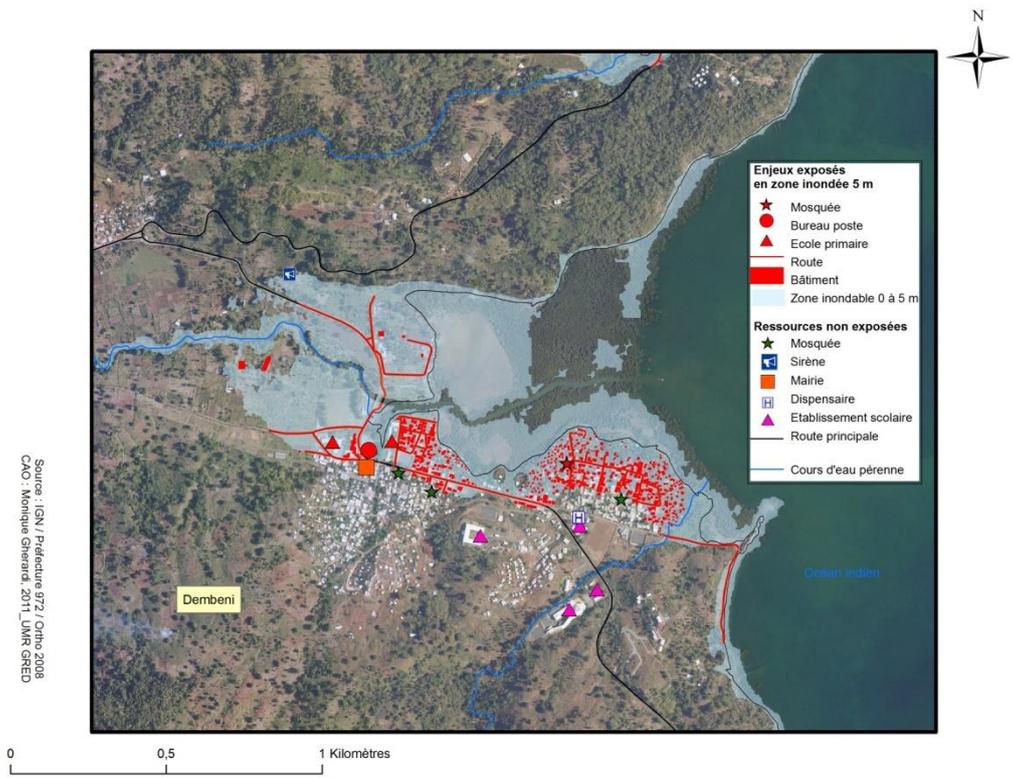


Figure 124. La répartition des enjeux et lieux de gestion de crise sur la commune de Dembeni : zoom sur le secteur de Dembeni-Iloni.

4.2.2 Moyens d'intervention et ressources de gestion de crise (Figure 123 et Figure 124)

Le Plan communal de sauvegarde de Dembeni élaboré en 2009 est l'un des plus avancés de l'île. Il recense les principaux enjeux en particulier les 10 écoles et évalue leur exposition aux aléas contenus dans le PPR à savoir les risques « inondations », « mouvements de terrains » et « cyclone ».

Le PCS recense également les personnes ressources en cas de sinistre : infirmiers médecins, et propose un organigramme de gestion de crise.

Mais pour l'instant le dispositif n'est pas complet. Au regard des éléments requis dans un PCS (0), le PCS de Dembeni doit être complété sur différents points comme :

- l'analyse de scénarios d'impacts dont celui de tsunami qui pour l'heure n'est pas pris en compte.
- le dispositif de gestion de crise (pour l'instant certains postes ne sont pas pourvus, les suppléants ne sont pas nommés...)
- la gestion post crise

Des exercices d'évacuation ont lieu annuellement dans les écoles ce qui témoigne d'une certaine conscience du risque et d'un embryon de culture de gestion de crise.

- Moyens internes de gestion de crise et post crise

Dembeni n'a pas de moyens propres d'assistance aux victimes. Dembeni devrait être équipée d'un centre de secours en 2012 ; ce centre de secours sera situé à Iloni, proche de la mer, à une altitude inférieure à 10 m. Pour l'instant, les moyens viendraient du sud de l'île. La mairie disposait en 2011 de peu de moyens interne de gestion de crise : peu de matériel et peu de personnel mobilisable.

- Moyens externes

L'acheminement de moyens d'intervention extérieurs poserait problème en cas de crise majeure. En effet à l'échelle de l'île les moyens sont limités (un seul hélicoptère) et ils seraient sans doute concentrés sur des enjeux plus forts autour de Mamoudzou.

Par ailleurs, l'accessibilité de Dembeni serait problématique : la route vers Mamoudzou serait momentanément coupée (voir plus haut figure 6). Il ne nous a pas été possible de recenser à l'échelle de l'île les moyens de dégagement des routes. Ces moyens ne sont pas recensés à Dembeni.

L'accès par mer serait sans doute limité : il ne serait possible qu'à marée haute et seulement pour des embarcations légères. Les moyens maritimes présents sur l'île sont faibles et se limitent à quelques zodiacs, un chaland de transport de 15 m de la Légion et aux moyens de recherche des clandestins (gendarmerie). L'utilisation de ce matériel suppose qu'il soit préservé d'un éventuel tsunami et qu'il puisse aborder les côtes.

Enfin il faut souligner qu'à Mayotte, les communes n'ont pas de ressources propres et fonctionnent surtout sur les dotations de l'Etat. Cette configuration qui limite fortement les investissements des municipalités dans l'amélioration des infrastructures sur le long terme explique la dégradation et donc la vulnérabilité de certains équipements comme la voirie communale.

4.2.3 Ressources post crise

C'est dans la phase de post crise que se mesure la capacité de réponse des autorités face à une crise. Trop souvent ignorée par rapport à l'alerte ou l'évacuation la post crise est une période critique qui peut devenir difficile à gérer pour les autorités locales si elle dure trop longtemps. Passée l'émotion, la pression de la population est forte pour que soient rétablis au plus vite les fonctions vitales de la vie socio-économique (tableau 5 plus haut). Les points critiques sont l'alimentation en eau potable, en électricité et en télécommunications mais aussi le déblai des déchets et la prise en charge des personnes qui ont perdu leur logement.

Dembeni est alimenté par l'usine de traitement d'eau potable d'Ouroveni au nord-est de Chiconi. A priori, le système AEP est moins vulnérable en cas de tsunami qu'en cas de fortes pluies où les canalisations pourraient être coupées par des glissements de terrain. Le réseau électrique est plus souple que le réseau AEP car la rupture de quelques câbles peut être contournée par des redistributions. A Mayotte, la vulnérabilité du réseau réside dans la proximité de certains postes de transformation et de redistribution proches du niveau de la mer (voir photographie 2, plus haut). Les gestionnaires de réseaux ont des plans d'actions en cas de crise qu'il ne nous a pas été possible d'évaluer.

En cas de crise grave, se poserait la question de l'hébergement des personnes sinistrées. A Dembeni, les locaux recensés comme pouvant accueillir des personnes en séjours supérieurs à une journée sont assez rares. La commune possède avec l'IUFM une structure d'hébergement pour les personnes sinistrées couverte et équipée (eau, sanitaire...). L'IUFM est situé à 35m d'altitude hors zone à risque. Toutefois, il ressort d'entretiens sur place que l'accès à l'IUFM n'est pas assuré hors des heures

ouvrables. La municipalité ne dispose pas des clés des locaux la nuit et le WE. Les clés seraient détenues par la gendarmerie.

Une première tranche du lycée de Tsararano est ouverte au public depuis septembre 2011. Un Plan d'Accueil des Populations Sinistrées (PAPS) est opérationnel depuis le 12 janvier 2012. Il met à disposition 954 m² répartis en plusieurs salles ainsi que des sanitaires. En cas de nécessité, c'est la gendarmerie qui dispose des clés de l'établissement.

En revanche, les écoles et les mosquées sont *a priori* trop petites pour constituer des lieux d'hébergement en cas de crise durable.

4.3 Bilan et proposition d'amélioration

Les impacts d'un éventuel tsunami à Dembeni seraient non négligeables car environ 2000 personnes habitent officiellement en zone exposée (altitude < 5m) auxquels s'ajoutent les clandestins vivant dans la mangrove. La commune de Dembeni est l'une des plus avancées en termes de connaissance du risque (elle disposera d'un Plan de prévention des risques mais qui n'intègre pas le risque tsunami) et de planification de gestion de crise (elle sera dotée d'un Plan communal de sauvegarde). Il existe une culture du risque minimale qui se traduit par des exercices d'évacuation annuels dans les écoles. Ils concernent le risque cyclonique. La construction en 2012 d'un centre de secours à Iloni serait un point positif s'il n'était pas situé trop proche du littoral. Il faut aussi noter une relative bonne intégration de la société mahoraise dans le fonctionnement de la vie civile (par exemple : utilisation des mosquées pour la diffusion des messages préventifs).

Parmi les points faibles susceptibles d'être améliorés, on note :

- l'absence de définition claire des rôles respectifs de l'Etat et des collectivités territoriales dans l'alerte aux populations en cas de tsunami
- L'absence de scénarios d'impacts sur lesquels la commune pourrait se reposer pour dimensionner sa réponse en cas de crise.
- L'incomplétude du recensement des moyens locaux de gestion de crise
- La faiblesse de la culture du risque chez les élus locaux

- La nécessité de compléter le dispositif de gestion de crise (organisation de gestion de crise, noms des personnes responsables et des suppléants pour chaque domaine d'intervention mise en place de groupes de personnes mobilisables tels les réserves communales de sécurité civile (Cepri, 2011).
- La faiblesse des moyens communaux en post crise (déblaiement des routes, relogement des sinistrés, fourniture eau potable et électricité, reprise de la vie économique...)

Ces différents points critiques qui constituent des suggestions d'amélioration des dispositifs existants de gestion de crise sont d'ailleurs pour la plupart communs à toutes les municipalités littorales de Mayotte, notamment la faiblesse des moyens matériels et humains. En cas de crise grave (nombre élevé de logements détruits, coupure des réseaux routiers AEP et électriques...), qu'elle soit générée par un tsunami ou un événement climatique de type cyclone, les municipalités ne seraient pas en mesure de faire face et d'assurer le relais ou de se substituer aux ressources de l'Etat qui à l'échelle de l'île sont limitées également.

4.4 Conclusions partielles sur le dispositif et les ressources de gestion de crise à Mayotte

Le dispositif de gestion de crise est à l'échelle de Mayotte c'est-à-dire modeste. La planification de la gestion des crises a clairement progressé avec la mise en place de la départementalisation et les efforts de l'Etat sont indéniables. De même, le maillage du territoire en moyens de secours progresse avec la création de nouveaux centres de secours dans un bref délai. En cas d'événement moyen, dans des conditions « normales », le dispositif serait apte à prendre en charge la gestion de crise. Toutefois, à l'analyse des dispositifs de gestion de crise et de la répartition spatiale des enjeux, quelques faiblesses ou incertitudes apparaissent.

Les moyens d'alerte sont nombreux mais aucun ne peut prétendre toucher l'ensemble de la population exposée. Le cas particulier de la société mahoraise et de son fonctionnement impose de combiner les moyens d'alerte institutionnels avec des relais proches de la population (mosquées ?, télévision et radio locales). Si l'on peut être relativement confiant sur la diffusion d'un message d'alerte dans un délai de quelques heures avant un tsunami en journée, en revanche, en cas d'événement intervenant hors des heures ouvrables (3 chances sur 4 qu'un événement ait lieu hors des heures « ouvrables » (exemple d'un tsunami se déclenchant en Indonésie à 22 h Heure de Mayotte un samedi), l'efficacité de l'alerte pourrait être amoindrie. Il faut également tenir compte

des possibles contradictions entre divers médias (SMS, télévision...) : n'oublions pas que, compte tenu du temps d'arrivée d'un tsunami d'origine indonésienne, les images seraient sur toutes les télévisions avant ou après que l'alerte officielle ait été donnée, avec des risques de réaction non contrôlée ou des évacuations spontanées de la population trop précoces...

L'éducation, l'information en temps « normal » (hors temps de crise) sont les conditions de base du déploiement d'une prévention efficace. L'éducation et l'information sur les risques naturels crée le terreau nécessaire à la mise en place d'autres mesures de préparation aux crises à condition d'être adaptée au contexte local.

Il demeure également des incertitudes concernant le dimensionnement des moyens d'assistance aux victimes en cas de crise majeure en intensité ou en durée : un seul hélicoptère est disponible sur l'île, de nombreuses routes seraient coupées. De nombreuses ressources sont exposées à l'aléa et pourraient ne pas être opérationnelles en cas d'aléa fort : aéroport, centres de secours, réseau électrique, installations portuaires...

Une autre incertitude concerne les potentiels apports extérieurs de secours en cas de crise grave. Les moyens extérieurs n'arriveraient pas sur l'île avant H + 6 à moins qu'ils ne fussent mobilisés ailleurs. En effet, si Mayotte était touchée par un tsunami, il est fort probable que d'autres territoires français le soient concomitamment, en premier lieu l'île de la Réunion ce qui mobiliserait en priorité les secours. De plus, l'aéroport serait partiellement touché en cas de Runup de 5 mètres. A l'intérieur de l'île la rupture probable de la route de Mamoudzou–Dembeni poserait des problèmes d'approvisionnement pour le sud et l'ouest de l'île car les possibilités d'accéder aux territoires par la mer ou par les airs sont très limitées.

Une troisième recommandation concerne la nécessité de renforcer le dialogue entre acteurs de la gestion de crise notamment entre services de l'Etat et acteurs municipaux. L'implication des acteurs locaux dans la planification de gestion de crise est à quelques exceptions près, insuffisante comme le prouve l'état encore embryonnaire des plans communaux de sauvegarde. L'étude de cas de la commune de Dembeni montre tout l'intérêt qu'il y aurait à développer des outils tels que les plans communaux de sauvegarde. Ce type de dispositif pourrait apporter des réponses en matière de moyens d'alerte d'évacuation des personnes exposées et de gestion de la post crise. Les moyens locaux (matériels et humains) de gestion de crise sont faibles et la capacité de réponse des communes seraient sans doute dépassée par une crise majeure. Il reste à sensibiliser les équipes municipales à la préparation des crises ce qui est sans doute un des défis majeurs dans le domaine de

la planification de gestion de crise. La mentalité mahoraise et l'omniprésence de l'Etat dans ce domaine ne favorisent pas la prise en main à l'échelle locale.

Bibliographie

- 20 Minutes. (2010, 26.10. 2010). Un mini-tsunami touche l'île de la Réunion Retrieved 26.10. 2010, 2010, from <http://www.20minutes.fr/article/612731/societe-un-mini-tsunami-touche-ile-reunion>
- Amigues J.-P., Arnaud F., Bonniex F., (2003), « Évaluation des dommages dans le domaine de l'eau : contribution à la constitution d'une base de données françaises », INRA Rapport final, p. 38.
- Appert M. & Chapelon L. (2006), La vulnérabilité des réseaux routiers urbains face aux risques d'altération, in : La mise en carte des risques naturels, Géorisque n°2, collection du laboratoire GESTER, Université Montpellier 3, pp. 47-58.
- Arrow K., Solow R., Leamer E., Portney P., Randner R., Schuman H., (1993), Report of the NOAA Panel on contingent valuations », U. S. Federal Register, 15 January, 58, vol.10, pp.4601-4614.
- Aswathanarayana, U. (2005). Preparedness and Mitigation Systems for Asian Tsunami-Type Hazards. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 86(11), 1-111. doi: 10.1029/2005EO110003
- Audru J.C., Bitri A., Desprats J.F., Dominique P., Eucher G, Hachim S., Jossot O., Mathon C., Nédellec J.L., Sabourault P., Sedan O., Stollsteiner P., Terrier-Sedan M. (2010), Major natural hazards in a tropical volcanic island: A review for Mayotte Island, Comoros archipelago, Indian Ocean, *Engineering Geology*, 114, pp. 364-381.
- Barbier B., Acreman M. et Knowler D., (1997) « Évaluation économique des zones humides Guide à l'usage des décideurs et planificateurs ». Bureau de la Convention de Ramsar, Gland, Suisse, 143 pages.
- Barde J.P., 1992, « Économie et politique de l'environnement », Presses Universitaires de France, Paris.
- Barthomeuf, B., Paris, R., Grancher, D., Wassmer, P., & Vautier, F. (2011). Accumulations de blocs par le tsunami du 26 décembre 2004 à Lhok Nga, ouest de Banda Aceh. In F. Lavigne & R. Paris (Eds.), *Tsunarisque* (pp. 137-144). Paris, France: Publications de la Sorbonne.
- Bavoux J.J., Beaucire F., Chapelon L., Zembri P. (2005), *Géographie des transports*, Ed. Armand Colin, Collection U, Paris, 232 p.
- Beumais O., R.Chakir D., et Laroutis D., « Valeur économique des zones humides de l'estuaire de la Seine (France) Application de la Méthode d'Évaluation Contingente », <http://www.univ-rouen.fr/droit-sceco- article> consulté le 2 novembre 2007
- Beumais (O.), Chiroleu-Assouline (M.), 2002, « Économie de l'environnement », Bréal, Collection « Amphi ».
- Bensoussan O. (2009), La mer, menace ou espoir de développement pour Mayotte ?, *Les cahiers d'Outre-mer*, n°248, 25 p., <http://com.revues.org/index5779.html>.

- Bishop R.C., Heberlein T.A. (1990), « The Contingent Valuation Method » in R.L. Johnson and Johnson G.V. (eds), *Economic Valuation of Natural Resources*, Boulder Co., Westview Press.
- Bonnieux F., Le Goffe P., Vermersch D., 1995, « La méthode d'évaluation contingente : application à la qualité des eaux littorales », *Économie et Prévision* 117-118, pp. 89-106.
- Borero, J., Ortiz, M., Titov, V. V., & Synolakis, C. E. (1997). Field Survey of Mexican Tsunami Produces New Data, Unusual Photos. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 78, 85, 87-88.
- BRGM (2011), Base de données sur les mouvements de terrain (BDMvt), <http://www.bdmvt.net/>, consulté en mars 2011.
- Bruzzi, C., & Prone, A. (2000). Une méthode d'identification sédimentologique des dépôts de tempête et de tsunami: l'exoscopie des quartz, résultats préliminaires. *Quaternaire*, 11(3-4), 167-177.
- Burnod, P., & Sourisseau, J.-M. (2007). Changement institutionnel et immigration clandestine à Mayotte. *Autrepart* 3(43), 165-176. doi: 10.3917/autr.043.0165
- Cepri (2011) La réserve communale de sécurité civile Les citoyens au côté du maire, face au risque inondation. 56 p.
- Chang S. (2003), *Transportation planning for disasters: an accessibility approach*, *Environment and Planning*, vol. 35, pp. 1051-1072.
- Chapelon L. (1996), Modélisation multi-échelles des réseaux de transport : vers une plus grande précision de l'accessibilité, *Mappemonde*, n°3, pp. 28-36.
- Choi, B. H., Pelinovsky, E., Kim, K. O., & Lee, J. S. (2003). Simulation of the trans-oceanic tsunami propagation due to the 1883 Krakatau volcanic eruption. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 321-332.
- Coffin, M. F., Gahagan, L. M., & Lawver, L. A. (1998). Present-day Plate Boundary Digital Data Compilation, Technical Report No. 174 (pp. 5). Austin, TX, USA: University of Texas, Institute for Geophysics.
- Collectif Migrants (2008), *Contre-Rapport sur la réalité de ce que dissimule le terme d'« immigration clandestine » à Mayotte*, 43 p.
- Combescur, D., Gueguen, P., & Lebrun, B. (2005). Vulnérabilité sismique du bâti existant: approche d'ensemble *Cahiers Techniques* (Vol. 25, pp. 55): AFPS.
- Coursey D.L., Hovis J.J., Schulze W.D. (1987), «The Disparity between Willingness to Accept and Willingness to Pay Measures of value», *Quarterly Journal of Economics*, 102, 679-690.
- Cummings R.G., Brookshire D.S., Schulze W.D., 1986, «Valuing public Goods: The Contingent Valuation Method», Totowa (N.J.), Rowman and Allanheld Publishers.
- Daamen W. (2004), *Modeling Passenger Flows in Public Transport Facilities*, Delft University of Technology, 403 p.

- Dariento, M., Aya, A., Crawford, G. L., Gibbs, D., Whitmore, P. M., Wilde, T., & Yanagi, B. S. (2005). Local Tsunami Warning in the Pacific Coastal United States. *Natural Hazards*, 35, 111-119.
- De Groot R., Wilson M.A., Boumans R.M.J., 2000 « A typology for the classification, description and valuation of ecosystem function, goods and services », *Ecological Economics* 41, pp. 393-408.
- Demoraes F. & D'Ercole R. (2009), Risques et accessibilité des lieux dans le District Métropolitain de Quito (Équateur), *Mappemonde*, N° 95 (3-2009), 20 p.
- Dengler, L. (2005). The Role of Education in the National Tsunami Hazard Mitigation Program. *Natural Hazards*, 35, 141-153.
- D'Ercole R. & Metzger P. (2009), La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain, *Cybergeo : European Journal of Geography*, document 447, <http://www.cybergeo.eu/index22022.html>.
- Desaigues B. et Point P., 1993, « Économie du patrimoine naturel », *Économica*, 307 pages.
- Desaigues B. et Bonnieux F., 1998, « Économie et politique de l'environnement », Dalloz 1998.
- Dewi R.S. (2010), A GIS_Based approach to the Selection of Evacuation Shelter Building and Routes for Tsunami Risk Reduction, a Case Study of Cilacap Coastal Area Indonesia, Double Degree MSc. Programme, University of Twente, Netherland and Gadjadara University Indonesia, 166 p.
- Dijkstra E. W. (1959), A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, 1, pp. 269–271.
- Dominey-Howes, D., Dunbar, P., Varner, J., & Papathoma-Köhle, M. (2009). Estimating probable maximum loss from a Cascadia tsunami. *Natural Hazards*, 53, 43-61.
- Dominey-Howes, D., & Papathoma, M. (2006). Validating a Tsunami Vulnerability Assessment Model (the PTVA Model) Using Field Data from the 2004 Indian Ocean Tsunami. *Natural Hazards*, 40, 113-136.
- Drouet F. (2011), Evaluation de la vulnérabilité humaine et structurelle d'un territoire face au risque tsunami : l'île de Petite Terre (Mayotte), mémoire de Master 1 GCRN, dir. F. Leone, Université Montpellier 3, 115 p.
- Dudley, W. C., & Lee, M. (1998). *Tsunami!* Honolulu: University of Hawai'i Press.
- Dunbar, P. (2011, 01/09/2011). NOAA/WDC Historical Tsunami Database Retrieved 01/09/2011, 2011, from <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml>
- Falques M. et Lamotte H. 2002, « Droits de propriété, économie et environnement : les ressources marines », Actes, thèmes et commentaires, 506 pages.
- Farreras, S. F., Ortiz, M., & Gonzalez, J. I. (2007). Steps Towards the Implementation of a Tsunami Detection, Warning, Mitigation and Preparedness Program for Southwestern Coastal Areas of Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 164, 605-616.

- Fautrero, M. (2010). Mise en place d'une méthodologie de diagnostic de la vulnérabilité humaine et structurelle face au risque tsunami Exemple de Saint Paul de La Réunion. (Mémoire de Master 1 GCRN), Université Montpellier III, Montpellier, France.
- FEMA (2008), Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, FEMA P646 / June 2008, 176 p.
- Fisher A.C. et Hanemann W.M. 1987, « Quasi-Option Value : Some Misconceptions Dispelled», *Journal of environmental Economics and Management*,14, 183-190.
- Frégné H. (2008), Le travail indépendant informel à Mayotte, Rapport d'étude (dir. Barrier M. & Chaze C.), Microcrédit Réunion, 36 p.
- Friedland, C. J., Levitan, M. L., & Adams, B. J. (2008, 11-12/09/2008). Suitability of Remote Sensing Per-Building Damage Assessment of Residential Buildings Subjected to Hurricane Storm Surge. Paper presented at the 6th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Applications, Pavia, Italy.
- Fritz, H. M., & Okal, E. A. (2008). Socotra Island, Yemen: field survey of the 2004 Indian Ocean tsunami. *Natural Hazards*, 46, 107-117.
- Fruin, J. (1971), *Pedestrian Planning and Design*, Metropolitan Association of Urban Design and Environmental Planners, Inc., New York.
- Gaillard, J.-C., & Dibben, C. J. L. (2008). Volcanic risk perception and beyond. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172(3-4), 163-169. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2007.12.015
- Gauraz A.L. (2008), Elaboration d'indicateurs d'évaluation de la vulnérabilité structurelle aux tsunamis, Rapport de stage de Master 2 GCRN, Université Montpellier 3 (dir. F. Leone), 106 p.
- Gauraz, A. L., Valencia, N., Koscielny, M., Guillande, R., Gardi, A., Leone, F., & Salaun, T. (2009). Tsunami damages assessment: vulnerability functions on buildings based on field and earth observation survey. Paper presented at the EGU General Assembly.
- Gleyze J.F. (2005), La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques, thèse de doctorat, université Paris 7, 540 p.
- Goett, H. (2011). Méthodes de décryptages des archives sédimentaires : recherche de signatures sédimentaires de paleo-tsunami à La Réunion et Mayotte. (Mémoire de Master 2 Géographie Environnementale), Université de Strasbourg, Strasbourg, France.
- Gomez, C., & Wassmer, P. (2011, 3-8/04/2011). A New Insight on the 2004 Boxing Day Tsunami in North Sumatra through the Analysis of Videos of the 2011 Tohoku Tsunami: Preliminary Results. Paper presented at the EGU General Assembly, Vienna, Austria.
- Gregg, C. E., Houghton, B. F., Paton, D., Johnston, D. M., Swanson, D. A., & Yanagi, B. S. (2007). Tsunami Warnings: Understanding in Hawaiï. *Natural Hazards*, 40, 71-87.
- Guezennec L., Romaña L.-A, Goujon R., Meyer R., 1999, « Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes », fascicule Programme Seine-Aval, p. 29.

- Hachim, S. (2004). Catastrophes naturelles et mémoire collective à Mayotte Mémoire de DEA (pp. 78). Montpellier, France: Université Paul Valéry Montpellier 3.
- Hartnady, C. (2005a, 16-18/08/2005). Continental slope landslide- and oceanic island volcano-related tsunami potential in the Western Indian Ocean. Paper presented at the East African Rift 2005, Mbeya, Tanzania.
- Hartnady, C. (2005b). De la possibilité d'apparition de tsunamis sur la côte est-africaine et les îles de l'Océan indien. La prévention des catastrophes en Afrique - SIPC Informations, 27-30.
- Hébert, H., Sladen, A., & Schindelé, F. (2007). Numerical Modeling of the Great 2004 Indian Ocean Tsunami: Focus on the Mascarene Islands. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(1A), S208-S222. doi: 10.1785/0120050611
- Heymann (2011), Evacuation en cas de tsunami : modélisation et évaluation de l'accessibilité des zones refuges à El Jadida (Maroc), mémoire de Master 1 GCRN, dir. F. Leone, Université Montpellier 3, 141 p.
- INSEE (2010), Tableau économique de Mayotte, Direction régionale de la Réunion, antenne de Mayotte, 130 p.
- IOC-UNESCO (2008), Intergovernmental Oceanographic Commission. Tsunami Preparedness—Information Guide for Disaster Planners, IOC Manuals and Guides No. 49, 29 p., <http://ioc.unesco.org>.<http://ioc>
- Joku, G. N., Davies, J. M., Jocelyn, M., & Davies, H. L. (2007). Eyewitness Accounts of the Impact of the 1998 Aitape Tsunami, and of Other Tsunamis in Living Memory, in the Region from Jayapura, Indonesia, to Vanimo, Papua New Guinea. *Pure and Applied Geophysics*, 164, 433-452.
- Jonientz-Trisler, C., Simmons, R. S., Yanagi, B. S., Crawford, G. L., Darienzo, M., Eisner, R. K., . . . Priest, G. R. (2005). Planning for tsunami-resilient communities. *Natural Hazards*, 35, 121-139.
- Kanamori, H., Rivera, L., & Lee, W. H. K. (2010). Historical seismograms for unravelling a mysterious earthquake: The 1907 Sumatra Earthquake. *Geophysical Journal International*, 183(1), 358-374. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04731.x
- Kealy M.J., Montgomery M., Dovidio J.F.(1990), «Reliability and predictive validity of contingent values : does the nature of good matter ?», *Journal of Environmental Economics and Management*, 19, pp. 224-263.
- Keating, B. H. (2006). 2006: Status of Tsunami Science Research and Future Directions of Research *Science of Tsunami Hazards*, 24(5), 385-395.
- Kelfoun, K., Giachetti, T., & Labazuy, P. (2010). Landslide-generated tsunamis at Réunion Island. *Journal of Geophysical Research*, 115(F04012), 1-17. doi: 10.1029/2009JF001381
- Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H., & Imamura, F. (2009). Developing Fragility Functions For Tsunami Damage Estimation Using Numerical Model And Post-Tsunami Data From Banda Aceh, Indonesia. *Coastal Engineering*, 51(3), 243-273.

- Laghi M., Cavalletti A., Polo P. (2007), Evacuation routes tools ArcGIS Toolbox, Asian Disaster Preparedness Center, 98 p.
- Le Goffe P., 1995, « The Benefits of Improvements in Coastal Water Quality: A Contingent Approach », *Journal of Environmental Management* 45, pp. 305-317.
- Le Goffe P., 2000, « Hedonic Pricing of Agriculture and Forestry Externalities », *Environmental and Resource Economics* 15, pp. 397-401.
- Lebot J.M. (2002), « Du développement durable au bien public : essai anthropologique sur l'environnement et l'économie », collection Logiques sociales, 298 pages.
- Lee D., Kim H., Park J.H., Park B.J. (2003), The current status and future issues in human evacuation from ships, *Safety Science*, 41, pp. 861- 876.
- Lee D., Park J-H., Kim H. (2004), A study on experiment of human behavior for evacuation simulation, *Ocean Engineering*, 31, pp. 931-941.
- Lemahieu A. (2009), Modélisation du temps d'évacuation des populations de Mandelieu-la- Napoule (Alpes-Maritimes) en cas d'alerte tsunami, mémoire de master 1, UFR de Géographie, Université Paris I Panthéon-Sorbonne, 110p.
- Leone F. (2002), Implications territoriales et socio-économiques des menaces naturelles : une approche spatiale assistée par SIG en Martinique (Antilles françaises), *Annales de Géographie*, N°627-628, pp. 549-573.
- Leone F. (2008), Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes « naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones), Ed. Edilivre Universitaire Collection, Paris, 336 p.
- Leone F., De Richemond N., Vinet F. (2010a), Aléas naturels et gestion des risques, Ed. PUF, Collection Licence Géographie, Paris, 288 p.
- Leone F., Lavigne F., Paris R., Denain J.C., Vinet F. (2010b), A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability, *Applied Geography*, 13 p., doi:10.1016/j.apgeog.2010.07.009.
- Leone F., Mellas S., Omira R., Péroche M., Lagahé E., Baptista M.-A., Gherardi M., Cherel J.-P., Sahal A., Zourarah B., Lavigne F., Grancher D., Heymann A., Meschinet de Richemond N. (2011a), Modélisation spatio-temporelle de la vulnérabilité humaine face aux tsunamis en milieu urbain : le cas d'El Jadida (Maroc), In : Actes du colloque Géorisque 2011, pp. 25-26, Montpellier, France.
- Leone F., Deymier J., Chapelon L., Colas A., Jomelli V. (2011b), Debris flows et accessibilité routière dans les Alpes françaises : caractérisation et modélisation des vulnérabilités physiques, fonctionnelles et territoriales, In : Actes du XXIVème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rovereto, Italie, sept. 2011, pp. 369-374.
- 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*, 31, 363-375.

- Leone, F., Mellas, S., Omira, R., Péroche, M., Lagahé, E., Baptista, M.-A., . . . Meschinet de Richemond, N. (2011, 25-26/01/2011). Modélisation spatio-temporelle de la vulnérabilité humaine face aux tsunamis en milieu urbain : le cas d'El Jadida (Maroc). Paper presented at the Géorisque 2011, Montpellier, France.
- Leone, F., Vinet, F., Denain, J.-C., & Bachri, S. (2011). L'analyse spatiale des dommages sur le bâti : contribution méthodologique et enseignements pour les futurs scénarios de risque tsunami. In F. Lavigne & R. Paris (Eds.), *Tsunarisque* (pp. 77-98). Paris, France: Publications de la Sorbonne.
- Licoine F. (2008), Le réseau routier de Mayotte, *Ponts et Chaussées magazine*, octobre 2008, 4 p.
- Lumbroso D., Stone K. and Vinet F. (2011) An assessment of flood emergency plans in England and Wales, France and the Netherlands. *Natural Hazards*. Vol. 58, N° 1, Pages 341-363
- Mastronuzzi, G., & Sanso, P. (2000). Boulders transport by catastrophic waves along the Ionian coast of Apulia (southern Italy). *Marine Geology*, 170, 93-103.
- Metzger P., D'Ercole R., Robert J, Hardy S., Sierra A., Gluski P. (2011), Les dimensions spatiales et territoriales de la gestion des situations de crise, In : Actes du Colloque international du GIS Collège International des Sciences du Territoire : « Fonder les sciences du territoire », Paris, novembre 2001, pp. 342-348.
- Mhammdi, N., Medina, F., Kelletat, D., Ahmamou, M. F., & Aloussi, L. (2008). Large boulders along the rabat coast (Morocco); possible emplacement by the november, 1st, 1755 A.D. tsunami. *Science of Tsunami Hazards*, 27(1), 17-32.
- Mitsch W. J., Gosselink J. G., 2000, « The value of wetlands: importance of scale and lanscape setting », *Ecological Economics* 35, pp. 25-33.
- Miura, H., Wijeyewickrema, A. C., & Inoue, S. (2006). Evaluation of Tsunami Damage in the Eastern Part of Sri Lanka Due to the 2004 Sumatra Earthquake Using Remote Sensing Technique. Paper presented at the 100th Anniversary Earthquake Conference, San Francisco, CA, USA.
- Morin, J., De Coster, B., Flohic, F., Lavigne, F., Le Floch, D., & Paris, R. (2011). L'éducation des populations : mesure essentielle pour la réduction du risque de tsunami en Indonésie. In F. Lavigne & R. Paris (Eds.), *Tsunarisque* (pp. 271-288). Paris, France: Publications de la Sorbonne.
- Morin, J., Lavigne, F., Bachelery, P., Zinizola, A., & Villeneuve, N. (2009). Institutional and Social Responses to Hazards related to Karthala Volcano, Comoros, Part I: Analysis of the May 2006 eruptive crisis. *Shima: The International Journal of Research into Island Cultures*, 3(1), 33-53.
- Morin, J., De Coster, B., Paris, R., Lavigne, F., Flohic, F., & Le Floch, D. (2008). Tsunami-resilient communities' development in Indonesia through educative actions. *Disaster Prevention and Management*, 17(3), 460-446.
- Moussaïd M. (2010), Étude expérimentale et modélisation des déplacements collectifs de piétons, Thèse de doctorat, Université de Toulouse III , Paul Sabatier, 225 p.
- Nabaa M. (2011), Morphodynamique de réseaux viaires. Application au risque, Thèse de doctorat, Université du Havre, 256 p.

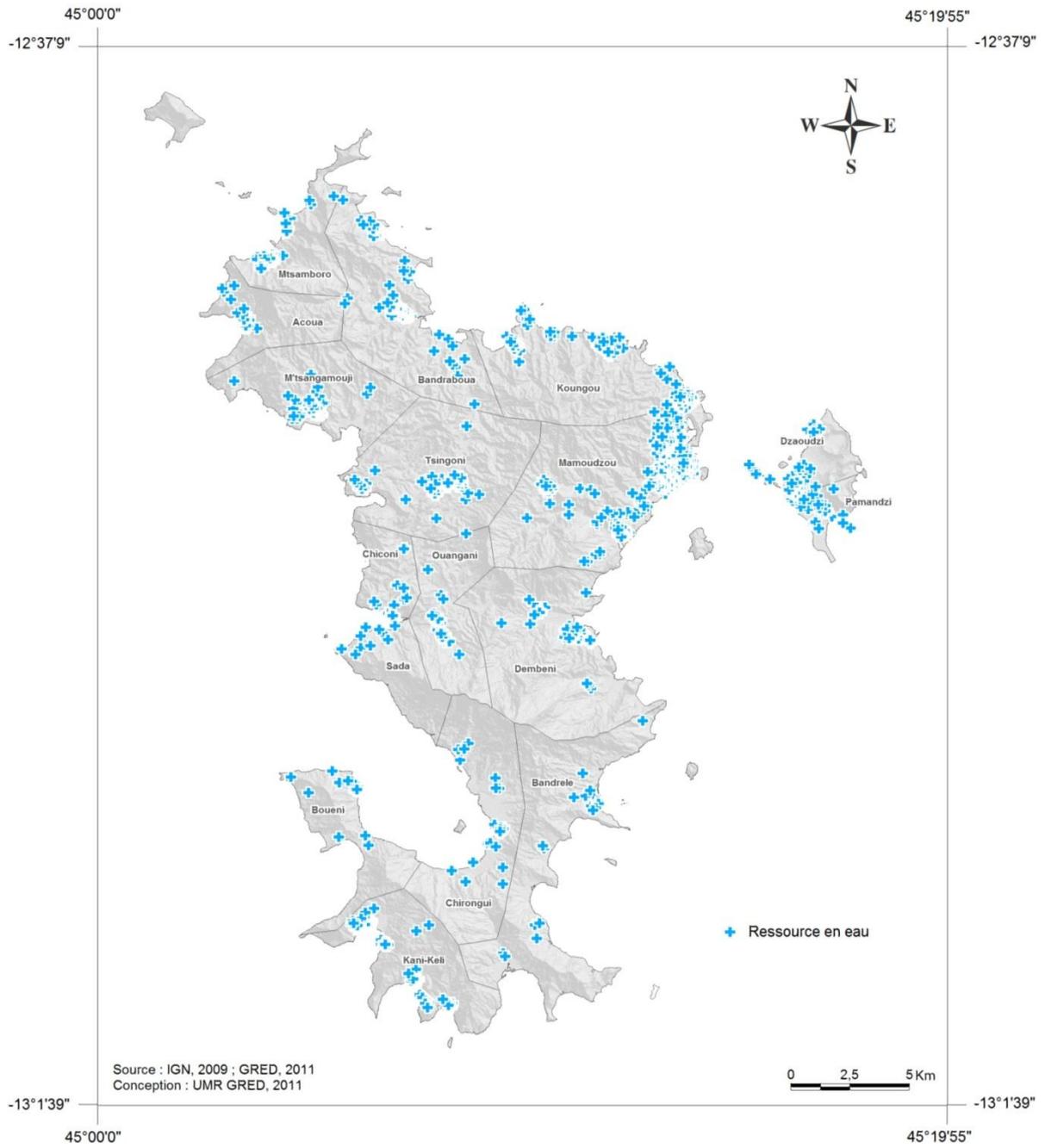
- Okal, E. A., Sladen, A., & Okal, E. ()
the December 2004 Indian Ocean Tsunami. *Earthquake Spectra*, 22(NS3), S241-S261.
- Okal, E. A., Synolakis, C. E., Fryer, G. J., Heinrich, P., Borrero, J. C., Ruscher, C., . . . Rousseau, D. (2002). A Field Survey of the 1946 Aleutian Tsunami in the Far Field. *Seismological Research Letters*, 73, 490-503.
- Papathoma, M., & Dominey-Howes, D. (2003). Tsunami vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Corinth, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3(6), 733-744.
- Papathoma, M., Dominey-Howes, D., Zong, Y., & Smith, D. (2003). Assessing tsunami vulnerability, an example from Heraklion, Crete. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3(5), 377-389.
- Paris, R., Wassmer, P., Sartohadi, J., & Lavigne, F. (2011). Étude sédimentologique des dépôts de tsunami du 26 décembre 2004 à Lhok Nga, ouest de Banda Aceh. In F. Lavigne & R. Paris (Eds.), *Tsunarisque* (pp. 111-126). Paris, France: Publications de la Sorbonne.
- Pelinovsky, E., Choi, B. H., Stromkov, A., Didenkulova, I., & Kim, H.-S. (2005). Analysis of tide-gauge records of the 1883 Krakatau tsunami. In K. Satake (Ed.), *Tsunamis: Case Studies and Recent Developments* (pp. 57-78).
- Péton-Klein, D., & Chaize, C. (2007). Chikungunya : Gestion d'une crise longue. *Gestions Hospitalières*, 462, 46-52.
- Post J., Wegscheider S., Mück M., Zosseder K., Kiefl R., Steinmetz T., Strunz G. (2009), Assessment of human immediate response capability related to tsunami threats in Indonesia at a sub-national scale, *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 9, Issue 4, pp.1075-1086.
- Prasad, G., Rynn, J., & Kaloumaira, A. (2000). Tsunami Mitigation for the City of Suva, Fiji *Science of Tsunami Hazards*, 18(1), 35-54.
- Prasetya, G. S., & Borrero, J. C. (2010, 12-15 October 2010). Modeling a General Distribution of Suspended Materials and Flotsam Throughout the Affected Regions in Banda Aceh During the 26 December 2004 Tsunami Event. Paper presented at the Indian Ocean Tsunami Modeling Symposium, Fremantle, Australia.
- Préfecture de Mayotte & BRGM (2010), Dossier Départemental des Risques Majeurs à Mayotte, 145 p., <http://ddrm.mayotte.pref.gouv.fr/>.
- Priest, G. R., Hull, D. A., Vogt, B. F., Karel, A., & Olmstead, D. L. (1996). Tsunami Risk Reduction: the Oregon Strategy *Science of Tsunami Hazards*, 14(2), 101-106.
- Raboteur J., 2007, « La méthode d'évaluation contingente (M.E.C), un outil à appliquer à l'expertise judiciaire en matière environnementale », *Revue expert*, n°74, 6 pages.
- Raboteur J. 2006, « Application de la méthode d'évaluation contingente aux récifs coralliens dans la Caraïbe : étude appliquée à la zone de Pigeon de la Guadeloupe ». *Revue VertigO*, *Revue électronique en sciences de l'environnement*, n°7, vol.1.

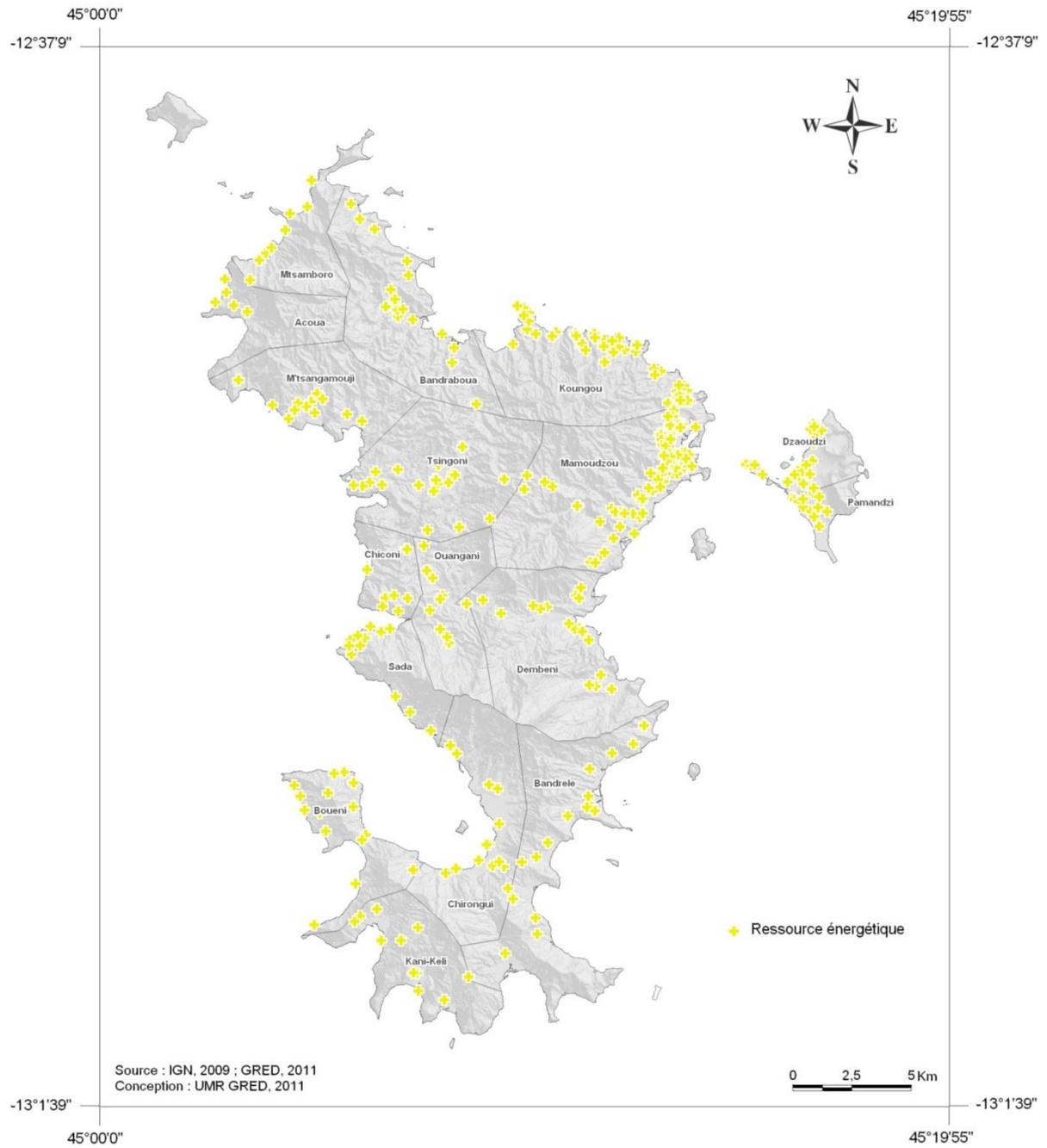
- Rekola M., 2004, « Incommensurability and uncertainty in contingent valuation: willingness to pay for forest and nature conservation policies in Finland », doctoral dissertation, University of Helsinki, p. 108.
- Sahal A. (2011), Le risque tsunami en France : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque, Thèse de doctorat de géographie, dir. Pr. F. Lavigne et F. Leone, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 268p. + annexes.
- Sahal, A., & Morin, J. (2012). Effects of the October 25th, 2010 Mentawai Tsunami in La Réunion Island (France): Observations and Crisis Management. *Natural Hazards*. DOI: 10.1007/s11069-012-0136-2.
- Sahal, A., Morin, J., Lavigne, F., & Schindelé, F. (2011). Indian Ocean transoceanic tsunamis affecting La Réunion Island, France. Paper presented at the Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2011, vol.13.
- Sahal, A., Morin, J., Schindelé, F., & Lavigne, F. (2011). A catalog of tsunamis in La Réunion Island from 27 August 1883 to 26 October 2010. *Science of Tsunami Hazards*, 30(3), 178-189.
- Samuelson P.A. 1954, «The Pure Theory of Public Expenditure», *Review of Economics and Statistics*, 36, pp. 387-389.
- Satake, K., Nishimura, Y., Putra, P., Yulianto, A., Sunendar, H., Sugimoto, M., . . . Pariatmono. (2011). Tsunami field survey for the Mentawai, Indonesia, earthquake of October 25, 2010 (pp. 1-23). Jakarta, Indonesia.
- Satake, K., Okal, E. A., & Borrero, J. C. (2007). Tsunami and Its Hazard in the Indian and Pacific Oceans: Introduction. *Pure and Applied Geophysics*, 164(2-3), 249-259.
- Soloviev, S. L., Go, C. N., & Kim, K. S. (1992). Catalog of tsunamis in the Pacific 1969-1982. Moscow, Russia.
- Soloviev, S. L., Solovieva, O. N., Go, C. N., Kim, K. S., & Shchetnikov, N. A. (2000). Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C.-2000 A.D. (Vol. 13).
- Sorensen J. H (2000), Hazard Warning Systems: Review of 20 Years of Progress, *Natural Hazards Review*, 1, pp. 119–125.
- Spence, R. J. S., Kelman, I., Calogero, E., Toyos, G., Baxter, P. J., & Komorowski, J. C. (2005). Modelling expected physical impacts and human casualties from explosive volcanic eruptions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(6), 1003-1015. doi: 10.5194/nhess-5-1003-2005
- Spiske, M., Böröcz, Z., & Bahlburg, H. (2008). The role of porosity in discriminating between tsunami and hurricane emplacement of boulders — A case study from the Lesser Antilles, southern Caribbean. *Earth and Planetary Science Letters*, 268, 384-396.
- Stein, S., & Okal, E. A. (2005). The 2004 Sumatra earthquake and Indian Ocean tsunami: What happened and why? *Visual Geosciences*, 10, 21-26.

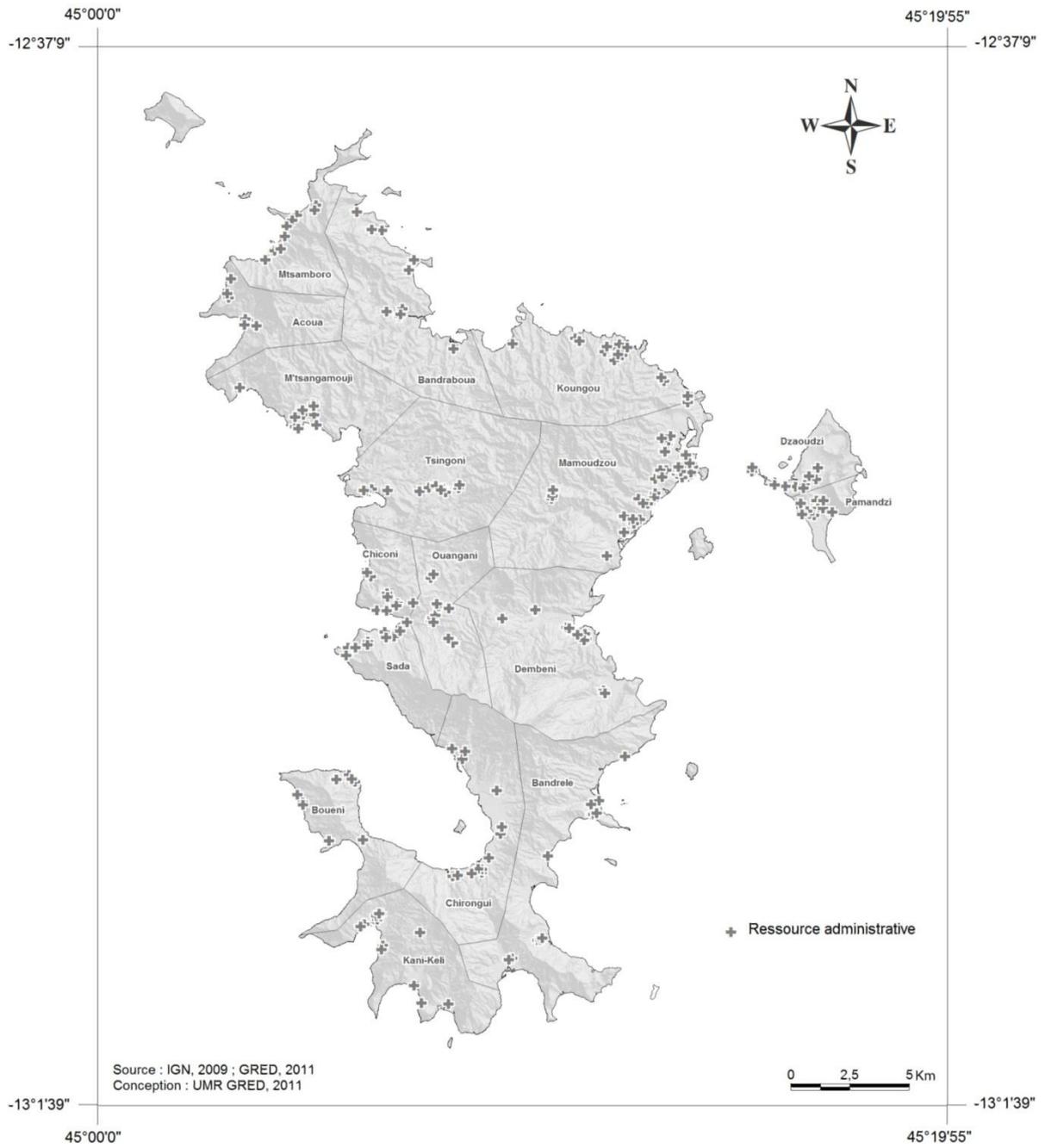
- Stewart, M. G. (2003). Cyclone damage and temporal changes to building vulnerability and economic risks for residential construction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(5), 671-691. doi: 10.1016/s0167-6105(02)00462-2
- Strunz G., Post, J., Zosseder K., Wegscheider S., Mück M., Riedlinger T., Mehl H., Dech, S., Birkmann J., Gebert N., Harjono H., Anwar H.Z., Khomarudin R.M., Muhari A. (2011), Tsunami risk assessment in Indonesia, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, vol. 11, pp. 67-82.
- Sugimoto, T., Murakami, H., Kozuki, Y., Nishikawa, K., & Shimada, T. (2003). A human damage prediction method for tsunami disasters incorporating evacuation activities. *Natural Hazards*, 29, 587-600.
- Synolakis, C. E., Imamura, F., Tsuji, Y., Matsutomi, S., Tinti, B., Cook, B., & Ushman, M. (1995). Damage Conditions of East Java tsunami of 1994 analyzed. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 76(26), 257 and 261-262.
- Tsuji, Y., Imamura, F., Matsutomi, H., Synolakis, C. E., Nanang, P. T., Harada, S., . . . Cook, B. (1995). Field survey of the East Java earthquake and tsunami of June 3, 1994. *Pure and Applied Geophysics*, 144, 839-854.
- Tyrväinen L., Väänänen H., 1998, « The economic value of urban forest amenities: an application of the contingent valuation method », *Landscape and Urban Planning* 43, pp. 105-118.
- UNESCO. (2007). *La réduction des risques de catastrophe commence à l'école* (pp. 25). Genève, Suisse: UNISDR/SIPC.
- UNESCO-IOC. (1998). *Post-Tsunami Survey Field Guide (First Edition)* (UNESCO-IOC ed.). Paris, France.
- Valencia N., Gardi A., Gauraz A, Leone F., Guillande R. (2011), New tsunami damage functions developed in the framework of SCHEMA project: application to European-Mediterranean coasts, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2835–2846, doi:10.5194/nhess-11-2835-2011.
- Wassmer, P., Schneider, J.-L., Fonfrègne, A.-V., Lavigne, F., Paris, R., & Gomez, C. (2010). Use of Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) in the study of tsunami deposits: application to the 2004 deposits on the eastern coast of Banda Aceh, North Sumatra, Indonesia. *Marine Geology*, 275, 255-272.
- Watin, M. (2009). Polémique, rumeur et Tension : de la « crise » du chikungunya dans l'espace public médiatique réunionnais. In S. Fuma & J. Low Chong (Eds.), *Epidémies et pharmacopée traditionnelle dans l'histoire des îles et pays de l'Océan indien occidental* (pp. 241-251): L'Harmattan.
- Weber J., 2003, « L'évaluation contingente : les valeurs ont-elles un prix ? – Juillet/Août 2003-<http://www.ceri-sciences-po.org>, page consultée le 26 décembre 2006.
- Wisner B., Gaillard J.C. Kelman I. (ed.) (2011), *The Routledge handbook of hazards and disaster risk reduction*, Routledge, London, 880 p.

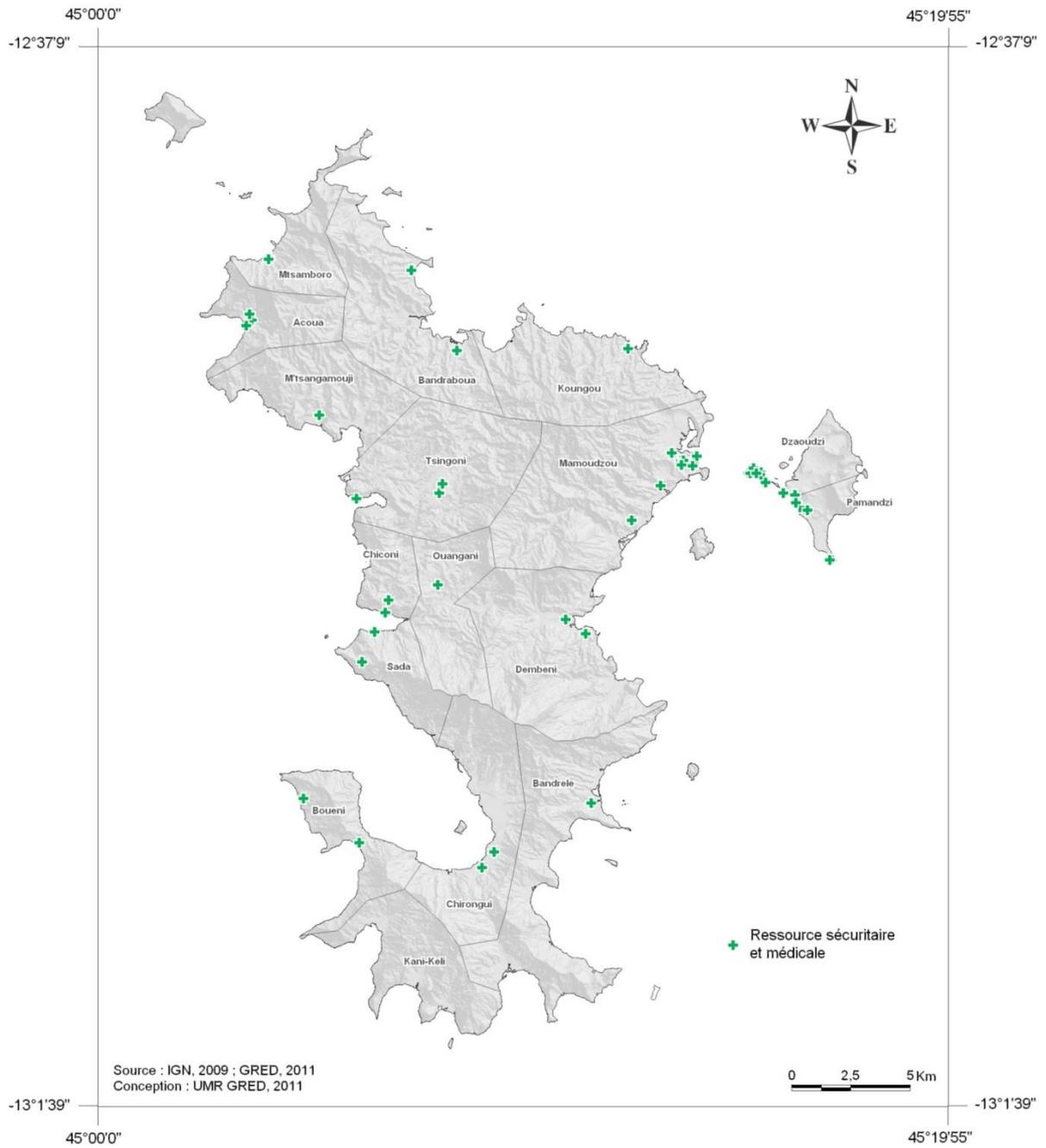
ANNEXES

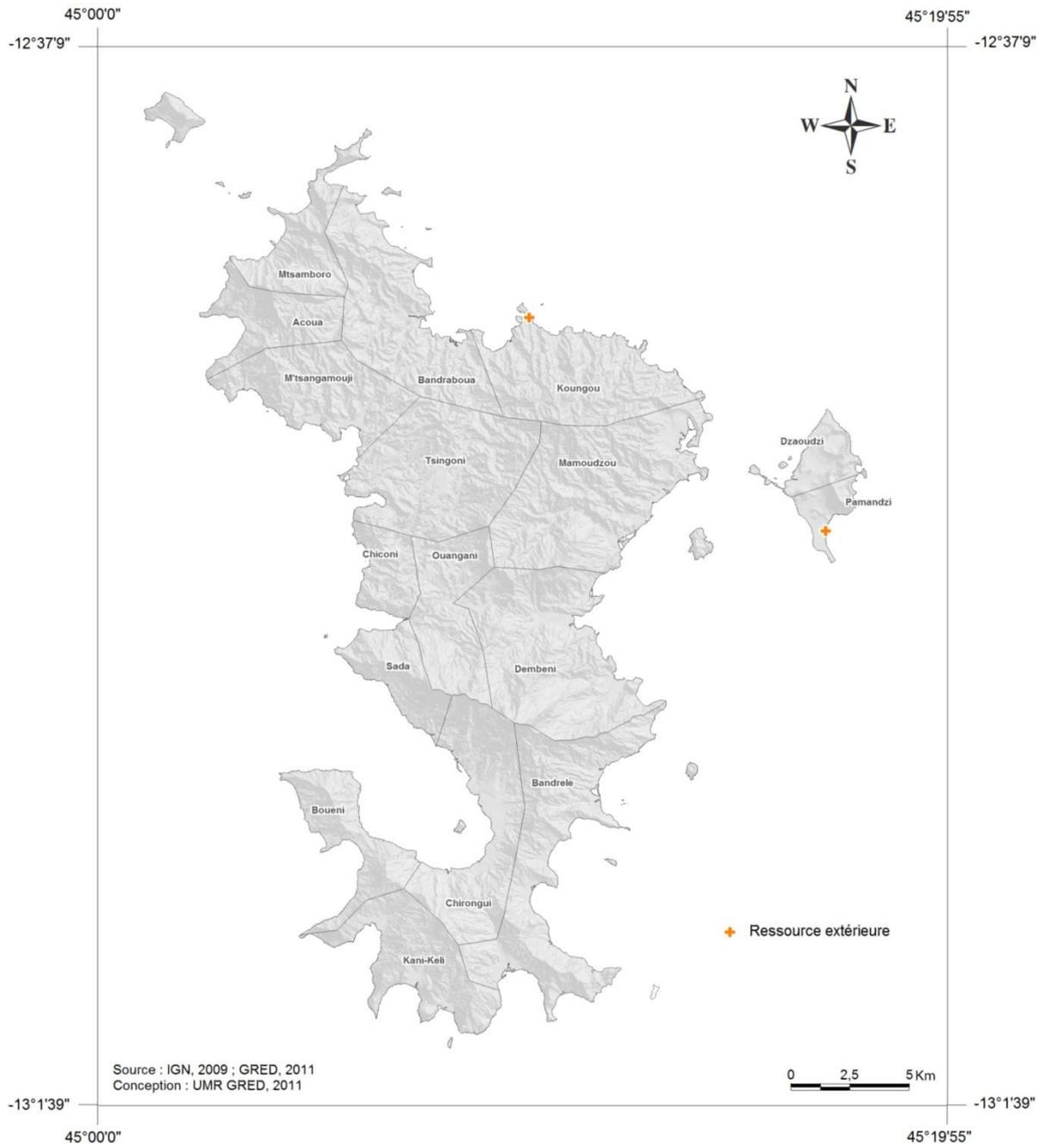
Principales ressources territoriales de la phase de récupération











Temps de parcours moyens mesurés en voiture

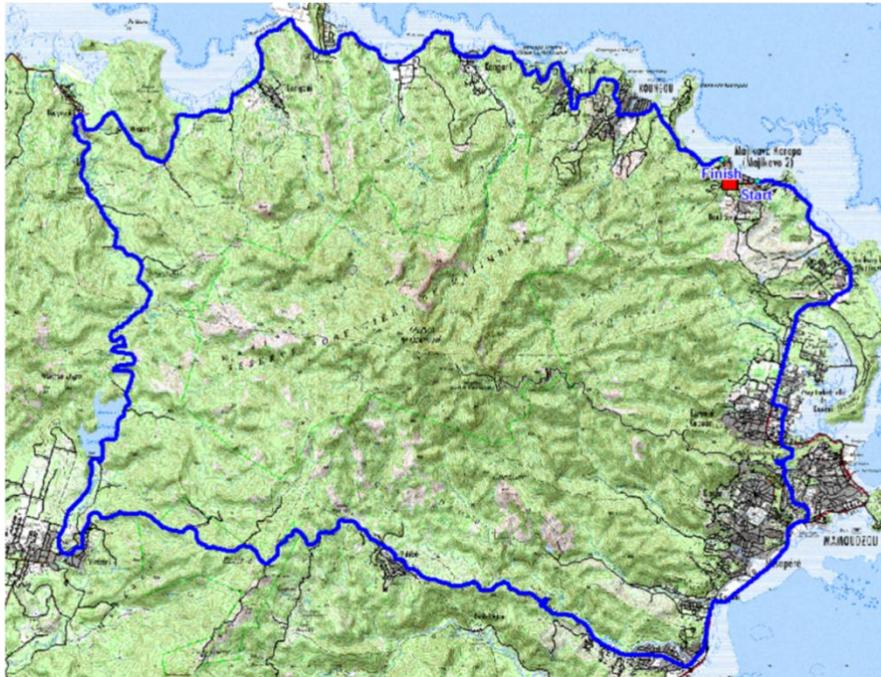
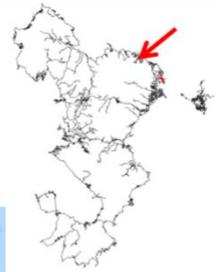
Capture d'écran	N° parcours	Heure et date de prise de vue	Temps mesuré en mn	Distance calculée en km (à partir de Route Finder)	Vitesse moyenne en km/h	Type de route
	7	8h46 le 15/3/11	19mn01	13,212	41,7	Départementale
	5	14h13 le 12/3/11	11mn11	5,481	29,6	Nationale
	2	13h21 le 12/3/11	2mn54	1,823	43	Nationale
	3	11h44 le 12/3/11	6mn27	4,223	40,4	Nationale
	1	11h26 le 12/3/11	2mn12	1,347	38	Nationale

	4	11H15 le 12/3/11	8mn43	2,464	17,5	Nationale
	6	13h31 le 12/3/11	16mn54	11,606	42	Nationale

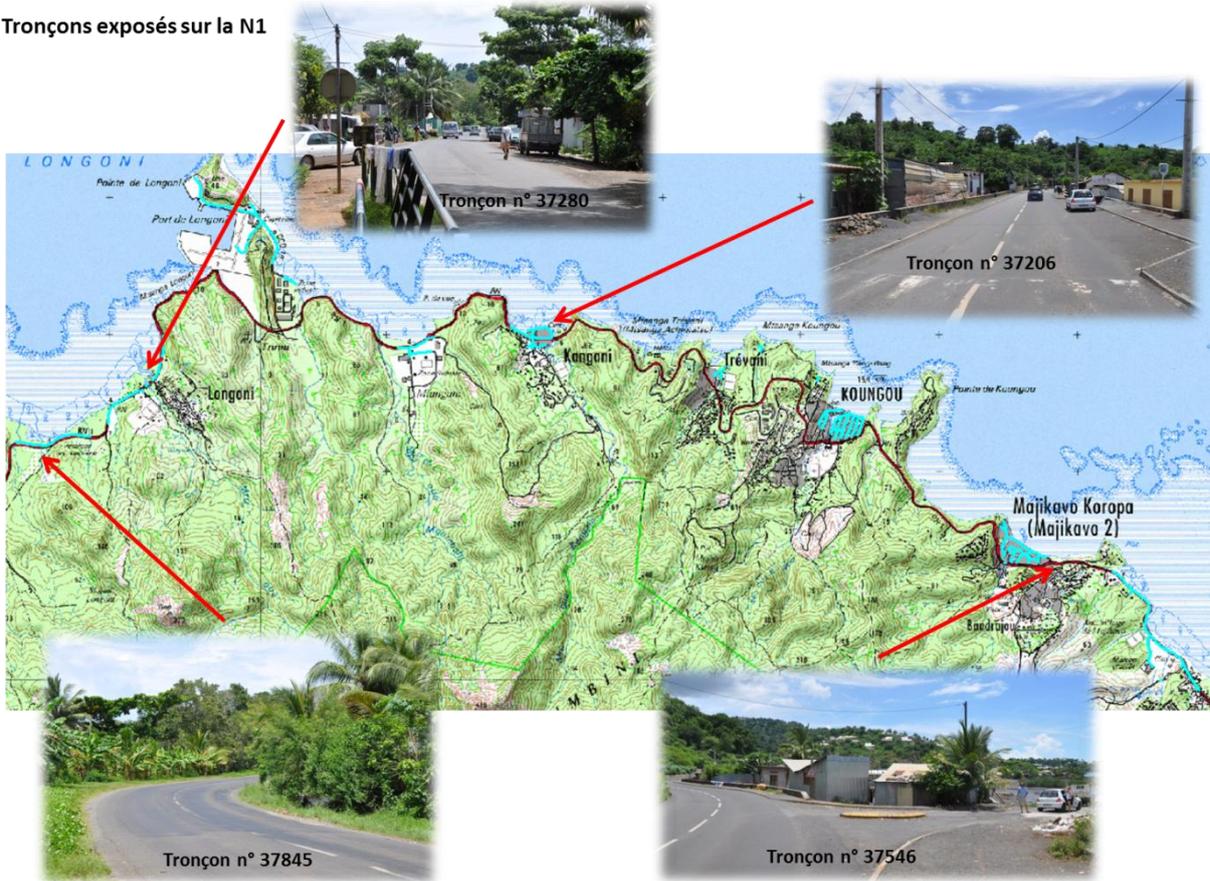
Quelques tronçons routiers exposés (moins de 5 m d'altitude) et déviations possibles

Id tronçon BD Topo IGN : 37546
N° ou nom Route : N1
Commune : Majikavo (Koungou)
Longueur exposée : 14 m
Distance de déviation : 41 km

Déviations



Tronçons exposés sur la N1



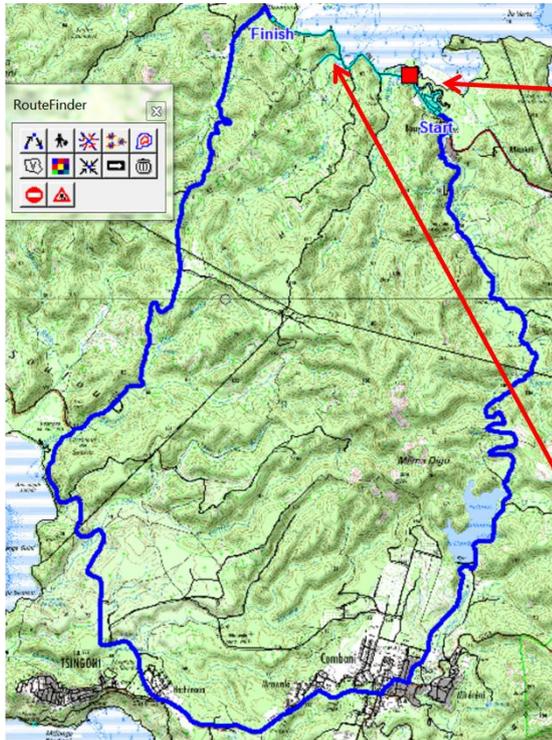
N° tronçon : Id tronçon BD Topo IGN : 37297

N° ou nom Route : N1

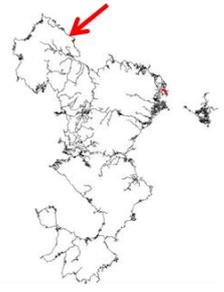
Commune : Bouyouni

Longueur exposée : 458 m

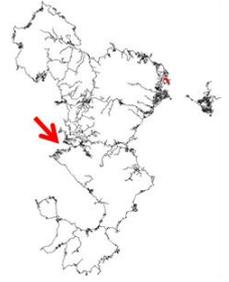
Distance de déviation : 21,548 km



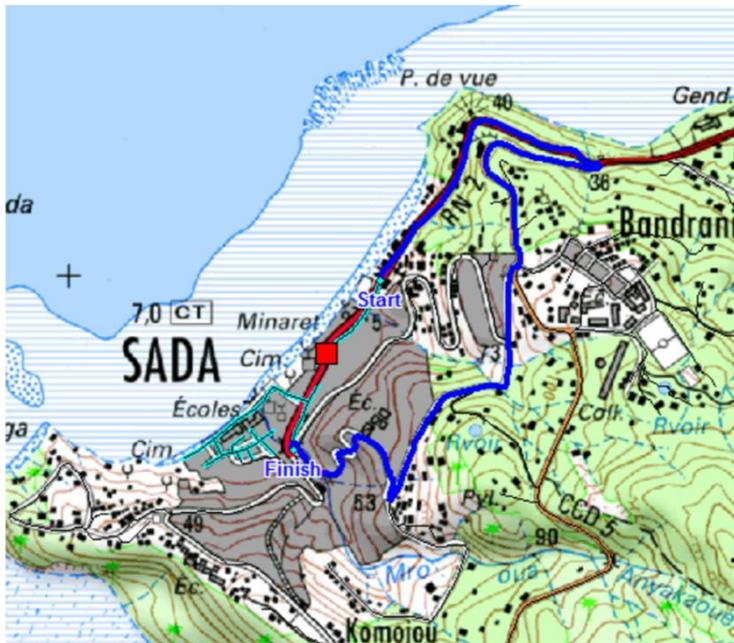
Id tronçon BD Topo IGN : 37083
N° ou nom Route : N1
Commune : Bandraboua
Longueur exposée : 354,69 m
Distance de déviation : 40,507 km



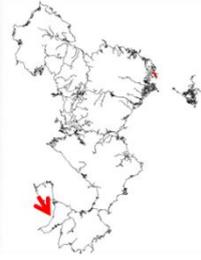
Id tronçon BD Topo IGN : 41707 et 42372
N° ou nom Route : N2 et N3
Commune : Manjapou et Mtsatoundou
Longueur exposée : 80,25 m et 69,40 m
Distance de déviation : 44,616 km



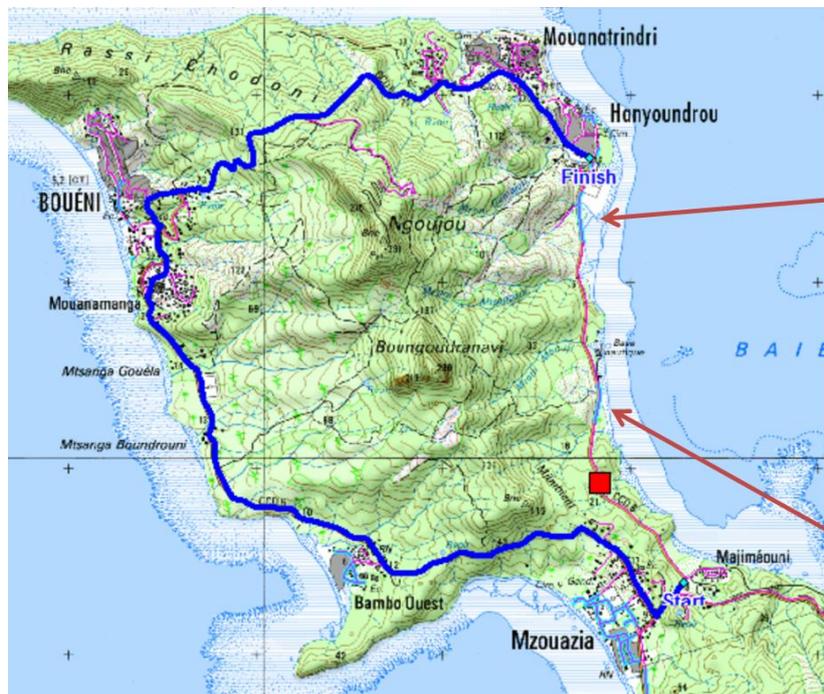
Id tronçon BD Topo IGN : 41788
N° ou nom Route : N2
Commune : Sada
Longueur exposée : 174,80 m
Distance de déviation : 2,469 km



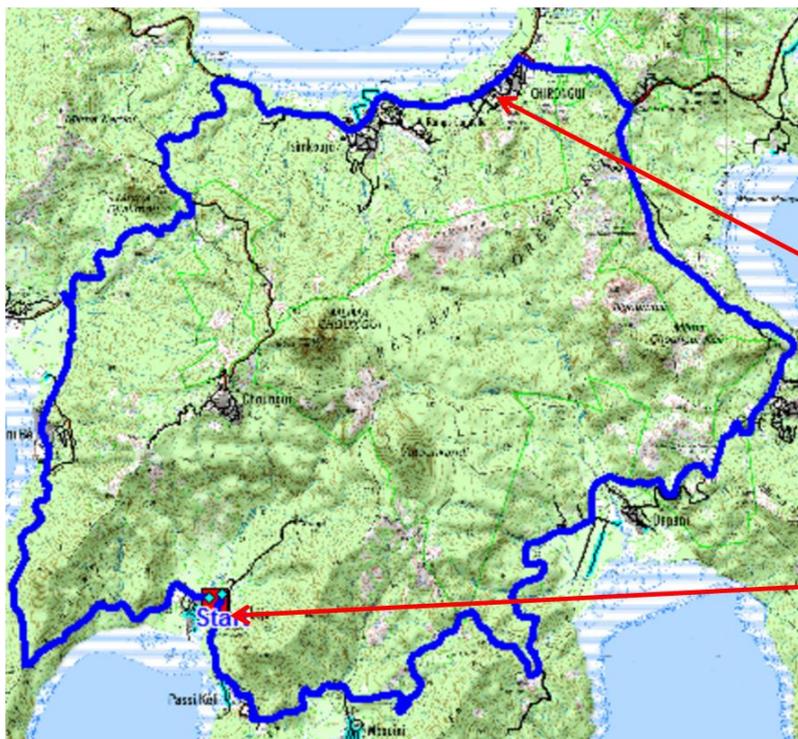
Id tronçon BD Topo IGN : 42694, 42700 et 42958
N° ou nom Route : D4
Commune : Mzouazia
Longueur exposée : 387,42 m, 17,02 m et 37,83
Distance de déviation : 14,816 km



Id tronçon BD Topo IGN : 42454 et 42438
N° ou nom Route : D6
Commune : Hanyoundrou
Longueur exposée : 168,23 m et 245,05 m
Distance de déviation : 14,816 km



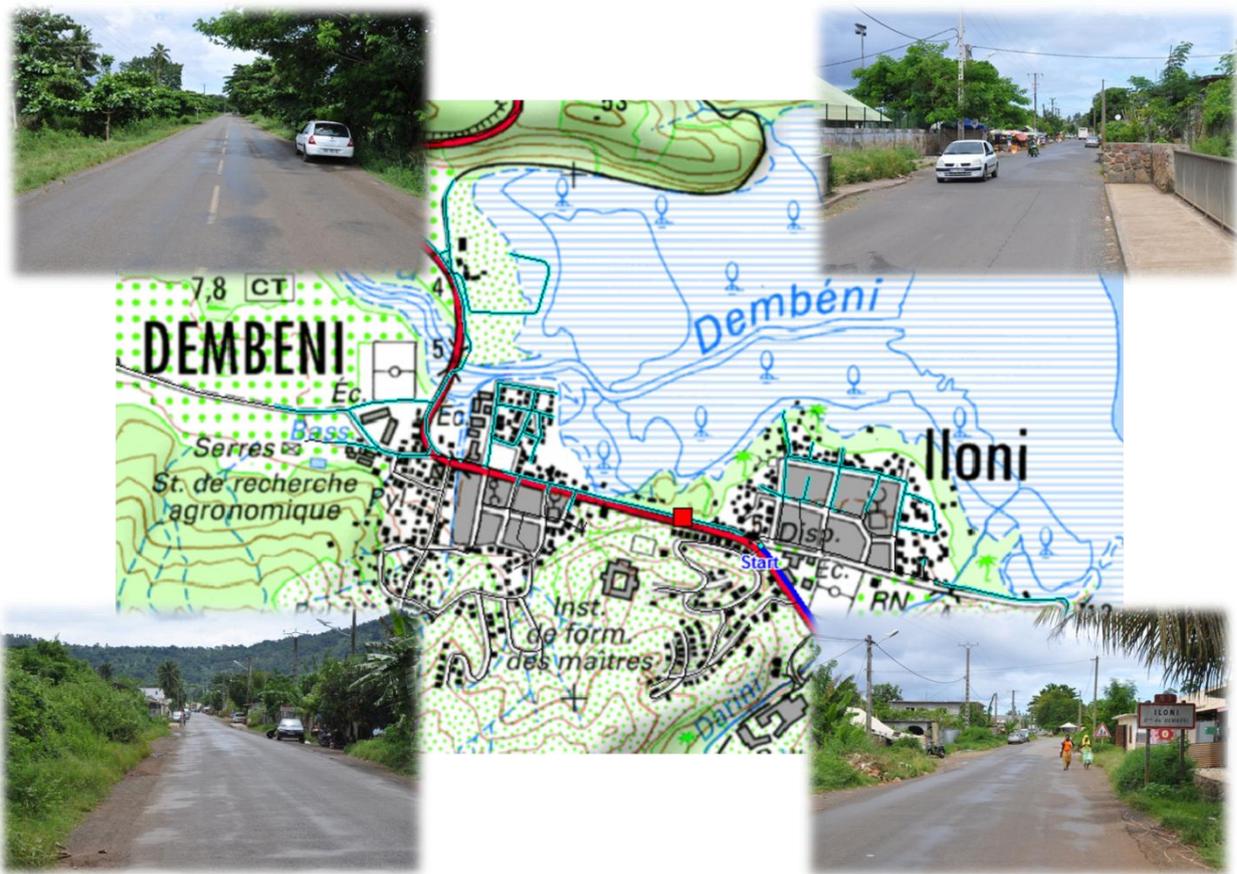
Id tronçon BD Topo IGN : 43035 et 42568
N° ou nom Route : D4 et N3
Commune : Mronabéja et Chirongui
Longueur exposée : 15,25 m et 328,22 m
Distance de déviation : 28,49 km et 27,868



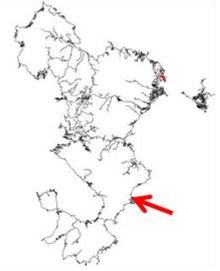
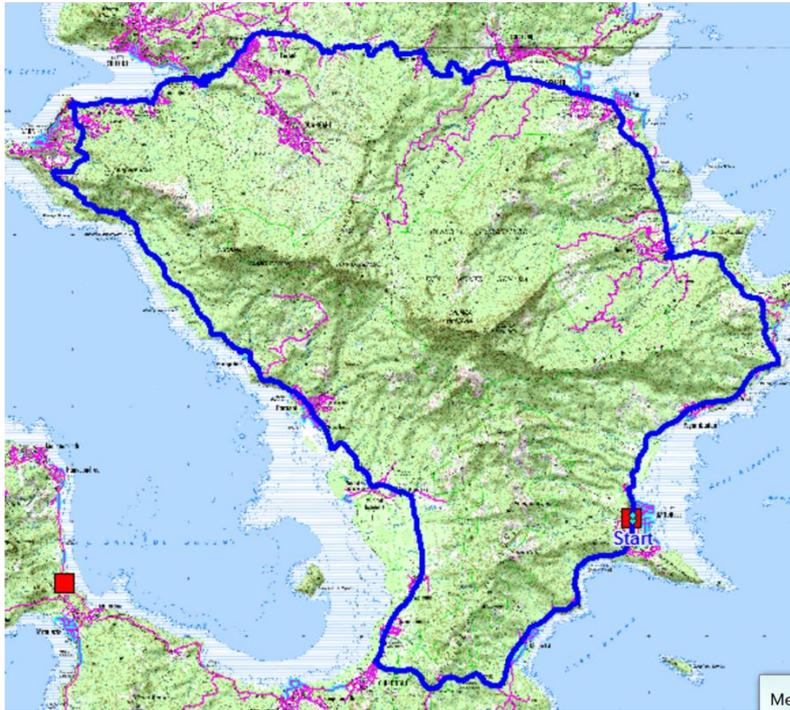
Tronçon 42568



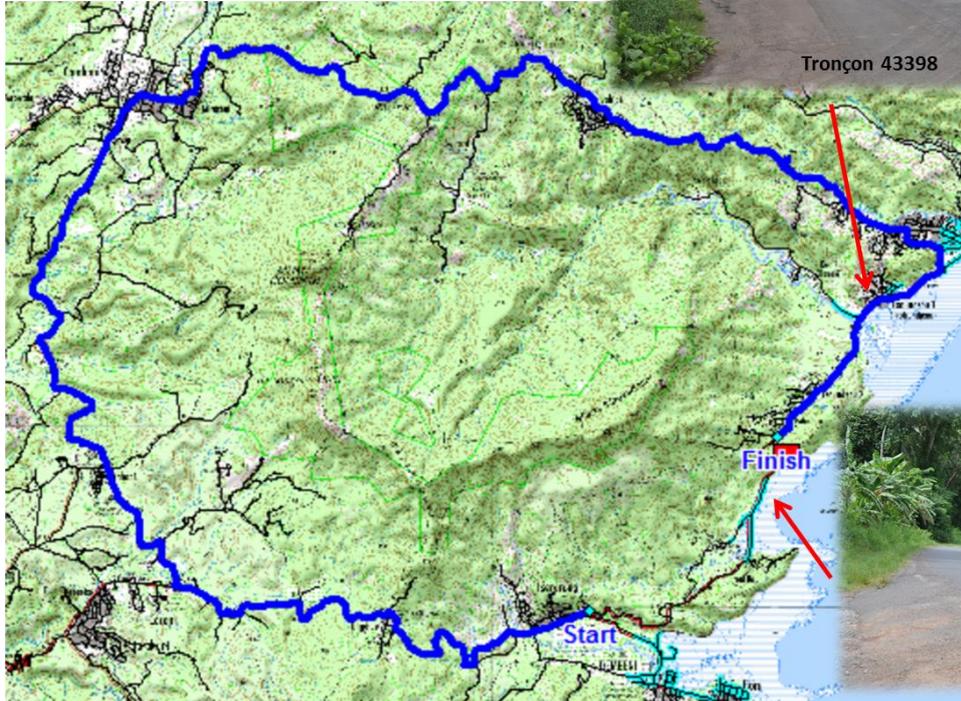
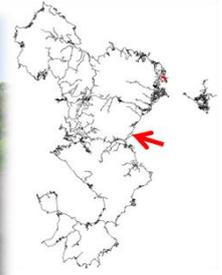
Tronçon 43035



Id tronçon BD Topo IGN : 42196
N° ou nom Route : N3
Commune : **Bandrélé**
Longueur exposée : 11,10 m
Distance de déviation : 44,698 km



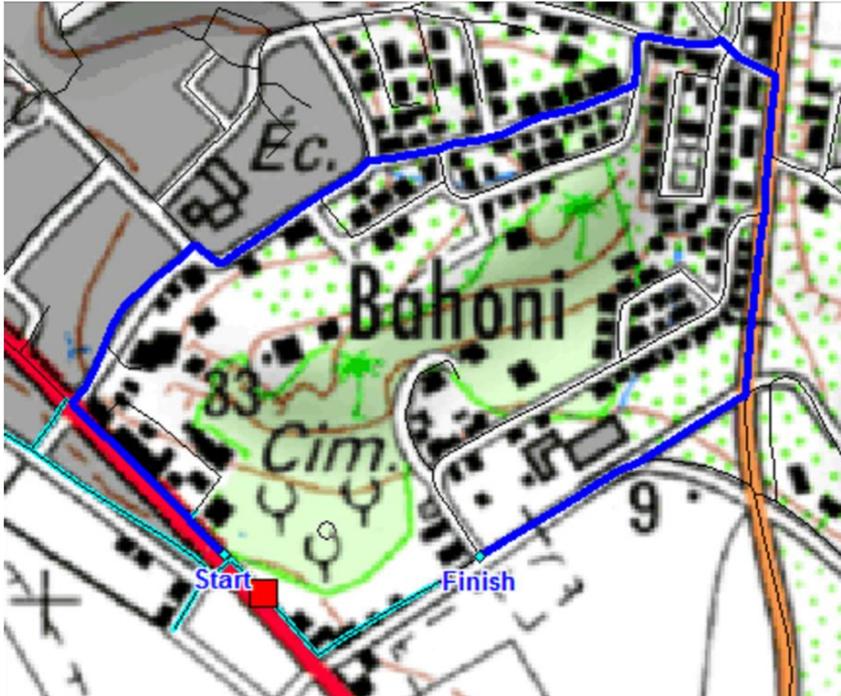
Id tronçon BD Topo IGN : 40862 et 43398
N° ou nom Route : N2
Commune : Tsoundzou et Passamaïnti
Longueur exposée : 386,50 m et 362 m
Distance de déviation : 26,34 km



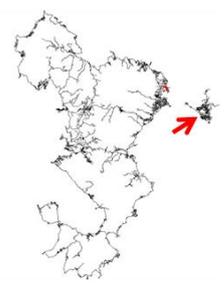
Tronçon 43398

Tronçon 40862

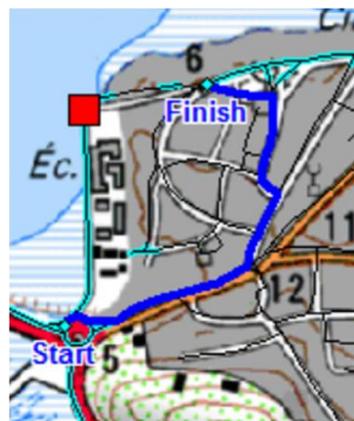
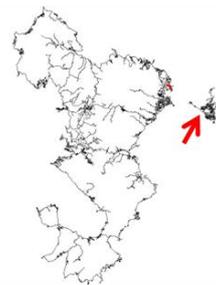
Id tronçon BD Topo IGN : 40087
N° ou nom Route : N4
Commune : Pamandzi
Longueur exposée : 97,22 m
Distance de déviation : 1,313 km



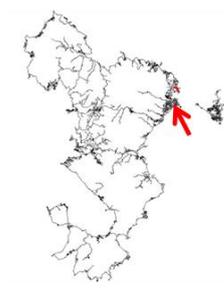
Id tronçon BD Topo IGN : 39163
N° ou nom Route : N
Commune : Pamandzi
Longueur exposée : 320,26 m
Distance de déviation : 1,744 km



Id tronçon BD Topo IGN : 39155
N° ou nom Route : NC
Commune : Labattoir
Longueur exposée : 358,27 m
Distance de déviation : 0,624 km



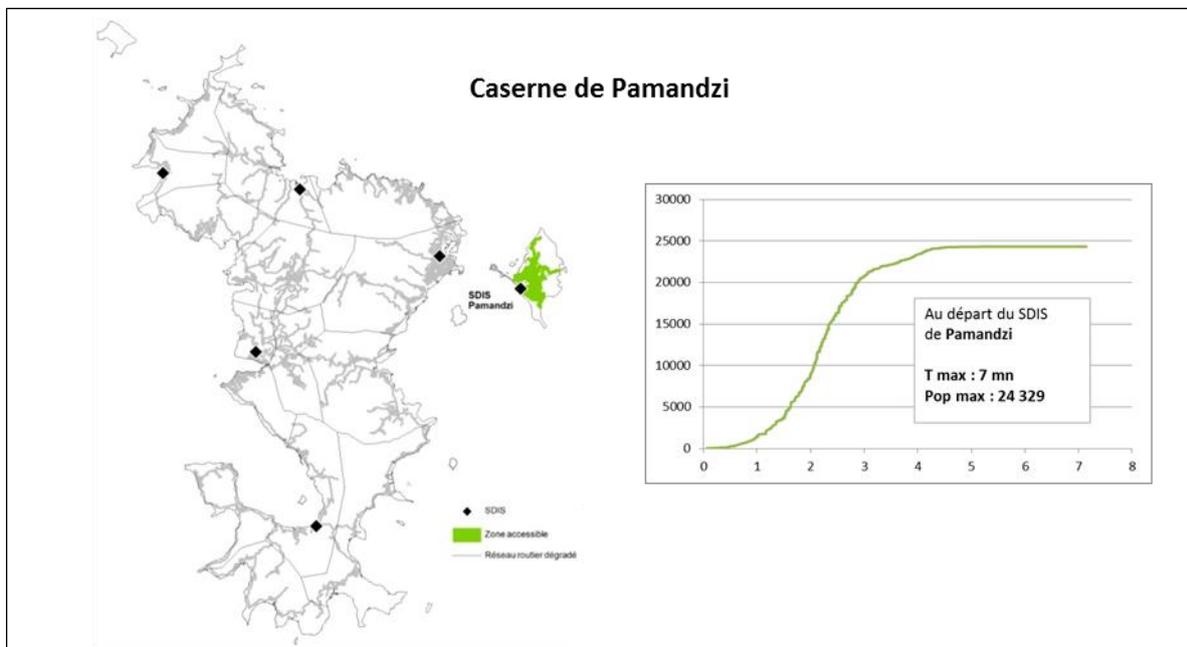
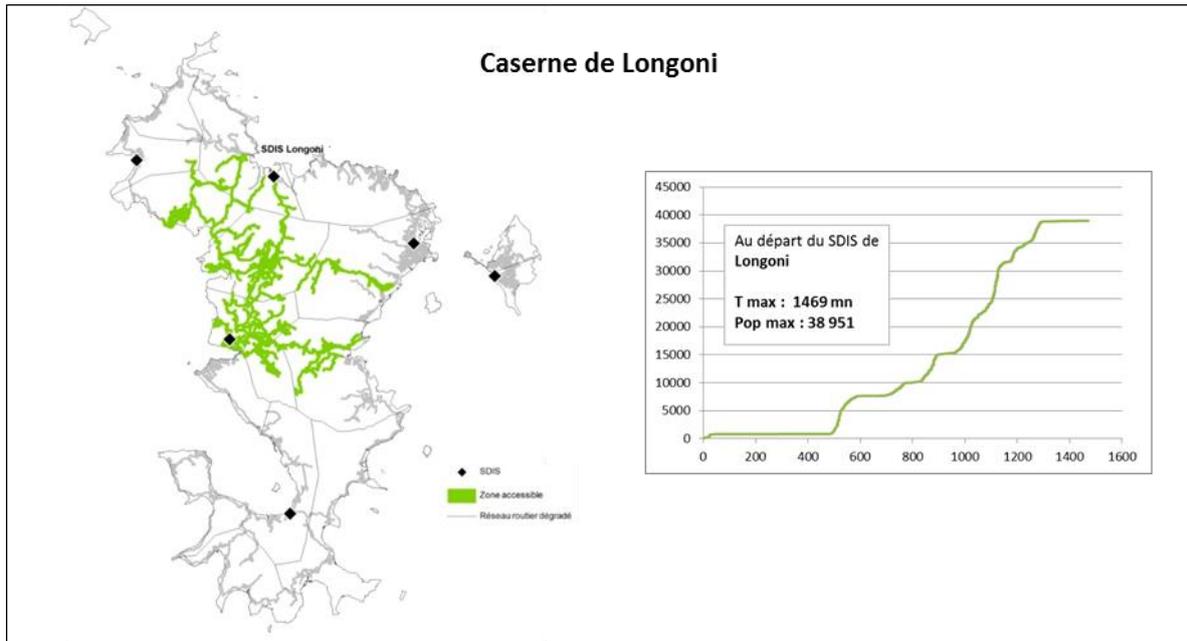
Id tronçon BD Topo IGN : 39322
N° ou nom Route : N2
Commune : Mamoudzou
Longueur exposée : 598,90 m
Distance de déviation : 1,321 km



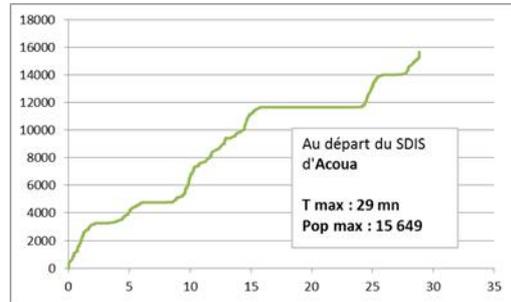
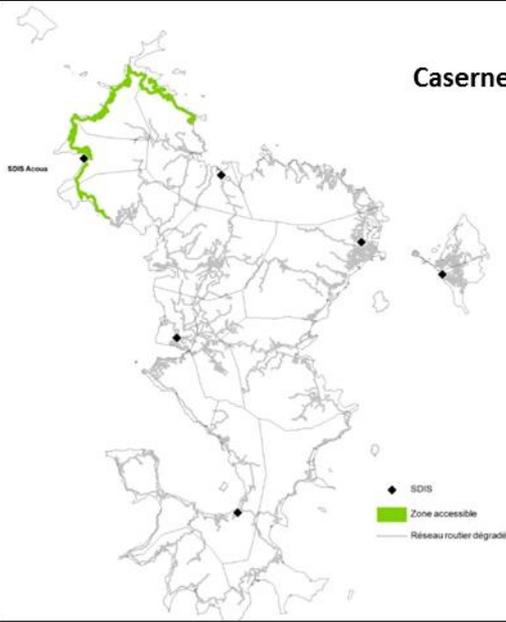
Id tronçon BD Topo IGN :
N° ou nom Route :
Commune :
Longueur exposée :
Distance de déviation :



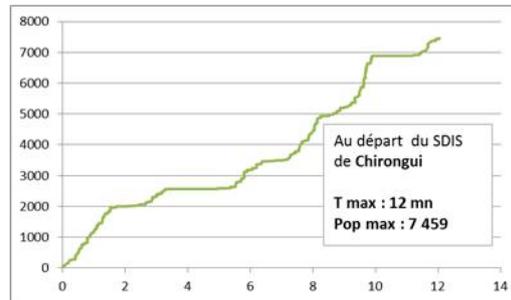
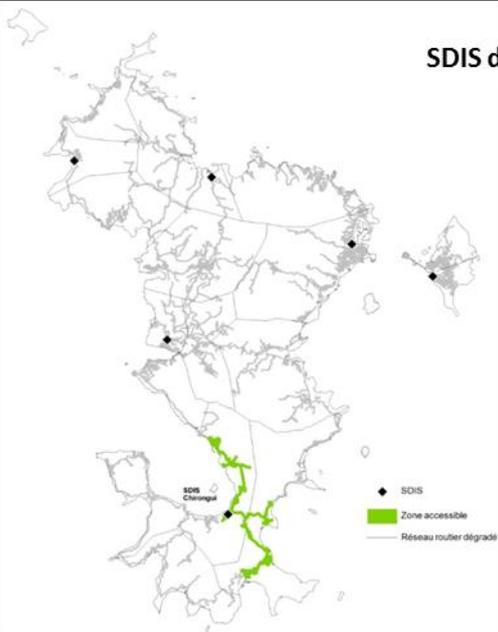
Territoire et population accessibles au départ de chaque centre de secours (situation dégradée)



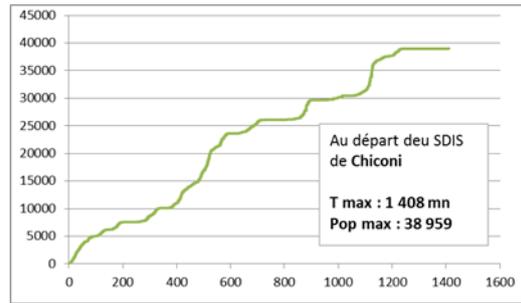
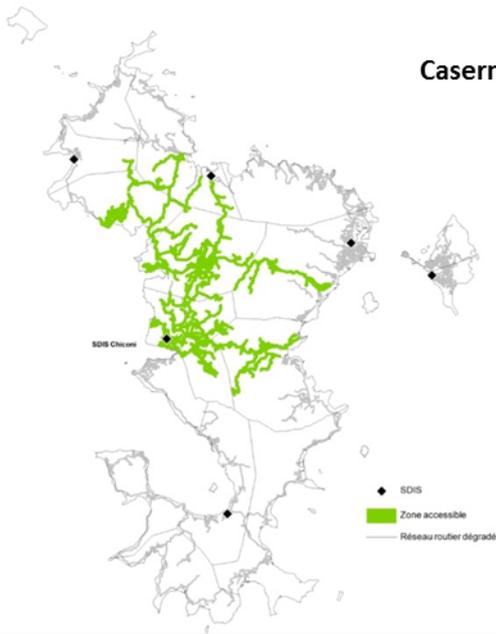
Caserne d'Acoua



SDIS de Chirongui



Caserne de Chiconi



Ressources territoriales post-crise encore accessibles pour chaque village

