Le risque tsunami en France : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque.

Alexandre Sahal

▶ **To cite this version:**

Alexandre Sahal. Le risque tsunami en France : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque.. Géographie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2011. Français. NNT : . tel-00651617v2

HAL Id: tel-00651617

https://theses.hal.science/tel-00651617v2

Submitted on 21 Dec 2011

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

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

Thèse de doctorat
de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
spécialité Géographie

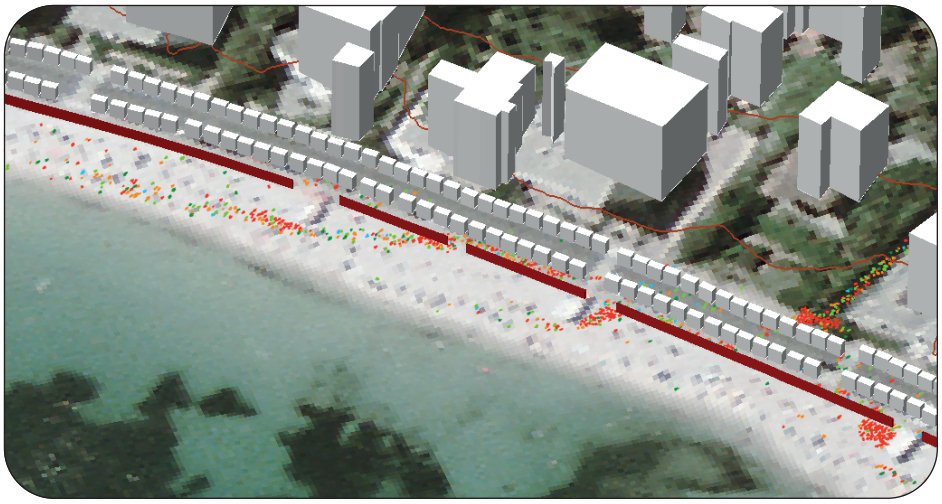
Ecole Doctorale de Géographie de Paris

présentée par

M. Alexandre SAHAL

en vue de l'obtention du grade de
Docteur de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Le risque tsunami en France : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque.



Soutenue publiquement à Paris le 10 décembre 2011
devant le jury composé de :

Franck LAVIGNE, Professeur, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne	Directeur de thèse
Frédéric LEONE, Professeur, Université Montpellier 3	Co-directeur
Virginie DUVAT-MAGNAN, Professeur, Université de La Rochelle	Rapporteuse
Franck DOLIQUE, Professeur, Université des Antilles et de Guyane	Rapporteur
Lydie GOELDNER-GIANELLA, MCF HDR, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne	Examinatrice
François SCHINDELE, Expert aléa Tsunami, CEA/DASE	Examinateur

Thèse de doctorat
de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
spécialité Géographie

Ecole Doctorale de Géographie de Paris

présentée par

M. Alexandre SAHAL

en vue de l'obtention du grade de
Docteur de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Le risque tsunami en France : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque.

Soutenue publiquement à Paris le 10 décembre 2011
devant le jury composé de :

Franck LAVIGNE, Professeur, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne	Directeur de thèse
Frédéric LEONE, Professeur, Université Montpellier 3	Co-directeur
Virginie DUVAT-MAGNAN, Professeur, Université de La Rochelle	Rapporteuse
Franck DOLIQUE, Professeur, Université des Antilles et de Guyane	Rapporteur
Lydie GOELDNER-GIANELLA, MCF HDR, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne	Examinatrice
François SCHINDELE, Expert aléa Tsunami, CEA/DASE	Examinateur

Avant propos

Le travail de recherche ici présenté a été réalisé au sein de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne et du Laboratoire de Géographie Physique (« LGP », CNRS, UMR 8591).

Il a été possible grâce à une participation active à deux programmes de recherche pluridisciplinaires visant à l'évaluation du risque tsunami dans des collectivités françaises :

- Le programme **PREPARTOI** (**P**révention et **RE**cherche **P**our l'**A**tténuation du **R**isque **T**sunami dans l'**O**céan **I**ndien, Mayotte et La Réunion), principalement financé par la **Fondation MAIF** et piloté par le LGP, a permis une étude intégrée du risque tsunami à Mayotte et à La Réunion.

> *Partenaires scientifiques du LGP : CEA/DASE, PRODIG (UMR 8586), GEOLAB (UMR 6042), GRED (UMR 0007), GéoSciences Réunion (UMR 7154), PRISM Economie.*

- Le programme **MAREMOTI** (**MARE**graphie, observations de tsuna**M**is, m**O**délisation et é**T**udes de vulnérab**I**lité pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée occidentale), financé par l'**Agence Nationale de la Recherche** et piloté par le CEA/DASE, a quant à lui permis une étude intégrée du risque tsunami à Antibes (Alpes-Maritimes).

> *Partenaires scientifiques du CEA/DASE : LGP, SHOM, Université de La Rochelle, Noveltis, GEOLAB (UMR 6042), Géosciences Consultants, GRED (UMR 0007), Centro de Geofisica da Universidade de Lisboa, Laboratoire de Géologie ENS.*

La réalisation de ce travail de recherche a également été possible grâce à la contribution financière et/ou logistique du **Secrétariat d'État à l'Outre-mer**, de la **Commission Française auprès de l'UNESCO**, du **Haut-commissariat de la République en Nouvelle-Calédonie (DSC)**, des **Préfectures de La Réunion (EMZ) et de Mayotte (SIDPC)**.

NB. Le « je » a volontairement été évité lors de la rédaction de cette thèse. Sauf indication contraire, les travaux présentés ont été réalisés par l'auteur.

Remerciements :

Par ordre chronologique, d'importance et/ou de localisation…

Pour commencer chronologiquement, je remercie Christopher GOMEZ qui a vendu ma motivation et ma débrouillardise à Franck LAVIGNE en période de faible activité, et sans qui je n'aurais jamais eu l'occasion de travailler (1) avec Franck et (2) sur le risque tsunami.

Pour poursuivre, je remercie chaleureusement les « piliers gris » de ce travail :

Plus que tous, je remercie du fond du cœur Franck LAVIGNE, qui a cru en moi, m'a fait confiance toutes ces années, m'a laissé une liberté sans pareil sans pour autant me laisser seul un seul instant. Un énorme merci pour m'avoir intégré à une équipe humaine et généreuse avec qui il a toujours été un réel plaisir de travailler, et que je remercie par la même occasion : particulièrement Frédéric LEONE pour le partage de son approche et son soutien ; Patrick WASSMER, Freddy VINET, Monique GHERARDI, JC GAILLARD, Raphael PARIS et les autres.

François SCHINDELE et Hélène HEBERT, du CEA, mes premiers employeurs en Métropole au titre de "tsunamiste", qui m'ont également fait confiance et confié un travail d'investigation qui s'est vite transformé en passion. Merci encore, Franck, de m'avoir recommandé auprès du CEA/DASE qui m'a lancé dans cette aventure tsunamique. Merci plus particulièrement à François pour les nombreuses discussions et pour son inestimable soutien depuis 2007.

Un grand merci aux membres du jury : Virginie DUVAT-MAGNAN, Franck DOLIQUE et Lydie GOELDNER-GIANELLA, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je remercie les « piliers financiers » qui ont permis la réalisation de ce travail :

La **Fondation MAIF**, qui a permis le financement de PREPARTOI à La Réunion et à Mayotte, notamment grâce à l'appui de François SCHINDELE, que je ne remercierai jamais assez. Merci à Hubert OLIVIERO pour la grande liberté qu'il a bien voulu nous laisser pour gérer ce programme et ses imprévus. La participation de la Fondation MAIF a été décisive dans la réalisation de ce travail de thèse.

L'**Agence Nationale pour la Recherche**, financeur du programme MAREMOTI.

Je remercie les organismes qui ont également contribué financièrement à la réalisation de ces travaux :

Le **Secrétariat d'État à l'Outre-mer** et plus particulièrement Simon BABRE, Bertrand DUCROS et Kedidja YAHIAOUI, pour le financement de mon séjour en Nouvelle-Calédonie et à Wallis-et-Futuna.

La **Commission Française auprès de l'UNESCO** et plus particulièrement Bernard FRONTERO, pour son financement de l'ensemble de mes trajets vers la Nouvelle-Calédonie et au sein de son territoire ainsi qu'à Wallis-et-Futuna.

Le Secrétariat d'État à l'Outre-Mer et la Commission Française auprès de l'UNESCO m'ont permis de recueillir de précieuses données en Nouvelle-Calédonie et à Wallis-et-Futuna, et m'ont par ailleurs permis de vivre une riche et inoubliable expérience sur ces territoires. Je me dois de nouveau de remercier François SCHINDELE qui s'est battu pour que cette mission d'évaluation se fasse, et qui y est parvenu malgré mes dérapages diplomatiques…

Le **Laboratoire de Géographie Physique** et plus particulièrement Catherine KUZUCUOGLU et Franck LAVIGNE (encore !), en tant que financeur de certaines missions, mais surtout un grand merci à son équipe pour son soutien : d'abord Michelle PENNEC, qui a du s'arracher quelques cheveux au milieu des nombreuses demandes d'ordres de mission, d'états de frais, de commandes de matériel et de logiciels ; merci à Delphine GRANCHER et à Daniel BRUNSTEIN pour leur expertise en matière de statistiques et de SIG (respectivement) et pour leur dévouement à accompagner les thésards dans leurs démarches et leurs soucis (je pense que ces derniers le feront mieux que moi). Encore merci à Delphine pour la bonne humeur, la fraicheur et le charme qu'elle a apporté contre son gré à mes visites au labo, ainsi que pour ses relectures de dernière minute.

L'**Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne** : merci à Frédérique BAUDIER pour sa contribution à la mise en place de PREPARTOI à l'Université Paris 1 et à Isabelle CARRIER pour s'être si bien démêlée dans la pagaille des nombreuses missions de PREPARTOI. Merci également à l'UFR de Géographie et plus particulièrement à Etienne COSSART pour sa confiance en ma capacité à enseigner, et à Franck (encore…) qui a largement contribué à l'établissement de cette confiance.

UNDP Yemen, financeur sans le savoir d'une bonne partie de cette thèse grâce à ses généreuses payes pour 3 mois d'un travail passionnant auprès des communautés côtières yéménites, qui plus est dans un cadre splendide. J'en profite pour remercier Mohamed EL SHABBAN et Saïd EL WASER, du *Disaster Managment Program*, pour avoir facilité de manière inestimable cette mission. Encore merci à Franck (!) de m'avoir « branché » sur cette opportunité enrichissante à tout point de vue. Un sincère merci à Cédric HOEBRECK pour avoir accepté de partager cette mission de dernière minute, malgré les troubles rencontrés.

Enfin, merci à Cédick BERCY pour avoir bien voulu compléter le financement de cette thèse en ses derniers mois de rédaction.

Outre ces piliers sans lesquels pas une ligne de cette thèse n'aurait été écrite, c'est essentiellement grâce à un fastidieux travail de terrain que cette thèse existe. Je remercie donc ici l'ensemble des personnes qui ont facilité mes recherches en ces différents lieux, mais aussi ceux qui ont rendu tous ces séjours inoubliables :

En Méditerranée :

Un grand merci à la caserne d'Antibes pour son accueil et surtout au Commandant IMBERT, qui m'a accueilli dans des circonstances plutôt cocasses (ce n'est pas tous les jours qu'on reçoit des visiteurs en doudoune-slip-bottines dans une caserne de pompier… je ne remercie pas les voleurs de pantalons ni les services des objets trouvés de la gare de Nice). Merci au SDIS 06 et plus particulièrement au Commandant RIQUIER pour sa coopération. Un grand merci aux services techniques de la Commune d'Antibes, et plus particulièrement à Jean-Louis CECCHINI et Patrice PIERINI pour avoir permis l'accès aux données de la ville d'Antibes. Enfin, merci à tous les maitres de ports, à leurs personnels et aux témoins qui ont bien voulu partager leurs observations pour leur accueil et leur précieuse aide.

En Atlantique :

Merci à tous les personnels des Archives Départementales du littoral Atlantique, pas toujours accueillants mais pour la plupart d'un grand soutien technique. Merci à tous ceux qui m'ont accueilli sur le terrain : Franch, Polo et les autres. Merci à Thibault REINHART d'avoir fait jouer ses relations pour me dégoter des lieux de repli aussi accueillants, chez des amis si bienveillants.

En Nouvelle-Calédonie :

Un immense merci à l'équipe de la DSC : au Colonel Frédéric MARCHI-LECCIA et à Marie-Joëlle VENDEGOU, ainsi qu'à Laura. Je les remercie pour leur accueil et pour toute la logistique qu'ils ont mise à ma disposition pour cette mission. Sans ce précieux appui, la mission aurait tout simplement été un fiasco.

J'adresse mes plus sincères et chaleureux remerciements à Richard POIDO, qui m'a initié à la coutume kanak et accompagné en tribus. Richard a toujours été là pour me soutenir, me conseiller, m'aider. Son aide et son investissement ont été décisif dans le succès de cette mission.

Merci à Bernard PELLETIER, pour sa coopération et sa confiance, à Jean CHATELIER pour son travail passionné de terrain et son partage.

Merci au Haut-Commissaire Yves DASSONVILLE, aux Commissaires Délégués Jean-Marc BEDIER, Florus NESTAR et Luc ANKRY, pour leur accueil, leurs discussions constructives et pour l'intérêt qu'ils ont pu porter à ma mission.

Merci aux autorités coutumières, locales, territoriales et de l'État et à leurs personnels, qui m'ont accueilli et aidé tout au long de cette mission.

Enfin, je remercie les coutumiers qui m'ont accompagné sur le terrain et les témoins qui m'ont accueilli chez eux et m'ont raconté leurs souvenirs.

A Wallis et Futuna :

Merci à Daniel FRIMIGACCI, mon premier et décisif contact à Wallis, à Pétélo LELEIVAI, mon guide, traducteur et conseiller coutumier à Futuna. Merci au Père JOPITRE pour son accueil et sa générosité. Merci à l'ensemble des témoins qui ont accepté de répondre à mes questions, toujours avec un accueil chaleureux.

Merci à Monsieur Patrick HEROLE pour l'intérêt qu'il a montré à ma mission à Futuna, à Jean-Jack FEVE et Jean-Marie BOUTET pour leur accueil.

A La Réunion :

Merci à Didier PARIS et à la Préfecture de La Réunion pour son soutien et sa collaboration. Merci à Nicolas VILLENEUVE pour son accueil dans les locaux de l'IRD, ainsi qu'à Zarah SERVADIO pour m'avoir "motivé" à passer le moins de temps possible au bureau... A la DIREN et DDE (puis DEAL), merci à Christian LEGER et Bertrand BOUTEILLES, à Mrs. ALLAERT, BAYLE et FESTIN aux Phares et Balises et à Marie-Christine LEROUX aux routes. Merci à Pierre TESSIER, Olivier CARTADE et Hervé LEMAHIEU au Conseil Général. Merci à Karim KELFOUN et Andrea DI MURO pour les discussions sur le cas du 20 mars 2010, ainsi qu'à Michel ROPERT pour son partage d'une vidéo qui aura fait du bruit... A Saint-Paul, un grand merci à Thierry KEGLER, Jean-François LHEMERY et Olivier MOREL pour la mise à disposition de précieuses données cartographiques. Merci à Karine POTHIN pour son accueil à la Réserve Marine de La Réunion. Merci à Caroline REGNARD pour les discussions enrichissantes concernant les méthodes et données INSEE.

Merci à la Plate forme d'Intervention Régionale de l'Océan Indien (Croix Rouge Française) et plus particulièrement à Christian PAILLET et Véronique WALBAUM pour leur soutien au programme PREPARTOI.

Un énorme merci à la famille LEMAHIEU pour son accueil et à Anne plus particulièrement. Un très grand et chaleureux merci à Ludovic PIRAZZOLI pour m'avoir fait partager son amour pour son île, pour son accueil chez lui et son soutien radiophonique au programme PREPARTOI. Un chaleureux merci à l'équipe de Bourbon Parapente : Eric, Will et Séb pour leur générosité dans la transmission de leur passion, Gabi pour sa désastreuse

mais comique désorganisation, à Petio pour ses trajets et soirées partagés, et surtout à Patrick MORONI pour sa générosité et sa bienveillance pour les "oisillons". Merci à la "Team Orbéa" : à Patrick (je n'oublierai jamais ce vol interdit…), à Jean Bernard pour sa générosité, à Nico pour sa gentillesse.

Merci à Philippe le garagiste pour ses locations de voitures particulières sans lesquelles la logistique sur le terrain aurait été beaucoup moins gérable.

A Mayotte :

Merci à Anthony BOUKOUCHA et à Nadia TOTH pour leur accueil et leur collaboration, merci à Jordan MAZADO pour son dévouement à la cause des SIG. Enfin, un très grand merci à Saïd HACHIM et à sa famille pour leur précieux soutien.

Sans distinction géographique, merci à Juanito (aussi appelé "Sean ROGER" à Mayotte, prononcez à l'américaine), un petit chinois malgré son nom à consonance hispanique, pour ses explications sur la modélisation des tsunamis, pour sa collaboration à nos travaux, et pour sa philosophie extrême-orientale qui m'a - a maintes reprises - fait relativiser quand à notre condition d'êtres humains. Merci aux nombreux stagiaires qui ont participé aux différents travaux de terrain réalisés dans le cadre de PREPARTOI et de MAREMOTI : Anne LEMAHIEU, Florent DROUET, Morgane FAUTRERO, Colas ROBERT et Marie COQUET. Et un grand merci à la famille LAVIGNE pour son accueil chaleureux à la veille de l'impression de cette thèse, à Axel pour ses cahiers porte-souris, et plus particulièrement à Emma pour le broc en plastique, et pour son buffet de pot de soutenance.

Pour leurs nombreuses relectures d'articles en anglais et leur soutien : un grand merci à Christa TEPLICKY et à Marion COLE.

Pour leur soutien perpétuel : merci à mes parents, à mes sœurs Elsa, Amandine et Bettina pour leur soutien, à mes nièces Dora, Faustine et Lucie, et plus récemment Esther, pour leur amour. Merci à ma grand-mère, Rolande, pour son accueil en ces derniers mois de rédaction. Enfin, merci à Thibault, à Arnaud, à Greg et au Zink pour leur amitié de voilà presque 20 ans. Loin des yeux pour certains, mais toujours près du cœur.

"Laste beute note liste", merci à Julie MORIN pour sa contribution à PREPARTOI par son expertise dans la gestion de crise et la prévention des risques (merci à Planet Risk par la même occasion). Merci pour ces derniers mois de thèses partagés : merci pour ces moments de bonheur au cœur de la tourmente et pour tes relectures. J'espère que nos routes se recroiseront, probablement jalonnées de catastrophes volcaniques, tsunamiques ou d'autres fléaux divins…

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE 9

PARTIE 1. ÉTAT DE L'ART ET CHOIX METHODOLOGIQUES 13

CHAPITRE 1ER. LES TSUNAMIS DANS LE MONDE ET DANS LES TERRITOIRES FRANÇAIS : DEFINITION DU PHENOMENE ET MOYENS D'ALERTE ET DE REDUCTION DU RISQUE 15

CHAPITRE 2E. LA NECESSITE D'UNE METHODE D'EVALUATION INTEGREE PAR SCENARIOS DE RISQUES 39

PARTIE 2. APPLICATION ET RESULTATS DE LA METHODE D'EVALUATION INTEGREE PAR SCENARIO DE RISQUE 79

CHAPITRE 3E. EVALUATION INTEGREE DU RISQUE DE TSUNAMI A MAYOTTE : LE CAS DE PETITE-TERRE 85

CHAPITRE 4E. EVALUATION INTEGREE DU RISQUE DE TSUNAMI A LA REUNION : LE CAS DE SAINT-PAUL 115

CHAPITRE 5E. EVALUATION INTEGREE DU RISQUE DE TSUNAMI EN MEDITERRANEE : LE CAS D'ANTIBES 167

PARTIE 3. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS 199

CHAPITRE 6E. LIMITES DES METHODES DE L'EVALUATION INTEGREE ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION 201

CHAPITRE 7E. RECOMMANDATIONS GENERALES POUR UNE MEILLEURE PREPARATION FACE AU RISQUE TSUNAMI EN FRANCE 219

CONCLUSION GENERALE 233

BIBLIOGRAPHIE 237

TABLE DES MATIERES 253

TABLE DES FIGURES 257

TABLE DES TABLEAUX 267

ANNEXES I

Introduction générale

26 décembre 2004, 11 mars 2011… de nombreux tsunamis récents ont tué des dizaines de milliers de personnes dans l'Océan Indien et l'Océan Pacifique. Loin d'être les premiers tsunamis meurtriers, ils sont les premiers à être tant médiatisés et à éveiller chez certains une inquiétude sur l'existence d'une possible menace en France. De mémoire humaine, aucun tsunami n'a été meurtrier sur le territoire français. Pourquoi donc s'intéresser au risque tsunami en France ? Ce risque existe-t-il ou bien est-il le fruit d'un fantasme paranoïaque, ou encore d'un principe de précaution excessif ? Pendant la réalisation de ce travail de recherche, de nombreuses personnes se sont interrogées sur le bien fondé d'une telle entreprise : « la France n'a jamais été touchée par un tsunami ! A quoi bon s'investir ! Allez plutôt en Indonésie ou au Japon ! ». *De mémoire*. C'est bien de mémoire du risque dont il s'agit, et celle-ci est souvent éphémère [Proenza et Maul 2010]. En réalité, des tsunamis ont tué sur le territoire français et causent des dégâts matériels aussi bien en métropole qu'en outre-mer [Sahal *et al.* 2010 ; Sahal et Lemahieu 2011], et le risque que cela se reproduise est bien réel.

Le risque se définit par la conjonction d'un aléa - ici un tsunami, non maitrisable - et d'une vulnérabilité, c'est-à-dire d'une capacité pour des enjeux à affronter et à se remettre d'un impact [UNESCO 2009]. Cette capacité à faire face à un aléa est directement liée à la capacité de préparation des sociétés à l'affronter (Figure 1).

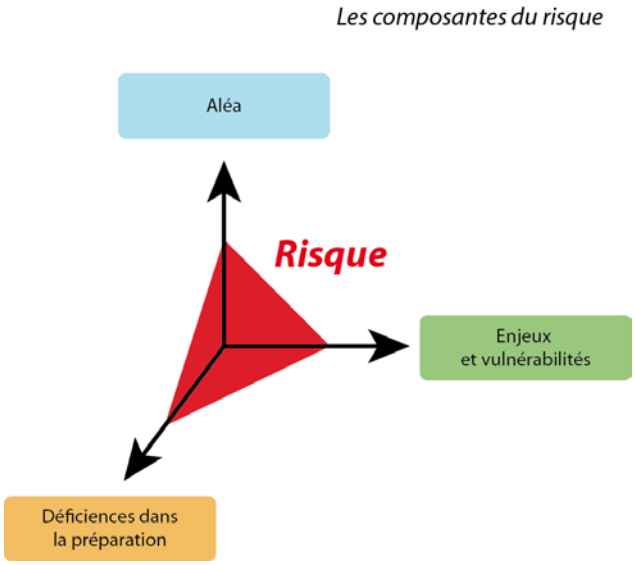


Figure 1. Les composantes du risque : aléa, enjeux et vulnérabilités, et déficiences dans la préparation (ou « capacités »).

Source : adapté de UNESCO [2009].

Afin d'améliorer la capacité de réponse des sociétés, il est nécessaire d'étudier l'aléa auquel elles sont exposées, d'évaluer leurs enjeux et d'organiser une réponse à la menace [UNESCO 2009]. Ces composantes du risque sont le plus souvent l'objet d'études uni-disciplinaires. Dans le cas du risque tsunami, les géophysiciens étudient les sources de l'aléa, les modélisateurs simulent la propagation des ondes, les économistes se focalisent sur les enjeux économiques, les géographes évaluent les vulnérabilités des sociétés, et enfin, les opérationnels tentent tant bien que mal d'avoir une visibilité globale mais succincte de ces évaluations segmentées. Aussi, c'est aux scientifiques d'adopter une démarche pluridisciplinaire et intégrée pour rassembler l'ensemble de ces spécialités afin d'en dégager des solutions opérationnelles.

Comment évaluer l'aléa tsunami ? Quelle visibilité existe concernant les événements passés ? Quels sont les territoires exposés ? Avec quelle fréquence et quelle intensité les tsunamis affectent-ils les côtes françaises ? Quels biens, quels enjeux humains ou stratégiques sont menacés ? Comment évaluer leur vulnérabilité ? Comment limiter l'impact de ces événements ? Que fait-on en France et que peut-on faire de plus pour mieux protéger les populations et les biens exposés ?

Cette thèse a pour objectif de mettre en place une démarche intégrée visant à évaluer le risque tsunami dans les collectivités françaises. Ce travail de recherche s'intéresse à la mise en évidence des enjeux littoraux et de leurs vulnérabilités, et à l'évaluation des dégâts que pourraient occasionner des tsunamis à l'avenir. Il propose une méthode fondée sur la modélisation de scénarios de risque, c'est-à-dire conjuguant des scénarios d'aléa, d'enjeux et de vulnérabilités et des scénarios de gestion de crise. Cette démarche permet ainsi de mettre en évidence les lacunes de la gestion du risque de tsunami en France, aujourd'hui en pleine évolution, et de proposer des améliorations pour une meilleure préparation des autorités comme des populations.

Une première partie sera consacrée à un état des connaissances actuelles sur l'aléa tsunami dans le monde et en France. Elle exposera la manière dont ce risque est géré à l'échelle globale et à celle des collectivités françaises, dans la lignée du récent rapport du sénateur Courteau [2008] sur l'évaluation et la prévention du risque du tsunami sur les côtes françaises en métropole et outre-mer. Les collectivités littorales françaises ont la chance de n'avoir été affectées depuis le milieu du XVIII^{ème} siècle que par des tsunamis de faible amplitude. Cela ne signifie pas pour autant que ces littoraux sont à l'abri d'événements aux périodes de retour millénaires comme cela a été le cas au Japon le 11 mars 2011. Les lacunes de la connaissance historique des tsunamis qui ont affecté les littoraux français seront mises en évidence. Cette première partie sera également l'occasion de présenter la démarche adoptée dans cette thèse, visant à une évaluation intégrée du risque tsunami. Différentes

méthodes d'évaluation des composantes du risque seront comparées, et certaines seront sélectionnées pour une évaluation par scénarios de risque dans certaines collectivités françaises.

Une seconde partie proposera ainsi de mettre en œuvre cette démarche dans trois sites d'étude : Petite-Terre à Mayotte, Saint-Paul à La Réunion, et enfin le quartier de la Salis à Antibes (Alpes-Maritimes). Ces sites, étudiés dans le cadre de deux programmes de recherche, permettront de par leurs spécificités d'adapter la démarche d'évaluation par scénarios de risque à différents contextes socioculturels, ainsi qu'à différentes échelles spatiales. Un bilan de l'aléa historique dans ces collectivités sera dressé et permettra la sélection d'un scénario d'aléa probable pour chacune d'entre elles. Une évaluation des enjeux sera réalisée à une échelle très fine (celle du bâtiment voire de l'individu), proposant différents scénarios choisis à des moments de la semaine pour lesquels la répartition spatiale des enjeux est déterminante. Enfin, les enjeux actuels seront confrontés à l'aléa probable, numériquement modélisé, permettant l'évaluation de pertes humaines potentielles et de dommages au bâti. Une spatialisation du risque sera ainsi rendue possible. Pour chacun de ces lieux d'étude, une évaluation des capacités et des temps d'évacuation des individus sera proposée afin de mesurer les temps disponibles pour mettre les personnes exposées à l'abri.

Enfin, une troisième et dernière partie discutera de l'applicabilité de la démarche employée et des limites propres à chacune des méthodes et variables utilisées. Des pistes d'amélioration de la connaissance de ces méthodes et indicateurs seront proposées. Enfin, cette partie soumettra un ensemble de recommandations issues de l'expérience acquise pendant ce travail de thèse en vue d'une amélioration de la préparation des collectivités françaises au risque tsunami.

Partie 1. État de l'art et choix méthodologiques

Cette première partie définit l'aléa tsunami, ses spécificités hydrodynamiques, ses origines et la manière dont il se manifeste à la côte. Elle propose un état des connaissances actuelles des effets des tsunamis sur les côtes françaises. Sont également présentés les systèmes d'alerte globaux et régionaux qui permettent aux territoires exposés d'obtenir, dès qu'un tsunami est détecté, une information sur l'existence d'effets possibles sur leurs littoraux.

Enfin, cette partie expose la démarche intégrée que cette thèse propose de mettre en œuvre, démarche fondée sur le concept de scénarios de risques. Elle compare les méthodes nécessaires à l'évaluation du risque tsunami et sélectionne celles qui seront utilisées dans la seconde partie de cette thèse.

Chapitre 1er. Les tsunamis dans le monde et dans les territoires français : définition du phénomène et moyens d'alerte et de réduction du risque

1.1 L'aléa tsunami

Le terme tsunami décrit un **ensemble de vagues de grandes longueurs d'ondes**, c'est-à-dire atteignant jusqu'à 300km, et engendrées par un déplacement ou une modification brutale du plancher sous-marin, en opposition avec les houles météorologiques qui se caractérisent par de courtes longueurs d'ondes, c'est-à-dire de quelques mètres à quelques centaines de mètres. Cette caractéristique fondamentale rend cet aléa spécifique dans la mesure où les submersions marines qu'il engendre pénètrent bien plus à l'intérieur des terres que le font de fortes houles, et présente une énergie bien plus importante.

1.1.1 Genèse

Les tsunamis sont déclenchés par des mouvements verticaux de matières solides : on distingue ainsi en tant que sources de tsunamis (ou sources tsunamigènes) : (1) les **séismes**, (2) les **glissements de terrain** sous-marins ou subaériens, (3) les **éruptions volcaniques** ou encore (4) les chutes de **météorites** en mer. Ces 4 types de sources ne sont pas exclusifs, ils peuvent être combinés, à l'exception des chutes de météorites.

Ainsi toutes les étendues d'eau - océans, mers et lacs - peuvent être impactées par un tsunami. La Figure 2 illustre la localisation des sources tsunamigènes identifiées depuis -2000 jusqu'à aujourd'hui[1].

[1]NB : les cartes qui illustrent cette thèse sont orientées au nord, sauf indication contraire.

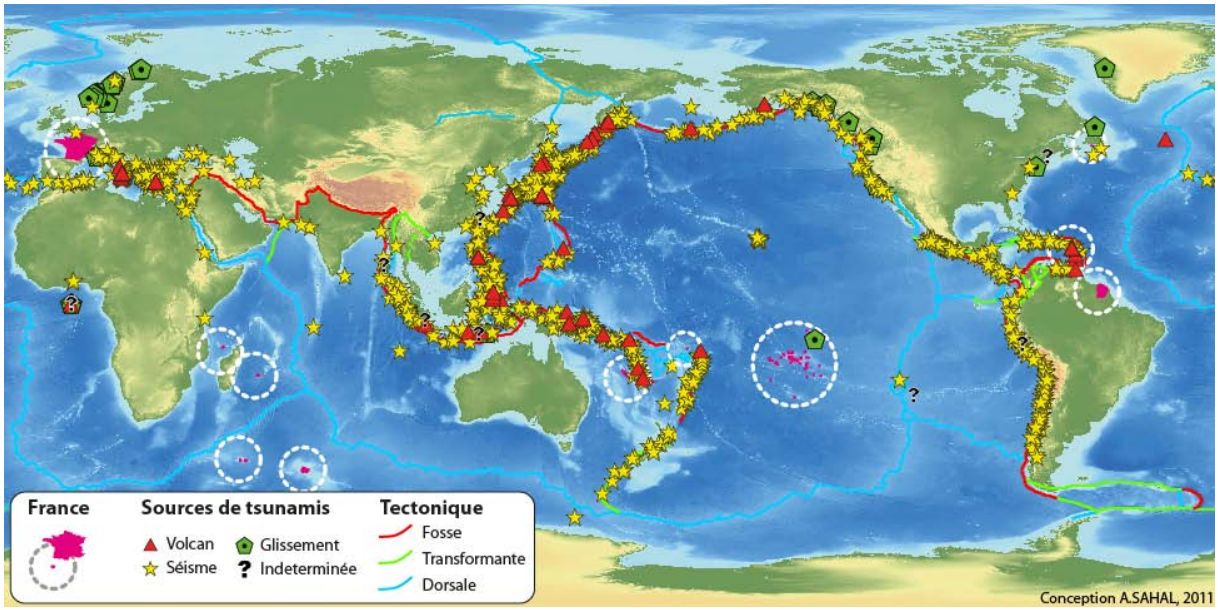


Figure 2. Sources de tsunamis avérés de -2000 à 2011 selon NOAA/NGDC (les sources de tsunamis « douteux » ne sont pas cartographiées, ni les sources de tsunamis n'ayant provoqué qu'une sèche ; en cas d'événements tsunamigènes synchrones, la cause majeure est cartographié).

Sources : données NOAA/NGDC, Dunbar [2011], tectonique selon Coffin *et al.* [1998], fond de carte issu de données GEODAS NOAA/NGDC (http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/geodas.html).

On peut constater que tous les bassins sont concernés. Les territoires français, de par leur présence dans l'ensemble des bassins océaniques et marins sont ainsi tous potentiellement exposés aux effets des tsunamis.

En se basant sur les données récentes de la NOAA/NGDC (Figure 3), on constate que (1) les tsunamis d'origines sismiques sont les plus fréquents, et que (2) le Pacifique regroupe la majorité des événements récents.

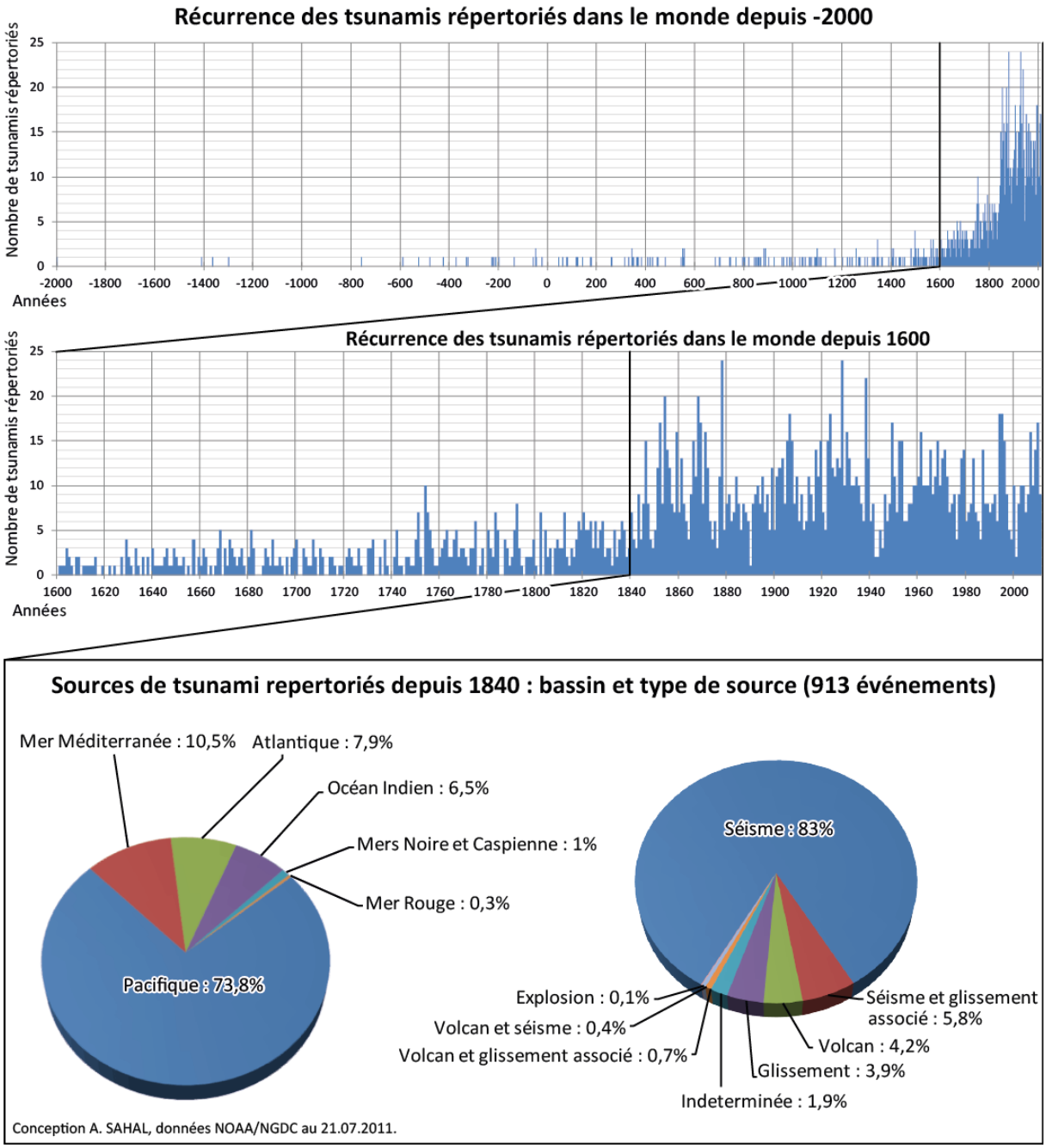


Figure 3. Récurrence annuelle des tsunamis répertoriés depuis -2000 : répartition spatiale des sources et typologie des phénomènes déclenchants.

Source : données NOAA/NGDC, Dunbar [2011], les événements « douteux » ne sont pas considérés.

L'analyse statistique des données NGDC révèle que plus on avance dans le temps, plus un nombre important d'événements est documenté. On constate un accroissement du nombre de tsunamis répertoriés à partir des années 1600, date à partir de laquelle 3 à 5 tsunamis le sont avec certitude chaque année. A partir des années 1840-1850, on observe un seuil au-delà duquel le nombre moyen d'événements double ou triple chaque année. On peut poser l'hypothèse de l'apport de nombreux périodiques locaux à nationaux nés à cette période et utilisés dans l'étude des tsunamis historiques. A l'inverse, les années 1940-1950 voient un recul net, probablement dû aux temps de guerre.

On considère ici qu'à partir de 1840, le nombre de tsunamis répertoriés annuellement est comparable avec celui d'aujourd'hui. Sur cette période, près de 3 tsunamis sur 4 sont engendrés dans l'Océan Pacifique, et ils sont globalement provoqués par des séismes dans plus de 80% des cas. La Mer Méditerranée est le second bassin dans lequel le plus grand nombre de tsunami est répertorié, avec 10,5% des événements depuis 1840.

1.1.1.1 *Tsunamis déclenchés par des séismes*

La Figure 2 illustre que ce sont les séismes dans les zones de subduction (fosses) qui sont les plus tsunamigènes, et plus particulièrement ceux de la ceinture de feu qui entoure l'Océan Pacifique (Figure 4).

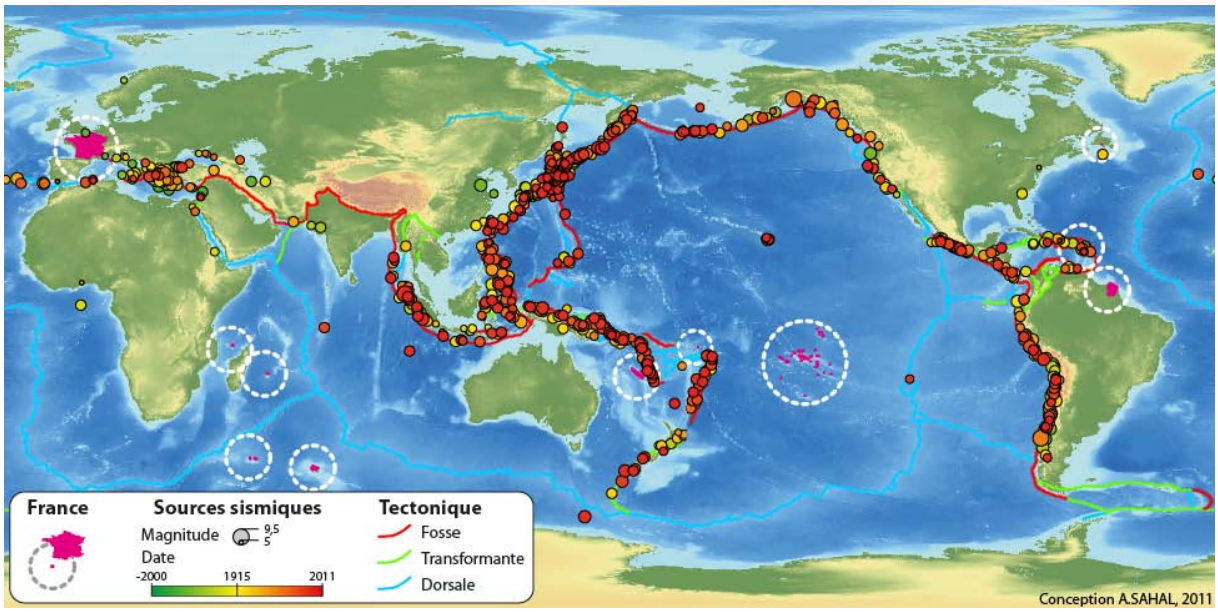


Figure 4. Tsunamis d'origines sismiques avérés de -2000 à 2011 selon NGDC (les sources de tsunamis « douteux » ne sont pas cartographiées, ni les sources de tsunamis n'ayant provoqué qu'une sèche ; en cas d'événements tsunamigènes synchrones, la cause majeure est cartographié).

Sources : données NOAA/NGDC, Dunbar [2011], tectonique selon Coffin *et al.* [1998], fond de carte issu de données GEODAS NOAA/NGDC (http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/geodas.html).

Cette région est également la plus active, concentrant 73,8% des sources d'événements récents. Dans la majorité des cas, ces séismes génèrent de grands déplacements verticaux du plancher océanique, provoquant ainsi un déplacement de la colonne d'eau sus-jacente et la propagation d'un tsunami (Figure 5).

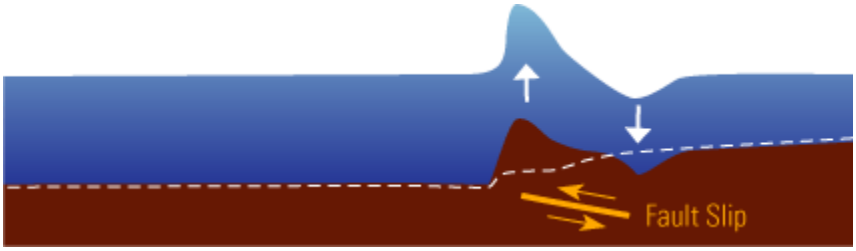


Figure 5. Initiation d'un tsunami d'origine sismique dans un contexte de subduction.

Source : USGS/WALRUS (http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/basics.html).

Ainsi, le plus souvent, les côtes situées du côté de la plaque subductée (à droite sur la Figure 5) percevront un retrait du niveau océanique annonçant l'arrivée du tsunami. Il s'agit là d'un des signes précurseurs de l'arrivée d'un train de vague submergeant. On parle dans ce cas de la « **polarité** » de l'arrivée du train d'ondes à la côte : une polarité négative décrit un retrait suivi d'une phase de submersion, tandis qu'une polarité positive décrit l'arrivée d'un train d'onde inondant avant qu'un retrait ne soit observé. Ainsi, la polarité des tsunamis telle que constatée à la côte permet en outre une meilleure compréhension des phénomènes tectoniques les déclenchant [Roger *et al.* 2011].

Les séismes superficiels sont ceux déclenchant le plus de tsunamis (*shallow earthquakes*). Sur la période 1840-2011, les séismes tsunamigènes ont une profondeur moyenne de 34,9 km., c'est-à-dire superficielle, et une magnitude moyenne Mw = 7,19. Ces statistiques sont issues des 532 événements pour lesquelles la NOAA/NGDC fournit ces paramètres, et pour lesquels des tsunamis sont avérés.

On peut citer comme exemples de tsunamis dévastateurs déclenchés par des séismes ceux du 26 décembre 2004 en Indonésie (Mw = 9,1, profondeur de 30km) atteignant des hauteurs de *runup* de 50,9 m. et entraînant la mort de 230 000 personnes [Lavigne *et al.* 2009], et du 11 mars 2011 au Japon (Mw = 9, profondeur de 32km) atteignant des hauteurs de *runup* de 37,8 m. et entraînant la mort de 23 000 personnes selon la COI/UNESCO. A des profondeurs supérieures à 40km et des magnitudes inférieures à Mw = 6,5, on considère le risque de tsunamigenèse comme faible.

Plus proche des côtes françaises, le tsunami de Lisbonne de 1755, déclenché par un séisme de magnitude Mw = 8,5/9 avait entrainé la mort de 60 000 personnes, essentiellement due au séisme mais également au tsunami déclenché [Chester 2001]. Ses effets ont été ressentis sur les côtes métropolitaines, et également jusqu'en Guadeloupe et Martinique [Roger *et al.* 2010a ; Roger *et al.* 2011].

Les séismes lents (*tsunami earthquake*) sont les plus problématiques dans la mesure où leur magnitude est souvent sous-estimée [Kanamori 1972 ; Pelayo et Wiens 1992]. C'était notamment le

cas du séisme et tsunami du 25 octobre 2010 à Mentawai (Indonésie), dont la magnitude a été mesurée à 7,5 pour être ensuite réévaluée à 7,7. Ce type de séisme lent est particulièrement redouté dans la mesure où les effets attendus sont par conséquent sous-estimés et rendent la gestion de l'alerte et de la crise complexes.

Il est difficile d'établir un lien de corrélation précis entre magnitude du séisme et hauteurs d'eau maximales mesurées. On peut toutefois, en se basant sur les données NOAA/NGDC tenter de mettre en rapport ces deux paramètres (Figure 6).

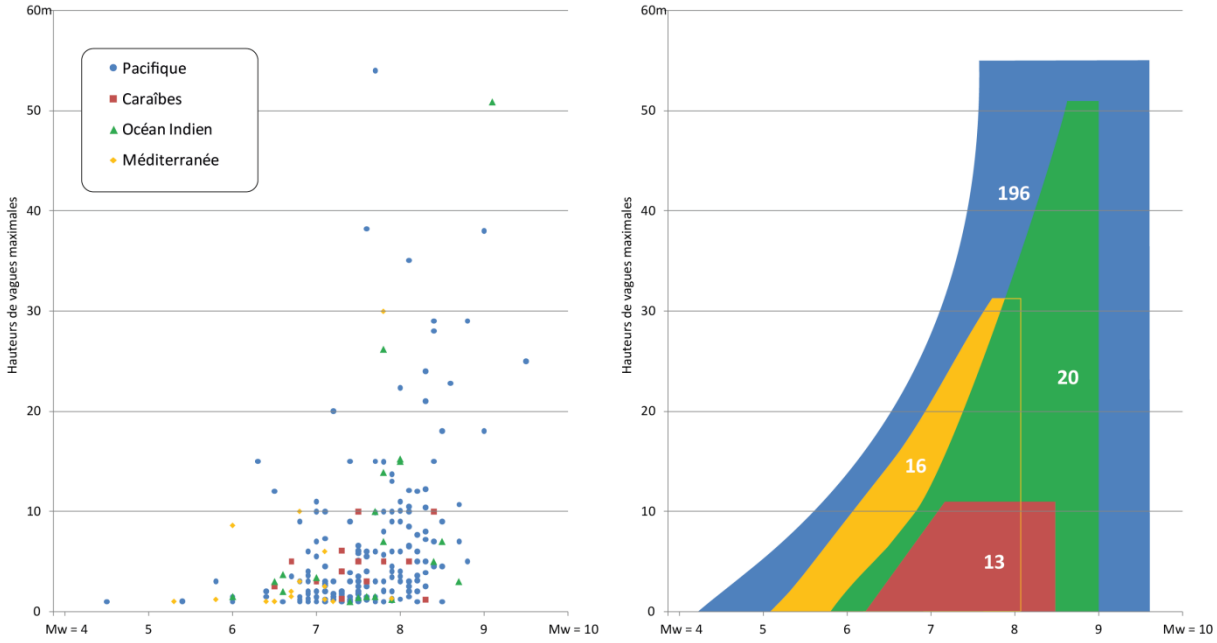


Figure 6. Rapport entre magnitude du séisme tsunamigène et hauteurs d'eau mesurées à la côte.

Source : données NGDC/NOAA d'événements tsunamigènes certains, de source sismique et engendrant des hauteurs d'eau mesurées à la côte supérieures à 1 m. depuis 1840 (en texte blanc sur-imprimé le nombre d'événements recensés pour chaque bassin).

On observe que dans le Pacifique les tsunamis se manifestant par des hauteurs à la côte particulièrement importantes dès la magnitude Mw = 4,5 et qu'on y enregistre les séismes les plus intenses (jusqu'à Mw = 9,5). Dans l'Océan Indien, les séismes tsunamigènes sont de plus grande magnitude et ont des effets à partir de Mw = 6 sur la période considérée (1840-2011). En terme d'amplitude, vient ensuite la Méditerranée, avec des événements atteignant des hauteurs de 30 m, et déclenchés dès la magnitude Mw = 5,5. On n'y enregistre pas de séismes tsunamigènes de magnitude supérieure à Mw = 8 sur la période 1840-2011. Enfin, dans les Caraïbes, les hauteurs d'eau répertoriées ne dépassent pas 10 m. Les observations sont faites à partir de magnitudes Mw = 6,5.

A noter toutefois la prudence à adopter concernant ces statistiques : cette période de moins de 200 ans, bien qu'elle soit la mieux documentée, ne peut tenir compte de séismes tsunamigènes de fortes

magnitudes dont les périodes de retour sont supérieures à 200 ans et qui ne se sont pas manifestés sur cette période. Ces événements moins fréquents mais dont l'amplitude des tsunamis déclenchés est plus forte sont à considérer sérieusement bien qu'ils soient absents des catalogues d'événements récents.

1.1.1.2 *Tsunamis déclenchés par des mouvements de masse d'origines volcaniques ou non*

Il convient ici de distinguer les glissements tsunamigènes provenant des surfaces émergées (glissement de terrain) des glissements tsunamigènes sous-marin. Leur déclenchement peut être provoqué par des effondrements de massifs volcaniques actifs ou éteints, ou non volcaniques.

Les tsunamis déclenchés par des mouvements de masses sont certes moins fréquents que ceux engendrés par des séismes et ont des effets moins étendus dans l'espace, mais ils sont les plus destructeurs localement. En se basant sur les données récentes (post 1840) extraites de la NGDC/NOAA, on trouve en effet des événements d'une extrême violence.

A titre d'exemple de glissements sur terre déclenchant des tsunamis, on peut citer le cas du 10 juillet 1958, en Alaska : un séisme de magnitude 8,3 a déclenché un glissement de terrain qui a engendré un tsunami atteignant une altitude de 525 m. dans la baie de Lituya [Miller 1960 ; Fritz *et al.* 2009] (Figure 7). On comptabilise seulement 5 victimes, grâce à la faible densité de population dans cette région. Toujours dans un contexte de baies, le 7 avril 1934, un éboulement génère un tsunami qui atteint une altitude de 64 m. dans le fjord de Tafjord, en Norvège. Les villages de Fjøra et Tafjord sont en partie détruits, 40 personnes sont tuées [Harbitz *et al.* 1993].

Concernant les glissements sous-marins sans causes volcaniques, on peut citer sur les côtes françaises elles-mêmes, l'exemple de l'effondrement du terre plein de l'aéroport de Nice le 16 octobre 1979, engendrant un *runup* de 3,5 m. à la côte [Sahal et Lemahieu 2011].

Concernant les glissements sous-marins déclenchés par des volcans inactifs, le glissement sur le flanc du volcan Fatu Hiva en Polynésie Française le 13 septembre 1999, engendrant des vagues de 2 à 5 m. à la côte [Hébert *et al.* 2002 ; Okal *et al.* 2002a].

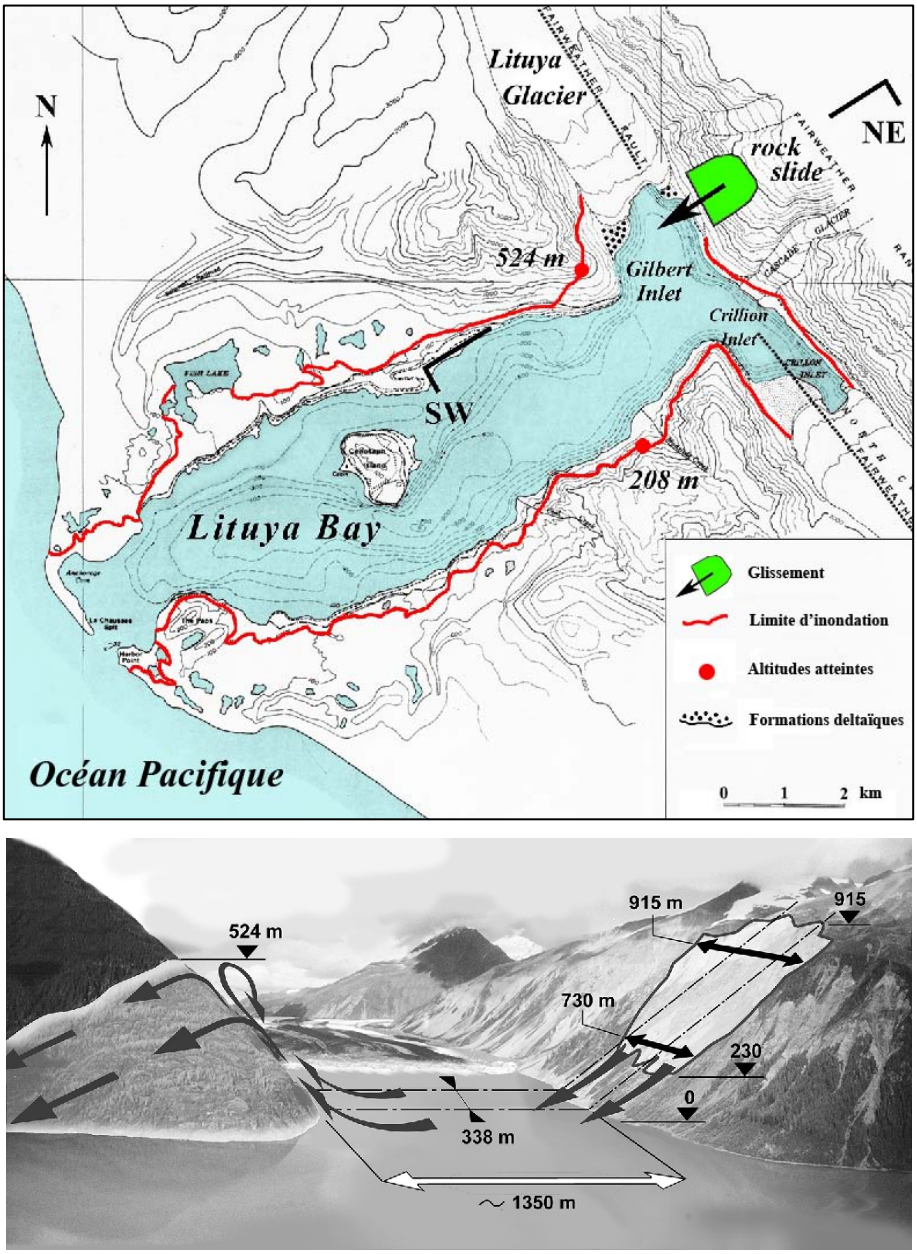


Figure 7. Glissement de Lituya, consécutif à un séisme de magnitude 8,3 en Alaska.

Source : adapté de Fritz *et al.* [2009].

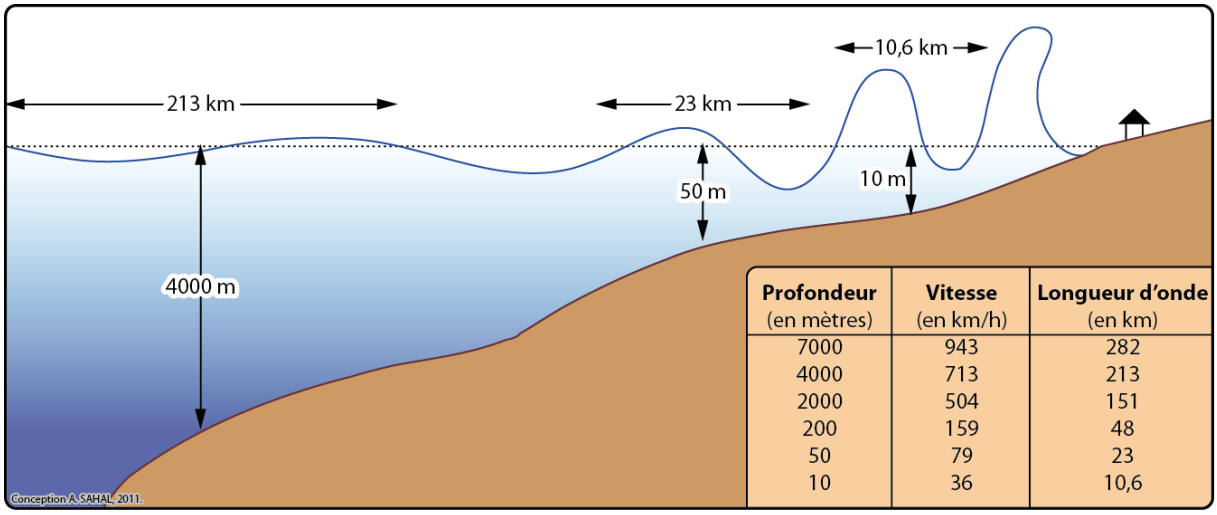
Enfin, pour ce qui est des volcans actifs, l'exemple de l'explosion du Krakatau (Indonésie) en 1883 est le plus frappant. Cet effondrement déclencha un tsunami qui atteint des altitudes supérieures à 30 m., tuant 36000 personnes à Java et Sumatra. Les effets atmosphériques de l'explosion et hydrologiques du tsunami ont été perçus dans le monde entier, jusqu'à La Rochelle [Pelinovsky *et al.* 2005]. En Méditerranée, le 30 décembre 2002, le glissement d'une partie de l'île volcanique de Stromboli (Eoliennes, Italie), génère un tsunami qui atteint une altitude de 10,9 m. [Tinti 2000 ; Tinti *et al.* 2005].

1.1.1.3 *Tsunamis déclenchés par des chutes de météorites*

Les tsunamis déclenchés par des chutes de météorites sont heureusement les plus rares : leur taille devant être suffisamment importante pour résister à l'entrée dans l'atmosphère terrestre, ils sont de loin les plus dévastateurs [Weiss et Wünnemann 2007].

1.1.2 Propagation et mesure des effets à la côte

Les tsunamis se propagent à des vitesses très importantes, atteignant plus de 900km/h en plein océan. Ils peuvent traverser des distances très importantes, faisant parfois le tour du globe comme cela a été le cas lors de l'explosion du Krakatau [Pelinovsky *et al.* 2005]. Lorsque ces trains d'ondes se rapprochent de la côte, la profondeur réduisant, ils sont contraints à ralentir et à se développer en amplitude. La longueur d'onde et la vitesse réduisent au bénéfice de l'amplitude. On parle alors de *shoaling effect* (Figure 8).



Profondeur (en mètres)	Vitesse (en km/h)	Longueur d'onde (en km)
7000	943	282
4000	713	213
2000	504	151
200	159	48
50	79	23
10	36	10,6

Figure 8. Amplification et ralentissement des tsunamis à la côte (*shoaling effect*).

Source : adapté de UNESCO (http://ioc3.unesco.org/itic/files/tsunami_glossary_en_small.pdf).

Le *shoaling effect* se traduit physiquement par la conversion d'une énergie cinétique (de vitesse) en énergie potentielle (hauteur de la vague). L'énergie totale (ou mécanique) de l'onde reste inchangée. Ainsi, les effets d'un tsunami seront imperceptibles au large mais amplifiés à la côte.

« Tsunami » signifie littéralement « **vague portuaire** » en japonais : lorsqu'il est de faible amplitude, le tsunami génère principalement des perturbations dans les bassins portuaires, qui ne sont en général pas prévus pour amortir des vagues de grande longueur d'onde. Parfois ces vagues entrent en **résonance** dans ces bassins semi-clos et s'amplifient : on observe ainsi des effets bien plus importants dans les bassins que le long des littoraux [Bellotti 2007 ; Sahal *et al.* 2009a]. Outre les

bassins portuaires, certaines baies peuvent être plus particulièrement affectées, du fait de phénomènes de réflexion et de résonance propres à leur morphologie [Abe 2005 ; Roger *et al.* 2011]. Ainsi, en fonction de la morphologie des fonds marins et du trait de côte, les effets des tsunamis peuvent être très contrastés le long d'un même littoral.

Pour des événements de faible intensité (aléa faible), seuls les ports sont affectés. En revanche lorsque l'aléa est plus important (modéré à fort), les côtes sont submergées et les dégâts importants lorsque des enjeux y sont présents. Afin de quantifier l'aléa inondant, plusieurs indices fondés sur l'étendue de la submersion sont utilisés (Figure 9).

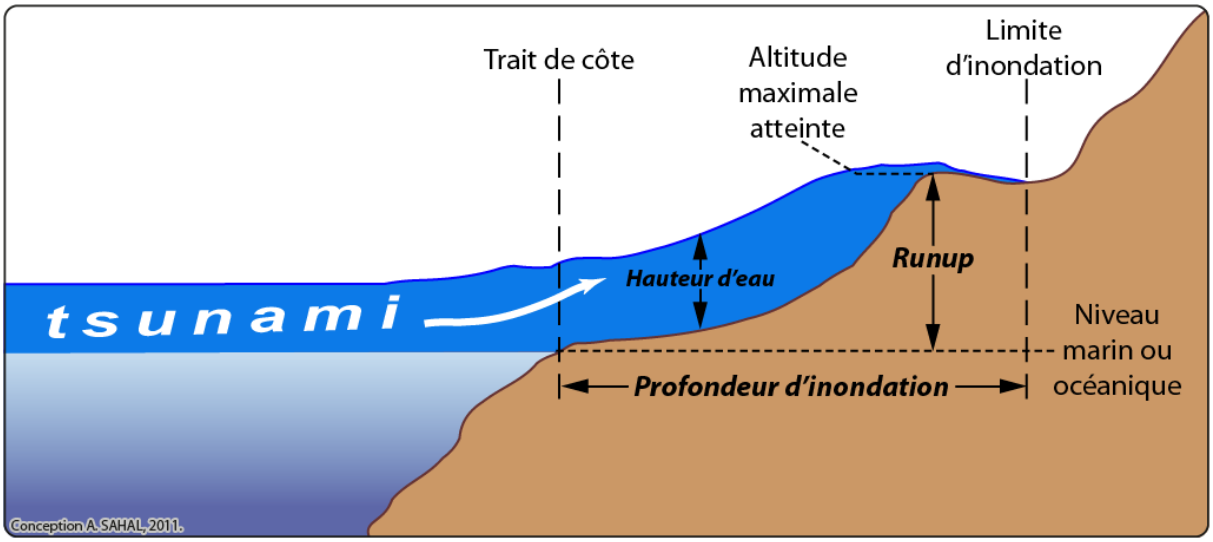


Figure 9. Caractérisation de la submersion marine liée à un tsunami.

On distingue ainsi la profondeur d'inondation, la hauteur d'eau à terre et l'altitude maximale atteinte (*runup*). Lors de la submersion marine, le tsunami érode la surface habituellement émergée en emportant de nombreux matériaux sur son passage. Ces matériaux seront déposés (ou sédimentés) lors du ralentissement du flux inondant, ou lors de son retour (*backwash*).

1.1.3 Synthèse de la connaissance historique de l'aléa tsunami en France

1.1.3.1 *Catalogues publiés*

L'aléa tsunami, comme tous les phénomènes naturels, est caractérisé par une fréquence relativement élevée d'événements de faible intensité et par une fréquence relativement faible d'événements extrêmes. En fonction de l'exposition d'un territoire, cette relativité varie mais reste évaluable. Il est nécessaire pour tout territoire de définir ces fréquences et ces intensités qui leur sont propres, et ce à différentes échelles spatiales, afin de mieux s'y préparer. L'aléa auquel les côtes françaises de métropole et d'Outre-mer sont soumises est faible à modéré, il est donc délicat de

l'évaluer car peu de retours d'expériences (RETEX) existent, et les effets des tsunamis sont rarement recensés avec précision car faibles, voire imperceptibles par un observateur non averti. Un travail d'enquête sur le terrain est donc indispensable aussitôt après l'événement.

En Mer Méditerranée, de nombreux travaux ont été réalisés par la communauté scientifique étrangère de Méditerranée Occidentale, et des catalogues d'événements sont disponibles lorsqu'ils ont eu des effets en Italie [Tinti et Maramai 1999 ; Tinti *et al.* 2004], en Espagne [Instituto Geográfico Nacional 2011], au Portugal [Baptista et Miranda 2009], ou encore au Maroc [Kaabouben *et al.* 2009]. Très peu de travaux ont concerné les côtes françaises avant le lancement du programme MAREMOTI. Depuis, quelques rapports et publications rendent compte d'observations sur nos littoraux [Sahal 2007 ; Sahal *et al.* 2009a ; Roger 2011 ; Sahal et Lemahieu 2011], résultats qui seront pour la plupart présentés ultérieurement dans cette thèse.

En Atlantique, les recherches effectuées sur les côtes françaises sont encore plus succinctes. On trouve quelques témoignages anciens rapportant des observations marégraphiques suite à certains événements (séisme de Lisbonne de 1755, explosion du Krakatau en 1883, entre autres) dont certains éléments ont fait l'objet d'une synthèse dans le cadre du programme MAREMOTI [Sahal 2009].

Aux Antilles et en Guyane, on trouve quelques références, notamment celle d'Accary et Roger [2010] qui ont fait une synthèse bibliographique des observations faites en Martinique suite à différents tsunamis. Il existe également un catalogue pour la Guadeloupe [Nikolkina *et al.* 2010]. La Guyane en est quand à elle dépourvue. La Figure 10 présente une synthèse historique de l'aléa dans les Antilles.

On constate que dans les Caraïbes les sources sont essentiellement locales et ont parfois des effets très importants, notamment en 1867 en Guadeloupe, avec un tsunami atteignant l'altitude de 18,3 m. à Deshaies [Nikolkina *et al.* 2010]. On note également l'impact du télé-tsunami déclenché par le séisme de Lisbonne en 1755 à la Guadeloupe et en Martinique, atteignant 3,5 m. d'altitude en Martinique [Roger *et al.* 2010b].

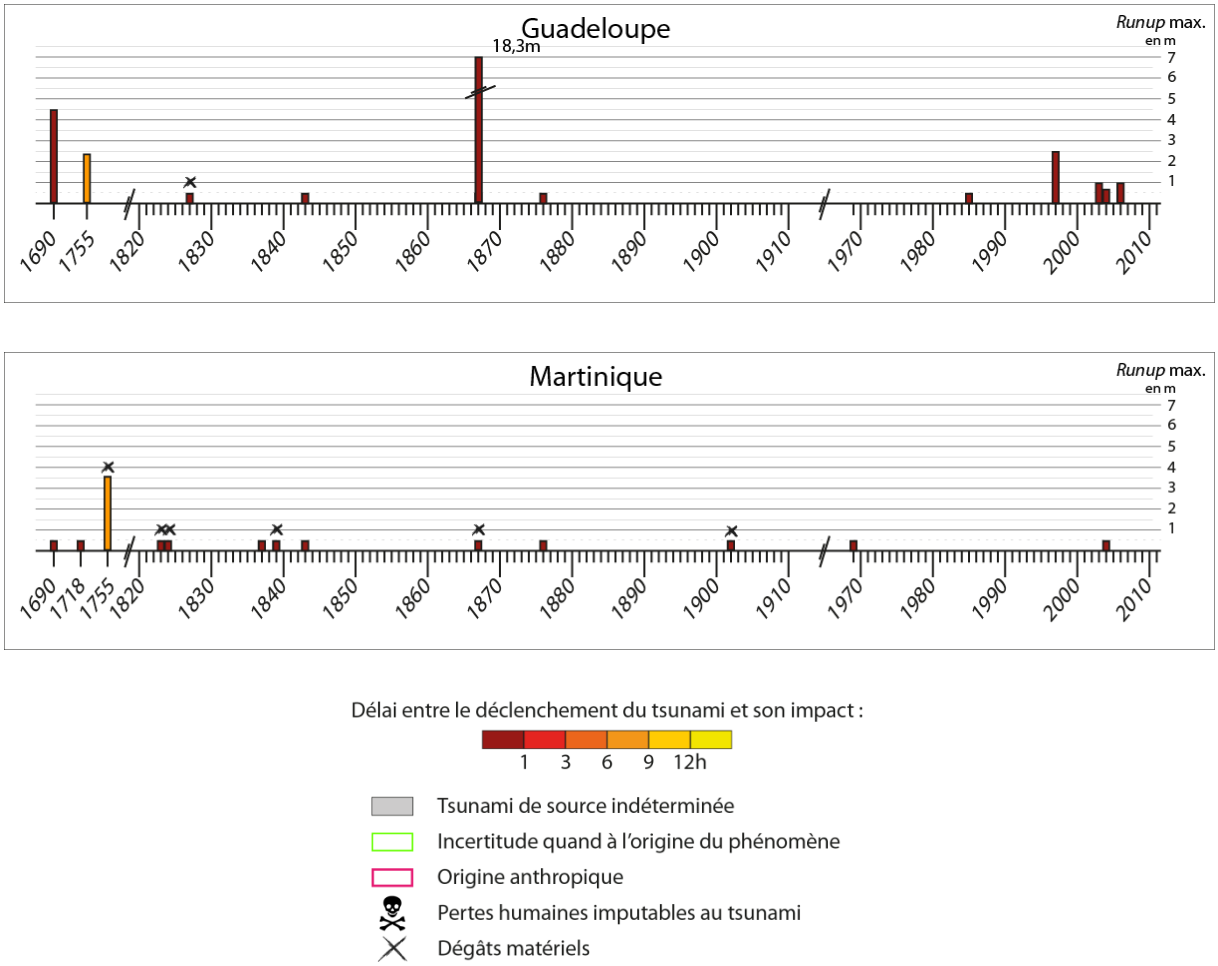


Figure 10. Frise chronologique des effets des tsunamis identifiés en Guadeloupe et Martinique.

Sources : données issues de publications [Zahibo *et al.* 2005 ; Accary et Roger 2010 ; Nikolkina *et al.* 2010 ; Roger *et al.* 2011].

Dans le Pacifique, un catalogue a été réalisé pour la Polynésie Française [Schindelé *et al.* 2006] et pour la Nouvelle-Calédonie [Sahal *et al.* 2010]. Ce dernier est présenté en version française et enrichie en Annexe 1, p. III de cette thèse. Pour Wallis-et-Futuna, on trouve quelques études consécutives à des événements particuliers, publiées [Lamarche *et al.* 2010] ou non [Sahal 2008] mais aucun catalogue synthétique n'a été réalisé à ce jour faute de recherches approfondies sur le terrain. Une synthèse de l'aléa sur ce territoire est présentée en Annexe 2, p. XVII. La Figure 11 propose une synthèse graphique des effets recensés dans ces collectivités françaises du Pacifique.

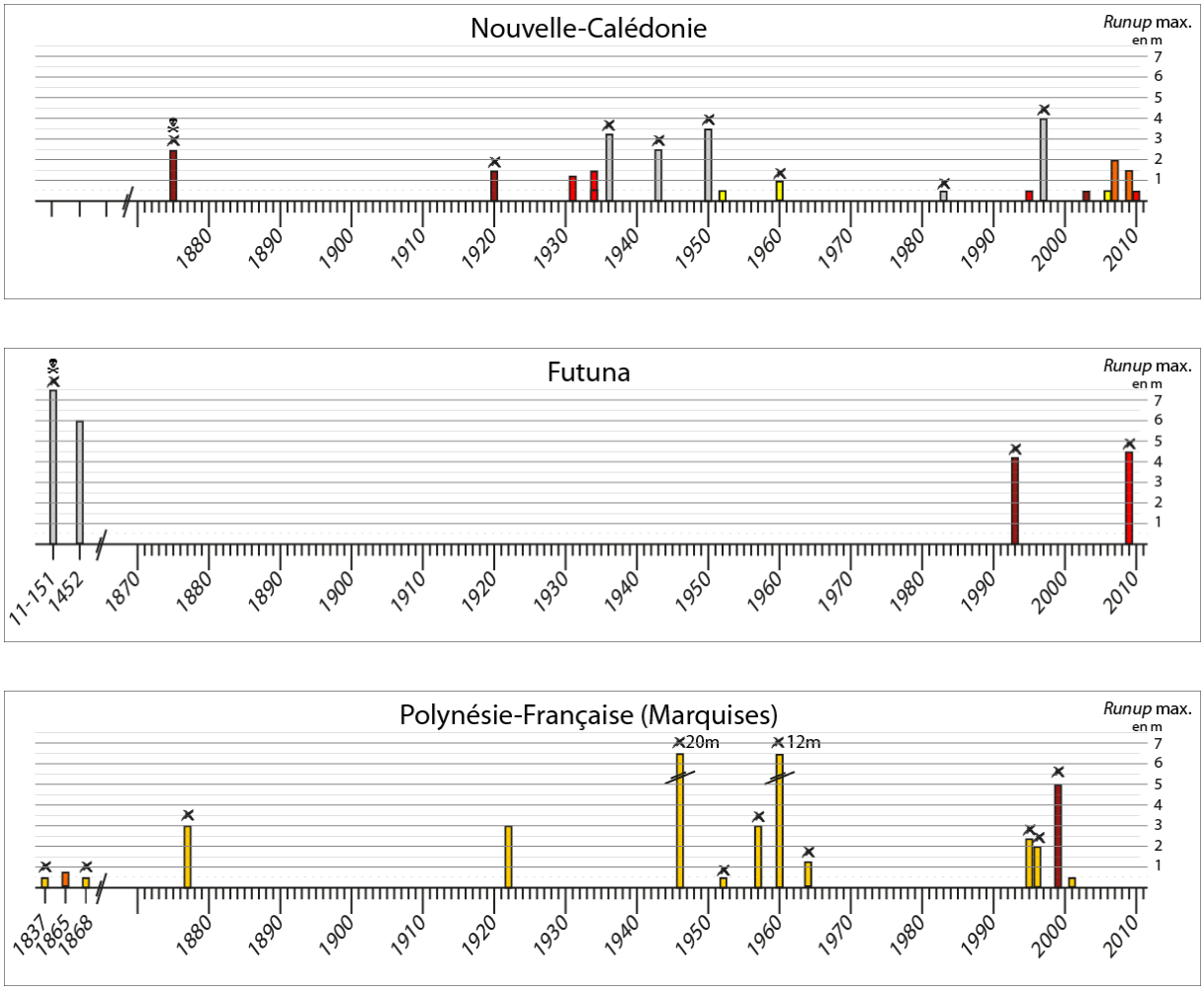


Figure 11. Frise chronologique des effets des tsunamis identifiés dans les collectivités françaises du Pacifique.

Sources : données issues de publications [Schindelé *et al.* 2006 ; Sahal 2008 ; Lamarche *et al.* 2010 ; Sahal *et al.* 2010 ; Goff *et al.* 2011].

On observe la fréquence importante d'événements en Nouvelle-Calédonie (sources locales, régionales et transocéaniques), ou encore l'importance des effets observés en Polynésie-Française, dépassant fréquemment les 5 m. d'altitude. Enfin, dans l'Océan Indien, seuls certains événements perçus à La Réunion ont fait l'objet de publications, notamment ceux des 26 décembre 2004 [Okal *et al.* 2006] et 25 octobre 2010 [Sahal et Morin sous presse]. Un catalogue est ici présenté et sera bientôt disponible en ligne [Sahal *et al.* 2011c]. Aucune publication n'est disponible concernant des

effets de tsunamis à Mayotte. A noter que la Figure 11 ne représente pas les effets des tsunamis de 2009, 2010 et 2011 aux Marquises.

1.1.3.2 *Catalogues numériques*

Outre les catalogues publiés, il existe de nombreuses bases de données numériques accessibles en ligne sur les tsunamis historiques dans le monde, y compris les territoires français. On peut notamment citer la base de données du NGDC[2] qui couvre le monde entier[Dunbar 2011]. Cette base de données, alimentée par le recueil d'informations publiées par la communauté scientifique, synthétise les principales caractéristiques des observations à la côte : date et heure de déclenchement ; source du tsunami (type, localisation, magnitude ou intensité) ; distance à la côte touchée et temps de trajet correspondant ; effets à la côte pour chaque lieu pour lequel des investigations ont été publiées (*runup*, dégâts chiffrés, pertes humaines, etc.).

Pour la France plus précisément, le site http://www.tsunami.fr, géré par le BRGM, propose depuis 2009 une synthèse bibliographique des tsunamis en France [Lambert et Terrier 2011]. Cet outil précieux est malheureusement peu mis à jour, tout comme la base de données NGDC. Au 20 juin 2011, la dernière mise à jour de la base de données date du 3 juillet 2009. Entre temps, de nombreuses publications ont été faites concernant les tsunamis ayant affecté la France, apportant des éléments précis qu'il serait bon d'intégrer à cette base de donnée [Sahal *et al.* 2009b ; Accary et Roger 2010 ; Labbé *et al.* 2010 ; Lamarche *et al.* 2010 ; Nikolkina *et al.* 2010 ; Roger *et al.* 2010b ; Sahal *et al.* 2010 ; Roger 2011 ; Sahal et Lemahieu 2011 ; Sahal *et al.* 2011c]. Il en est de même pour la base de données du NGDC, peu mis à jour et présentant par conséquent quelques erreurs. Bien qu'ayant été pour la plupart adressés aux gestionnaires de ces bases de données lors de leur publication, ces articles n'ont pas encore été intégrés à la mi-2011.

Une synthèse historique basée sur les publications scientifiques est possible dans certains cas. C'est l'approche adoptée par les bases de données numériques. Mais le plus souvent, cette synthèse nécessite un travail de terrain afin de quantifier les effets de tsunamis non encore étudiés par la communauté scientifique. Il est alors nécessaire de trouver des sources d'information primaires (témoins, traces physiques, marégrammes) ou secondaires (témoignages rapportés) pour mener à bien cette synthèse, événement par événement.

[2] Disponible à l'adresse : http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml.

1.2 La gestion du risque tsunami

Sont détaillés ici les moyens globaux, régionaux et locaux entrepris pour limiter l'impact des tsunamis : moyens de détection, de transmission de l'information et plans d'interventions des territoires français étudiés.

1.2.1 L'alerte montante : de la détection par les centres d'alerte aux tsunamis (*Tsunami Warning Systems*, TWS) à l'alerte des Etats concernés

1.2.1.1 *Les systèmes d'alerte aux tsunamis (TWS)*

A l'échelle internationale, la Commission Océanographique Internationale (COI ou IOC), organe de l'UNESCO, a été mandatée pour fédérer ses Etats membres pour réduire le risque tsunami. Elle a trois objectifs [UNESCO 2000] :

- **Etude du phénomène : renforcer la capacité d'évaluation du risque de tsunami** en coordonnant les programmes internationaux de recherche et d'observation et la diffusion des résultats obtenus ;
- **Apports opérationnels : mettre en œuvre des systèmes d'alerte** rapide aux tsunamis dans l'ensemble des bassins exposés ;
- **Prévention : mieux préparer les populations exposées** en coordonnant des programmes dans les domaines de l'éducation, de la formation.

Par ailleurs, la COI « travaille étroitement avec les organismes nationaux et favorise la coopération inter-organismes et régionale. Des centres régionaux spécialisés fournissent une information relative aux tsunamis, laquelle, assortie d'une analyse nationale, constitue la base des alertes publiques »[3]. Ces centres sont dépendants de « systèmes d'alerte » propres à chaque bassin.

Depuis le tsunami consécutif au séisme du Chili de 1960 qui a dévasté de nombreux pays du bassin [Berkman et Symons 1961], le centre d'alerte aux tsunamis du Pacifique (PTWC : *Pacific Tsunami Warning Center*, dépendant du PTWS) est en charge d'alerter les pays concernés par un risque de tsunami.

Depuis 2005, trois nouveaux systèmes d'alerte régionaux viennent renforcer le PTWS sous la coordination de la COI : le *Caribbean TWS* pour les Caraïbes (CTWS), le *North-east Atlantic and*

[3] Source : http://www.ioc-tsunami.org/.

Mediterranean TWS pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée (NEAMTWS), ainsi que l'*Indian Ocean TWS* pour l'Océan Indien (IOTWS). Chacun de ces quatre systèmes est dédié à un bassin spécifique, ou à deux bassins comme c'est le cas du NEAMTWS (Figure 12).

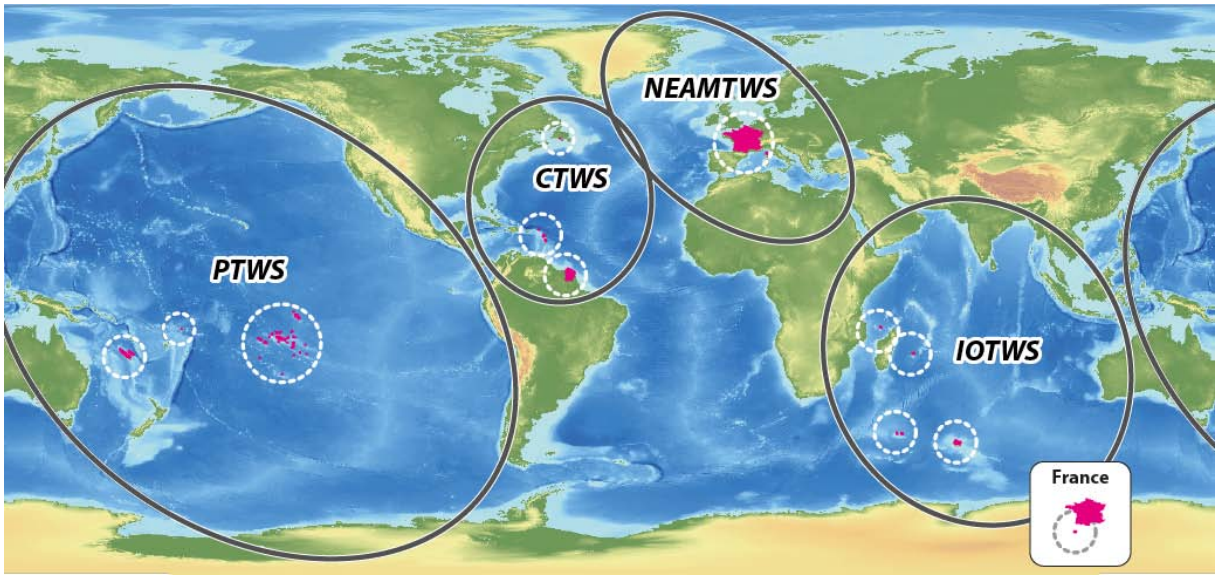


Figure 12. Les 4 TWS de la COI/UNESCO.

Source : IOC/UNESCO, fond de carte issu de données GEODAS NOAA/NGDC (http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/geodas.html).

Ces trois systèmes n'étant pas encore opérationnels à l'heure actuelle, c'est le PTWC qui se substitue à leurs centres d'alerte respectifs pour informer les pays exposés dans les bassins correspondants.

1.2.1.2 *Détection des tsunamis et seuils d'alerte des TWC*

Afin de détecter l'initiation et la propagation des tsunamis, les TWC utilisent un réseau important de **sismographes**, de **tsunamimètres** et de **marégraphes**.

Ce sont les **sismographes** qui constituent le premier maillon de la chaine d'alerte aux tsunamis. Ils enregistrent les séismes en temps réel et fournissent aux centres d'alerte des informations concernant leurs caractéristiques, et permettent ainsi une évaluation du caractère tsunamigène ou non du séisme enregistré. Selon les bassins, des seuils de veille (*watch*) sont définis [Weinstein 2009]. Ces seuils sont décrits dans le Tableau 1.

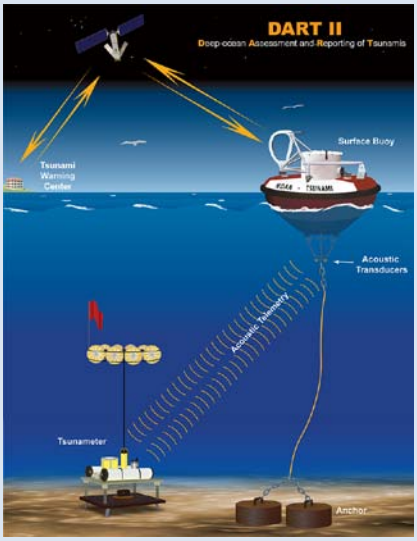
Tableau 1. Seuils de déclenchement par le PTWC des différents niveaux de veille par bassin en cas de séisme sous-marin superficiel (*shallow undersea e.q.*).

Source : PTWC, Weinstein [2009] .

<table>
<tr><th>Mw</th><th>Océan Pacifique</th><th>Océan Indien</th><th>Océan Atlantique</th><th>Caraïbes</th></tr>
<tr><td><6,0</td><td rowspan="6">Information sur le séisme</td><td rowspan="6">Information sur le séisme</td><td rowspan="6"></td><td></td></tr>
<tr><td>6</td><td rowspan="12">TIB</td></tr>
<tr><td>6,1</td></tr>
<tr><td>6,2</td></tr>
<tr><td>6,3</td></tr>
<tr><td>6,4</td></tr>
<tr><td>6,5</td><td rowspan="13">TIB (Tsunami Information Bulletin)</td><td rowspan="7">TIB</td><td rowspan="13">TIB</td></tr>
<tr><td>6,6</td></tr>
<tr><td>6,7</td></tr>
<tr><td>6,8</td></tr>
<tr><td>6,9</td></tr>
<tr><td>7</td></tr>
<tr><td>7,1</td><td rowspan="6">Veille locale</td><td rowspan="6">Veille locale</td></tr>
<tr><td>7,2</td></tr>
<tr><td>7,3</td></tr>
<tr><td>7,4</td></tr>
<tr><td>7,5</td></tr>
<tr><td>7,6</td><td rowspan="3">Veille régionale</td><td rowspan="3">Veille régionale</td><td rowspan="3">Veille régionale</td></tr>
<tr><td>7,7</td></tr>
<tr><td>7,8</td></tr>
<tr><td>7,9</td><td rowspan="11">Veille pour l'ensemble du bassin</td><td rowspan="11">Veille pour l'ensemble du bassin</td><td rowspan="11">Veille pour l'ensemble du bassin</td><td rowspan="11">Veille pour l'ensemble du bassin</td></tr>
<tr><td>8</td></tr>
<tr><td>8,1</td></tr>
<tr><td>8,2</td></tr>
<tr><td>8,3</td></tr>
<tr><td>8,4</td></tr>
<tr><td>8,5</td></tr>
<tr><td>> 8,5</td></tr>
</table>

Le Bulletin d'Information Tsunami (***Tsunami Information Bulletin,* TIB**) informe les pays du bassin de la localisation du séisme, de son heure d'occurrence et de sa magnitude estimée, sans apporter pour autant de précisions concernant le risque de tsunami associé. L'état de veille (***Tsunami Watch***) est émis en se basant sur les informations sismiques disponibles, sans confirmation qu'un tsunami destructeur se propage. Son émission a pour but de fournir des informations sommaires aux pays qui pourraient être menacés par un tsunami destructeur. Ce bulletin est mis à jour au moins toutes les heures afin de préciser si d'autres territoires sont menacés, pour étendre le niveau de veille à un niveau d'alerte, ou encore pour mettre fin à l'alerte. Au large, les **tsunamimètres** prennent le relai de l'information en détectant les variations de grande longueur d'onde caractéristiques des tsunamis (Figure 13).

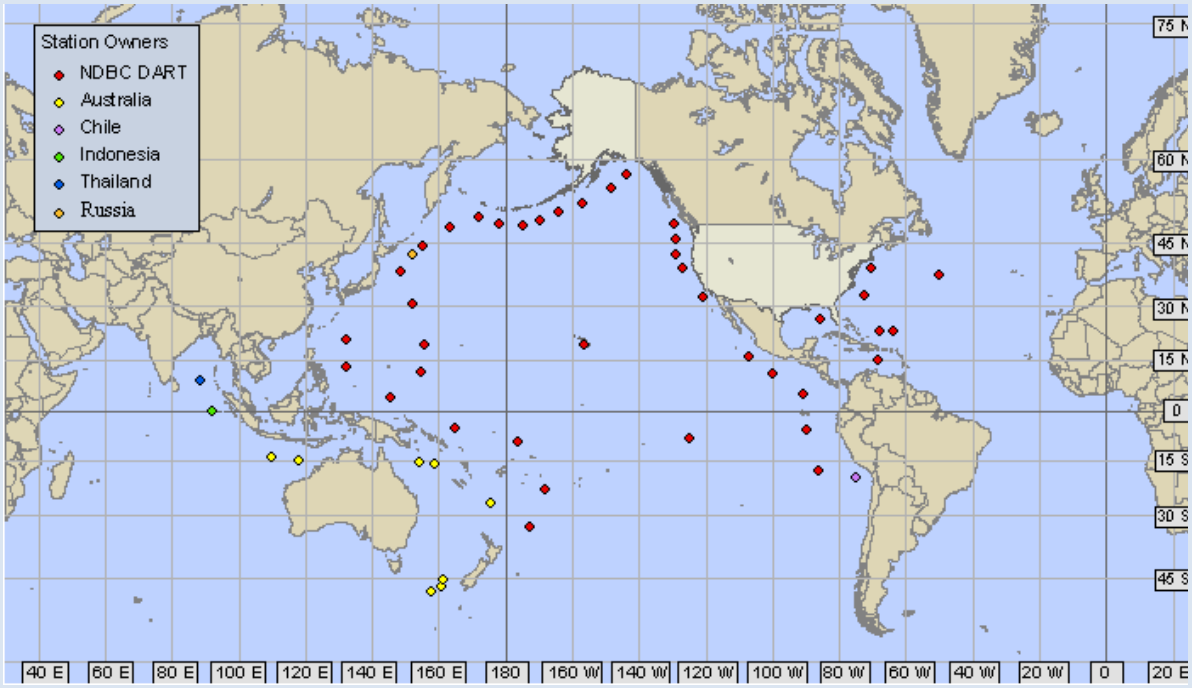
Les tsunamimètres (*Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis*, DART®)



La Bouée DART®.

Source : NOAA.

Le système DART® permet la détection en temps réel des tsunamis en mer. Il s'agit d'un ensemble composé d'un capteur de pression placé au fond de la mer, et d'une bouée de surface communicant les enregistrements du capteur par satellite [Gonzalez *et al.* 1998] (figure ci-contre). Le capteur enregistre les variations du niveau marin sur un intervalle de 15 secondes avec une précision de 1 mm. Il permet de filtrer les variations de courte longueur d'onde (houles) et de percevoir les grandes longueurs d'onde caractéristiques des tsunamis. Les informations enregistrées sont transmises aux centres d'alerte régionaux (ou à défaut au PTWC) qui en déduisent le passage ou non d'un tsunami. Ils sont essentiellement répartis dans les océans les plus affectés (figure ci-dessous).



Réseau DART® et instances/pays responsables.

Source : NOAA.

Figure 13. Les tsunamimètres (*Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis*, DART®).

L'alerte tsunami (***Tsunami Warning***) est le plus haut des niveaux d'alerte. Elle est déclenchée lorsqu'une menace imminente de tsunami est évaluée suite à un séisme de forte magnitude enregistré en mer, ou lorsqu'un tsunami potentiellement destructeur a été détecté. Son émission a pour but de conseiller aux pays concernés la prise de mesures de mise en sureté des enjeux humains ou matériels. Ce bulletin est mis à jour au moins toutes les heures pour confirmer, étendre, restreindre ou mettre fin à l'état d'alerte.

Lorsque des Etats sont situés à moins de 3 heures de temps de trajet théorique d'un tsunami, ils passent de l'état de veille (*watch*) à celui d'alerte (*warning*). Dans tous les cas les messages d'alerte régionaux précisent quels pays sont en veille et quels pays sont en alerte. Ils renseignent également les pays concernés des horaires théoriques d'arrivée des tsunamis sur leurs côtes. Pendant la propagation du tsunami, certains pays peuvent donc passer de l'état de veille à celui d'alerte, le tsunami étant dès lors à moins de 3 heures de leurs côtes. On distingue deux types de bulletins d'alerte régionaux : (1) le ***Fixed Regional Warning*** informe les pays situés à moins de 1000km de l'épicentre du séisme d'un niveau d'alerte ; et (2) le ***Expanding Regional Warning*** place les pays situés à moins de 3 heures du front du tsunami en état d'alerte, et ceux situés entre 3 et 6 heures de temps de trajet du tsunami en état de veille. Toutes les heures, des bulletins fournissent une mise à jour des pays concernés par l'alerte ou la veille.

Enfin, les **marégraphes** situés à terre apportent des informations quand aux effets enregistrés à la côte. Situés à la côte, ils permettent de suivre en temps réel les effets d'un tsunami à la côte lorsque les marégraphes sont communicants (liaison satellite), et que leur pas d'échantillonnage est suffisamment précis (≤5 min). Les informations recueillies par les marégraphes peuvent être suivis en temps réel par n'importe qui ayant un accès à Internet.

On peut notamment citer le réseau *Global Sea Level Observing System,* dérivé du *Global Level of the Sea Surface* (GLOSS[4]) et, plus récent, le système rassemblant les données GLOSS et celles des différents systèmes d'alerte régionaux, baptisé *Sea Level Station Monitoring Facility* (SLSMF[5]), également piloté par la COI. Ce dernier propose une observation en temps réel des mesures des marégraphes du monde entier ainsi qu'une consultation des mesures enregistrées par le passé.

[4] Pour plus d'information : **http://www.gloss-sealevel.org/**.
[5] Pour plus d'information : **http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/**.

La Figure 14 illustre un exemple d'extraction de la SLSMF détaillant à titre d'exemple les caractéristiques techniques du marégraphe de la Pointe des Galets à La Réunion, ainsi que les variations du niveau de la mer qu'il a enregistrées lors du passage du tsunami du 26 octobre 2010.

Un traitement du signal par régression polynomiale permet de « retirer » du signal la « marée normale » et d'isoler les variations « anormales » (Figure 15).

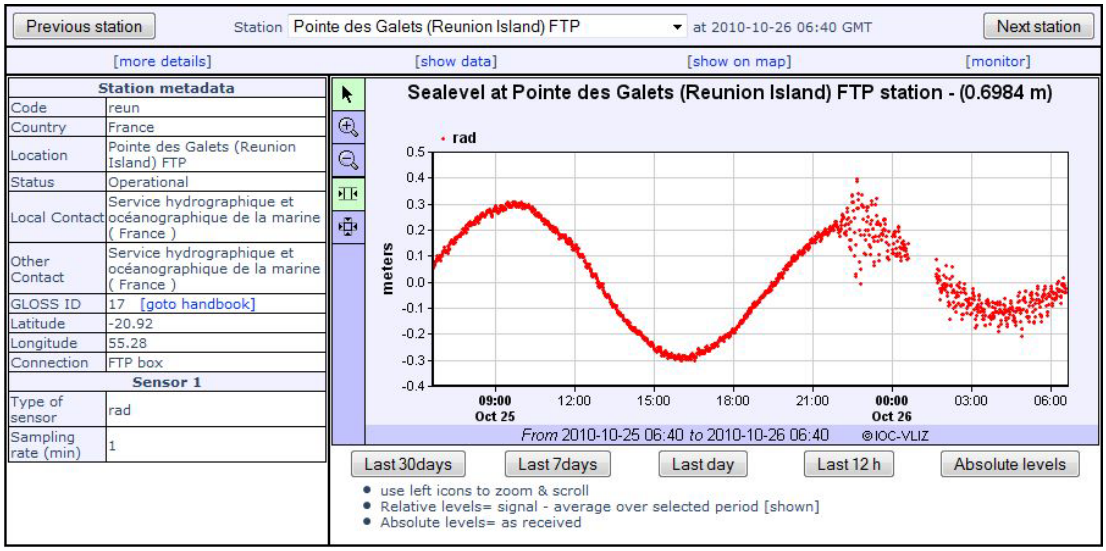


Figure 14. Marégramme illustrant l'enregistrement du tsunami du 26 octobre 2010 par le marégraphe de la Pointe des Galets (La Réunion).

Source : capture d'écran du *Sea Level Station Monitoring Facility* (http://www.ioc-sealevelmonitoring.org).

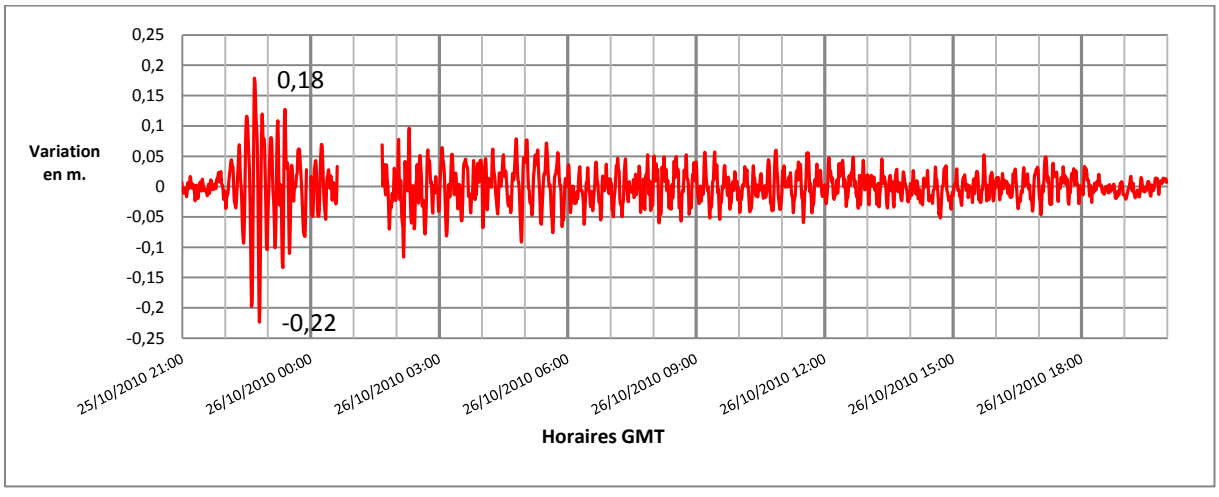


Figure 15. Marégramme corrigé de l'enregistrement du tsunami du 26 octobre 2010 par le marégraphe de la Pointe des Galets (La Réunion).

Source : issu du traitement de données *Sea Level Station Monitoring Facility* (http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/).

On peut ainsi évaluer les variations du niveau océanique caractéristiques du tsunami étudié hors marée. Dans cet exemple, l'amplitude du tsunami est de 40cm de crête (+0,18) à creux (-0,22) avec un enregistrement toutes les minutes dans le bassin du port de la Pointe des Galets.

1.2.2 L'alerte descendante en France : de la réception de l'alerte par l'État à la mise en sureté des populations concernées

Dès réception du message d'alerte en provenance des TWC, l'État est responsable des mesures de protection à entreprendre pour ses populations. En France, territoire qui nous intéresse, c'est la Défense qui est en charge de la coordination des moyens de sécurité civile[6].

Selon l'article 1 de la loi n°2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile, la sécurité civile a pour objet la **prévention des risques** de toute nature, l'**information** et l'**alerte des populations** ainsi que la **protection des personnes, des biens et de l'environnement** par la **préparation** et la mise en œuvre de **mesures** et de **moyens** appropriés relevant de l'État, des collectivités territoriales et les personnes publiques ou privées.

Le territoire français est découpé en plusieurs « zones de défense et de sécurité[7] » dirigées par le **Préfet** de la Région - ou le **Haut Commissaire** du territoire - du siège de la zone. Ces hauts fonctionnaires sont assistés pour les questions de sécurité civile par le **chef d'état-major de zone** et d'autres personnels dans le cadre d'un **comité de défense de zone**[8]. Concernant le risque tsunami, celui-ci affectant l'ensemble des bassins marins et océaniques, 9 zones de défense et de sécurité sont concernées, à savoir l'ensemble des zones côtières (Tableau 2).

Chaque zone possède - en théorie - dans son plan d'**O**rganisation de la **R**éponse de **SÉ**curité **C**ivile (plan **ORSEC**) de dispositifs spécifiques « tsunami ».

Les dispositifs spécifiques ORSEC les plus aboutis sont sans doute ceux de la Polynésie-Française, premier territoire à s'être préoccupé de sa gestion du risque tsunami après les années 1960 et l'impact du tsunami du Chili [Vitousek 1963 ; Schindelé *et al.* 2006]. Ces dispositifs, dans leur version du 15/09/2010, se présentent sous la forme d'un « Plan de Secours Spécialisé tsunami ». Ce dernier a pour but de « *permettre dans des délais qui peuvent s'avérer limités, la mise en sécurité des personnes par une diffusion de l'alerte adaptée et la mise en place, en cas de besoin, d'un dispositif de secours adapté aux circonstances grâce à des mesures de prévention, aux modalités d'une alerte précoce, à l'organisation des secours avec l'indication des missions pour chaque Service* ». Son déclenchement est décidé par le Haut-commissaire selon les recommandations du Laboratoire de Géophysique de Pamatai, organe du Commissariat à l'Energie Atomique, ou à défaut par le PTWC.

[6] Décrets n°62-207 du 24 février 1962 puis n°67-897 du 12 octobre 1967.
[7] Décrets n°50-1189 du 29 septembre 1950 relatif à l'organisation de la défense en surface du territoire métropolitain et n°2010-224 et 2010-225 du 4 mars 2010.
[8] Code de la défense, art. R*1311-25.

Les dispositifs spécifiques tsunami décrivent 4 phases d'alertes (numérotées de 1 à 4) et une phase de fin d'alerte (numérotée « 0 »).

Toutes collectivités confondues, le niveau d'alerte est dans la plupart des cas décidé en fonction de la magnitude du séisme et de sa localisation, en se basant sur l'historique - parfois succinct - de l'aléa. A noter que les dispositifs spécifiques « tsunami » sont en cours de rédaction dans la plupart des collectivités françaises et ne sont donc pas tous encore arrêtés par les autorités préfectorales ou les hauts-commissariats.

Tableau 2. Zones de défense et de sécurité concernées par le risque tsunami en France.

Source : Code de la défense, articles R*1211-4 et R. 1681-2.

Bassin	TWC	Nom de la zone	Siège	Ressort territorial	Haut-fonctionnaire responsable
Atlantique	NEAMTWC	Nord	Lille	Nord-Pas-de-Calais, Picardie	Préfet de Nord-Pas-de-Calais, préfet du Nord
		Ouest	Rennes	Basse-Normandie, Bretagne, Centre, Haute-Normandie, Pays de la Loire	Préfet de Bretagne, préfet d'Ille-et-Vilaine
		Sud-Ouest	Bordeaux	Aquitaine, Limousin, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes	Préfet d'Aquitaine, préfet de la Gironde
Méditerranée		Sud	Marseille	Corse, Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte d'Azur	Préfet de Provence-Alpes-Côte d'Azur, préfet des Bouches-du-Rhône
Caraïbes	CTWC	Antilles	Fort-de-France	Guadeloupe, Martinique, Saint-Barthélemy, Saint-Martin	Préfet de la Martinique
		Guyane	Cayenne	Guyane	Préfet de Guyane
Océan Indien	IOTWC	Sud de l'Océan Indien	Saint-Denis	La Réunion, Mayotte, Terres australes et antarctiques françaises	Préfet de La Réunion
Pacifique	PTWC	Nouvelle-Calédonie	Nouméa	Nouvelle-Calédonie, Wallis-et-Futuna	Haut-commissaire de la République en Nouvelle-Calédonie
		Polynésie française	Papeete	Polynésie française	Haut-commissaire de la République en Polynésie française

Conclusion du chapitre

L'aléa tsunami apparaît complexe dans la mesure où différentes déstabilisations de masses peuvent en être à l'origine : séismes, glissements aériens ou sous-marins, éruptions volcaniques ou encore chutes de météorites. Ces différentes sources peuvent être combinées et rendent ainsi les mesures de surveillance et d'alerte complexes. Les effets de tsunamis passés recensés en France démontrent un manque flagrant de recul historique, voire une absence de synthèses sur certains territoires que seules des investigations de terrain et d'archives peuvent combler.

Un système d'alerte existe à l'échelle du globe et permet aux autorités des collectivités françaises de recevoir des bulletins d'information en cas de menace. Le manque de recul historique sur l'aléa ne permet toutefois pas à ces autorités de déterminer avec précision quels effets sont à attendre sur leurs littoraux, ni de savoir quelles populations sont exposées. Enfin, très peu de collectivités ont identifié des zones refuge en cas de nécessité d'évacuation.

Ainsi, un second chapitre s'intéresse à l'évaluation des variables qui permettent de mettre en évidence quels secteurs sont les plus exposés, quels enjeux humains et structurels y sont présents, et enfin, quels outils permettent de préparer la mise en sureté des populations.

Chapitre 2e. La nécessité d'une méthode d'évaluation intégrée par scénarios de risques

La démarche scientifique intégrée ici proposée se définit par une fédération de l'ensemble des ressources à même de résoudre la question complexe de l'évaluation du risque à travers ses multiples composantes, c'est-à-dire le rassemblement des spécialités (et donc des spécialistes) touchant à l'évaluation des composantes du risque au sein d'un projet commun, d'un terrain d'étude commun. Cette intégration est essentielle afin de valoriser des actions trop souvent isolées des spécialistes des sciences sociales (histoire, géographie, psychologie, etc.) et des sciences physiques (géophysique, sédimentologie, sciences de l'ingénieur, etc.). Elle implique l'intégration de nombreuses données, de méthodes et de résultats à même d'apporter un outil d'aide à la décision pour les opérationnels.

2.1 Démarche et variables d'un scénario de risque

L'évaluation des vulnérabilités d'un territoire peut se faire selon deux approches : (1) par retour d'expériences (RETEX), donc *a posteriori* (« démarche rétrospective »), en étudiant les dégâts causés lors d'événements passés ; ou (2) par l'évaluation *a priori* (ou « démarche prospective ») des dommages potentiels pouvant être subis par des enjeux selon un ou plusieurs scénarios d'aléas probables [Leone 2007].

L'évaluation par RETEX se focalise ainsi sur certains événements spécifiques ayant causé des dommages significatifs. Les catalogues d'événements passés sur les territoires français ne renseignent que certains tsunamis ayant submergé des espaces autres que les bassins portuaires : ceux de Saint-Paul de La Réunion en 1883 (source volcanique, *runup* de 7 m), d'Antibes en 1979 (source gravitaire, *runup* de 3,5 m), et enfin de Mayotte en 2004 (source sismique, surcote de 4,5 m). Ces événements n'ont pas fait l'objet de RETEX précis délimitant les zones submergées à l'exception de l'événement de 1979 [Sahal et Lemahieu 2011]. Dans tous les cas, ces événements n'ont détruit aucun bâtiment et n'ont pas engendré de pertes humaines directement imputables à la submersion, à l'exception d'Antibes, où une personne, fortement vulnérable de par son âge et sa localisation au moment des faits a trouvé la mort. On peut considérer que cette quasi absence de pertes humaines est purement contextuelle : dans le cas de Saint-Paul, la ville est encore peu développée en 1883, les plages ne font pas encore l'objet d'une occupation significative comme c'est le cas aujourd'hui. À

Mayotte, les espaces littoraux sont peu occupés : absence de tourisme dans les zones impactées, activités de loisir peu présentes sur les littoraux. Enfin à Antibes, l'événement s'est produit en basse saison (octobre), un jour peu ensoleillé avec par conséquent des plages très peu fréquentées.

L'évaluation par RETEX permet ainsi de mieux comprendre les processus à l'origine de dommages subis dans le passé. La démarche proposée dans cette thèse s'appui sur ces RETEX afin de bâtir des scénarios de référence pour une évaluation du risques. Il s'agit donc ici d'**évaluations *a priori* d'impacts potentiels selon des scénarios fondés sur des événements passés**. Ces événements déjà observés constituent ainsi des scénarios d'aléa que l'on modélise. Les enjeux, spatialisés de manière dynamique, sont confrontés à l'aléa. Enfin, on évalue les capacités d'évacuation des zones exposées selon une approche dynamique, permettant ainsi d'évaluer les conséquences d'une évacuation sur l'exposition des enjeux. La Figure 16 présente l'ensemble des variables prises en compte dans les étapes de mise en œuvre de la démarche.

Une première étape d'évaluation consiste ainsi à reconstituer l'historique de l'aléa. De nombreuses sources d'information sont utilisées afin d'évaluer les dégâts occasionnés par des tsunamis passés, l'objectif étant de tenter de dégager une corrélation « localisation de la source/magnitude/effets à la côte », et de construire des scénarios d'aléa crédibles qui seront modélisés. Une seconde étape consiste à évaluer les enjeux humains et structurels d'un site exposé. Là encore, l'historique de l'aléa intervient, notamment dans la sélection d'un site d'application. L'étude spatio-temporelle des enjeux permet de capter le rythme de vie de l'espace étudié et de dégager un scénario temporel maximisant l'exposition humaine par le recensement dynamique de ses enjeux. Une troisième étape d'évaluation consiste à bâtir un scénario de gestion de crise à travers l'étude des dispositifs spécifiques adoptés par le territoire concerné et des retours d'expérience qui ont pu mettre en relief leurs limites. Une fois l'ensemble de ces évaluations menées et les choix de scénarios validés, on étudie l'impact de l'aléa sur les enjeux dans le contexte de gestion de crise choisi, aboutissant à une cartographie des dommages potentiels.

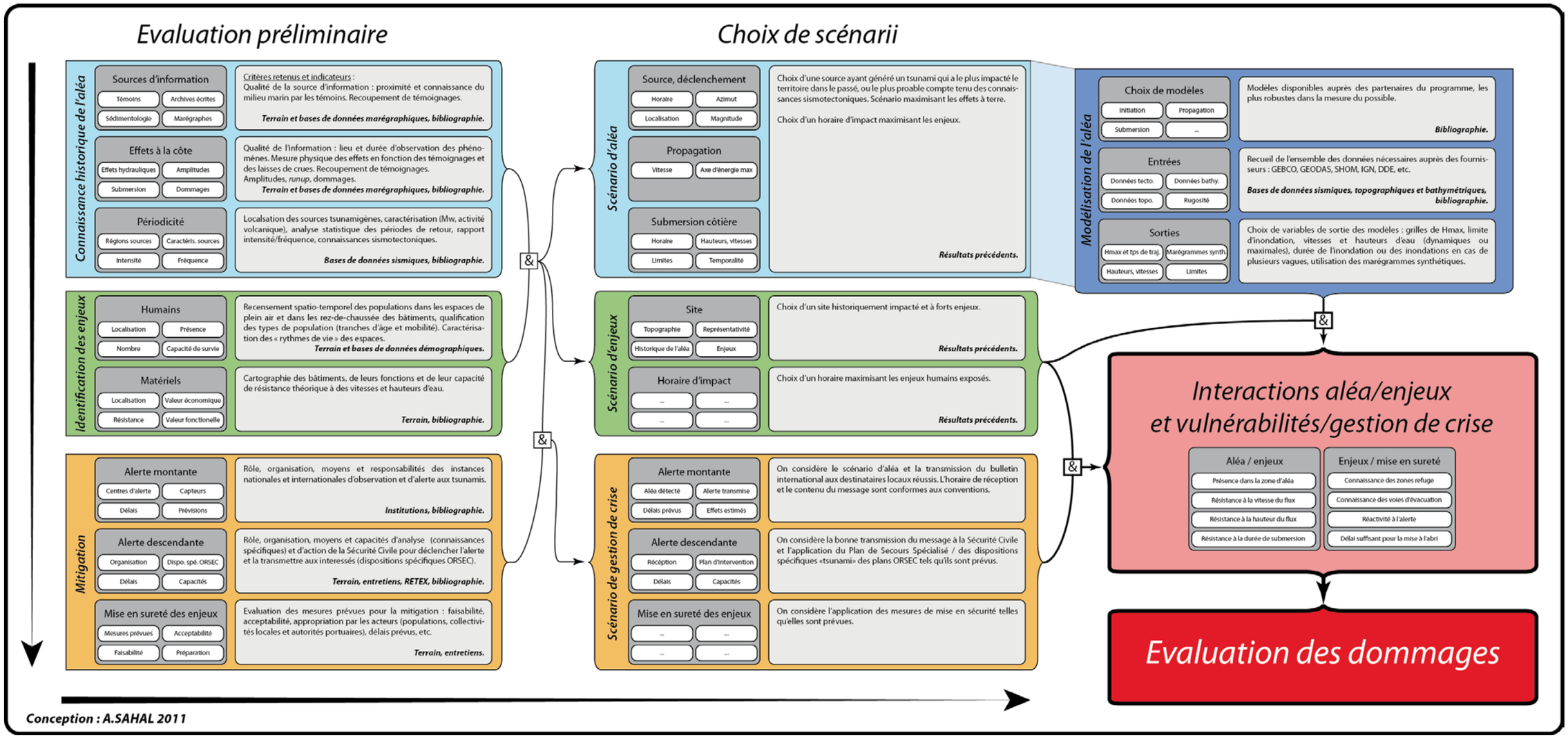


Figure 16. Etapes et variables d'une démarche d'évaluation intégrée basée sur des scénarios de risque.

2.2 Évaluations préliminaires

Comme cela a été souligné dans un premier chapitre, la connaissance de l'aléa historique constitue la base de toute évaluation du risque en vue de l'établissement de scénarios de référence.

2.2.1 Évaluation préliminaire de l'aléa

Trois approches complémentaires permettent de retracer l'historique 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.

2.2.1.1 *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 [Borerro *et al.* 1997], et plus récemment mises en œuvre par Okal et Fritz [Okal *et al.* 2002b ; Okal *et al.* 2006 ; Fritz et Okal 2008], 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 (plus particulièrement en Nouvelle-Calédonie) 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 cette thèse 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.

2.2.1.2 *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 (cf. liste des périodiques consultés par territoire présentée en Annexe 3, p. XXI), 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].

2.2.1.3 *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 [Mastronuzzi et Sanso 2000 ; Mhammdi *et al.* 2008 ; Spiske *et al.* 2008 ; Barthomeuf *et al.* 2011]. 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 et Borrero 2010]. La Figure 17 illustre cette turbidité et la manière dont les modèles peuvent la reconstituer.

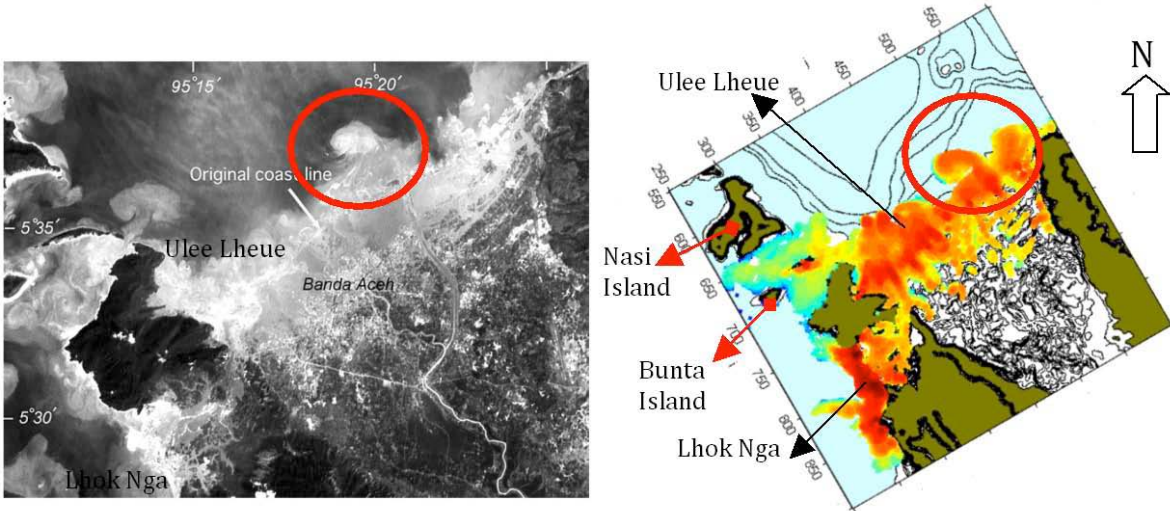


Figure 17. Image satellite (SPOT2) illustrant la répartition de la matière en suspension quatre heures post-séisme à Banda Aceh bien reproduite par le modèle de Prasetya et Borrero [2010].

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].

1. Extension à toutes les côtes d'accumulation affectées par le tsunami ;
2. Taille décroissante avec l'altitude et la distance par rapport à la côte ;
3. Stratification interne avec des unités inférieures plus grossières ;
4. Discontinuité avec le substratum, ce dernier présentant parfois des formes d'érosion ;
5. Granulométrie variant des sables fins aux blocs plurimétriques ;
6. Richesse en bioclastes (coquilles, fragments de coraux etc.) provenant de la mer, fragments de sol, de plantes et de bois ;
7. Imbrication des sédiments vers l'amont (*runup*) comme vers l'aval (*backwash*)

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 et 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 17, p. 46). Ces approches ont été mises en œuvre dans le cadre du programme PREPARTOI.

2.2.1.4 *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 18).

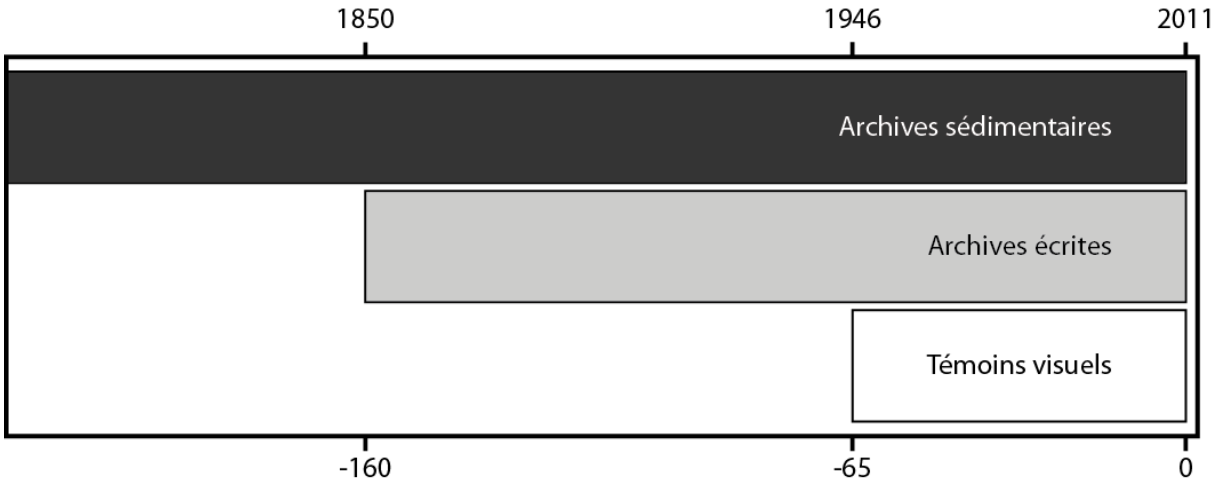


Figure 18. Intervalles de temps couverts par les différentes méthodes d'étude des tsunamis passés.

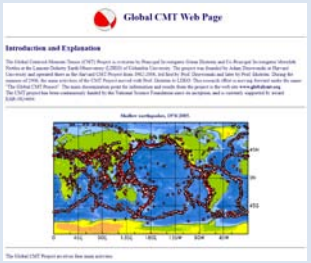
Tandis que les témoignages recueillis sur le terrain ne permettent que très rarement de quantifier des effets remontant à plus de 65 ans, les archives écrites permettent (selon leur état de conservation) de remonter à près de 160 ans, du moins pour la presse ancienne. Pour ce qui est de la quantification 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 (cf. 1.2.1.2, p. 30) peut être rappelé pour constater *a posteriori* les effets enregistrés à la côte (jusque vers le milieu du XIX^{ème} siècle.

2.2.1.5 *Un exemple de campagne de terrain et d'appel à témoin : méthode mise en œuvre en Nouvelle-Calédonie*

En Nouvelle-Calédonie, une liste des tsunamis ayant potentiellement eu un impact sur le territoire et des séismes potentiellement tsunamigènes a été construite à partir de catalogues [Heck 1947 ; Soloviev et Go 1974 ; Louat et Baldassari 1989 ; Dunbar 2011]. Les tsunamis ayant eu un impact majeur sur l'ensemble du Pacifique ont été considérés, tout comme les séismes locaux (magnitude supérieure à Mw = 7 mesurées dans un rayon de 600 km. autour de la Nouvelle-Calédonie), dans l'hypothèse de survenance de conséquences hydrologiques exclusivement locales et donc non recensées dans la littérature scientifique.

Sites internet d'informations sismiques internationaux :

United States Geological Survey (USGS), National Earthquake Information Center (NEIC)	Services fournissant des informations quasi-instantanées sur les premiers paramètres des séismes (estimations).	http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/ http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/
Global Centroid-Moment-Tensor	Délai de 3 à 4 mois pour des informations précises sur les paramètres des séismes.	 http://www.globalcmt.org/
National Geophysical Data Center (NGDC)	Délai indéterminé mais base de données cartographiques intégrant les dommages consécutifs aux séismes et tsunamis consécutifs.	http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/earthqk.shtml

Cette liste a permis une recherche plus ciblée dans le temps au sein des archives. L'ensemble des journaux d'époque a ainsi pu être consulté depuis la date J d'occurrence potentielle d'un tsunami jusqu'à J+10. Cette liste ainsi que les archives météorologiques (Météo-France) ont été utilisées pour confronter les témoignages, et notamment pour exclure des observations tout raz de marée observé

en contexte cyclonique. Un appel à témoin a été diffusé sur l'ensemble du territoire pendant toute la campagne d'investigation. Plusieurs médias (télévision, presse écrite et radio) ont ainsi relayé l'appel et informé les populations côtières du passage en tribus de la mission [Sahal 2008 ; Sahal *et al.* 2010]. La Figure 19 illustre l'appel à témoins diffusé sous format A4 imprimé.

Figure 19. Appel à témoins affiché en Nouvelle-Calédonie.

Les administrations coutumières, gouvernementales et de l'État ont activement participé à l'appel à témoins en affichant et en diffusant l'appel dans les espaces d'accueil du public (halls de mairies, subdivisions administratives, casernes de gendarmeries et de pompiers, conseils coutumiers, dispensaires, etc.) de telle sorte qu'il soit visible par le plus grand nombre.

La campagne médiatique a été l'occasion de lancer l'appel à témoins et de présenter les objectifs de la mission.

Campagne médiatique « Appel à témoins » en Nouvelle-Calédonie (04/2008 - 07/2008)

- **Télévision**
  - ✓ **RFO Nouvelle-Calédonie**, interview diffusée au Journal du soir du 8 avril 2008 ;
  - ✓ **RFO Wallis-et-Futuna**, invité du Journal du soir du 30 mai 2008.
- **Presse écrite**
  - ✓ **Les Nouvelles Calédoniennes**, « Un chercheur mesure le risque tsunami », n°11151, 17-18 mai 2008.
- **Radio**
  - ✓ **ABC / Radio Australia**, interview diffusée le 10 avril 2008 ;
  - ✓ **Radio Djiido**, diffusion d'un entretien avec témoin en tribu le 16 avril 2008 ;
  - ✓ **ABC / Radio Australia**, interview suite à séisme le 29 avril 2008 ;
  - ✓ **RFO (radio)**, interview, plusieurs diffusions ;
  - ✓ **Radio Rythme Bleu**, interview, plusieurs diffusions.

Cette campagne, réalisée en 2008 grâce à un financement du Secrétariat d'Etat à l'Outre-mer et de la Commission Française auprès de l'UNESCO, a également été l'occasion de présenter les « indices » qui laissent à penser qu'un tsunami pourrait arriver sur les côtes dans un court délai : fort tremblement de terre, retrait de la mer ou comportement anormal des animaux (agitation, fuite vers les hauteurs). La mission a également insisté sur la diffusion de ces indices lors de sa campagne de terrain.

L'enquête a recueilli toutes les observations assimilables à la survenue d'un tsunami, tels que la variation du niveau marin de manière asynchrone aux marées, en deçà ou au-delà de l'estran et hors contexte cyclonique, l'observation de tourbillons, de mascarets, de courants ascendants dans les rivières ou à l'inverse leur purge brutale, la rupture d'amarres, etc. La mission a concentré ses déplacements sur les secteurs potentiellement les plus exposés : Îles Loyautés, côte est de Grande Terre et Île des Pins. La côte ouest n'a pas été visitée car opposée à la fosse du Vanuatu et à l'ensemble du Pacifique, et par conséquent considérée comme plus faiblement exposée à l'aléa. Aucun témoin ne s'est par ailleurs manifesté sur cette côte.

Après le recueil des différents témoignages sur le terrain, ces derniers ont été confrontés à la liste des tsunamis avérés ou potentiels. Ce croisement a permis de valider ou non les données d'observation recueillies, à l'exception de tsunamis très locaux sans événement sismique majeur. L'utilisation des archives de presse écrite, des archevêchés, des États-Civils de Droit Commun et

Coutumier a permis d'identifier de manière plus précise les événements relatés, et/ou de compléter ces témoignages.

Les résultats de cette enquête sont présentés en Annexe 1 (p. III).

2.2.2 Évaluation préliminaire des enjeux

2.2.2.1 *Les notions d'enjeu et de vulnérabilité*

Le terme « **enjeu** » décrit les éléments potentiellement exposés à un aléa. Ils sont « en jeu », c'est-à-dire exposés, susceptibles d'être endommagés ou détruits. Cette notion recouvre celle de la valeur associée aux éléments exposés (valeur économique, sociale, patrimoniale, fonctionnelle, d'usage etc.) [Leone et al. 2010]. La notion de **vulnérabilité** est plus complexe : il s'agit de la propension à l'endommagement d'un enjeu. On distingue ainsi plusieurs types de vulnérabilités qui sont ici développées. Son opposé, la résilience, décrit la capacité d'un enjeu à se remettre de l'événement [Leone et Vinet 2006].

Dans le cadre de cette thèse et des différentes études qui la composent, l'enjeu qui est au centre de l'approche adoptée est l'individu. On s'intéresse à sa capacité de survie et à l'optimisation de cette dernière. Cette préoccupation (l'individu) est au centre du modèle conceptuel de vulnérabilité systémique développé par Leone [2007], où l'homme est l' « enjeu suprême à préserver », et placé à ce titre « au cœur du processus d'évaluation » des vulnérabilités (Figure 20).

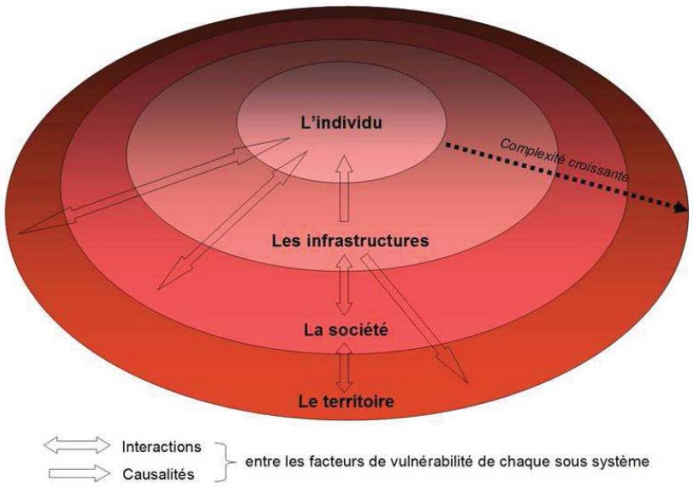


Figure 20. Modèle conceptuel du système vulnérable selon Leone [2007].

Selon Leone [2007], la vulnérabilité de l'individu (**vulnérabilité humaine**) est dépendante de la résistance du bâtiment où il se trouve (**vulnérabilité structurelle**), de facteurs intrinsèques (psychosociologiques et physiologiques) liés à la société à laquelle il appartient. Enfin, l'homme et le

milieu construit dans lequel il évolue appartiennent respectivement à des systèmes sociaux et territoriaux organisés présentant une **vulnérabilité fonctionnelle**, c'est-à-dire une propension à se voir désorganisés par un événement dommageable. La vulnérabilité est, toujours selon Leone [2007], largement dépendante des vulnérabilités humaines et structurelles et d'une multitude d'autres variables (géographiques, démographiques, institutionnelles).

On s'intéresse dans cette thèse aux deux éléments fondamentaux que sont les individus et les structures dans lesquelles ils sont présents (bâtiments), et qui conditionnent directement leur vulnérabilité physique, c'est-à-dire leur propension à être affectés physiquement par un tsunami.

Leone décrit les critères de vulnérabilité affectant les individus et les infrastructures (Tableau 3).

Tableau 3. Principaux facteurs et critères de vulnérabilité des sous-systèmes individu et infrastructures.

Source : extrait de Leone [2007].

Sous-systèmes vulnérables	Principaux critères de vulnérabilité	Facteurs déterminants
L'individu *(vulnérabilité intrinsèque)*	Représentations du risque (menaces, effets, espaces)	Psycho-sociologique
	Comportements potentiels	Psycho-sociologique
	Connaissance des mesures de protection et de prévention	Psycho-sociologique
	Vécu	Psycho-sociologique
	Résistance physique et mentale	Physiologique et psycho-sociologique
	Confiance dans les autorités	Psycho-sociologique
	Implantation géographique et la distance au danger	Géographique
	Accessibilité	Géographique
	Possibilité de fuite	Géographique
	Niveau de protection physique	Structural
Les infrastructures et leurs biens (ex. bâtiments et routes) *(vulnérabilité structurelle ou physique)*	Résistance physique	Structural
	Distance au danger	Géographique
	Entretien et contrôle	Politico-administratif

On constate l'importance de la perception et de la préparation au risque des individus (**facteurs psychosociologiques**) dans la variabilité de leur vulnérabilité : représentation, connaissance des mesures de protection, confiance dans les autorités sont autant de facteurs sur lesquels il est possible d'agir à plus ou moins long terme par des campagnes d'information et de prévention.

La localisation de l'individu (**facteurs géographiques**) conditionne logiquement son exposition à un aléa, tout comme sa possibilité d'évitement du phénomène, par la fuite ou l'abri. Ainsi, une **quantification des enjeux humains** sera développée. Enfin, la physiologie de l'individu influence sur sa capacité de résistance. Cette variabilité de la physiologie des individus est ici décrite par une **qualification des enjeux humains**.

2.2.2.2 *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.* [2011a ; 2011b ; 2011c] ont développé une échelle de destruction propre à l'aléa tsunami, une échelle dite « macro-tsunamique », fondée sur des méthodes employées dans le cas de cyclones [Stewart 2003], d'ouragans [Friedland *et al.* 2008], de séismes [Combescure *et al.* 2005] ou de crises volcaniques [Spence *et al.* 2005]. Cette échelle de destruction a permis dans le cadre du programme TSUNARISQUE[9] 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 21).

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)						

Figure 21. Typologie de la vulnérabilité structurelle du bâti proposée par Leone *et al.* à Banda Aceh, Indonésie.

Source : extrait de Léone *et al.* [2011a].

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.

[9] http://www.tsunarisque.cnrs.fr/

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 [Leone *et al.* 2011a].

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

Leone *et al.* [2011a ; 2011b ; 2011c] 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 [Papathoma et Dominey-Howes 2003 ; Papathoma *et al.* 2003 ; Dominey-Howes et Papathoma 2006 ; Dominey-Howes *et al.* 2009], 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.* [2011a ; 2011b]. 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 [Leone *et al.* 2011a ; 2011b], modèle qui est suivi et adapté dans cette thèse.

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

Ainsi, Leone *et al.* [2011a ; 2011b] 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) [Leone *et al.* 2011a] 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 4, 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 4. Typologie de la fonction des bâtiments et méthode de quantification de leur occupation.

	Type	Description	Méthode de quantification
BATIMENTS	HINDIV	Habitat individuel	Densité calculée par (population ilot / surface totale habitable dans l'ilot), ou distribution par classe de bâtiment.
	HCOL	Habitat collectif, immeuble	Densité calculée par (population ilot / surface totale habitable dans l'ilot), 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.
AUTRE	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 5).

Tableau 5. Typologie des espaces de plein air et méthode de peuplement.

	Type	Description	Méthode de peuplement
PLEIN AIR	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.
	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.

2.2.3 Évaluation préliminaire de la prévention : l'alerte descendante locale et les capacités de réponse des autorités

La capacité de réponse des autorités doit être évaluée dans le cadre d'une approche par scénarios de risque dans la mesure où les réponses institutionnelles influent directement sur l'exposition des enjeux humains.

Les RETEX consistent en une évaluation des capacités de réponse des institutions en situation de crise [Wybo et Kowalski 1998]. Il permettent ainsi d'évaluer les limites opérationnelles des mesures prévues dans les plans de prévention en vue de tirer des enseignements, de garder la mémoire des événements, d'identifier des pistes de progrès et de renforcer les liens entre les acteurs [DDSC 2006]. La pratique du RETEX s'inscrit dans un cadre réglementaire[10] qui en fait un « élément incontournable

[10] Articles 5 et 6 du décret n°2005-1157 du 13 septembre 2005 relatif au dispositif ORSEC et pris pour application de l'article 14 de la loi n°2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile.

de l'actualisation du dispositif ORSEC » [DDSC 2006]. Il faut ici entendre « actualisation » dans le sens d'une adaptation aux réalités vécues par les gestionnaires.

La méthode RETEX s'appuie sur un travail de terrain consistant à faire remonter toute information mettant en évidence les carences des dispositifs de gestion de crise, et ORSEC en ce qui nous concerne. Mains-courantes, archivage des documents, application SYNERGI[11], photos ou vidéos prises sur le terrain, trace des entrées/sorties de ressources et de logistique, coupures de presse, etc. constituent les différentes sources d'information de l'établissement du RETEX [DDSC 2006]. Par ailleurs, une évaluation de l'aléa et de ses effets doit être menée.

Dans le cadre de cette thèse et du programme PREPARTOI, un RETEX sur la gestion de crise du tsunami des 25-26 octobre 2010 à La Réunion[12] a été réalisé [Sahal et Morin sous presse] (cf. Annexe 4, p. XXV). Il présente l'apport possible de tels retours d'expérience pour comprendre les causes des dysfonctionnements de la gestion de crise et apporter des solutions pour leur amélioration. Il permet ainsi d'introduire les dysfonctionnements possibles de la gestion de crise dans des scénarios de risques.

2.3 Mise en place d'un scénario de risque

Plusieurs critères sont retenus pour définir les différents scénarios des composantes du risque. Le choix d'un scénario d'enjeux est fait en maximisant l'exposition humaine : on choisit le scénario d'enjeux le plus défavorable. Le choix des autres scénarios des composantes du risque est ici discuté.

2.3.1 Choix de scénarios d'aléa et modélisation

Le choix d'un scénario d'aléa peut se faire selon deux démarches : par reproduction d'un événement connu (approche déterministe) ou selon sa probabilité d'occurrence dans l'avenir (approche probabiliste). La première démarche est de loin la plus aisée si toutefois l'événement passé de référence est suffisamment documenté : on reproduit l'événement par modélisation dans le but d'en déduire un impact sur des enjeux contemporains ou futurs. La modélisation est alors calée avec les observations connues, rendant la modélisation bien plus précise. La seconde démarche est plus délicate dans la mesure où elle nécessite une connaissance précise de la sismo-tectonique des zones

[11] Interface logicielle permettant à l'ensemble des acteurs de la gestion de crise qui en sont équipés de suivre les actions engagées par chacun d'entre eux.
[12] Le lecteur curieux de précisions sur les effets de cet événement pourra se référer au paragraphe 4.1.1.7, p. 121.

sources : le géophysicien évalue la probabilité d'occurrence d'un événement sismo-tectonique en fonction des ajustements attendus. Il s'agit alors d'une évaluation probabiliste de l'aléa sismique.

La méthode employée par le CEA/DASE[13] pour modéliser l'initiation, la propagation et les effets à la côte de tsunamis a été développée depuis plusieurs années avec pour objectif l'étude de l'aléa tsunami dans des régions comme la Polynésie Française [Sladen *et al.* 2007] et la Mer Méditerranée [Alasset *et al.* 2006 ; Roger et Hébert 2008], mais également pour comprendre les caractéristiques de la source des tsunamis d'origine sismique par inversion du modèle (des observations à la côte jusqu'à la source qui a généré le tsunami) [Hébert *et al.* 2005 ; Sladen et Hébert 2008].

La méthode consiste dans un premier temps à modéliser la déformation co-sismique du plancher océanique (la source). Celle-ci est calculée avec la méthode de dislocation élastique d'Okada (1985), et considère une déformation homogène et instantanée de la colonne d'eau sus-jacente (Figure 22).

La caractérisation de la source est l'étape la plus délicate de la modélisation, dans la mesure où son paramétrage a des conséquences directes sur les résultats obtenus avec le modèle. Lorsque les paramètres de la source sont précisément connus, on ajuste le modèle en se basant sur les observations à la côte, et donc *a posteriori*, afin de calibrer le modèle. Lorsque les paramètres de la source sont peu connus, on fait fonctionner le modèle calibré par inversion en y entrant les effets observés à la côte pour en déduire les caractéristiques de la source. Pour une évaluation *a priori*, des effets potentiels d'un tsunami hypothétique, une étude sismo-tectonique poussée est menée afin de mettre en évidence les déformations co-sismiques déclencheuses de tsunamis les plus probables.

La propagation est modélisée par la résolution des équations de l'hydrodynamique, selon l'approximation non-linéaire des ondes longues, en appliquant le schéma numérique de différence finie de type Crank Nicolson sur des grilles imbriquées de définition de plus en plus fine à l'approche des côtes, afin de considérer les effets d'amplification à la côte (*shoaling effect*). Il faut noter que pour une telle propagation à la côte, la propagation du tsunami n'est pas dispersive (approximation), et donc l'équation de célérité ne dépend que de la profondeur [Roger 2011]. Les phénomènes de friction de fond ne sont pas considérés.

La modélisation permet la production d'une cartographie de la propagation du tsunami et de la directivité de son énergie (Figure 23). Ainsi, la modélisation des hauteurs d'eau maximales (Hmax) fournit des indications sur les littoraux les plus exposés à une hausse du niveau océanique ou marin.

[13] Le CEA/DASE est partenaire des différents programmes au sein desquels cette thèse s'inscrit.

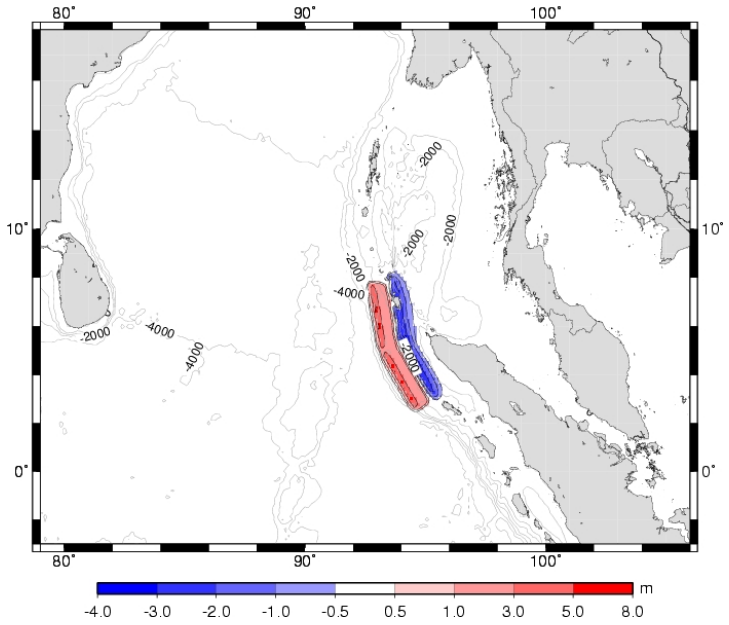


Figure 22 Déformation initiale utilisée pour la modélisation du tsunami du 26 décembre 2004.

Source : CEA/DASE DIF/DASE, disponible en ligne http://www-dase.cea.fr/actu/dossiers_scientifiques/2004-12-26/index.html.

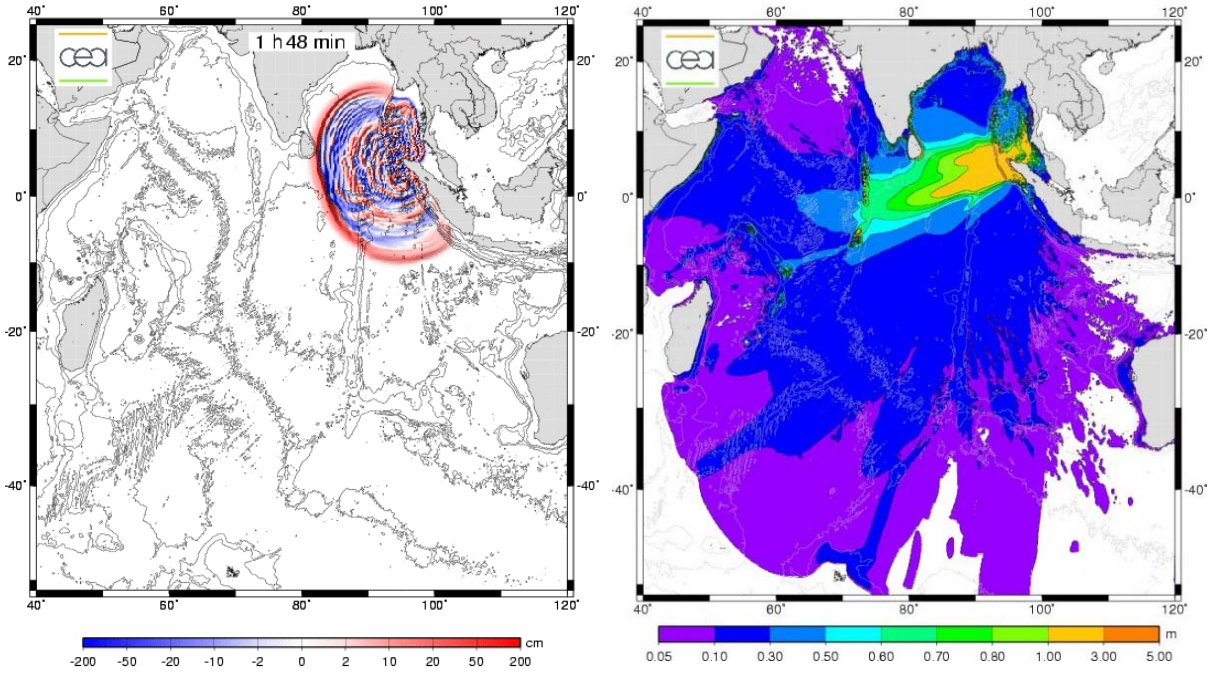


Figure 23. Propagation du tsunami du 26 décembre 2004, 1h48 post-séisme et hauteurs d'eau maximales en mer (Hmax).

Source : CEA/DASE DIF/DASE, disponible en ligne http://www-dase.cea.fr/actu/dossiers_scientifiques/2004-12-26/index.html.

Plus les données morphométriques (topographie et bathymétrie) sont précises, et plus la modélisation sera précise. Dans le cas des modélisations réalisées dans le cadre de cette thèse, on utilise, lorsqu'elles sont disponibles, les données IGN Litto3D qui fournissent des altitudes précises à

plus ou moins 20 cm. à un pas de 1 m. et des données bathymétriques précises à plus ou moins 30 cm. à un pas de 5 m. (cf. Annexe 5, p. XXIX).

La modélisation de la submersion côtière est plus délicate dans la mesure où elle pose le problème de la friction (ou rugosité, *roughness*) provoquée par les surfaces émergées et différente de celle des surfaces immergées : végétation, bâtiments et autre objets influencent la propagation à terre en rendant le flux turbulent et en le ralentissant par dissipation d'énergie [Bourgeois *et al.* 1999]. Aussi dans le cas d'inondations, plus généralement, certaines équipes de recherche se sont penchées sur la quantification de cette rugosité [Remond *et al.* 1999 ; King *et al.* 2001].

Différents indices de rugosité existent, et c'est le plus souvent celui de Manning qui est utilisé pour la modélisation de la submersion côtière dans le cas des tsunamis [Nakamura 2006]. Le modèle du CEA/DASE utilise un indice comparable, celui de Chézy (Tableau 6).

Tableau 6. Coefficients de rugosité de Manning et de Chézy pour différents matériaux de surface.

Source : http://www.engineeringtoolbox.com/mannings-roughness-d_799.html.

Matériau de surface	Coefficient de rugosité de Manning (*n*)	Coefficient de rugosité de Chézy
Asphalte	0,016	150
Béton armé / bâtiments « indestructibles » / infranchissable	1	0
Cours d'eau naturels - grands fleuves	0,035	
Cours d'eau naturels - propres et droits	0,03	
Cours d'eau naturels - stagnant ou lent et à bassins profonds	0,04	40
Plaines d'inondation - arbres	0,15	15
Plaines d'inondation - broussailles, taillis denses	0,075	
Plaines d'inondation - broussailles, taillis peu denses	0,05	30
Plaines d'inondation - pâturages, terres agricoles	0,035	75
Terre végétale nue	0,025	130
Eau (PLEINE MER)		1 000 000 000 000 (dans le code CEA)
Plage		45
Terrain vague, zone d'activité		35
Terrain de sport		100
Jardin		30

Nakamura, par exemple, utilise sur l'ensemble de la zone d'étude émergée le coefficient de Manning n = 0,025 [Nakamura 2006], ce qui équivaut à un substrat terreux non végétalisé.

Lors de la modélisation, il est ici proposé d'attribuer à chaque cellule une rugosité propre correspondante à son occupation, comme cela a été fait par Mader *et al.* [1992], avec pour objectif une amélioration de la prise en compte de la friction par le modèle. En sortie, la modélisation de la submersion côtière fournit pour chaque maille de la grille utilisée une hauteur d'eau et une vitesse

de flux à tout instant *t*. Il est à noter que, pour l'instant, le code du CEA/DASE ne peut intégrer une variation spatiale de la rugosité. Sa cartographie est toutefois proposée dans cette thèse, dans la perspective d'une évolution future, ou de l'utilisation d'un autre modèle.

2.3.2 Choix de scénarios de gestion de crise et prise en compte des évacuations

On considère les dispositions spécifiques ORSEC (**O**rganisation de la **R**éponse des **SEC**ours) prévues dans le territoire étudié comme mises en œuvre. On s'intéresse également à la question de l'évacuation des populations, peu souvent considérée dans les dispositions spécifiques ORSEC des collectivités françaises, et qui dans le cas d'un scénario de gestion de crise peut être modélisée. Il s'agit ici d'évaluer les capacités d'évacuations qui pourraient être mises en œuvre en déterminant quels délais sont nécessaires à des piétons pour évacuer les zones exposées.

Qu'il s'agisse d'évacuer une classe d'école, un bâtiment de plusieurs étages ou une agglomération entière, l'étude des comportements humains en condition de stress est essentielle pour anticiper ces situations bien souvent déclencheuses de chaos et de pertes humaines par piétinement (*stampede*) ou asphyxie. On peut notamment évoquer les exemples des stades et lieux de concert, des ponts et tunnels, etc. souvent sujets à des pertes humaines lors d'évacuations non planifiées. La « Love Parade » allemande de Duisbourg le 25 juillet 2010 en est une illustration récente [LeMonde.fr *et al.* 2010].

La communauté scientifique s'est attachée depuis les années 1990 à tenter de comprendre et de modéliser les comportements humains lors d'évacuations. Les modèles ainsi développés permettent de quantifier les temps d'évacuation par simulation. Pidd *et al.* [1996] distinguent plusieurs approches de la modélisation des évacuations :

(1) les *micro-simulateurs* (plus récemment rebaptisés « Systèmes Multi Agents », SMA), qui suivent le mouvement propre à chaque individu (véhicule et/ou piéton) sur un réseau afin de rejoindre les zones refuge selon un itinéraire spontané ou contraint (autorités, ruptures, etc.). Il tient ainsi compte des phénomènes réels tels que la congestion, l'intervention de la police ou les pannes de certains véhicules entraînant le blocage du processus d'évacuation. Ils sont dynamiques dans la mesure où le trajet de chaque individu tient compte de son environnement et du comportement des autres individus.

(2) les *macro-simulateurs,* qui se basent sur l'analogie hydrologique pour modéliser des flux dans un réseau. Ils ont l'inconvénient de ne pas considérer l'interaction entre individus et par conséquent ignorent les aléas propres aux évacuations : engorgement, panique, chaos, etc. Ils ont cependant

l'avantage de ne pas avoir à gérer par le calcul des phénomènes qui sont bien souvent aléatoires et complexes (interaction entre individus propres aux SMA). Leur paramétrage est fixe et non dynamique. Exemple : EESCAPE, ERT (Evacuation Route Tools).

(3) enfin, les *méso-simulateurs*, qui constituent un compromis entre les deux précédentes approches en considérant le mouvement de groupes d'individus et donc en modélisant les interactions entre groupes, tout en limitant les calculs afférents aux SMA.

Aujourd'hui, les capacités de calcul permettent de ne plus faire de compromis sur les choix méthodologiques et on se tourne de plus en plus vers les SMA lorsque l'on s'intéresse à des échelles fines. C'est désormais le paramétrage des SMA qui intervient dans la qualité des modélisations des évacuations. Ce paramétrage passe par l'étude et la modélisation du comportement des individus : temps de réaction, choix d'itinéraires, prise en compte de l'irrationalité et des caractéristiques socio-psychologiques propres de groupe.

On notera toutefois la complémentarité de ces approches : l'intérêt des macro-simulateurs pour évaluer dans un premier temps l'accessibilité « absolue » de zones refuge, puis celui des micro-simulateurs pour permettre d'évaluer l'accessibilité « relative » (c'est-à-dire prenant en compte le comportement des individus et leurs interactions) pour un aménagement cohérent des zones à évacuer et le choix de voies d'évacuation calibrées aux flux attendus.

À titre de comparaison, sont ici développés les cas de deux types de simulateurs (un macro- et un micro-simulateur) qui seront utilisés dans cette thèse dans l'évaluation des capacités d'évacuation.

2.3.2.1 *Les Macro-simulateurs et leur apport dans la modélisation des voies d'évacuation : l'exemple d'Evacuation Route Tools (ERT)*

Evacuation Route Tools a été créé dans le cadre du programme CRATER (***C**oastal **R**isk **A**nalysis of **T**sunamis and **E**nvironmental **R**emediation*) avec pour objectif la création et la diffusion d'un outil d'aide à la décision facilitant l'établissement de zones refuge et de voies d'évacuation. Cet outil, intégré à ArcGIS®, permet d'utiliser les bases de données géographiques disponibles (topographie, occupation du sol, etc.) afin d'étudier les temps de parcours nécessaires pour rejoindre des zones refuge [Laghi *et al.* 2006 ; Cavalletti *et al.* 2007][14] sans contraintes directives. Son principe de fonctionnement est fondé sur des concepts hydrologiques. Par analogie, dans un espace naturel, chaque portion de l'espace est caractérisée par une pente. Dans un espace de texture homogène, la

[14] Pour plus d'informations sur le programme CRATER : http://www.adpc.net/dms06/sub_proj4_3.php.

pente conditionne la vitesse de l'écoulement d'une goutte d'eau depuis son impact avec le sol jusqu'au niveau de base, c'est-à-dire l'exutoire, le point le plus bas de son « bassin versant ». On entend ici par bassin versant « la portion d'espace drainée à partir d'un seul exutoire bien identifié » [Cosandey et Robinson 2000]. Ici, la pente correspond à la vitesse de déplacement d'un piéton, la goutte d'eau à un piéton, le niveau de base à une zone refuge. On ne s'intéresse pas au parcours le plus direct, c'est-à-dire la plus courte distance géométrique, mais au parcours le plus rapide compte tenu des contraintes environnementales (**pente** et **type de revêtement** en l'occurrence). Ainsi, chaque portion de l'espace découpé en une matrice (ou grille composée de pixels) est caractérisée par un **coût en temps** pour la parcourir. Ce coût dépend de la nature du substrat et de la pente associée. Ainsi, plus la pente est importante et plus la texture du substrat rend son parcours difficile, plus le piéton est ralenti.

Pour caractériser la conservation de la vitesse possible en fonction de la pente, une discrétisation est faite selon les recommandations de Laghi *et al.* [2006] (Tableau 7).

Tableau 7. Coefficients de conservation de vitesse des classes de pente.

Source : adapté de Laghi *et al.* [2006].

Pente (en %)	Coefficient de conservation de la vitesse (en %)
0 à 3	100
3 à 6	85
6 à 9	70
9 à 12	55
12 à 15	45
15 à 18	40
18 à 21	35
21 à 24	30
24 à 27	25
27 à 30	20
30 à 33	17
33 à 36	14
36 à 39	13
39 à 42	12
42 à 45	11
45 à 48	10
> 48	0

Ainsi, on considère les espaces dont la pente est supérieure à 48% comme non empruntables dans un contexte d'évacuation.

Afin de caractériser l'occupation du sol de la zone d'intérêt, un travail de terrain est réalisé. On décrit chaque portion de l'espace praticable par un piéton par les caractéristiques de son substrat : route goudronnée, sentier graveleux et plage dans le cas du quartier de La Salis. On prend par conséquent le soin de retirer des espaces praticables tout espace clos (clôturé ou d'accès réglementé, etc.) ou

présentant un obstacle (bâtiments, véhicules en stationnement, etc.). Tout comme pour la pente, des coefficients de ralentissement sont attribués en suivant les préconisations de Laghi *et al.* [2006] et en déduisant des valeurs pour les espaces non caractérisés sur les terrains d'étude du programme CRATER (Tableau 8).

Tableau 8. Coefficients de conservation de vitesse des différents substrats.

Source : adapté de Laghi *et al.* [2006]

Type de revêtement	Coefficient de conservation de la vitesse (en %)
Trottoir	100
Route	99
Parking	95
Zones d'activité	60
Cours	80
Terrains vagues	60
Espaces végétalisés	65
Aires de jeu	65
Plages	30

La combinaison de ces deux paramètres de conservation de la vitesse aboutit à une cartographie du coût de franchissement de chaque pixel. La vitesse moyenne de déplacement est fixée à 1,2 m/s, vitesse communément admise pour des évacuations piétonnes sans contraintes quelconques [Fahy et Proulx 2001 ; Laghi *et al.* 2006 ; Pelechano et Malkawi 2008]. Cette vitesse est ensuite détériorée en fonction du coût de franchissement des espaces empruntables. ERT fournit ainsi une cartographie des temps d'accès aux zones refuge pour chaque portion de l'espace.

Ce type de simulateur apporte des éléments de réponse quant aux temps de trajet dans un contexte d'**espaces largement ouverts**. En revanche, il ne peut tenir compte, comme cela a été vu précédemment, des phénomènes d'encombrement liés au nombre de personnes empruntant un même itinéraire simultanément et par conséquent se gênant, ce qui est rendu possible par l'apport des micro-simulateurs.

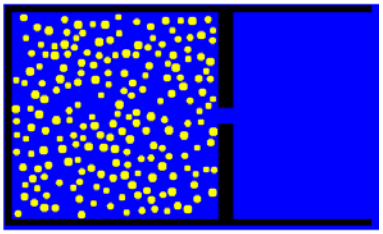
2.3.2.2 *Les Micro-simulateurs et leur apport dans la modélisation des comportements humains dans un contexte d'évacuation : l'exemple de SimWalk*

À l'inverse des macro-simulateurs, les micro-simulateurs peuvent considérer les phénomènes d'embâcle - pour reprendre l'analogie hydrologique - ou d'encombrement des voies.

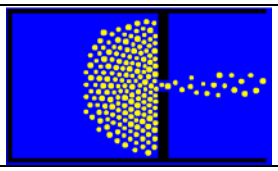
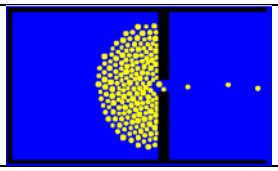
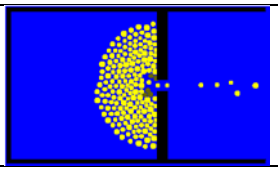
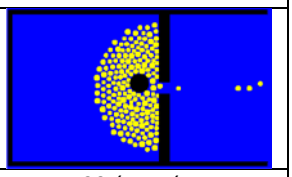
Dans le cadre de cette thèse, le choix s'est porté sur le modèle de la « Force Sociale », développé par Helbing et Molnár [1995]. Ce type de modèle fait agir chaque piéton individuellement. Chaque individu possède des attributs qui lui sont propres (gabarit, vitesse de déplacement, agressivité, etc.). Il est affecté par une force interne (sa volonté d'atteindre sa destination), et par des forces externes :

la force des autres piétons (influences socio-psychologiques et physiques) et la force des obstacles rencontrés sur le chemin emprunté par le piéton. On simule ainsi des comportements de groupe, comme par exemple le piétinement dans des conditions de stress (Figure 24), ou deux individus en couple qui tentent de rester groupés, s'attendent, s'entraident, comme c'est le cas par exemple de SimWalk [Steiner *et al.* 2007].

Situation à T_0 : 200 personnes dans une pièce



Situation à $T_{0+15sec}$: comparaison du nombre d'évacués en fonction du comportement

Sans panique	**Avec panique**	**Avec panique et piétinement**	**Avec panique et piétinement + colonne**
Vitesse de 1 m/s.	Vitesse de 5 m/s.	Vitesse de 5 m/s.	Vitesse de 5 m/s
			
30 évacués	22 évacués	17 évacués	20 évacués
0 blessé	0 blessé	5 blessés	0 blessé

Le lecteur curieux de voir l'animation pourra le faire en consultant le site internet « Panic : A Quantitative Analysis » http://angel.elte.hu/~panic/ (disponible au 25/06/2011).

Figure 24. Modélisation des comportements humains dans un contexte d'évacuation piétonne : typologie des cas de figure pour l'évacuation d'une pièce selon Helbing *et al.* [2000].

En situation de panique, la pression exercée par les individus les uns sur les autres devient plus importante et la fluidité de la circulation s'en voit dégradée. En prenant en compte le phénomène du piétinement (mise en incapacité de se déplacer d'un piéton blessé par son entourage), la voie d'évacuation se retrouve obstruée, réduisant encore plus le débit de personnes pouvant évacuer la pièce. La simple mise en place d'une colonne devant la sortie réduit les champs de pression exercés sur les individus, fluidifiant le trafic et réduisant complètement le piétinement.

Shields *et al.* [2009], par exemple, se sont intéressés au cas spécifique du comportement des personnes à mobilité réduite lors d'évacuations de bâtiments en réalisant un RETEX sur l'évacuation des *Twin Towers* lors de l'événement du 11 septembre 2001. Ces comportements spécifiques sont aujourd'hui intégrés aux modèles dits de « Force Sociale ».

Certains auteurs se sont focalisés sur les facteurs psychologiques et physiques influençant les comportements. Ainsi, Nilsson *et al.* [2009] ont entrepris une expérience d'ordre comportementale dans le contexte de l'évacuation d'un tunnel affecté par un incendie. Les personnes recrutées circulent dans leur véhicule. Le tunnel est équipé de sorties de secours mises en évidence par des signaux lumineux, et est instrumenté d'une quinzaine de caméras. On simule un accident et on observe le comportement des individus. Un débriefing est fait individuellement et en groupe une fois les personnes évacuées. Il ressort des différents entretiens et observations que l'influence sociale joue un rôle important tant dans la réactivité des individus face au danger (temps de réponse) que pour le choix d'une voie d'évacuation. Helbing *et al.* [2000], par le développement du modèle de la « Force Sociale », ont ainsi apporté aux micro-simulateurs la prise en compte de la tendance des individus à se suivre les uns les autres, quitte à suivre des voies d'évacuation plus longues.

Le logiciel SimWalk, édité par Savannah Simulations AG [Steiner *et al.* 2007] est un micro-simulateur basé sur le modèle de « Force Sociale ». Il a été retenu dans cette thèse pour l'évaluation multi-agents des capacités d'évacuation. Il n'a toutefois été utilisé que sur un site, à titre d'exemple, compte tenu du temps nécessaire pour de telles simulations. Dans un premier temps, des zones sources de populations et des zones cibles sont définies. Une cartographie à échelle très fine doit être produite, intégrant l'ensemble des obstacles tels qu'équipements urbains, véhicules, clôtures, etc. Les zones sources et zones refuge sont ensuite définies et les effectifs de chaque zone source renseignés. On caractérise alors les populations, selon des paramètres de taille, de gabarit, de vitesse de déplacement, etc. en fixant des fourchettes de valeurs à ces caractéristiques (Figure 25).

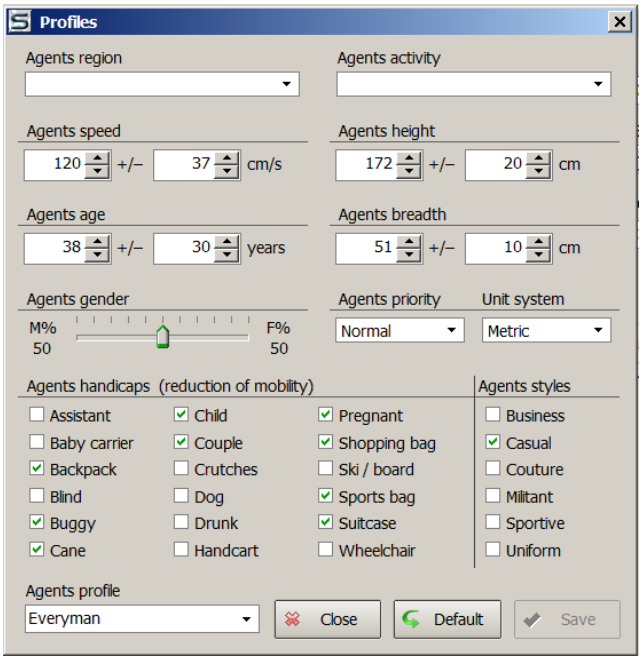


Figure 25. Configuration des caractéristiques des agents pour la modélisation d'évacuations avec SimWalk.

Il existe des profils prédéfinis en fonction de la région géographique des agents et en fonction de leur activité (travail en bureau, loisirs, transports en commun, voyage, événements sportifs, etc.). Ces profiles ajustent les paramètres de taille, de vitesse et d'encombrement des agents. Il est également possible de définir ces paramètres manuellement, et d'ajouter des caractéristiques spécifiques aux agents, telles que le lien social qui existe entre certains et qui conditionne leur comportement les uns vis-à-vis des autres (enfants, couples, aveugles, personnes ivres, etc.) ou telles que leur encombrement (femmes enceintes, sacs à dos, caddys, équipements de ski, etc.). Une fois ces caractéristiques de la population définies, elles sont attribuées à chaque agent de manière aléatoire, fournissant une population représentative de celle fréquentant les lieux étudiés.

À noter que le modèle de « Forces Sociales » n'est pas le seul existant. Il existe d'autres modèles de micro-simulateurs présentés ici à titre comparatif [Zainuddin *et al.* 2009] :

Le Modèle Cellulaire Coût Bénéfice : selon une approche raster, développée par Gipps et Marksjö [1985], le modèle place un individu par pixel. Chaque pixel est caractérisé par un « coût » de franchissement et ne peut contenir qu'un individu à la fois. Le « bénéfice » est le rapprochement de l'individu par rapport à sa destination finale. L'individu se déplace vers la cellule dont le bénéfice net est le plus important, c'est-à-dire la moins coûteuse en contraintes et la plus bénéfique pour se rapprocher de son objectif. Ce modèle, de par son caractère « cellulaire », a l'inconvénient de ne pas tenir compte du facteur « stress » qui joue sur les densités de population comme cela a été mis en évidence par Helbing *et al.* [2000] (cf. Figure 24, p. 67).

Le Modèle des Automates Cellulaires : le concept a été utilisé pour la première fois dans le contexte d'une simulation du trafic routier par Nagel et Schreckenberg [1992]. Il consiste à découper une route (1 dimension) en segments qualifiés par un statut binaire « libre » ou « non-libre ». Les cellules non-libres contiennent un véhicule qui tente d'avancer sur sa route à une vitesse qui lui est propre, mais limitée (ou non) par la présence devant lui d'une cellule non-libre, c'est-à-dire d'un autre véhicule se déplaçant à une vitesse inférieure. Par itération, les vitesses de chaque véhicule sont adaptées en fonction des vitesses en aval du réseau. Dans un système à 2 dimensions comme EGRESS, aucune interaction entre individus voisins n'existe, ils ne se gênent pas tant que leurs routes ne se croisent pas [Ketchell *et al.* 1993 ; Pelechano et Malkawi 2008]. Les inconvénients de ce modèle sont les mêmes que ceux du « Modèle Cellulaire Coût Bénéfice ».

Le Modèle de la Force Magnétique : développé par Okazaki [1979]. Chaque élément environnemental est caractérisé par un champ magnétique attirant ou repoussant les individus. La destination a une polarité négative (attraction), tandis que les obstacles et les individus ont une

polarité positive. Ainsi, chaque individu tente de rejoindre sa destination en contournant les obstacles et en évitant les collisions avec ses congénères.

2.3.3 Critères de sélection de zones refuge

On distingue l'évacuation horizontale, qui consiste à se déplacer vers des zones topographiquement surélevées et à l'abri de l'aléa, de l'évacuation verticale, qui consiste à se mettre à l'abri sur une structure surélevée (toit d'un bâtiment, ou perchoir, Figure 26).

L'Agence Fédérale de Gestion des Urgences (FEMA), qui dépend du Ministère de l'Intérieur des États-Unis, propose un guide de sélection de zones refuge verticales [FEMA 2008]. Il propose une localisation des zones refuge à une altitude supérieure de 30% + 3 m. au dessus des *runups* maximaux envisagés. Ce guide fait une distinction entre deux types de structures possibles :

(1) Les zones refuge à fonction unique : celles-ci ne servent que de refuge, elles sont nombreuses et de taille limitée, localisées loin des sources de débris, toujours prêtes à accueillir des réfugiés. Elles ne présentent pas de conflit d'usage.

Figure 26. Exemple de zone refuge à usage unique.

Source : *The American Prospect*, auteur inconnu, disponible à l'adresse http://prospect.org/csnc/blogs/tapped_archive?month=03&year=2011&base_name=tsunamis_and_vertical_evacuati, consultée le 06.10.2011.

Ce type de structure est surélevé par des piliers de diamètre important, permettant au flux de passer en dessous sans trop de contraintes sur l'intégrité de la structure (« transparence hydraulique »).

(2) Les zones refuge multi-usages : elles sont privilégiées en cas de contraintes économiques ou spatiales pour implanter des zones refuge à usage unique. Il s'agit dans le cas de bâtiments existants de locaux communautaires (équipements ou bâtiments publics, locaux associatifs) ou commerciaux (centres commerciaux, hypermarchés). Le retour sur investissement est immédiat si la structure est

construite et affectée à une activité quotidienne : parkings, gymnases, cantines, salles communes (mariages, conférences, congrès), etc.

La Croix Rouge Américaine (*American Red Cross*) propose une surface utile par individu dans les zones refuge (Tableau 9) qui permet d'évaluer leur « capacité de stockage ».

Tableau 9. Surface nécessaire par individu dans les zones refuge selon la durée du séjour.

Source : adapté de *American Red Cross* (ARC) [2002].

Durée du séjour en zone refuge	Surface nécessaire par individu
Quelques heures	1 m²
Quelques jours	2 m²
Quelques semaines	4 m²

On peut considérer dans le cas du risque tsunami que la durée du séjour peut s'étaler entre plusieurs heures et un jour, compte tenu des caractéristiques de l'aléa : à partir de l'alerte et de l'évacuation, on peut devoir attendre quelques heures avant l'arrivée du premier train d'onde. Les suivants, souvent le plus puissant, peuvent se manifester plusieurs heures après le premier. Ainsi, la FEMA [2008] propose un retour à la normale après l'arrivée du deuxième train et la constatation qu'aucune perturbation du niveau marin est toujours perceptible.

2.4 Interaction entre aléa et enjeux

2.4.1 Résistance des enjeux structurels face à l'aléa tsunami

Leone *et al.* [2011a ; 2011c] ont évalué cette résistance du bâti en fonction de ses caractéristiques structurelles. Le rapport entre classes de bâti (cf. 2.2.2.2, p. 53) et hauteur de la submersion est présenté en Figure 27. 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 28). Les auteurs proposent ainsi des seuils de destruction des bâtiments en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse du flux (Tableau 10), correspondant à la classe D5.

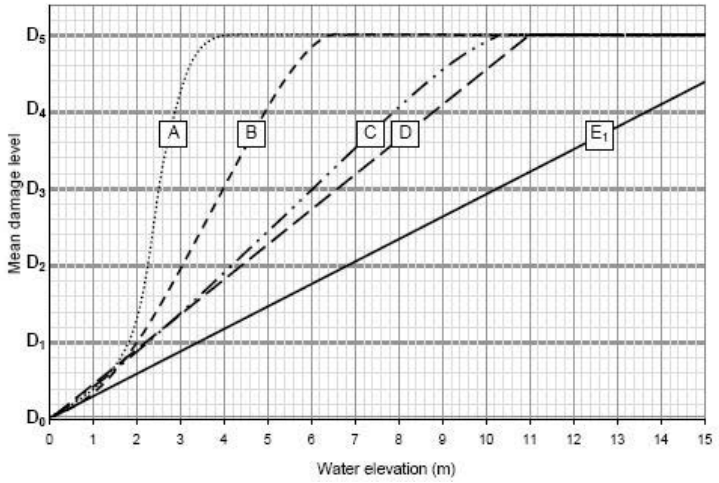


Figure 27. Corrélation entre niveau de dommage et hauteur d'eau en fonction de la classe structurelle du bâti (courbes de fragilité).

Source : extrait de Leone *et al.* [2011c].

	D0	D1	D2
Critères d'identification terrain	Aucun dommage ou dommages imperceptibles un an après	Dommages négligeables à légers sans affectation des structures (mobilier, 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
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
B	C	B

Figure 28. Niveaux de dommage des bâtiments.

Source : adapté de Gauraz *et al.* [2009].

Tableau 10. Seuils de destruction totale des bâtiments selon leur classe de vulnérabilité structurelle.

Source : adapté de Leone *et al.* [2011c] 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 29).

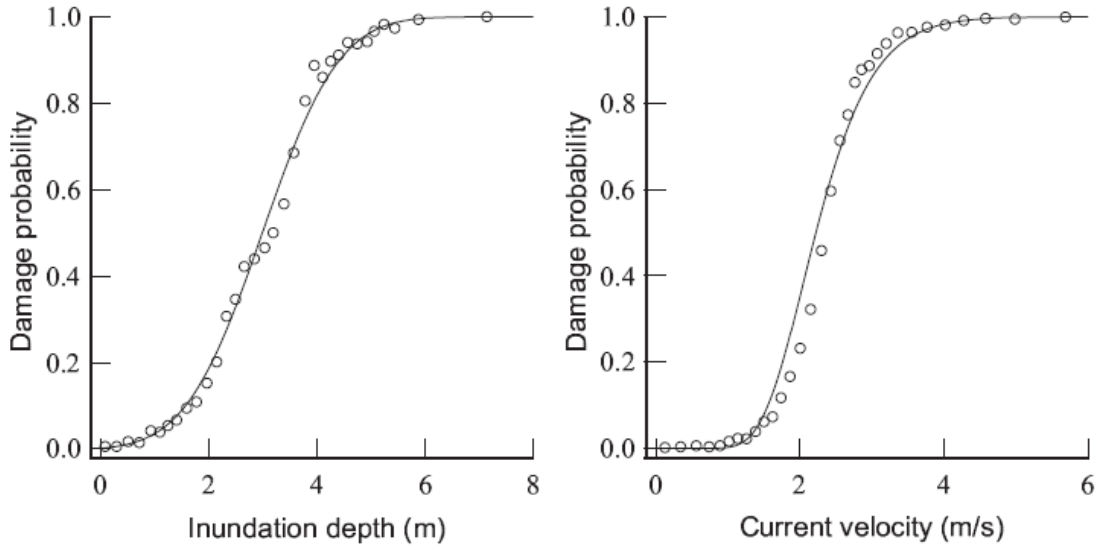


Figure 29. Rapport entre probabilité de dommage (*damage probability*), profondeur d'inondation (*inundation depth*) et vitesse de courant (*current velocity*).

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.* [2011a ; 2011c] 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.

2.4.2 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 (Annexe 6, p. XXXI) 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 30). Ces travaux ont contribué au développement des matrices de résistance des individus aux submersions par des tsunamis dans les espaces de plein air.

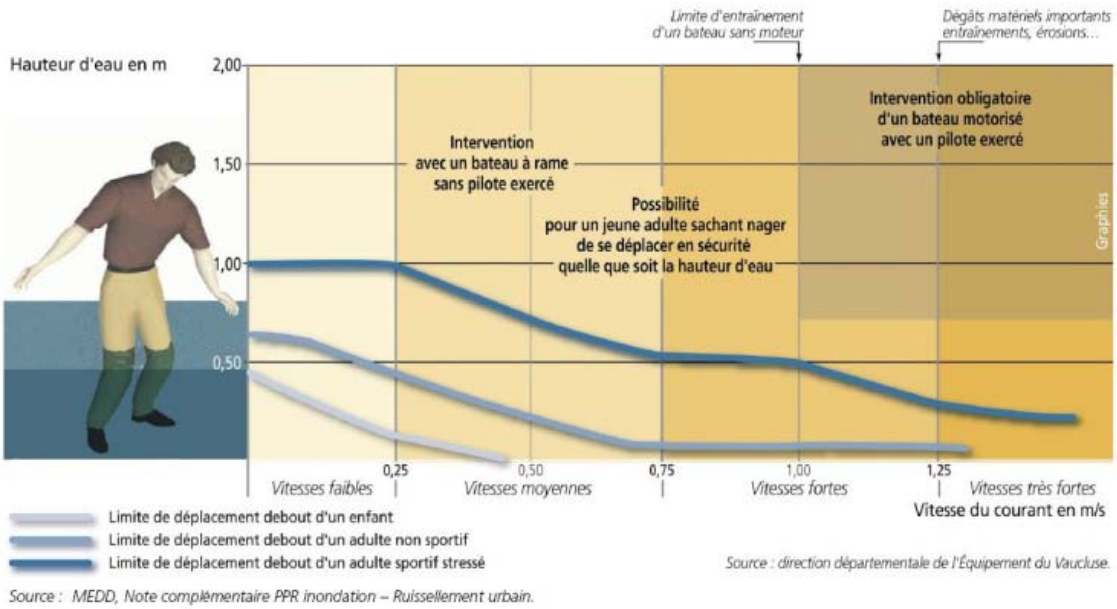


Figure 30. Limites de déplacements d'individus en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau (contexte d'inondation).

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 11).

Tableau 11. 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 et 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 à 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.

Conclusion du chapitre

La connaissance historique des effets de l'aléa permet sa reproduction par les modèles et la cartographie dynamique de ses caractéristiques hydrologiques à une échelle fine. Du point de vue de l'évaluation des enjeux et de leurs vulnérabilités, la méthode adoptée permet une cartographie des enjeux humains et structurels selon différents scénarios temporels à l'échelle de l'individu. Par ailleurs, la démarche RETEX permet de mesurer l'efficacité des mesures de mise en sureté des populations en cas de menace, introduisant un autre facteur d'exposition des enjeux humains, celui de leur évacuation. La simulation des évacuations est possible. Elle peut également être dynamique et à l'échelle de l'individu.

Ces méthodes permettent toutes d'évaluer une composante du risque, et apparaissent compatibles, tant d'un point de vue spatial que temporel : elles peuvent être menées à une échelle fine, celle de l'agglomération ou du quartier, elles ont toutes une composante dynamique, s'inscrivant certes dans des temporalités différentes, mais qualifiables à tout instant *t*.

Compte tenu de la variété des approches et des méthodes nécessaires à l'évaluation du risque, l'intérêt d'une démarche intégrée apparaît essentielle pour donner une cohérence une évaluation du risque considérant toutes ces variables.

Partie 2. Application et résultats de la méthode d'évaluation intégrée par scénario de risque

Dans le cadre de différents programmes de recherche, la méthode d'évaluation intégrée du risque tsunami par scénario de risque ici développée a pu être conduite sur différents lieux d'étude.

Le programme **PREPARTOI** (**P**révention et **RE**cherche **P**our l'**A**tténuation du **R**isque **T**sunami dans l'**O**céan **I**ndien, Mayotte et La Réunion), principalement financé par la Fondation MAIF, a permis une évaluation intégrée du risque tsunami à Mayotte et à La Réunion au cours des années 2010 et 2011 (Figure 31).

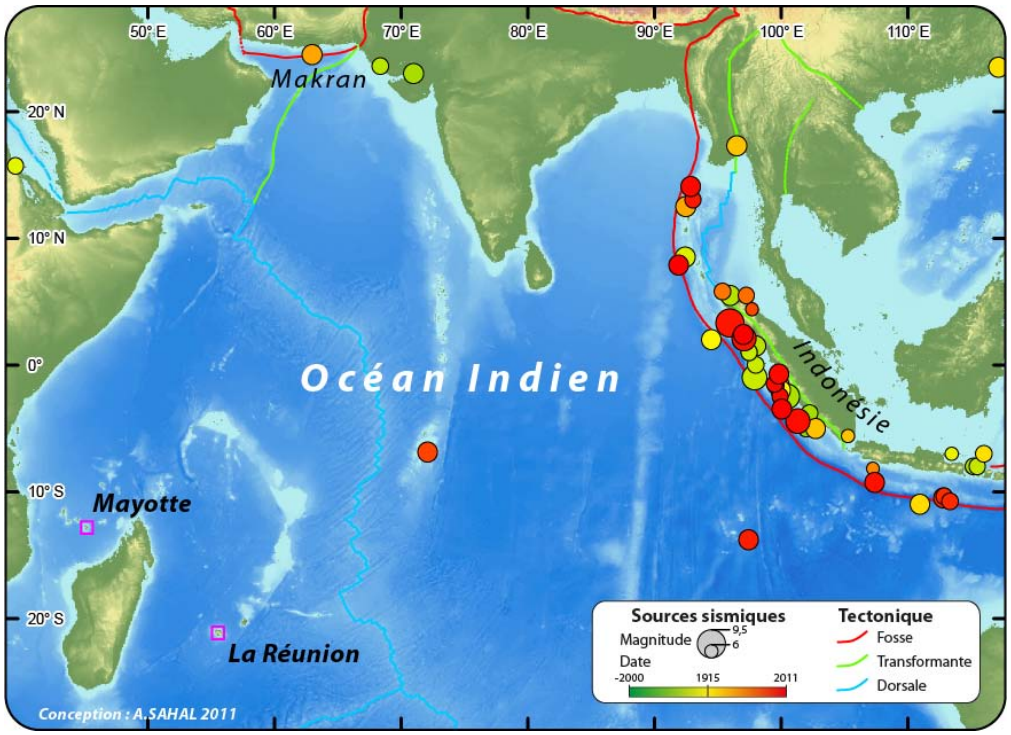


Figure 31. Localisation des sources sismiques de tsunamis depuis -2000 et contexte tectonique dans l'Océan Indien.

Sources : données NOAA/NGDC, Dunbar [2011], tectonique selon Coffin *et al.* [1998], fond de carte issu de données GEODAS NOAA/NGDC (http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/geodas.html).

Ces collectivités françaises sont directement exposées aux sources sismiques situées sur la marge indonésienne et dans la région du Makran.

Mayotte, territoire récemment départementalisé appartenant à l'archipel des Comores, est constituée de deux îles principales : Grande-Terre et Petite-Terre (Figure 32). Mayotte est peuplée d'environ 300 000 habitants occupant pour la plupart le bord de mer. Les services de l'État - contrairement aux services des collectivités - sont pour l'essentiel localisés sur Petite-Terre, à Dzaoudzi. C'est également sur Petite-Terre que sont situés les enjeux les plus stratégiques de l'île : dépôt de carburant, aéroport international, mais également casernes militaires et de pompiers, police maritime, SIDPC, etc. C'est pourquoi l'évaluation du risque tsunami à Mayotte s'est focalisée sur Petite-Terre (Chapitre 3).

La Réunion, île volcanique de l'archipel des Mascareignes, est peuplée par 800 000 habitants occupant essentiellement son littoral. Les enjeux majeurs sont également pour la plupart situés en bord de mer (Figure 33).

Le Chapitre 4 présentera une mise en œuvre de la méthode à Saint-Paul, ville basse historiquement affectée par des tsunamis de forte amplitude et présentant de forts enjeux humains.

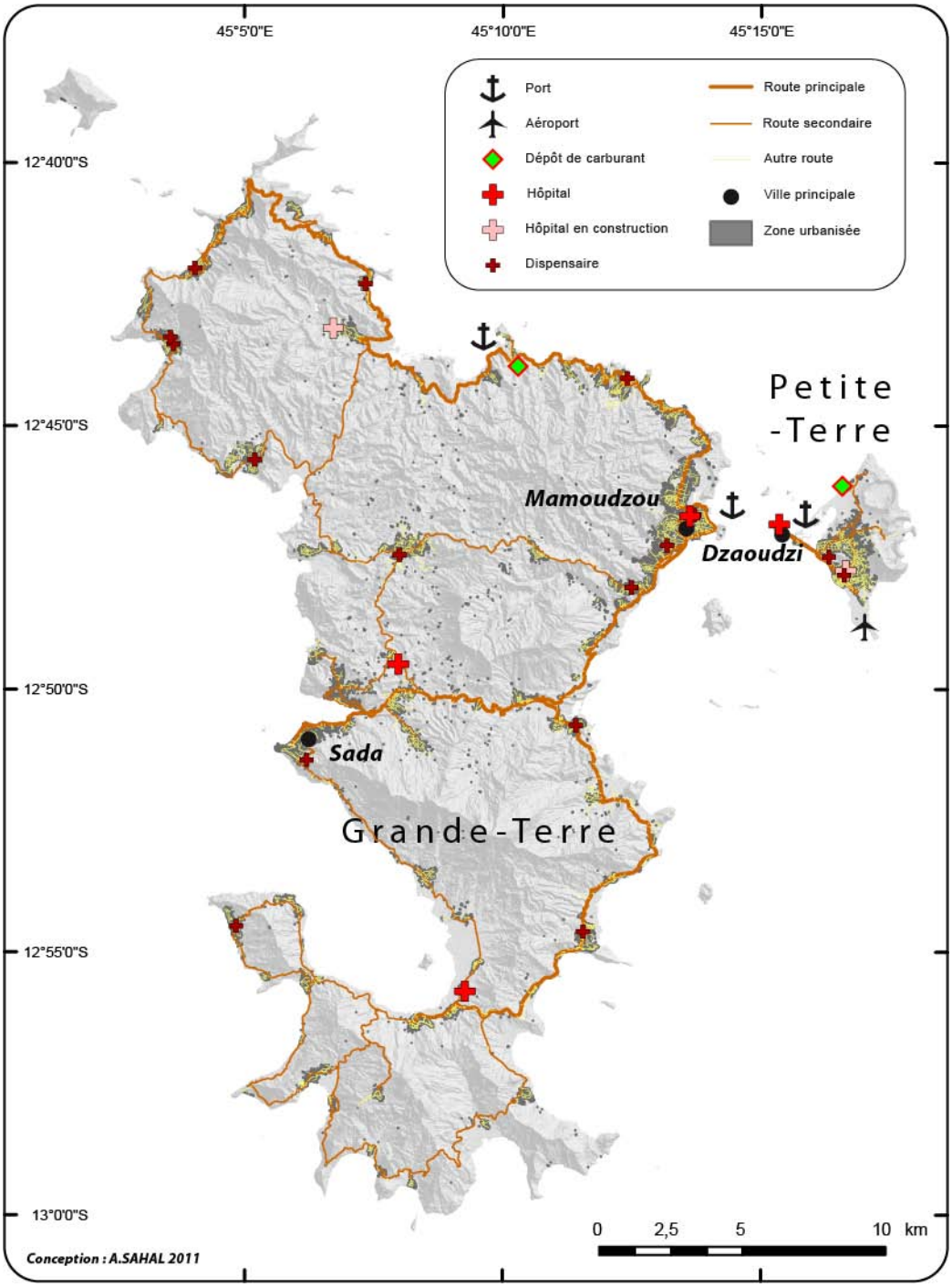


Figure 32. Principaux enjeux à Mayotte

Sources : données IGN BD Topo « Pays » v.1.2, 2006 ; relief ombré issu du MNT TerraModeler, 2010 ; données SIDPC, 2011.

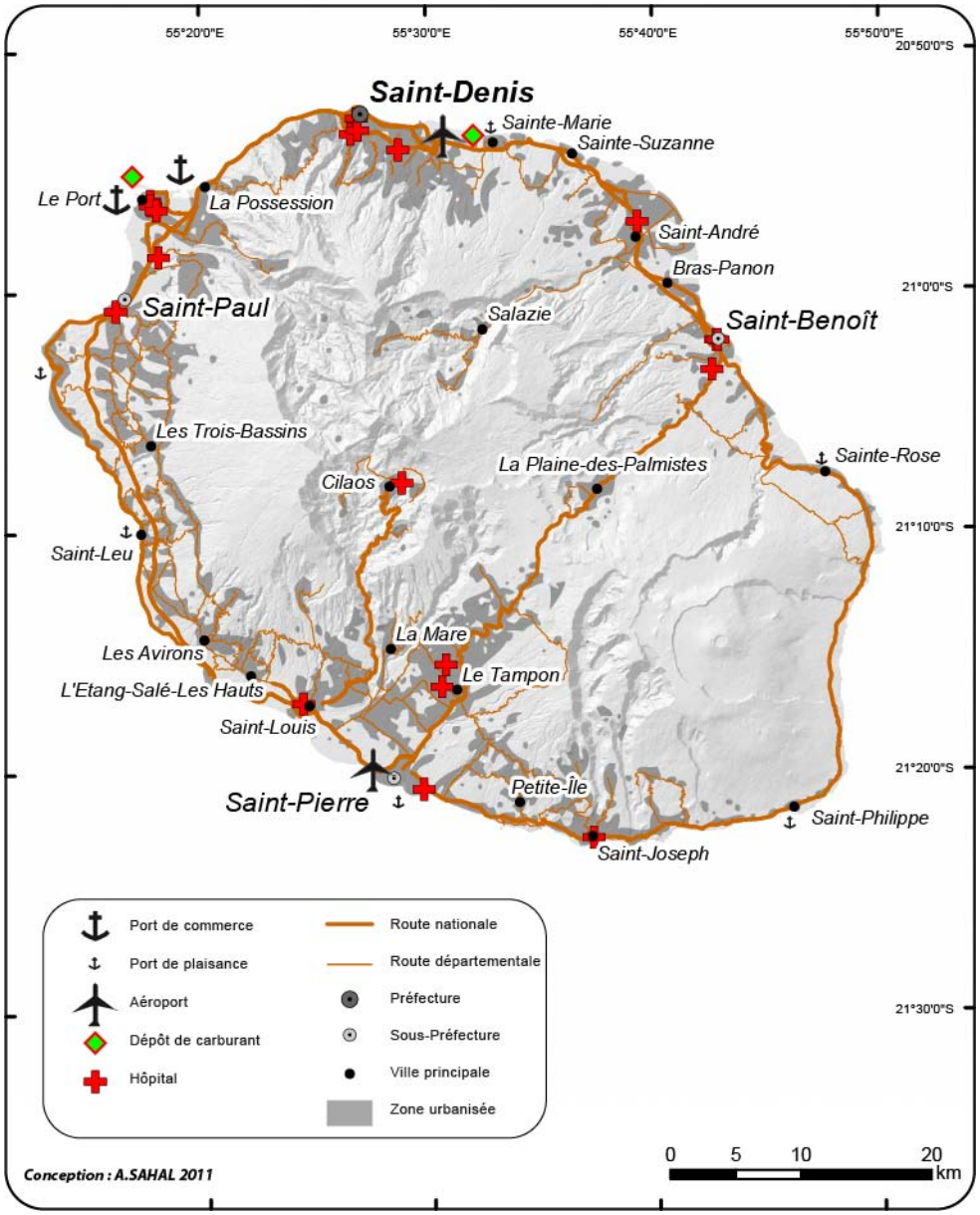


Figure 33. Principaux enjeux à La Réunion

Sources : données IGN BD Topo v.2, 2009 ; fond IGN BD Raster v.2.4, 2009.

Le programme **MAREMOTI** (**MARE**graphie, observations de tsuna**M**is, m**O**délisation et é**T**udes de vulnérab**I**lité pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée occidentale), financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) s'est focalisé sur les côtes méditerranéennes françaises, historiquement plus impactées que la façade Atlantique. Compte tenu des effets importants du tsunami du 16 Octobre 1979 à Antibes [Sahal et Lemahieu 2011] et plus particulièrement dans le quartier de La Salis (Figure 34), l'évaluation intégrée du risque tsunami s'est concentrée sur ce quartier.

Dans le quartier de La Salis, le Port de La Salis, sa plage, ses établissements recevant du public (ERP) et ses bâtiments résidentiels constituent des enjeux humains importants. Le Chapitre 5 présentera une application de certains aspects de la démarche sur ce quartier, notamment la modélisation d'évacuations par micro-simulateur.

Figure 34. Localisation du quartier de La Salis (Antibes, Alpes-Maritimes) et de ses enjeux. Extrait 3D du Système d'Information Géographique constitué pour une évaluation par scénario de risque.

Sources : fonds de carte Open Street Map 2011 et IGN BD Ortho 2004, topographie Ville d'Antibes, ERP recensés sur le terrain.

Chapitre 3e. Evaluation intégrée du risque de tsunami à Mayotte : le cas de Petite-Terre

La méthode proposée est ici appliquée au cas de Petite-Terre, à Mayotte. Les différentes étapes de l'évaluation sont abordées selon un ordre logique, prenant en compte l'interdépendance existante entre les différents volets de l'évaluation.

3.1 Evaluation et modélisation de l'aléa

3.1.1 Historique 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.

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

Le 26 décembre 2004, à 00:58 UTC, un séisme de magnitude Mw = 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 12). Les effets du tsunami atteignent, selon les témoignages recueillis, une altitude de 6 m., correspondant à une surcote de 4,46 m. (Figure 35).

Tableau 12. 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/SHOM)	*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.

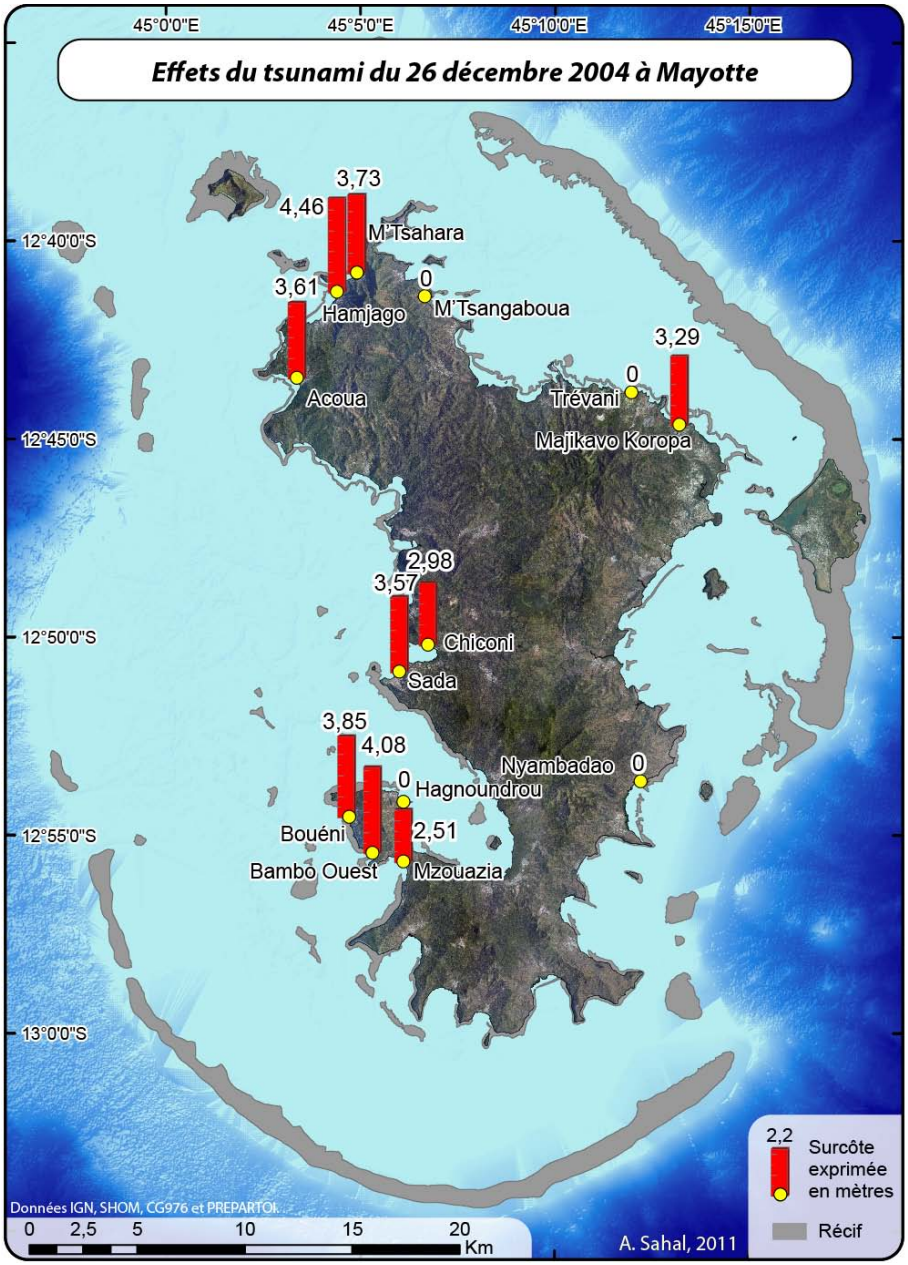


Figure 35. Effets du tsunami du 26 décembre 2004 à Mayotte.

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 36). Surpris par la submersion, les témoins n'ont pas eu l'occasion de constater un retrait particulier.

Figure 36. 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 violement 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.

3.1.1.2 *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 2004[15] 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 37) [Goett 2011].

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

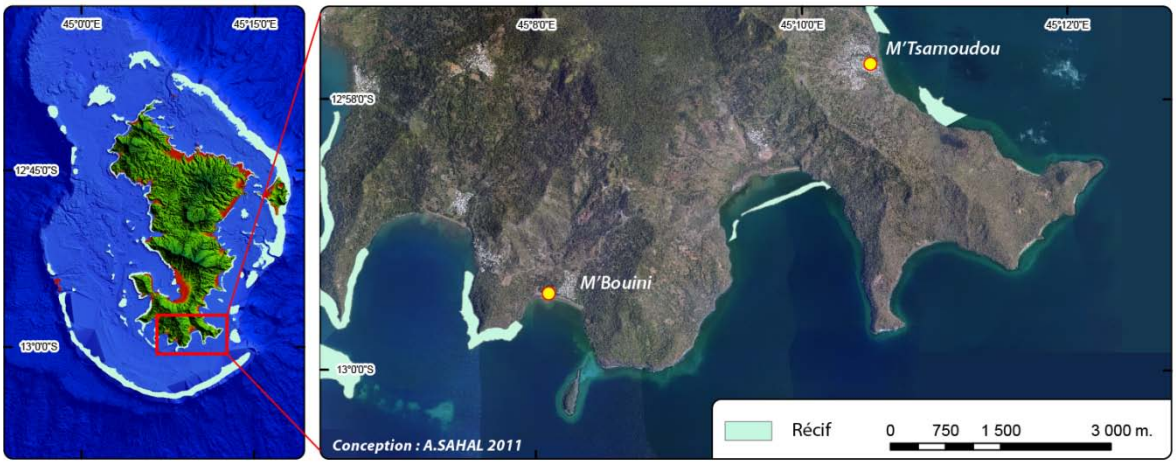


Figure 37. Sites où des dépôts soupçonnés d'avoir été laissés par des tsunamis ont été identifiés à Mayotte.

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.

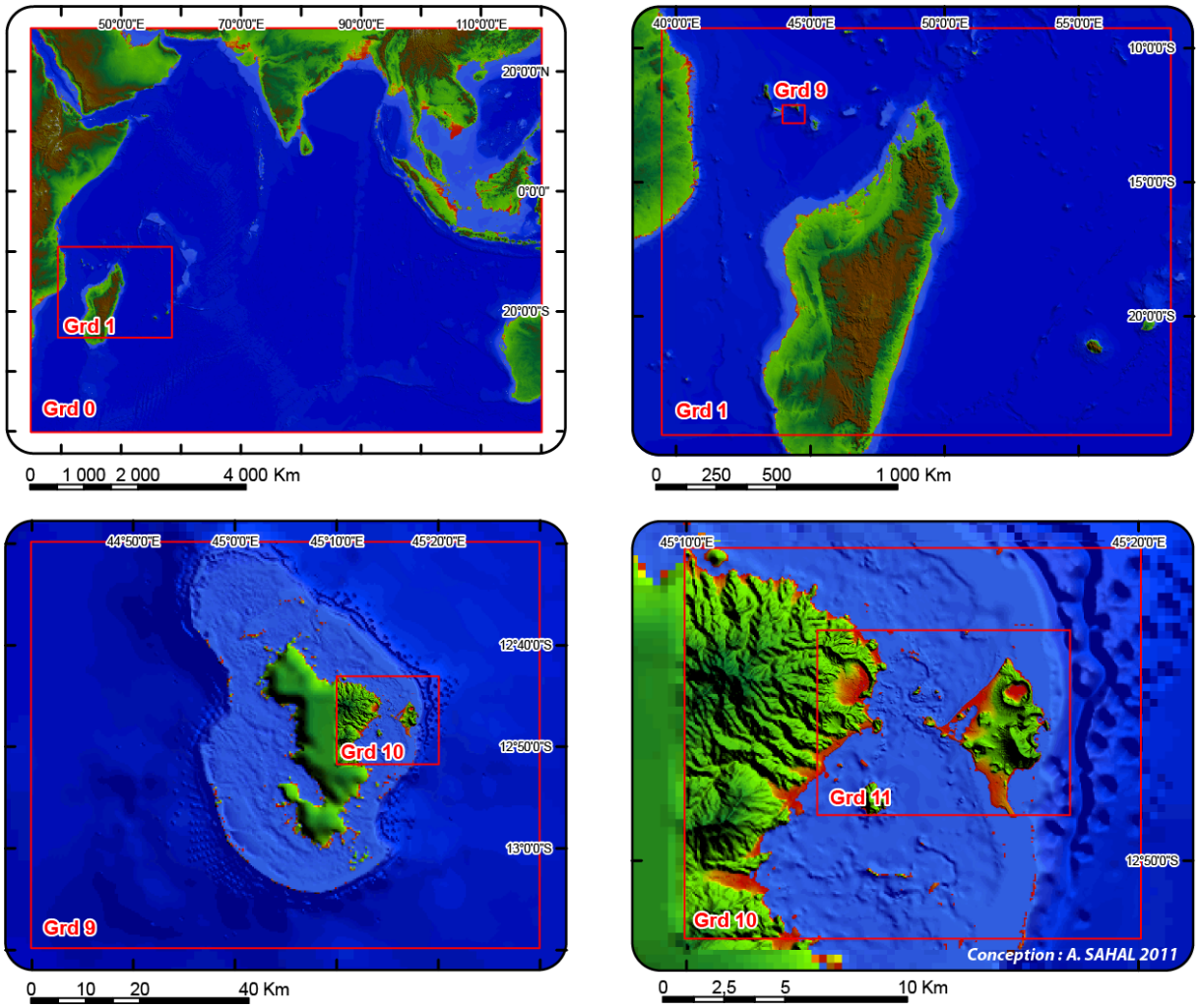
Le tsunami de décembre 2004 est d'origine transocéanique. Mais il existe par ailleurs un risque de tsunamis d'origine locale qui pourrait être lié au décrochement et au glissement de parties du récif qui entoure l'archipel. Un tel cas de figure entrainerait l'arrivée de vagues en quelques minutes à la côte. Par ailleurs, à l'échelle régionale, le Karthala constitue une source possible de tsunami [Hartnady 2005b, a ; 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 minutes[16]. Ces sources potentielles qui n'apparaissent pas dans l'historique connu des tsunamis qui ont affecté Mayotte restent à être considérés sérieusement.

3.1.2 Comparaison des données historiques avec la modélisation

Compte tenu du peu de recul disponible concernant l'historique de l'aléa à Mayotte, une modélisation est proposée pour un scénario d'aléa identique à celui du 26 décembre 2004. En se fondant sur les résultats de l'évaluation historique, on considère que les espaces d'altitude supérieure à 10 m. ne sont pas exposés. On choisit le cas de Petite-Terre pour une cartographie à échelle fine de l'aléa, territoire dont les enjeux stratégiques sont les plus concentrés sur le littoral. La

[16] Temps de trajet calculé avec le logiciel TsuDig v. 1.1, septembre 2010, NGDC.

modélisation a été réalisée sur des grilles emboitées de résolution croissante à mesure que l'on se rapproche des zones d'intérêt (Figure 38).



Grille	Zone	Résolution (°)	Résolution (m.)
0	Océan Indien	0,05	~5500
1	Madagascar	0,0125	~1375
9	Mayotte large	0,0027	~300
10	Mayotte nord-est	0,00055	~60
11	Petite-Terre	0,000138	~15

Figure 38. Grilles utilisées par le CEA/DASE pour la modélisation de l'aléa à Mayotte.

Source : données GEBCO, SHOM et Terra Modeler.

Malheureusement les données Litto3D qui auraient du fournir des levés bathymétriques à une maille très fine à Mayotte (résolution de 1 m.) ne sont pas disponibles à ce jour (octobre 2011)[17]. Aussi, la modélisation à l'échelle la plus fine a été faite à une résolution de 15 m. Compte tenu des données disponibles, les résultats fournis par le CEA/DASE sont peu fiables, mais permettent toutefois de

[17] Initialement, les données Litto3D devaient être livrées aux collectivités à la fin 2010.

mettre en évidence les secteurs d'amplification des grandes longueurs d'ondes autour de Mayotte (Figure 39).

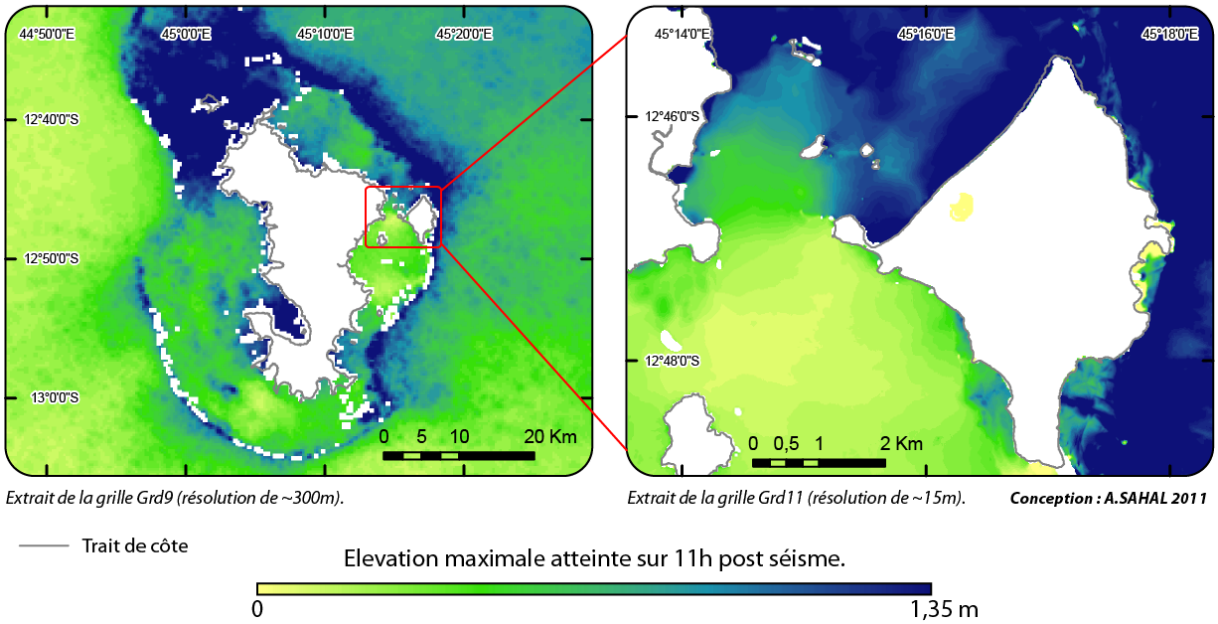


Figure 39. Elévation maximale du niveau de la mer (Hmax) pendant 11h post-séisme, modélisée avec les paramètres de la source du tsunami du 26 décembre 2004.

Sources : issu de données CEA/DASE et IGN BD Topo 2007 (trait de côte).

On peut constater que les secteurs d'amplification correspondent assez bien aux secteurs les plus affectés en 2004 et que les 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. Il a par conséquent été choisi d'attendre la mise à disposition de la Litto3D et une modélisation fine de l'aléa pour mener à bien l'évaluation des pertes humaines et des destructions potentielles. Ce délai de livraison de modèles d'aléa plus fins n'empêche toutefois pas la réalisation d'une évaluation des enjeux et des capacités d'évacuation de Petite-Terre.

3.2 Evaluation de la vulnérabilité des bâtiments et des enjeux humains

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].

3.2.1 Adaptation et application de la méthode

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. 3.1.1.2, p. 88).

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.

3.2.1.1 *Vulnérabilité structurelle des bâtiments et fonction des rez-de-chaussée*

Chaque bâtiment est caractérisé par la résistance potentielle de sa structure à un tsunami, conformément à la méthode précédemment exposée (Figure 40).

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 traditionelle auto-constuit 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 (tyopologie 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 40. 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 41) et par la fonction principale de son rez-de-chaussée (Figure 42) selon la typologie précédemment exposée (cf. 2.2.2.3, p. 54).

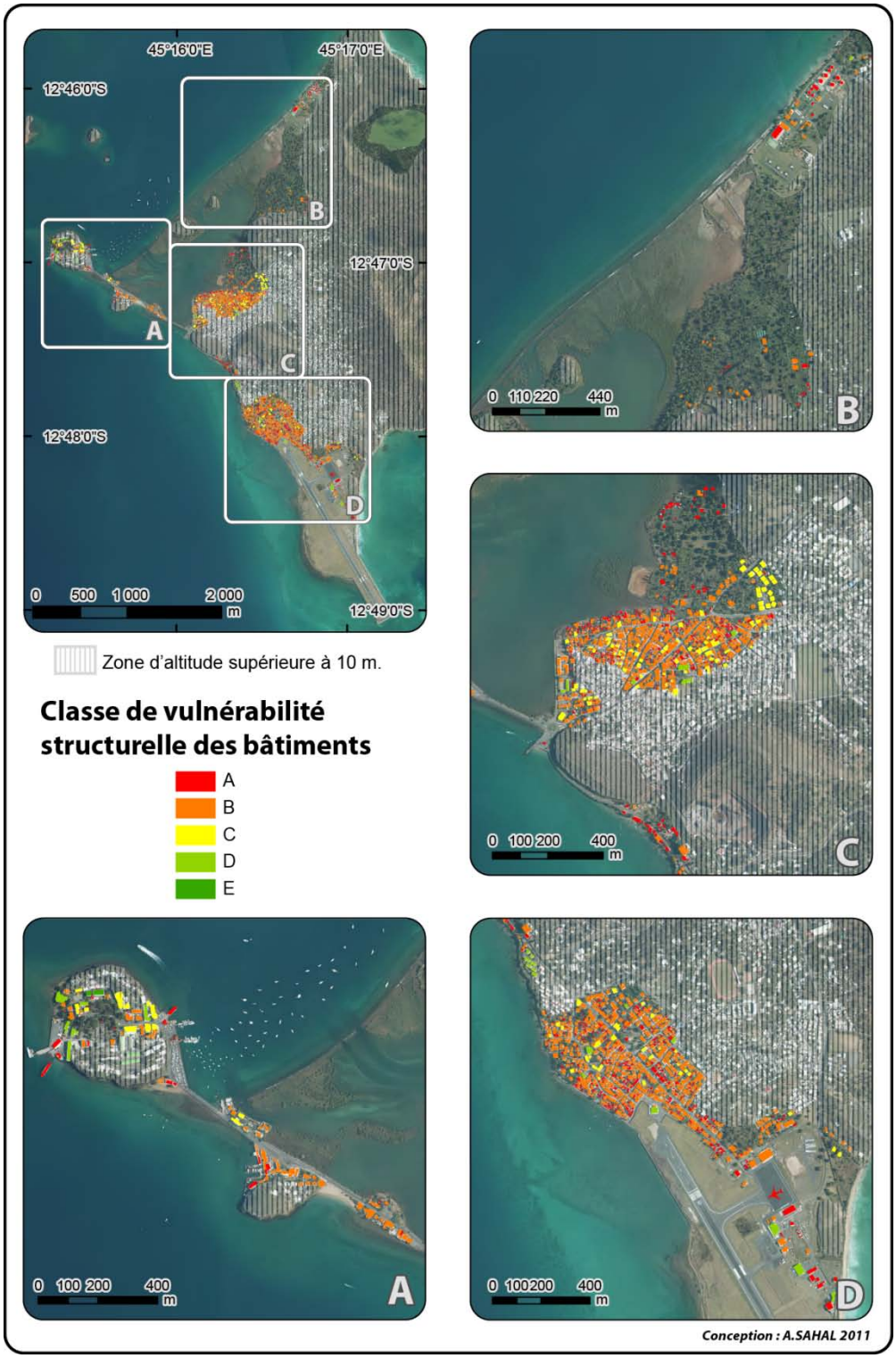


Figure 41. Vulnérabilité structurelle du bâti sur Petite-Terre (Mayotte).

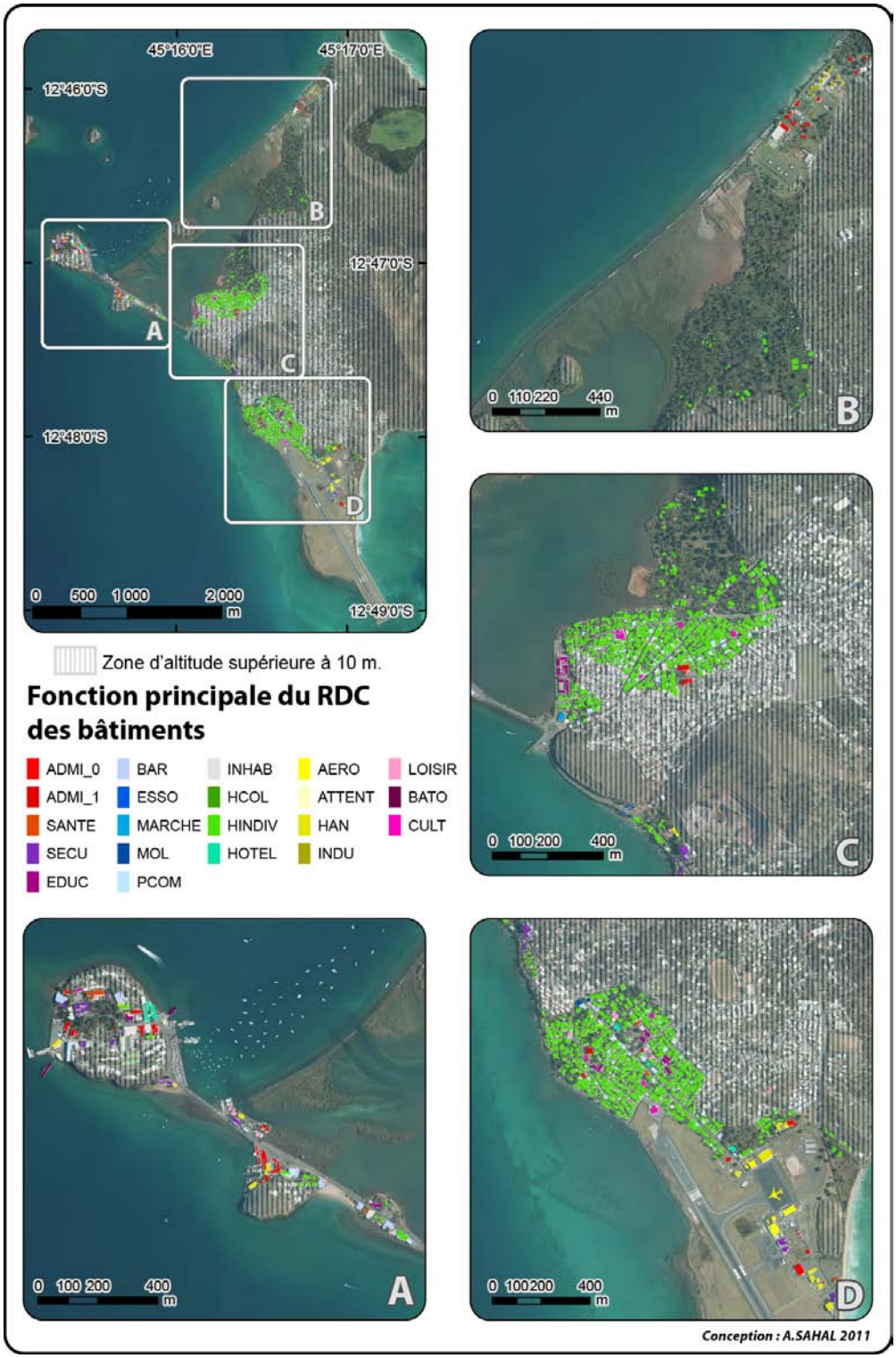


Figure 42. Fonction principale du RDC du bâti sur Petite-Terre (Mayotte).

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).

3.2.1.2 *Quantification des enjeux humains présents dans les bâtiments*

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 13 présente les îlots pour lesquels la population totale des logements recensés est connue.

Tableau 13. Population des IRIS échantillonnés à Petite Terre.

Source : données INSEE, 2007.

IRIS	Commune	Population en 2007 (INSEE)	Surface habitée (m²)	Densité par m² 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 14).

Tableau 14. 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 et 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 15).

Tableau 15. 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 16).

Tableau 16. 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 43), SC2 (Figure 44) et SC3 (Figure 45).

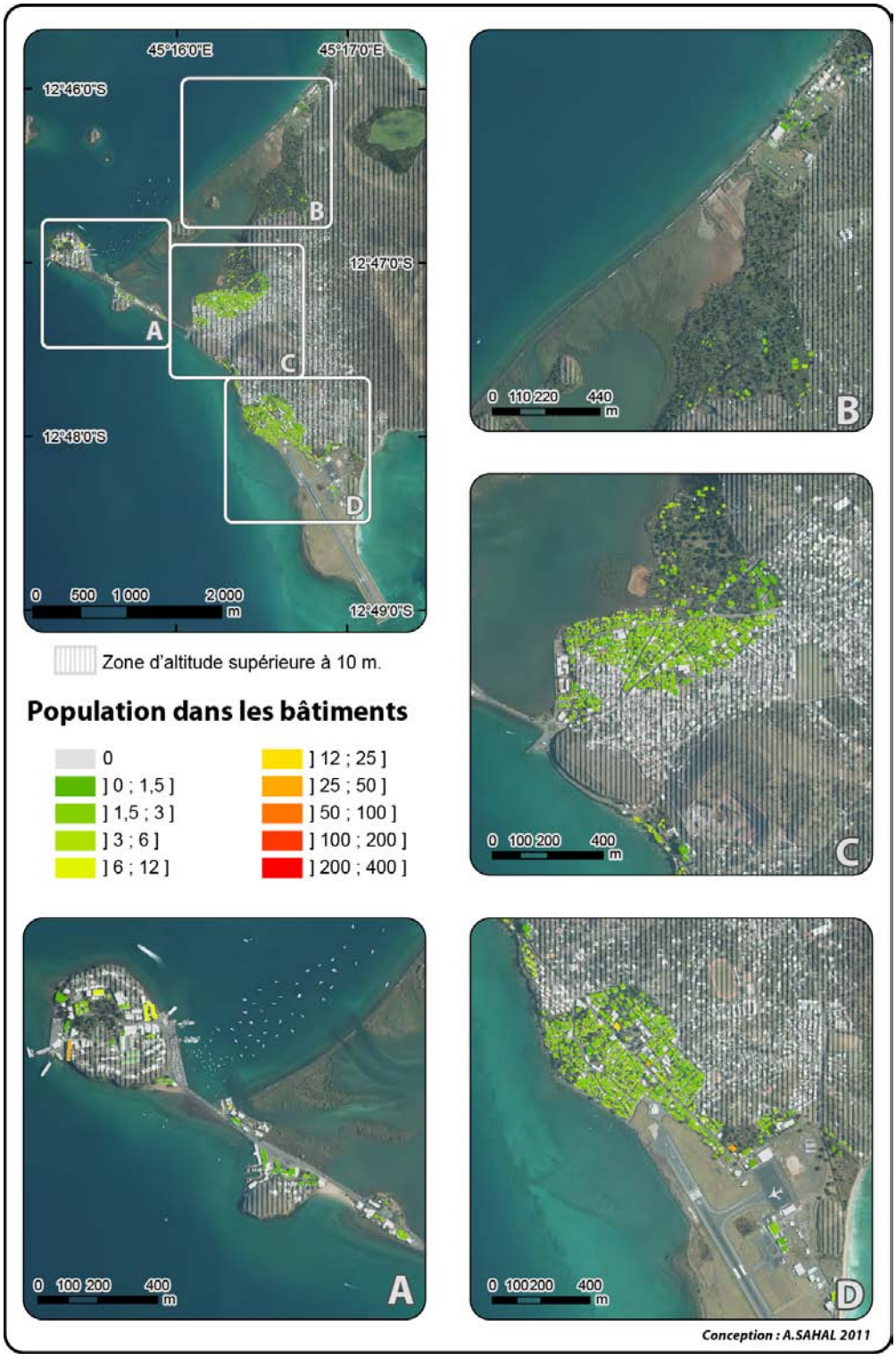


Figure 43. Populations présentes dans les bâtiments pour le scénario nocturne (SC1) sur Petite-Terre (Mayotte).

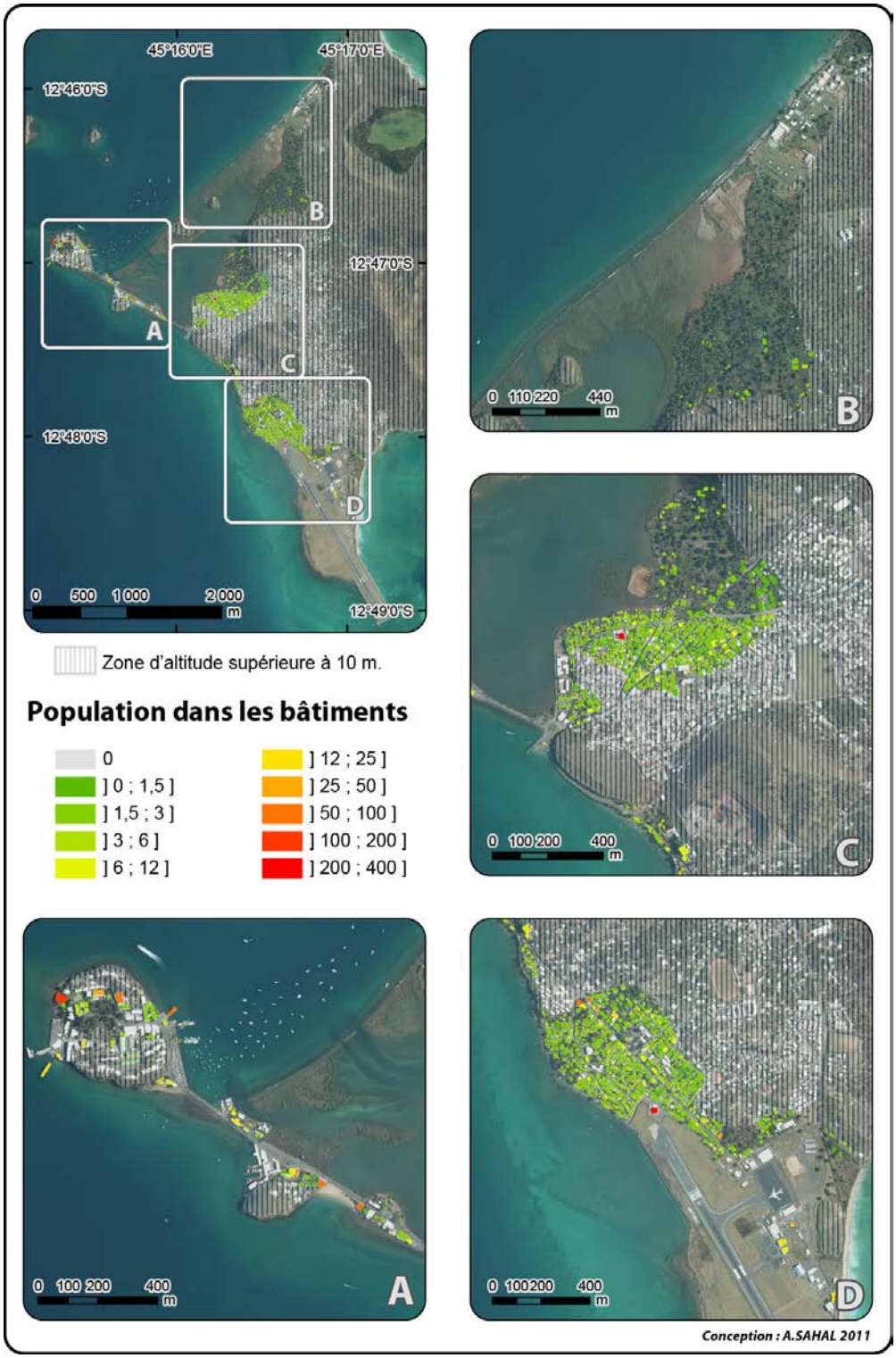


Figure 44. Populations présentes dans les bâtiments pour le scénario « jour ouvrable à 17h30 » (SC2) sur Petite-Terre (Mayotte).

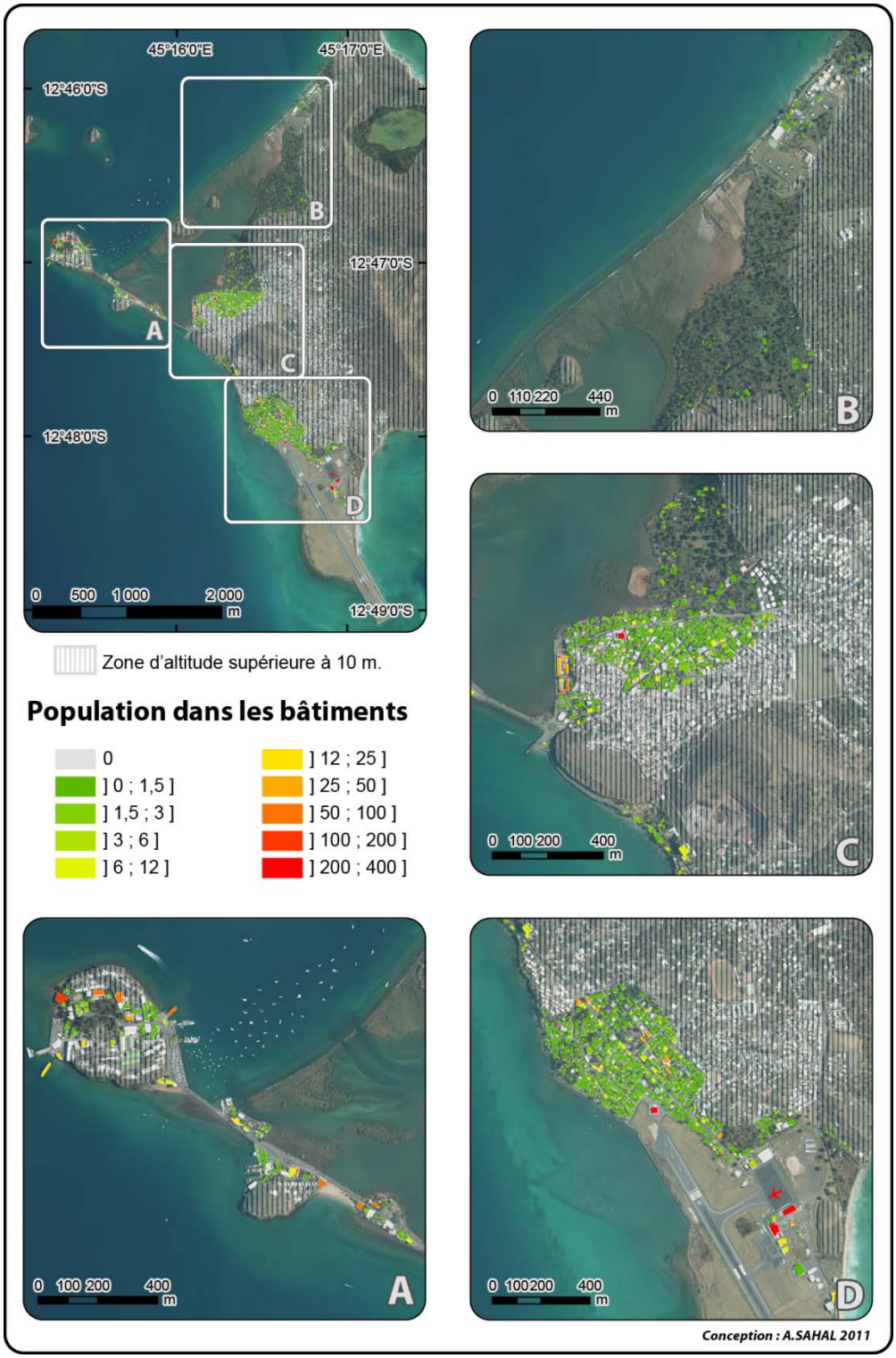


Figure 45. Populations présentes dans les bâtiments pour le scénario « vendredi entre 12h et 12h30 » (SC3) sur Petite-Terre (Mayotte).

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).

3.2.1.3 *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 46).

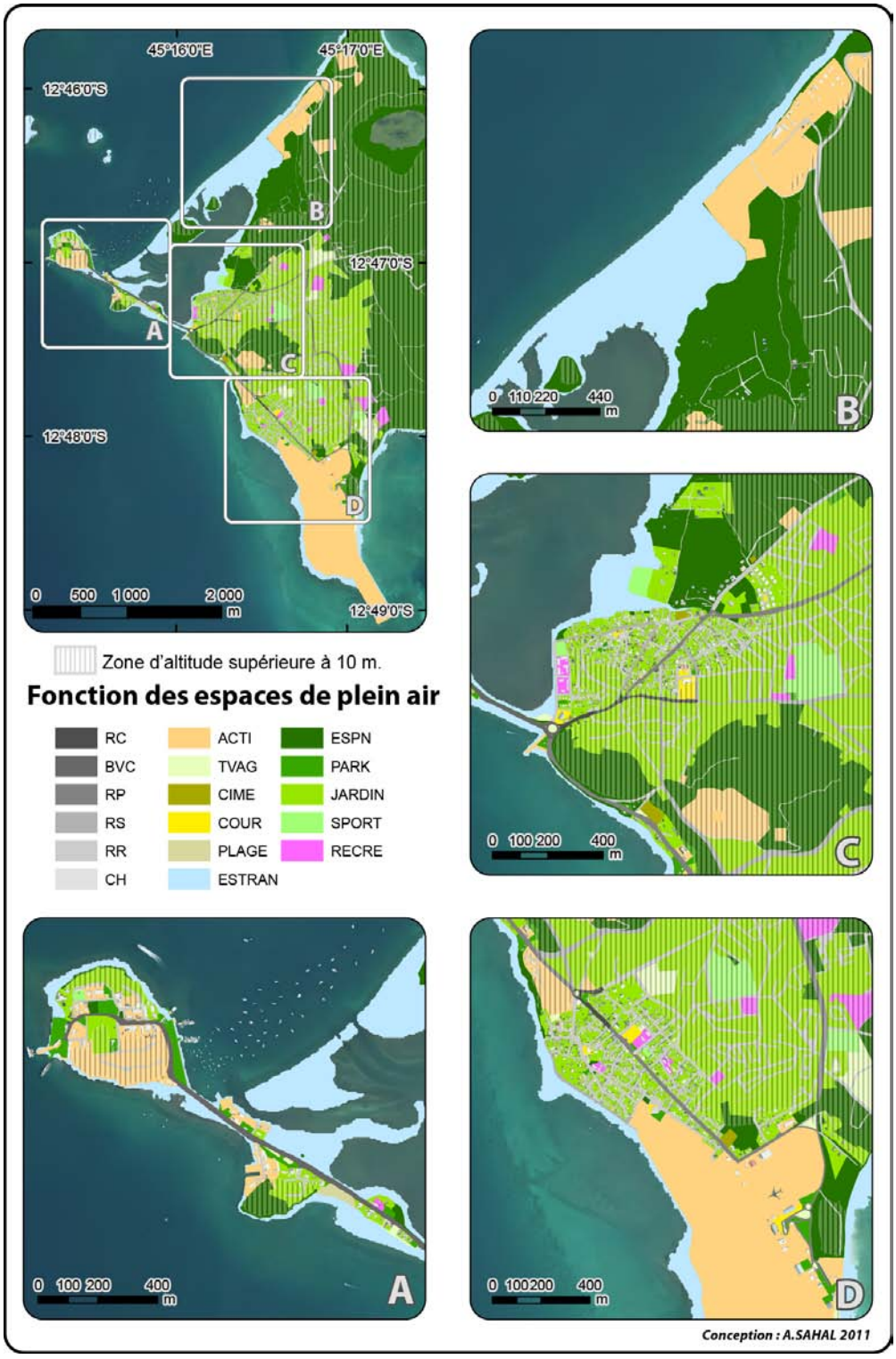


Figure 46. Fonction des espaces de plein air de Petite-Terre (Mayotte).

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 47), et un comptage est réalisé aux heures des scénarios choisis.

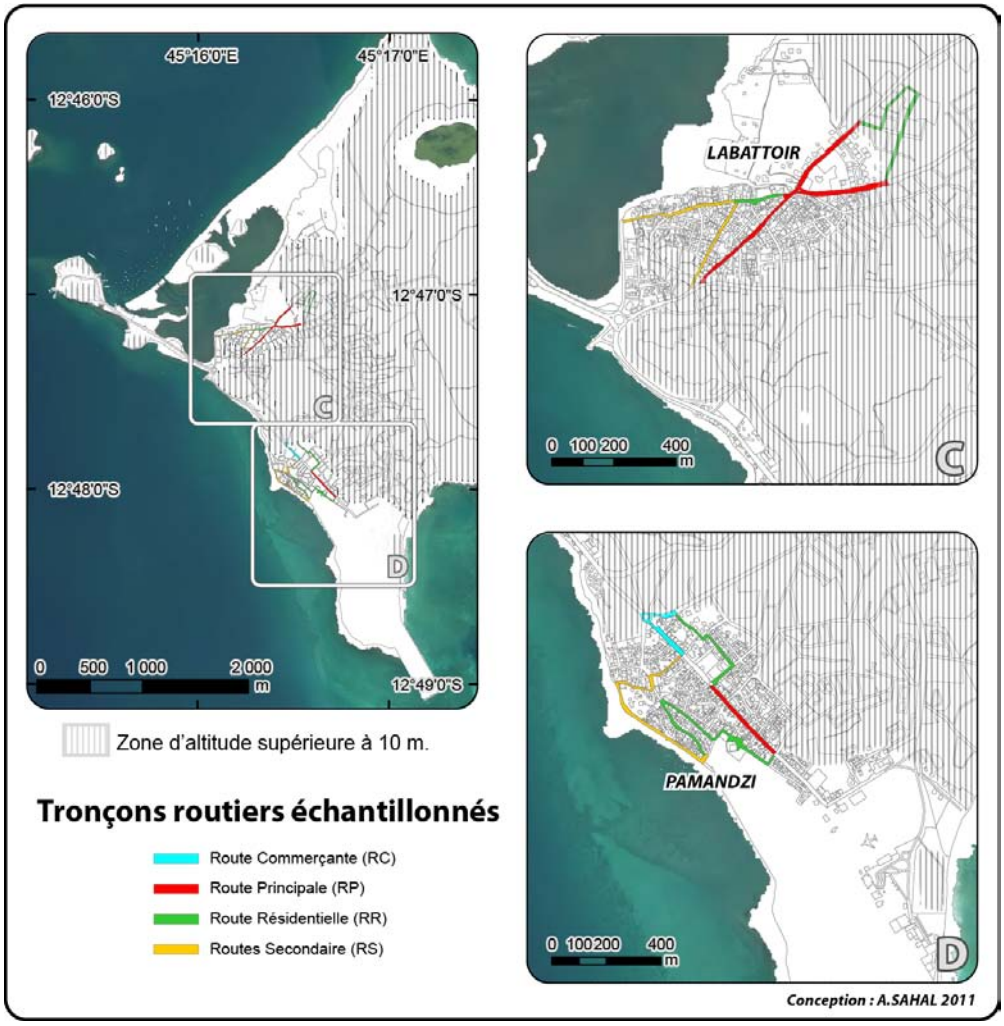


Figure 47. Tronçons routiers échantillonnés pour l'évaluation de la fréquentation des routes de Petite-Terre (Mayotte).

On aboutit à une densité de population des tronçons routiers échantillonnés que l'on extrapole à l'ensemble du réseau (Figure 48). 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.

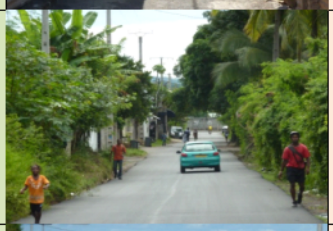
Type de route	Critères d'identification terrain	Vue terrain	Densité SC1	Densité SC2 Et SC3
CH: Chemin	Chemin ou piste en Terre. Impraticable en voiture apart pour des véhicules type 4X4 (sauf pour les sentiers de randonnées à l'Est de l'île). Fréquentation très faible à toute heure de la journée.		0	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 piéton. 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 48. 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 ½ effectif dans le bâtiment et ½ effectif en approche, sur les routes alentour.

Pour les autres espaces on utilise la méthode exposée précédemment (2.2.2.4, p. 55). On obtient ainsi une cartographie de la distribution des individus dans les espaces de plein air pour SC2 (Figure 49) et SC3 (Figure 50).

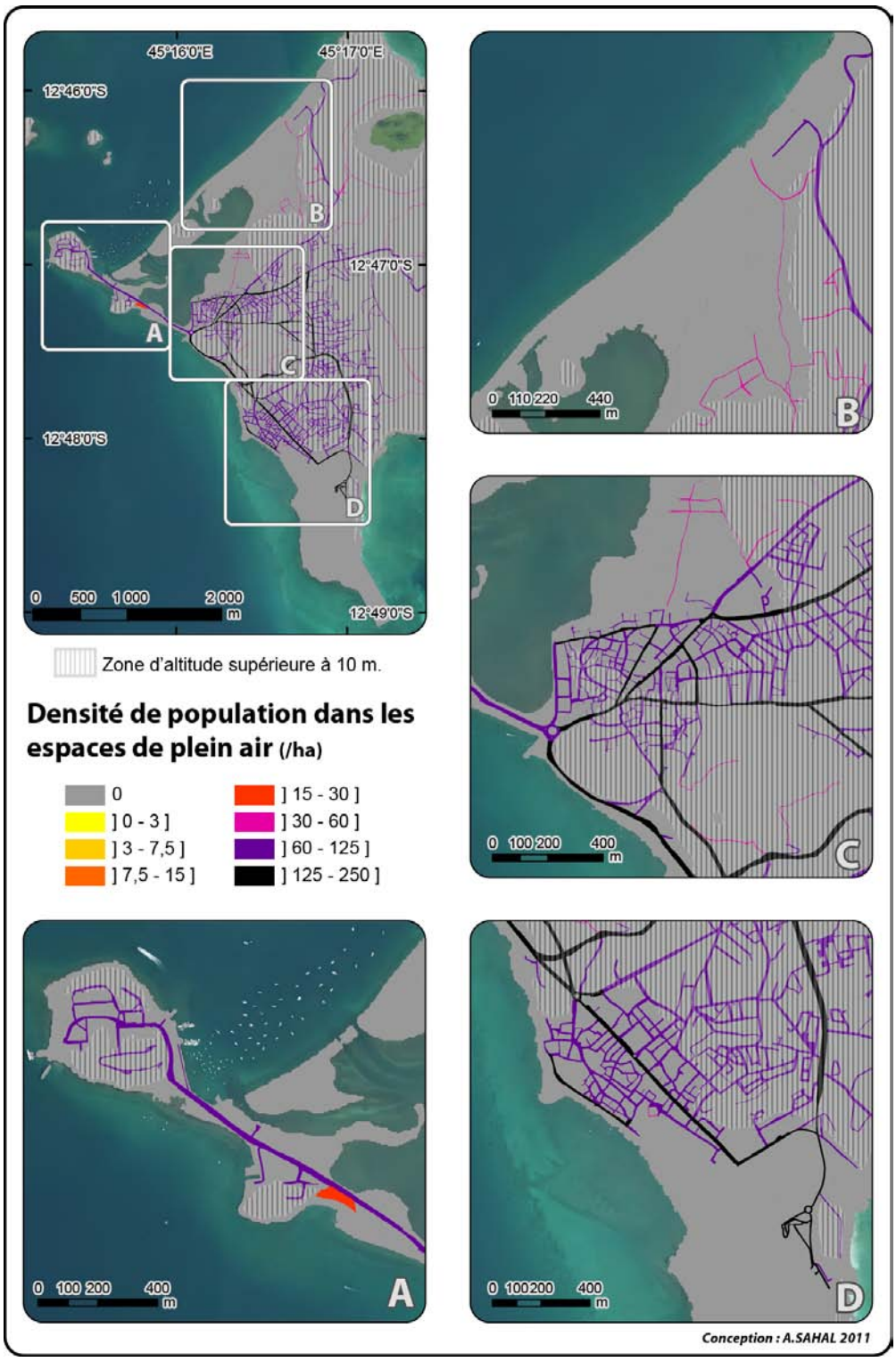


Figure 49. Densité de population dans les espaces de plein air de Petite-Terre (Mayotte) pour le scénario SC2.

Source : données issues de Drouet [2011].

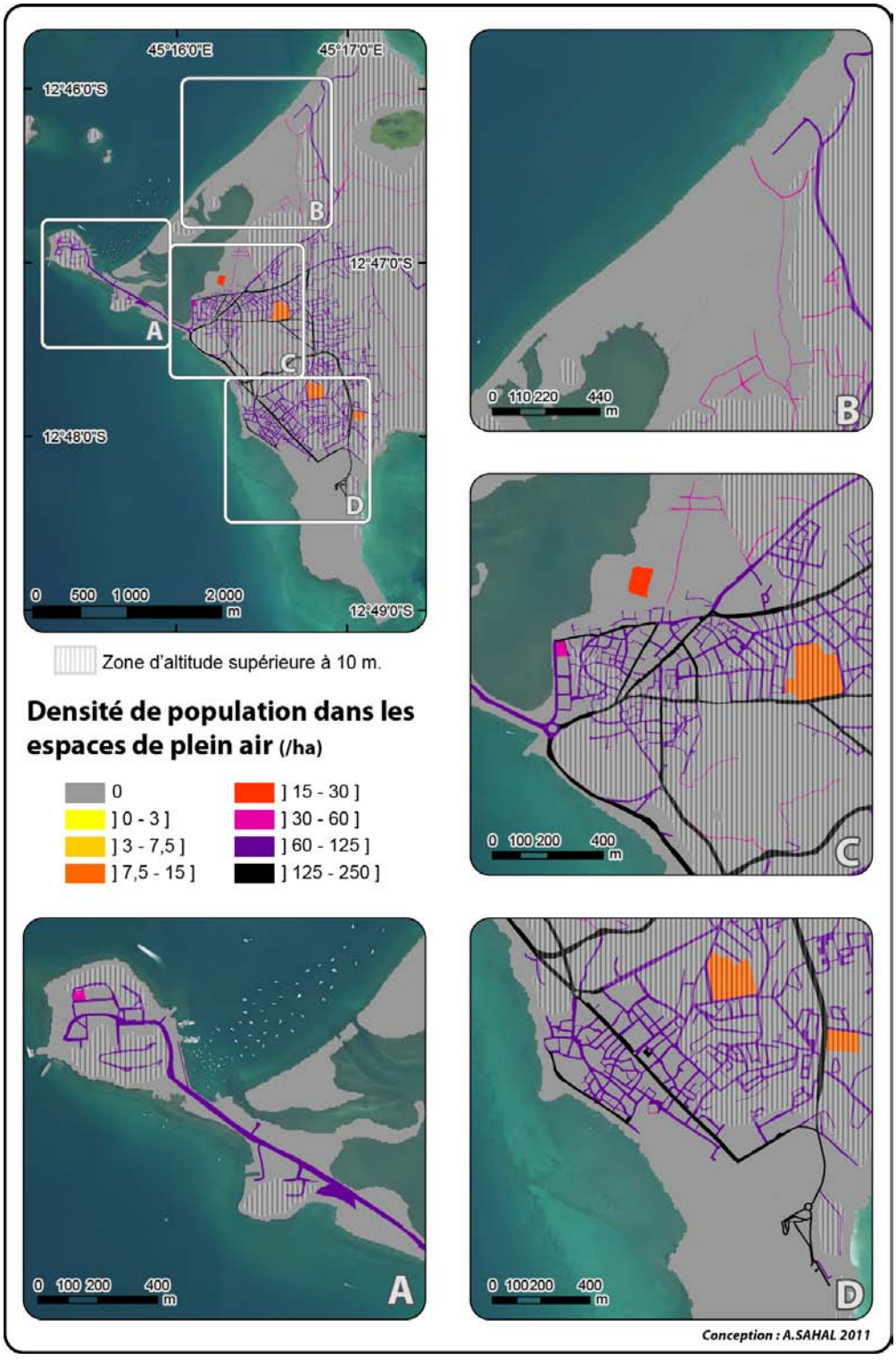


Figure 50. Densité de population dans les espaces de plein air de Petite-Terre (Mayotte) pour le scénario SC3.

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 51).

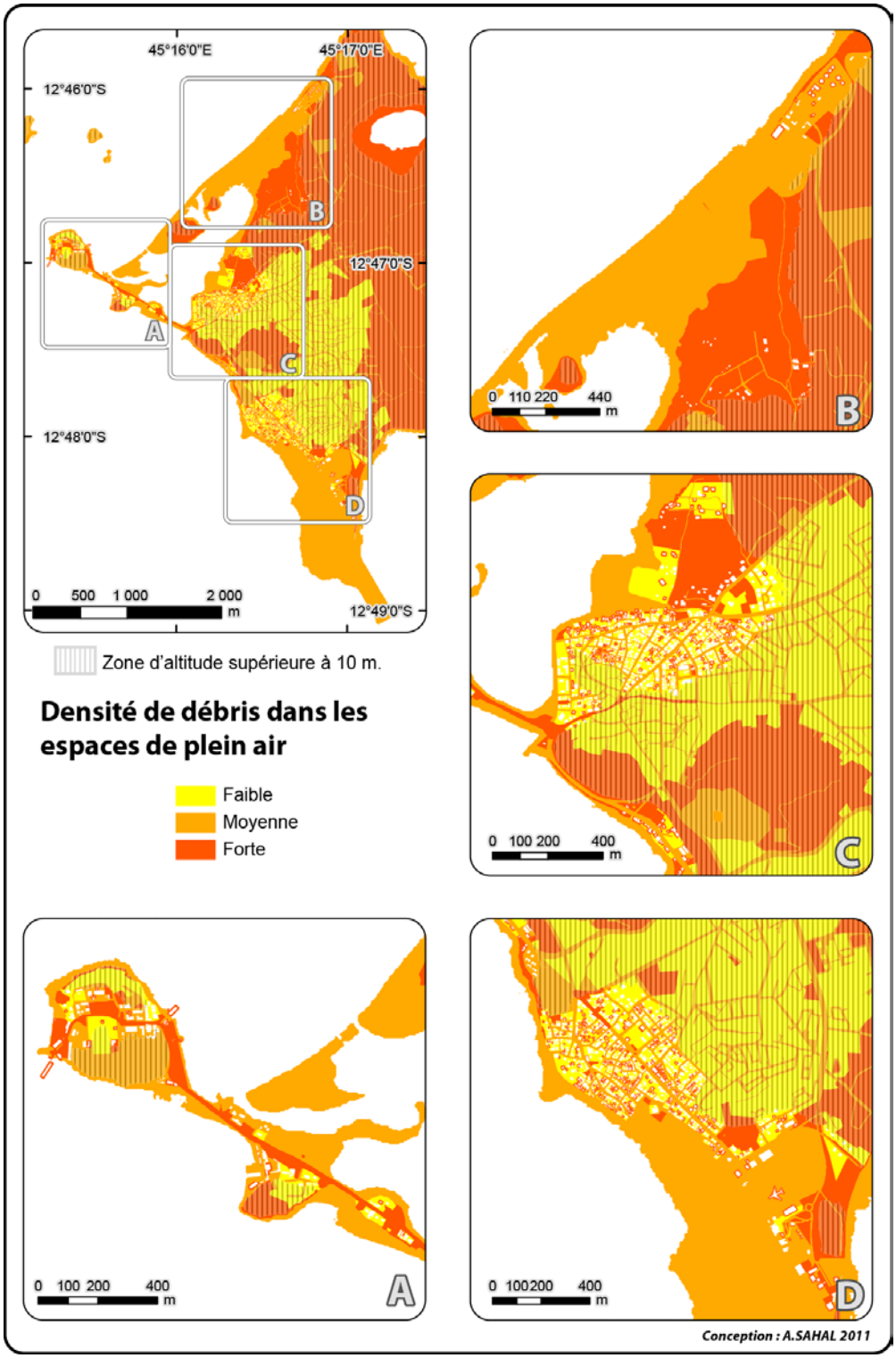


Figure 51. Densité de débris potentiellement mobilisables dans les espaces de plein air de Petite-Terre (Mayotte).

Source : données issues de Drouet [2011].

On observe que les densités de débris (cf. 2.4.2, p. 73) 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.

3.3 La gestion du risque tsunami à Mayotte

On s'intéresse ici à la capacité de réponse des autorités à Mayotte dans un contexte de scénario de risque. Quelles seraient les réactions des autorités et celles des populations en cas de menace ?

Mayotte, dépendante de l'EMZPCOI situé à La Réunion, possède son propre plan ORSEC. Les dispositifs spécifiques « tsunami » actuels datent de mars 2009[18].

En l'absence de modélisation de l'aléa tsunami sur les côtes de l'île, les dispositifs proposent une cartographie des zones d'altitudes inférieures à 5 m. (équivalentes aux zones en rouge sur la Figure 38, p. 90), et liste les effets potentiels (1) sur l'intégrité physique des populations : personnes emportées, blessées par des débris charriés, projetées contre des objets terrestres ; (2) sur les conditions sanitaires : maladies, contamination de l'eau potable, problèmes d'alimentation, etc. ; (3) sur l'économie : faune et flore côtière, récoltes, etc. ; (4) sur l'environnement : destruction d'installations dangereuses et dispersion de toxiques, pathogènes, etc. pour les installations à terre, ou par dispersion de sédiments pollués pour les émissaires industriels et décharges sous-marines, etc., enfin, dislocation et pollution des coraux.

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 ».

Les bulletins d'alerte du TWC sont transmis à la Préfecture (SIDPC) par Météo-France. Le Préfet décide ou non d'évacuer les zones d'habitation exposées. L'information est transmise aux

[18] Arrêté N° 2009-103 du 17 mars 2009 par le Préfet de Mayotte.

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.

L'alerte aux populations est diffusée 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. 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.

Comme on a pu le voir, l'aléa peut être d'origine locale, avec des délais de réponse de quelques minutes entre la perception d'une secousse et l'arrivée de vagues, d'origine régionale, avec plusieurs dizaines de minutes, et enfin d'origine transocéanique avec plusieurs heures de délai avant l'arrivée des premières vagues. Il apparaît donc important d'évaluer le temps nécessaire à l'évacuation des littoraux afin de qualifier la vulnérabilité humaine liée à la gestion de crise.

3.4 Modélisation des évacuations

L'absence de modélisation ne permet pas une évaluation de l'endommagement structurel et des pertes humaines potentiels (pas de submersion ni d'intensité de l'aléa). Il est toutefois possible d'évaluer les capacités d'évacuation de Petite-Terre en utilisant *Evacuation Route Tools* (ERT) après une sélection des zones refuge.

3.4.1 Sélection de zones refuge et cartographie de leur accessibilité

Compte tenu de l'historique de l'aléa, les zones refuge sélectionnées doivent se situer à des altitudes supérieures à 10 m. Elles sont multipliées de manière à réduire les temps d'accès depuis les zones côtières. Comme toute zone refuge, elles doivent être en mesure d'accueillir des populations pendant plusieurs heures (Figure 52).

Il s'agit d'établissements recevant du public (ERP) permettant l'accueil de populations sinistrées, fournissant abris et commodités. Ces zones refuge ont été identifiées et validées sur le terrain, notamment grâce à l'aide des fiches ERP disponibles auprès du Service Interministériel de Défense et Protection Civile (SIDPC). A noter que les accès aux zones refuge décrivent les points d'entrée dans ces zones. Ils sont connectés au réseau routier et utilisés comme points d'aboutissement lors de la mise en œuvre d'ERT.

Après construction de coefficients de conservation de vitesse pour les pentes et les voies empruntables, le modèle fournit une cartographie des temps d'accès aux différentes zones refuge (Figure 53).

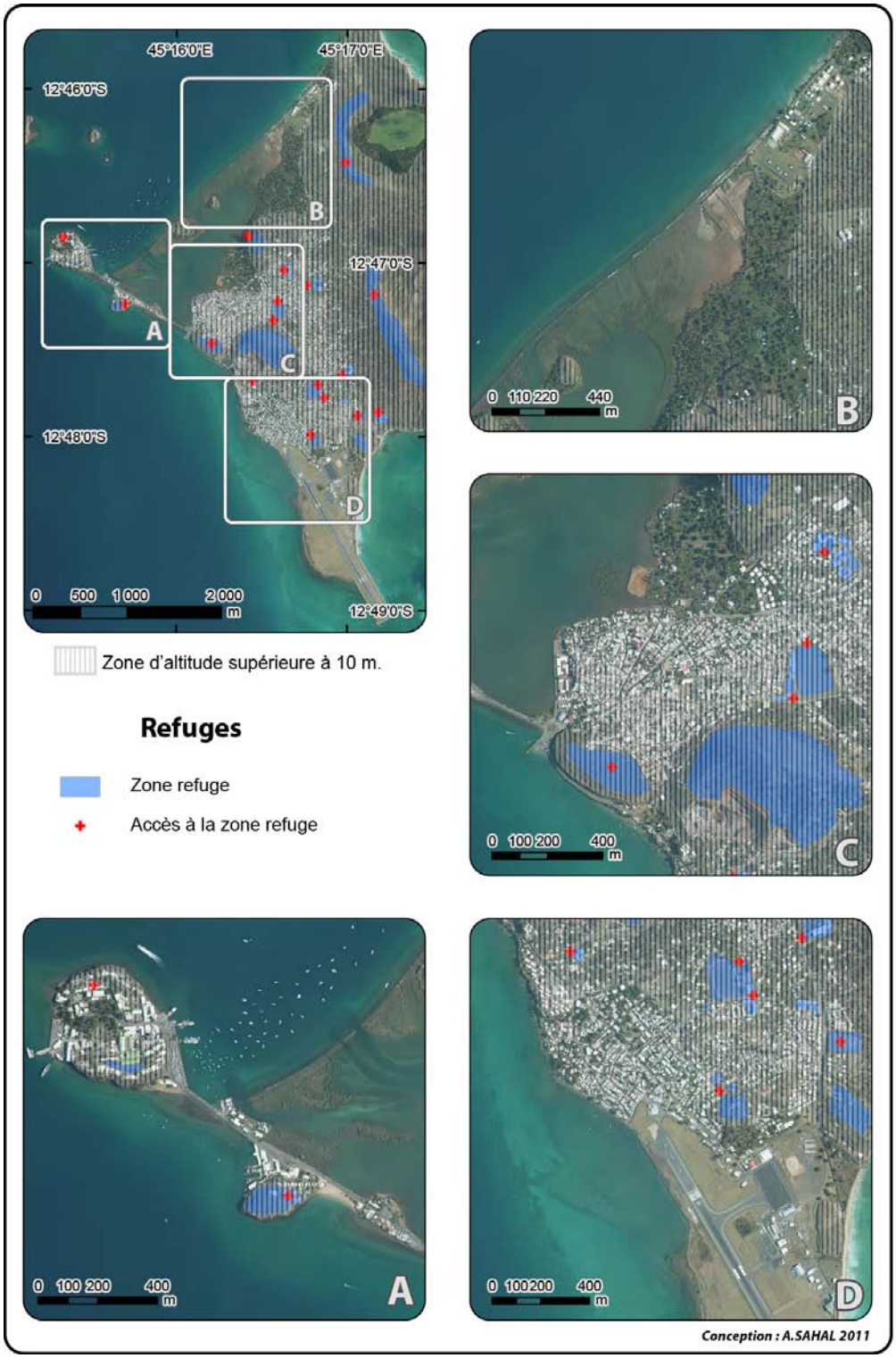


Figure 52. Zones refuge sélectionnées pour Petite-Terre (Mayotte).

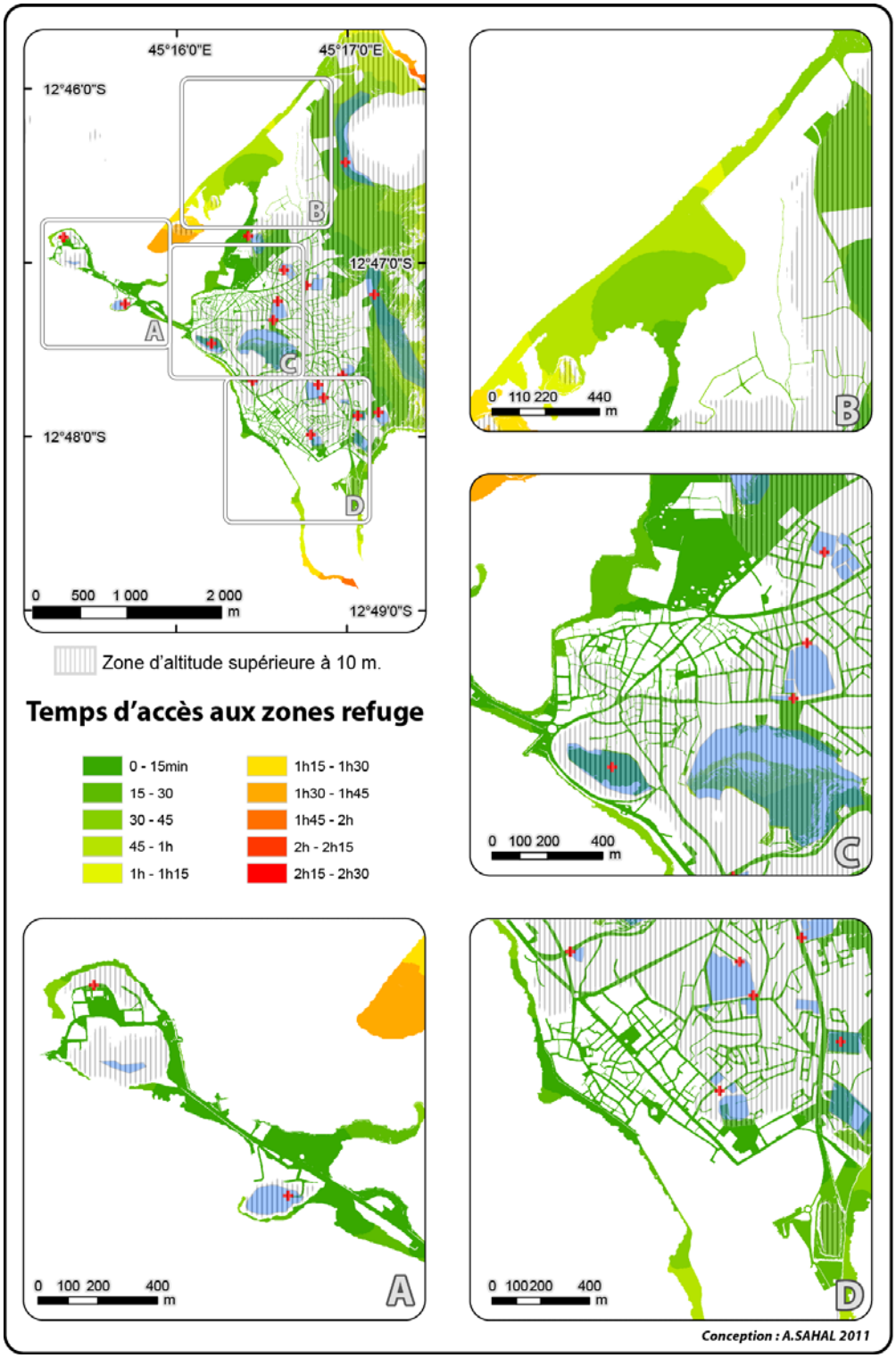


Figure 53. Temps d'accès pédestre aux zones refuge sur Petite-Terre (Mayotte).

On peut constater que les temps d'évacuation des zones basses sont inférieurs à la demi-heure de marche. Seuls certains secteurs restent quelque peu enclavés, notamment le secteur lagunaire (cadre B), ainsi que la partie sud du secteur aéroportuaire. A noter que ces deux secteurs sont très peu occupés. Ces temps d'accès aux zones refuge est satisfaisant dans la mesure où les sources de tsunamis pouvant affecter Mayotte sont essentiellement distales ou régionales.

Conclusion du chapitre

Peu de recul existe concernant l'aléa à Mayotte, malgré l'importance de l'impact du tsunami de décembre 2004. Cet événement s'est produit durant une marée relativement basse. Un événement similaire à marée haute aurait eu des effets sans doute plus dommageables. Peu de dégâts ont été enregistrés, mais de nombreuses habitations se sont vues inondées. Seules quelques denrées alimentaires (notamment des sacs de riz) ont été perdues par les habitants touchés, mais ces pertes se sont révélées d'une grande importance pour ces populations aux ressources limitées. La vulnérabilité de ces populations littorales est d'autant plus accentuée dans les secteurs d'habitat informel occupés par des clandestins comoriens : ces derniers se concentrent dans les secteurs lagunaires sur Grande-Terre, contrairement à Petite-Terre où ils sont situés en hauteur compte tenu de la pression démographique exercée sur le littoral de cette île.

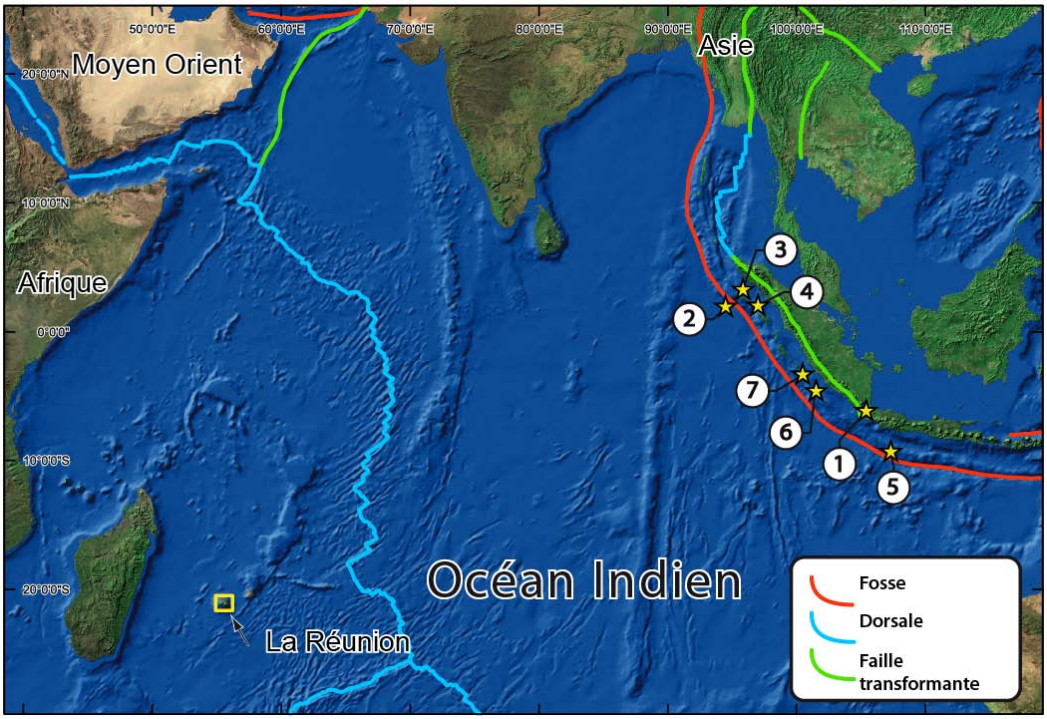
L'essentiel des étapes d'évaluation du risque par scénario a pu être adapté au contexte mahorais. Cette évaluation manque toutefois d'une confrontation des enjeux à l'aléa. La démarche permet néanmoins, en attendant d'obtenir une modélisation fiable, de cartographier les enjeux humains et structurels tout comme leurs vulnérabilités. La sélection de zones refuge permet par ailleurs de rendre compte des capacités de mise en sureté des populations qui se révèlent convenables (accessibilité inférieure à la demi-heure selon *Evacuation Route Tools*), à condition que ces zones refuge soient identifiées par les populations et que ces dernières soient alertées à temps pour évacuer.

Chapitre 4e. **Evaluation intégrée du risque de tsunami à La Réunion : le cas de Saint-Paul**

4.1 Evaluation et modélisation de l'aléa

4.1.1 Historique des tsunamis à La Réunion

C'est également dans le cadre du programme PREPARTOI qu'une investigation a pu être menée à La Réunion durant des missions de terrain en 2010 puis en 2011. Sept tsunamis transocéaniques ont été identifiés comme ayant impacté les côtes réunionnaises (Figure 54). Les sources de ces tsunamis sont localisées au large de l'Indonésie, le long de sa fosse. La Figure 55 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 ¤	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 54. 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 ¤ Kanamori *et al.* [2010], tectonique par Coffin *et al.* [1998] ; figure adaptée de Sahal *et al.* [2011b ; 2011c].

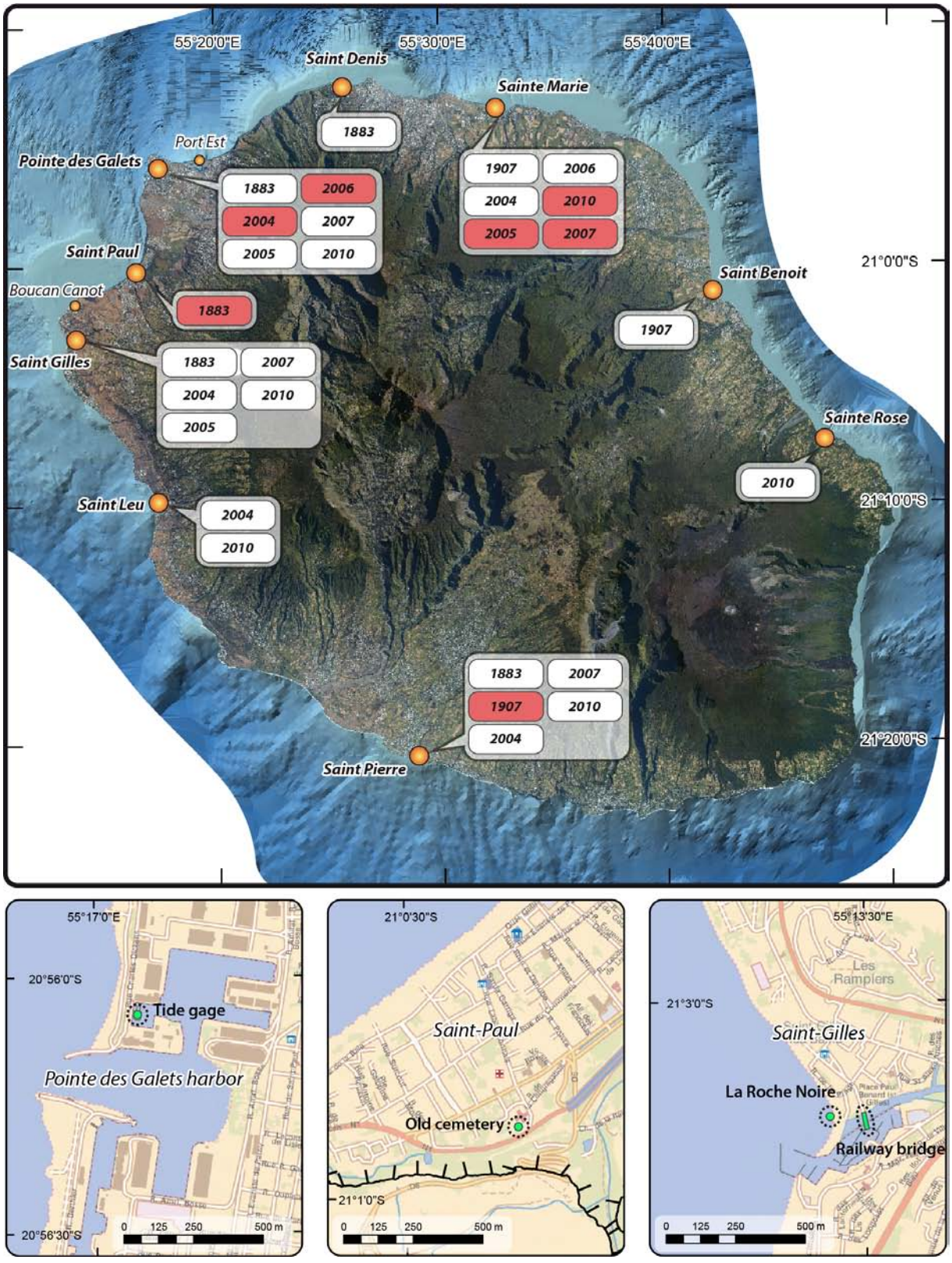


Figure 55. Île de La Réunion : lieux cités dans le texte et effets majeurs pour chaque événement transocéanique identifié (en rouge les localités les plus affectées par chaque événement.

Source : extrait de Sahal *et al.* [2011b ; 2011c].

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.

4.1.1.1 *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 ou 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 ancres 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 55). 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 parait 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**.

4.1.1.2 *Tsunami du 4 janvier 1907*

Le 4 janvier 1907, à 5:19 UTC [Dunbar 2011], un séisme de magnitude Ms=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 chaine 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.

4.1.1.3 *Tsunami du 26 décembre 2004*

Le 26 décembre 2004, à 00:58 UTC, un séisme de magnitude Mw = 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 et 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, **T_0+8h55)**. Le signal du tsunami est enregistré jusqu'en matinée du 28 décembre.

4.1.1.4 *Tsunami du 28 mars 2005*

Le 28 mars 2005 à 16:09 UTC, un séisme de magnitude Mw = 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 **T_0+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 maitre 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.

4.1.1.5 *Tsunami du 17 juillet 2006*

A 8:19 UTC, un séisme de magnitude Mw = 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**.

4.1.1.6 *Tsunami du 12 septembre 2007*

Le 12 septembre 2007, à 11:10 UTC, un séisme de magnitude Mw = 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.

4.1.1.7 *Tsunami du 26 octobre 2010*

Le 25 octobre 2010, à 14:42 UTC (18:42 LT[19] à La Réunion), un séisme de magnitude Mw = 7,7 est enregistré en Indonésie, à proximité de l'archipel Mentawai (Figure 56).

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 57). Peu après 22:00 UTC (2:00 LT le 26 à La Réunion), c'est à dire à **T_0+ 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 57).

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 (Annexe 4, p. XXV) du 30 octobre au 8 novembre 2010, c'est-à-dire au lendemain de l'événement [Sahal et 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 58 illustre les valeurs maximales de *runup* mesurées le long des côtes de La Réunion.

[19] LT pour *local time*, heure locale à La Réunion.

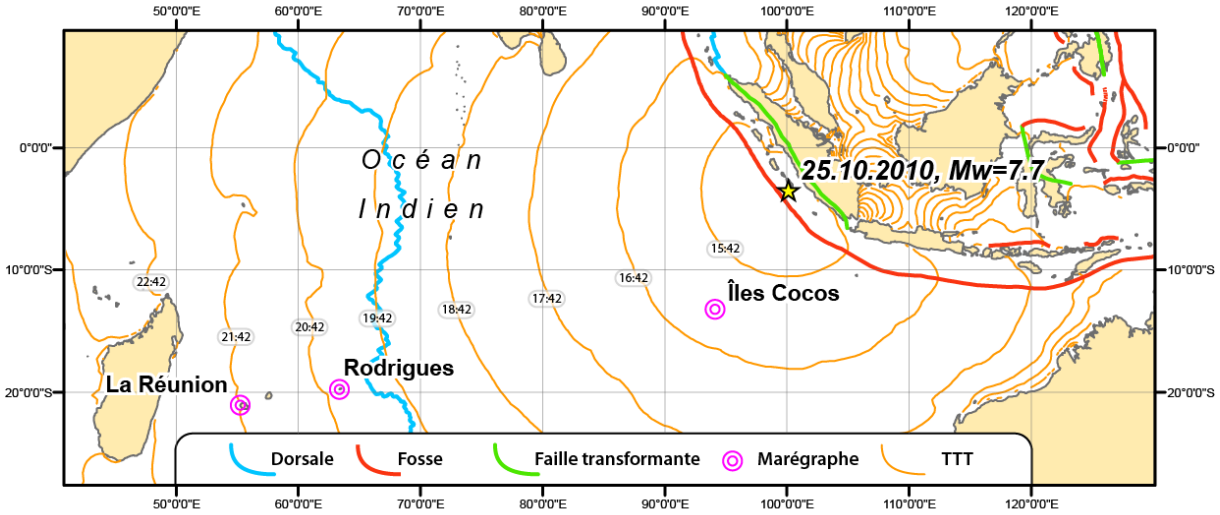


Figure 56. Localisation de la source du tsunami du 25.10.2010 et des marégrammes étudiés.

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].

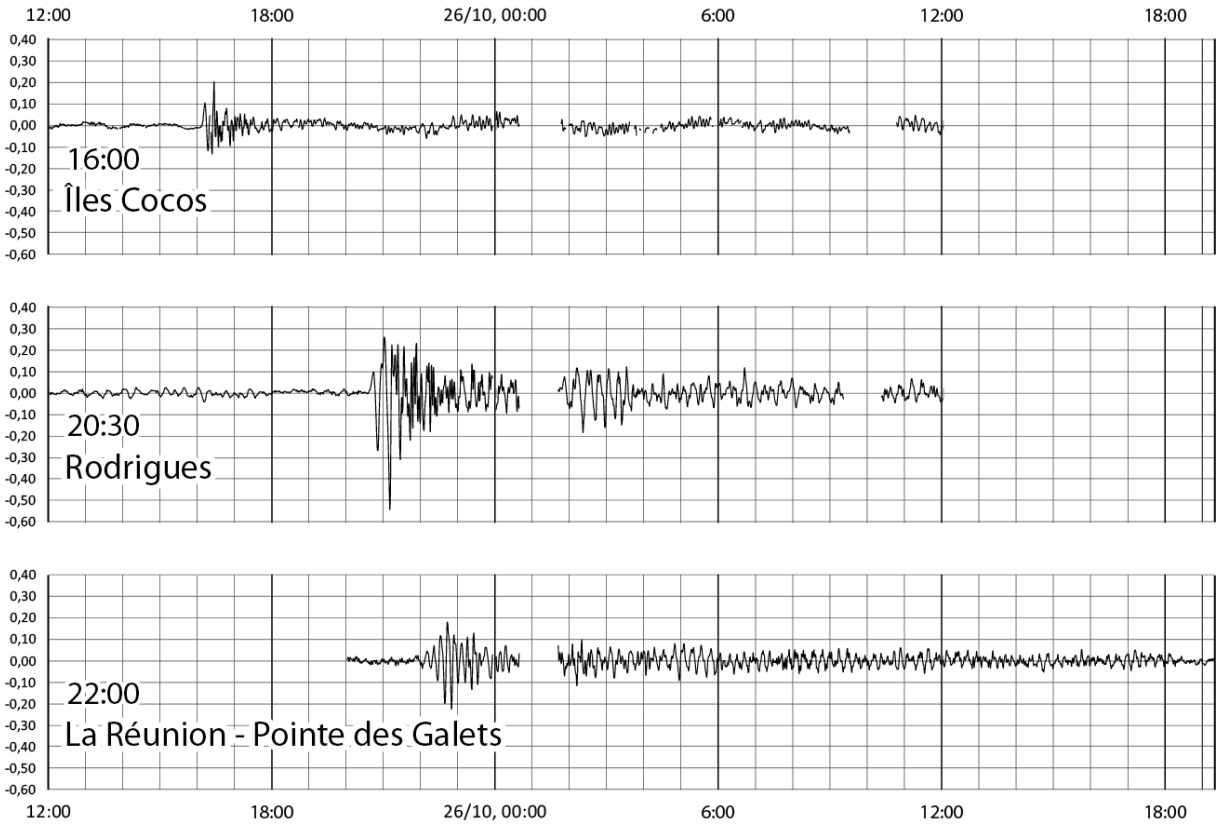
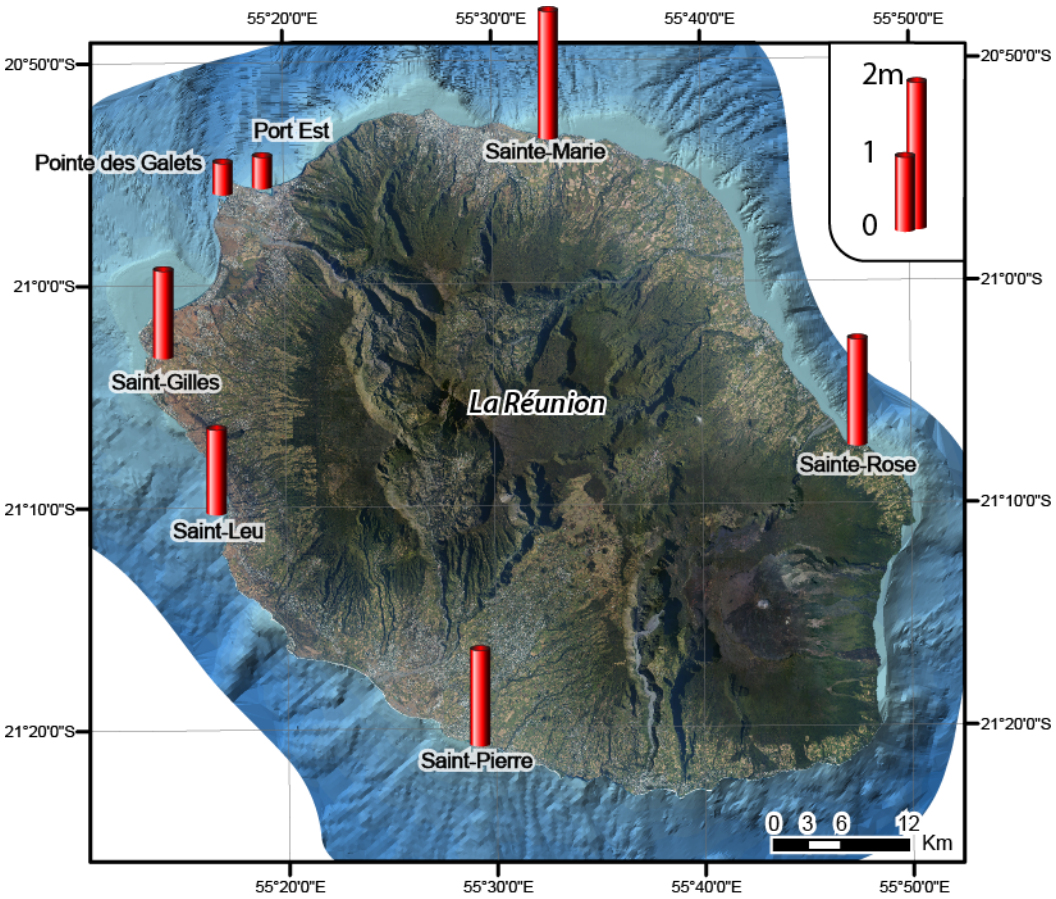


Figure 57. Marégrammes des îles Cocos, Rodrigues et de La Réunion (UTC) lors du passage du tsunami du 26.10.2010 (une régression polynomiale a été effectuée afin de retirer le signal de la marée normale).

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 58. *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.

4.1.1.8 *Synthèse historique*

Une frise chronologique des *runups* maximaux mesurés pour chaque événement est construite (Figure 59).

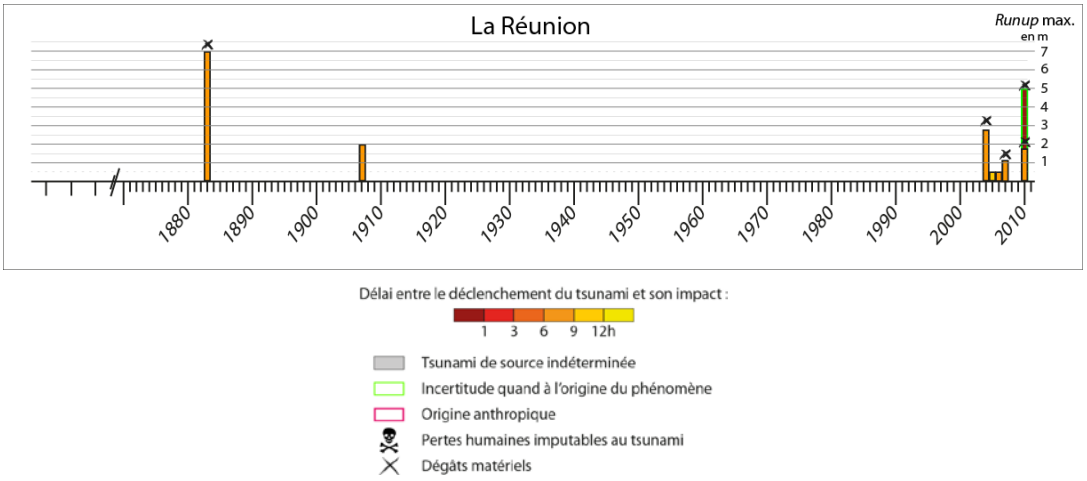


Figure 59. Frise chronologique des effets des tsunamis identifiés à La Réunion.

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 [Okal *et al.* 2006 ; Hébert *et al.* 2007], 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.

4.1.2 Comparaison données historiques et modélisation

L'agglomération de Saint-Paul est la plus impactée historiquement. C'est par conséquent sur cette ville que s'est concentrée la modélisation. Dans cette perspective, une cartographie de la rugosité de ce territoire a été produite en se basant sur les observations faites sur le terrain (Figure 60). Malheureusement, le code du CEA/DASE n'est pas encore au point pour intégrer la rugosité des surfaces émergées. Cette cartographie reste toutefois disponible dans la perspective d'une intégration de cette variable dans les modèles.

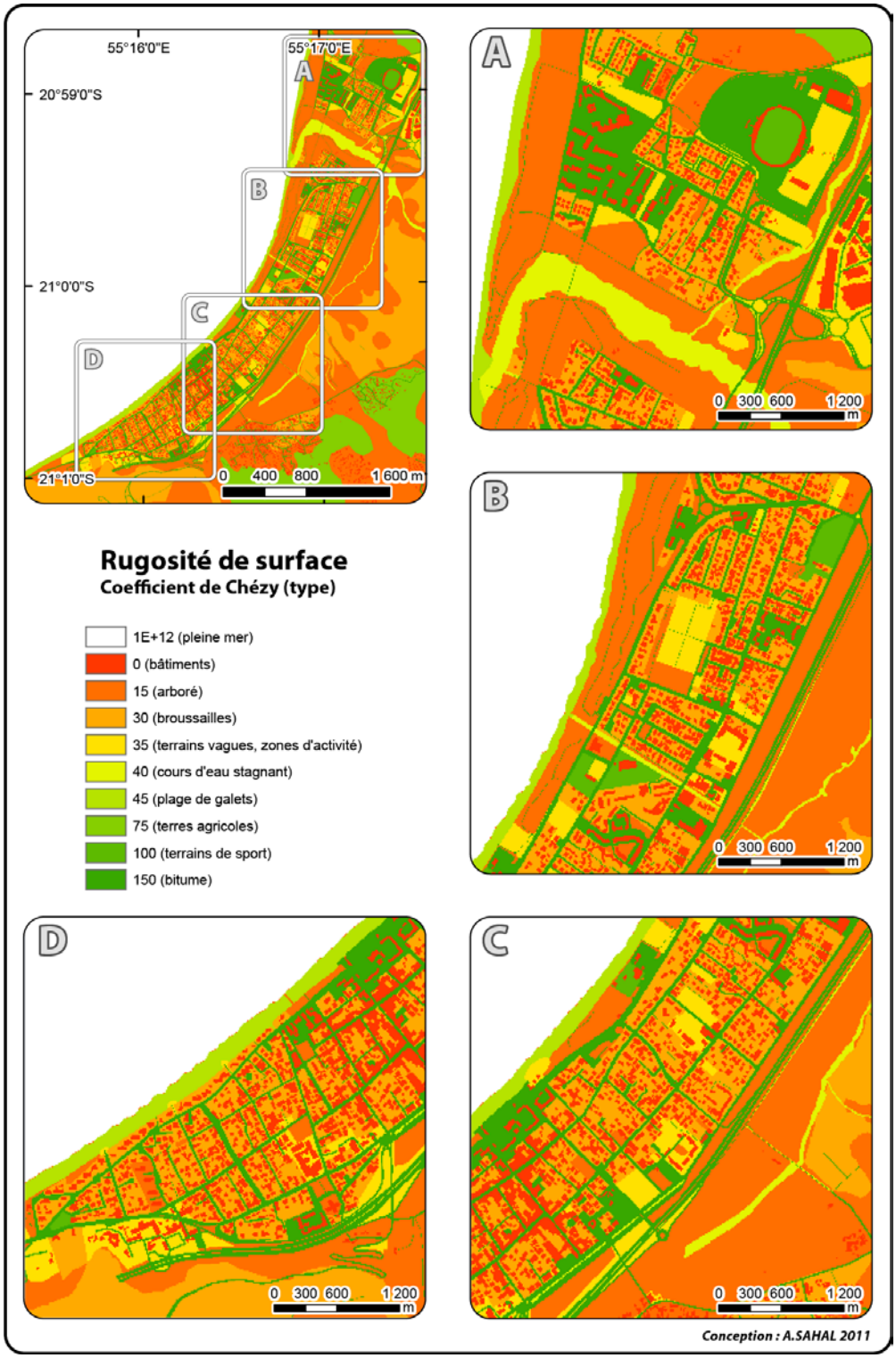
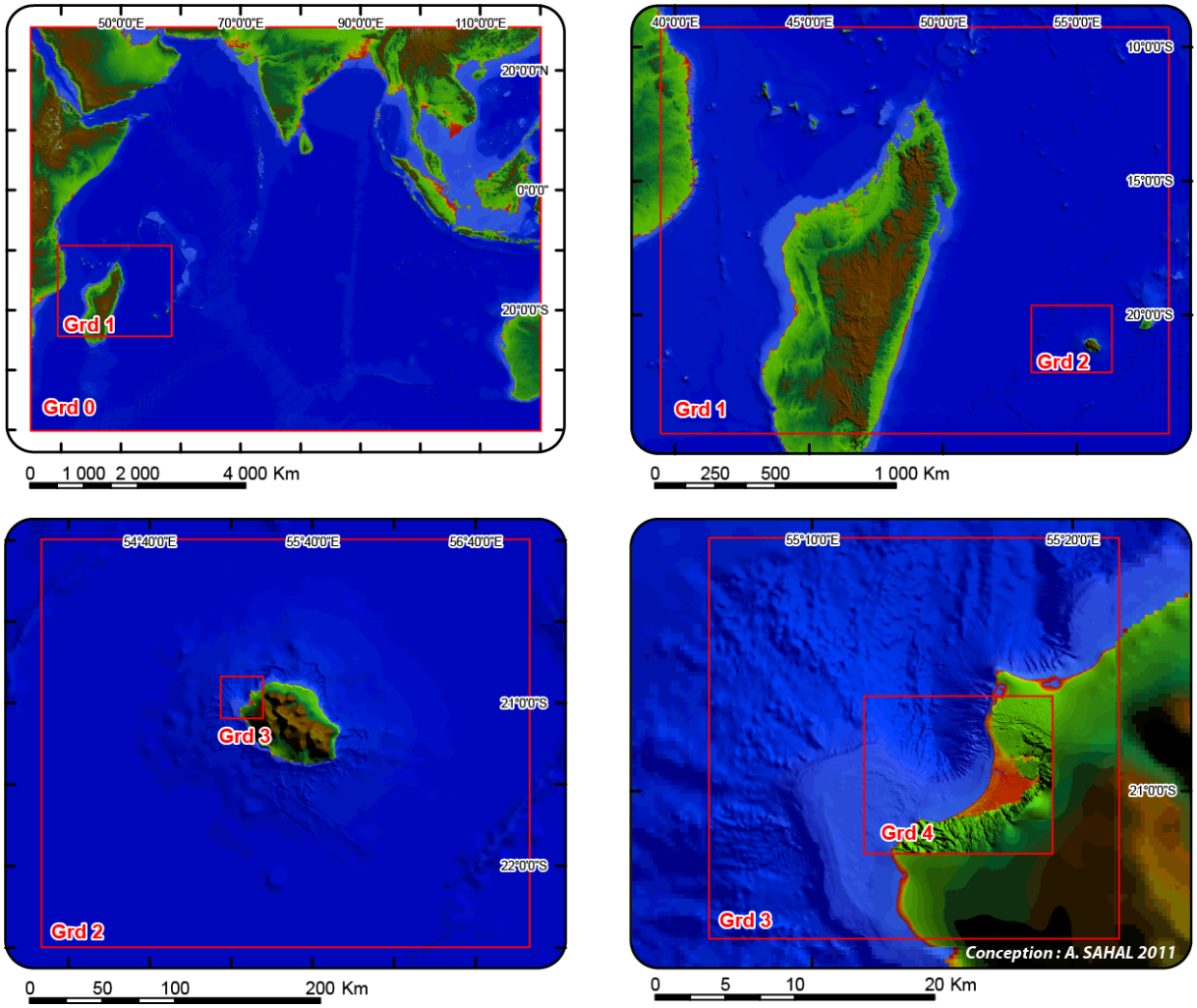


Figure 60. Rugosité de surface à Saint-Paul (coefficient de Chézy).

Le choix d'un scénario d'aléa s'est porté sur l'événement du 24 novembre 1833, dont la source est la plus défavorable à La Réunion compte tenu de sa directivité [Okal *et al.* 2006 ; Hébert *et al.* 2007]. Plusieurs auteurs décrivent cette source dans la littérature, notamment Natawidjaja *et al.* [2006] et Zachariasen *et al.* [1999]. La description de Natawidjaja *et al.* [2006] comporte trois sous-plans avec

une magnitude estimée à Mw = 8,9. Celle de Zachariasen *et al.* [1999] présente quant à elle un seul plan de faille long de 250 km. et large de 55 km., avec une magnitude estimée à Mw = 9,2. La description de source maximisant la magnitude du séisme est choisie en vue d'une modélisation maximisant les effets à la côte.

La modélisation est réalisée par le CEA, partenaire du programme PREPARTOI, sur des grilles emboitées de résolution croissante à mesure que l'on se rapproche des zones d'intérêt (Figure 61).



Grille	Zone	Résolution (°)	Résolution (m.)
0	Océan Indien	0,05	~5500
1	Madagascar	0,0125	~1375
2	La Réunion large	0,0027	~300
3	Quart nord-ouest	0,00055	~60
4	Saint-Paul large	0,000138	~15
5	Saint-Paul Etang	0,0000416	~4,5

Figure 61. Grilles utilisées par le CEA/DASE pour la modélisation de l'aléa à La Réunion (en rouge les secteurs d'altitudes inférieurs à 10 m).

Source : données GEBCO, SHOM, DDE Phares et Balises, Litto3D IGN.

Le CEA/DASE fournit les résultats de sa modélisation, intégrant hauteurs d'eau et vitesses de flux maximales atteintes pendant une durée de 10 heures après l'initiation du tsunami (respectivement présentées en Figure 62 et Figure 63).

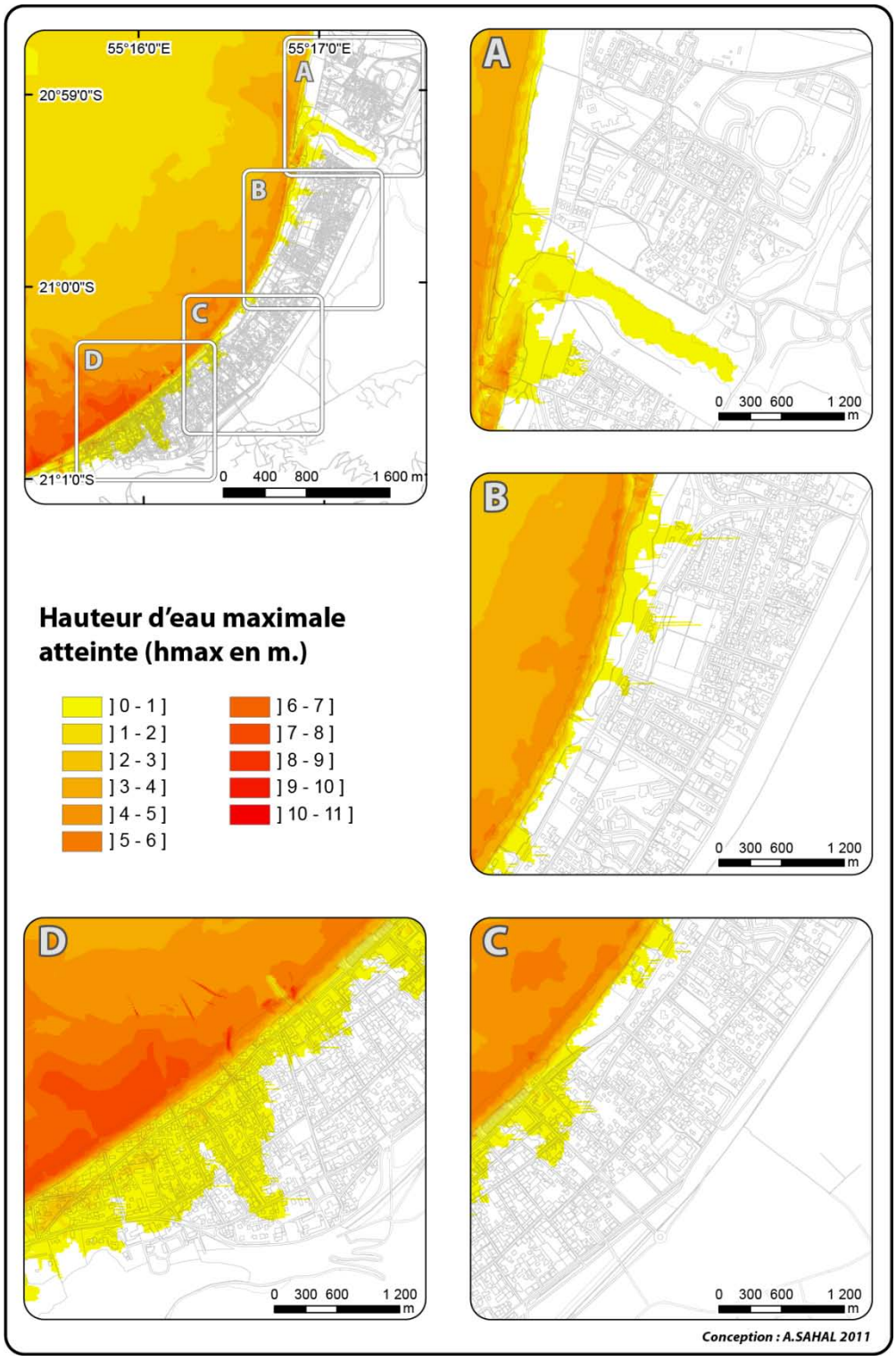


Figure 62. Hauteur maximale atteinte par un tsunami similaire à celui de 1833 à Saint-Paul (La Réunion) durant les 10 heures suivant l'initiation du tsunami.

Source : données CEA.

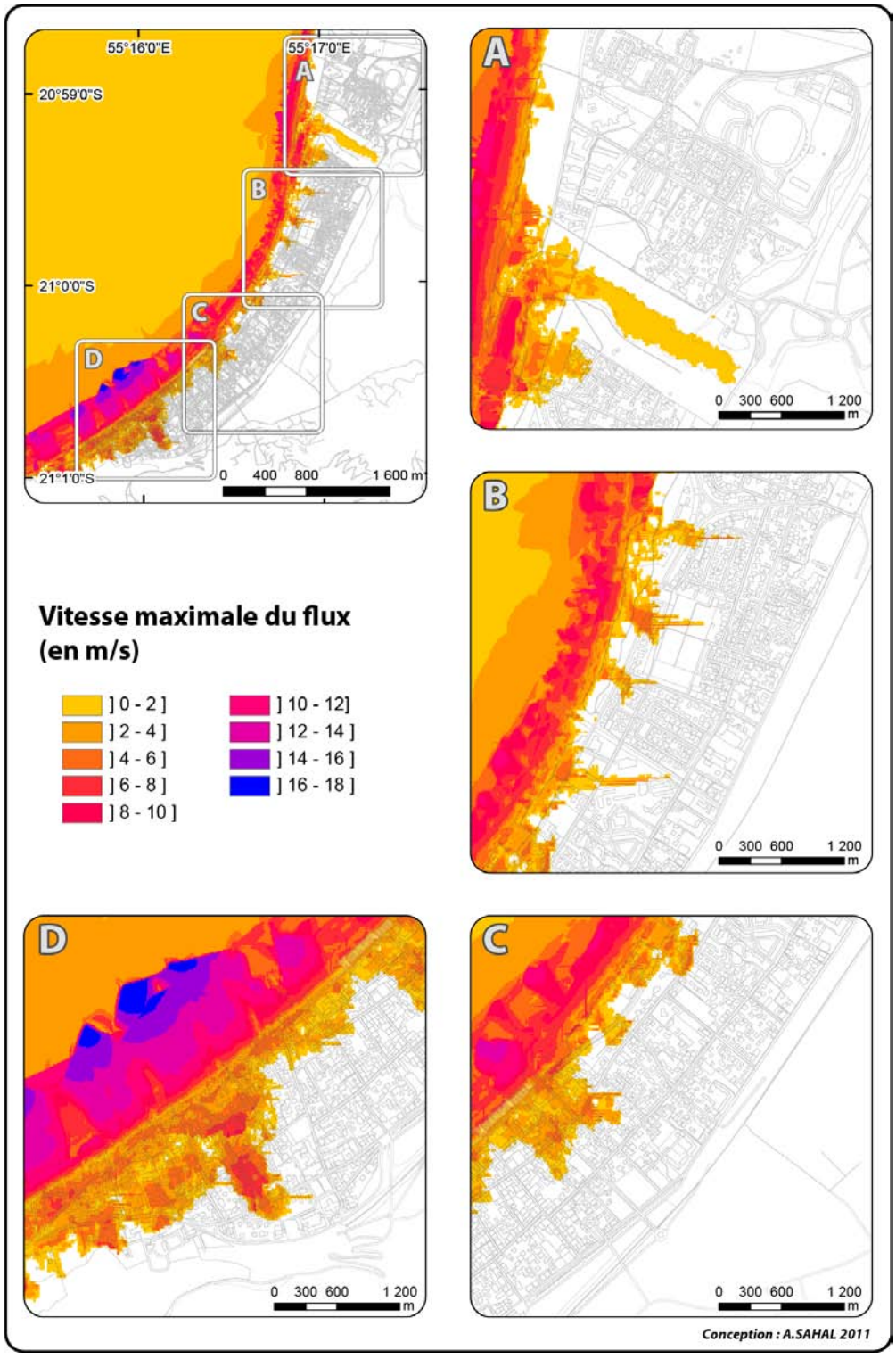


Figure 63. Vitesse maximale du flux pour un tsunami similaire à celui de 1833 à Saint-Paul (La Réunion) durant les 10 heures suivant l'initiation du tsunami.

Source : données CEA.

C'est avant tout le secteur sud de l'agglomération de Saint-Paul qui semble être un site d'amplification préférentielle du train d'ondes. Le tsunami modélisé atteint quasiment les limites de

la submersion du tsunami de 1883 (cf. 4.1.1.1, p. 118). Le *runup* maximal atteint environ 7 m. avec une profondeur d'inondation de plus de 1200 m. à l'intérieur des terres.

4.2 Evaluation de la vulnérabilité des bâtiments et des enjeux humains

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. (cf. Figure 61, p. 128).

4.2.1 Fonctions des bâtiments et vulnérabilité structurelle

La méthode est appliquée à l'ensemble de l'agglomération de Saint-Paul, aboutissant à une cartographie des fonctions de chaque bâtiment (Figure 64).

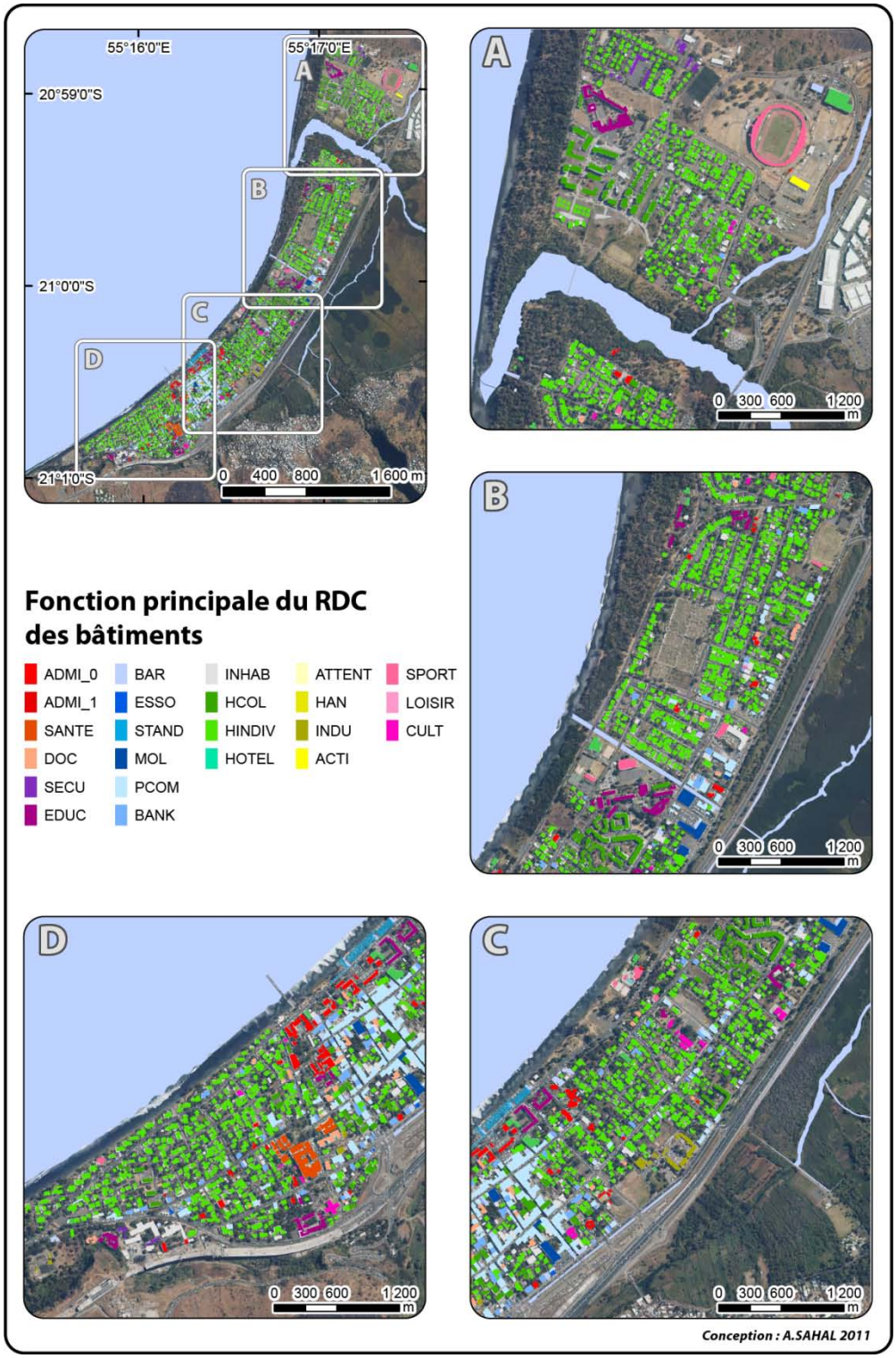


Figure 64. Fonction principale du RDC du bâti à Saint-Paul (La Réunion).

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

La Figure 64 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 65). On notera l'apparition d'une classe inédite : la classe F qui décrit des bâtiments sur pilotis (Figure 66). L'adaptation de cette typologie à l'architecture locale permet une cartographie de la vulnérabilité structurelle des bâtiments de l'agglomération (Figure 67).

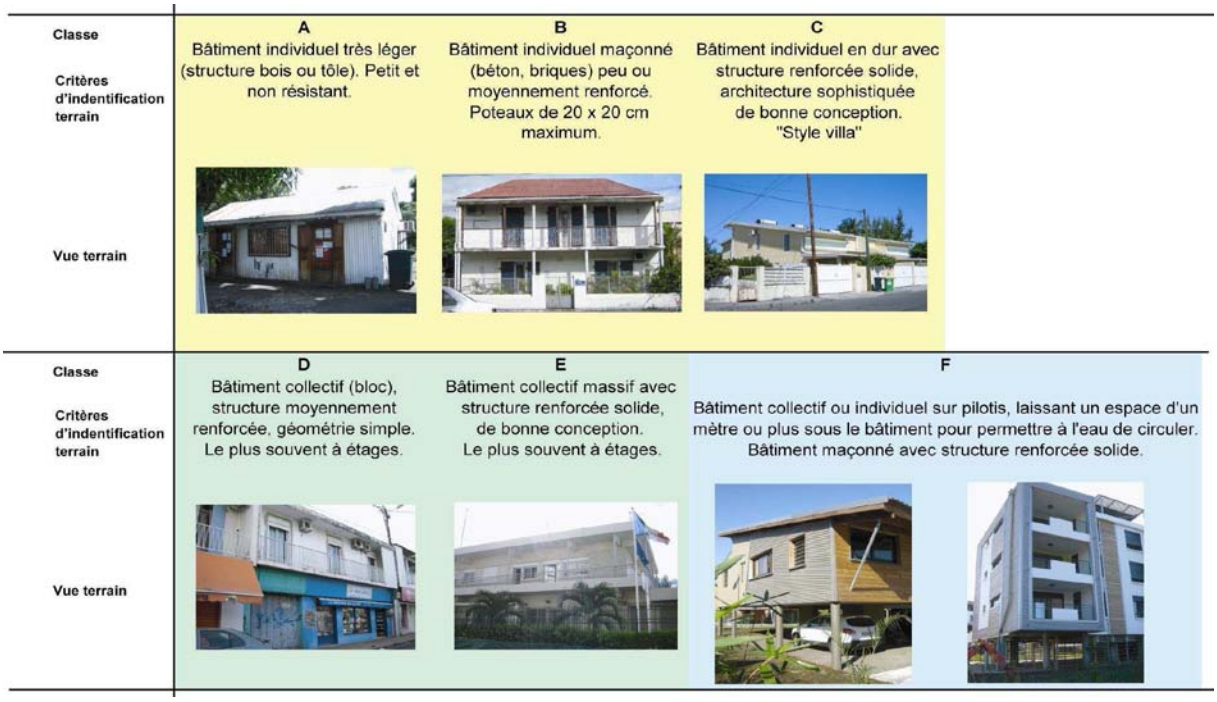


Figure 65. Typologie structurelle du bâti à Saint-Paul (La Réunion).

Source : extrait de Fautrero [2010].

Figure 66. Habitat récent (individuel et collectif) construit sur pilotis à Saint-Paul (La Réunion).

Source : clichés A. Sahal, 2010.

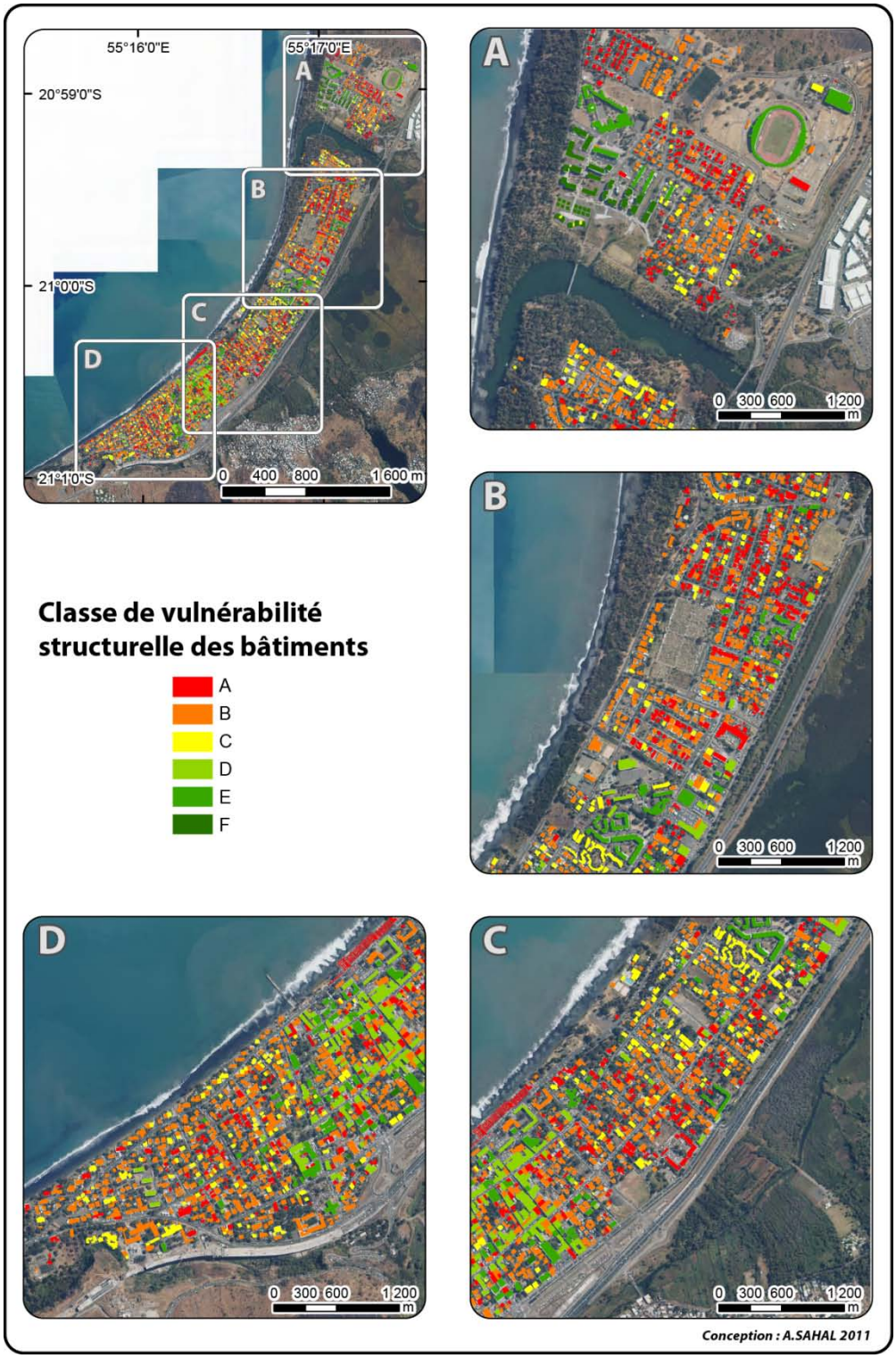


Figure 67. Vulnérabilité structurelle du bâti à Saint-Paul (La Réunion).

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.

4.2.2 Quantification des enjeux humains présents dans les bâtiments

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 17). 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 18).

Tableau 17. Population des IRIS de Saint-Paul (La Réunion).

Source : données INSEE, 2006.

IRIS	Population en 2006 (INSEE)	Surface habitée (m²)	Densité par m² habité
101	3135	170280	0,0184
102	2700	182554	0,0147
201	2169	141888	0,0152
202	2615	n +(107100)	0,0161 (moyenne)

Tableau 18. Occupation professionnelle des habitants de Saint-Paul (La Réunion).

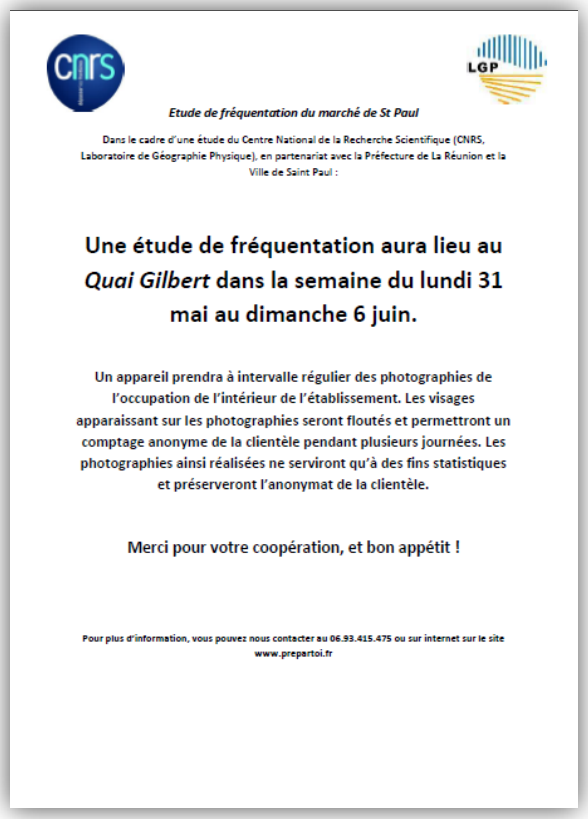
Source : INSEE, 1999 et 2006.

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 68).



Etude de fréquentation du marché de St Paul

Dans le cadre d'une étude du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS, Laboratoire de Géographie Physique), en partenariat avec la Préfecture de La Réunion et la Ville de Saint Paul :

Une étude de fréquentation aura lieu au *Quai Gilbert* dans la semaine du lundi 31 mai au dimanche 6 juin.

Un appareil prendra à intervalle régulier des photographies de l'occupation de l'intérieur de l'établissement. Les visages apparaissant sur les photographies seront floutés et permettront un comptage anonyme de la clientèle pendant plusieurs journées. Les photographies ainsi réalisées ne serviront qu'à des fins statistiques et préserveront l'anonymat de la clientèle.

Merci pour votre coopération, et bon appétit !

Pour plus d'information, vous pouvez nous contacter au 06.93.415.475 ou sur internet sur le site www.prepartoi.fr

Figure 68. 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 utilisées 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 69 illustre quelques clichés utilisés pour ce comptage ainsi que la localisation du *Quai Gilbert*.

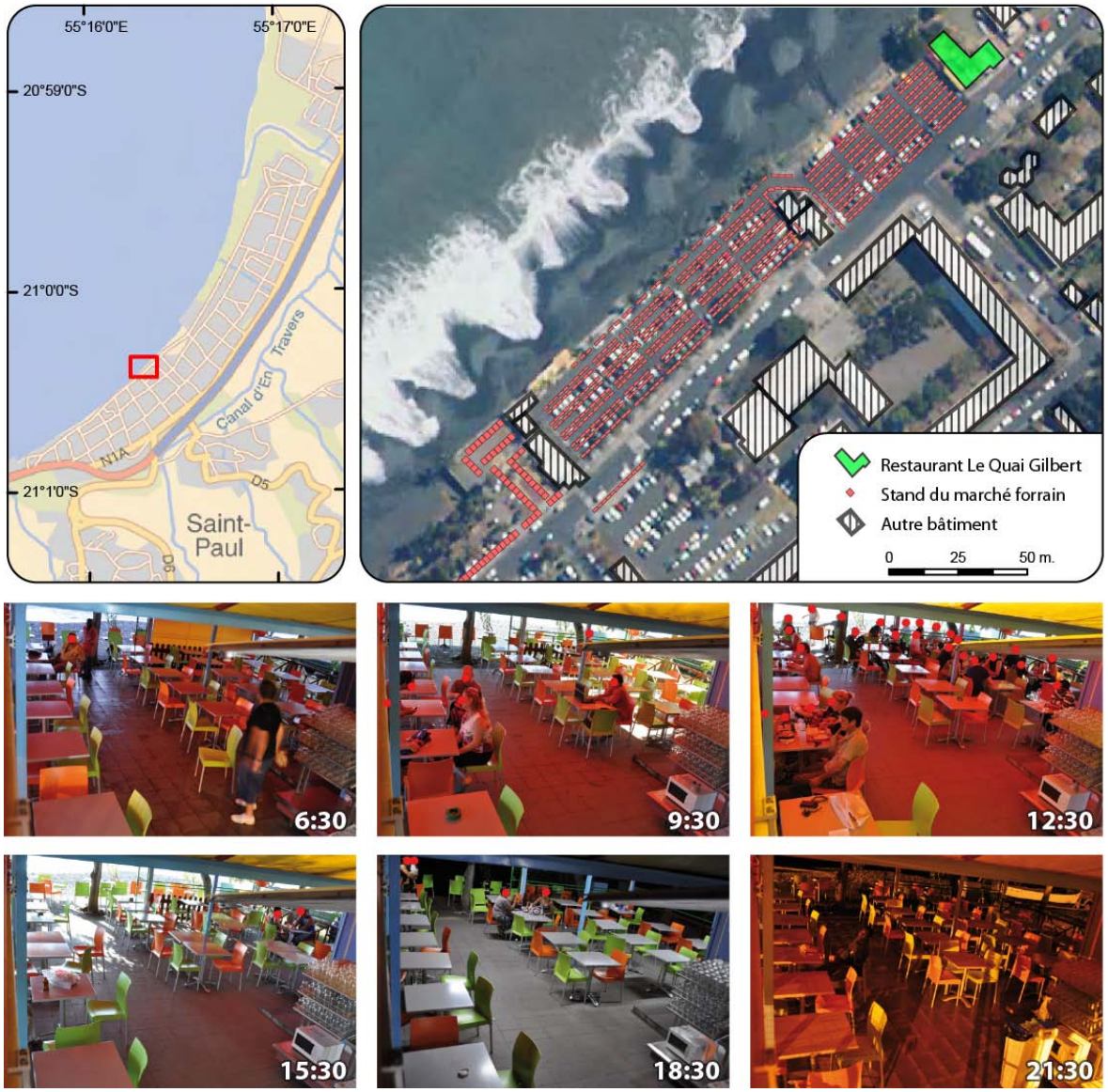


Figure 69. Localisation du Quai Gilbert dans le marché de Saint-Paul (La Réunion) et exemples de clichés (un vendredi).

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 70).

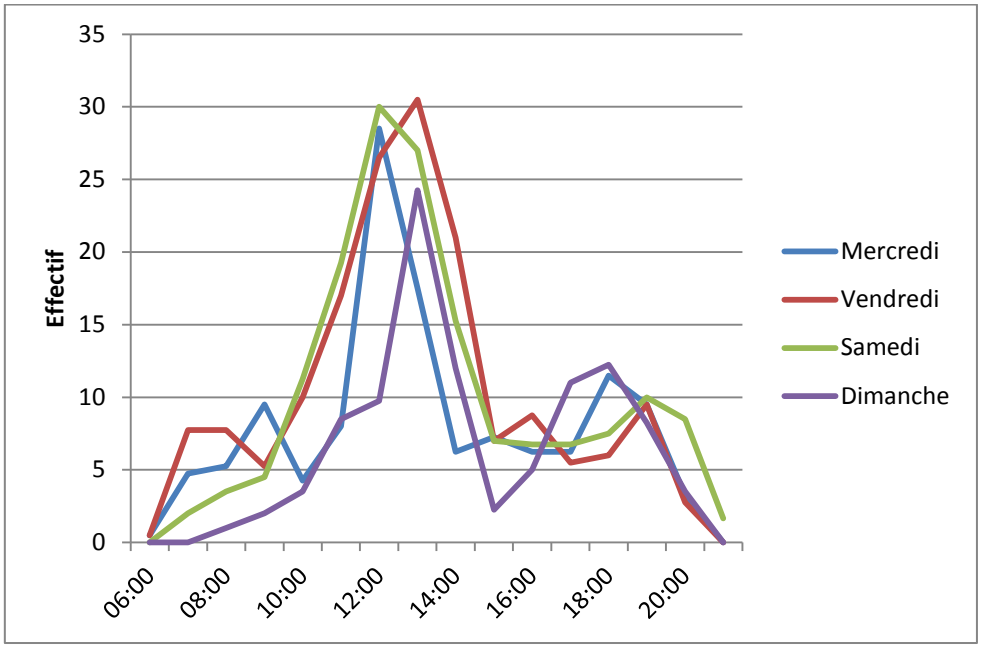


Figure 70. Fréquentation horaire moyenne du Quai Gilbert.

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 71 et Tableau 19).

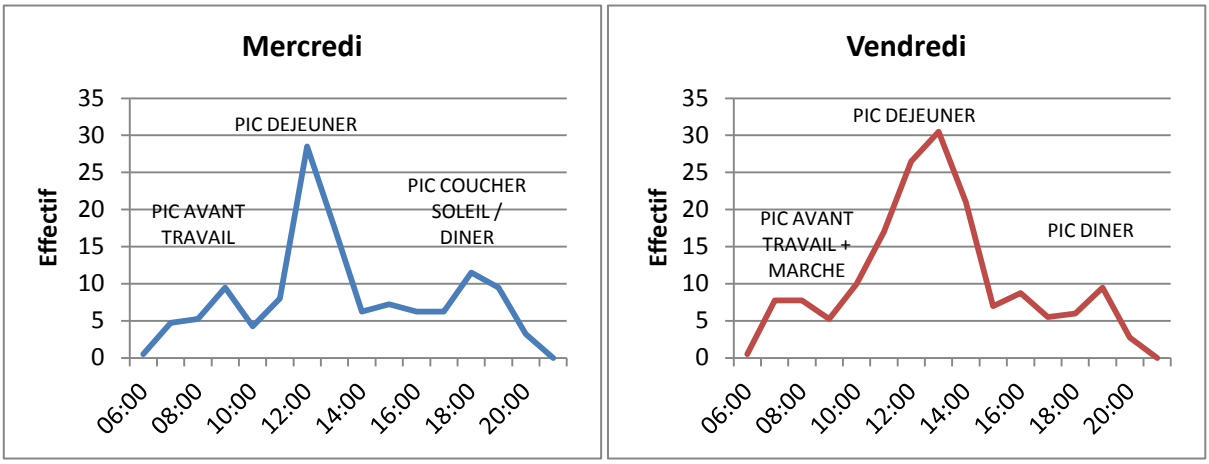


Figure 71. Courbes de fréquentation des bars/restaurants adoptées pour les scénarios diurnes (horaire en abscisses, effectif compté en ordonnées).

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

Tableau 19. Densités de populations adoptées pour la catégorie bars/restaurants.

Scénario	Population	Surface (m²)	Densité pour le scénario (pop/m²)
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 72), SC2 (Figure 73) et SC3 (Figure 74).

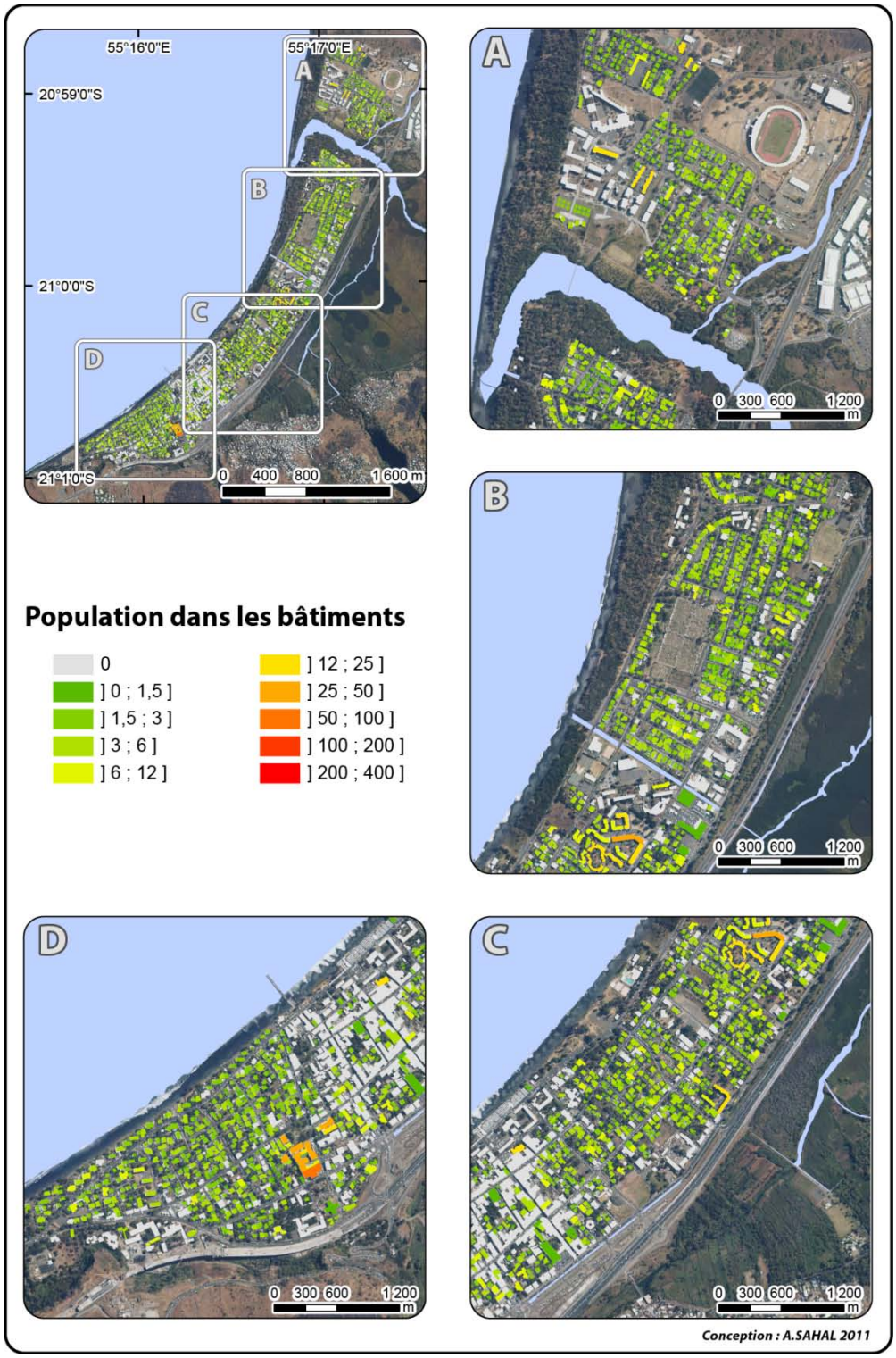


Figure 72. Populations présentes dans les RDC des bâtiments pour le scénario nocturne SC1 à Saint-Paul (La Réunion).

Source : fond de carte IGN BD Ortho 2008.

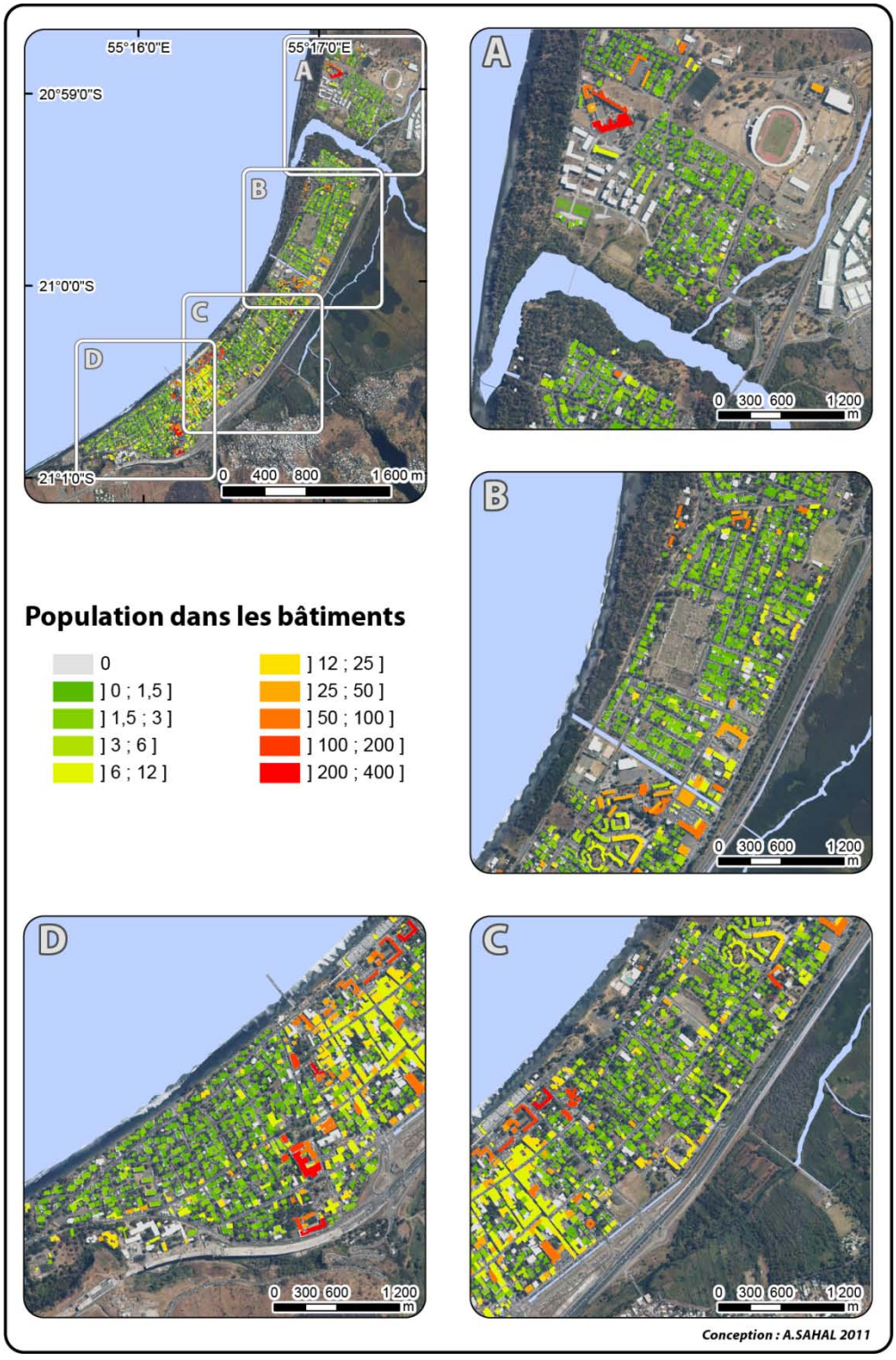


Figure 73. Populations présentes dans les RDC des bâtiments pour le scénario SC2 (jour ouvrable 15h) à Saint-Paul (La Réunion).

Source : fond de carte IGN BD Ortho 2008.

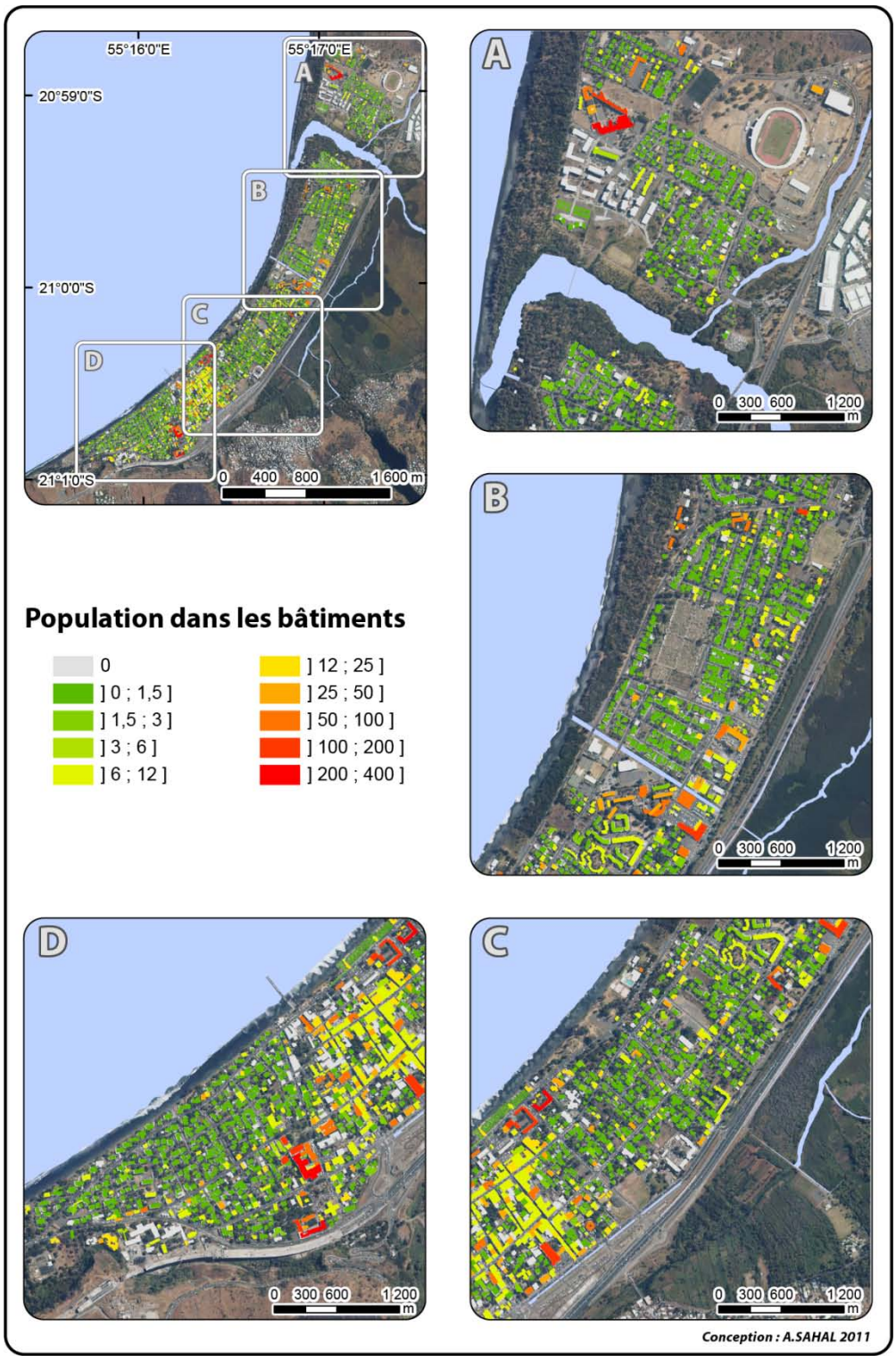


Figure 74. Populations présentes dans les RDC des bâtiments pour le scénario SC3 (vendredi, jour de marché à 10h) à Saint-Paul (La Réunion).

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.

4.2.3 Quantification et qualification des enjeux humains présents dans les espaces de plein air et densités de débris

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 75).

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 76).

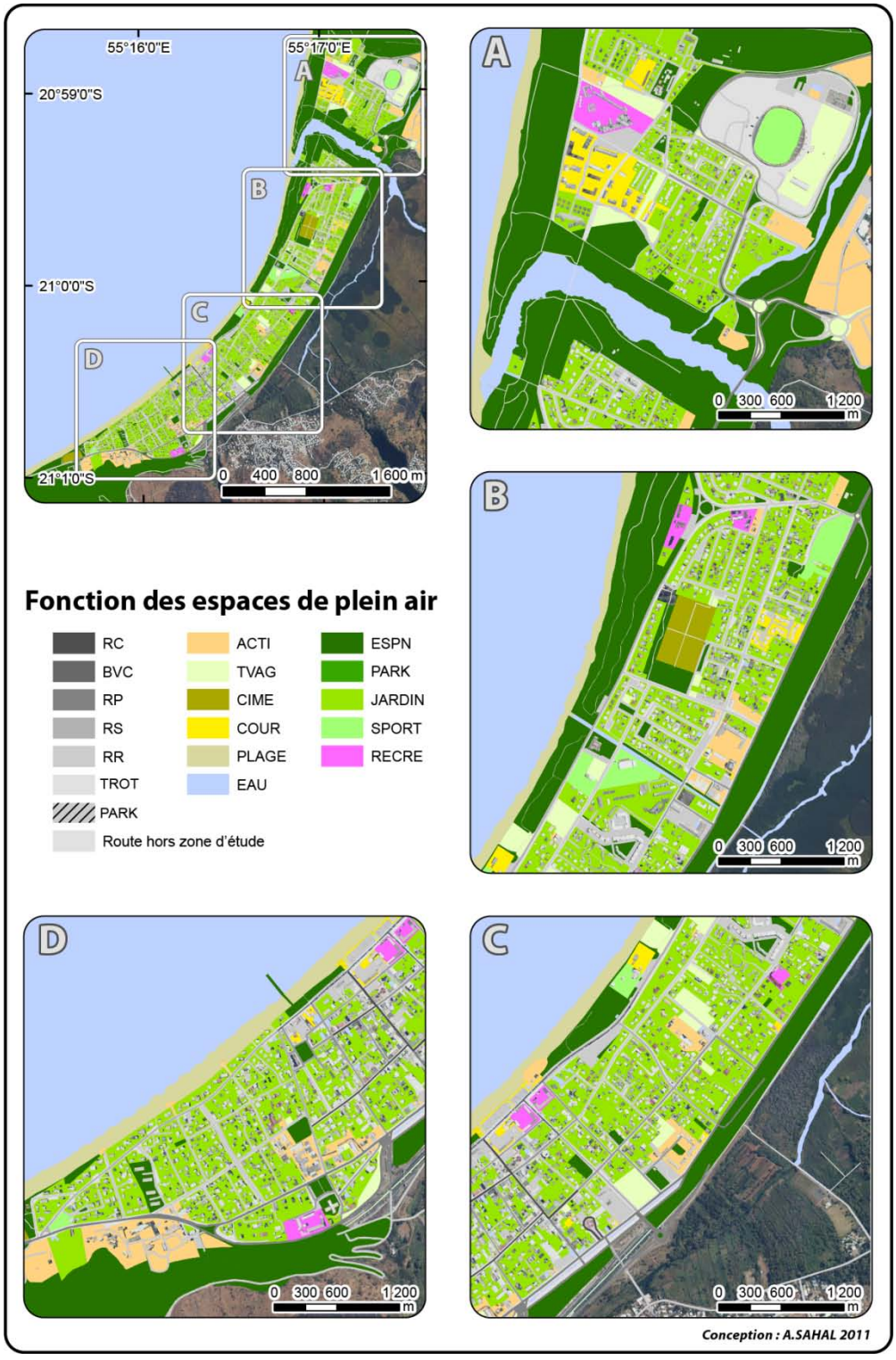


Figure 75. Fonction des espaces de plein air de Saint-Paul.

Source : fond de carte IGN BD Ortho 2008.

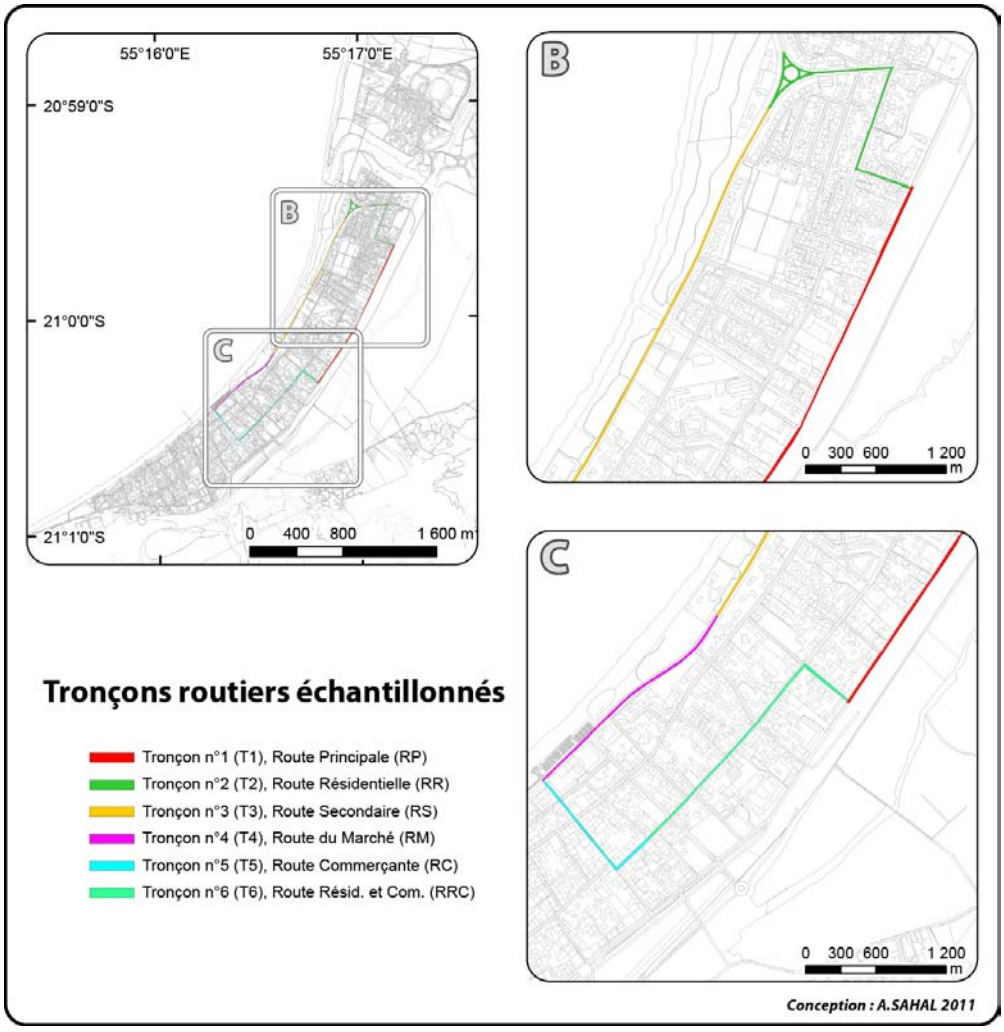


Figure 76. Tronçons routiers échantillonnés à Saint-Paul pour le peuplement des trottoirs.

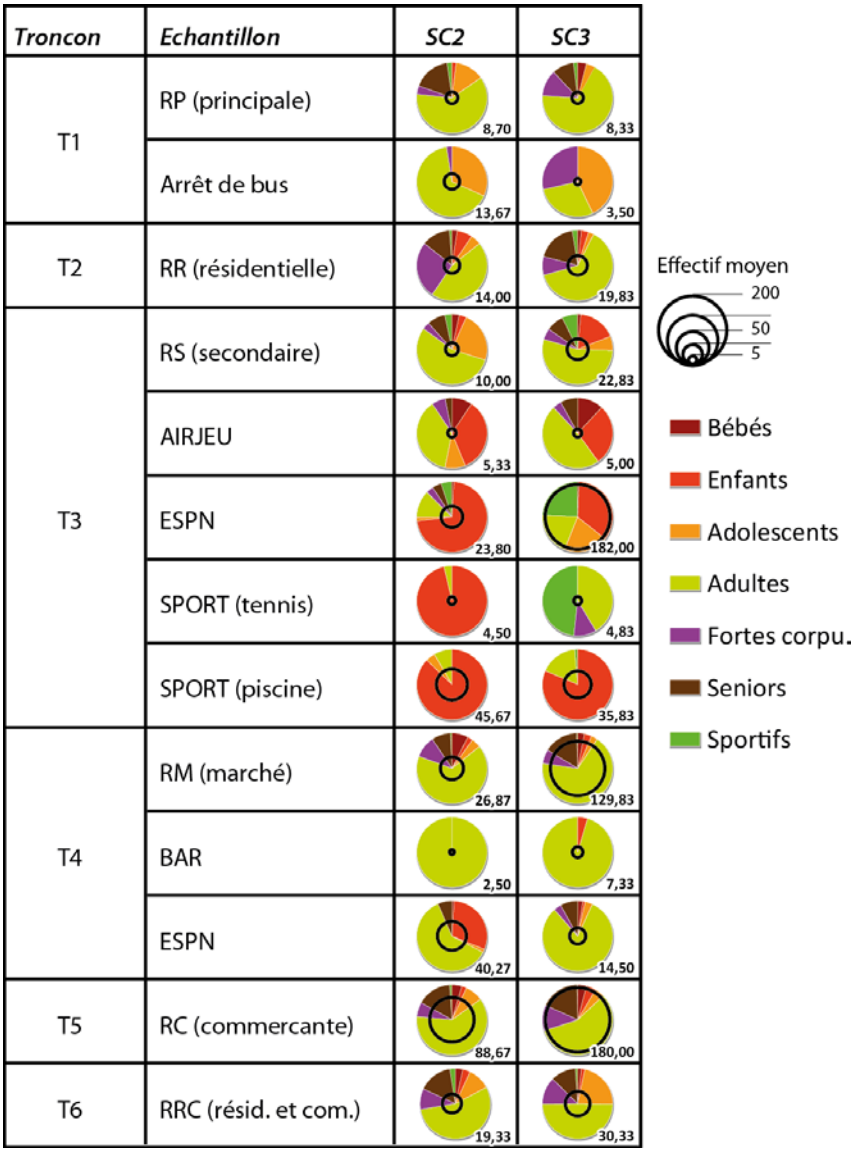
Sur le terrain, on sillonne les tronçons échantillonnés, ainsi que certains ERP que l'on considère comme représentatifs. On obtient une fréquentation moyenne pour chaque tronçon et pour chaque type d'ERP échantillonné, intégrant une caractérisation qualitative des individus (Tableau 20).

Tableau 20. Fréquentation moyenne des tronçons et des ERP échantillonnés aux jours et horaires des scénarios d'enjeux 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 piétions
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 piétions
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 77).



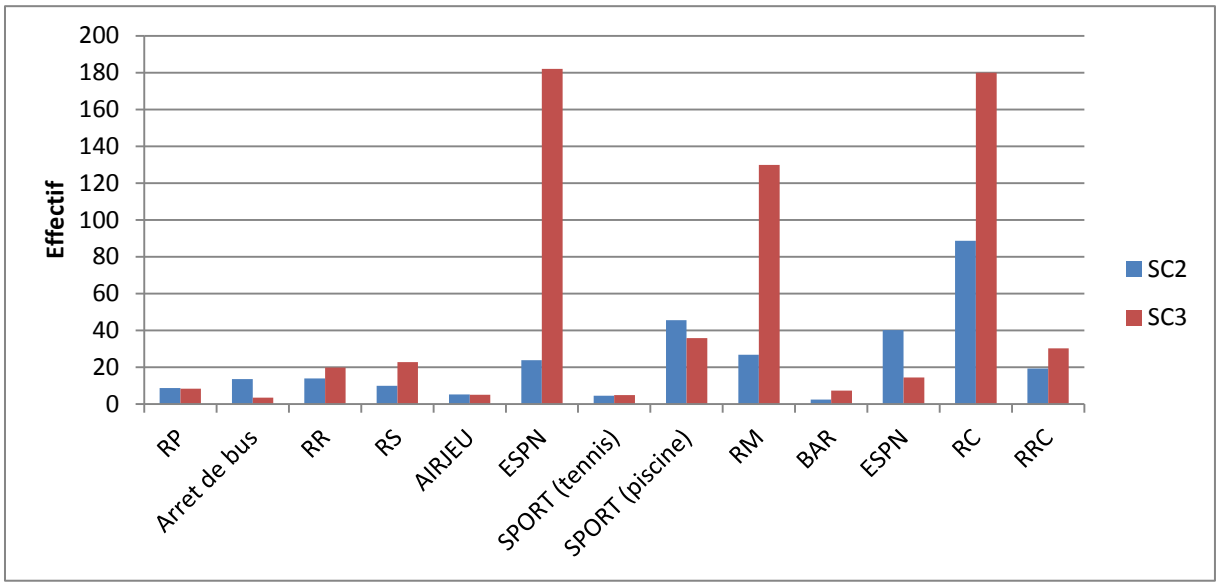


Figure 77. Comparatif quantitatif et qualitatif des effectifs comptés pour les deux scénarios diurnes.

En termes qualitatifs, le tronçon T3, situé en bord de mer (cf. Figure 76, p. 145) 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. 4.2.2, p. 135) : un appareil photo est installé sur le toit d'un des restaurants du marché (Figure 78) et photographie toutes les 15 minutes un secteur dont la surface est connue (95m²).

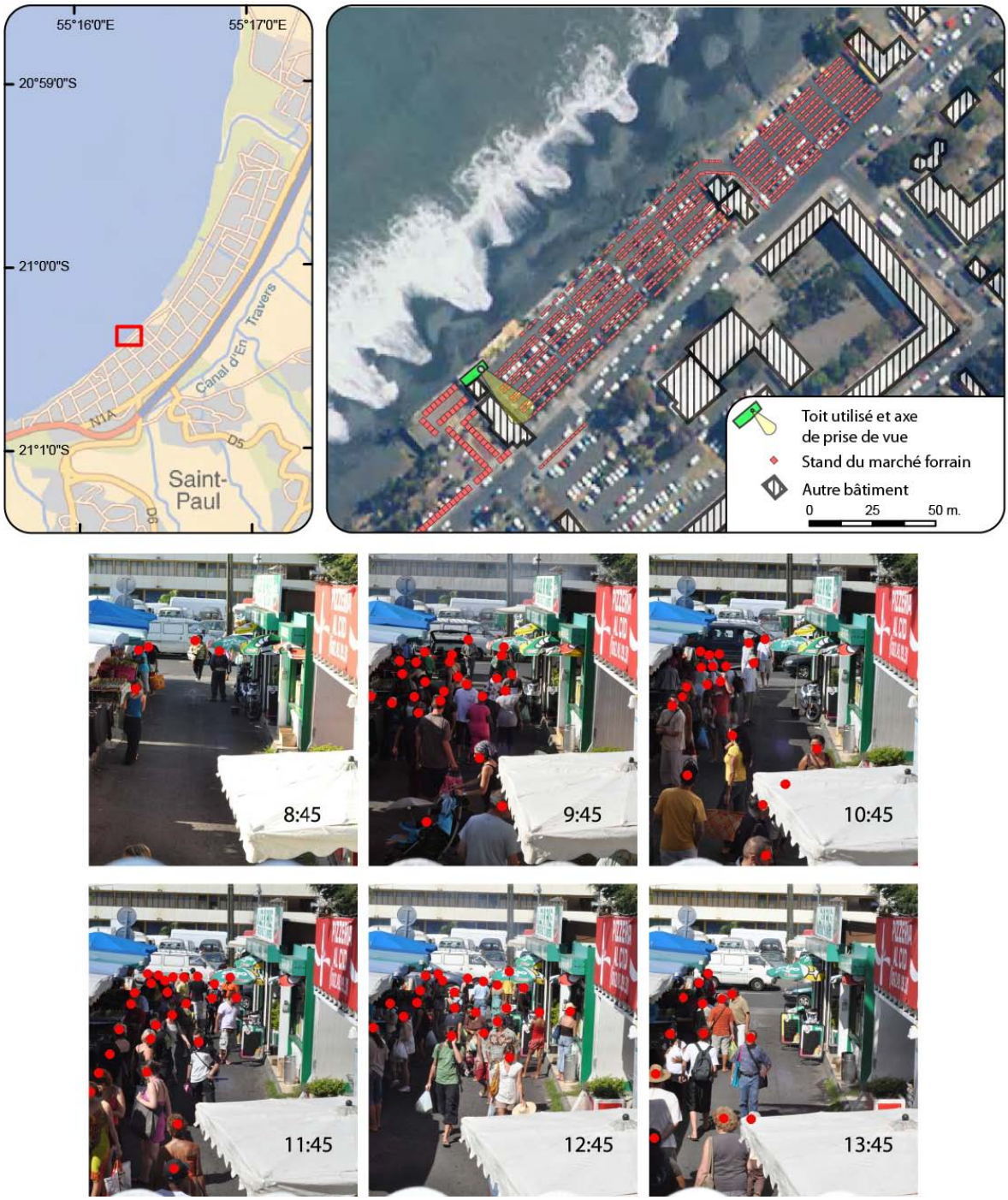


Figure 78. Localisation du toit utilisé pour la mesure de la densité de population sur le marché de Saint-Paul et exemples de clichés obtenus.

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 79).

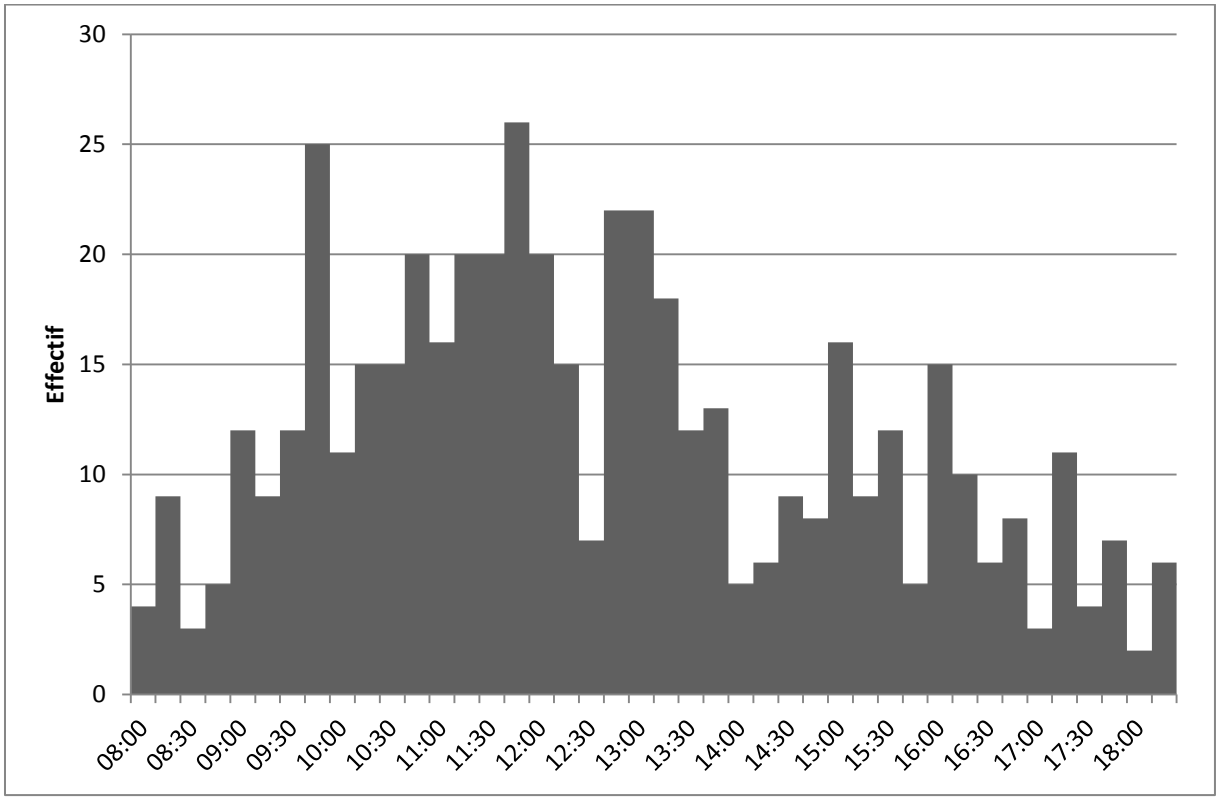


Figure 79. Fréquentation humaine dans la zone échantillonnée du marché de Saint-Paul (exemple de la journée du vendredi 21 mai 2010).

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 80) et SC3 (Figure 81). Concernant le scénario de nuit SC1, les espaces de plein air sont considérés comme vides.

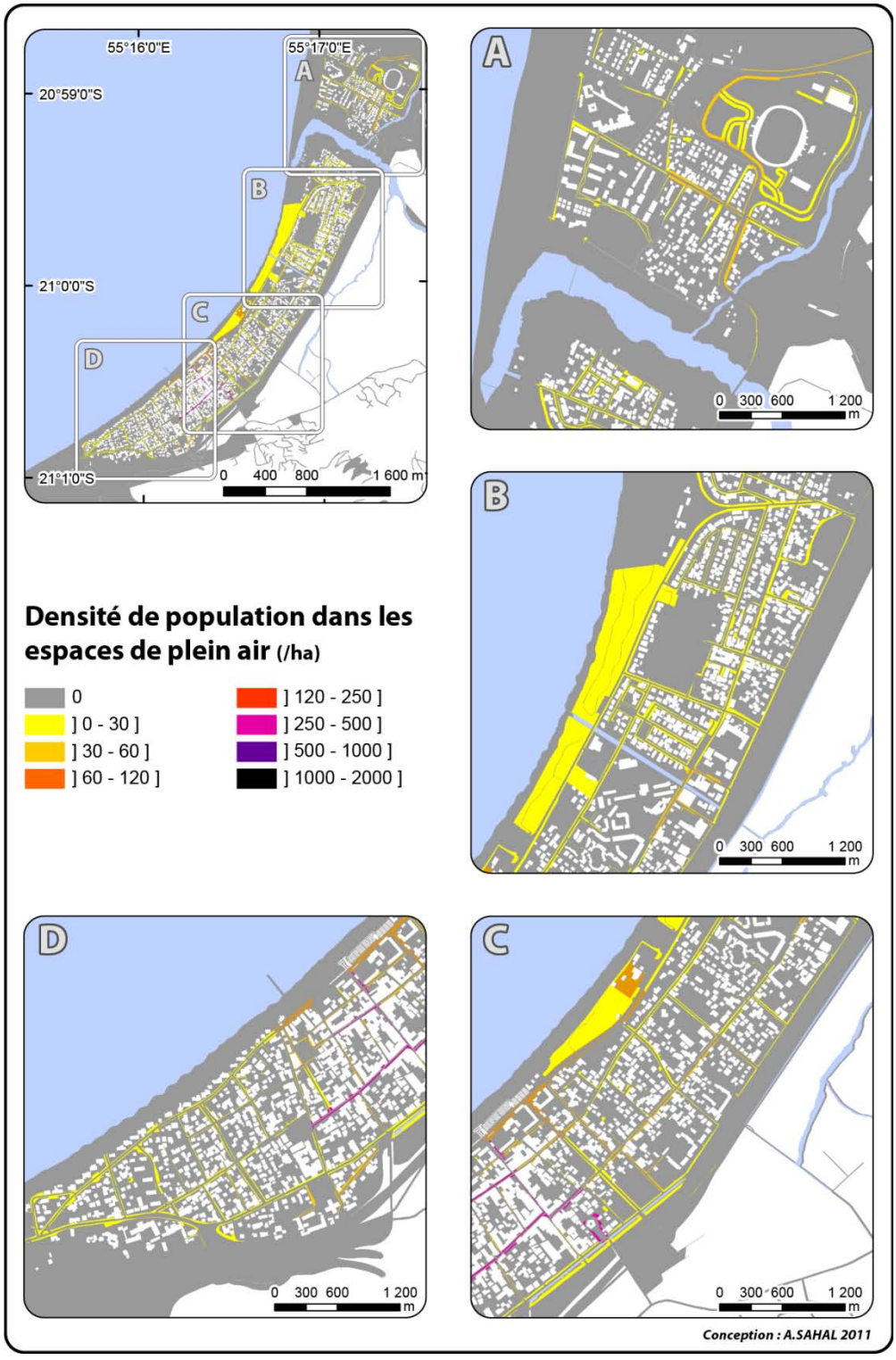


Figure 80. Densité de population dans les espaces de plein air de Saint-Paul pour le scénario SC2 (jour ouvrable, 15h) à Saint-Paul (La Réunion).

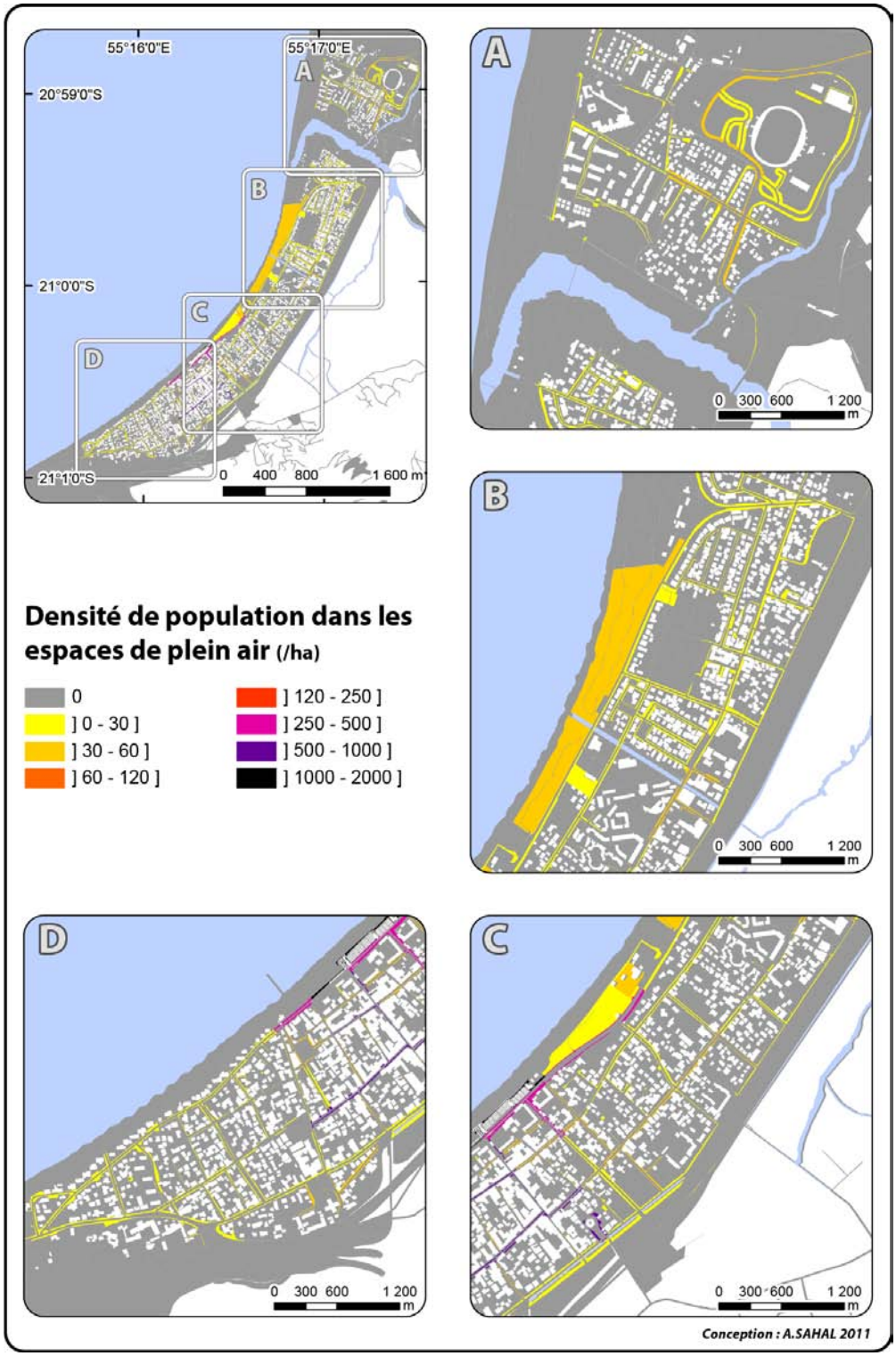


Figure 81. Densité de population dans les espaces de plein air de Saint-Paul pour le scénario SC3 (vendredi, jour de marché, 10h) à Saint-Paul (La Réunion).

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 82).

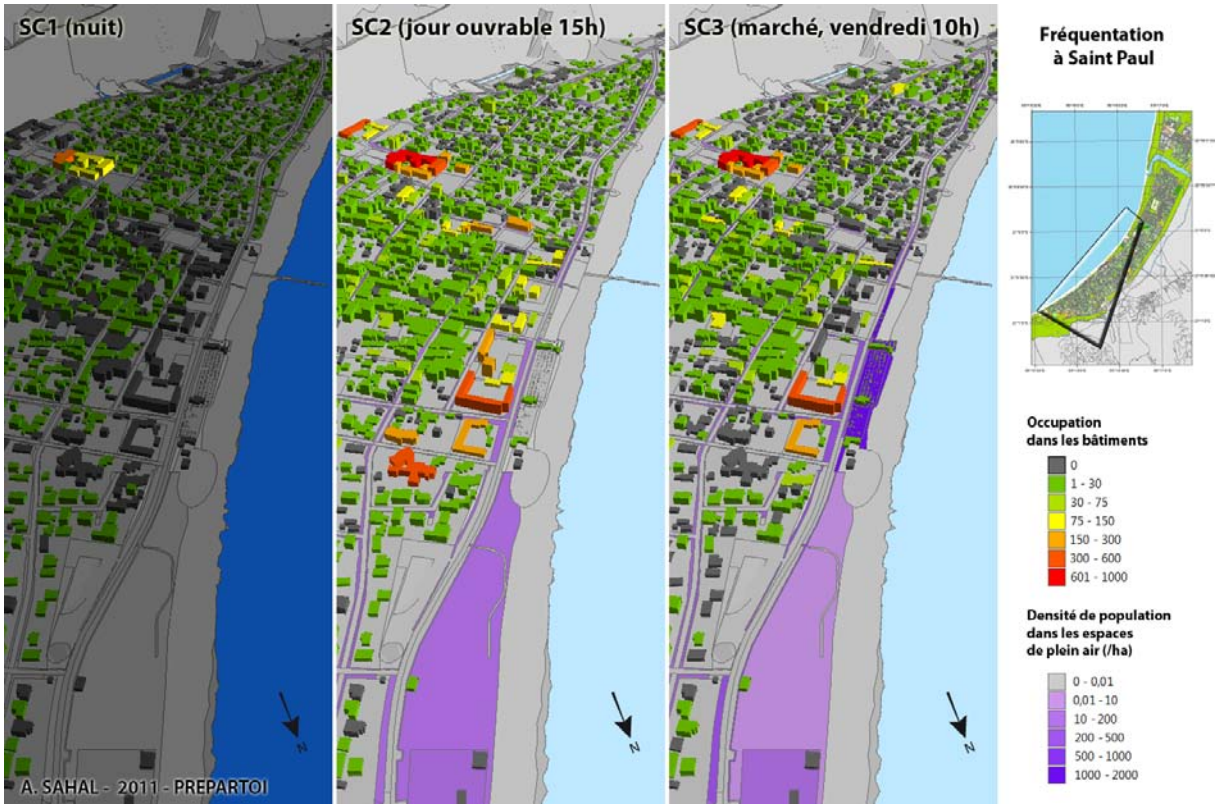


Figure 82. Vue 3D de la fréquentation des bâtiments et des espaces de plein air selon les 3 scénarios d'enjeux (zoom sur le centre ville de l'agglomération de Saint-Paul).

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 83).

4.2.3.1 *La prise en compte des débris*

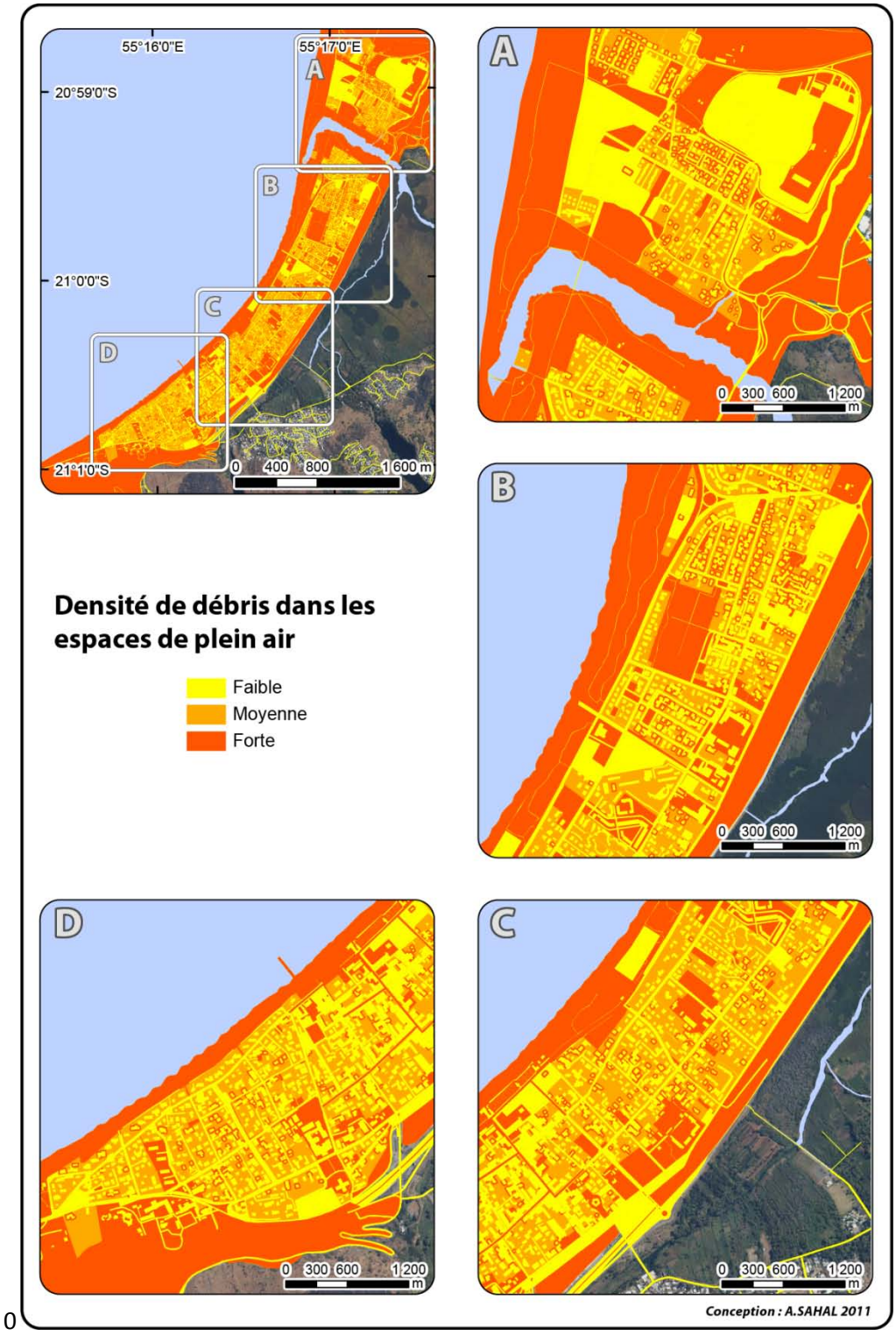


Figure 83. Densité de débris dans les espaces de plein air de Saint-Paul.

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.

4.2.4 Choix d'un scénario d'enjeux

Le choix d'un scénario d'enjeux se porte sur le scénario SC3, scénario critique compte tenu des fortes densités de populations rassemblées sur le littoral les jours de marché.

4.3 Spécificités de la gestion de crise à La Réunion

Un Plan de Secours Spécialisé Tsunami (PSS Tsunami) existe pour La Réunion et a été approuvé par l'Arrêté préfectoral n°1773 du 16 juillet 2008[20]. Le PSS Tsunami fournit un guide pour l'interprétation des bulletins d'information ou d'alerte diffusés par le PTWC-JMA et le déclenchement d'alertes locales. Il considère la localisation et la magnitude du séisme potentiellement tsunamigène pour en déduire un niveau d'alerte et des mesures d'information et de sauvegarde. Au total, 11 zones sources sont considérées, essentiellement localisées sur la marge indonésienne. Cinq classes de magnitude sont établies à partir de Mw = 7,5. En dessous de cette magnitude, La Réunion est considérée comme non concernée par un risque de tsunami.

Le PSS attribue à Météo-France le rôle de veille et de transmission des bulletins d'alerte du PTWC-JMA à la Préfecture. La Préfecture est l'autorité chargée par le PSS de prendre la décision de déclencher ou non un niveau d'alerte jaune, orange ou rouge. Après visa du Préfet ou de son représentant, l'alerte est diffusée par différents moyens.

Dans le contexte d'un tsunami identique à celui de 1833, à savoir de magnitude Mw = 9,2 dont l'épicentre est évalué (100,45°E ; 3,25°S) [Zachariasen *et al.* 1999], la source est à cheval sur deux zones (numérotées 4 et 5, Figure 84).

[20] Disponible en ligne : http://www.risquesnaturels.re/pdf/PSS%20TSUNAMI.pdf.

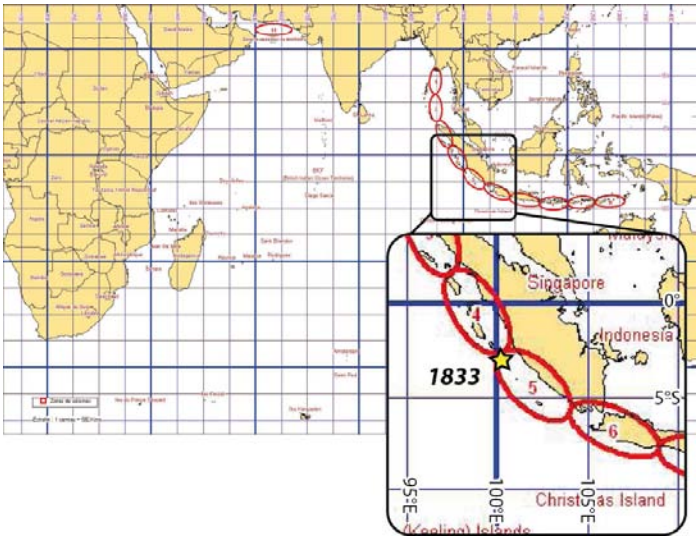


Figure 84. Carte permettant aux opérationnels de La Réunion d'identifier la zone source à la lecture des bulletins des TWC.

Source : adapté du PSS Tsunami de La Réunion.

Une fois la zone source identifiée, l'opérationnel se rapporte à la grille décrivant les seuils de déclenchement des alertes tsunami (Tableau 21).

Tableau 21. Seuils de déclenchement des alertes tsunami à La Réunion.

Source : extrait du PSS Tsunami de La Réunion.

Zone / Magnitude	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
> à 9	O	R	R	R	R	R	R	R	O	O	R
de 8,6 à 9	O	O	O	O	R	R	R	O	O	O	R
de 8,1 à 8,5	O	O	O	O	R	R	O	O	O	O	O
de 7,6 à 8	J	J	J	J	O	O	O	J	J	J	J
de 7 à 7,5	Rien	J	J	J	J	J	J	J	Rien	Rien	J

Dans le cas du scénario d'aléa choisi, le niveau d'alerte pour un séisme de magnitude supérieure à 9 en zone 4 ou 5 est « ROUGE ». Le *runup* estimé par le PSS est compris entre 2 et 5 m. A noter que l'événement modélisé par le CEA/DASE atteint 7 m. (cf. 4.1.2, p. 126). Les mesures prévues par le PSS pour une alerte de niveau rouge sont : l'alerte « générale » et l'« évacuation possible des populations menacées ». Aucun détail n'est donné dans le PSS concernant les populations menacées : quelles populations évacuer, selon quels critères, où les évacuer ? Ces indications ne sont pas obligatoires dans la mesure où les communes sont responsables de la mise en sureté de leurs populations (PCS[21]).

[21] Plan Communal de Sauvegarde.

A noter que la commune de Saint-Paul ne prévoit pas d'évacuation spécifique à l'aléa tsunami : peu d'indications sur la prévention du risque tsunami sont disponibles dans le DDRM[22] de l'île, or, c'est ce document qui est utilisé par les communes pour la constitution des PCS.

4.4 Résultats du scénario de risque et modélisation des évacuations

4.4.1 Endommagement du bâti

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 85).

[22] Dossier Départemental des Risques Majeurs.

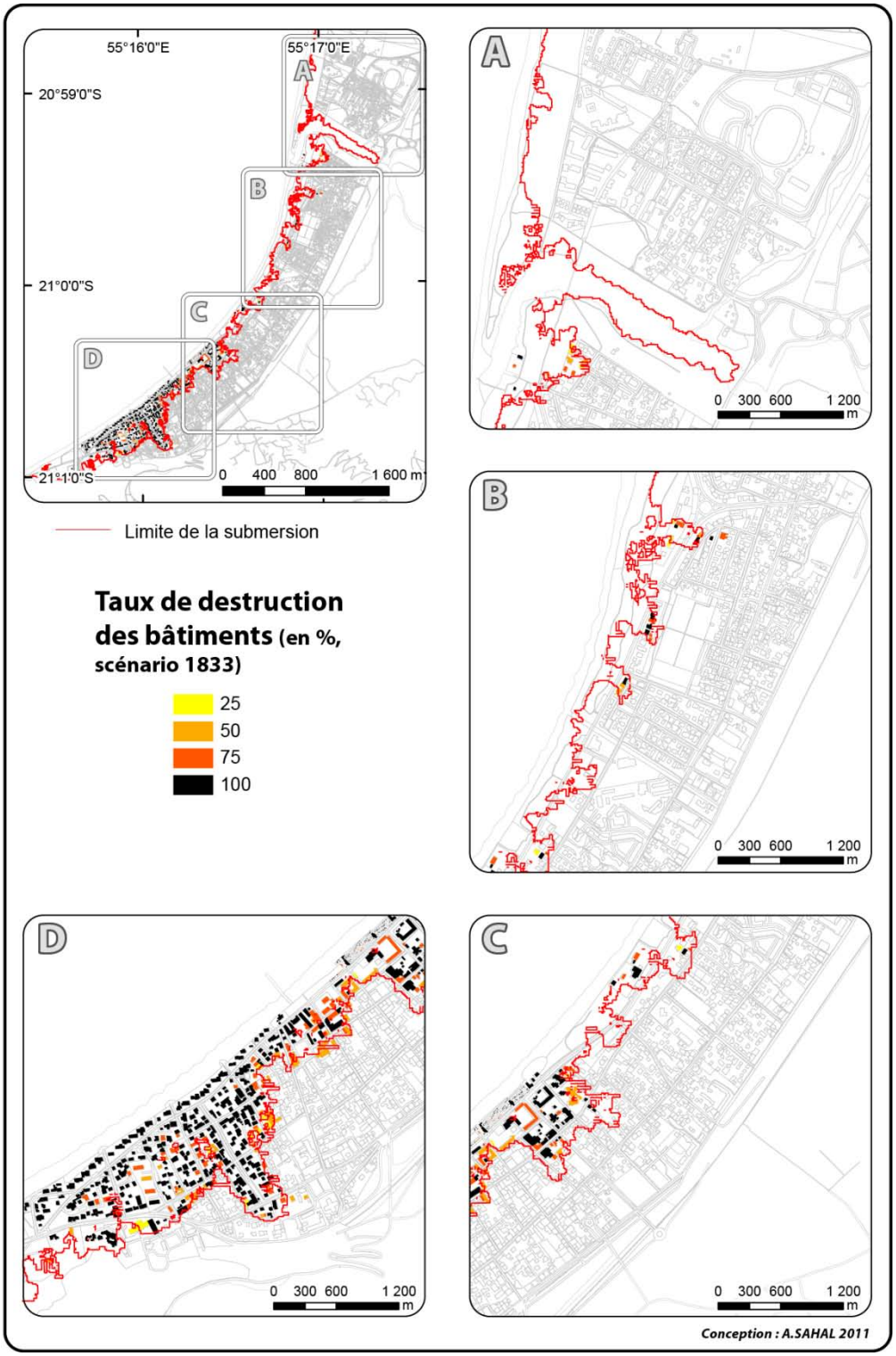


Figure 85. Taux de destruction des bâtiments pour un aléa de type 1833 à Saint-Paul.

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 décroit 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.

4.4.2 Pertes humaines potentielles

On multiplie la probabilité de décès dans les bâtiments par la population présente dans ces derniers pour le scénario d'enjeux SC3 (Figure 86) 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 (~20 m²). 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 87). Par souci de clarté, la densité pour 20 m² (surface d'un pixel) est rapportée à une densité par hectare.

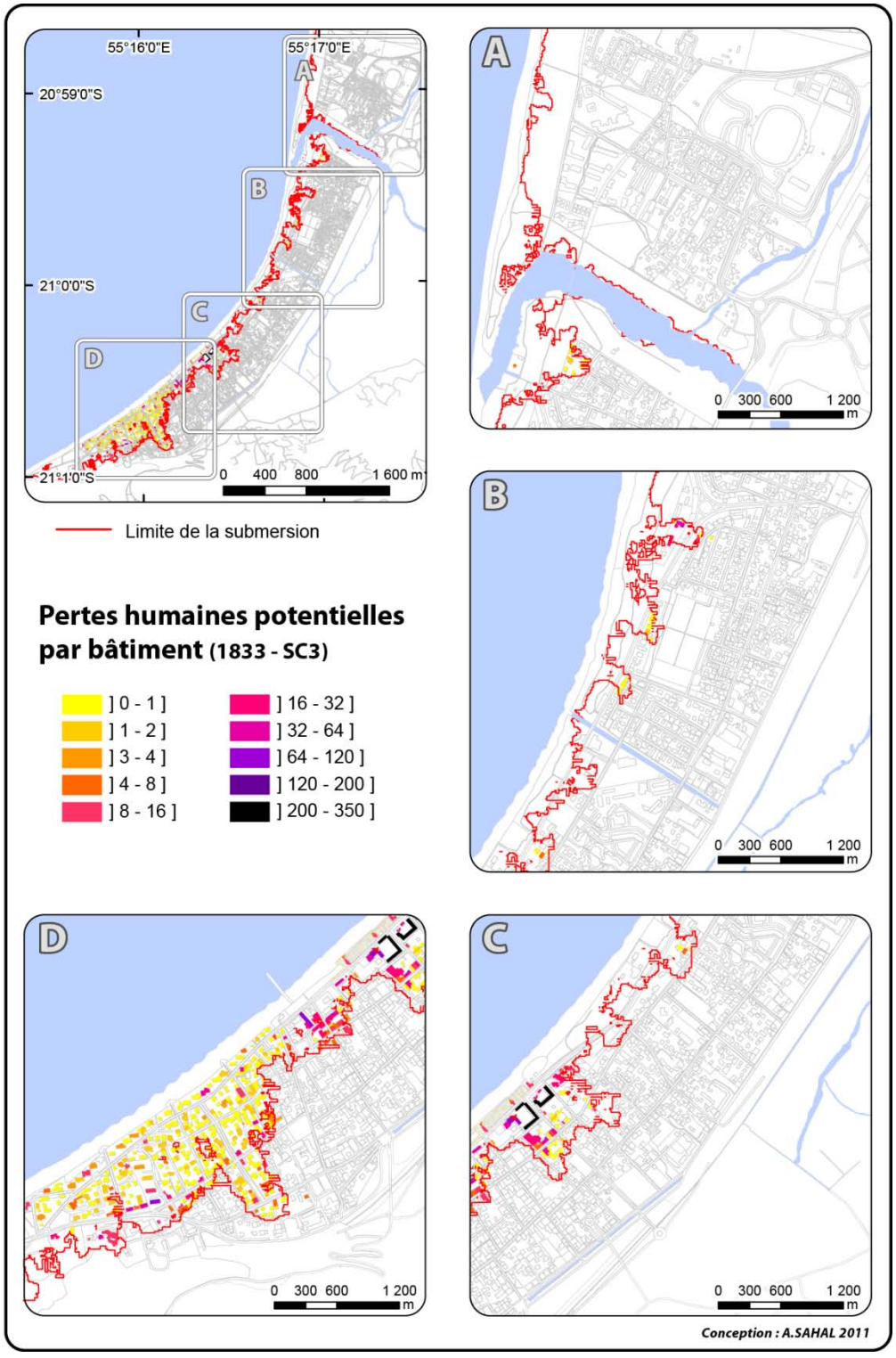


Figure 86. Pertes humaines potentielles par bâtiment pour un aléa de type 1833 et un scénario d'enjeu SC3 (vendredi, jour de marché à 10h) à Saint-Paul (La Réunion).

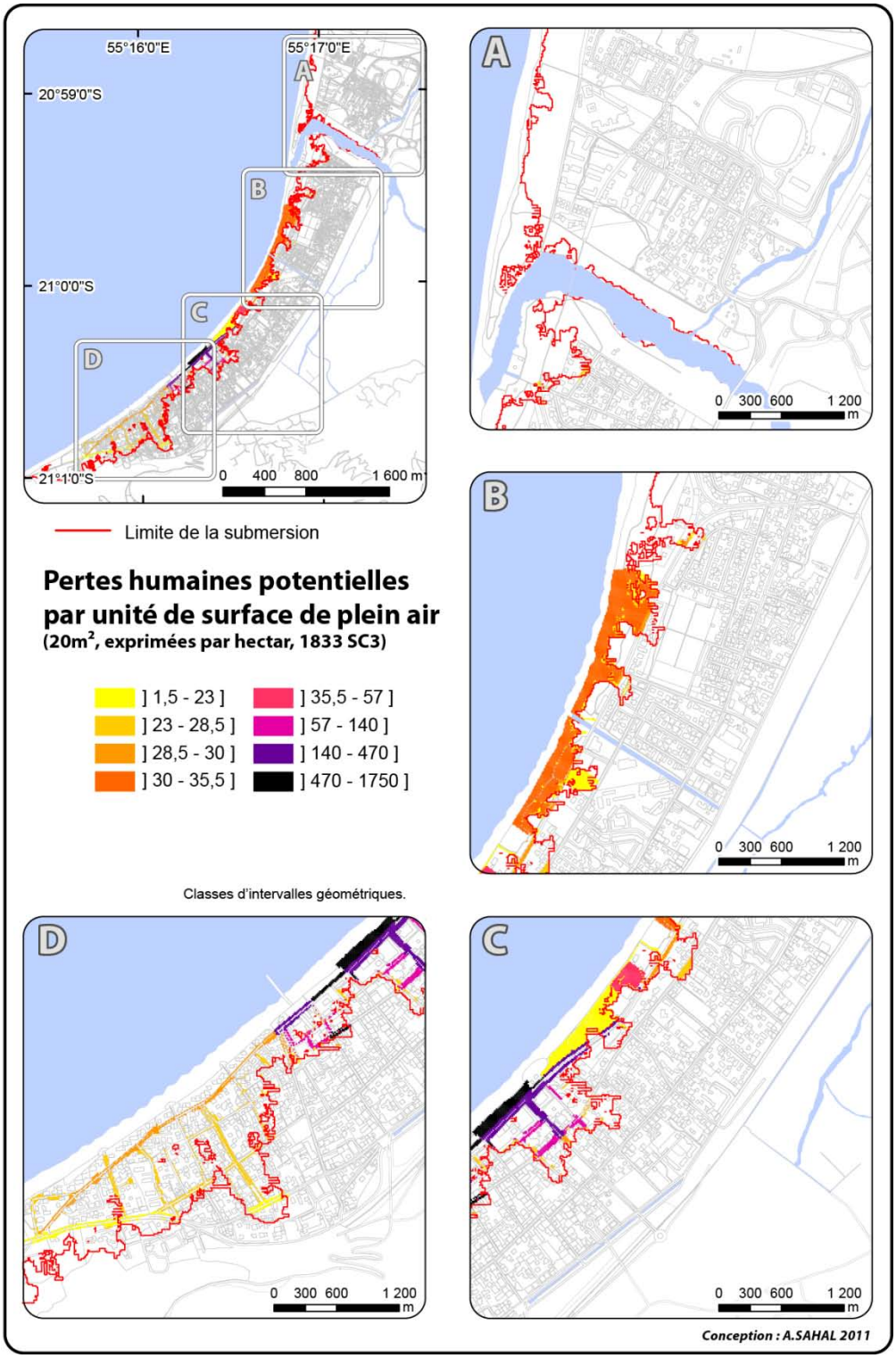


Figure 87. Pertes humaines potentielles dans les espaces de plein air pour un aléa de type 1833 et un scénario d'enjeu SC3 (vendredi, jour de marché à 10h) à Saint-Paul (La Réunion).

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.

4.4.3 Modélisation des évacuations

Evacuation Route Tools est utilisé pour évaluer les temps d'évacuation des piétons. Un premier scénario propose une évacuation horizontale nécessitant des zones refuge à une altitude supérieure à 10 m. La configuration topographique du site implique la sélection de zones refuge distales pour répondre à ce critère altitudinal. On obtient des temps d'évacuation considérables pour certains espaces enclavés (on considère les ponts comme coupés), parfois distants de plus de 2h30 de marche des zones refuge (Figure 88).

Dans un second temps, on propose la sélection de bâtiments comme refuges complémentaires afin de proposer une évacuation partiellement verticale. On choisit des structures résistantes et de plus de 2 étages à titre d'exemples. Les habitations collectives sont écartées. Le calcul des nouveaux temps d'évacuation montre un écart important avec le premier scénario, rendant les temps d'évacuation globalement inférieurs à la demi-heure, et au maximum de 50 minutes pour les secteurs les plus enclavés (Figure 89).

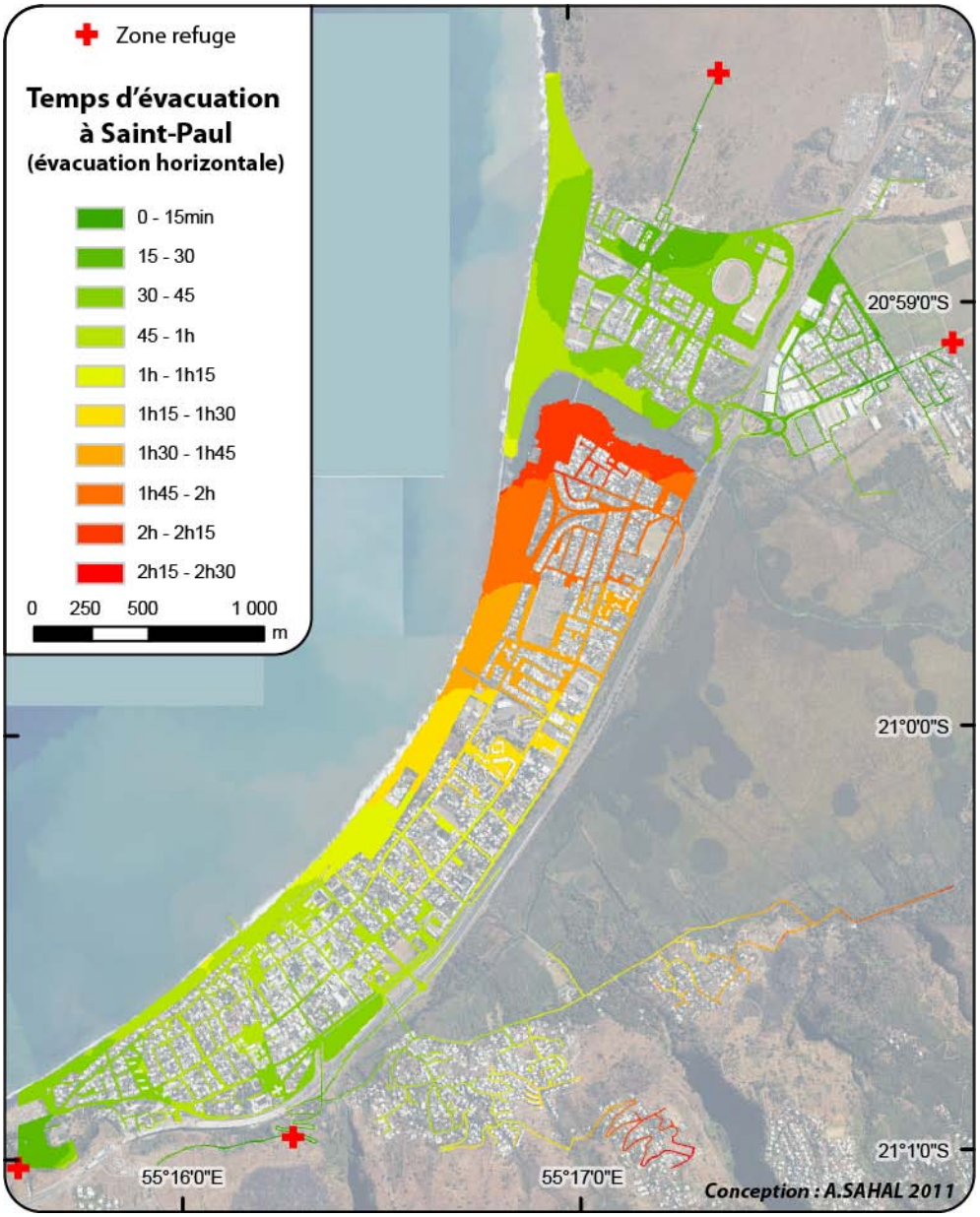


Figure 88. Temps d'évacuation dans un contexte d'évacuations horizontales à Saint-Paul (La Réunion).

Source : fond de carte IGN BD Ortho 2008.

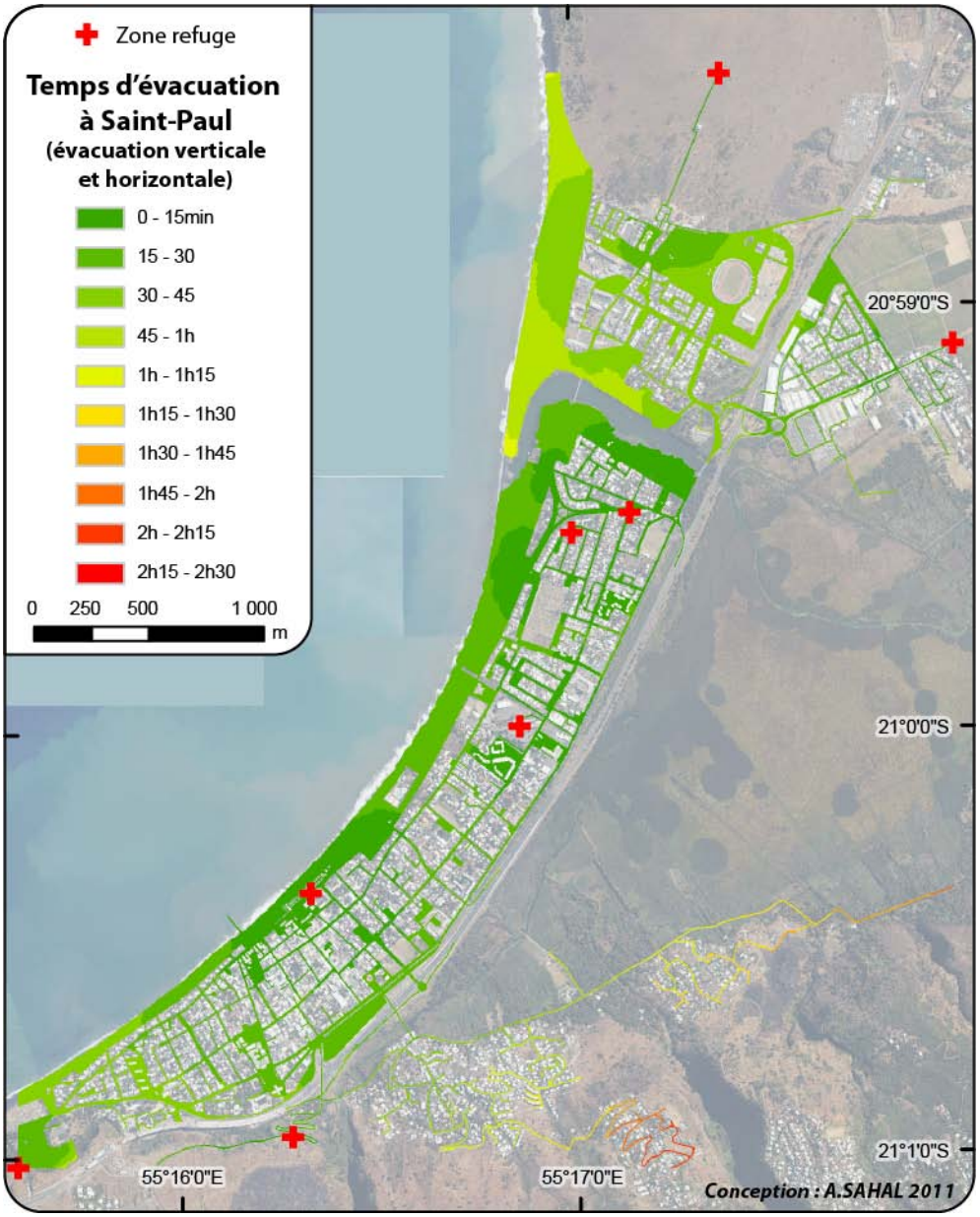


Figure 89. Temps d'évacuation dans un contexte d'évacuations horizontales et verticales à Saint-Paul (La Réunion).

Source : fond de carte IGN BD Ortho 2008.

Dans un scénario d'évacuation de l'agglomération de Saint-Paul, le rôle de refuges verticaux présents en centre-ville apparaît essentiel à une mise en sécurité rapide des populations. Dans cet exemple, les refuges verticaux ont été choisis de manière superficielle : la capacité d'accueil de ces bâtiments n'a pas été évaluée. Les résultats obtenus soulignent toutefois la nécessité de telles solutions, et l'effort institutionnel qui doit être fait pour identifier des bâtiments capables d'accueillir les populations à sauvegarder.

Conclusion du chapitre

L'île de La Réunion est essentiellement concernée par des tsunamis originaires de la marge indonésienne. Leurs effets ont parfois atteint les 7 m. d'altitude, et il n'est pas exclu que de tels phénomènes se reproduisent. De tels effets seraient aujourd'hui bien plus dommageables qu'ils ont pu l'être dans le passé compte tenu de l'occupation croissante des littoraux de l'île. A ce jour, La Réunion est mal préparée : non considération des tsunamis de sources locales ou régionales et absence d'une planification des évacuations des zones basses constituent quelques unes des limites des dispositifs spécifiques « tsunami » du plan ORSEC de l'île.

Les travaux réalisés à Saint-Paul apparaissent bien plus complets que ceux réalisés sur Petite-Terre. L'utilisation de la Litto3D a permis une modélisation à échelle fine de l'aléa, basée sur un événement similaire à celui de 1833. Il est toutefois difficile de confirmer la précision de cette modélisation compte tenu de l'absence de traces historiques identifiées. Le calage des modèles est par conséquent incertain.

Malgré ces incertitudes, la démarche par scénario de risque a permis une évaluation intégrée du risque tsunami à Saint-Paul, mettant en relief les forts enjeux humains et structurels de l'agglomération, et aboutissant à une évaluation de dégâts et de pertes humaines potentielles. Ce risque important à Saint-Paul justifie les efforts que doivent entreprendre les autorités locales pour mettre en sécurité leurs populations en cas d'alerte de niveau rouge.

Les temps d'évacuation modélisés avec ERT ont mis en évidence les besoins pour cette agglomération d'une planification d'évacuations verticales, permettant un gain de temps considérable. Le micro-simulateur SimWalk n'a pas été utilisé compte tenu des temps de calcul nécessaires pour une modélisation multi-agents sur une zone d'étude aussi étendue. Cette modélisation, prévue à court terme sur un calculateur plus puissant permettra de mettre en évidence les secteurs d'encombrement et donc des voies d'évacuation les plus adaptées. Cette modélisation nécessitera une sélection plus précise et robuste de zones refuge.

Chapitre 5e. Evaluation intégrée du risque de tsunami en Méditerranée : le cas d'Antibes

Ce chapitre, consacré au cas d'Antibes diffère dans son application de la méthode par scénario de risque. L'aléa est ici modélisé, mais certains paramètres ne nous ont pas été fournis par le CEA/DASE, ce qui rend partielle l'interaction entre aléa et enjeux. Le scénario de risque a toutefois pu s'appuyer sur les limites de submersion reconstituées sur le terrain [Sahal et Lemahieu 2011]. En revanche, l'emprise réduite de la zone étudiée a permis une modélisation des évacuations avec les macro- et micro-simulateurs sélectionnés, contrairement aux cas précédents.

5.1 Évaluation et modélisation de l'aléa

Sur les côtes françaises de Méditerranée, seuls deux événements sont correctement documentés et sont reconnus comme ayant provoqué des dommages : le tsunami d'origine régionale de Boumerdès-Zemmouri du 21 mai 2003 [Sahal *et al.* 2009b], et celui d'origine locale et anthropique du 16 octobre 1979 à Antibes [Sahal et Lemahieu 2011]. Les tsunamis plus anciens sont très peu documentés [Sahal 2007] et donc difficilement reconstituables dans le cadre d'un scénario de risque.

5.1.1 Le cas du tsunami régional du 21 mai 2003

5.1.1.1 *Observations recueillies*

Le 21 mai 2003 à 18:44 UTC, un séisme de magnitude Mw = 6,9 est enregistré dans la région de Boumerdès-Zemmouri, Algérie, déclenchant un tsunami qui a atteint les côtes méditerranéennes les plus proches en quelques minutes et les plus éloignées plusieurs heures après le séisme [Alasset *et al.* 2006]. La Figure 90 illustre les surcotes maximales enregistrées par les marégraphes en fonctionnement à cette période en Méditerranée occidentale.

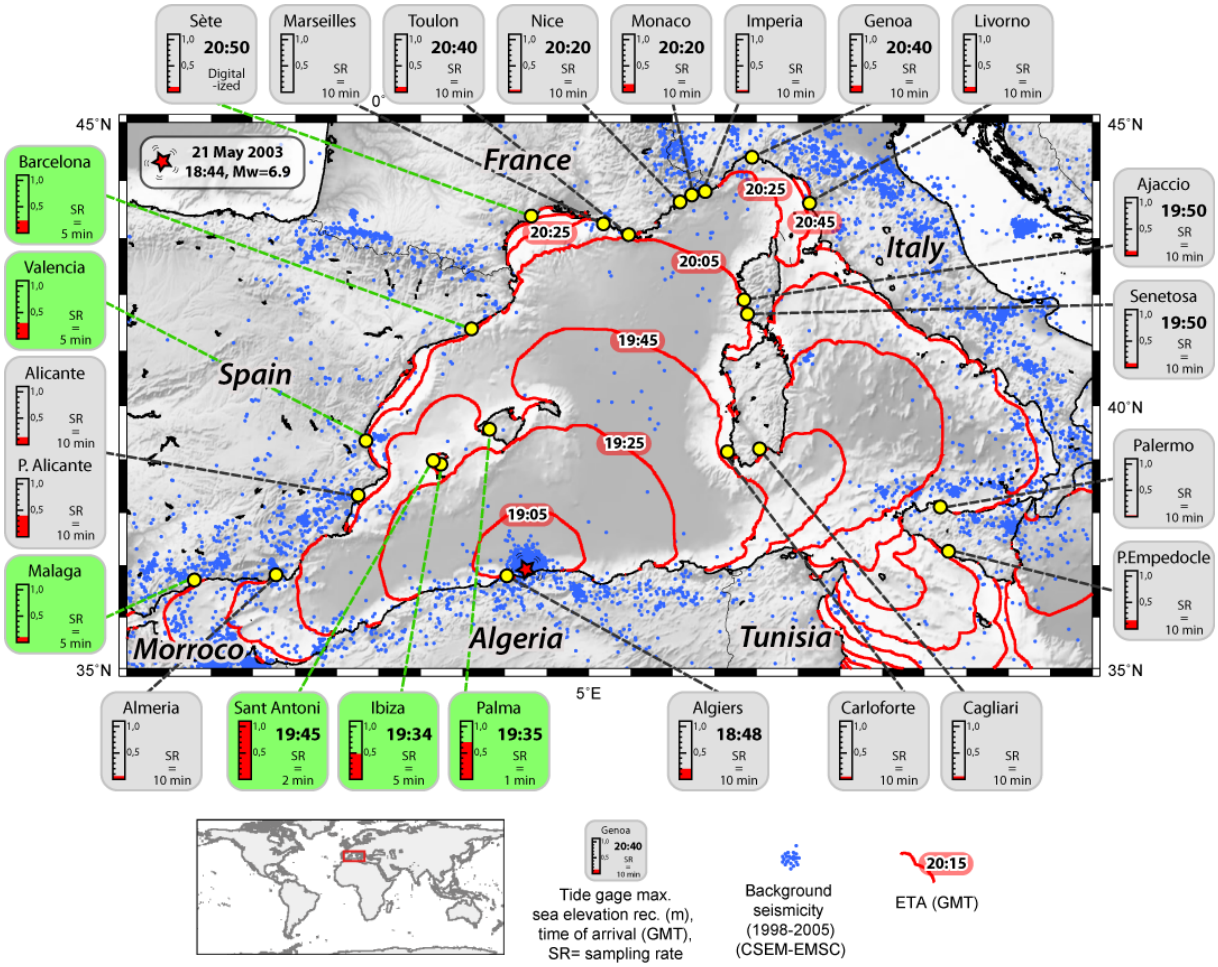


Figure 90. Le tsunami du 21 mai 2003 tel qu'enregistré par les marégraphes (en vert les marégraphes permettant une évaluation fiable de par leur pas d'échantillonnage fin).

Source : adapté de Sahal *et al.* [2009b].

Les marégraphes ont enregistré des élévations de quelques centimètres en Sardaigne (Italie) à un mètre dans les Baléares (Espagne). Le taux d'échantillonnage des marégraphes varie de 1 à 10 minutes. Les marégraphes à échantillonnage précis (moins de 5 minutes, représentés en vert) sont les seuls à enregistrer des variations importantes, à l'exception de celui du Port d'Alicante (Puerto Alicante, Espagne) qui enregistre également des variations, mais potentiellement sous-estimées. Les marégraphes à pas d'échantillonnage grossier (>= 10 minutes, représentés en gris) sont inefficaces pour enregistrer correctement l'amplitude de tsunamis, leur période étant comprise entre 15 et 20 minutes. La modélisation du temps de propagation du tsunami, présentée en Figure 90, montre qu'il a théoriquement atteint les côtes françaises autour de 20:10 UTC (21:10 LT). Les recherches de témoignages ont ainsi été concentrées sur les ports, pour la plupart équipés de capitaineries dont les services de surveillance opèrent de jour comme de nuit. Les maitres de port ont accepté de consulter leurs registres à la recherche d'observations particulières, et un appel à témoins a été affiché dans les 135 ports identifiés, appelant toute personne ayant observé des anomalies hydrologiques à se signaler.

La SNSM, les sémaphores du CROSS-MED, ainsi que les pilotes des ports de commerce ont également été contactés et ont accepté de consulter leurs registres d'intervention. La Figure 91 illustre la localisation des ports et sémaphores dont les responsables ont été sollicités.

Sur les 135 ports auprès desquels l'enquête s'est concentrée, seulement 66 avaient une veille capable d'observer des phénomènes hydrologiques anormaux de nuit. Sur les 66 ports ayant des veilleurs de nuit, 8 ont été affectés par le tsunami. Les 69 autres ports n'avaient pas de veilleurs de nuit, et personne n'a été en mesure de constater quoi que ce soit de particulier le matin du 22, ce qui ne signifie par pour autant que rien ne s'y soit produit. La Figure 92 illustre le secteur affecté avec certitude par le phénomène (emprise correspondant au cadre jaune de la Figure 91).

Le Tableau 23 décrit les caractéristiques de chaque port, le nombre de témoins significatifs ainsi que les phénomènes observés. Il apporte également des éléments concernant la chronologie de ces observations.

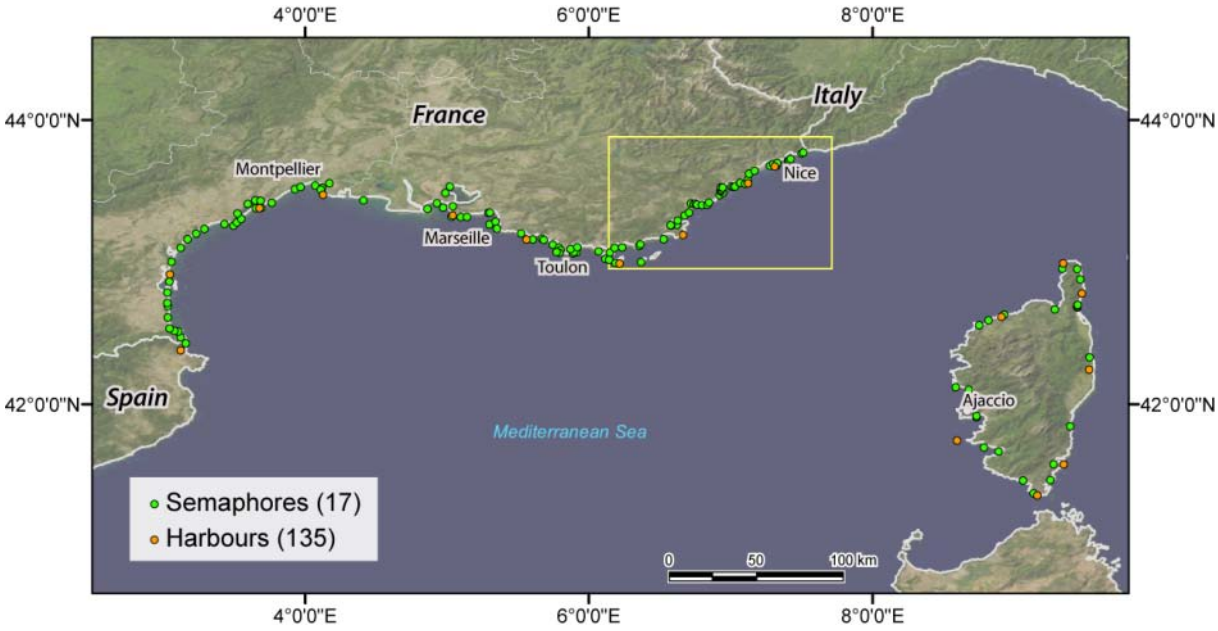


Figure 91. Localisation en Méditerranée des ports et sémaphores le long des côtes françaises.

Source : adapté de Sahal *et al.* [2009b].

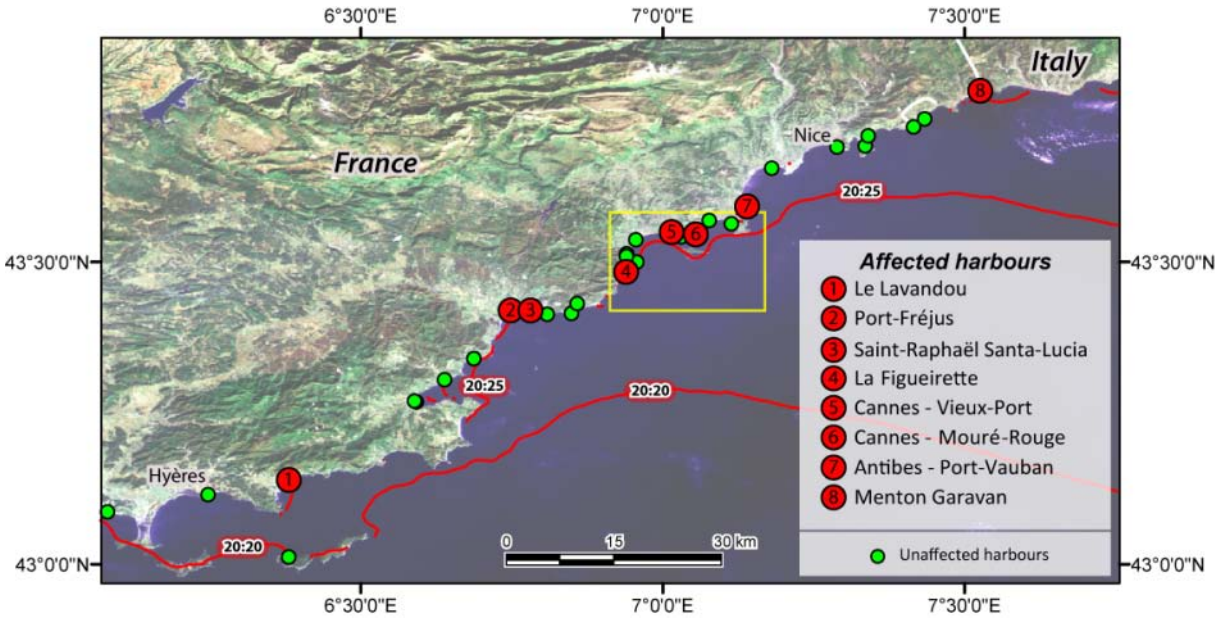


Figure 92. Localisation des ports affectés par le tsunami du 21 mai 2003 (en rouge). Sont figurés en rouge les ports n'ayant pas observé de perturbations.

Source : adapté de Sahal *et al.* [2009b].

Tableau 23. Caractéristiques des ports ayant subi les effets du tsunami du 21 mai 2003, phénomènes observés et chronologie des événements d'après les témoignages recueillis.

Source : adapté de Sahal *et al.* [2009b].

	Caractéristiques du bassin						Observations										
									Heures d'observation				Niveau minimal atteint (m)		Niveau maximal atteint (m)		
	L.(m)	l.(m)	Largeur de la passe (m)	Azimuth de la passe	Azimuth de la baie	Témoin(s) direct(s)	début min	début max	fin min	fin max	min	max	min	max	courants max. (nds.)	Phénomènes hydrologiques observés	Impacts observés
Le Lavandou	400	140	145	S	S	1		22:30									Bateaux coulés
Port-Fréjus	650	210	68	E	S	1	20:00	21:00			-0,2	-0,15		0			Aucun
Saint-Raphaël Santa-Lucia	380	125	47	N & S	S	1		21:30		04:00							Talonnage de la quille de nombreux bateaux
La Figueirette	146	140	23	W	SE	4	20:00	20:30		02:00	-0,9	-1,5	0,7	0,9	15	Forts courants ; tourbillons ; bouillonnement du plan d'eau	Talonnage de la quille de nombreux bateaux ; Une embarcation longue de 5m. coule ; ruptures d'amarres ; Déplacement d'un corps mort de 2t
Cannes - Vieux-Port	480	335	236	E	S	1	21:30			00:00					12	Forts courants ; bouillonnement du plan d'eau	De nombreux corps-morts de 2t sont déplacés
Cannes - Mouré Rouge	200	100	26	S	SE	3	20:30	21:00	00:30	00:45	-1,5		0,3			Fish jumping out of the water; eddies; siphon and "water step"at the entry of the harbor	Echouage d'une embarcation sur la digue ; rupture d'amarres; corps-morts de 2t déplacés
Antibes - Port-Vauban	1000	520	180	N	E	3		21:00			-0,6			0,2			Talonnage de quilles
Menton Garavan	550	160	57	ENE	S	2		21:00		23:00	-0,4			0		Tourbillons à l'entrée du port	Aucun

Tous les ports de la région n'ont pas été affectés par le tsunami. On constate que ceux touchés par le phénomène ont des caractéristiques bien différentes : taille, orientation de la passe et orientation à la côte, etc. La plupart d'entre eux ont subi des variations du niveau marin ainsi que des phénomènes de bouillonnement. Sur les 8 ports affectés, 6 ont subi des dommages matériels. La Figueirette et le port du Mouré-Rouge sont les ports les plus touchés : ils ont tout deux subi une baisse du niveau de

la mer de grande amplitude (0,9 à 1,5 m. et 1,5 m., respectivement). En revanche, le port Cannes - Vieux-Port a été moins affecté par des variations du niveau de la mer.

Les résultats ainsi obtenus possèdent certaines limites : il apparaît difficile pour les témoins de se remémorer avec précision les horaires d'observation, d'autant plus après quelques années (l'enquête a été réalisée en 2009). Toutefois, la plupart des témoins sont des plaisanciers qui connaissent parfaitement leur bateau et la bathymétrie des ports dans lesquels ils s'amarrent. Ils sont par conséquent capables d'estimer avec précision les variations du niveau de la mer étant donné qu'ils doivent ajuster leurs amarres de manière conséquente. Les autres témoins étaient de garde dans les ports touchés la nuit du 21 au 22 mai 2003 et ont aussitôt reporté leurs observations dans les livres de bord des capitaineries, relevant des heures et des effets précis. Néanmoins, afin de constituer une base de données d'observation solide, un nombre conséquent de témoignages significatifs doit être atteint. Le manque de témoins dans cette étude s'explique notamment par l'arrivée du phénomène de nuit (après 21:00 LT). Des enregistrements vidéo auraient pu apporter des éléments plus objectifs, mais malheureusement ils ne sont pas conservés plus d'un mois. Pour toutes ces raisons, il apparaît essentiel de réaliser les enquêtes aussitôt après l'occurrence des événements, le temps jouant en défaveur du recueil d'informations précises.

5.1.1.2 *Modélisation et confrontation aux observations*

Une modélisation a été réalisée en partenariat avec le CEA/DASE pour tenter de comprendre les contrastes des effets observés à la côte [Sahal *et al.* 2009b] en se concentrant sur trois ports ayant réagi différemment à l'arrivée du tsunami (Figure 93).

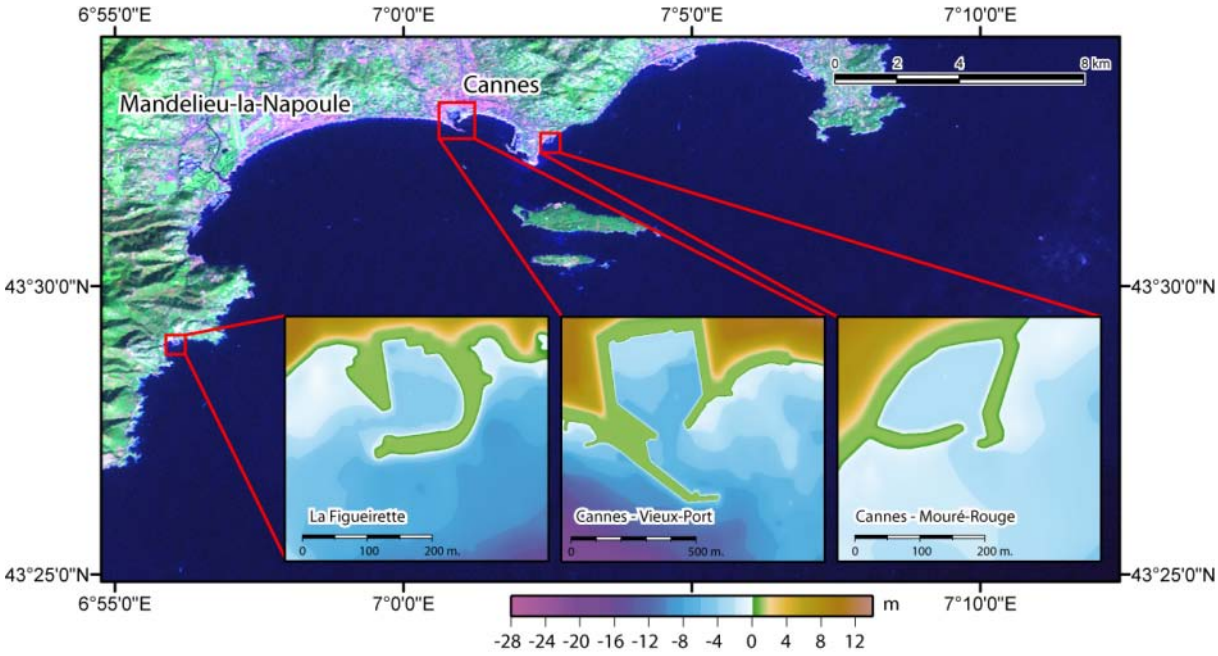


Figure 93. Cartographie et bathymétrie des trois ports retenus pour la modélisation (fond de carte Landsat).

Source : adapté de Sahal *et al.* [2009b].

Dans le cas présent, différents scénarios de sources et de déformation ont été étudiés en se basant sur des données sismiques et des levés GPS [communication personnelle de Bezzeghoud dérivée de Bounif *et al.* 2004 ; Delouis *et al.* 2004 ; Meghraoui *et al.* 2004 ; Yelles *et al.* 2004 ; Semmane *et al.* 2005]. Ces paramètres sont décris dans le Tableau 24.

Tableau 24. Description de la source du séisme du 21 mai 2003 selon différents auteurs.

Source : adapté de Sahal *et al.* [2009b].

	Delouis	Bezzeghoud	Meghraoui	Semmane	Yelles
Longitude	36.83°N	36.83°N	36.83°N	36.83°N	36.91°N
Latitude	3.65°E	3.65°E	3.65°E	3.65°E	3.65°E
Depth of the fault center (km)	~6	~8	~8	~16	~9
Strike (°)	70	64	54	54	60
Dip (°)	45	50	50	47	42
Rake (°)	95	111	90	90	84
Length (km)	60	50	54	64	32
Width (km)	24	16	15	32	14

Tous ces scénarios ont été testés. Seuls certains s'accordent avec les enregistrements marégraphiques des Baléares, dont celui de Delouis *et al.* [2004], le plus approchant. Néanmoins, même si les phases sont correctement reproduites, les amplitudes modélisées sont trop faibles

[Alasset *et al.* 2006]. Ainsi, puisque toutes les sources fournissent des résultats similaires en terme de tsunami déclenché, la source proposée par Delouis *et al.* [2004] a été choisie pour modéliser le phénomène dans le cadre de cette étude [Lemaire 2008].

La grille bathymétrique principale utilisée pour la modélisation inclut l'ensemble de la Mer Méditerranée occidentale. Elle a été construite grâce à des données GEBCO (*GEneral Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre*, 1997, résolution 1') interpolées à une maille de 1000 m. Cette grille (« grd 0 ») a été utilisée pour modéliser la déformation co-sismique dérivée du modèle proposé par Delouis *et al.* [2004], puis pour calculer le niveau maximal de la surélévation de la surface de l'eau en tout point de la grille. Cette surélévation maximale (Hmax) est calculée sur les 4 heures suivant le séisme (Figure 94).

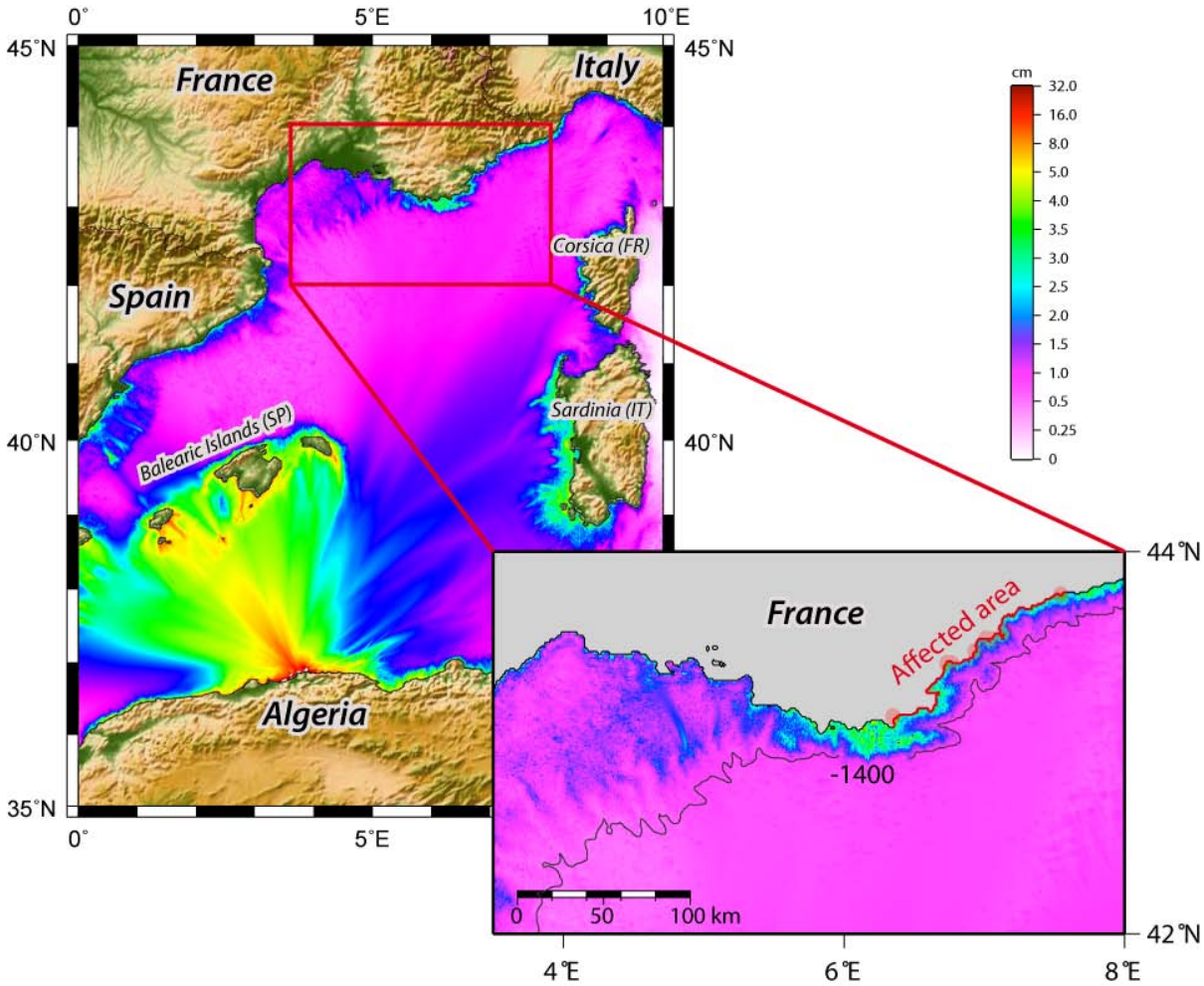


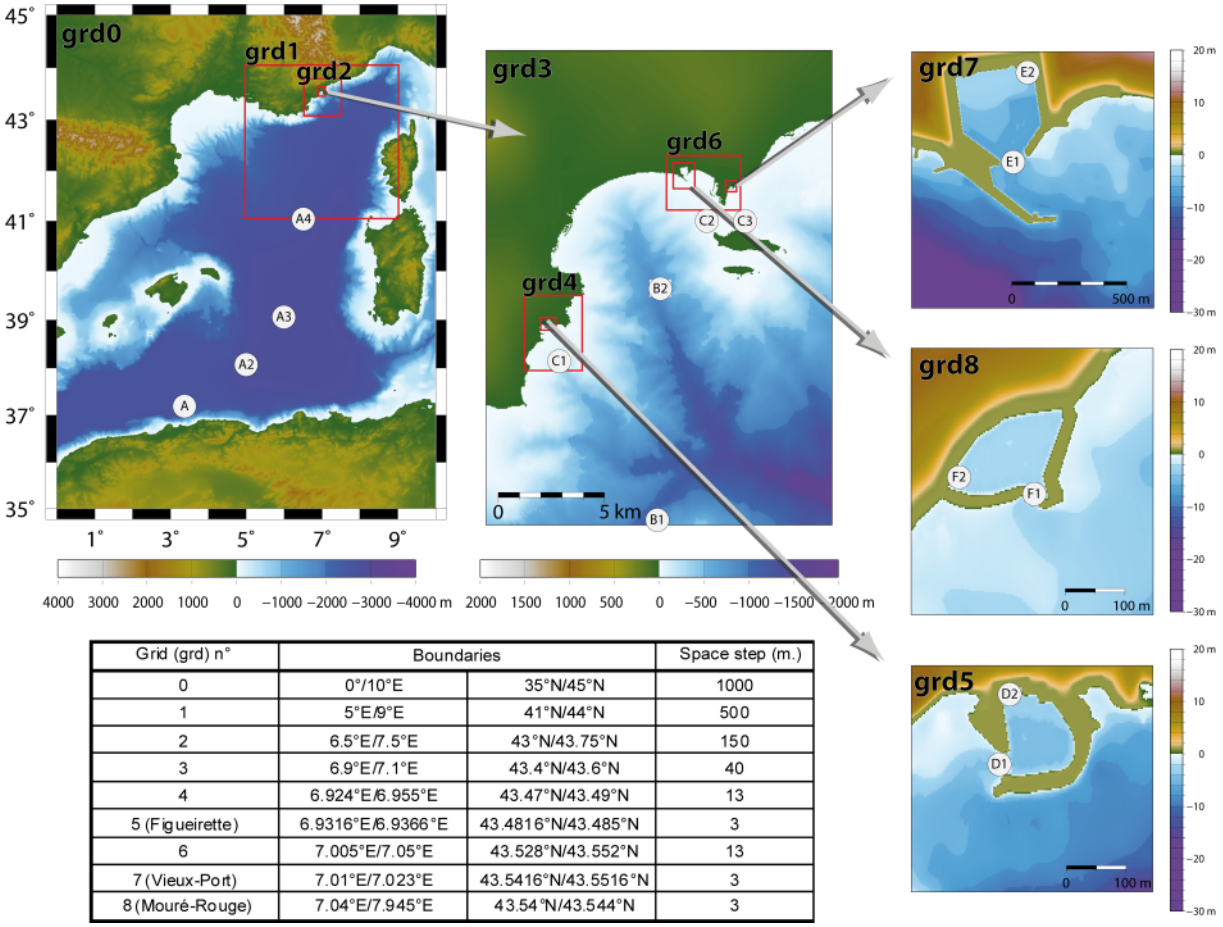
Figure 94. Hmax calculés durant les 4 heures suivant le séisme tél que décrit par Delouis *et al.* (grille « grd0 ») et zoom sur la côte française affectée.

Source : adapté de Sahal *et al.* [2009b].

La Figure 94, qui représente un premier résultat de la modélisation du CEA/DASE, montre l'axe d'énergie maximale du tsunami, orienté en direction des Baléares, conformément aux résultats

obtenus pas Alasset *et al.* [2006]. Cette orientation de l'axe d'énergie maximale et en accord avec les enregistrements marégraphiques, affectant principalement les Baléares. Cet axe est fortement lié à l'orientation de la faille utilisée, bien qu'un léger changement de celui-ci n'entraine que peu de conséquences sur les résultats de la modélisation : les effets sont toujours marqués aux Baléares [Alasset *et al.* 2006]. A noter que ce phénomène a également été constaté lors de l'étude du tsunami déclenché par le séisme de Jijel (Algérie) en 1856 [Roger et Hébert 2008]. Enfin, les canyons sous-marins semblent jouer un rôle important dans l'amplification de l'élévation du niveau de la mer, comme cela est visible le long de la côte espagnole. La Figure 94 révèle également des amplifications le long des côtes espagnoles, sardes, corses ainsi que sur la Côte d'Azur. Ces amplifications n'atteignent toutefois que 10 cm. sur la grille « grd 0 » (maille large). A cette petite échelle, la modélisation montre clairement une amplification sur la zone française affectée par le phénomène. A l'inverse de cette zone d'amplification, le Golfe du Lion apparait peu affecté. Ce contraste pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs : l'effet de masque des Baléares, la perte d'énergie du phénomène au contact de la marge continentale de l'entrée du Golfe du Lion, et enfin la distance qui sépare l'extrémité de cette marge et la côte. Dans tous les cas, les amplifications modélisées n'atteignent pas les hauteurs observées à la côte, bien que correspondant à l'enregistrement du marégraphe de Nice (43.695°N ; 7.285°E). La maille grossière de la grille « grd0 » ne peut considérer les effets d'amplification à la côte (*shoaling effect*[23]), particulièrement le long de la côte affectée en France, notamment à cause de ses pentes importantes, non visibles sur la grille « grd0 ». C'est pourquoi l'emboitement de grilles plus fines a été testé (Figure 95).

[23] Cf. 1.1.2, p. 24.



Grid (grd) n°	Boundaries		Space step (m.)
0	0°/10°E	35°N/45°N	1000
1	5°E/9°E	41°N/44°N	500
2	6.5°E/7.5°E	43°N/43.75°N	150
3	6.9°E/7.1°E	43.4°N/43.6°N	40
4	6.924°E/6.955°E	43.47°N/43.49°N	13
5 (Figueirette)	6.9316°E/6.9366°E	43.4816°N/43.485°N	3
6	7.005°E/7.05°E	43.528°N/43.552°N	13
7 (Vieux-Port)	7.01°E/7.023°E	43.5416°N/43.5516°N	3
8 (Mouré-Rouge)	7.04°E/7.945°E	43.54°N/43.544°N	3

Figure 95. Description des grilles et localisation des capteurs virtuels (A, A1, A2, etc.), utilisés pour la modélisation des effets du tsunami du 21 mai 2003 dans les trois ports étudiés.

Source : adapté de Sahal *et al.* [2009b].

Les grilles des ports et de la côte ont été construites et viennent se greffer sur la grille « grd0 », permettant ainsi un affinage depuis la source jusqu'aux trois ports étudiés. Ces trois ports, situés à proximité les uns-des-autres permettent une imbrication au sein de la même grille intermédiaire. Les grilles à haute résolution des trois ports étudiés ont été construites grâce à des données du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) avec un pas de 3 m., et complétées avec des plans de navigation [Escales 2007]. Des interpolations et/ou extrapolations ont été conduites dans certaines parties des ports dont la bathymétrie n'était pas renseignée, grâce à l'utilisation de photographies ou d'images satellites, de manière à obtenir une géométrie des bassins la plus fidèle possible. Au total, 9 grilles imbriquées ont ainsi été créées.

Les résultats de la modélisation faite par le CEA/DASE (Figure 96) montrent une forte amplification dans le port de La Figueirette, le plus petit des ports étudiés.

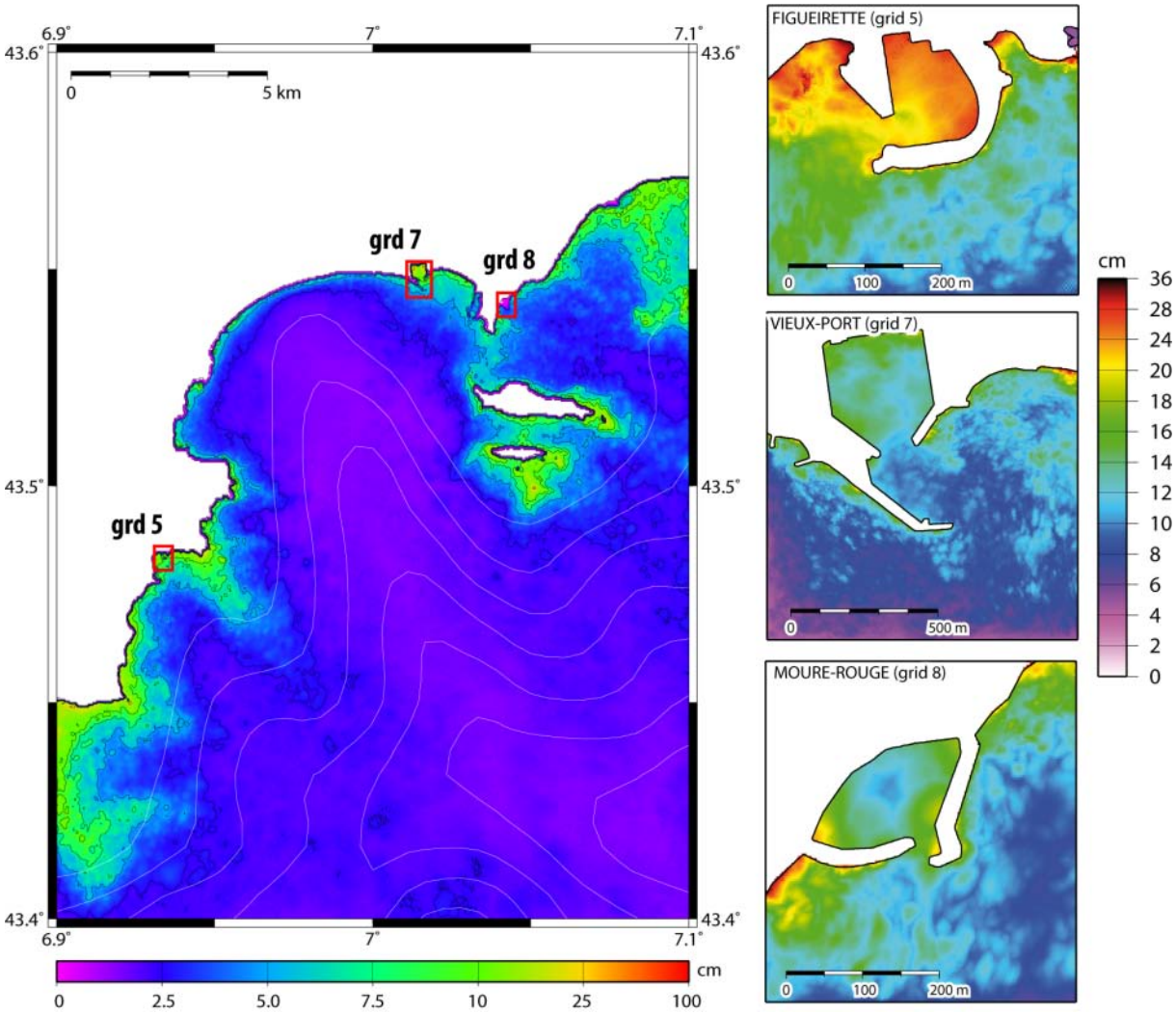


Figure 96. Hmax pendant les 4 heures suivant le séisme dans la baie de Cannes et dans les trois ports étudiés.

Source : adapté de Sahal *et al.* [2009b].

Les amplifications modélisées se manifestent essentiellement à la côte, traduisant cette fois ci le *shoaling effect*. C'est à La Figueirette que les amplifications sont les plus importantes, illustrant les phénomènes de résonances propres à sa baie et à son bassin avec des surcotes atteignant 36 cm. En ce qui concerne le Vieux-Port de Cannes, le plus grand des trois ports étudiés, localisé entre les deux ports ayant subi les plus grandes amplifications, seule une légère variation du niveau de la mer est modélisée, avec un maximum de l'ordre de 15 cm. Le Mouré-Rouge quant à lui légèrement plus grand que La Figueirette, semble être moins affecté. On peut poser l'hypothèse d'une atténuation liée à la présence des îles de Lérins qui protègeraient le Mouré-Rouge des trains de grande longueur d'onde (Figure 96), hypothèse qui reste à débattre.

Globalement, la modélisation à échelle fine n'a pas permis la reproduction des observations en termes d'amplitude. Toutefois, elle est en accord avec les observations sur le fait que La Figueirette est le port le plus affecté en comparaison avec ses voisins étudiés.

5.1.2 Le cas du tsunami local du 16 octobre 1979

L'événement du 16 octobre 1979 est le mieux documenté des tsunamis de source locale ayant affecté les côtes de France métropolitaine [Anthony et Julian 1997 ; Assier-Rzadkiewicz *et al.* 2000 ; Labbé *et al.* 2010 ; Sahal et Lemahieu 2011].

5.1.2.1 *Observations recueillies*

Le 16 octobre 1979, une partie du chantier de construction du nouveau port de commerce de Nice, adjacent à l'aéroport Nice-Côte d'Azur, s'effondre en mer sous les pieds des ouvriers, déclenchant un tsunami qui submerge les quartiers de La Salis et de La Garoupe à Antibes, tuant 8 personnes et entraînant de nombreux dégâts (automobiles, magasins, restaurants et autres commerces détruits). Les effets du tsunami sont ressentis de Menton, situé à 30 km. au nord-est de Nice jusqu'aux îles du Levant, situées à 90 km. au sud-ouest de Nice. Plusieurs marégraphes enregistrent des variations du niveau marin, dont ceux de Nice Lympia, Villefranche, Cagnes, Mandelieu-la-Napoule, Monaco, ou encore celui des îles du Levant. La Figure 97 illustre les variations du niveau marin telles qu'elles ont été rapportées à l'époque par différents témoins oculaires [MIP 1986].

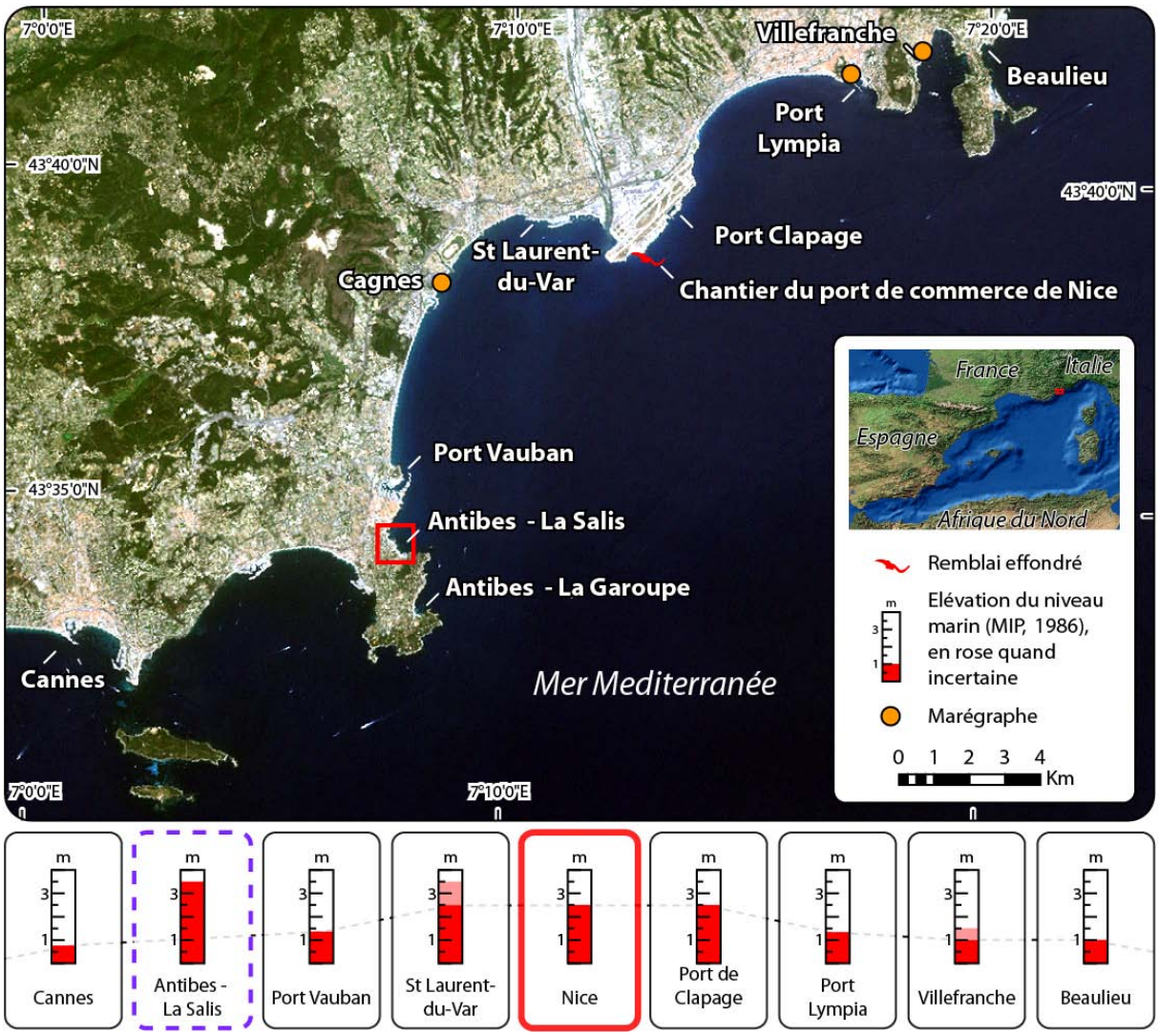


Figure 97. Variations du niveau de la mer observées autour de Nice le 16 octobre 1979.

Sources : élévations du niveau de la mer selon MIP [1986]; fond de carte LANDSAT ; adapté et traduit de Sahal et Lemahieu [2011].

Les élévations observées qui atteignent 2,5 m. sur le site de Nice décroissent globalement à mesure que l'on s'en éloigne jusqu'à atteindre moins d'1 m. à Cannes et Beaulieu. La seule exception est le cas d'Antibes - La Salis où les effets du tsunami sont amplifiés, atteignant une élévation du niveau de la mer de 3,5 m. [MIP 1986].

A la suite de ce tsunami, des enquêtes ont été diligentées par de nombreuses institutions et experts mandatés pour clarifier les causes du tsunami afin de déduire s'il s'agissait d'un événement « naturel » ou bien lié à une négligence humaine. Les rapports correspondants, non publiés et consultables par une poignée de personnes seulement, contiennent des informations sur la source du tsunami, récemment étudiée par Assier-Rzadkiewicz *et al.* [2000] afin de modéliser l'effondrement du remblai. Ces rapports fournissent également des informations sur la propagation du tsunami et sur les dommages engendrés. Par croisement des rapports - et plus particulièrement

grâce au rapport DDE [1981] - une synthèse des variations du niveau marin a pu être établie (Figure 98).

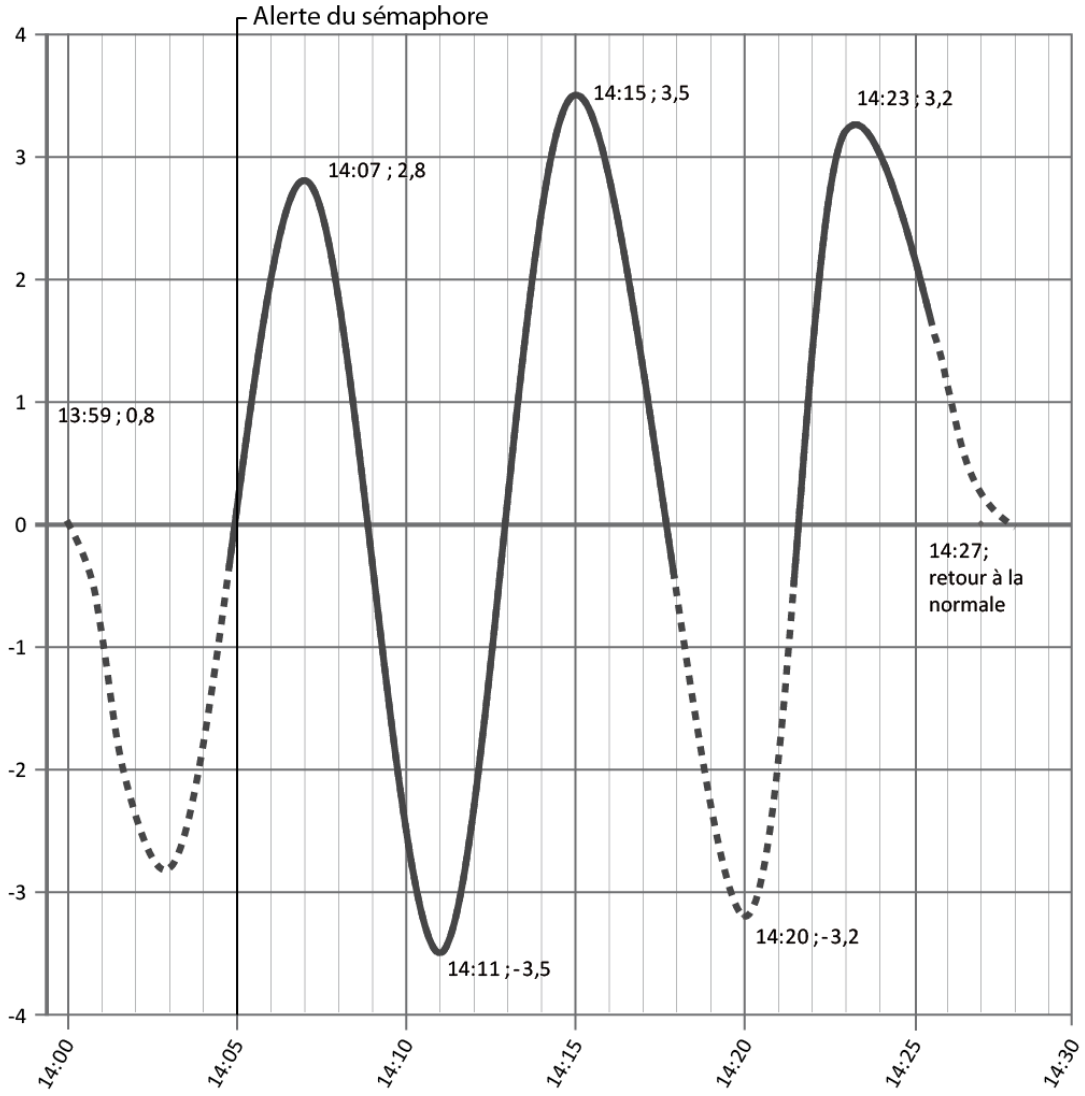


Figure 98. Séquence temporelle des variations du niveau de la mer observées à La Salis après l'effondrement du remblai de l'aéroport de Nice le 16 octobre 1979, GMT+1 ; les tirets représentent l'incertitude des niveaux atteints et de la chronologie correspondante.

Source : adapté de Sahal et Lemahieu [2011].

Les témoignages et les rapports sont concordants concernant la polarité[24] du tsunami à la côte de La Salis, débutant par un retrait de la mer. Ce retrait a été suivi de hausses et de baisses par alternance, pas toujours précisément décrites dans le temps, avec une période oscillant autour de 8-9 minutes. Le phénomène a été observé à Antibes pendant environ 30 minutes.

[24] Cf. 1.1.2, p. 24.

Aucune cartographie de la submersion n'a été faite par le passé, aucune institution ne semblant s'être intéressée aux limites atteintes à terre par le phénomène. C'est donc en recueillant des témoignages auprès des habitants des lieux présents lors de l'événement que celle-ci a pu être réalisée (Figure 99).

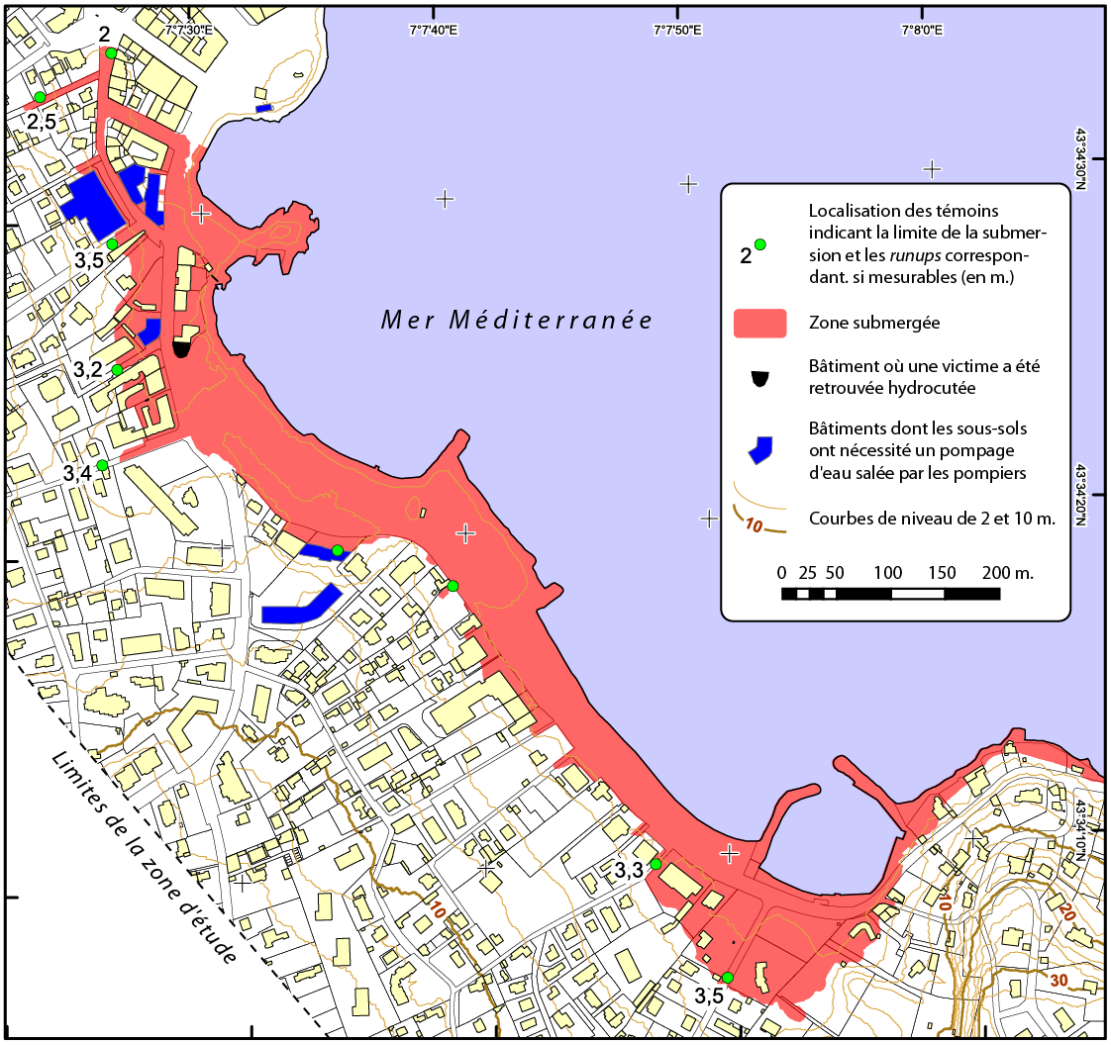


Figure 99. Limites de la submersion marine consécutive à l'effondrement de l'aéroport du Nice du 16 octobre 1979 et hauteurs de *runup* correspondantes dans les quartiers de La Salis et du Ponteil (Antibes).

Source : adapté de Sahal et Lemahieu [2011].

Les témoins ont physiquement indiqué les hauteurs maximales atteintes ou les limites horizontales maximales de submersion grâce à des repères précis (murs, arbres, etc.). Ces lieux, après levés GPS, ont été identifiés sur les cartes AFNOR d'époque afin de déterminer les altitudes correspondantes et d'en déduire des valeurs de *runup.* Par ailleurs, les rapports d'intervention consultés aux archives de la caserne de pompiers d'Antibes ont permis de cartographier les bâtiments dont les caves ont été inondées par le phénomène, fournissant des informations sur l'extension spatiale sous-terraine du

phénomène. Les valeurs de *runup* atteignent 3,5 m. d'altitude, avec une profondeur maximale d'inondation de 150 m.

Quelques clichés pris par des témoins sur place permettent d'illustrer l'ampleur de la submersion, voire de confirmer certaines mesures sur des repères encore présents (Figure 100). Le bâtiment sombre visible à gauche de la caravane est celui dans lequel la personne décédée a été retrouvée (localisation sur la Figure 99).

Figure 100. Cliché du quartier du Ponteil (Antibes) submergé le 16 octobre 1979, pris face au nord.

Source : cliché de M. Tremolani, 1979.

5.1.2.2 *Comparaison des observations avec la modélisation*

Dans le cadre du programme MAREMOTI, Labbé *et al.* [2010] ont modélisé ce tsunami en reconstituant le glissement qui l'a déclenché, produisant une cartographie de la submersion qui a affecté Antibes (Figure 101).

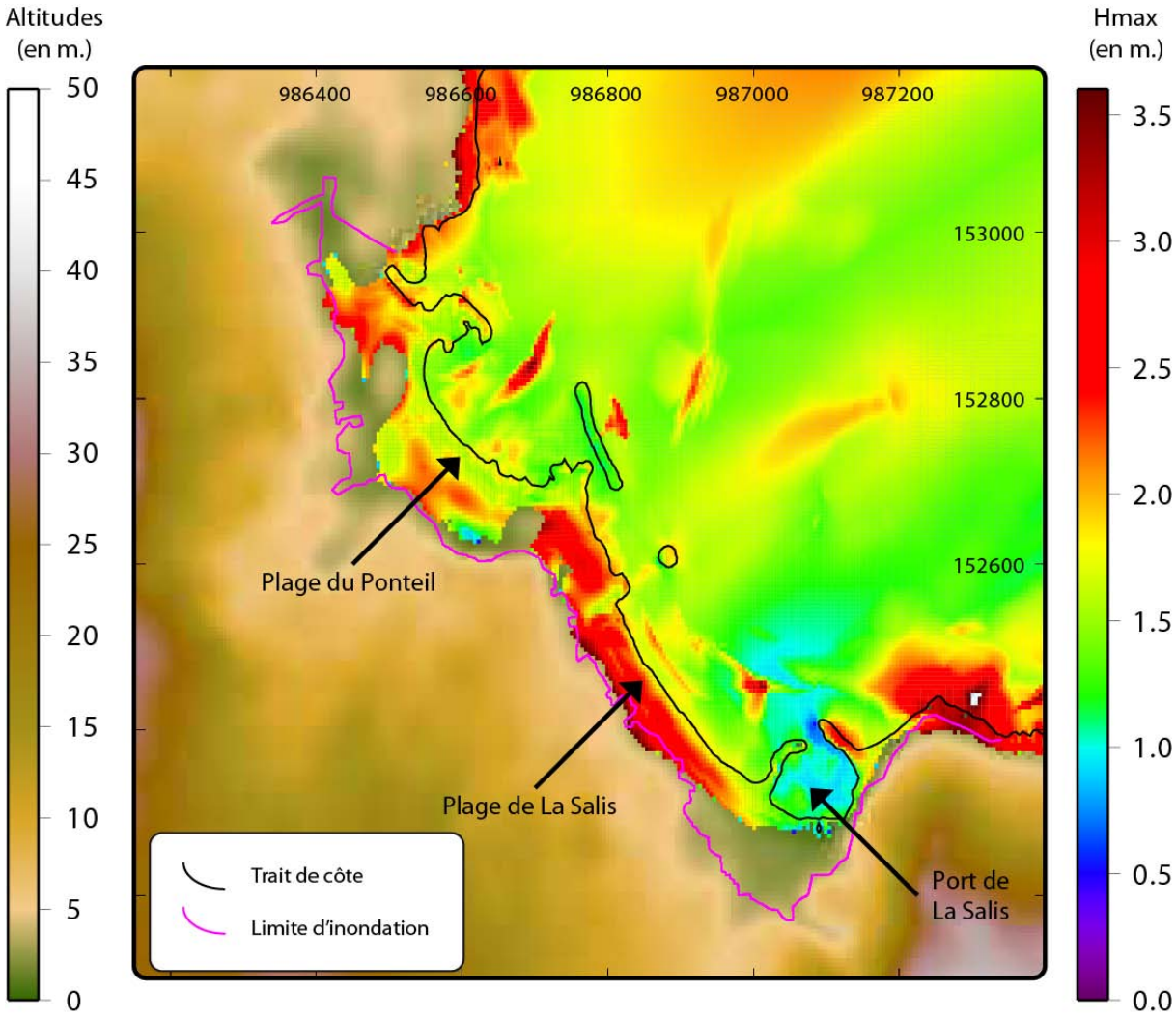


Figure 101. Comparaison de la modélisation du tsunami du 16 octobre 1979 avec les limites d'inondations constatées sur lors de l'enquête de terrain.

Sources : limites d'inondation selon Sahal et Lemahieu [2011], modélisation selon Labbé *et al.* [2010], adapté de Sahal *et al.* [2011a]. Coordonnées Lambert III exprimées en m.

La submersion modélisée correspond relativement bien avec les observations recueillies sur le terrain, particulièrement pour les plages de La Salis et du Ponteil. En revanche, elle reste moins étendue au sud du port de La Salis : la modélisation montre une profondeur d'inondation de 40 m., bien en deçà des 150 m. rapportés par les témoins.

Compte tenu du caractère inondant de l'événement de 1979, celui-ci a été retenu pour une évaluation par scénario de risque.

5.2 Evaluation préliminaire des enjeux : la plage de La Salis

Dans le quartier de La Salis, l'ensemble des bâtiments présente des structures résistantes (type « E »). Aussi, l'évaluation des enjeux s'est focalisée sur la fréquentation de la plage de La Salis. Ces

travaux ont été réalisés avec l'appui d'un étudiant stagiaire de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Colas Robert, encadré pour mener à bien une étude de fréquentation de l'ensemble des plages d'Antibes et de Juan-les-Pins [Robert 2011] dans le cadre du programme ANR MAREMOTI.

Par différents moyens de comptage manuels et photographiques, l'étude de fréquentation permet d'évaluer les effectifs présents sur la plage de La Salis à toute heure de la journée, en distinguant les baigneurs des personnes installées sur la plage. La campagne d'évaluation de la fréquentation de la plage est étalée sur une durée d'un mois (août 2010). La distinction entre baigneurs et personnes sur la plage est faite afin de prendre en compte le temps nécessaire aux baigneurs pour rejoindre la plage et évacuer avec le reste des usagers. La fréquentation moyenne de la plage est calculée après comptage (Figure 102).

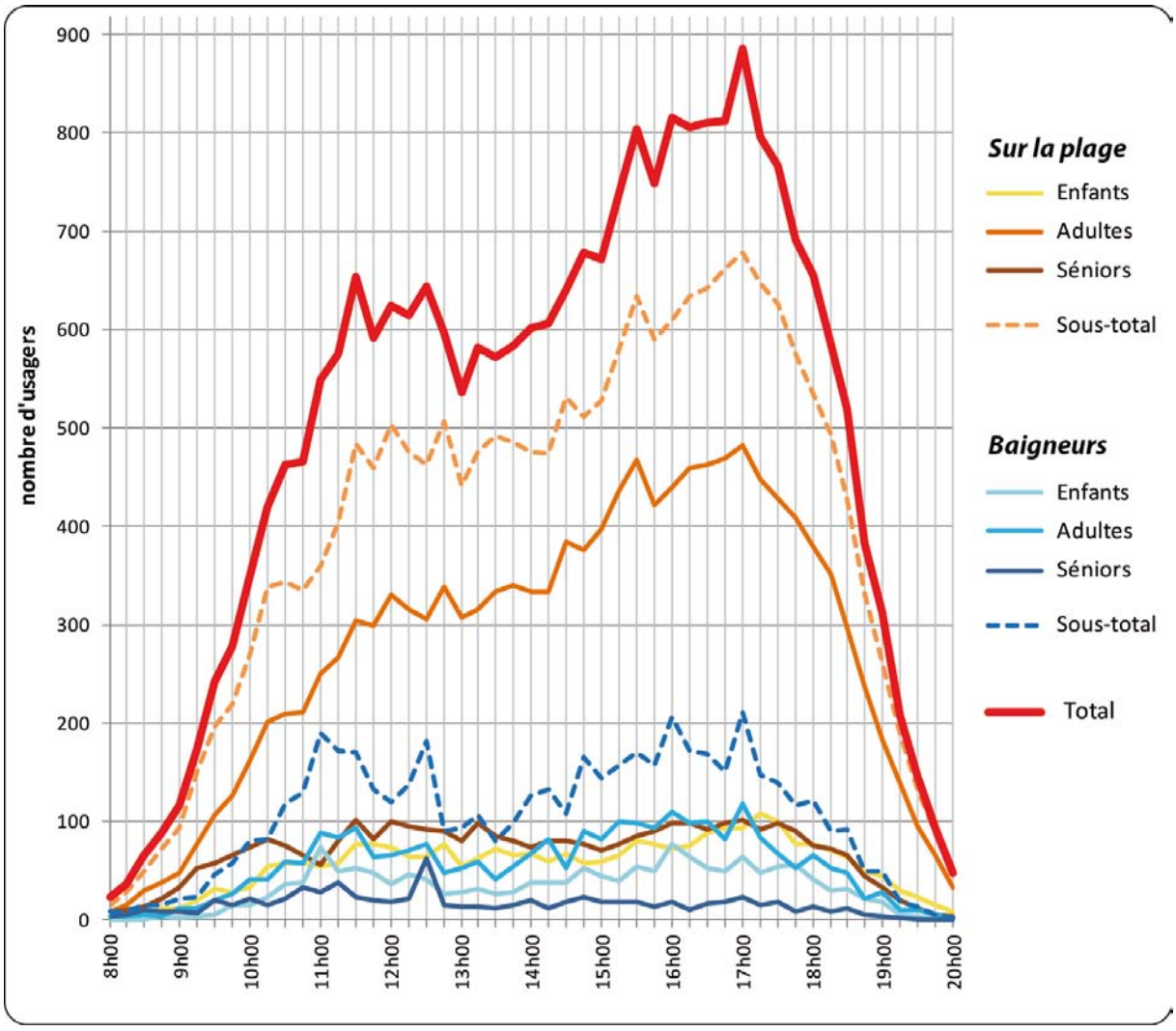


Figure 102. Fréquentation moyenne de la plage de La Salis durant le mois d'août 2010.

On observe un pic important autour de 17h, lorsque l'insolation et les températures commencent à baisser, et une fréquentation moindre à l'heure du déjeuner (heure la plus chaude). Ces tendances

observées sur la plage de La Salis sont conformes à celles observables sur les autres plages étudiées. Le nombre de baigneurs atteint globalement une proportion de 20 à 30% des usagers. L'étude fine des fréquentations journalières (et non moyennes) met en évidence certains pics atteignant les 1000 individus. Aussi, ce scénario maximisant les enjeux est retenu pour modéliser une évacuation multi-agent. La distinction entre baigneurs et personnes sur la plage n'est pas directement exploitée dans la modélisation des évacuations, tous les usagers étant placés à terre. Néanmoins, le micro-simulateur est paramétré afin de distribuer aléatoirement des temps de réaction compris entre 0 et 3 minutes aux agents.

5.3 Scénarios de risque et modélisation des évacuations

Compte tenu de l'importance du phénomène de 1979 en termes d'amplitudes, on peut considérer que l'ensemble des populations présentes sur la plage de La Salis est fortement menacé. L'objectif n'est pas ici de réaliser une quantification des pertes humaines potentielles. On s'intéresse spécifiquement au cas de l'évacuation de cette plage, dont l'étendue limitée permet l'utilisation des macro- et micro-simulateurs.

5.3.1 Définition d'une zone refuge

On pose ici la problématique d'une évacuation de la plage de La Salis à Antibes, submergée en 1979 par le tsunami consécutif à l'effondrement de l'aéroport de Nice. On se place dans un scénario de submersion similaire mais avec un temps de réaction des autorités permettant une alerte et une évacuation de la plage vers les hauteurs (évacuation horizontale). La zone refuge choisie est la résidence « Les Jardins de l'Ermitage », située au 28 Chemin de l'Ermitage (Figure 103).

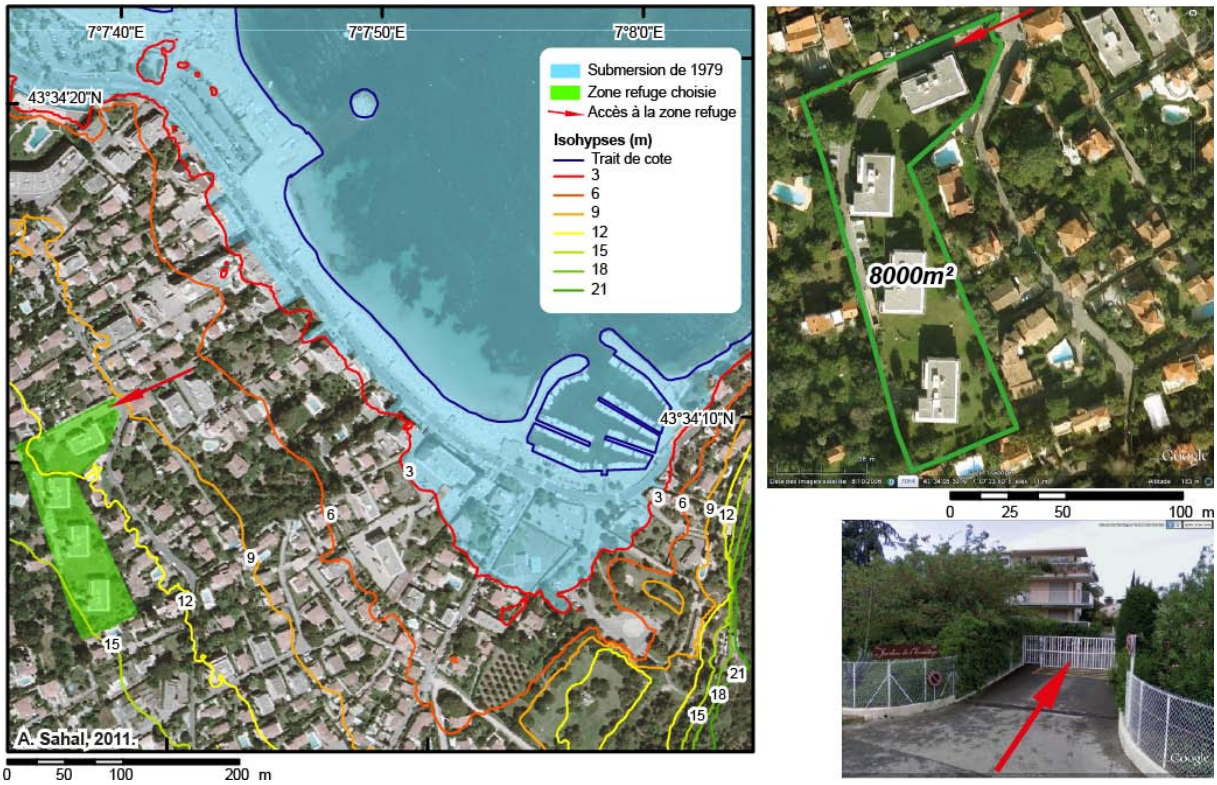


Figure 103. Submersion dans le quartier de La Salis (Antibes) en 1979 et choix d'une zone refuge horizontale, voie d'accès et surface disponible.

Sources : Sahal et Lemahieu [2011], fonds de cartes IGN BD Ortho 2004 et GoogleEarth 2006, photographie GoogleEarth 2011.

Cette résidence présente une surface extérieure disponible de 8000 m² (bâtiments exclus). Elle est située entre 9 et 15 m. d'altitude et répond donc aux critères de choix d'une zone refuge en Méditerranée occidentale.

Une fois la zone refuge choisie, on utilise la modélisation pour déterminer les voies d'évacuation optimales et les temps de trajet correspondant selon les macro- et micro-simulateurs sélectionnés : *Evacuation Route Tools* et *SimWalk*.

5.3.2 Etude préliminaire des voies d'évacuation possibles avec Evacuation Route Tools (ERT)

Les relevés topographiques réalisés par le Service Topographique de la Ville d'Antibes (Services Techniques Municipaux) sont utilisés pour créer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à un pas de 1 m. sur l'ensemble de la zone d'intérêt. La Figure 104 présente les données de base et le MNT ainsi créé par krigeage, méthode d'interpolation spatiale la plus adaptée aux données topographiques [Stein 1999 ; Gratton 2002].

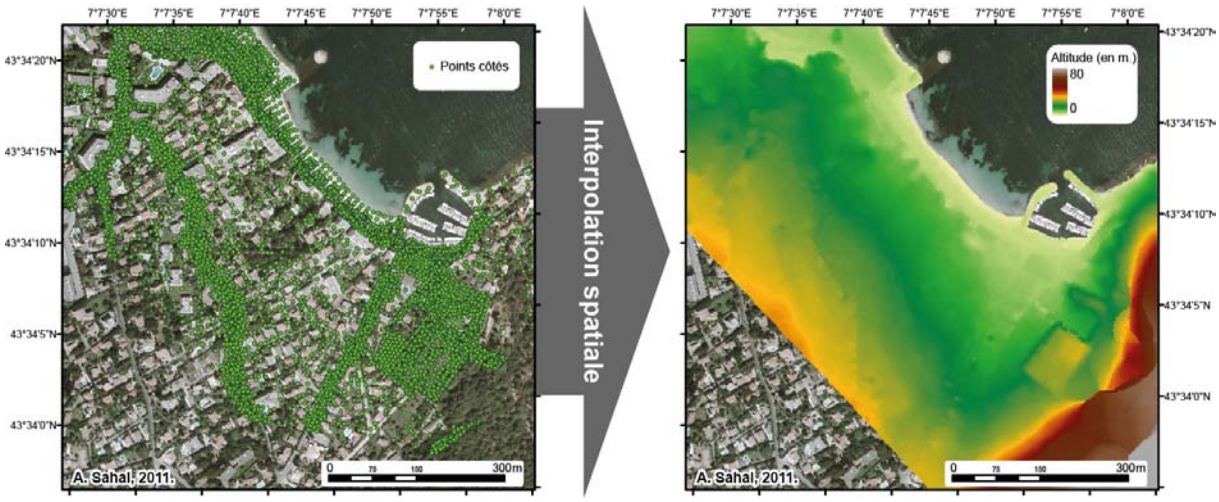


Figure 104. Création du Modèle Numérique de Terrain du quartier de La Salis, Antibes.

Source : semi de point fourni par les Services Techniques de la Commune d'Antibes, fond de carte IGN BD Ortho 2004.

A partir de ce MNT, une matrice des pentes est construite. Les coefficients de perte de vitesse sont attribués en fonction de la pente et du type de substrat, fournissant une cartographie du coût en temps nécessaire pour franchir chaque pixel. Enfin, on peut cartographier l'accessibilité en temps de la zone refuge et simuler des trajets (Figure 105).

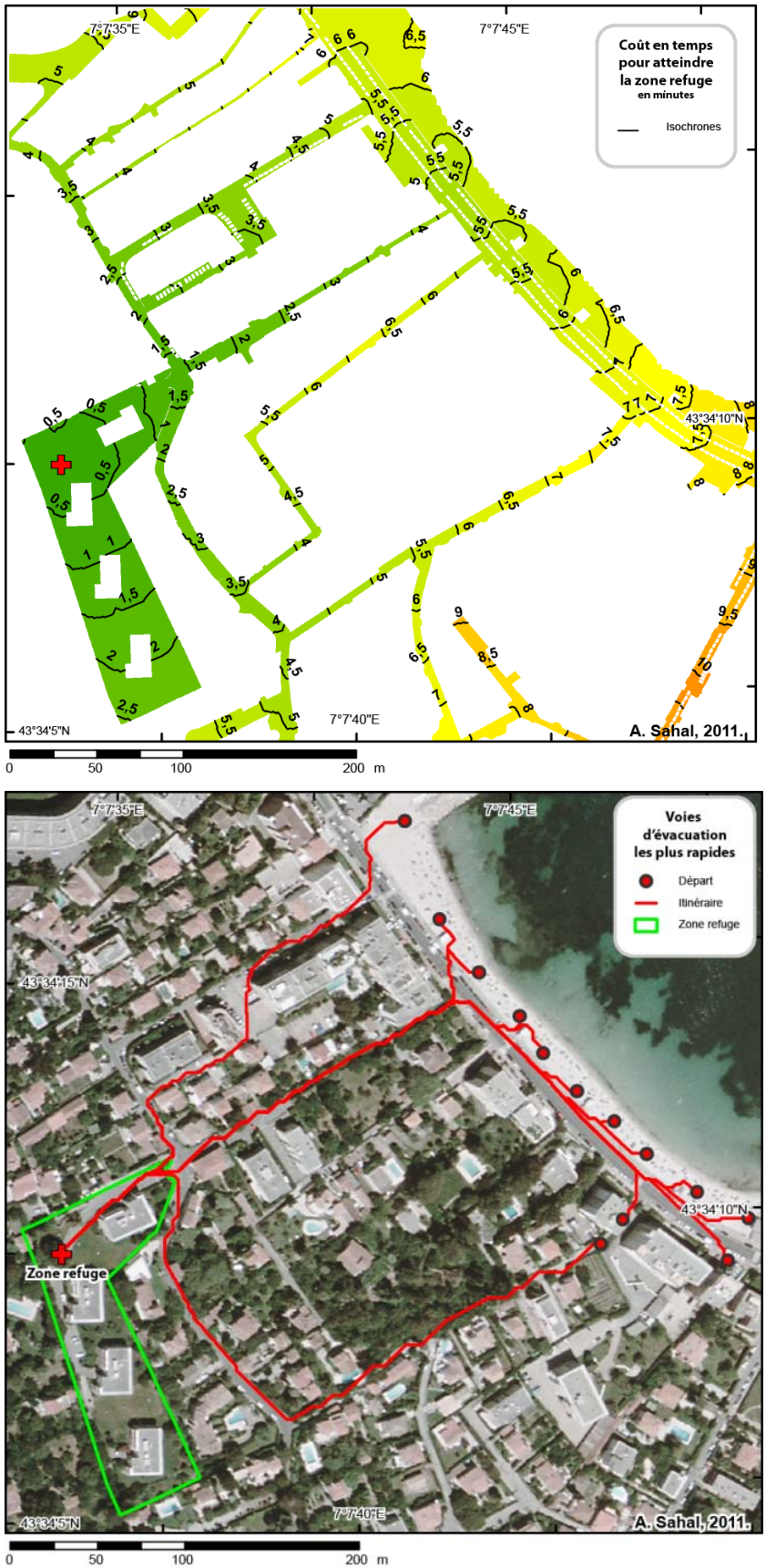


Figure 105. Accessibilité de la zone refuge et exemples de voies d'évacuation optimales selon le macro-simulateur ERT dans le quartier de La Salis (Antibes).

L'essentiel des trajets optimums fournis par le modèle emprunte le même itinéraire (voie dans l'axe direct de l'accès à la zone refuge). Il faudrait ainsi à un individu situé sur la plage 5 à 8 minutes pour atteindre la zone refuge selon ERT et les paramètres d'entrée du modèle. La voie qui traverse la partie centrale de la zone, en forme de coude, n'est pas empruntée par le modèle car elle rallonge considérablement le temps d'évacuation vers la zone refuge. Les obstacles que constituent les voitures ne semblent pas avoir d'incidence sur les temps d'évacuation. On peut aisément imaginer les conséquences que pourrait avoir un mouvement de foule de 1000 personnes dans une rue large de quelques mètres. Si ERT considère ces voies comme optimales en terme de temps de parcours, SimWalk, par son approche multi-agents, permet d'apporter des compléments concernant les engorgements potentiels des voies d'évacuation.

5.3.3 Modélisation multi-agents selon différents scénarios de préparation des populations et des équipements urbains : mise en œuvre avec le logiciel SimWalk

L'idée est ici de faire varier l'encadrement des évacuations : dans un premier temps, une évacuation **S**pontanée **S**ans adaptation des **A**ménagements urbains (**SSA**) est modélisée. Il est ensuite proposé de contraindre les individus à emprunter des itinéraires **F**léchés, toujours **S**ans **A**ménagement (**FSA**). Enfin, on simule une évacuation **F**léchée cette fois-ci **A**vec une adaptation des **A**ménagements et équipements urbains (**FAA**).

Une première étape dans la mise en œuvre de la simulation consiste à définir les zones sources (départ) et les zones refuge (Figure 106). On « place » 200 individus distribués aléatoirement dans chacune des 5 zones sources. La simulation SSA est lancée et permet d'observer en temps réel le déplacement des individus. La couleur de chaque agent correspond à sa vitesse de déplacement (Figure 107). Les caractéristiques physiques et comportementales des individus ont été paramétrées avec des valeurs standard (vitesse de 1,2m/s +/- 0,37, taille de 1,72 m. +/- 0,2) couplées à des handicaps spécifiques au contexte balnéaire (présence d'enfants, de couples, de femmes enceintes, personnes avec sacs à dos ou sacs de sport).

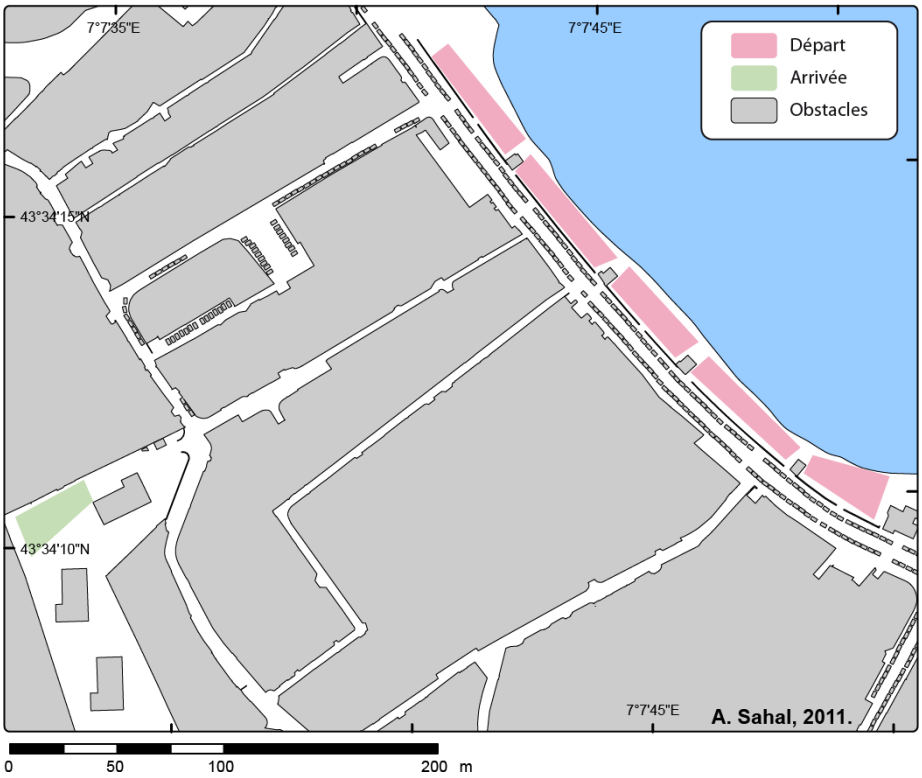


Figure 106. Définition des zones de départ et d'arrivée des agents dans un environnement contraignant : aménagements urbains existants et véhicules stationés.

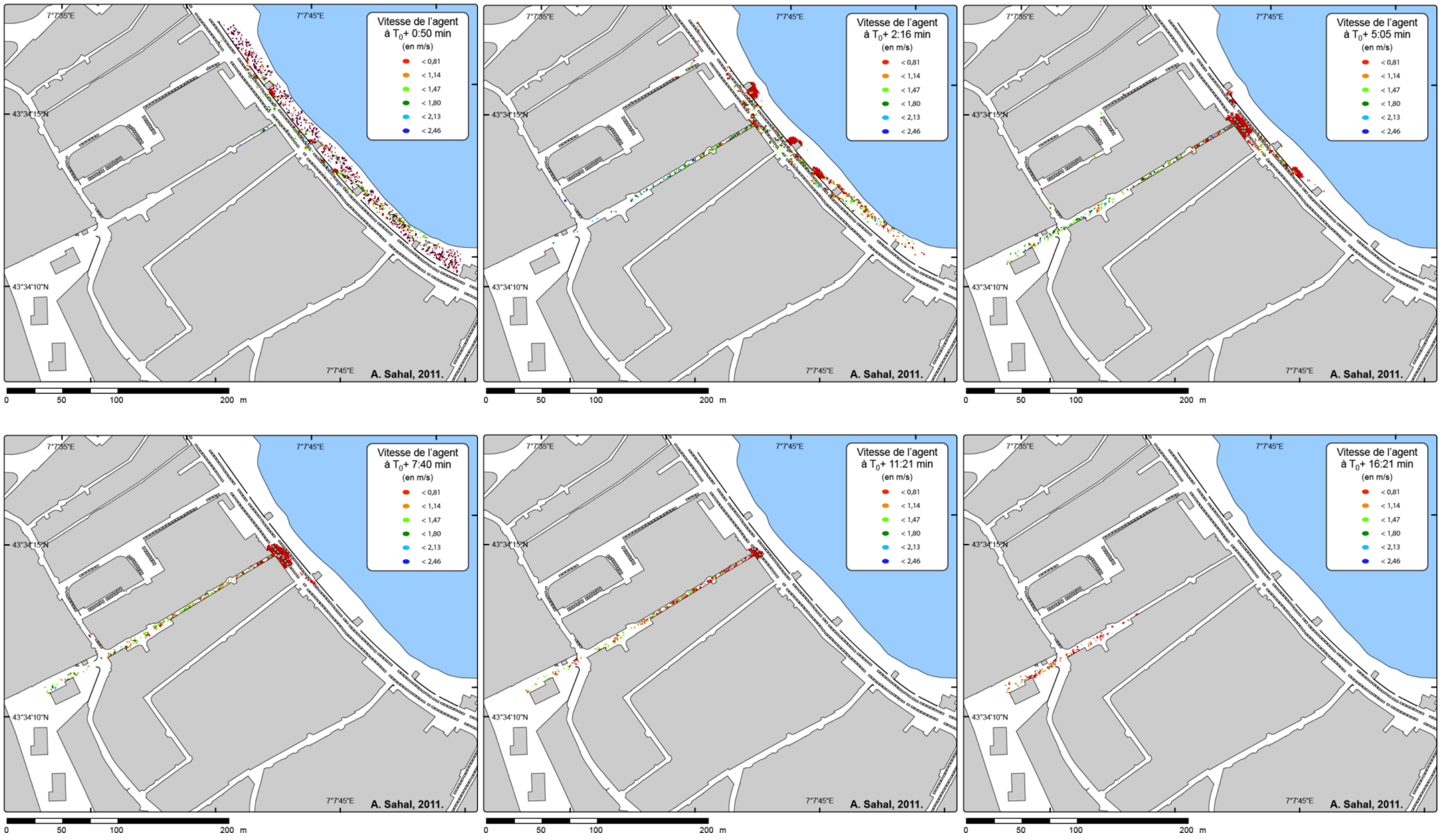


Figure 107. Simulation multi-agents dynamique de l'évacuation de la plage de La Salis (1000 agents), sans fléchage des voies d'évacuation ni aménagements.

En sortie, SimWalk fournit plusieurs cartographies ainsi qu'une base de données décrivant les caractéristiques du déplacement de chaque agent. Parmi les cartes disponibles, celle de la charge maximale décrit le nombre de piétons ayant emprunté chaque portion de l'espace. Elle fournit une cartographie des portions de l'espace les plus empruntées lors de l'évacuation (Figure 108). SimWalk fournit également une cartographie des densités maximales atteintes pendant l'évacuation. Cette carte permet de visualiser les secteurs d'engorgement des populations (Figure 109). Enfin, la cartographie des pertes de vitesse renseigne des secteurs où les piétons se voient ralentis, soit par nécessité de contourner un obstacle soit par engorgement (Figure 110).

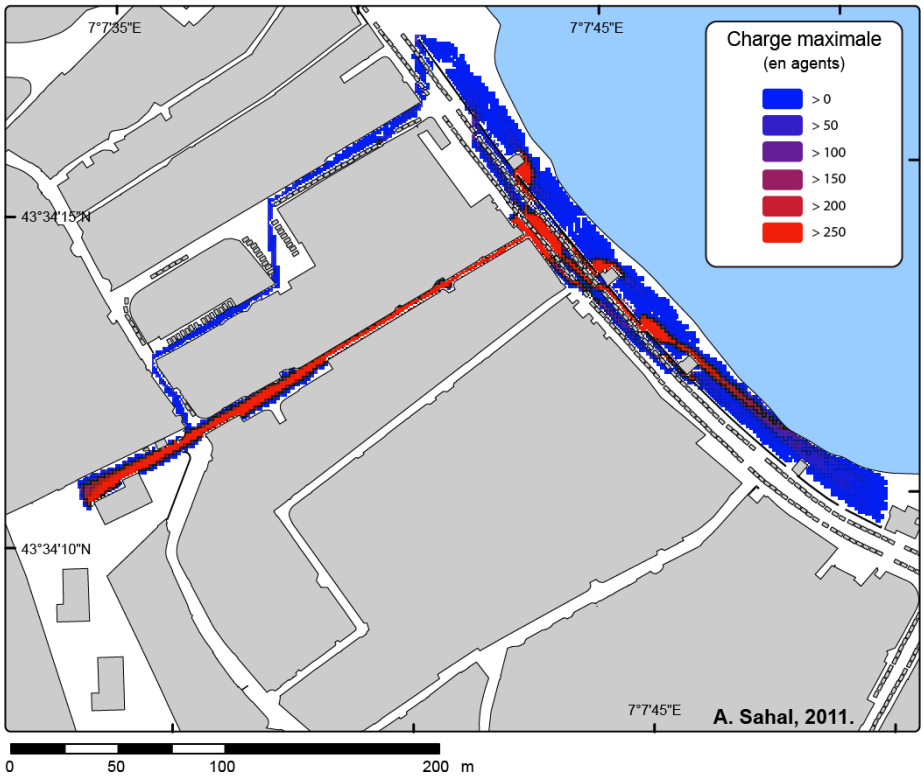


Figure 108. Charge maximale calculée par SimWalk lors de l'évacuation de la plage de la Salis.

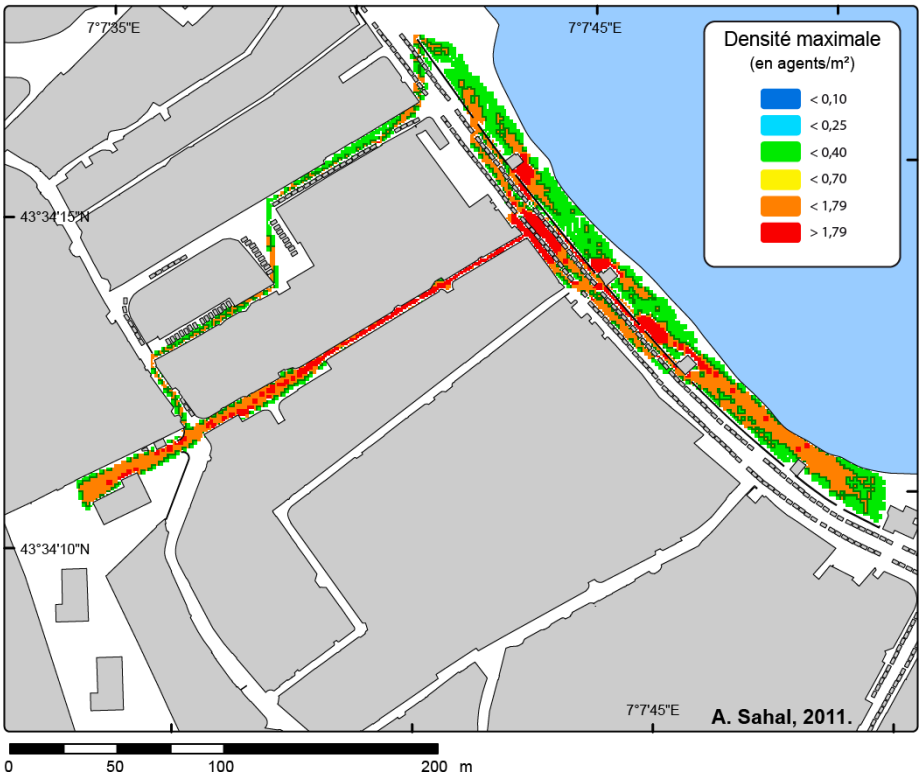


Figure 109. Densité maximale calculée par SimWalk lors de l'évacuation de la plage de la Salis.

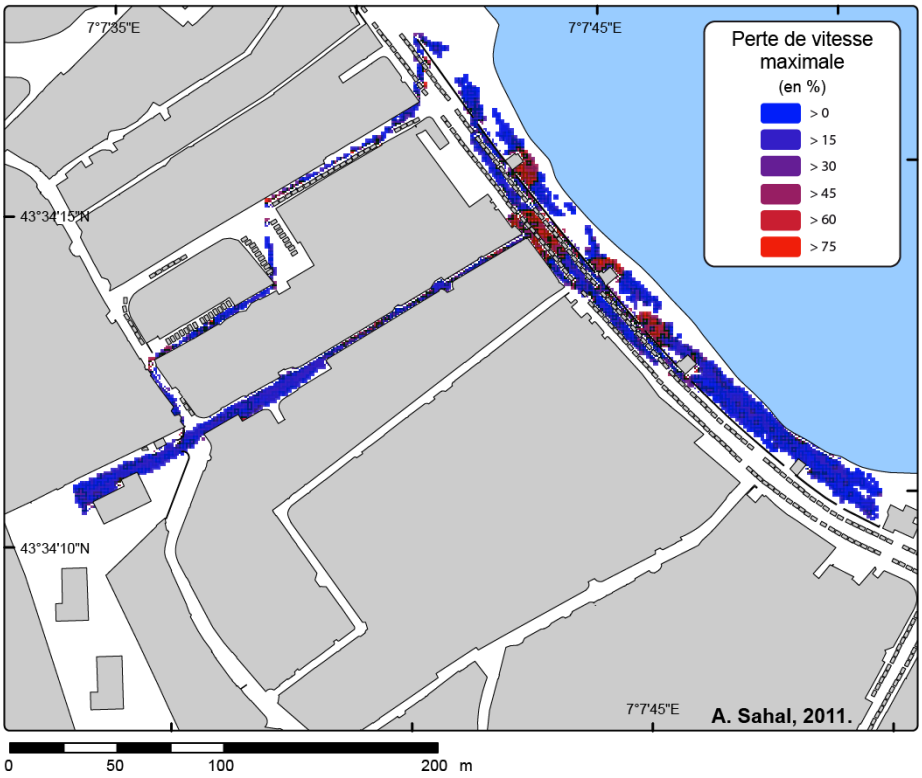


Figure 110. Perte de vitesse maximale calculée par SimWalk lors de l'évacuation de la plage de la Salis.

La simulation montre une forte densité de population et donc une perte de vitesse importante dans les secteurs de rétrécissement de la chaussée : murs situés entre la plage et la chaussée, et goulet d'étranglement à l'entrée de la rue qui mène à la zone refuge. Le traitement statistique de la base de données résultant de la simulation permet une description des temps d'évacuation pour cette configuration d'évacuation spontanée non fléchée. Ainsi, la durée moyenne pour atteindre la zone refuge est d'environ 8 minutes avec un écart-type de près de 4 minutes, et une durée maximale de 25 minutes pour le dernier agent arrivant à la zone refuge.

Dans un second temps, le cas de figure d'une évacuation fléchée sans adaptation des équipements (FSA) est proposé : la même population est contrainte à prendre des itinéraires spécifiques, distribuant les flux piétons sur 2 voies différentes. Les 500 agents situés dans la moitié nord de la plage utilisent la voie d'accès principale, tandis que les 500 autres agents (moitié sud) empruntent une seconde située plus au sud. Après 3 simulations, les statistiques obtenues montrent un gain de temps moyen de 30 secondes par individu en comparaison avec le scénario SSA.

Enfin, une évacuation fléchée avec adaptation des équipements (FAA) est simulée. Il s'agit d'un scénario identique au scénario FSA mais où l'environnement urbain est modifié : on perce le mur longeant la plage et on ajoute des passages piétons (absence de voitures) afin de limiter l'encombrement, permettant ainsi la multiplication des chemins empruntés pour évacuer la plage (Figure 111). La durée moyenne d'évacuation est d'environ 7 minutes, avec un maximum notable de 36 minutes. Le suivi de la simulation permet d'expliquer cette valeur extrême par un cas isolé : un individu de forte corpulence s'est retrouvé bloqué entre deux voitures, et ce lors des trois simulations… Après une centaine d'itérations, le modèle a fini par libérer l'individu.

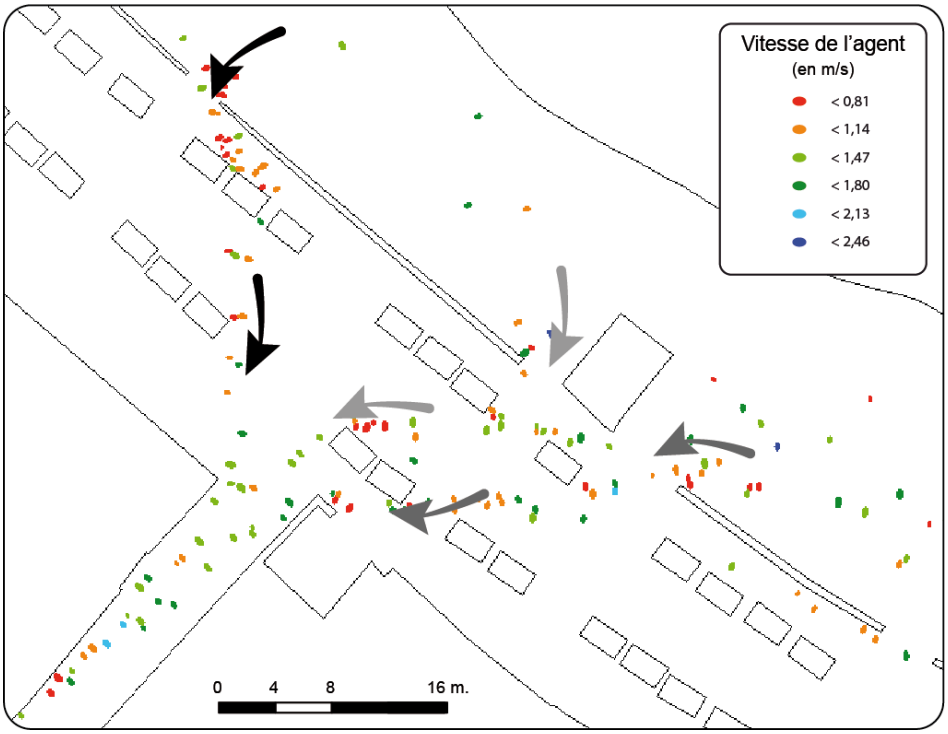


Figure 111. Multiplication des voies d'évacuation par segmentation du muret de bord de plage.

En comparant les durées d'évacuation moyennes des trois scénarios (Tableau 25), on constate un gain moyen de près d'une minute du temps d'évacuation pour chaque individu, soit d'environ 13,5 % (1,08*100/7,99) entre un scénario sans signalisation et sans aménagements et un scénario avec ces deux améliorations. Un gain de 13% ou d'une minute est considérable dans un contexte d'évacuation. Une minute de marche à 1,2 m. par seconde représente plus de 70 mètres parcourus. Cette minute gagnée peut donc faire la différence pour un individu qui dans un cas se trouverait emporté par le flux, dans l'autre distant d'une centaine de mètres du phénomène.

Tableau 25. Comparatif des durées d'évacuation moyennes en minutes pour les 3 scénarios.

	SSA	FSA	FAA	Gain de FAA à SSA
Moyenne	7,99	7,29	6,91	1,08
Médiane	7,05	6,23	6,19	0,86
Ecart-Type	3,95	4,30	3,78	0,17
Max	25,07	31,49	36,71	-11,64
Min	0,33	0,29	0,19	0,14

On constate une augmentation des temps d'évacuation maximaux à mesure que la simulation se complexifie. Plus les choix des agents sont complexes pour le simulateur et plus les agents les plus lents ou les plus handicapés se trouvent retardés. On constate ainsi la perte de 11 minutes en moyenne dans le temps d'évacuation des individus les plus lents pour chaque scénario entre les simulations SSA et les simulations FAA.

Conclusion du chapitre

L'aléa tsunami sur les côtes méditerranéennes françaises apparaît historiquement de faible amplitude. Les escarpements du plateau continental laissent toutefois entrevoir la possibilité de glissements pouvant générer des tsunamis. Le cas de 1979 reste exceptionnel dans la mesure où son origine est vraisemblablement anthropique. De tels événements ne peuvent pour autant être écartés dans la prise en compte des risques de tsunami sur ces littoraux.

Les populations présentes sur la côte d'azur apparaissent par ailleurs fortement vulnérables compte tenu des densités de populations présentes sur les plages en saison estivale et de l'absence d'information et de prévention de ce risque.

La modélisation des temps d'évacuation à La Salis a permis de comparer les résultats fournis par les macro- et micro-simulateurs (5 à 8 minutes selon ERT et jusqu'à près de 30 minutes avec SimWalk). Elle illustre bien les limites du macro-simulateur pour fournir des temps d'évacuation dans un contexte de rues étroites : l'engorgement des voies apparaît comme un élément essentiel que seuls les micro-simulateurs de type SMA peuvent mettre en évidence. Il a ainsi été possible de quantifier les gains que peuvent apporter le fléchage de voies d'évacuations, quitte à augmenter les distances à parcourir, ainsi que l'adaptation des équipements urbains en termes de temps de mise en sureté des populations. Seule une zone refuge a été testée, mais de tels outils permettraient d'optimiser la localisation de zones refuge dans des espaces plus étendus.

Partie 3. Discussions et recommandations

Cette partie discute de l'applicabilité de la démarche et des limites propres à chacune des méthodes et indicateurs utilisés. Elle propose des pistes d'amélioration de la connaissance des indicateurs les plus incertains ou les plus importants dans la mise en œuvre des méthodes adoptées.

Enfin, cette dernière partie soumet un ensemble de recommandations issues de l'expérience acquise pendant ce travail de thèse en vue d'une amélioration de la préparation des collectivités françaises au risque tsunami.

Chapitre 6e. Limites des méthodes de l'évaluation intégrée et perspectives d'amélioration

Ce chapitre discute de la capacité d'application de la démarche proposée ainsi que des limites propres à chacune de ses étapes de mise en œuvre. Il discute du degré d'incertitude des différentes variables, et propose des pistes d'amélioration de leur évaluation ou de leur prise en compte.

6.1 Limites de l'application de l'approche globale

La démarche intégrée n'a pas pu être appliquée de manière complète sur l'ensemble des sites étudiés (Tableau 26). L'évaluation de l'aléa nécessite un recul historique important qui manque dans les îles de l'Océan Indien. Toutefois, les connaissances apportées en la matière permettent une comparaison de l'historique récent de l'aléa dans la plupart des collectivités françaises (cf. Annexe 7, p. XXXVII).

Tableau 26. Etapes de la démarche mises en œuvre sur les 3 sites d'étude.

	Chap. 3. Mayotte	Chap. 4. La Réunion	Chap. 5. Antibes
Evaluation historique de l'aléa	/	/	X
Modélisation de la submersion		X	X
Quantification des enjeux	X	X	X
Interactions enjeux/aléa		X	
Evaluation des temps d'évacuation	/	/	X
			X : complète ; / : partielle.

La qualité des données disponibles n'a pas toujours permis une modélisation fine de l'aléa. Ainsi, la démarche n'a pas pu aboutir à Mayotte, du moins en ce qui concerne les impacts potentiels d'une submersion. Seul le tsunami de 1979 à Antibes a pu être modélisé et validé par des mesures de terrain, mais aucune donnée de vitesses maximales atteintes n'a pu nous être fournie. Concernant le tsunami de 1833 à Saint-Paul, aucune observation ou trace de submersion n'a pu être trouvée.

L'évaluation des enjeux et de leurs vulnérabilités, qui a pu être faite sur l'ensemble des sites d'étude, a démontré la capacité d'adaptation aux contextes locaux des outils nécessaires à son entreprise. Les interactions entre enjeux et aléa n'ont pu être étudiés qu'à Saint-Paul, seule ville pour laquelle l'ensemble des données issues de la modélisation de l'aléa étaient disponibles. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence les secteurs les plus à risque, tant du point de vue humain que structurel, validant ainsi la capacité d'intégration de la méthode.

Enfin, l'évaluation des temps d'évacuation a été en partie menée à bien, notamment pour différents scénarios de zones refuge à Saint-Paul. Seul le site de La Salis à Antibes a pu bénéficier de l'apport des deux approches (macro- et micro-simulateurs), illustrant leur complémentarité.

6.2 Evaluations préliminaires : limites et pistes d'amélioration

Le Tableau 27 synthétise les limites de la connaissance des variables utilisées pour les évaluations préliminaires nécessaire. Sont développées dans le texte les variables considérées comme « clés », indispensables et pour lesquels des améliorations sont possibles.

Tableau 27. Synthèse des incertitudes liées aux évaluations préliminaires nécessaires en vue de l'établissement d'un scénario de risque.

	Etape	Thématique	Variable	Incertitudes	Niveau d'incertitude	Amélioration possible
Evaluation préliminaire	1.1 Aléa	Sources d'information	Témoins	Nombre et précision des témoignages.	Neutre	**Enquête de terrain aussitôt après l'événement.**
			Archives écrites	Disponibilité de l'information (accessibilité des archives), état de conservation.	Elevé	**Etude dans les plus brefs délais des archives des littoraux non encore étudiés.**
			Sédimentologie	État de conservation des dépôts anciens.	Elevé	**Expertises sédimentologiques lors de grands travaux d'aménagement : partenariat avec les services de l'État (DEAL) pour intervenir sur site lors des forages prospectifs.**
			Marégraphes	Représentativité des zones lieux d'amplification : souvent placés en zone abritée.	Elevé	**Installation de marégraphes dans les secteurs d'amplification et à forts enjeux, dans des bassins non protégés.**
		Effets à la côte	Effets hydrauliques	Manque de précision.	Neutre	**Diffusion de fiches d'observation dans les ports et dans les mairies.**
			Submersion			
			Amplitudes			
			Dommages	Manque de RETEX.	Neutre	**Accès aux déclarations de sinistres auprès des compagnies d'assurance.**
		Périodicité	Régions sources	Manque de recul historique.	Elevé	**Prospection sédimentologique sur l'ensemble des littoraux pour quantifier les effets de paléo-tsunamis et dater les événements, modélisation par inversion pour identifier les sources,**
			Intensité			
			Caractérisation des sources			
			Fréquence			
	1.2 Enjeux	Humains	Localisation	Variabilité spatiale, manque d'exhaustivité des scénarios d'enjeux. Variabilité temporelle : diagnostique à un instant t, nécessité de mise à jour par les communes concernées.	Elevé	**Appropriation de l'outil par les collectivités, mise à jour de la base de données lors de nouvelles constructions. Planification de zones refuge lors de l'organisation de manifestations.**
			Nombre			
			Présence			
			Capacité de survie	Variabilité propre à chaque individu. La généralisation entraine une perte de précision.	Neutre	**Intégration de la variabilité qualitative des individus (gabarit et résistance à l'aléa).**
		Matériels	Localisation	Diagnostique figé dans le temps.	Neutre	**Appropriation de l'outil par les collectivités, mise à jour de la base de données lors de nouvelles constructions.**
			Résistance		Faible	
			Valeur économique	Non évaluée	Faible	**Coopération avec des économistes et agents immobiliers ou fisc.**
			Valeur fonctionnelle	Non évaluée	Elevé	**Nécessité d'une approche systémique de l'organisation des territoires ; utilisation de la théorie des graphes pour évaluer les impacts dur les réseaux.**
	1.3 Gestion de crise	Alerte montante	Centres d'alerte	Evaluation aisée : plans publics.	Faible	**Veille sismique locale et création de seuils d'alerte tsunami pour les événements locaux.**
			Délais			
			Capteurs			
			Prévision			
		Alerte descendante	Organisation	Evaluation aisée : plans publics. Lacunes dans les plans d'intervention, manque d'expérience des autorités face au risque tsunami	Faible	**Formation des personnels, exercices de mise en situation, RETEX et mise à jour du plan après chaque événement.**
			Délais			
			Dispo. Spé. ORSEC			
			Capacités			
		Mise en sureté des enjeux	Mesures prévues	Limitées le plus souvent aux enjeux matériels.	Faible	
			Faisabilité	Difficile à évaluer sans exercices ou RETEX.	Elevé	**RETEX systématiques.**
			Acceptabilité	Difficile à évaluer sans exercice « grandeur nature ».	Elevé	**Planification concertée.**
			Préparation	Non évaluée.	Elevé	**Etudes de perception et du risque et évaluation de la préparation des autorités et populations.**

C'est très certainement le **manque de recul historique** qui constitue la limite la plus importante dans l'évaluation de l'aléa. Afin de réduire les incertitudes liées à ce manque de connaissances, des **études sédimentologiques** approfondies doivent être entreprises sur l'ensemble des littoraux étudiés, notamment en utilisant des techniques récentes comme l'Anisotropie de la Susceptibilité Magnétique des sédiments [Wassmer *et al.* 2010]. Pour les événements futurs, il apparaît indispensable de dépêcher une mission d'**évaluation des impacts sur site aussitôt après l'événement**.

Dans le cadre du programme PREPARTOI, des fiches d'observation « temps-réel » ont été diffusées aux autorités portuaires et aux associations de pêcheurs ou d'amodiataires, afin que ces derniers puissent au moment de l'événement quantifier précisément ses effets. Ces fiches, personnalisées pour chaque port, fournissent un plan précis du site et une grille d'analyse permettant au témoin de reporter ses observations (Figure 112).

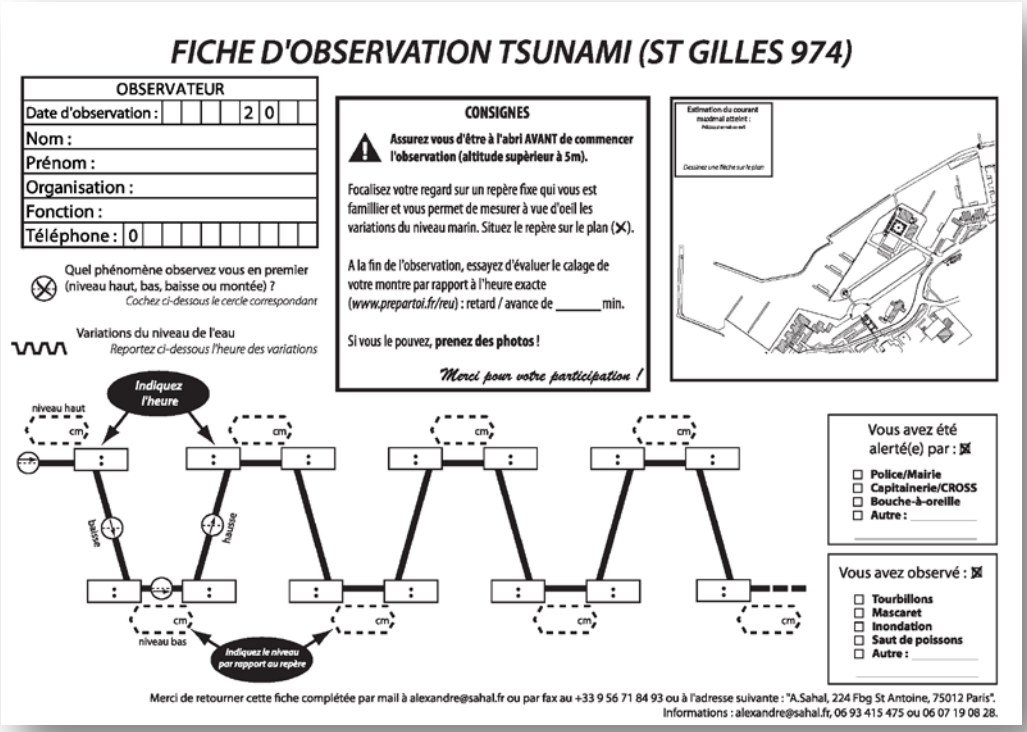


Figure 112. Fiche d'observation pour le port de Saint-Gilles, La Réunion.

Concernant l'évaluation des enjeux, l'approche adoptée nécessite une **mise à jour régulière** de la distribution des individus : construction de nouveaux bâtiments, apparition de nouveaux ERP, etc. On notera toutefois que les agglomérations étudiées présentent un certain niveau de saturation spatiale, qui rend la multiplication des enjeux peu probable. On peut imaginer lors de

rassemblements importants une prise en compte par les autorités locales de l'éventualité d'une évacuation et la planification de zones refuge adaptés. Il s'agit là de questions de sécurité civile ne nécessitant pas d'intervention sur la base de données. Cependant, l'outil développé gagnerait à se voir **approprié par les services techniques des communes** (pour les cas de Saint-Paul et d'Antibes, par exemple), ou par la sécurité civile elle-même (cas de Petite-Terre) lorsque les autorités municipales ne possèdent pas de service de l'information géographique. D'un point de vue méthodologique, la considération de la physiologie des individus n'est pas ici considérée pour évaluer les pertes humaines potentielles. Les données sont cependant disponibles, et présentent des perspectives d'intégration, notamment dans le cadre de l'utilisation des micro-simulateurs pour les évacuations.

Les **valeurs économiques et fonctionnelles** n'ont pas été évaluées, mais les perspectives sont nombreuses : dans le cadre du programme MAREMOTI, des méthodes de chiffrage des enjeux matériels présents dans les ports sont en cours d'application sur la Côte d'Azur, afin d'évaluer les pertes potentielles. On peut imaginer la réalisation de matrices d'endommagement des embarcations se fondant sur les RETEX décrivant les dommages enregistrés dans les ports lors d'événements passés. Des corrélations entre amplitude du tsunami dans le port et dommages aux embarcations pourraient être recherchées et permettre selon un scénario d'aléa d'évaluer les pertes potentielles d'embarcations. Mais le champ de l'économie est bien plus large, et devrait permettre d'estimer les pertes indirectes, d'ordre **socio-économique** : destruction de biens nécessaires à l'exercice d'activités commerciales, pertes d'emplois consécutives, chute de fréquentation touristique dans des cas extrêmes, etc. Pour ce qui est des enjeux fonctionnels, des approches fondées sur la théorie des graphes peuvent également mettre en évidence les conséquences d'un tsunami sur l'ensemble des **réseaux** routiers, électriques et d'alimentation en eau [Nabaa *et al.* 2011]. Les bases de données concernant les réseaux et leurs débits ont été recueillies pour La Réunion et Mayotte. Le croisement de ces enjeux avec des scénarios d'aléa devrait permettre de mettre en évidence les faiblesses des réseaux et les problèmes qui pourraient être posés en cas de tsunami. Là encore, les perspectives d'évolution et d'enrichissement de la méthode sont nombreuses.

Enfin, concernant l'évaluation des capacités de gestion de crise, les **RETEX** apparaissent comme le meilleur moyen de mettre en évidence les limites des dispositions spécifiques « Tsunami » des plans ORSEC et des PCS lorsqu'ils seront réalisés. Ces dispositions sont généralement récentes et le recul sur leur efficacité (faisabilité, acceptabilité) est aujourd'hui insuffisant.

6.3 Choix de scénarios : limites et pistes d'amélioration

Le Tableau 28 présente les incertitudes liées au choix de scénarios ainsi que les améliorations proposées.

Le choix d'un scénario de source sismique est le plus délicat car impossible à déterminer à l'avance. Afin de mettre en place des scénarios d'aléa crédibles, il est indispensable d'évaluer les secteurs pour lesquels on attend des ajustements **sismo-tectoniques** importants. Cette évaluation se borne toutefois à la question de la temporalité de tels ajustements, qui se font sur des siècles, voire des millénaires. Il apparaît donc nécessaire de **multiplier les scénarios possibles** et de préparer au mieux les populations. Cette question est délicate en France compte tenu de la faible amplitude des tsunamis récents. Elle pose le **problème de la préparation au pire** sans « mémoire » d'événements similaires, et donc celui de la **crédibilité des scénarios auprès des autorités comme des populations**.

Le choix d'un site d'étude pour une évaluation fine des enjeux telle que celle proposée dans cette thèse est directement dépendant de la thématique de vulnérabilité choisie : la **vulnérabilité fonctionnelle d'un espace insulaire** tient essentiellement dans son réseau routier et à l'accessibilité des zones sinistrées. Elle doit se voir étudiée à l'échelle de l'ensemble de l'île (du moins pour les îles au réseau routier peu dense). De telles évaluations sont en cours concernant le programme PREPARTOI, notamment à Mayotte. Les enjeux socio-économiques parfois vitaux que constituent les ports des espaces insulaires, interfaces d'importation de produits alimentaires entre autres, doivent être évalués de manière plus spécifique. La méthode proposée s'intéresse plus particulièrement aux enjeux humains à court terme, c'est-à-dire à l'**impact direct du phénomène**. Outre l'élargissement de l'échelle spatiale parfois nécessaire, on peut également envisager une extension de l'échelle temporelle de l'étude, s'intéressant aux conséquences indirectes et à la résilience des sociétés. Pour ce qui est du choix d'un horaire d'impact, la démarche proposée s'intéresse aux pics de fréquentation des espaces en jeu. Elle fournit des scénarios de nuit (SC1), scénarios présentant une probabilité importante (quotidien, 8/24 heures, soit une chance sur 3 de se produire) et des scénarios de type jour ouvrés (SC2). Ces différents scénarios apparaissent complémentaires. N'ont été développés à titre d'exemple que les scénarios SC3 à Mayotte et à La Réunion, mais **la méthode doit encore être appliquée aux autres scénarios, moins pessimistes**.

Concernant les scénarios de gestion de crise, il est apparu que **l'existence d'un plan de secours ne suffit pas : celui-ci doit être correctement mis en place et appliqué** à la lettre. Cela n'a pas toujours été le cas, notamment lors de l'événement d'octobre 2010 à La Réunion (cf. Annexe 4, p. XXV). Aussi

des scénarios de gestion de crise qui suivent le PSS ont été choisis pour le cas de Saint-Paul à La Réunion (cf. 4.3, p. 155).

Tableau 28. Synthèse des incertitudes liées au choix de scénarios.

Etape		Thématique	Variable	Incertitudes	Niveau d'incertitude	Amélioration possible
Choix de scénarios	2.1 Scénario d'aléa	Source, déclenchement	Horaire	Arbitraire, choisi en fonction des enjeux.	Elevé	**Approche par cumul de différents scénarios pour mettre en évidence les secteurs les plus affectés, quelque soit la source.**
			Localisation	Scénario d'un aléa passé, sans étude sismo-tectonique (approche passéiste et non probabiliste.	Elevé	**Etudes sismo-tectoniques complètes et à jour des zones sources potentielles.**
			Azimut			
			Magnitude			
		Propagation	Vitesse	OK.	Faible	
			Axe d'énergie max.	Dépendant du choix de la source.	Elevé	**Etudes sismo-tectoniques complètes et à jour des zones sources potentielles.**
		Submersion côtière	Horaire	Arbitraire, dépendant du scénario d'enjeux.	Elevé	**Multiplication des scénarios d'enjeux.**
			Limites	Dépendante de la rugosité et de la capacité du modèle à la considérer convenablement.	Neutre	**Amélioration du code CEA/DASE (rugosité de fond et des surfaces émergées), utilisation d'un modèle plus robuste.**
			Hauteurs, vitesses			
			Temporalité			
	2.2 Scénario d'enjeux	Site	Topographie	OK.	Faible	
			Historique de l'aléa	Incertitudes liées à l'évaluation préliminaire.	Elevé	**Cf. Tableau 27.**
			Représentativité	Seules les agglomérations sont considérées, car approche focalisée sur l'homme au détriment des enjeux économiques ou stratégiques.	Neutre	**Extension de l'évaluation du taux de destruction des bâtiments aux zone moins peuplées mais plus stratégiques d'un point de vue fonctionnel (routes, ports, etc.).**
			Enjeux	Evolution spatio-temporelle des enjeux, valable à un instant *t*.	Neutre	**Généralisation de la méthode, appropriation par les autorités des bases de données et mises à jour régulières.**
		Horaire d'impact		Variable.	Elevé	**Développement de multiples scénarios de risque en utilisant les scénarios d'enjeux non utilisés (nuit, etc.)**
	2.3 Scénario de gestion de crise	Alerte montante	Aléa détecté	Probabilité d'un séisme lent (tsunami-earthquake).	Neutre	
			Délais prévus	OK : Temps de trajet correctement évalués.	Faible	
			Alerte transmise	OK : TWC efficaces.	Faible	
			Effets estimés	Effets de site non évalués.	Elevé	**Développement de modèles indiquant les effets locaux à la côte prévus pour différents scénarios d'aléa.**
		Alerte descendante	Réception	OK : Veille opérationnelle 24/24, 7/7.	Faible	
			Délais	Manque de RETEX.	Elevé	**RETEX systématiques, également pour le processus de prise de décision (à chaque bulletin ?).**
			Plan d'intervention	Etablis, mais dépendant de capacités.	Neutre	
			Capacités	Manque de RETEX.	Elevé	
		Mise en sureté des enjeux		Non prévue dans la plupart des cas.	Elevé	**Développement de plans d'évacuation avec les collectivités locales.**

6.4 Modélisation de l'aléa et confrontation aux enjeux

On peut reprocher aux travaux réalisés à Saint-Paul de La Réunion une précision excessive de la cartographie des enjeux humains en comparaison avec la modélisation de l'aléa, faite à échelle fine également mais présentant de grandes incertitudes dans les secteurs submergés et dans les paramètres hydrauliques de la submersion modélisée. De manière générale, la modélisation est confrontée a de nombreuses limites : **précision des paramètres de sa source** et donc des propriétés énergétiques et directionnelles du tsunami généré, *shoaling effect* pas toujours bien modélisé du fait de la nom prise en compte de la **friction de fond** et de la **qualité variable des données** bathymétriques, enfin, submersion maximisante dans la mesure où elle n'est pas confrontée à la rugosité des surfaces émergées que peuvent constituer arbres, bâtiments, aménagements, etc. On peut considérer les modèles et codes de propagation et d'inondation des tsunamis comme performants : ils ont a de nombreuses reprises été validés et leurs qualités reconnues, notamment celui utilisé par le CEA/DASE. Mais la qualité des **modélisations** reste **tributaire des données d'entrée**, comme cela a pu être mis en évidence dans le cas de Mayotte.

Il a été choisi de ne pas dégrader la précision cartographique des enjeux humains, mais de tenir compte de l'incertitude liée à la modélisation de l'aléa pour la considération des pertes humaines et structurelles déduites de ces deux composantes, bien qu'il puisse sembler facile de « prendre au mot » des évaluations de pertes humaines potentielles à l'unité près.

Au final, le seul événement pour lequel il est possible de comparer l'aléa observé avec l'aléa modélisé est celui de 1979 à Antibes. D'où l'intérêt de la **délimitation des surfaces submergées le plus tôt possible après l'événement**. Malheureusement, les Hmax et Vmax n'ont pu nous être fournis pour cet événement, empêchant toute confrontation des enjeux humains à l'aléa.

Tableau 29. Synthèse des incertitudes liées à la modélisation de l'aléa et à la confrontation des enjeux à ce dernier.

Etape		Thématique	Variable	Incertitudes	Niveau d'incertitude	Amélioration possible
Modélisation de l'aléa et confrontation aux enjeux	3.1 Modélisation de l'aléa	Choix de modèles	Initiation	Incertitudes liées aux paramètres de la source	Elevé	**Etudes sismo-tectoniques approfondies.**
			Propagation	OK	Faible	
			Submersion	Modèle non destiné à modéliser la submersion	Elevé	**Développement par le CEA/DASE d'un modèle spécifique afin de modéliser la submersion côtière ; utilisation d'un autre modèle que celui du CEA.**
		Entrées	Données tectoniques	Manque de recul historique et d'évaluation sismo-tectonique probabiliste.	Elevé	**Etudes sismo-tectoniques approfondies.**
			Données topographiques	OK	Faible	**Création de bases de données à échelle fine de type Litto3D sur l'ensemble des littoraux français.**
			Données bathymétriques	Non exhaustives spatialement.	Neutre	
			Rugosité	OK	Faible	
		Sorties	Hmax et temps de trajet	Sous-estimés faute de rugosité de fond dans le modèle.	Neutre	
			Hauteurs, vitesses		Elevé	**Prise en compte de la rugosité de fond.**
			Marégrammes synthétiques		Neutre	**Prise en compte de la rugosité de fond pour rendre compte du *shoaling effect*.**
			Limites de la submersion		Elevé	**Prise en compte de la rugosité des surfaces émergées.**
	3.2 Confrontation	Aléa / enjeux	Présence dans la zone d'aléa	Grande variabilité : les modèles d'endommagement (physiques ou humains) restent approximatifs et ne peuvent tenir compte de la variabilité intrinsèque propre à chaque individu ou bâtiment.	Neutre	
			Résistance à la vitesse du flux		Neutre	**Intégration des sciences de l'ingénieur dans l'évaluation de la capacité de résistance des bâtiments ; RETEX sur les blessures subies par les individus en fonction des densités de débris, hauteurs et vitesses des flux. Intégration de la variabilité qualitative des individus (gabarit et résistance à l'aléa).**
			Résistance à la hauteur du flux		Neutre	
			Résistance à la durée de submersion	Inconnue et très variable.	Elevé	
		Enjeux / mise en sureté	Connaissance des zones refuge	Non évaluée, considérée comme acquise.	Elevé	**Les zones refuge n'ont pas été définies, par conséquence personne ne les connait. L'évaluation de ces connaissances nécessiterait un affichage sur le littoral ainsi que des exercices d'évacuation.**
			Connaissance des voies d'évacuation		Elevé	
			Réactivité à l'alerte	Considérée comme immédiate.	Elevé	**Nécessité d'études comportementales et de perception.**
			Délais suffisants pour la mise à l'abri	Facteur limitant les dégâts mais pas l'évaluation de ceux-ci.	Elevé	**Utilisation de micro-simulateurs.**

6.5 Modélisation des évacuations

La vulnérabilité physique des populations a été prise en compte avec le SMA SimWalk. En revanche, les **facteurs d'ordre psychosociologiques** tels que les effets du stress [Fahy et Proulx 2001], de la panique [Helbing *et al.* 2000 ; Kirchner et Schadschneider 2002] ou de la prise de risque [Tang et Ren 2008] ne l'ont pas été. Le **temps de marche** n'est pas non plus pris en compte dans la vitesse déplacement de l'individu. Or, cette vitesse dépend de la distance à parcourir : un rythme soutenu de marche ne peut être conservé sur une grande distance par tous les individus.

Les **déplacements** des agents sont **rationnels** dans la simulation : ces derniers empruntent les voies les plus directes, sans être influencés par la topographie ou le type de substrat, paramètres pris en compte par *Evacuation Route Tools*. SimWalk propose de définir des secteurs de ralentissement assimilables au coût de franchissement des pixels d'ERT. Il pourrait ainsi être envisagé de faire varier la vitesse des individus selon qu'ils circulent sur le sable ou la route dans SimWalk. Il s'agirait là d'une piste de combinaison des deux approches, permettant des gains de précision dans la simulation des évacuations.

Par ailleurs, SimWalk a été développé pour des évacuations de bâtiments ou d'espaces clos tels que halls de gares ou couloirs de métro. Le **calage de ce modèle** dans un contexte d'évacuations dans des espaces de plein air est envisagé à Mayotte. Dans le cadre du programme PREPARTOI, un RETEX de l'évacuation spontanée (non encadrée) du 26 décembre 2004 a été réalisé. Il porte sur la perception du risque par les populations de Petite-Terre, et fournit une cartographie des voies d'évacuation empruntées par chaque individu interrogé. Ces derniers ont également été mis à contribution pour cartographier les voies qu'ils emprunteraient en cas de nouvelle évacuation, qu'ils soient sur leur lieu de travail ou à leur domicile au moment de l'alerte. Une comparaison des modélisations sur SimWalk et de ces évacuations réelles sera faite, et devrait permettre de mieux paramétrer ce micro-simulateur.

Les scénarios d'évacuation ne nécessitent pas une modélisation de l'aléa, uniquement des études de fréquentation et l'identification de zones refuge. Aussi ils **peuvent être élaborés et simulés à l'avance**, indépendamment des modélisations de tsunamis.

Conclusion du chapitre

De nombreuses incertitudes apparaissent dans la démarche, et ce à chaque étape de sa mise en œuvre. Chaque variable prise en compte possède ses limites. De nombreuses pistes d'amélioration ont toutefois été proposées pour ces variables et devraient permettre dans un avenir très proche d'améliorer la démarche dans son ensemble.

Concernant l'aléa et sa modélisation, c'est le manque de recul historique qui apparait le plus dommageable à la démarche. Aussi, l'évaluation des impacts de tsunamis futurs aussitôt après leur occurrence apparait comme la meilleure solution pour enrichir les catalogues d'événements. Elle peut être complétée par des fiches descriptives remplies par les témoins au moment de l'observation. Pour ce qui est de la scénarisation de l'aléa, des études sismo-tectoniques permettraient de mieux décrire les paramètres des sources passées et attendues. Il conviendrait par ailleurs de multiplier les scénarios d'aléa. Enfin, le problème de la crédibilité de scénarios maximisants plausibles auprès des autorités et populations a été posé. Ainsi, un travail de sensibilisation des opérationnels est nécessaire pour leur faire prendre conscience de telles éventualités. Ce n'est qu'à cette condition que ces scénarios pourront être intégrés efficacement dans la gestion des crises.

Concernant les enjeux et leurs vulnérabilités, les bases de données gagneraient à se voir appropriées par les collectivités pour devenir pérennes dans leur validité. La question, de l'échelle temporelle de l'évaluation des vulnérabilités a été soulevée, notamment en ce qui concerne vulnérabilités fonctionnelles et territoriales (perte de connectivité des réseaux, accessibilité réduite aux zones sinistrées pour les services de secours, conséquences socio-économiques à moyen et long terme, accès aux ressources de base) exacerbées dans les espaces insulaires. L'étude de ces vulnérabilités est en cours sur certains sites et devrait apporter des réponses.

Concernant la gestion de crise et la modélisation des évacuations, les RETEX apparaissent comme le meilleur moyen de mesurer la vulnérabilité institutionnelle des collectivités exposées. La modélisation des évacuations a montré ses limites en termes d'excès de rationalité des agents. La prise en compte de l'irrationalité des individus et le calage du modèle sont prévus et devraient permettre un meilleur paramétrage de SimWalk.

Chapitre 7e. Recommandations générales pour une meilleure préparation face au risque tsunami en France

Au terme des travaux et réflexions engagés dans cette thèse il est possible de formuler un certain nombre de recommandations destinées aux intervenants de la gestion du risque tsunami. Ces propositions s'appuient essentiellement sur les résultats du RETEX sur l'événement du 25 octobre 2010 à La Réunion [Sahal et Morin sous presse]. Elles sont également fondées sur des observations directes ou RETEX réalisés sur d'autres territoires étudiés. Elles sont par conséquent applicables à l'ensemble des collectivités françaises.

Ces recommandations visant à améliorer l'efficacité de la gestion de crise reposent sur un enrichissement de la planification, de la surveillance scientifique et de l'alerte, sur la formation des opérationnels ainsi que sur la préparation des populations.

7.1 La prise en compte des tsunamis d'origines locales et volcaniques dans les dispositions spécifiques « Tsunami » des plans ORSEC

A l'heure actuelle, peu de dispositions spécifiques « tsunami » sont prévues dans les plans ORSEC concernant les risques de tsunamis associés aux sources locales ou aux sources distales de type volcanique (type 1883 dans l'Océan Indien). Ces cas de figure, et plus particulièrement celui des sources locales, rendent la gestion de crise « ingérable » selon certains opérationnels dans la mesure où les temps de réponse des autorités sont généralement insuffisants pour entreprendre des mesures de sauvegarde.

Dans le cas de tsunamis d'origines locales, un séisme est la plupart du temps ressenti par les populations côtières et doit être considéré comme un signal d'alerte d'un potentiel danger imminent. Ce fut le cas en Nouvelle-Calédonie en 1875 (cf. Annexe 1, p. III) : un fort séisme a été ressenti par les populations de Lifou ; 20 minutes plus tard, un tsunami tuait 25 personnes dont 15 enfants dans la tribu de Mou. Les habitants s'étaient réinstallés dans leurs cases aussitôt après la fin du séisme. Pour faire face à ce type de danger immédiat, certaines collectivités françaises comme la Nouvelle-Calédonie se sont équipées de systèmes d'alerte par sirènes déclenchables localement par les habitants. Ce type de système d'alerte nécessite toutefois une bonne connaissance du

phénomène et de ses signes précurseurs par les populations : séisme de forte magnitude, retrait de la mer visible ou audible (sifflement des coraux), comportement inhabituel des animaux fuyant à l'intérieur des terres. Avec des délais inférieurs à 20 minutes entre signes précurseurs perçus localement et submersion par un tsunami, la gestion de crise par les autorités apparaît effectivement « ingérable » pour prévenir les populations à temps. Dans de tels cas de figure, seule l'information des populations apparaît comme une mesure adéquate, et par conséquent indispensable pour réduire les risques.

Les sources volcaniques distales, en revanche, peuvent faire l'objet d'une évaluation grâce aux marégraphes et tsunamimètres installés en mer.

7.2 La mise en place de marégraphes temps « réel » dans des sites adaptés

Parmi les perspectives d'évolution des systèmes d'alerte on peut évoquer la modernisation en cours du réseau de marégraphes répartis dans les différents bassins (Figure 113). La transmission de relevés marégraphiques dans des délais supérieurs à la demi-heure rend l'observation de l'importance des tsunamis déclenchés lente, voire inutile lorsque certains territoires comptent sur de telles informations pour adapter leur niveau d'alerte. C'est notamment le cas de certains marégraphes situés en Polynésie Française et dans l'Atlantique nord-est.

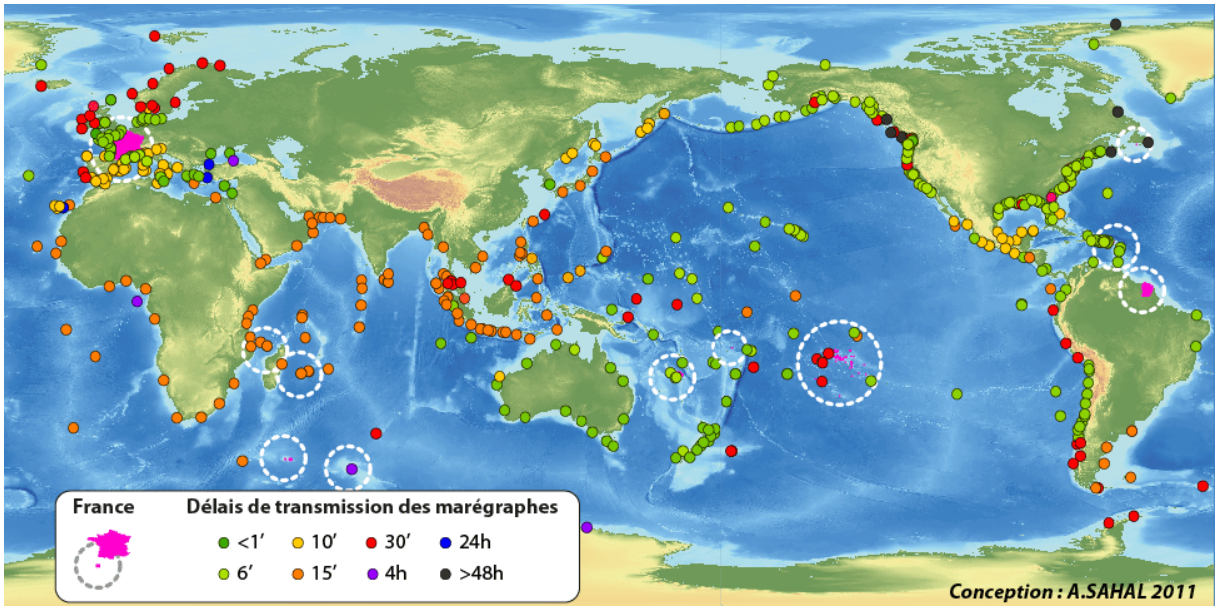


Figure 113. Délais de transmission des relevés marégraphiques vers le réseau SLSMF.

Source : *Sea Level Station Monitoring Facility* (http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/).

Dans le sud-ouest Pacifique, de nouveaux marégraphes ont été implantés, notamment à Hienghène, Ouinné et Lifou en Nouvelle-Calédonie, ou sont en cours d'installation (à Futuna). Les valeurs enregistrées par ces marégraphes sont transmises toutes les 6 minutes via le réseau japonais. D'autres installations sont financées à Maré (Nouvelle-Calédonie, prévu en 2012) et à Wallis (dépendante de l'avancement de travaux portuaires en cours). Enfin des propositions d'installations de marégraphes ont été faites en 2007 pour d'autres sites en Nouvelle-Calédonie (Ouvéa, Touho et Thio) [Musson et Schindelé 2007]et ont été soumises à l'arbitrage de la Délégation Générale à l'Outre-mer (DéGéOM) du Ministère de l'Intérieur. Du côté de la Polynésie Française, des marégraphes ont été implantés à Nuku Hiva, Papeete et Rikitea (équipements appartenant aux Etats-Unis, transmission toutes les 5 minutes), à Hiva Oa (marégraphe CEA, transmission toutes les 15 minutes) et à Tubuai, Rangiroa, Vairoa (sur Tahiti) et Huahine (transmission toutes les heures). D'autres installations sont d'ores et déjà financées à Makemo (Tuamotu) et Rikitea (prévu en principe pour 2012) dans le cadre d'une coopération entre le Laboratoire de Géophysique de Pamatai (LDG-Pamatai), le SHOM et l'Université du Pacifique.

En Méditerranée, au 21 mai 2003, lors de la survenue du tsunami de Boumerdès-Zemmouri, les marégraphes français apparaissaient inadaptés à l'observation précise du passage de tsunamis (cf. 5.1.1.1, p. 167) du fait de leur taux d'échantillonnage insuffisant. Ces marégraphes ont depuis été modernisés, offrant désormais un pas d'échantillonnage d'une minute pour une transmission des données aux réseaux internationaux comme la SLSMF dans des délais compris entre 5 à 10 minutes. Il en est de même pour les marégraphes espagnols et italiens. Cette modernisation offre un réel progrès à la communauté scientifique. Malheureusement, certains marégraphes de la région n'ont toujours pas été connectés à ces réseaux. C'est notamment le cas des marégraphes situés sur la côte nord africaine qui n'apparaissent pas sur la carte du réseau SLSMF. Par ailleurs, dans le cadre du développement du Centre d'alerte aux tsunamis pour l'Atlantique nord-est et la Méditerranée occidentale (CENALT ou NEAMTWC), le SHOM a déjà installé 4 nouvelles stations : 3 en Corse et une à la Figueirette, port le plus touché par le tsunami du 21 mai 2003. La transmission au CENALT se fait ici en temps réel. Enfin, un marégraphe sera installé à Port Ferréol en mars 2012. L'essentiel de ces améliorations récentes a été fait à l'occasion du suivi des recommandations du rapport Courteau [2008]. D'autres projets sont à l'étude, notamment pour installer des tsunamimètres au large de la côte nord-africaine (Figure 114). Ces derniers permettront une meilleure évaluation des effets à attendre sur les côtes françaises lors de prochains événements en provenance de la marge nord-africaine.

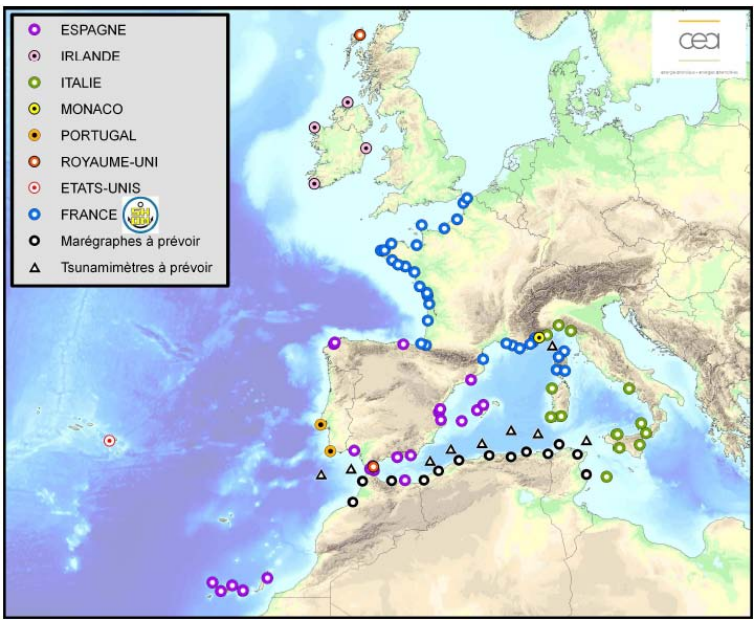


Figure 114. Réseau des stations marégraphiques pour l'Atlantique nord-est et la Méditerranée occidentale. Source : CEA.

7.3 La formation des opérationnels

Une des raisons pour lesquelles le système d'alerte n'a pas fonctionné le 26 octobre 2010 pourrait être liée au fait que la plupart des fonctionnaires rattachés aux responsabilités de sécurité civile ne le sont que pour quelques années, avant d'être mutés à d'autres fonctions [Sahal et Morin sous presse]. La plupart des personnes affectées à la gestion de crise doivent apprendre sur le terrain à gérer celles-ci, sans formation préalable à des risques aussi spécifiques que le risque tsunami. Au-delà de la question de l'information aux populations, c'est donc l'information et la formation de ces personnels qui devrait être inconditionnelle lors de leur prise de fonction.

7.4 La préparation de la mise en sureté des populations

7.4.1 L'alerte des populations

De nombreux outils 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. 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 30 liste les différents types de systèmes de communication, précisant leurs avantages et limites.

Tableau 30. Avantages et limites comparés des systèmes d'alerte aux populations.

Moyen d'alerte	Avantages	Limites
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.
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.	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. Problème de l'alerte de nuit : extinction probable ou mode « vibreur ».
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.
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.
Mosquées (dans les collectivités densément équipées)	Possibilité de messages précis. Couverture de l'ensemble des littoraux occupés dans les territoires à dominante musulmane.	Nécessité d'une coopération des communautés religieuses, éventuellement d'autonomie électrique.
Médias (télévision, radio)	Excellente réactivité, diffusion simultanée, messages précis.	Efficacité entièrement dépendante de l'audience. Problème de l'alerte de nuit.

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.

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) quelque soit leur opérateur. Toutes les populations équipées d'un GSM et présentes dans la zone sont alors informées (*cell broadcast*). La rénovation en cours du réseau d'alerte national français intègre l'usage de ce vecteur d'alerte[25].

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 [UBYRISK Consultants 2011]. 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.

7.4.2 La planification des évacuations

Il a été démontré que l'évacuation peut s'avérer indispensable et que son organisation - ne serait-ce que par fléchage des voies d'évacuation - permet un gain de temps important et donc un accroissement des vies sauvées. Cette responsabilité appartient aux communes qui doivent les intégrer dans leurs PCS.

Pour ce qui est des ports, les autorités portuaires doivent être systématiquement impliquées le plus rapidement possible dans la chaine d'alerte descendante, tout comme les communes pour l'évacuation des plages [Sahal et Morin sous presse].

Des zones refuge doivent être choisies, identifiées et cartographiées aux endroits stratégiques de chaque unité urbaine (principaux carrefours par exemple). Aussi, différents critères de sélection de zones refuge ont été proposés (2.3.3, p. 70). Ces critères devraient permettre aux opérationnels de définir des zones refuge adaptées au risque tsunami. Il pourrait être judicieux de considérer l'utilisation de ces refuges pour d'autres aléas (cyclones, séismes, inondations, etc.) et donc de les choisir ou de les construire selon des critères de mise à l'abri communs ou compatibles avec

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

l'ensemble de ces aléas. Les zones refuge doivent être implantées ou choisies en fonction de l'**étendue de la zone submersible** et du **nombre d'individus à abriter** en **minimisant les temps d'accès**. La modélisation numérique des évacuations peut être une solution pour en mesurer l'accessibilité spatiale et temporelle. On peut notamment citer en la matière certains travaux réalisés par le GITEWS (*German Indonesian Tsunami Early Warning System*) en Indonésie, proposant le calcul de temps d'accès à des zones refuge [Strunz *et al.* 2011]. L'essai grandeur nature, sous forme d'exercice, permet par un RETEX d'évaluer les problèmes posés : accessibilité spatiale et temporelle, capacité de « stockage », etc.

Concernant les équipements nécessaires à ces zones refuge, qui sont de l'ordre de la protection civile, le lecteur pourra se référer à Leitmann [2007] qui réalise un RETEX de la réponse à la crise de décembre 2004 en Indonésie et met en relief les besoins en équipements et en biens de première nécessité pour affronter ce type d'événement.

Les **voies d'évacuation** doivent être **fléchées et leur nombre augmenté**, et les **zones exposées mises en évidence par des panneaux de signalisation** triangulaires ISO. C'est le cas notamment à Stromboli, île volcanique de l'archipel des Eoliennes (Italie) : un fléchage permet aux usagers - habitants ou vacanciers - de rejoindre la zone refuge dont ils dépendent, où qu'ils soient sur le littoral (Figure 115).

Figure 115. Signalisation des voies d'évacuation à Stromboli (Italie).

Source : clichés A. Sahal.

Trois types de pancartes sont ainsi implantés, renseignant les piétons sur la nécessité de suivre les fléchages lorsque les sirènes retentissent, à ralentir une fois en zone sécurisée, puis à attendre en zone refuge. L'établissement des PCS est l'occasion pour les collectivités de définir des zones refuge spécifiques tsunami.

En Nouvelle-Calédonie, la sélection de zones refuge en **concertation** avec les populations et les autorités coutumières aboutira bientôt à l'**aménagement complet de zones refuge** et d'abris en hauteur. Une telle démarche doit être adoptée sur tous les littoraux ultra-marins français. Ce type d'**approche participative** pour la réduction des risques (CBDM, *Community Based Disaster Managment*) se révèle être des plus efficaces dans la mesure où les populations s'approprient les

décisions prises en concertation [Gaillard et Maceda 2009 ; Gaillard et Pangilinan 2010] et développent ainsi leur **culture du risque**. Les approches « communautaires » sont ainsi de plus en plus adoptées par les grands organismes de réduction des risques [UNCRD 2004]. Cette approche est parfois appelée « *bottom-up* » c'est-à-dire des populations vers les l'Etat, en opposition avec les approches « *top-down* » de l'État vers les populations. Elles permettent en outre aux populations de diagnostiquer elles-mêmes leurs enjeux et vulnérabilités et de les réduire.

Enfin, l'évacuation de populations peut représenter un coût économique et social qui limite souvent son recours par les services de sécurité civile. Elle peut nécessiter des indemnisations, être volontaire ou contrainte par les autorités [Rashid et al. 2007].

7.4.3 Les exercices grandeur nature

Les exercices grandeur nature constituent le meilleur moyen de mesurer la faisabilité de mesures d'évacuation, la réactivité des populations et par conséquent leur perception du risque.

On distingue les exercices locaux, organisés par une collectivité territoriale ou locale, impliquant les populations, et les exercices globaux, organisés par les TWS et impliquant l'ensemble des autorités des différentes collectivités d'un bassin. Il est bien évidemment possible de coupler ces deux types d'exercices.

Dans le cas d'exercices locaux, ceux-ci doivent être l'occasion de RETEX complets pour les acteurs impliqués : maires, chefs d'établissements scolaires ou hospitaliers, pompiers, gendarmes, polices et responsables de la sécurité civile doivent tirer des leçons de cette expérience. Tout problème de coordination des différentes autorités ou tout dysfonctionnement doit être mis en avant, solliciter une réflexion aboutissant à une amélioration de l'organisation de la chaine d'alerte, de la répartition des rôles et d'organisation de chacun des acteurs.

Ce type d'exercice permet par ailleurs, au même titre que des essais de sirènes - qui peuvent être couplés à des exercices d'évacuation -, de rappeler aux populations l'existence du risque. Les problèmes concrets liés à une évacuation sont posés aux populations (nécessité d'entraide, d'identification des zones refuge et d'accès à celles-ci), chaque individu devant personnellement faire face aux problèmes qui pourraient se poser en cas d'alerte réelle. Il permet d'une certaine manière à chaque participant d'effectuer son RETEX et de mieux se préparer à une future alerte.

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

7.5.1 Comportement des populations au regard du manque d'information

Lors du RETEX réalisé suite à l'événement des 25-26 octobre 2010 à La Réunion [Sahal et Morin sous presse], 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 et 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, quelque soit le type de crise, rendant la gestion de crise d'autant plus complexe, ou encore d'une **opposition de principe** à se 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 (Figure 116). 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 (cf. Annexe 1, p. III) : à Hienghène, les populations se sont précipitées sur les ponts afin de mieux observer les effets du tsunami remontant *La Hienghène*.

Figure 116. 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.

Source : 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, quittes 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.

7.5.1 S'appuyer sur les réseaux existants pour transmettre l'information aux populations

Les différentes enquêtes de terrain menées dans les collectivités ultra-marines étudiées ont révélé des réactions variées des populations face à l'aléa, notamment en termes de diffusion de l'alerte. A La Réunion, par exemple, 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'efficience organisationnelle des usagers de la mer, professionnels ou non. 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.

7.5.2 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 intéressé 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 [Priest *et al.* 1996 ; Dudley et Lee 1998 ; Prasad *et al.* 2000 ; Aswathanarayana 2005 ; Darienzo *et al.* 2005 ; Dengler 2005 ; Jonientz-Trisler *et al.* 2005 ; Farreras *et al.* 2007 ; Gregg *et al.* 2007 ; Joku *et al.* 2007 ; Satake *et al.* 2007 ; Morin *et al.* 2008 ; Morin *et al.* 2011].

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, mais par des 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 et Dibben 2008]. Des campagnes d'évaluation de la 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 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 de réactions populaires parfois 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 et commerces, 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'Education 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 à 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 spécifiques 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 être formées à la prévention des risques.

Conclusion du chapitre

Face à un aléa non maîtrisable comme les tsunamis, la réduction des vulnérabilités des sociétés apparait essentielle pour épargner des vies humaines.

La **vulnérabilité fonctionnelle** peut être limitée par le développement d'outils de mesure en temps réel des effets des tsunamis à la côte, permettant d'améliorer l'information aux pays concernés lors d'un événement. Une meilleure préparation des opérationnels et une amélioration des plans d'intervention est également indispensable : l'organisation de l'alerte aux populations utilisant tous les moyens existants et la planification de leur mise en sureté en sont les principales composantes. Ces moyens doivent en l'état actuel être améliorés.

Les facteurs socioculturels de la vulnérabilité humaine doivent également être considérés, notamment à travers la **prise en compte de la perception** du risque par les populations. Les **approches participatives** sont une des solutions privilégiées pour éveiller la conscience individuelle et améliorer la préparation collective. Enfin, la communication des autorités vers les populations, qu'elle s'inscrive dans un temps de crise comme dans un contexte préventif, doit être adaptée aux contextes socioculturels spécifiques à chaque territoire, et s'appuyer sur des événements passés ayant eu un impact local.

L'ensemble de ces mesures a été entrepris par de nombreux gouvernements étrangers dans des pays plus exposés à l'aléa tsunami. Les autorités françaises devraient s'inspirer de telles expériences. Mais la mise œuvre et le financement de ces mesures **nécessite une forte volonté politique**. La prise en charge de certains aspects de la prévention du risque par des ONG, bien que celle-ci soit une responsabilité régalienne, est l'illustration d'un manque d'engagement de l'État qui ne peut qu'accroitre les inégalités territoriales face aux risques. Les autorités auraient tout à gagner à s'appuyer sur les réseaux communautaires existants. Elles pourraient ainsi constituer un réseau de référents de terrain expérimentés susceptibles de relayer au mieux leur politique, tout en s'assurant une plus grande coopération des populations. L'engagement doit donc être double : l'investissement concret de moyens mériterait d'être couplé à une évolution de la gestion des risques plus engagée et plus attachée à la compréhension des communautés ciblées.

Conclusion générale

Dans une première partie, cette thèse a permis de dresser un état des connaissances sur le phénomène tsunami, tant dans les caractéristiques hydrodynamiques de cet aléa que dans les processus qui en sont à l'origine. Les moyens mis en œuvre pour le détecter et alerter les responsables de la sécurité civile ont été exposés, tout comme la manière dont ces moyens sont gérés à l'échelle nationale et locale. Les lacunes de la connaissance historique de cet aléa en France ont été soulignées (Chapitre 1). Pour palier le manque d'évaluation du risque, une démarche intégrée par scénarios a été proposée. Celle-ci met en œuvre des méthodes disponibles ou bien développées dans le cadre de cette thèse (Chapitre 2).

Une seconde partie a appliqué cette démarche intégrée sur trois sites à forts enjeux. Ces applications de la démarche ont montré ses potentialités et ses limites d'adaptation à différents contextes d'exposition à l'aléa et à différentes dynamiques de répartition spatiale des enjeux : milieu urbain enclavé en contexte insulaire à Saint-Paul (La Réunion, Chapitre 3), présentant des enjeux humains importants ; milieu aux enjeux hautement stratégiques sur Petite-Terre (Mayotte, Chapitre 4) ; enfin, site méditerranéen à fortes densités touristiques et fortement urbanisé à Antibes (Alpes-Maritimes, Chapitre 5). Ces études de cas ont débouché sur des propositions de mesures d'évacuation adaptées à chaque contexte, après avoir mesuré et cartographié le niveau de risque.

Enfin, une troisième partie a mis en relief les limites d'applicabilité de la démarche et de sa mise en œuvre. Les nombreuses possibilités d'amélioration de l'évaluation des différentes composantes du risque (aléa, enjeux, vulnérabilités et mitigation) ont été discutées. On a pu ainsi dégager de multiples perspectives de recherche fondamentale et appliquée (Chapitre 6). En se fondant sur ces expériences de terrain nourries par les témoignages des populations et des opérationnels, de nombreuses propositions d'amélioration de la préparation des territoires français face au risque tsunami ont été proposées (Chapitre 7).

Globalement, la démarche intégrée a favorisé la création de passerelles entre les différentes modélisations et le travail de terrain réalisé ces dernières années.

L'ensemble des approches sur la connaissance historique de l'aléa (recueil de témoignages, recherches d'archives), combiné à des démarches moins classiques, comme les appels à témoin ou le

démarchage systématique des autorités portuaires, a permis de faire remonter des informations spatialisées sur les effets des tsunamis à la côte auprès de la communauté scientifique. Cette information a en outre permis une meilleure caractérisation des sources de tsunamis passés par leur modélisation par inversion, permettant ainsi aux géophysiciens de bénéficier d'une connaissance plus précise des sources sismiques. Le catalogage des tsunamis ayant affecté chaque territoire a mis en évidence des fréquences et des intensités d'événements plus importantes que celles précédemment admises par la communauté scientifique. On peut citer les exemples de Mayotte, où aucune information concernant les effets du tsunami de décembre 2004 n'était remontée jusqu'aux autorités ou à la communauté scientifique ; de La Réunion, où les effets du tsunami de 1883 semblaient avoir été oubliés ; et enfin d'Antibes, où aucune cartographie de la submersion de 1979 n'avait été faite auparavant. Cette mise en évidence de la récurrence de tsunamis dans la période récente (post 1850) sera très prochainement complétée par les résultats des datations de dépôts de paléo-tsunamis identifiés à Mayotte dans le cadre du programme PREPARTOI. L'analyse détaillée de ces dépôts pourra peut-être permettre l'identification de sources locales jusqu'alors non considérées par les scientifiques.

L'évaluation des enjeux, généralement considérés comme statiques, a été améliorée dans le cadre d'une cartographie dynamique. Développée récemment à El Jadida dans le cadre du programme MAREMOTI (Leone et al., en préparation), cette spatialisation horaire des enjeux (reconstitution de la dynamique urbaine) a ainsi pu être élargie à d'autres territoires et adaptée à des moments forts de la vie d'une communauté (comme le cas du marché de Saint-Paul ou de la prière du vendredi à Mayotte), validant ainsi son adaptabilité.

Par ailleurs, des outils complémentaires comme les SMA ont été utilisés pour affiner l'étude des évacuations en se basant sur les données de fréquentation obtenues. Ces simulations laissent entrevoir de nombreuses perspectives à court terme, en prenant notamment en compte des caractéristiques physiques des individus relevées lors des études de fréquentation (âge, corpulence, etc.). Dans un avenir très proche, la cartographie des évacuations consécutives aux alertes récurrentes depuis 2004 à Mayotte, recueillie selon une approche participative, sera confrontée aux simulations multi-agents. Il sera ainsi possible, toutes proportions gardées, d'ajuster les paramètres des SMA pour coller au mieux à la réalité. Les personnes interrogées à Mayotte ont également cartographié les voies d'évacuation qu'elles pourraient emprunter en cas de nouvelle alerte, qu'elles soient à leur domicile ou sur leur lieu de travail. Le couplage de ces comportements intentionnels avec les SMA devrait poser de nouvelles perspectives de comparaison des voies empruntées par simulation avec celles envisagées par les habitants.

Du point de vue de la recherche appliquée et des retombées opérationnelles, la démarche a mis en évidence les besoins de planification d'évacuations verticales à Saint-Paul de La Réunion, ainsi que certaines lacunes dans les dispositifs spécifiques du plan ORSEC de l'île. À Mayotte, un *workshop* a été organisé dans le cadre de PREPARTOI pour améliorer la coordination entre les différents acteurs de la gestion de crise. Enfin, à Antibes, la modélisation des évacuations a répondu à une forte demande opérationnelle. Cette démarche pourrait ainsi être transposée à d'autres communes littorales méditerranéennes dans le cadre du développement du NEAMTWC.

A l'issue de ce travail de recherche, une étape plus poussée consisterait à l'intégration logicielle d'une modélisation numérique de l'aléa et d'une simulation multi-agent de la mobilité des enjeux humains. A l'issue de cette étape, une étude dynamique de la propagation du tsunami à terre, de la prise en charge des débris par le flot, et de son impact sur une population en fuite serait rendue possible, le tout au sein d'un même outil géomatique dédié à la gestion des territoires. Il sera ainsi possible de faire varier les scénarios de dommages et de pertes en fonction de l'origine du tsunami et de la manière dont la crise est gérée.

Bibliographie

20 MINUTES. *Un mini-tsunami touche l'île de la Réunion* [en ligne], 2010. Document datant du 26.10. 2010, disponible sur http://www.20minutes.fr/article/612731/societe-un-mini-tsunami-touche-ile-reunion, consulté le 26.10. 2010.

ABE, K. Tsunami Resonance Curve from Dominant Periods Observed in Bays of Northeastern Japan. In K. SATAKE. *Tsunamis.* Springer Netherlands, 2005, vol. 23, pp. 97-113.

ACCARY, F. et ROGER, J. Tsunami catalog and vulnerability of Martinique (Lesser Antilles, France). *Science of Tsunami Hazards*, 2010, vol. 29, pp. 148-174.

ALASSET, P.-J., HÉBERT, H., MAOUCHE, S., CALBINI, V. et MEGHRAOUI, M. The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake (Mw=6.9, Algeria): modelling and results. *Geophysical Journal International*, 2006, vol. 166, pp. 213-226.

ANTHONY, E.J. et JULIAN, M. The 1979 Var Delta Landslide on the French Riviera: A Retrospective Analysis. *Journal of Coastal Research*, 1997, vol. 13, pp. 27-35.

ARC. *Standards for Hurricane Evacuation Shelter Selection*. American Red Cross. 2002, vol. 4496, 5 p.

ASSIER-RZADKIEWICZ, S., HEINRICH, P., SABATIER, P.C., SAVOYE, B. et BOURILLET, J.F. Numerical Modelling of a Landslide-generated Tsunami: The 1979 Nice Event. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, vol. 157, pp. 1707-1727.

ASWATHANARAYANA, U. Preparedness and Mitigation Systems for Asian Tsunami-Type Hazards. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2005, vol. 86, n°11, pp. 1-111. DOI: 10.1029/2005EO110003. Disponible en ligne: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2005/2005EO110003.shtml>.

BAPTISTA, M.-A. et MIRANDA, J.M. Revision of the Portuguese catalog of tsunamis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, vol. 9, pp. 25-42.

BARTHOMEUF, B., PARIS, R., GRANCHER, D., WASSMER, P. et VAUTIER, F. Accumulations de blocs par le tsunami du 26 décembre 2004 à Lhok Nga, ouest de Banda Aceh. In F. LAVIGNE et R. PARIS. *Tsunarisque.* Paris, France: Publications de la Sorbonne, 2011, pp. 137-144.

BELLOTTI, G. Transient response of harbours to long waves under resonance conditions. *Coastal Engineering*, 2007, vol. 54, pp. 680-693.

BERKMAN, S.C. et SYMONS, J.M. *Tsunami of May 22, 1960 as recorded at tide stations*. *Coast and Geodetic Survey*. U.S. Dept. of Commerce. 1961, 79 p.

BORERRO, J., ORTIZ, M., TITOV, V.V. et SYNOLAKIS, C.E. Field Survey of Mexican Tsunami Produces New Data, Unusual Photos. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1997, vol. 78, pp. 85, 87-88.

BOUNIF, A., DORBATH, C., AYADI, A., MEGHRAOUI, M., BELDJOUDI, H., LAOUAMI, N., FROGNEUX, M., SLIMANI, A., ALASSET, P.J., KHARROUBI, A., OUSADOU, F., CHIKH, M., HARBI, A., LARBES, S. et MAOUCHE, S. The 21 May 2003 Zemmouri (Algeria) earthquake Mw 6.8: Relocation and aftershock sequence analysis. *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31, n°19, pp. L19606. DOI: 10.1029/2004gl020586. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL020586>.

BOURGEOIS, J., PETROFF, C., YEH, H., TITOV, V., SYNOLAKIS, C.E., BENSON, B., KUROIWA, J., LANDER, J. et NORABUENA, E. Geologic Setting, Field Survey and Modeling of the Chimbote, Northern Peru, Tsunami of 21 February 1996. *Pure and Applied Geophysics*, 1999, vol. 154, n°3, pp. 513-540. DOI: 10.1007/s000240050242. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1007/s000240050242>.

BRUZZI, C. et PRONE, A. Une méthode d'identification sédimentologique des dépôts de tempête et de tsunami: l'exoscopie des quartz, résultats préliminaires. *Quaternaire*, 2000, vol. 11, n°3-4, pp. 167-177.

BURNOD, P. et SOURISSEAU, J.-M. Changement institutionnel et immigration clandestine à Mayotte. *Autrepart*, 2007, vol. 3, n°43, pp. 165-176. DOI: 10.3917/autr.043.0165. Disponible en ligne: <http://www.cairn.info/revue-autrepart-2007-3-page-165.htm>.

CAVALLETTI, A., DALL'OSSO, F., POLO, P., GONELLA, M. et ULAZZI, E. *CRATER: Coastal Risk Analysis of Tsunamis and Environmental Remediation*. Italian Ministry for the Environment Land and Sea Department for Environmental Research and Development. 2007, 40 p.

CHESTER, D.K. The 1755 Lisbon earthquake. *Progress in Physical Geography*, 2001, vol. 25, n°3, pp. 363-383.

CHOI, B.H., PELINOVSKY, E., KIM, K.O. et LEE, J.S. Simulation of the trans-oceanic tsunami propagation due to the 1883 Krakatau volcanic eruption. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, vol. 3, pp. 321-332.

COFFIN, M.F., GAHAGAN, L.M. et LAWVER, L.A. *Present-day Plate Boundary Digital Data Compilation, Technical Report No. 174*. University of Texas, Institute for Geophysics. 1998, 5 p.

COMBESCURE, D., GUEGUEN, P. et LEBRUN, B. *Vulnérabilité sismique du bâti existant: approche d'ensemble*. *Cahiers Techniques*. AFPS. 2005, vol. 25, n°v.2.2, 55 p.

COSANDEY, C. et ROBINSON, M. *Hydrologie continentale*. Paris: Armand Colin, 2000. 360 p. ISBN 2-200-25113-0.

COURTEAU, R. *Rapport sur l'évaluation et la prévention du risque du tsunami sur les côtes françaises en métropole et outre-mer*. Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques. 2008, n°488/117, 168 p.

DARIENZO, M., AYA, A., CRAWFORD, G.L., GIBBS, D., WHITMORE, P.M., WILDE, T. et YANAGI, B.S. Local Tsunami Warning in the Pacific Coastal United States. *Natural Hazards*, 2005, vol. 35, pp. 111-119.

DDE. Rapport de la Direction Départementale de l'Equipement des Alpes-Maritimes du 17 juillet 1981 sur le sinistre du 16.10.79 [non publié]. Direction Départementale de l'Equipement des Alpes-Maritimes. 1981, p.

DDSC. *La conduite du retour d'expérience, éléments techniques et opérationnels*. *Guide méthodologique*. MIAT/DDSC/SDGR/BAPC. 2006, 120 p.

DELOUIS, B., VALLÉE, M., MEGHRAOUI, M., CALAIS, E., MAOUCHE, S., LAMMALI, K., MAHSAS, A., BRIOLE, P., BENHAMOUDA, F. et YELLES, K. Slip distribution of the 2003 Boumerdes-Zemmouri earthquake, Algeria, from teleseismic, GPS, and coastal uplift data. *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31, pp. L18607. DOI: 10.1029/2004GL020687.

DENGLER, L. The Role of Education in the National Tsunami Hazard Mitigation Program. *Natural Hazards*, 2005, vol. 35, pp. 141-153.

DOMINEY-HOWES, D., DUNBAR, P., VARNER, J. et PAPATHOMA-KÖHLE, M. Estimating probable maximum loss from a Cascadia tsunami. *Natural Hazards*, 2009, vol. 53, pp. 43-61.

DOMINEY-HOWES, D. et PAPATHOMA, M. Validating a Tsunami Vulnerability Assessment Model (the PTVA Model) Using Field Data from the 2004 Indian Ocean Tsunami. *Natural Hazards*, 2006, vol. 40, pp. 113-136.

DROUET, F. *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, Laboratoire GRED, UMR 0007, Université Montpellier III, Montpellier, France. Sous la direction de F. LEONE et A. SAHAL. Soutenance: 14/06/2011. 2011, 115 p.

DUDLEY, W.C. et LEE, M. *Tsunami!* Honolulu: University of Hawaï Press, 1998.

DUDLEY, W.C., WHITNEY, R., FAASISILA, J., FONOLUA, S., JOWITT, A. et CHAN-KAU, M. Learning from the victims: New physical and social science information about tsunamis from victims of the September 29, 2009 event in Samoa and American Samoa. *Earth-Science Reviews*, 2011, vol. 107, n°1-2, pp. 201-206. DOI: 10.1016/j.earscirev.2011.03.005. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.03.005>.

DUNBAR, P. *NOAA/WDC Historical Tsunami Database* [en ligne], 2011. Document datant du 01/09/2011, disponible sur http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml, consulté le 01/09/2011.

ESCALES *Escales Méditerranée [Document cartographique] : 2007 / [sous la dir.de Jacques Anglès]*. Edition Les Éd. de Chabassol. Bussy-Saint-Georges, France, 2007. 591+548 p. ISBN 2-904132-01-5.

FAHY, R.F. et PROULX, G. Toward Creating a Database on Delay Times to Start Evacuation and Walking Speeds for Use in Evacuation Modeling, *in* actes du colloque "2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire", Boston, MA, USA. 2001.

FARRERAS, S.F., ORTIZ, M. et GONZALEZ, J.I. Steps Towards the Implementation of a Tsunami Detection, Warning, Mitigation and Preparedness Program for Southwestern Coastal Areas of Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, vol. 164, pp. 605-616.

FAUTRERO, M. *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, Laboratoire GRED, UMR 0007, Université Montpellier III, Montpellier, France. Sous la direction de F. LEONE et A. SAHAL. Soutenance: 2010, 118 p.

FEMA *Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis*. Edition FEMA P646 Redwood City, CA, USA: FEMA/NOAA, 2008. 176 p.

FRIEDLAND, C.J., LEVITAN, M.L. et ADAMS, B.J. Suitability of Remote Sensing Per-Building Damage Assessment of Residential Buildings Subjected to Hurricane Storm Surge, *in* actes du colloque "6th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Applications", 11-12/09/2008, Pavia, Italy. 2008.

FRIMIGACCI, D., KELETAONA, M., MOYSE-FAURIE, C. et VIENNE, B. Histoire de Fatuloli. In PEETERS. *La Tortue au dos moussu : textes de tradition orale de Futuna.* 1995, pp. 334-335/515.

FRITZ, H.M. et KALLIGERIS, N. Ancestral heritage saves tribes during 1 April 2007 Solomon Islands tsunami. *Geophysical Research Letters*, 2008, vol. 35, pp. 1-5.

FRITZ, H.M., MOHAMMED, F. et YOO, J. Lituya Bay Landslide Impact Generated Mega-Tsunami 50th Anniversary. In P.R. CUMMINS, K. SATAKE et L.S.L. KONG. *Tsunami Science Four Years after the 2004 Indian Ocean Tsunami.* Birkhäuser Basel, 2009, pp. 153-175.

FRITZ, H.M. et OKAL, E.A. Socotra Island, Yemen: field survey of the 2004 Indian Ocean tsunami. *Natural Hazards*, 2008, vol. 46, pp. 107-117.

GAILLARD, J.-C. et DIBBEN, C.J.L. Volcanic risk perception and beyond. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, vol. 172, n°3-4, pp. 163-169. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2007.12.015. Disponible en ligne: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027307004258>.

GAILLARD, J.-C. et MACEDA, E.A. Participatory 3-dimensional mapping for disaster risk reduction. *Participatory Learning and Action*, 2009, vol. 60, pp. 109-118.

GAILLARD, J.-C. et PANGILINAN, M.L.C.J.D. Participatory mapping for raising disaster risk awareness among the youth. *Journal of Contingencies and Crisis Management,*, 2010, vol. 18, n°3, pp. 175-179.

GAURAZ, A.L., VALENCIA, N., KOSCIELNY, M., GUILLANDE, R., GARDI, A., LEONE, F. et SALAUN, T. Tsunami damages assessment: vulnerability functions on buildings based on field and earth observation survey, *in* actes du colloque "EGU General Assembly", 2009.

GIPPS, P.G. et MARKSJÖ, B. A Micro-Simulation Model for Pedestrian Flows. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1985, vol. 27, n°2, pp. 95-105.

GOETT, H. *Méthodes de décryptages des archives sédimentaires : recherche de signatures sédimentaires de paleo-tsunami à La Réunion et Mayotte*. Mémoire de Master 2 Géographie Environnementale, Faculté de Géographie et d'aménagement de Strasbourg, Université de Strasbourg, Strasbourg, France. Sous la direction de P. WASSMER. Soutenance: 29/06/2011. 2011, 107 p.

GOFF, J., LAMARCHE, G., PELLETIER, B., CHAGUÉ-GOFF, C. et STROTZ, L. Predecessors to the 2009 South Pacific tsunami in the Wallis and Futuna archipelago. *Earth-Science Reviews*, 2011, vol. 107, n°1-2, pp. 91-106. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.11.003. Disponible en ligne: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V62-51K995M-1/2/689e00181015fbfc6d90d47c1996c3e6>.

GOMEZ, C. et WASSMER, P. A New Insight on the 2004 Boxing Day Tsunami in North Sumatra through the Analysis of Videos of the 2011 Tohoku Tsunami: Preliminary Results, *in* actes du colloque "EGU General Assembly", 3–8/04/2011, Vienna, Austria. 2011.

GONZALEZ, F.I., MILBURN, H.M., BERNARD, E.N. et NEWMAN, J.C. Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART®): Brief Overview and Status Report, *in* actes du colloque "International Workshop on Tsunami Disaster Mitigation", 19-22/01/1998, Tokyo, Japan. 1998. Disponible en ligne: <http://www.ndbc.noaa.gov/dart/brief.shtml>.

GRATTON, Y. Le Krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. *Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique*, 2002, vol. Juin 2002. Disponible en ligne: <http://www.iag.asso.fr/pdf/krigeage_juillet2002.pdf>.

GREGG, C.E., HOUGHTON, B.F., PATON, D., JOHNSTON, D.M., SWANSON, D.A. et YANAGI, B.S. Tsunami Warnings: Understanding in Hawaï. *Natural Hazards*, 2007, vol. 40, pp. 71-87.

HACHIM, S. *Catastrophes naturelles et mémoire collective à Mayotte*. *Mémoire de DEA*. Université Paul Valery Montpellier 3. 2004, 78 p.

HARBITZ, C.B., PEDERSEN, G. et GJEVIK, B. Numerical Simulations of Large Water Waves due to Landslides. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1993, vol. 119, n°12, pp. 1325-1342. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/doi/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:12(1325)>.

HARTNADY, C. Continental slope landslide- and oceanic island volcano-related tsunami potential in the Western Indian Ocean, *in* actes du colloque "East African Rift 2005", 16-18/08/2005, Mbeya, Tanzania. 2005a.

HARTNADY, C. 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*, 2005b, pp. 27-30.

HÉBERT, H., PIATANESI, A., HEINRICH, P., SCHINDELÉ, F. et OKAL, E.A. Numerical modeling of the September 13, 1999 landslide and tsunami on Fatu Hiva Island (French Polynesia). *Geophysical Research Letters*, 2002, vol. 29, n°10, pp. 4. DOI: 10.1029/2001GL013774.

HÉBERT, H., SCHINDELÉ, F., ALTINOK, Y., ALPAR, B. et GAZIOGLU, C. Tsunami hazard in the Marmara Sea (Turkey): a numerical approach to discuss active faulting and impact on the Istanbul coastal areas. *Marine Geology*, 2005, vol. 215, pp. 23-43.

HÉBERT, H., SLADEN, A. et SCHINDELÉ, F. Numerical Modeling of the Great 2004 Indian Ocean Tsunami: Focus on the Mascarene Islands. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, vol. 97, n°1A, pp. S208-S222. DOI: 10.1785/0120050611. Disponible en ligne: <http://www.bssaonline.org/content/97/1A/S208.abstract>.

HECK, N.H. List Of Seismic Sea Waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1947, vol. 37, n°4, pp. 269-286.

HELBING, D., FARKAS, I. et VICSEK, T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 2000, vol. 407, n°6803, pp. 487-490. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1038/35035023>.

HELBING, D. et MOLNÁR, P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 1995, vol. 51, n°5, pp. 4282. Disponible en ligne: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.51.4282>.

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL. *Catálogo de Tsunamis en las Costas Españolas* [en ligne], 2011. Document datant du 16/12/2010, disponible sur http://www.ign.es/ign/resources/sismologia/tsunami/catalogoTsunamis.pdf, consulté le 18/06/2011.

IOUALALEN, M. et PELLETIER, B. *Rapport de fin d'étude sur l'estimation des risques de tsunamis pour les Iles Loyauté, Nouvelle-Calédonie*. IRD, Geosciences Azur. 2007, 14 p.

JOKU, G.N., DAVIES, J.M., JOCELYN, M. et DAVIES, H.L. 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*, 2007, vol. 164, pp. 433-452.

JONIENTZ-TRISLER, C., SIMMONS, R.S., YANAGI, B.S., CRAWFORD, G.L., DARIENZO, M., EISNER, R.K., PETTY, E. et PRIEST, G.R. Planning for tsunami-resilient communities. *Natural Hazards*, 2005, vol. 35, pp. 121-139.

KAABOUBEN, F., BAPTISTA, M.-A., {IBEN BRAHIM}, A., {EL MOURAOUAH}, A. et TOTO, A. On the moroccan tsunami catalogue. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, vol. 9, pp. 1227-1236.

KANAMORI, H. Mechanism of tsunami earthquakes. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 1972, vol. 6, n°5, pp. 346-359. DOI: 10.1016/0031-9201(72)90058-1. Disponible en ligne: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0031920172900581>.

KANAMORI, H., RIVERA, L. et LEE, W.H.K. Historical seismograms for unravelling a mysterious earthquake: The 1907 Sumatra Earthquake. *Geophysical Journal International*, 2010, vol. 183, n°1, pp. 358-374. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04731.x. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04731.x>.

KEATING, B.H. 2006: Status of Tsunami Science Research and Future Directions of Research *Science of Tsunami Hazards*, 2006, vol. 24, n°5, pp. 385-395.

KELFOUN, K., GIACHETTI, T. et LABAZUY, P. Landslide-generated tsunamis at Réunion Island. *Journal of Geophysical Research*, 2010, vol. 115, n°F04012, pp. 1-17. DOI: 10.1029/2009JF001381. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1029/2009JF001381>.

KETCHELL, N., COLE, S.S. et WEBBER, D.M. The EGRESS Codefor human movement and behaviour in emergency evacuation, *in* actes du colloque "International Conference on Engineering for Crowd Safety", London, UK. 1993.

KING, C., LE BISSONAIS, Y., BONN, F., CALOZ, R., HILL, S.J., RASIO, R., BOURGET, M. et CLÉMENT, P. Floodgen : flood risk reduction by spaceborne recognition of indicators of excess runoff generating area, *in* actes du colloque "EARSel - Observing our environment from space. New solutions for a new millenium", Paris, France. 2001.

KIRCHNER, A. et SCHADSCHNEIDER, A. Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its*

Applications, 2002, vol. 312, n°1-2, pp. 260-276. DOI: 10.1016/s0378-4371(02)00857-9. Disponible en ligne: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437102008579>.

KOSHIMURA, S., OIE, T., YANAGISAWA, H. et IMAMURA, F. Developing Fragility Functions For Tsunami Damage Estimation Using Numerical Model And Post-Tsunami Data From Banda Aceh, Indonesia. *Coastal Engineering*, 2009, vol. 51, n°3, pp. 243-273.

LABBÉ, M., DONNADIEU, C., DAUBORD, C. et HÉBERT, H. Refined numerical modeling of the 1979 tsunami in Nice (French Riviera): comparison with coastal data (tide gages, inundation). *Journal of Geophysical Research*, 2010, pp. 1-15.

LAGHI, M., CAVALLETTI, A. et POLO, P. *Evacuation Routes Tools ArcGIS® toolbox, User's Manual*. Bangkok, Thailand: Asian Disaster Preparedness Center, Italian Ministry for the Environment and Territory, 2006. 98 p. Disponible en ligne: <http://www.adpc.net/v2007/Downloads/2007/May/EVACUATION%20ROUTES%20TOOLS%20A5_for_print.pdf>.

LAMARCHE, G., PELLETIER, B. et GOFF, J. Impact of the 29 September 2009 South Pacific tsunami on Wallis and Futuna. *Marine Geology*, 2010, vol. 271, n°3-4, pp. 297-302. DOI: 10.1016/j.margeo.2010.02.012. Disponible en ligne: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6M-4YDKK32-4/2/7acda8e82b50d43f2fc27dda7a8992e1>.

LAMBERT, J. et TERRIER, M. Historical tsunami database for France and its overseas territories. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, vol. 11, n°4, pp. 1037-1046. DOI: 10.5194/nhess-11-1037-2011. Disponible en ligne: <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/1037/2011/>.

LARDY, M. *Quelques remarques à propos du séisme et du tsunami du 17 mai 1995 à Port Vila (29/05/1995)*. ORSTOM. 1995, 5 p.

LAVIGNE, F., PARIS, R., GRANCHER, D., WASSMER, P., BRUNSTEIN, D., VAUTIER, F., LEONE, F., FLOHIC, F., COSTER, B., GUNAWAN, T., GOMEZ, C., SETIAWAN, A., CAHYADI, R. et FACHRIZAL Reconstruction of Tsunami Inland Propagation on December 26, 2004 in Banda Aceh, Indonesia, through Field Investigations. *Pure and Applied Geophysics*, 2009, vol. 166, pp. 259-281.

LEITMANN, J. Cities and Calamities: Learning from Post-Disaster Response in Indonesia. *Journal of Urban Health*, 2007, vol. 84, n°0, pp. 144-153. DOI: 10.1007/s11524-007-9182-6. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1007/s11524-007-9182-6>.

LEMAIRE, B. *Modélisation du tsunami généré par le séisme de Zemmouri (Algérie) de 2003 et des effets de sites observés dans certains ports de la côte d'Azur*. Rapport de Master 2, CEA DIF/DASE/LDG, Université Rennes I, Rennes, France. Sous la direction de H. HÉBERT, J. ROGER et J. BRAUN. Soutenance: 02/09/2008. 2008, 39 p.

LEMONDE.FR, REUTERS et AFP. Funeste "Love Parade" en Allemagne. *LeMonde.fr* du 24/07/2010. Disponible en ligne: <http://www.lemonde.fr/europe/article/2010/07/24/dix-morts-dans-un-mouvement-de-panique-a-duisbourg-en-allemagne_1391947_3214.html>.

LEONE, F. *Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes « naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisque*. Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), Laboratoire

GESTER, Université Paul Valery - Montpellier 3, Montpellier, France. Sous la direction de Soutenance: 2007, 244 p.

LEONE, F., LAVIGNE, F., PARIS, R., DENAIN, J.-C. et VINET, F. A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability. *Applied Geography*, 2011a, vol. 31, pp. 363-375.

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. et MESCHINET DE RICHEMOND, N. 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", 25-26/01/2011, Montpellier, France. 2011b.

LEONE, F., RICHEMOND, N. et VINET, F. *Aléas naturels et gestion des risques* Paris, France: PUF, 2010. 288 p. ISBN 978-2-13-057432-3

LEONE, F. et VINET, F. La vulnérabilité, un concept fondamental au coeur des méthodes d'évaluation des risques naturels. In F. LEONE et F. VINET. *Analyses géographiques - Géorisques.* Montpellier, France: Publications de l'Université Paul-Valéry-Montpellier 3, 2006, vol. 1, pp. 9-25.

LEONE, F., VINET, F., DENAIN, J.-C. et BACHRI, S. L'analyse spatiale des dommages sur le bâti : contribution méthodologique et enseignements pour les futurs scénarios de risque tsunami. In F. LAVIGNE et R. PARIS. *Tsunarisque.* Paris, France: Publications de la Sorbonne, 2011c, pp. 77-98.

LOUAT, R. et BALDASSARI, C. *Chronologie des séismes et des tsunamis ressentis dans la région Vanuatu Nouvelle Calédonie (1729-1989)*. ORSTOM. 1989, 52 p.

MADER, C.L., CURTIS, G.D. et NABESHIMA, G. Modeling tsunami flooding of Hilo, Hawaii, *in* actes du colloque "Fifth Pacific Congress on Marine Science and Technology", 01-05/06/1992, Kona, Hawaii. 1992.

MASTRONUZZI, G. et SANSO, P. Boulders transport by catastrophic waves along the Ionian coast of Apulia (southern Italy). *Marine Geology*, 2000, vol. 170, pp. 93-103.

MEEDDM. *Les risques naturels à La Réunion (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et Logement)* [en ligne], 2011. Document datant du 06.10.2011, disponible sur http://www.risquesnaturels.re/, consulté le 06.10.2011.

MEGHRAOUI, M., MAOUCHE, S., CHEMAA, B., CAKIR, Z., AOUDIA, A., HARB, A., ALASSET, P.-J., AYADI, A., BOUHADAD, Y. et BENHAMOUDA, F. Coastal uplift and thrust faulting associated with the M w = 6.8 Zemmouri (Algeria) earthquake of 21 May, 2003. *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31, pp. 2-5.

MHAMMDI, N., MEDINA, F., KELLETAT, D., AHMAMOU, M.F. et ALOUSSI, L. Large boulders along the rabat coast (Morocco); possible emplacement by the november, 1st, 1755 A.D. tsunami. *Science of Tsunami Hazards*, 2008, vol. 27, n°1, pp. 17-32.

MILLER, D.J. Giant waves in Lituya Bay, Alaska. *U.S. Geological Survey Publication*, 1960, vol. 354-C, pp. 51-86.

MIP. Rapport de la Mission d'Inspection Pluridisciplinaire sur le sinistre survenu le 16.10.1979 sur le littoral des Alpes Maritimes [non publié]. Mission d'Inspection Pluridisciplinaire. 1986, p.

MIURA, H., WIJEYEWICKREMA, A.C. et INOUE, S. Evaluation of Tsunami Damage in the Eastern Part of Sri Lanka Due to the 2004 Sumatra Earthquake Using Remote Sensing Technique, *in* actes du colloque "100th Anniversary Earthquake Conference", San Francisco, CA, USA. 2006.

MONZIER, M., ROBIN, C. et EISSEN, J.-P. Kuwae (~1425 A.D.): the forgotten caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1994, vol. 59, n°3, pp. 207-218. DOI: 10.1016/0377-0273(94)90091-4. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273(94)90091-4>.

MORIN, J., DE COSTER, B., FLOHIC, F., LAVIGNE, F., LE FLOCH, D. et PARIS, R. L'éducation des populations : mesure essentielle pour la réduction du risque de tsunami en Indonésie. In F. LAVIGNE et R. PARIS. *Tsunarisque.* Paris, France: Publications de la Sorbonne, 2011, pp. 271-288.

MORIN, J., DE COSTER, B., PARIS, R., LAVIGNE, F., FLOHIC, F. et LE FLOCH, D. Tsunami-resilient communities' development in Indonesia through educative actions. *Disaster Prevention and Management*, 2008, vol. 17, n°3, pp. 460-446.

MORIN, J., LAVIGNE, F., BACHELERY, P., ZINIZOLA, A. et VILLENEUVE, N. 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*, 2009, vol. 3, n°1, pp. 33-53.

MUSSON, D. et SCHINDELÉ, F. *Compte rendu Mission Nouvelle Calédonie : Musson-Schindelé*. Haut-Commissariat de Nouvelle-Calédonie, SEOM, CNFU. 2007, 32 p.

NABAA, M., BERTELLE, C., DUTOT, A., LIONS, P., MALLET, P. et OLIVIER, D. Analyse multi-échelle de la vulnérabilité des réseaux des systèmes territoriaux, *in* actes du colloque "Fonder les sciences du territoire", 23-25/11/2011, Paris, France. 2011.

NAGEL, K. et SCHRECKENBERG, M. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 1992, vol. 2, n°12, pp. 2221-2229. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1051/jp1:1992277>.

NAKAMURA, M. Source Fault Model of the 1771 Yaeyama Tsunami, Southern Ryukyu Islands, Japan, Inferred from Numerical Simulation. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, vol. 163, pp. 41-54. DOI: 10.1007/s00024-005-0007-9. Disponible en ligne: <http://www.springerlink.com/content/7985j2p4517w18wq/>.

NATAWIDJAJA, D.H., SIEH, K., CHLIEH, M., GALETZKA, J., SUWARGADI, B.W., CHENG, H., EDWARDS, R.L., AVOUAC, J.-P. et WARD, S.N. Source parameters of the great Sumatran megathrust earthquakes of 1797 and 1833 inferred from coral microatolls. *Journal of Geophysical Research*, 2006, vol. 111, n°B6, pp. B06403. DOI: 10.1029/2005jb004025. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1029/2005JB004025>.

NIKOLKINA, I., ZAHIBO, N. et PELINOVSKY, E. Tsunami in Guadeloupe (Caribbean Sea). *The Open Oceanography Journal*, 2010, vol. 4, pp. 44-49. DOI: 10.2174/1874252101004010044. Disponible en ligne: <http://www.benthamscience.com/open/tooceaj/articles/V004/SI0042TOOCEAJ/44TOOCEAJ.htm>.

NILSSON, D., JOHANSSON, M. et FRANTZICH, H. Evacuation experiment in a road tunnel: A study of human behaviour and technical installations. *Fire Safety Journal*, 2009, vol. 44, pp. 458-468.

OKAL, E.A., FRYER, G.J., BORRERO, J.C. et RUSCHER, C. The landslide and local tsunami of 13 September 1999 on Fatu Hiva (Marquesas Islands; French Polynesia). *Bulletin de la Societe Geologique de France*, July 1, 2002 2002a, vol. 173, n°4, pp. 359-367. DOI: 10.2113/173.4.359. Disponible en ligne: <http://bsgf.geoscienceworld.org/cgi/content/abstract/173/4/359>.

OKAL, E.A., SLADEN, A. et OKAL, E. Rodrigues, Mauritius, and Réunion Islands Field Survey after the December 2004 Indian Ocean Tsunami. *Earthquake Spectra*, 2006, vol. 22, n°NS3, pp. S241-S261.

OKAL, E.A., SYNOLAKIS, C.E., FRYER, G.J., HEINRICH, P., BORRERO, J.C., RUSCHER, C., ARCAS, D., GUILLE, G. et ROUSSEAU, D. A Field Survey of the 1946 Aleutian Tsunami in the Far Field. *Seismological Research Letters*, 2002b, vol. 73, pp. 490-503.

OKAZAKI, S. Study of Pedestrian Movement in Architectural Space, Part 1 : Pedestrian Movement by the Application of Magnetic Models. *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, 1979, vol. 283, pp. 111-119.

PAPATHOMA, M. et DOMINEY-HOWES, D. Tsunami vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Corinth, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, vol. 3, n°6, pp. 733-744.

PAPATHOMA, M., DOMINEY-HOWES, D., ZONG, Y. et SMITH, D. Assessing tsunami vulnerability, an example from Heraklion, Crete. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, vol. 3, n°5, pp. 377-389.

PARIS, R., WASSMER, P., SARTOHADI, J. et LAVIGNE, F. Étude sédimentologique des dépôts de tsunami du 26 décembre 2004 à Lhok Nga, ouest de Banda Aceh. In F. LAVIGNE et R. PARIS. *Tsunarisque.* Paris, France: Publications de la Sorbonne, 2011, pp. 111-126.

PELAYO, A.M. et WIENS, D.A. Tsunami Earthquakes: Slow Thrust-Faulting Events in the Accretionary Wedge. *Journal of Geophysical Research*, 1992, vol. 97, n°B11, pp. 15321-15337. DOI: 10.1029/92jb01305. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1029/92JB01305>.

PELECHANO, N. et MALKAWI, A. Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches. *Automation in Construction*, 2008, vol. 17, pp. 377-385.

PELINOVSKY, E., CHOI, B.H., STROMKOV, A., DIDENKULOVA, I. et KIM, H.-S. Analysis of tide-gauge records of the 1883 Krakatau tsunami. In K. SATAKE. *Tsunamis: Case Studies and Recent Developments.* 2005, pp. 57-78.

PELLETIER, B., PERRIER, J., JUFFROY, F., FLAMAND, B., PANCHÉ , J.-Y. et GALLOIS, F. Cartographie systématique par sondeur multifaisceaux des pentes externes du récif barrière de la Grande-Terre et des îles Loyauté, Nouvelle-Calédonie, *in* actes du colloque "Assises de la Recherche Française dans le Pacifique", 24–27/08/2004, Nouméa, New Caledonia. 2004.

PÉTON-KLEIN, D. et CHAIZE, C. Chikungunya : Gestion d'une crise longue. *Gestions Hospitalières*, 2007, vol. 462, pp. 46-52.

PIDD, M., DE SILVA, F.N. et EGLESE, R.W. A simulation model for emergency evacuation. *European Journal Of Operational Research*, 1996, vol. 90, pp. 413-419.

POWER, W., DOWNES, G. et STIRLING, M. Estimation of Tsunami Hazard in New Zealand due to South American Earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, vol. 164, pp. 547-564.

PRASAD, G., RYNN, J. et KALOUMAIRA, A. Tsunami Mitigation for the City of Suva, Fiji *Science of Tsunami Hazards*, 2000, vol. 18, n°1, pp. 35-54.

PRASETYA, G.S. et BORRERO, J.C. Modeling a General Distribution of Suspended Materials and Flotsam Throughout the Affected Regions in Banda Aceh During the 26 December 2004 Tsunami Event, *in* actes du colloque "Indian Ocean Tsunami Modeling Symposium", 12-15 October 2010, Fremantle, Australia. 2010.

PRIEST, G.R., HULL, D.A., VOGT, B.F., KAREL, A. et OLMSTEAD, D.L. Tsunami Risk Reduction: the Oregon Strategy *Science of Tsunami Hazards*, 1996, vol. 14, n°2, pp. 101-106.

PROENZA, X.W. et MAUL, G.A. Tsunami Hazard and Total Risk in the Caribbean Basin. *Science of Tsunami Hazards*, 2010, vol. 29, n°2, pp. 70-77.

RASHID, H., HAIDER, W. et MCNEIL, D. Urban riverbank residents' evaluation of flood evacuation policies in Winnipeg, Manitoba, Canada. *Environmental Hazards*, 2007, vol. 7, pp. 372-382.

REGNIER, M. et CHARVIS, P. Etude de l'aléa sismique à Futuna [non publié]. IRD Nouméa. 2003, 15 p.

REMOND, A., BEAUDOIN, A. et KING, C. SAR imagery to estimate roughness parameters when modeling runoff risk. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, vol. 20, n°13, pp. 2613-2625.

ROBERT, C. *Elaboration d'une méthodologie pour l'étude de fréquentation d'une zone à forte vulnérabilité humaine*. Mémoire de Master 1 GCRN, Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris, France. Sous la direction de F. LAVIGNE, F. GOB et A. SAHAL. Soutenance: 01.07.2011. 2011, 96 p.

ROBIN, C., MONZIER, M. et EISSEN, J.-P. Formation of the mid-fifteenth century Kuwae caldera (Vanuatu) by an initial hydroclastic and subsequent ignimbritic eruption. *Bulletin of Volcanology*, 1994, vol. 56, n°3, pp. 170-183. DOI: 10.1007/bf00279602. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00279602>.

ROGER, J. *Tsunamis générés par des séismes au niveau de la zone de collision entre les plaques africaine et eurasienne : études de cas pour l'évaluation du risque tsunami en Méditerranée occidentale et Atlantique nord*. Thèse de Doctorat, ENS, CEA DAM/DIF, ISEL, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France. Sous la direction de P. BRIOLE, H. HÉBERT et M.-A. BAPTISTA. Soutenance: 11/02/2011. 2011, 347 p.

ROGER, J., ALLGEYER, S., HÉBERT, H., BAPTISTA, M.-A., LOEVENBRUCK, A. et SCHINDELÉ, F. The 1755 Lisbon Tsunami in Guadeloupe Archipelago: Source Sensitivity and Investigation of Resonance Effects. *The Open Oceanography Journal* 2010a, vol. 4, pp. 58-70. Disponible en ligne: <http://www.benthamscience.com/open/tooceaj/articles/V004/SI0042TOOCEAJ/58TOOCEAJ.pdf>.

ROGER, J., BAPTISTA, M.-A., SAHAL, A., ACCARY, F., ALLGEYER, S. et HÉBERT, H. The Transoceanic 1755 Lisbon Tsunami in Martinique, *in* actes du colloque "Pure Appl. Geophys., Proceedings of the International Tsunami Symposium", Novosibirsk, Russia. 2010b.

ROGER, J., BAPTISTA, M.-A., SAHAL, A., ACCARY, F., ALLGEYER, S. et HÉBERT, H. The Transoceanic 1755 Lisbon Tsunami in Martinique. *Pure and Applied Geophysics*, 2011, vol. 168, n°6-7, pp. 1015-1031. DOI: 10.1007/s00024-010-0216-8. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1007/s00024-010-0216-8>.

ROGER, J. et HÉBERT, H. The 1856 Djijelli (Algeria) earthquake and tsunami: source parameters and implications for tsunami hazard in the Balearic Islands. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008, vol. 8, pp. 721-731.

SAHAL, A. Effets des tsunamis en Méditerranée occidentale, Constitution d'une base de données d'observation [non publié]. CEA DIF DASE. 2007, 31 p.

SAHAL, A. Le risque tsunami en Nouvelle-Calédonie et à Wallis-et-Futuna : impacts, perception et mobilisation [non publié]. Secrétariat d'Etat à l'Outre-Mer, Ministère de l'Interieur. 2008, 26 p.

SAHAL, A. Effets des tsunamis historiques sur les côtes Atlantiques françaises [non publié]. Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591. 2009, 14 p.

SAHAL, A., LABBÉ, M., LEMAHIEU, A., DAUBORD, C. et DONNADIEU, C. The 1979 Nice airport tsunami (French Riviera): comparison between field investigations and a refined numerical modelling of the landslide and consecutive tsunami, *in* actes du colloque "Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2011, vol.13", Vienna, Austria, 3–8 April 2011. 2011a.

SAHAL, A. et LEMAHIEU, A. The 1979 Nice airport tsunami: mapping of the flood in Antibes. *Natural Hazards*, 2011, vol. 56, n°3, pp. 833-840. DOI: 10.1007/s11069-010-9594-6. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-010-9594-6>.

SAHAL, A. et MORIN, J. Effects of the October 25th, 2010 Mentawai Tsunami in La Réunion Island (France): Observations and Crisis Management. *Natural Hazards*, sous presse.

SAHAL, A., MORIN, J., LAVIGNE, F. et SCHINDELÉ, F. Indian Ocean transoceanic tsunamis affecting La Réunion Island, France, *in* actes du colloque "Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2011, vol.13", 2011b.

SAHAL, A., MORIN, J., SCHINDELÉ, F. et LAVIGNE, F. A catalog of tsunamis in La Réunion Island from 27 August 1883 to 26 October 2010. *Science of Tsunami Hazards*, 2011c, vol. 30, n°3, pp. 178-189.

SAHAL, A., PELLETIER, B., CHATELIER, J., LAVIGNE, F. et SCHINDELÉ, F. A catalog of tsunamis in New Caledonia from 28 March 1875 to 30 September 2009. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.*, 2010, vol. 342, pp. 434-447. DOI: 10.1016/j.crte.2010.01.013.

SAHAL, A., ROGER, J., ALLGEYER, S., HÉBERT, H., SCHINDELÉ, F. et LAVIGNE, F. The effects of the 2003 Zemmouri tsunami: database of observations in French harbors and influence of resonance effects, *in* actes du colloque "International Tsunami Symposium 2009", Novosibirsk, Russia. 2009a.

SAHAL, A., ROGER, J., ALLGEYER, S., LEMAIRE, B., HÉBERT, H., SCHINDELÉ, F. et LAVIGNE, F. The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdès-Zemmouri (Algeria) earthquake: field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009b, vol. 9, n°6, pp. 1823-1834. DOI: 10.5194/nhess-9-1823-2009. Disponible en ligne: <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/1823/2009/>.

SATAKE, K., NISHIMURA, Y., PUTRA, P., YULIANTO, A., SUNENDAR, H., SUGIMOTO, M., KORESAWA, A., PRADONO, M.H. et PARIATMONO. Tsunami field survey for the Mentawai, Indonesia, earthquake of October 25, 2010. In. Jakarta, Indonesia, 2011, p. 1-23.

SATAKE, K., OKAL, E.A. et BORRERO, J.C. Tsunami and Its Hazard in the Indian and Pacific Oceans: Introduction. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, vol. 164, n°2-3, pp. 249-259.

SCHINDELÉ, F., HÉBERT, H., REYMOND, D. et SLADEN, A. L'aléa tsunami en Polynésie française : synthèse des observations et des mesures. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.*, 2006, vol. 338, pp. 1133-1140.

SEMMANE, F., CAMPILLO, M. et COTTON, F. Fault location and source process of the Boumerdes, Algeria, earthquake inferred from geodetic and strong motion data. *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, n°1, pp. L01305. DOI: 10.1029/2004gl021268. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL021268>.

SHIELDS, T.J., BOYCE, K.E. et MCCONNELL, N. The behaviour and evacuation experiences of WTC 9/11 evacuees with self-designated mobility impairments. *Fire Safety Journal*, 2009, vol. 44, pp. 881-893.

SLADEN, A. et HÉBERT, H. On the use of satellite altimetry to infer the earthquake rupture characteristics: application to the 2004 Sumatra event. *Geophysical Journal International*, 2008, vol. 172, n°2, pp. 707-714. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2007.03669.x. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03669.x>.

SLADEN, A., HÉBERT, H., SCHINDELÉ, F. et REYMOND, D. Evaluation of far-field tsunami hazard in French Polynesia based on historical data and numerical simulations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, vol. 7, pp. 195-206.

SOLOVIEV, S.L. et GO, C.N. *A catalogue of tsunamis on the western shore of the Pacific Ocean*. Edition [Canadian Translation of Fisheries and Aquatic Sciences No. 5077, 1984, translation available from Canada Institute for Scientific and Technical Information, National Research Council, Ottawa, Ontario, Canada K1A OS2, 447 p.]. Moscow: Academy of Sciences of the USSR, Nauka Publishing House, 1974. 439 p.

SOLOVIEV, S.L., GO, C.N. et KIM, K.S. *Catalog of tsunamis in the Pacific 1969-1982*. Moscow, Russia, 1992. 208 p.

SOLOVIEV, S.L., SOLOVIEVA, O.N., GO, C.N., KIM, K.S. et SHCHETNIKOV, N.A. *Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C.-2000 A.D.*, 2000. 260 p. ISBN 978-0-7923-6548-8.

SPENCE, R.J.S., KELMAN, I., CALOGERO, E., TOYOS, G., BAXTER, P.J. et KOMOROWSKI, J.C. Modelling expected physical impacts and human casualties from explosive volcanic eruptions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005, vol. 5, n°6, pp. 1003-1015. DOI: 10.5194/nhess-5-1003-2005. Disponible en ligne: <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/5/1003/2005/>.

SPISKE, M., BÖRÖCZ, Z. et BAHLBURG, H. 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*, 2008, vol. 268, pp. 384-396.

STEIN, M.L. *Interpolation of spatial data: some theory for kriging*. New York: Springer, 1999. XVII-247 p. ISBN 0-387-98629-4 (rel).

STEIN, S. et OKAL, E.A. The 2004 Sumatra earthquake and Indian Ocean tsunami: What happened and why? *Visual Geosciences*, 2005, vol. 10, pp. 21-26.

STEINER, A., PHILIPP, M. et SCHMID, A. Parameter Estimation for a Pedestrian Simulation Model, *in* actes du colloque "7th Swiss Transport Research Conference", Ascona, Switzerland. 2007.

STEWART, M.G. Cyclone damage and temporal changes to building vulnerability and economic risks for residential construction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, vol. 91, n°5, pp. 671-691. DOI: 10.1016/s0167-6105(02)00462-2. Disponible en ligne: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610502004622>.

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. et MUHARI, A. 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. et SHIMADA, T. A human damage prediction method for tsunami disasters incorporating evacuation activities. *Natural Hazards*, 2003, vol. 29, pp. 587-600.

SYNOLAKIS, C.E., IMAMURA, F., TSUJI, Y., MATSUTOMI, S., TINTI, B., COOK, B. et USHMAN, M. Damage Conditions of East Java tsunami of 1994 analyzed. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1995, vol. 76, n°26, pp. 257 and 261-262.

TANG, F. et REN, A. Agent-Based Evacuation Model Incorporating Fire Scene and Building Geometry. *Tsinghua Science & Technology*, 2008, vol. 13, pp. 708-714.

TINTI, S. Computer simulations of tsunamis due to sector collapse at Stromboli, Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2000, vol. 96, pp. 103-128.

TINTI, S., MANUCCI, A., PAGNONI, G., ARMIGLIATO, A. et ZANIBONI, F. The 30 December 2002 landslide-induced tsunamis in Stromboli: sequence of the events reconstructed from the eyewitness accounts. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005, vol. 5, pp. 763-775.

TINTI, S. et MARAMAI, A. Large Tsunamis and Tsunami Hazard from the New Italian Tsunami Catalog. *Physics and Chemistry of The Earth*, 1999, vol. 24, pp. 151-156.

TINTI, S., MARAMAI, A. et GRAZIANI, L. The New Catalogue of Italian Tsunamis. *Natural Hazards*, 2004, vol. 33, pp. 439-465.

TSUJI, Y., IMAMURA, F., MATSUTOMI, H., SYNOLAKIS, C.E., NANANG, P.T., HARADA, S., HAN, S.S., ARAI, K.I. et COOK, B. Field survey of the East Java earthquake and tsunami of June 3, 1994. *Pure and Applied Geophysics*, 1995, vol. 144, pp. 839-854.

UBYRISK CONSULTANTS. Le Japon va se doter d'un système alerte nationale novateur en 2013. *CatNat.net : dernières actualités de la gestion des risques naturels*. 2011.

UNCRD *Sustainable Community Based Disaster Management (CBDM) Practices in Asia, A User's Guide*. Kobe, Japan: United Nations Center for Regional Development, 2004. 147 p.

UNESCO-IOC *Post-Tsunami Survey Field Guide (First Edition)*. Edition UNESCO-IOC. Paris, France, 1998.

UNESCO *Statutes of the Intergovernmental Oceanographic Commission*. Paris, France, 2000. 41 p.

UNESCO. *La réduction des risques de catastrophe commence à l'école*. UNISDR/SIPC. 2007, 25 p.

UNESCO *Tsunami risk assessment and mitigation for the Indian Ocean; knowing your tsunami risk - and what to do about it*. Paris, France, 2009. 82 p.

VITOUSEK, M.J. The tsunami of 22 May 1960 in French Polynesia. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1963, vol. 53, n°6, pp. 1229-1236.

WASSMER, P., SCHNEIDER, J.-L., FONFRÈGNE, A.-V., LAVIGNE, F., PARIS, R. et GOMEZ, C. 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*, 2010, vol. 275, pp. 255-272.

WATIN, M. Polémique, rumeur et Tension : de la « crise » du chikungunya dans l'espace public médiatique réunionnais. In S. FUMA et J. LOW CHONG. *Epidémies et pharmacopée traditionnelle dans l'histoire des iles et pays de l'Océan indien occidental.* L'Harmattan, 2009, pp. 241-251.

WEINSTEIN, S.A. *PTWC Operations, Systems and Procedures Manual*. Edition 1.12. NOAA, 2009. 254 p.

WEISS, R. et WÜNNEMANN, K. Large waves caused by oceanic impacts of meteorites. In A. KUNDU. *Tsunami and Nonlinear Waves.* Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 237-261.

WYBO, J.L. et KOWALSKI, K.M. Command centers and emergency management support. *Safety Science*, 1998, vol. 30, n°1-2, pp. 131-138. DOI: 10.1016/s0925-7535(98)00041-1. Disponible en ligne: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753598000411>.

YELLES, K., LAMMALI, K., MAHSAS, A., CALAIS, E. et BRIOLE, P. Coseismic deformation of the May 21st, 2003, Mw=6.8 Boumerdes earthquake, Algeria, from GPS measurements. *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31, n°13, pp. L13610. DOI: 10.1029/2004gl019884. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL019884>.

ZACHARIASEN, J., SIEH, K., TAYLOR, F.W., EDWARDS, R.L. et HANTORO, W.S. Submergence and uplift associated with the giant 1833 Sumatran subduction earthquake: Evidence from coral microatolls. *Journal of Geophysical Research*, 1999, vol. 104, n°B1, pp. 895-919. DOI: 10.1029/1998jb900050. Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1029/1998JB900050>.

ZAHIBO, N., PELINOVSKY, E., OKAL, E.A., YALÇINER, A.C., KHARIF, C., TALIPOVA, T. et KOZELKOV, A. The earthquake and tsunami of november 21, 2004 at Les Saintes, Guadeloupe, Lesser Antilles. *Science of Tsunami Hazards*, 2005, vol. 23, pp. 25-39.

ZAINUDDIN, Z., THINAKARAN, K. et ABU-SULYMAN, I.M. Simulating the Circumambulation of the Ka'aba using SimWalk. *European Journal of Scientific Research*, 2009, vol. 38, n°3, pp. 454-464.

Table des matières

AVANT PROPOS **1**

SOMMAIRE **7**

INTRODUCTION GENERALE **9**

PARTIE 1. ÉTAT DE L'ART ET CHOIX METHODOLOGIQUES **13**

CHAPITRE 1ER. LES TSUNAMIS DANS LE MONDE ET DANS LES TERRITOIRES FRANÇAIS : DEFINITION DU PHENOMENE ET MOYENS D'ALERTE ET DE REDUCTION DU RISQUE **15**

1.1 L'aléa tsunami *15*

1.1.1 Genèse 15

1.1.1.1 Tsunamis déclenchés par des séismes 18

1.1.1.2 Tsunamis déclenchés par des mouvements de masse d'origines volcaniques ou non 21

1.1.1.3 Tsunamis déclenchés par des chutes de météorites 23

1.1.2 Propagation et mesure des effets à la côte 23

1.1.3 Synthèse de la connaissance historique de l'aléa tsunami en France 24

1.1.3.1 Catalogues publiés 24

1.1.3.2 Catalogues numériques 28

1.2 La gestion du risque tsunami *29*

1.2.1 L'alerte montante : de la détection par les centres d'alerte aux tsunamis (*Tsunami Warning Systems*, TWS) à l'alerte des Etats concernés 29

1.2.1.1 Les systèmes d'alerte aux tsunamis (TWS) 29

1.2.1.2 Détection des tsunamis et seuils d'alerte des TWC 30

1.2.2 L'alerte descendante en France : de la réception de l'alerte par l'État à la mise en sureté des populations concernées 35

Conclusion du chapitre *37*

CHAPITRE 2E. LA NECESSITE D'UNE METHODE D'EVALUATION INTEGREE PAR SCENARIOS DE RISQUES **39**

2.1 Démarche et variables d'un scénario de risque *39*

2.2 Évaluations préliminaires *43*

2.2.1 Évaluation préliminaire de l'aléa 43

2.2.1.1 L'apport des témoignages pour les événements contemporains (depuis 1946) 43

2.2.1.2 L'apport des archives écrites pour les événements récents et contemporains (depuis 1850) 44

2.2.1.3 L'apport des archives sédimentaires pour les événements historiques 45

2.2.1.4 Bilan méthodologique pour l'étude des tsunamis historiques 47

2.2.1.5 Un exemple de campagne de terrain et d'appel à témoin : méthode mise en œuvre en Nouvelle-Calédonie 48

2.2.2 Évaluation préliminaire des enjeux 51

2.2.2.1 Les notions d'enjeu et de vulnérabilité 51

2.2.2.2 Évaluation des enjeux structurels (bâtiments) et de leur vulnérabilité 53
2.2.2.3 L'approche combinée : vulnérabilité physique des bâtiments et pertes humaines associées, et prise en compte des dynamiques spatio-temporelles 54
2.2.2.4 Adaptation de la méthode de Leone et al. à des scénarios d'enjeux dans des contextes locaux spécifiques 55
2.2.3 Évaluation préliminaire de la prévention : l'alerte descendante locale et les capacités de réponse des autorités 58
2.3 Mise en place d'un scénario de risque 59
2.3.1 Choix de scénarios d'aléa et modélisation 59
2.3.2 Choix de scénarios de gestion de crise et prise en compte des évacuations 63
2.3.2.1 Les Macro-simulateurs et leur apport dans la modélisation des voies d'évacuation : l'exemple d'Evacuation Route Tools (ERT) 64
2.3.2.2 Les Micro-simulateurs et leur apport dans la modélisation des comportements humains dans un contexte d'évacuation : l'exemple de SimWalk 66
2.3.3 Critères de sélection de zones refuge 70
2.4 Interaction entre aléa et enjeux 71
2.4.1 Résistance des enjeux structurels face à l'aléa tsunami 71
2.4.2 Capacité de survie des individus et importance de la prise en compte des débris pour une interaction aléa/enjeux. 73
Conclusion du chapitre 77

PARTIE 2. APPLICATION ET RESULTATS DE LA METHODE D'EVALUATION INTEGREE PAR SCENARIO DE RISQUE 79

CHAPITRE 3E. EVALUATION INTEGREE DU RISQUE DE TSUNAMI A MAYOTTE : LE CAS DE PETITE-TERRE 85
3.1 Evaluation et modélisation de l'aléa 85
3.1.1 Historique des tsunamis à Mayotte 85
3.1.1.1 L'unique cas du tsunami transocéanique du 26 décembre 2004 85
3.1.1.2 Synthèse historique de l'aléa : un manque de recul flagrant 88
3.1.2 Comparaison des données historiques avec la modélisation 89
3.2 Evaluation de la vulnérabilité des bâtiments et des enjeux humains 91
3.2.1 Adaptation et application de la méthode 92
3.2.1.1 Vulnérabilité structurelle des bâtiments et fonction des rez-de-chaussée 92
3.2.1.2 Quantification des enjeux humains présents dans les bâtiments 95
3.2.1.3 Description des espaces de plein air et enjeux humains associés 101
3.3 La gestion du risque tsunami à Mayotte 107
3.4 Modélisation des évacuations 108
3.4.1 Sélection de zones refuge et cartographie de leur accessibilité 109
Conclusion du chapitre 113

CHAPITRE 4E. EVALUATION INTEGREE DU RISQUE DE TSUNAMI A LA REUNION : LE CAS DE SAINT-PAUL 115
4.1 Evaluation et modélisation de l'aléa 115

4.1.1 Historique des tsunamis à La Réunion 115
4.1.1.1 Tsunami du 27 août 1883 118
4.1.1.2 Tsunami du 4 janvier 1907 119
4.1.1.3 Tsunami du 26 décembre 2004 120
4.1.1.4 Tsunami du 28 mars 2005 120
4.1.1.5 Tsunami du 17 juillet 2006 121
4.1.1.6 Tsunami du 12 septembre 2007 121
4.1.1.7 Tsunami du 26 octobre 2010 122
4.1.1.8 Synthèse historique 125
4.1.2 Comparaison données historiques et modélisation 126
4.2 Evaluation de la vulnérabilité des bâtiments et des enjeux humains 131
4.2.1 Fonctions des bâtiments et vulnérabilité structurelle 131
4.2.2 Quantification des enjeux humains présents dans les bâtiments 135
4.2.3 Quantification et qualification des enjeux humains présents dans les espaces de plein air et densités de débris 143
4.2.3.1 La prise en compte des débris 154
4.2.4 Choix d'un scénario d'enjeux 155
4.3 Spécificités de la gestion de crise à La Réunion 155
4.4 Résultats du scénario de risque et modélisation des évacuations 157
4.4.1 Endommagement du bâti 157
4.4.2 Pertes humaines potentielles 159
4.4.3 Modélisation des évacuations 162
Conclusion du chapitre 165

CHAPITRE 5E. EVALUATION INTEGREE DU RISQUE DE TSUNAMI EN MEDITERRANEE : LE CAS D'ANTIBES 167

5.1 Évaluation et modélisation de l'aléa 167
5.1.1 Le cas du tsunami régional du 21 mai 2003 167
5.1.1.1 Observations recueillies 167
5.1.1.2 Modélisation et confrontation aux observations 172
5.1.2 Le cas du tsunami local du 16 octobre 1979 177
5.1.2.1 Observations recueillies 177
5.1.2.2 Comparaison des observations avec la modélisation 181
5.2 Evaluation préliminaire des enjeux : la plage de La Salis 182
5.3 Scénarios de risque et modélisation des évacuations 184
5.3.1 Définition d'une zone refuge 184
5.3.2 Etude préliminaire des voies d'évacuation possibles avec Evacuation Route Tools (ERT) 185
5.3.3 Modélisation multi-agents selon différents scénarios de préparation des populations et des équipements urbains : mise en œuvre avec le logiciel SimWalk 188
Conclusion du chapitre 197

PARTIE 3. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS 199

CHAPITRE 6E. LIMITES DES METHODES DE L'EVALUATION INTEGREE ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION 201

6.1 Limites de l'application de l'approche globale 201
6.2 Evaluations préliminaires : limites et pistes d'amélioration 202
6.3 Choix de scénarios : limites et pistes d'amélioration 207
6.4 Modélisation de l'aléa et confrontation aux enjeux 211
6.5 Modélisation des évacuations 215
Conclusion du chapitre 217

CHAPITRE 7E. RECOMMANDATIONS GENERALES POUR UNE MEILLEURE PREPARATION FACE AU RISQUE TSUNAMI EN FRANCE 219

7.1 La prise en compte des tsunamis d'origines locales et volcaniques dans les dispositions spécifiques « Tsunami » des plans ORSEC 219
7.2 La mise en place de marégraphes temps « réel » dans des sites adaptés 220
7.3 La formation des opérationnels 222
7.4 La préparation de la mise en sureté des populations 222
7.4.1 L'alerte des populations 222
7.4.2 La planification des évacuations 224
7.4.3 Les exercices grandeur nature 226
7.5 L'information préventive et l'information de crise des populations 227
7.5.1 Comportement des populations au regard du manque d'information 227
7.5.1 S'appuyer sur les réseaux existants pour transmettre l'information aux populations 228
7.5.2 Informer préventivement les populations 229
Conclusion du chapitre 231

CONCLUSION GENERALE 233

BIBLIOGRAPHIE 237

TABLE DES MATIERES 253

TABLE DES FIGURES 257

TABLE DES TABLEAUX 267

ANNEXES I

Table des figures

Figure 1. Les composantes du risque : aléa, enjeux et vulnérabilités, et déficiences dans la préparation (ou « capacités »). 9

Figure 2. Sources de tsunamis avérés de -2000 à 2011 selon NOAA/NGDC (les sources de tsunamis « douteux » ne sont pas cartographiées, ni les sources de tsunamis n'ayant provoqué qu'une sèche ; en cas d'événements tsunamigènes synchrones, la cause majeure est cartographié). 16

Figure 3. Récurrence annuelle des tsunamis répertoriés depuis -2000 : répartition spatiale des sources et typologie des phénomènes déclenchants. 17

Figure 4. Tsunamis d'origines sismiques avérés de -2000 à 2011 selon NGDC (les sources de tsunamis « douteux » ne sont pas cartographiées, ni les sources de tsunamis n'ayant provoqué qu'une sèche ; en cas d'événements tsunamigènes synchrones, la cause majeure est cartographié). 18

Figure 5. Initiation d'un tsunami d'origine sismique dans un contexte de subduction. 19

Figure 6. Rapport entre magnitude du séisme tsunamigène et hauteurs d'eau mesurées à la côte. .. 20

Figure 7. Glissement de Lituya, consécutif à un séisme de magnitude 8,3 en Alaska. 22

Figure 8. Amplification et ralentissement des tsunamis à la côte (*shoaling effect*). 23

Figure 9. Caractérisation de la submersion marine liée à un tsunami. 24

Figure 10. Frise chronologique des effets des tsunamis identifiés en Guadeloupe et Martinique. 26

Figure 11. Frise chronologique des effets des tsunamis identifiés dans les collectivités françaises du Pacifique. 27

Figure 12. Les 4 TWS de la COI/UNESCO. 30

Figure 13. Les tsunamimètres (*Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis*, DART®). 32

Figure 14. Marégramme illustrant l'enregistrement du tsunami du 26 octobre 2010 par le marégraphe de la Pointe des Galets (La Réunion). 34

Figure 15. Marégramme corrigé de l'enregistrement du tsunami du 26 octobre 2010 par le marégraphe de la Pointe des Galets (La Réunion). 34

Figure 16. Etapes et variables d'une démarche d'évaluation intégrée basée sur des scénarios de risque. 41

Figure 17. 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]. 46

Figure 18. Intervalles de temps couverts par les différentes méthodes d'étude des tsunamis passés.47

Figure 19. Appel à témoins affiché en Nouvelle-Calédonie. 49

Figure 20. Modèle conceptuel du système vulnérable selon Leone [2007]. 51

Figure 21. Typologie de la vulnérabilité structurelle du bâti proposée par Leone *et al.* à Banda Aceh, Indonésie. 53

Figure 22 Déformation initiale utilisée pour la modélisation du tsunami du 26 décembre 2004. 61

Figure 23. Propagation du tsunami du 26 décembre 2004, 1h48 post-séisme et hauteurs d'eau maximales en mer (Hmax)..... 61

Figure 24. Modélisation des comportements humains dans un contexte d'évacuation piétonne : typologie des cas de figure pour l'évacuation d'une pièce selon Helbing *et al.* [2000]..... 67

Figure 25. Configuration des caractéristiques des agents pour la modélisation d'évacuations avec SimWalk. 68

Figure 26. Exemple de zone refuge à usage unique. 70

Figure 27. Corrélation entre niveau de dommage et hauteur d'eau en fonction de la classe structurelle du bâti (courbes de fragilité). 72

Figure 28. Niveaux de dommage des bâtiments. 72

Figure 29. Rapport entre probabilité de dommage (*damage probability*), profondeur d'inondation (*inundation depth*) et vitesse de courant (*current velocity*)..... 73

Figure 30. Limites de déplacements d'individus en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau (contexte d'inondation)..... 74

Figure 31. Localisation des sources sismiques de tsunamis depuis -2000 et contexte tectonique dans l'Océan Indien..... 79

Figure 32. Principaux enjeux à Mayotte..... 81

Figure 33. Principaux enjeux à La Réunion..... 82

Figure 34. Localisation du quartier de La Salis (Antibes, Alpes-Maritimes) et de ses enjeux. Extrait 3D du Système d'Information Géographique constitué pour une évaluation par scénario de risque. 84

Figure 35. Effets du tsunami du 26 décembre 2004 à Mayotte..... 86

Figure 36. Hauteur de submersion atteinte par le tsunami de décembre 2004 à Hamjago, Mayotte. 87

Figure 37. Sites où des dépôts soupçonnés d'avoir été laissés par des tsunamis ont été identifiés à Mayotte..... 89

Figure 38. Grilles utilisées par le CEA/DASE pour la modélisation de l'aléa à Mayotte..... 90

Figure 39. Elévation maximale du niveau de la mer (Hmax) pendant 11h post-séisme, modélisée avec les paramètres de la source du tsunami du 26 décembre 2004..... 91

Figure 40. Typologie de la vulnérabilité structurelle du bâti sur Petite-Terre (Mayotte)..... 92

Figure 41. Vulnérabilité structurelle du bâti sur Petite-Terre (Mayotte)..... 93

Figure 42. Fonction principale du RDC du bâti sur Petite-Terre (Mayotte). 94

Figure 43. Populations présentes dans les bâtiments pour le scénario nocturne (SC1) sur Petite-Terre (Mayotte)..... 98

Figure 44. Populations présentes dans les bâtiments pour le scénario « jour ouvrable à 17h30 » (SC2) sur Petite-Terre (Mayotte). 99

Figure 45. Populations présentes dans les bâtiments pour le scénario « vendredi entre 12h et 12h30 » (SC3) sur Petite-Terre (Mayotte)..... 100

Figure 46. Fonction des espaces de plein air de Petite-Terre (Mayotte)..... 101

Figure 47. Tronçons routiers échantillonnés pour l'évaluation de la fréquentation des routes de Petite-Terre (Mayotte). 102

Figure 48. Densité de population calculée pour les routes de Petite-Terre (Mayotte). 103

Figure 49. Densité de population dans les espaces de plein air de Petite-Terre (Mayotte) pour le scénario SC2. 104

Figure 50. Densité de population dans les espaces de plein air de Petite-Terre (Mayotte) pour le scénario SC3. 105

Figure 51. Densité de débris potentiellement mobilisables dans les espaces de plein air de Petite-Terre (Mayotte). 106

Figure 52. Zones refuge sélectionnées pour Petite-Terre (Mayotte)..... 110

Figure 53. Temps d'accès pédestre aux zones refuge sur Petite-Terre (Mayotte). 111

Figure 54. 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..... 116

Figure 55. 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. 117

Figure 56. Localisation de la source du tsunami du 25.10.2010 et des marégrammes étudiés. 123

Figure 57. Marégrammes 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)..... 123

Figure 58. *Runup* mesurés dans les ports affectés par le tsunami du 26.12.2010 (date en LT). 124

Figure 59. Frise chronologique des effets des tsunamis identifiés à La Réunion..... 125

Figure 60. Rugosité de surface à Saint-Paul (coefficient de Chézy). 127

Figure 61. Grilles utilisées par le CEA/DASE pour la modélisation de l'aléa à La Réunion (en rouge les secteurs d'altitudes inférieurs à 10 m)..... 128

Figure 62. Hauteur maximale atteinte par un tsunami similaire à celui de 1833 à Saint-Paul (La Réunion) durant les 10 heures suivant l'initiation du tsunami. 129

Figure 63. Vitesse maximale du flux pour un tsunami similaire à celui de 1833 à Saint-Paul (La Réunion) durant les 10 heures suivant l'initiation du tsunami. 130

Figure 64. Fonction principale du RDC du bâti à Saint-Paul (La Réunion). 132

Figure 65. Typologie structurelle du bâti à Saint-Paul (La Réunion). 133

Figure 66. Habitat récent (individuel et collectif) construit sur pilotis à Saint-Paul (La Réunion). 133

Figure 67. Vulnérabilité structurelle du bâti à Saint-Paul (La Réunion). 134

Figure 68. Affiche à l'attention des clients du Quai Gilbert les informant de la réalisation d'une étude de fréquentation par photographie. 136

Figure 69. Localisation du Quai Gilbert dans le marché de Saint-Paul (La Réunion) et exemples de clichés (un vendredi). 137

Figure 70. Fréquentation horaire moyenne du Quai Gilbert. 138

Figure 71. Courbes de fréquentation des bars/restaurants adoptées pour les scénarios diurnes (horaire en abscisses, effectif compté en ordonnées). 138

Figure 72. Populations présentes dans les RDC des bâtiments pour le scénario nocturne SC1 à Saint-Paul (La Réunion). 140

Figure 73. Populations présentes dans les RDC des bâtiments pour le scénario SC2 (jour ouvrable 15h) à Saint-Paul (La Réunion). 141

Figure 74. Populations présentes dans les RDC des bâtiments pour le scénario SC3 (vendredi, jour de marché à 10h) à Saint-Paul (La Réunion). 142

Figure 75. Fonction des espaces de plein air de Saint-Paul. 144

Figure 76. Tronçons routiers échantillonnés à Saint-Paul pour le peuplement des trottoirs. 145

Figure 77. Comparatif quantitatif et qualitatif des effectifs comptés pour les deux scénarios diurnes. 147

Figure 78. Localisation du toit utilisé pour la mesure de la densité de population sur le marché de Saint-Paul et exemples de clichés obtenus. 149

Figure 79. Fréquentation humaine dans la zone échantillonnée du marché de Saint-Paul (exemple de la journée du vendredi 21 mai 2010). 150

Figure 80. Densité de population dans les espaces de plein air de Saint-Paul pour le scénario SC2 (jour ouvrable, 15h) à Saint-Paul (La Réunion). 151

Figure 81. 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). 152

Figure 82. 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)..... 153

Figure 83. Densité de débris dans les espaces de plein air de Saint-Paul. 154

Figure 84. Carte permettant aux opérationnels de La Réunion d'identifier la zone source à la lecture des bulletins des TWC. 156

Figure 85. Taux de destruction des bâtiments pour un aléa de type 1833 à Saint-Paul..... 158

Figure 86. 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)..... 160

Figure 87. 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). 161

Figure 88. Temps d'évacuation dans un contexte d'évacuations horizontales à Saint-Paul (La Réunion). 163

Figure 89. Temps d'évacuation dans un contexte d'évacuations horizontales et verticales à Saint-Paul (La Réunion)..... 164

Figure 90. Le tsunami du 21 mai 2003 tel qu'enregistré par les marégraphes (en vert les marégraphes permettant une évaluation fiable de par leur pas d'échantillonnage fin). 168

Figure 91. Localisation en Méditerranée des ports et sémaphores le long des côtes françaises..... 169

Figure 92. Localisation des ports affectés par le tsunami du 21 mai 2003 (en rouge). Sont figurés en rouge les ports n'ayant pas observé de perturbations. 170

Figure 93. Cartographie et bathymétrie des trois ports retenus pour la modélisation (fond de carte Landsat). 172

Figure 94. Hmax calculés durant les 4 heures suivant le séisme tél que décrit par Delouis *et al.* (grille « grd0 ») et zoom sur la côte française affectée. 173

Figure 95. Description des grilles et localisation des capteurs virtuels (A, A1, A2, etc.), utilisés pour la modélisation des effets du tsunami du 21 mai 2003 dans les trois ports étudiés. 175

Figure 96. Hmax pendant les 4 heures suivant le séisme dans la baie de Cannes et dans les trois ports étudiés. 176

Figure 97. Variations du niveau de la mer observées autour de Nice le 16 octobre 1979. 178

Figure 98. Séquence temporelle des variations du niveau de la mer observées à La Salis après l'effondrement du remblai de l'aéroport de Nice le 16 octobre 1979, GMT+1 ; les tirets représentent l'incertitude des niveaux atteints et de la chronologie correspondante. 179

Figure 99. Limites de la submersion marine consécutive à l'effondrement de l'aéroport du Nice du 16 octobre 1979 et hauteurs de *runup* correspondantes dans les quartiers de La Salis et du Ponteil (Antibes). 180

Figure 100. Cliché du quartier du Ponteil (Antibes) submergé le 16 octobre 1979, pris face au nord. 181

Figure 101. Comparaison de la modélisation du tsunami du 16 octobre 1979 avec les limites d'inondations constatées sur lors de l'enquête de terrain. 182

Figure 102. Fréquentation moyenne de la plage de La Salis durant le mois d'août 2010. 183

Figure 103. Submersion dans le quartier de La Salis (Antibes) en 1979 et choix d'une zone refuge horizontale, voie d'accès et surface disponible. 185

Figure 104. Création du Modèle Numérique de Terrain du quartier de La Salis, Antibes. 186

Figure 105. Accessibilité de la zone refuge et exemples de voies d'évacuation optimales selon le macro-simulateur ERT dans le quartier de La Salis (Antibes). 187

Figure 106. Définition des zones de départ et d'arrivée des agents dans un environnement contraignant : aménagements urbains existants et véhicules stationés. 189

Figure 107. Simulation multi-agents dynamique de l'évacuation de la plage de La Salis (1000 agents), sans fléchage des voies d'évacuation ni aménagements. 191

Figure 108. Charge maximale calculée par SimWalk lors de l'évacuation de la plage de la Salis. 193

Figure 109. Densité maximale calculée par SimWalk lors de l'évacuation de la plage de la Salis. 194

Figure 110. Perte de vitesse maximale calculée par SimWalk lors de l'évacuation de la plage de la Salis. 194

Figure 111. Multiplication des voies d'évacuation par segmentation du muret de bord de plage. ... 196

Figure 112. Fiche d'observation pour le port de Saint-Gilles, La Réunion. 205

Figure 113. Délais de transmission des relevés marégraphiques vers le réseau SLSMF. 220

Figure 114. Réseau des stations marégraphiques pour l'Atlantique nord-est et la Méditerranée occidentale. 222

Figure 115. Signalisation des voies d'évacuation à Stromboli (Italie). 225

Figure 116. 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. 228

Figure 117. Localisation des témoins significatifs interrogés en Nouvelle-Calédonie. IV

Figure 118. Localisation des sources des tsunamis ayant eu un impact en Nouvelle-Calédonie. V

Figure 119. Localités de Grande-Terre et d'Ouvéa citées dans le texte. VII

Figure 120. Enregistrement marégraphique des 11 et 12 mars 2011 (UTC) à Nouméa. IX

Figure 121. Approximation des variations du niveau marin le 2 avril 2007 entre 10:30 et 14:00 LT, telles que décrites par les témoins (a : anomalie, b : absence d'anomalie, c : variation pendant env. 2 h., d : marée haute, e : niveau moyen, f : marée basse). XI

Figure 122. Lieux de Lifou affectés par le tsunami de 1875. XIII

Figure 123. Enregistrements marégraphiques du 20 au 23 août 2011 (UTC) à Hienghène, Nouméa et Ouinné. XV

Figure 124. Hauteurs de *runup* mesurées suite au tsunami du 30 septembre 2009 à Futuna. XVII

Figure 125. Localisation des témoins interrogés en 2008 concernant l'observation de phénomènes hydrologiques anormaux XVIII

Figure 126. Remontées d'eau de mer dans les tarodières de Léava et Nuku. Sources : fond de carte IGN 4902, 2007 ; photographie François Jopitre XIX

Figure 127. Banc de coraux à Fatuloli, dépôt de paléo-tsunamis. XX

Figure 128. Protocole de diffusion de l'alerte prévu par le PSS et alerte remontante du 26 octobre 2010. XXVI

Figure 129. Séquence des événements (LT le 26). En bleu les créneaux horaires d'observation du phénomène, en surimpression les élévations du niveau océanique générés dans chaque port. XXVII

Figure 130. Bilan comparatif de l'aléa tsunami et de ses effets sur les littoraux français. XXXIX

Table des tableaux

Tableau 1. Seuils de déclenchement par le PTWC des différents niveaux de veille par bassin en cas de séisme sous-marin superficiel (*shallow undersea e.q.*). 31

Tableau 2. Zones de défense et de sécurité concernées par le risque tsunami en France. 36

Tableau 3. Principaux facteurs et critères de vulnérabilité des sous-systèmes individu et infrastructures. 52

Tableau 4. Typologie de la fonction des bâtiments et méthode de quantification de leur occupation. 57

Tableau 5. Typologie des espaces de plein air et méthode de peuplement. 58

Tableau 6. Coefficients de rugosité de Manning et de Chézy pour différents matériaux de surface... 62

Tableau 7. Coefficients de conservation de vitesse des classes de pente. 65

Tableau 8. Coefficients de conservation de vitesse des différents substrats. 66

Tableau 9. Surface nécessaire par individu dans les zones refuge selon la durée du séjour. 71

Tableau 10. Seuils de destruction totale des bâtiments selon leur classe de vulnérabilité structurelle. 73

Tableau 11. Typologie qualitative des individus. 74

Tableau 12. Synthèse des observations du tsunami du 26 décembre 2004 à Mayotte (du nord au sud). 86

Tableau 13. Population des IRIS échantillonnés à Petite Terre. 95

Tableau 14. Calcul de la densité de population dans les surfaces habitées à Mayotte par classe de résistance du bâti. 95

Tableau 15. Ajustement de la distribution des populations dans les foyers de Mayotte. 96

Tableau 16. Occupation professionnelle des habitants de Mayotte. 97

Tableau 17. Population des IRIS de Saint-Paul (La Réunion). 135

Tableau 18. Occupation professionnelle des habitants de Saint-Paul (La Réunion). 135

Tableau 19. Densités de populations adoptées pour la catégorie bars/restaurants. 139

Tableau 20. Fréquentation moyenne des tronçons et des ERP échantillonnés aux jours et horaires des scénarios d'enjeux SC2 et SC3. 146

Tableau 21. Seuils de déclenchement des alertes tsunami à La Réunion. 156

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. 162

Tableau 23. Caractéristiques des ports ayant subi les effets du tsunami du 21 mai 2003, phénomènes observés et chronologie des événements d'après les témoignages recueillis. 170

Tableau 24. Description de la source du séisme du 21 mai 2003 selon différents auteurs. 172

Tableau 25. Comparatif des durées d'évacuation moyennes en minutes pour les 3 scénarios. 196

Tableau 26. Etapes de la démarche mises en œuvre sur les 3 sites d'étude. 201

Tableau 27. Synthèse des incertitudes liées aux évaluations préliminaires nécessaires en vue de l'établissement d'un scénario de risque. 203

Tableau 28. Synthèse des incertitudes liées au choix de scénarios. 209

Tableau 29. Synthèse des incertitudes liées à la modélisation de l'aléa et à la confrontation des enjeux à ce dernier. 213

Tableau 30. Avantages et limites comparés des systèmes d'alerte aux populations. 223

Tableau 31. Tsunamis historiques ayant affecté la Nouvelle-Calédonie depuis 1875. VI

Annexes

Annexe 1. Catalogue des tsunamis en Nouvelle-Calédonie

Une mission a été mandatée en 2008 par le Secrétariat d'État à l'Outre-Mer (SEOM), cofinancée par la Commission Française auprès de l'UNESCO et appuyée logistiquement par la Sécurité Civile et le Haut Commissariat à la République en Nouvelle Calédonie. Cette mission avait comme objectif d'établir un catalogue complet des événements ayant eu un impact sur le territoire de Nouvelle-Calédonie [Sahal *et al.* 2010]. Ainsi, la mission a sillonné pendant 12 semaines la Nouvelle-Calédonie (Grande Terre, les iles Loyautés et l'île des Pins) pour recueillir témoignages verbaux et traces écrites du passage de tsunamis. Par ailleurs, l'IRD Nouméa, le CEA/DASE et le LGP ont apporté leur appui scientifique dans l'accomplissement de cette mission.

Les témoignages sur des évènements anciens ou récents, collectés ces dernières années par le laboratoire de géologie-géophysique de l'IRD-Nouméa ont également été utilisés. Ils portent sur le lagon sud de Nouméa, la côte est de la Grande Terre et les îles Loyauté. Ces témoignages ont été obtenus grâce à la sensibilisation des populations depuis la mise en place en 2003 d'un programme sur la modélisation du tsunami destructeur de 1875 à Lifou [Ioualalen et Pelletier 2007]. Le tsunami meurtrier de décembre 2004 a fait naitre une certaine prise de conscience de l'impact meurtrier potentiel lié à l'aléa tsunami. Cette prise de conscience a été à l'origine d'une forte inquiétude des populations lors de la crise sismique de Nouméa en janvier 2005. Une enquête a été réalisée à cette occasion dans la région du grand Nouméa. Depuis 2005, la Sécurité Civile met en place avec les communes du littoral un système d'alerte par sirènes. A cette occasion, une campagne d'information auprès des provinces et des mairies a été menée en mai et juin 2007 par la Sécurité Civile et l'IRD. Cette succession d'événements depuis 2003 a permis d'accumuler quelques témoignages significatifs.

L'enquête de 2008 a recueilli toutes les observations assimilables à la survenue d'un tsunami, tels que la variation du niveau marin de manière asynchrone aux marées, en deçà ou au-delà de l'estran et hors contexte cyclonique, l'observation de tourbillons, de mascarets, de courants ascendants dans les rivières ou à l'inverse leur purge brutale, la rupture d'amarres, etc. La mission a concentré ses déplacements sur les secteurs potentiellement les plus exposés : Iles Loyautés, côte est de Grande Terre et Île des Pins. La côte ouest n'a pas été visitée car opposée à la fosse du Vanuatu et à l'ensemble du Pacifique, et par conséquent considérée comme très faiblement exposée à l'aléa. Aucun témoin ne s'est par ailleurs manifesté sur cette côte (Figure 117).

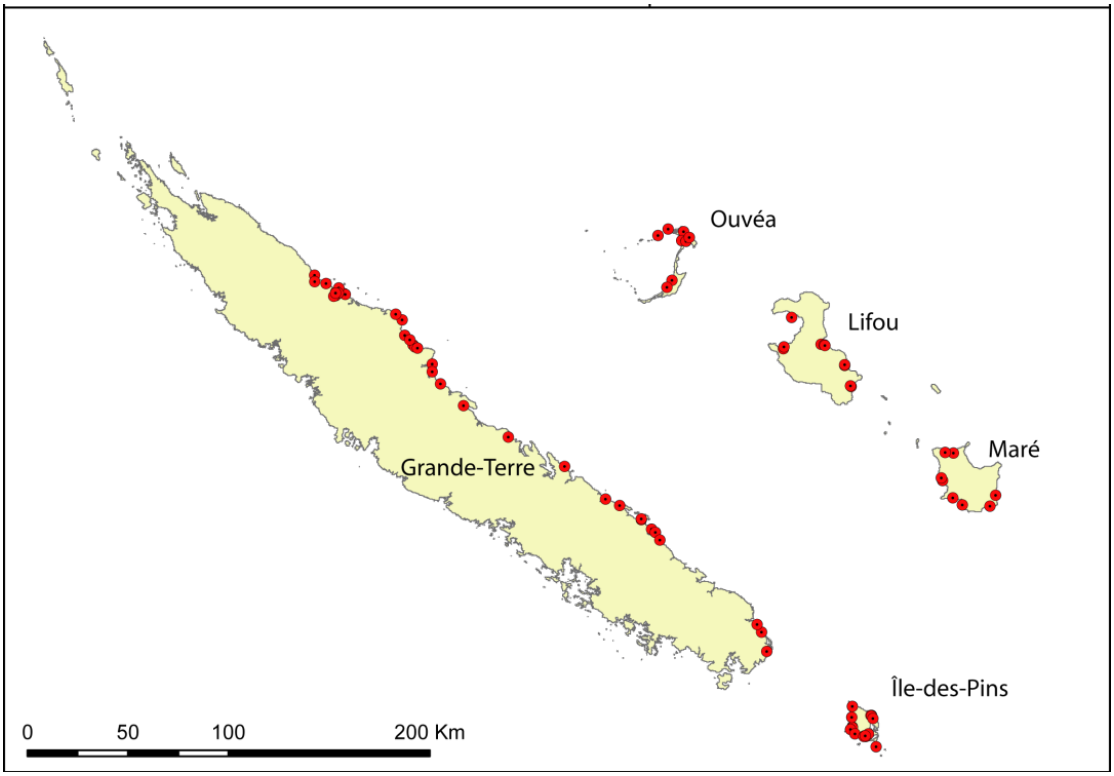


Figure 117. Localisation des témoins significatifs interrogés en Nouvelle-Calédonie.

Source : adapté de Sahal [2008].

Après le recueil des différents témoignages sur le terrain, ces derniers ont été confrontés à la liste des tsunamis avérés ou potentiels. Ce croisement a permis de valider ou non les données d'observation recueillies, à l'exception de tsunamis très locaux sans événement sismique majeur. L'utilisation des archives de presse écrite, des archevêchés, des Etats-Civiles de Droit Commun et Coutumier a permis d'identifier de manière plus précise les événements relatés, et/ou de compléter ces témoignages. Au total, 90 témoignages significatifs ont été recensés.

Enfin, en 2010, un complément d'enquête a été conduit sur le terrain et à permis de préciser les effets des événements post 2009.

Treize tsunamis ont pu être documentés et rattachés à des sources identifiées (Figure 118 et Tableau 31).

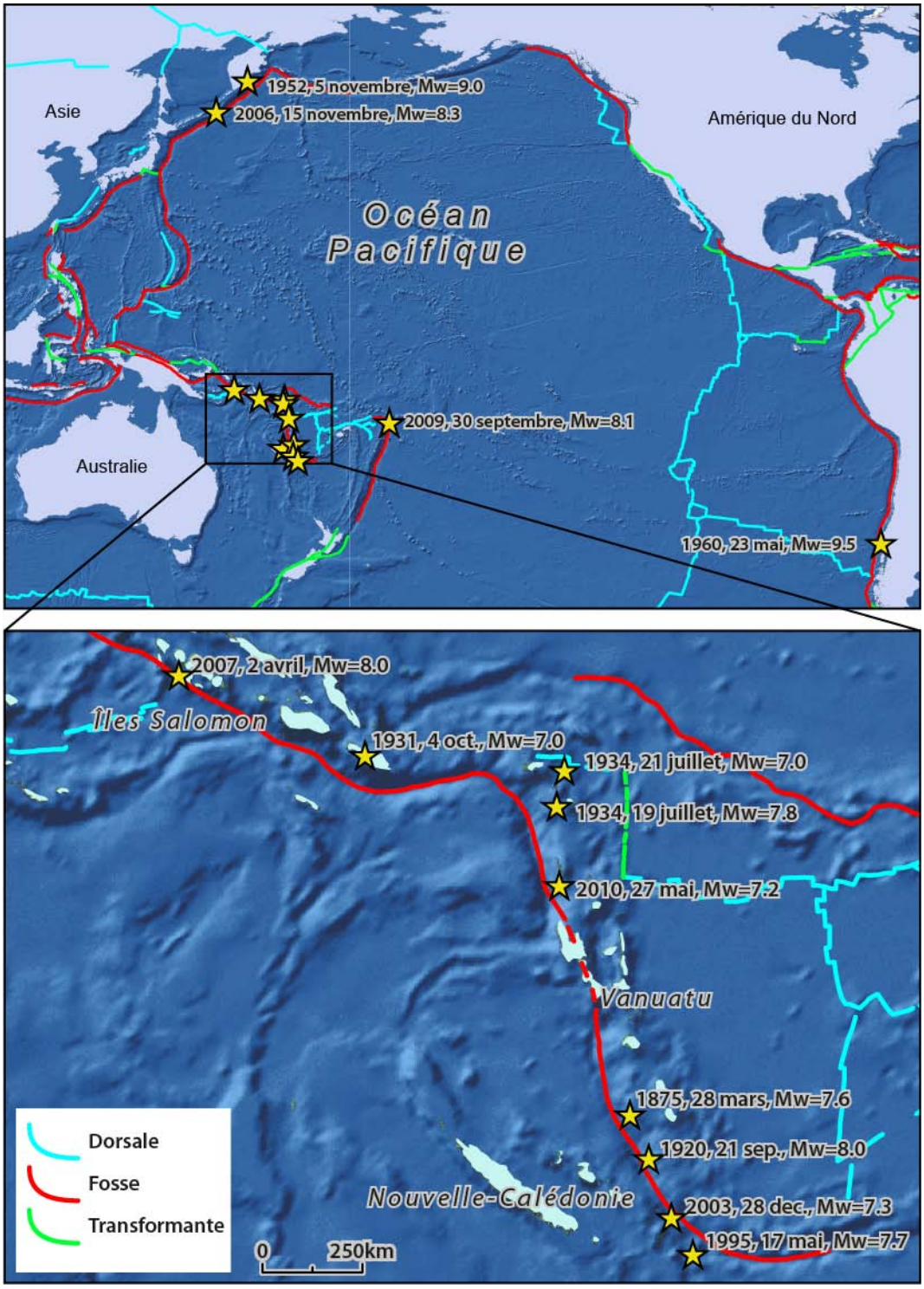


Figure 118. Localisation des sources des tsunamis ayant eu un impact en Nouvelle-Calédonie.

Source : adapté de Sahal *et al.* [2010].

Tableau 31. Tsunamis historiques ayant affecté la Nouvelle-Calédonie depuis 1875.

Date	Mw	Profondeur (km)	Distance / *runup* (km)	TTT observé	*Runup* maximal (m)	Localisation *runup* max.
28/03/1875	~7,6	?	180	0h20	2,5	Lifou
21/09/1920	8,0	33	220	~0h20	~1,5	Ouvéa
04/10/1931	7,0	33	1100	2h15	1,2	Hienghène
19/07/1934	7,8	33	990	1h20	1,5	Hienghène
21-22/07/1934	7,0	33	1200	2h	?	Touho
1936	?	?	?	?	3,2	Tova
1943	?	?	?	?	2,5	Hienghène
1950-1951	?	?	?	?	3,5	Mou
05/11/1952	9,0	45	8300	12h	?	Yaté
23/05/1960	9,5	33	10700	~10h	>1	Yaté
1983	?	?	?	?	?	Nouméa
17/05/1995	7,7	33	330	?	?	Maré
1997	?	?	?	?	4	Maré
28/12/2003	7,3	23	185	?	?	Maré
15/11/2006	8,3	13,5	7600	14h	?	Yaté
02/04/2007	8,0	14,1	1700	3h30	2	Maré
30/09/2009	8,1	12	2300	5h12	>1,5	Yaté
27/05/2010	7,2	42,9	750	?	?	Côte nord-est de Grande-Terre

On distingue ainsi des sources d'origines transocéaniques, situés le long de la côte chilienne et dans la région du Kamtchatka ; des sources régionales, situées à proximité des Îles Salomon, à l'extrémité nord du Vanuatu, ou aux Fidji ; et enfin, des sources locales situées à quelques centaines de kilomètres le long de la zone de subduction du Vanuatu (fosse des Nouvelles-Hébrides).

La Figure 119 situe les localités citées dans le texte.

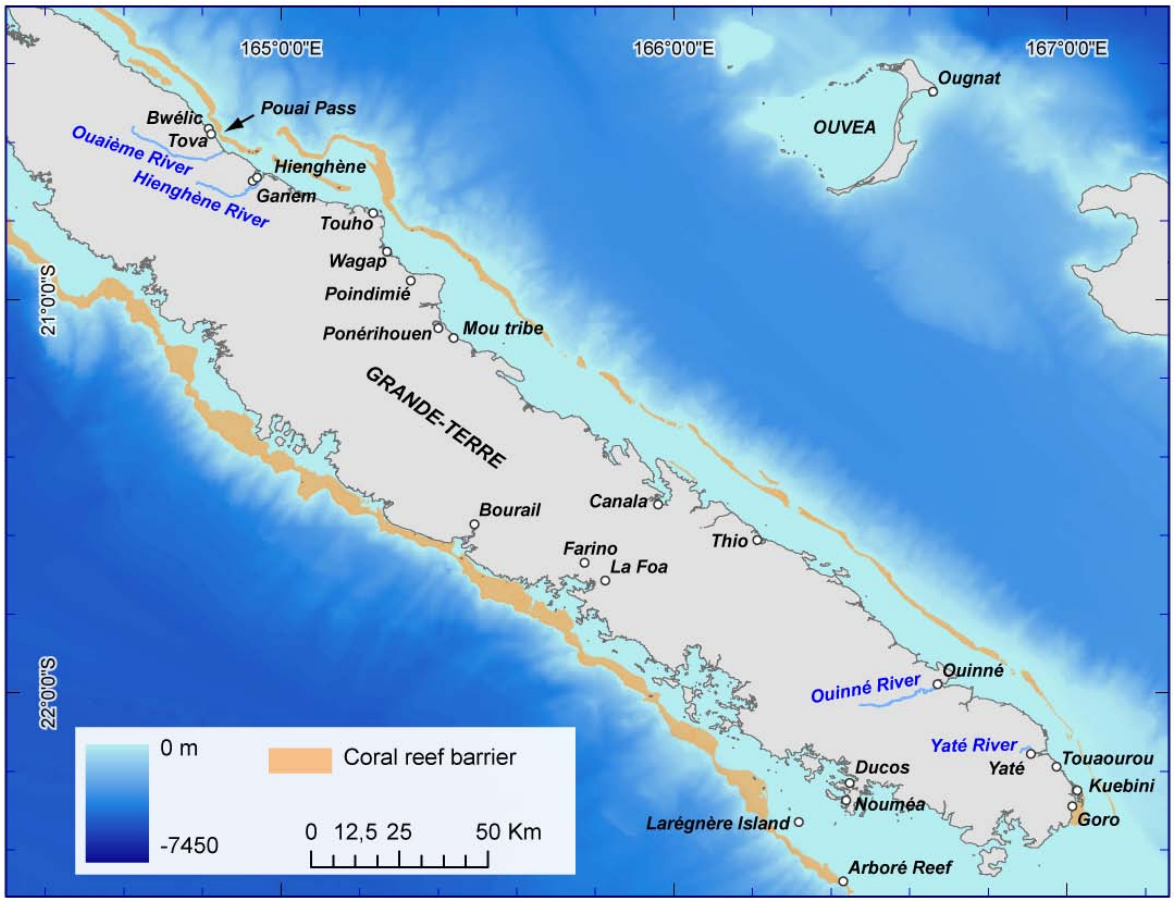


Figure 119. Localités de Grande-Terre et d'Ouvéa citées dans le texte.

Source : adapté de Sahal *et al.* [2010].

TSUNAMIS D'ORIGINES TRANSOCEANIQUES

TSUNAMI DU 5 NOVEMBRE 1952

Un séisme de magnitude Mw = 9,0 est enregistré le 5 novembre 1952 au Kamchatka (Russie) à 3:58, heure de la Nouvelle-Calédonie.

A **T_0+12h**, vers 16:00 LT, d' « énormes tourbillons » sont observés à l'embouchure de la Yaté (sud de Grande-Terre). De « très violents » courants ascendants et descendants sont observés avec une alternance toutes les 15 minutes, associés à une variation du niveau de la mer atteignant 2 mètres crête à creux, diminuant jusqu'à 20:00 LT. Des poissons sautent hors de l'eau. La nuit du 7 novembre, les perturbations sont toujours visibles : tourbillons, courants ascendants et descendants avec un intervalle de 45 minutes, et des amplitudes crêtes à creux de 0,8 à 1 m. (*La France Australe* du 10 novembre 1952, note de R.T. de Laubarede).

TSUNAMI DU 23 MAI 1960

Un séisme de magnitude Mw = 9,5 est enregistré le 23 mai 1960 au sud Chili à 6:11.

De « très fortes vagues » et des « courants extrêmement violents » affectent la côte ouest de la Nouvelle Calédonie. « Les routes côtières sont submergées ». La côte est (Yaté) est affecté de la même manière (La *France Australe* des 27 et 28 mai 1960). Le journal ne fournit pas plus de précisions sur les secteurs affectés ou les horaires d'observation. Aucun témoignage n'a pu être recueilli lors de l'enquête de terrain. On peut penser que ce manque de témoignages est lié au fait que le phénomène se soit manifesté durant la nuit du 23 au 24 mai, c'est-à-dire entre T_0+14h et T_0+15h selon les modèles.

A l'échelle régionale, des valeurs de *runup* sont enregistrés en Nouvelle-Zélande atteignant 4 à 5 m. à Gisborne et Napier, et 3 à 4 m. aux alentours de la péninsule de Bank [Power *et al.* 2007]. Plus proche de la Nouvelle-Calédonie, à Lord HoweIsland (Australie), situé à 1200 km. au sud-sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie, un *runup* de 70 cm. est mesuré [Berkman et Symons 1961]. Lord Howelsland est touché par le tsunami à **T_0+15h34**, validant les horaires fournis par les modèles.

TSUNAMI DU 15 NOVEMBRE 2006

Un séisme de magnitude Mw = 8,3 est enregistré le 15 novembre 2006 aux Kuriles à 22:14, heure de la Nouvelle-Calédonie.

A l'embouchure de la Ouinné, des tourbillons et des bouillonnements sont observés. Les flux remontent la rivière sur une centaine de mètres avec une fréquence de 10 minutes. Le témoin (André Puech) observe le phénomène de 12:30 à 13:30 LT le 26 novembre, ce qui correspond à T_0+14h. Le phénomène a pu débuter plus tôt et se terminer plus tard, s'agissant de la période de présence du témoin sur les lieux. A Port Vila, le marégraphe enregistre des oscillations d'une amplitude de 29 cm. sur une durée de 20h, commençant à 8:20 le 16, soit **T_0+10h**.

TSUNAMI DU 30 SEPTEMBRE 2009

Un séisme de magnitude Mw = 8,1 est enregistré le 30 septembre 1952 au nord de la zone de subduction des Tonga à 4:48 LT en Nouvelle-Calédonie.

Le tsunami déclenché par ce séisme affecte les côtes des Samoa occidentales, des Samoa américaines et du nord de l'archipel des Tonga, causant 192 pertes humaines [Dudley *et al.* 2011]. Une alerte est déclenchée par le PTWC. Les ouvriers de la mine de Ouinné évacuent en hauteur autour de 9:20 et observent l'océan. Le niveau est inférieur à la marée prévue. Le temps est clément et sans vent. Vers 10h, soit **T_0+5h12**, un courant remontant et des tourbillons sont observés à l'embouchure de *La Ouinné*. En 15 minutes, le lagon tourne au rouge par brassage des sédiments. A

13:00, plusieurs témoins voient le niveau des eaux monter plus haut que le pont qui franchit la rivière (*runup*>1,5 m). A 13:45, on constate un retour à la normale.

A Ducos, près de Nouméa, dans la baie de Numbo, le marégraphe enregistre une surcote de 5cm.

TSUNAMI DU 11 MARS 2011

Le 11 mars 2011, un séisme de magnitude Mw = 9 est enregistré à 5:46 UTC proche de la côte est de Honshu, au Japon. Le tsunami déclenché atteint des hauteurs de *runup* de 37,8 m. au Japon et entraine la mort de 23 000 personnes (IOC/UNESCO). En Nouvelle-Calédonie, des perturbations sont enregistrées à Nouméa à partir de 18:30 UTC, soit vers **T_0+12h16**, avec une amplitude très faible (Figure 120). Aucun dégât n'est constaté.

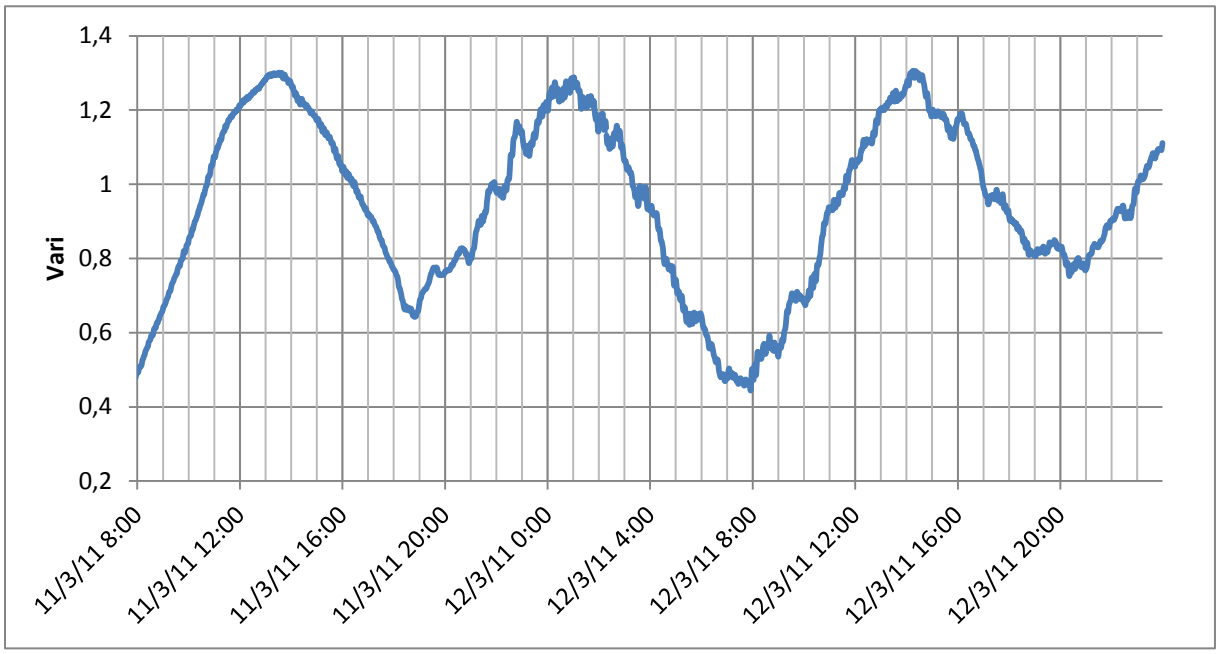


Figure 120. Enregistrement marégraphique des 11 et 12 mars 2011 (UTC) à Nouméa.

Source : signal RAD disponible sur le SLMF (http://www.ioc-sealevelmonitoring.org).

TSUNAMIS D'ORIGINES REGIONALES

TSUNAMI DU 4 OCTOBRE 1931

Un séisme de magnitude Mw = 7,0 est enregistré le 4 octobre 1931 à 6:30 LT aux îles Salomon (San Cristobal).

A **T_0+2h15**, les premières vagues du tsunami déclenché par ce séisme remontent La Hienghène jusqu'à 7km à l'intérieur des terres [Soloviev et Go 1974]. Sur le rivage, la mer se retire rapidement puis retourne à la normale (*Le Bulletin du Commerce* daté du 10 octobre 1931), et des vagues « bruyantes et agitées » sont observées [Soloviev et Go 1974]. L'eau, d'aspect turbide, atteint 1,2 m. au

delà de la marée normale (surcote). Plus localement, le long de La Hienghène, une vague haute d'1,5 m. est observée depuis les berges de la rivière. Des témoins constatent la présence de courants ascendants et descendants selon une période de 20 à 30 min. Les oscillations les plus importantes sont relevées entre 8:30 et midi. Des bateaux sont retournés, un mur à la mer est détruit. Aucune victime n'est enregistrée.

TSUNAMI DU 19 JUILLET 1934

Un séisme de magnitude Mw = 7,8 est enregistré le 19 juillet 1934 sur la partie nord de l'arc du Vanuatu (Vanikoro, île des Salomon orientales) à 6:40 LT.

A **T_0+1h20**, un courant ascendant et descendant d'amplitude équivalente aux marées normales est observé avec une période de 20 min à Hienghène et Touho. Les variations sont estimées à une amplitude de 1,2 m. à 1,3 m. [Kellar 1935 in Soloviev et Go 1974] et durent de 8:00 à 14:00 (*La France Australe* datées des 21 et 24 juillet 1934, *Le Bulletin du Commerce* daté du 25 juillet 1934). Ces jours là, le temps était clément. Aucune perte humaine ou matérielle n'est à déplorer.

TSUNAMIS DES 21–22 JUILLET 1934

Un séisme de magnitude Mw = 7,0 est enregistré le 21 juillet 1934 sur la partie nord de l'arc du Vanuatu (Santa Cruz, île des Salomon orientales) à 17:18 LT.

A **T_0+2h** des courant ascendants et descendants, plus forts mais moins longs que ceux du 19 sont observés à Hienghène de 19:00 à 20:00. Certains témoins constatent une baisse de la marée de 20 à 30 cm. se produisant à intervalle régulier toutes les 5 à 10 min. Au wharf de Thio, vers 20:00, on observe une montée brutale de la mer passant d'un niveau de basse-marée à un niveau normal pour aussitôt se retirer. A Poindimié, le même phénomène est observé, accompagné d'un « fort bruit », et ce de 20:00 à 20:30. Enfin, à Touho, le même phénomène est observé mais avec une amplitude plus importante et période inférieur (*La France Australe* datées des 23 et 24 juillet 1934, *Le Bulletin du Commerce* daté du 25 July 1934). Ces observations sont faites un jour de beau temps. Le 22 juillet, dans la Baie de Magenta, proche de Nouméa, une légère hausse du niveau marin suivi d'un retrait de 3 à 4 m. est observé avec une alternance de 10 minutes sur une durée de 45 min [Kellar 1935 in Soloviev et Go 1974]. Aucune perte humaine ou matérielle n'est à déplorer.

TSUNAMI DU 2 AVRIL 2007

Cet événement, récent lors de l'enquête de terrain de 2008, est décrit grâce au témoignage de 18 personnes. Il s'agit de l'événement le mieux documenté pour la Nouvelle-Calédonie.

Le 2 avril 2007, un séisme de magnitude Mw = 8,0 est enregistré le long de l'arc des Salomon (péninsule de Gizo, New Georgia Group) à 7:39 LT. Un tsunami est déclenché et tue 52 personnes à Gizo [Fritz et Kalligeris 2008].

Aux alentours de 11:00 à 12:00, soit **T_0+3h30**, une marée anormalement très basse est observée par l'opérateur du bac de *La Ouaième* : le bac talonne sur le lit de la rivière. La même observation est faite dans La Hienghène qui est presque asséchée. Des observations de retraits similaires sont faites sur l'ensemble du territoire.

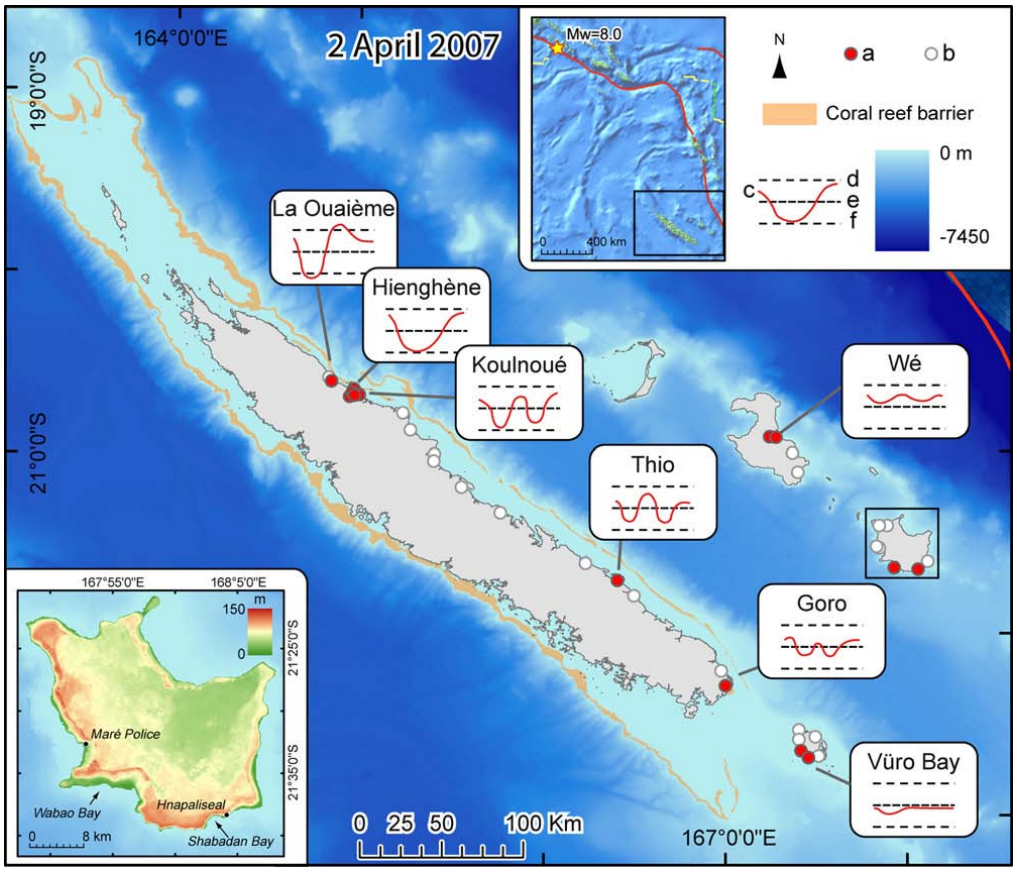


Figure 121. Approximation des variations du niveau marin le 2 avril 2007 entre 10:30 et 14:00 LT, telles que décrites par les témoins (a : anomalie, b : absence d'anomalie, c : variation pendant env. 2 h., d : marée haute, e : niveau moyen, f : marée basse).

Source : adapté de Sahal *et al.* [2010].

Dans la baie de *La Ouinné*, à 11:35 LT, un témoin observe une marée basse inhabituelle et des tourbillons à l'embouchure du cours d'eau. Le phénomène dure jusqu'à 12:00 LT.

A Nouméa, le marégraphe enregistre une élévation anormale de 5cm à 11:40 LT. Le signal du tsunami est enregistré de 10:50 à 12:20 LT.

On observe une décroissance de l'amplitude à la côte du nord-ouest au sud-est, à l'exception de Maré où un *runup* de 2 m. est déduit : près d'Hnapaliseal, un témoin, guide local qui parcours le

littoral quotidiennement a constaté une végétation couchée en direction de l'ouest. Toujours à Maré, le même jour, un autre témoin a observé des vagues inhabituelles venant de l'est ainsi qu'un retrait d'une amplitude de 1,5 m. On peut interpréter ce contraste entre observations à Maré de trains d'ondes submergeant venant de l'est et les impacts moindres sur la côte est de Grande-Terre par la perte d'énergie engendrée par les fonds de moindre importances entre la Grande-Terre et les Loyautés, ainsi que par la diffraction autour de ces dernières (cf. le phénomène de *wrap-around* observé à La Réunion, 4.1.1.3).

A Port Vila, le marégraphe enregistre une élévation de 11 cm. à 10:51 LT. Aucune perte matérielle ou humaine n'est rapportée en Nouvelle-Calédonie ou au Vanuatu.

TSUNAMIS D'ORIGINES LOCALES

TSUNAMI DU 28 MARS 1875

Le 28 mars 1875, un séisme de magnitude indéterminée frappe les îles Loyautés à 23:00 LT. Quelques 20 minutes plus tard, un puissant tsunami envahi les côtes de Lifou [Ioualalen et Pelletier 2007].

Le tsunami tue 25 personnes su la côte sud-est de Lifou (Figure 122 A). Ce sont les tribus de Toth et de Mou qui subissent les dommages les plus importants (Figure 122 B). D'importantes vagues sont observées à Luengoni et à Wé, dans la Baie de Chateaubriand. *Le Moniteur* du 28 avril 1875 rapporte les témoignages des missionnaires présents sur l'île à l'époque. Ces témoignages sont présentés *in extenso* par Louat et Baldassari [1989]. La transmission orale du phénomène apporte aujourd'hui des précisions quand aux altitudes atteintes. Ainsi, un *runup* minimal de 2,5 m. est déduit à Mou grâce aux témoignages de quatre descendants de familles ayant perdu des proches lors du tsunami. Les ruines des bâtiments en parti détruits par le tsunami sont encore les témoins visibles de la puissance du phénomène (case du Chef et temple, Figure 122 C et D). La modélisation, faite à partir de données bathymétriques des zones côtières de l'île [Pelletier *et al.* 2004], a permis de reproduire les observations faites à la côte avec comme source un séisme de magnitude Mw = 7,6 [Ioualalen et Pelletier 2007], situé à 180km au nord-est de Lifou (Figure 122 A).

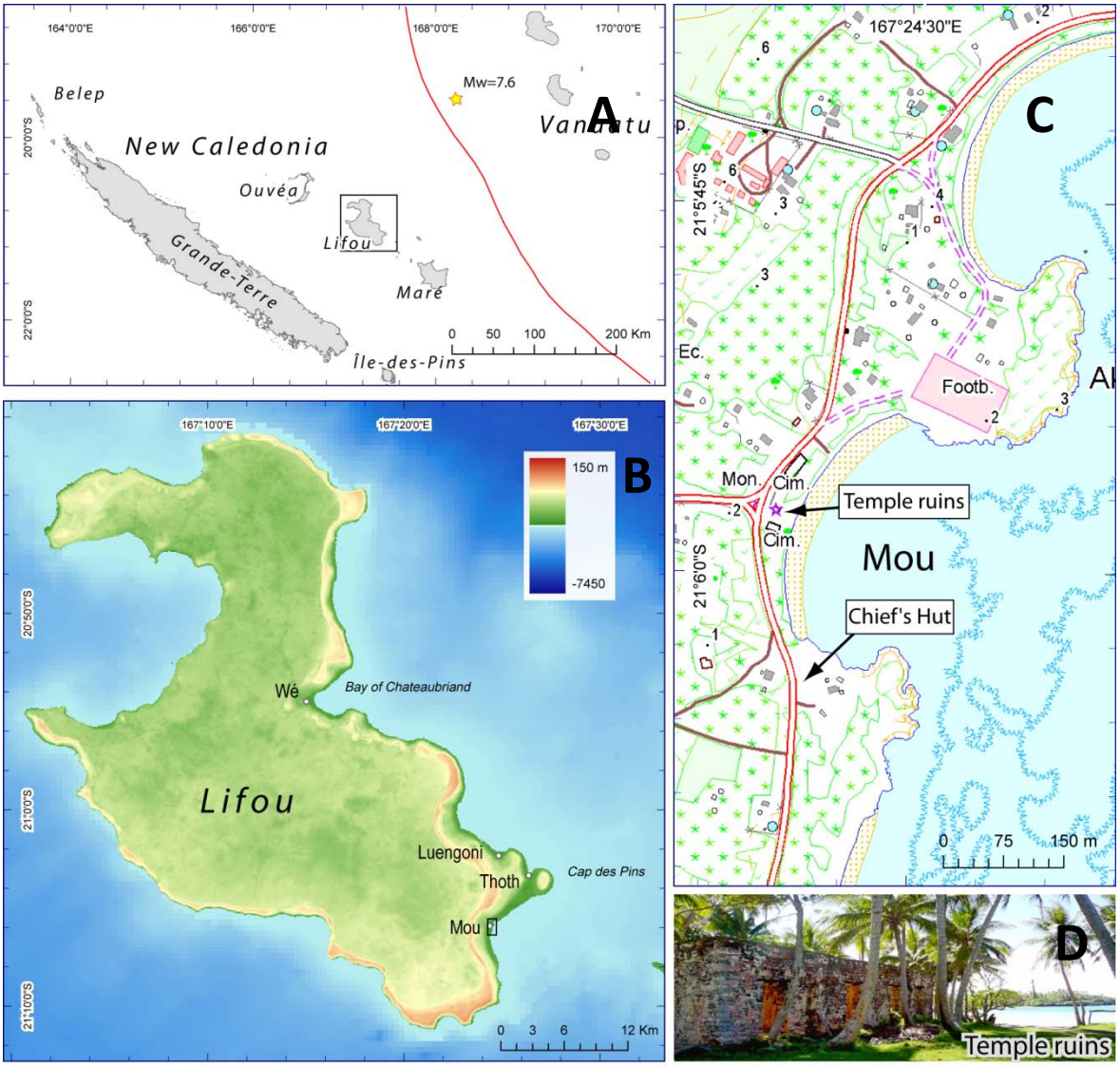


Figure 122. Lieux de Lifou affectés par le tsunami de 1875.

Source : adapté de Sahal *et al.* [2010].

TSUNAMI DU 21 SEPTEMBRE 1920

Un séisme de magnitude Mw = 8,0 est enregistré entre Anatom (Vanuatu) et Maré à 1:39 LT. La secousse est ressentie à Nouméa, La Foa, Farino, Canala, Ouvéa, etc. (*La France Australe* du 21 septembre 1920).

Par ce jour de beau temps, un tsunami inonde Ougnat, au nord d'Ouvéa. Aucun horaire précis n'a pu être trouvé concernant cet impact. Le même jour, une des victimes du tsunami, choquée par le phénomène, donne naissance prématurément à un fils qu'elle nomme Waakôiô (qui signifie “raz-de-marée”). L'événement est confirmé par deux témoins et par les registres d'État Civil. On peut estimer un *runup* minimal de 1,5 m. à partir de ce témoignage, altitude minimale pour inonder des

habitations à Ougnat. Les modèles estiment le temps de trajet du tsunami à environ 20 minutes pour atteindre Ouvéa et 45 pour atteindre Grande-Terre.

TSUNAMI DU 17 MAI 1995

Un séisme de magnitude Mw = 7,7 est enregistré à 7:12 LT au sud-sud-est de l'ilot Walpole (300 km. au sud-est de Maré et de Nouméa). La police de Maré rapporte une mer particulièrement agitée au sud-ouest de l'île.

Au Vanuatu, à T_0+1h30, entre 8:30 et 9:00 LT, un marnage particulièrement haut est constaté sur l'île d'Aneytum ainsi qu'à Port Vila (Efate) [Lardy 1995]. Les fondations des bungalows de l'îlot d'Erakor ainsi que le restaurant de la route de Pango sont atteint par les flots. L'amplitude de la submersion est estimée à 1,5 m. A l'entrée du Premier Lagon, des témoins constatent que l'océan est agité et qu'il conserve un niveau haut avec une période de 10 à 15 minutes. Malheureusement, aucun témoin n'a pu être trouvé concernant des observations lors de la mission en Nouvelle-Calédonie.

TSUNAMI DU 28 DECEMBRE 2003

Un séisme de magnitude Mw = 7.3 est enregistré sur la partie sud de l'arc du Vanuatu, à 185 km. au sud-est de Maré à 3:01 LT. La police de Maré rapporte une mer particulièrement agitée. Aucun témoin n'a pu être rencontré pendant la mission de terrain pour préciser le rapport de police. Ce séisme s'inscrit dans une crise sismique qui s'est étalée du 25 décembre 2003 au 5 janvier 2004.

TSUNAMI DU 27 MAI 2010

Un séisme de magnitude Mw = 7,2 à une profondeur de 20 km. est enregistré à 215 km. au nord-ouest de l'île d'Espiritu Santo (Vanuatu) à 17:15 GMT. Un bulletin d'alerte est diffusé par le PTWC. Quelques légères variations du niveau océanique sont constatées sur la côte nord-est de Grande-Terre.

TSUNAMI DU 20 AOUT 2011

Le 20 août 2011, un séisme de magnitude Mw = 7,1 est enregistré à 16:55 UTC au Vanuatu.

En Nouvelle-Calédonie où des marégraphes sont récemment venu compléter le réseau local existant, des perturbations sont enregistrées à partir de 17:55 UTC, soit vers T_0+1h, et plus particulièrement à Ouinné où elles atteignent une amplitude de 20cm. Malheureusement, les données enregistrées par les autres marégraphes sont indisponibles auprès de la SLMF (Figure 120). Aucun dégât n'est constaté.

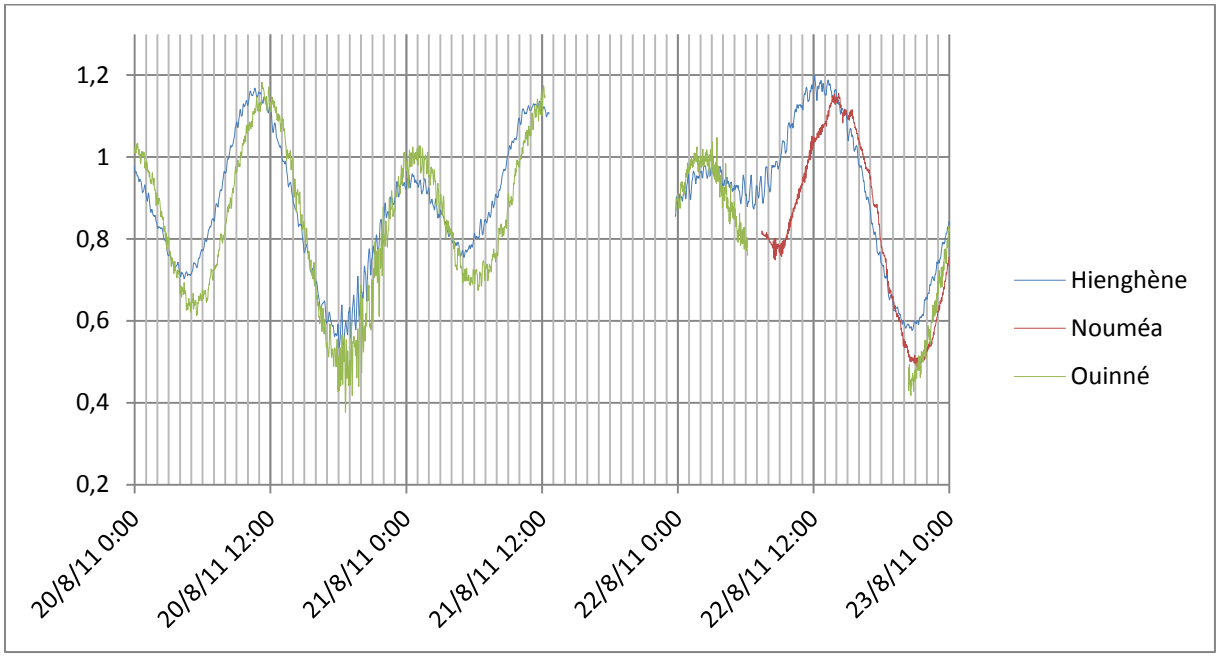


Figure 123. Enregistrements marégraphiques du 20 au 23 août 2011 (UTC) à Hienghène, Nouméa et Ouinné.

Source : signal RAD disponible sur le SLMF (http://www.ioc-sealevelmonitoring.org).

TSUNAMIS D'ORIGINES INCONNUES

Six événements d'origines inconnues ont été identifiés par Sahal *et al.* [2010] en Nouvelle-Calédonie : en 1936 près de *La Ouaième*, atteignant des hauteurs de *runup* de 3,2 m, en 1942-1943 toujours dans le nord-est de Grande-Terre, atteignant 2,5 m, en 1950-1951 à Mou, atteignant 3,5 m. ou encore plus récemment en 1995 et 1997, atteignant une hauteur de 4 m. pour ce dernier. Pour ces événements qui ne sont pas ici développés, aucune source n'a pu être identifiée avec certitude. L'hypothèse de glissements sous-marins locaux semble la plus plausible. Le lecteur curieux se référera à l'article publié à ce sujet [Sahal *et al.* 2010].

Annexe 2. Catalogue des tsunamis à Wallis-et-Futuna

TSUNAMIS D'ORIGINES REGIONALES A FUTUNA : L'UNIQUE CAS CONNU DU 29-30 SEPTEMBRE 2009

Le 29 septembre 2009, à 17:48 UTC, soit 5:48 LT à Futuna, un séisme de magnitude Mw = 7,8 est enregistré au nord Tonga. Il génère un tsunami qui atteint Futuna entre 7:00 et 7:20 LT [Lamarche *et al.* 2010], soit **T_0+1h12**.

Lamarche *et al.* [2010] ont mesuré des hauteurs de *runup* atteignant 4,5 m. sur Alofi et 4,4 m. sur Futuna.

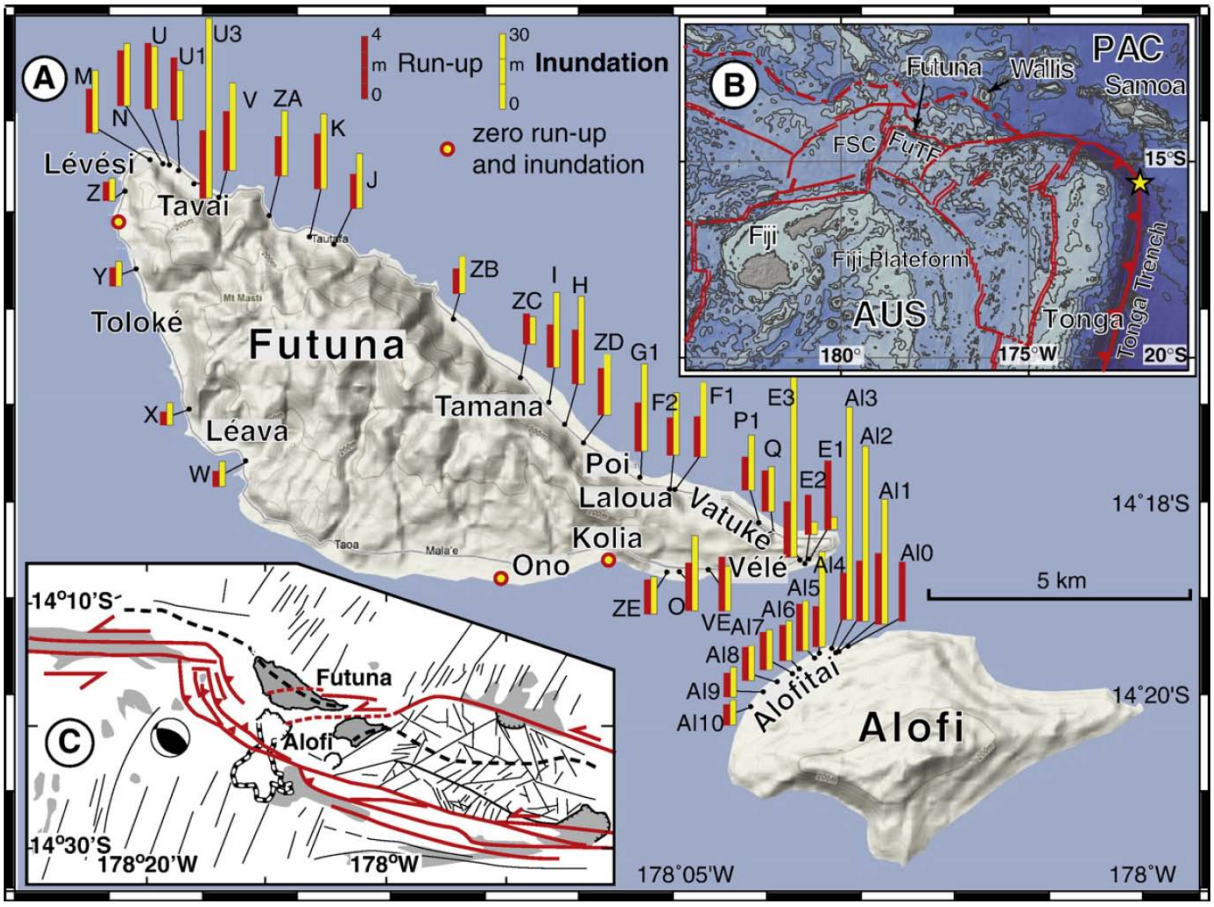


Figure 124. Hauteurs de *runup* mesurées suite au tsunami du 30 septembre 2009 à Futuna.

Source : extrait de Lamarche *et al.* [2010].

TSUNAMIS D'ORIGINES LOCALES A FUTUNA : L'EXEMPLE DU 15 MARS 1993

Le 15 mars 1993, un séisme de magnitude Mw = 6,4 est enregistré au sud de Futuna [Regnier et Charvis 2003]. Le séisme soulève la partie sud de l'île d'une trentaine de centimètres. Il entraine la mort de 3 personnes, de nombreux dégâts matériels et des glissements de terrain.

Parmi les témoins interrogés lors d'une mission en 2008 (Figure 125), certains affirment avoir vu une « boule de feu dans la mer », probablement une éruption sous-marine sur la partie sud de la dorsale de Futuna.

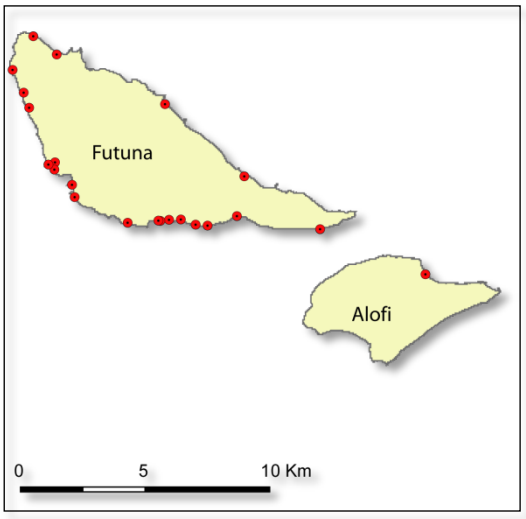


Figure 125. Localisation des témoins interrogés en 2008 concernant l'observation de phénomènes hydrologiques anormaux.

Source : adapté de Sahal [2008].

Les témoignages recueillis révèlent un impact hydrologique important : aussitôt après les plus grandes secousses qui ont soulevé la partie sud de l'île et fait émerger son platier, la mer s'est retirée puis une « grande vague » est venue frapper l'île, s'engouffrant sous le platier par le réseau de failles pour ressortir dans les tarodières, laissant des trous béants entourés de sable à Léava et à Nuku (Figure 126).

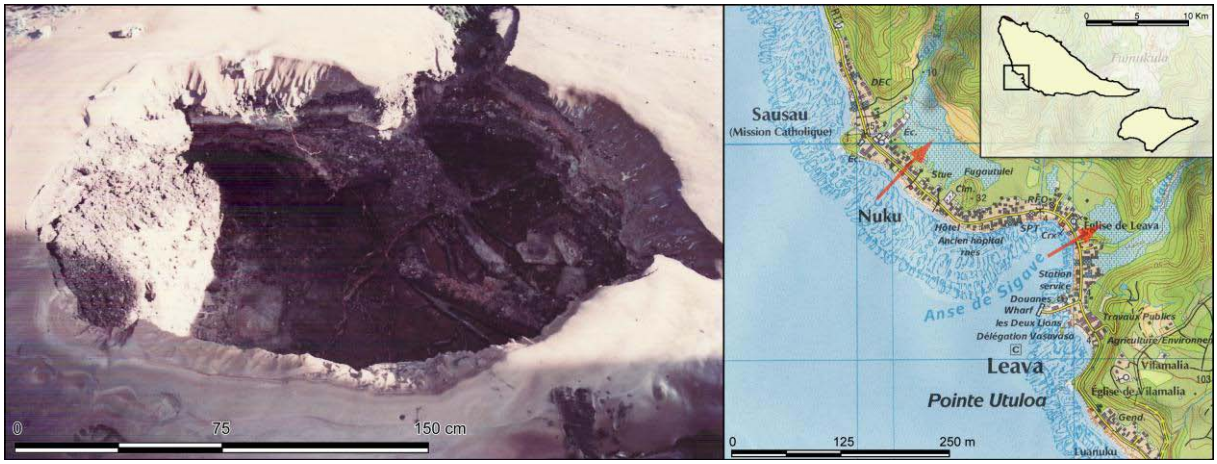


Figure 126. Remontées d'eau de mer dans les tarodières de Léava et Nuku. Sources : fond de carte IGN 4902, 2007 ; photographie François Jopitre.

Source : extrait de Sahal [2008].

Il est difficile de dire si cette vague a été engendrée par le soulèvement du platier ou par un effondrement sous-marin plus distant. Son arrivée immédiate post-séisme tendrait à privilégier la première hypothèse. Aucun autre dommage lié à ce phénomène hydrologique n'a été signalé.

Lamarche *et al.* [2010] ont récemment attribué ce tsunami déclenché par une rupture de compression sur un relai de la faille transformante nord Fidjienne. Ils estiment des valeurs de *runup* de 3,8 m. à Léava et 4,2 m. à Laloua (Figure 124, F1).

TSUNAMIS DE SOURCES NON IDENTIFIEES A FUTUNA, PROBABLEMENT REGIONALES

La légende de Fatuloli, recueillie par Frimigacci *et al.* [1995], évoque le passage d'une grande vague au nord de Futuna, et la mort de toute la population côtière de la région de Tavai. Elle aurait déposé de très nombreux coraux que l'on retrouve encore aujourd'hui sur une portion importante du littoral et sur une profondeur supérieure à 40cm. La mission s'est rendue sur le site afin de délimiter précisément ces dépôts, qui atteignent parfois une altitude proche des 8 m. et d'effectuer les échantillonnages nécessaires à sa datation (Figure 127).

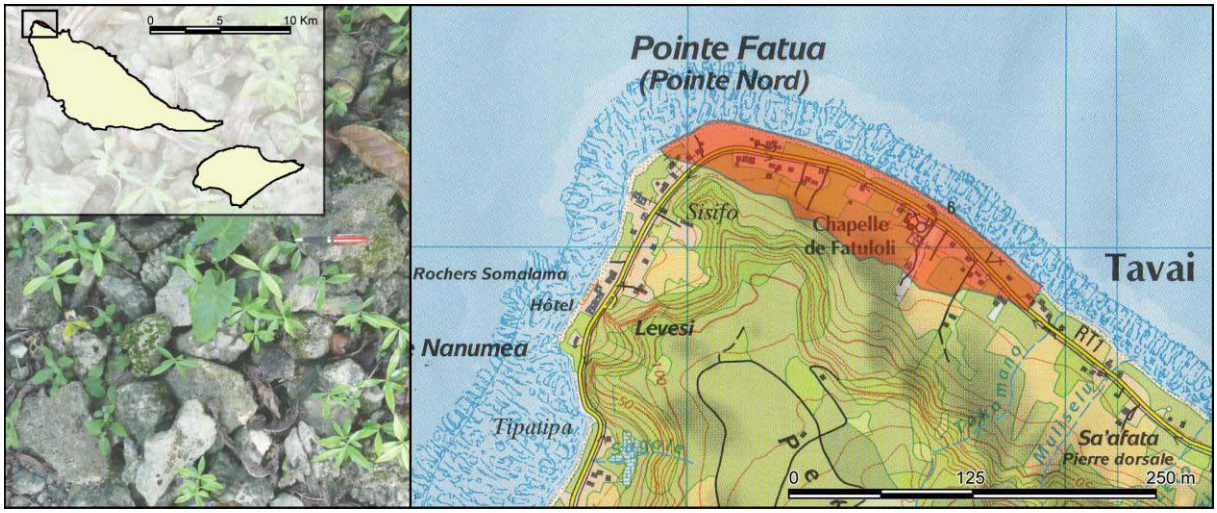


Figure 127. Banc de coraux à Fatuloli, dépôt de paléo-tsunamis.

Source : extrait de Sahal [2008].

Par manque de moyens, ces datations ont été impossibles. En 2010, Lamarche *et al.* [2010] ont constaté, lors du *post tsunami survey* consécutif à l'événement du 30 septembre 2009, les dépôts de Fatuloli et ont entrepris des datations. Les résultats de ces datations [Goff *et al.* 2011], posent l'hypothèse d'un tsunami vers 1860-2000 BP originaire de la fosse des Tonga-Kermadec atteignant 7 m. à Levesi (Figure 127). Un second événement, plus récent, se serait produit vers 470 BP [Goff *et al.* 2011], originaire selon les auteurs d'un séisme plus important dans la même région, ou bien en lien avec l'effondrement de la caldeira de Kuwae vers 1452/1453 AD [Monzier *et al.* 1994 ; Robin *et al.* 1994], volcan sous-marin du Vanuatu, situé à 50km au nord de Port-Vila. Des dépôts de ce dernier événement atteignent une altitude 6 m. à Futuna, toujours sur le site de Levesi.

Annexe 3. Liste des périodiques consultés pour chaque territoire étudié dans le cadre de la thèse

Sont ici listés l'ensemble des périodiques (presse actuelle et ancienne) qui ont été consultés dans le cadre de cette thèse, à la recherche d'observations de type tsunami sur les côtes françaises de métropole et d'Outre-mer.

NB. Les articles définis des titres des périodiques ont été supprimés.

COTE ATLANTIQUE FRANÇAISE

Action Medocaine
Action Radicale
Ami
Avenir Blayais
Avenir d'Arcachon
Avenir du Morbihan
Bataille Politique et Sociale
Charente Inferieure
Chronique du Libournais
Concorde
Courrier de Paimboeuf
Courrier de St Nazaire
Cri Populaire
Croisic
Democrate de Talence
Democrate et Petit Medocain Réunis
Démocratie du Morbihan
Eau claire
Echo de la Loire
Echo de la Presqu'Île
Echo de Lorient et du Morbihan
Echo de l'Ouest de St Nazaire
Echo de Paimboeuf
Echo de St Jean d'Angely
Echo du Médoc
Echo du Morbihan, de Basse-Bretagne, de l'Ouest
Echo rochelais
Echo saintongeais
Eclair (Nantes)
Figaro
Franc Parler
France de Bordeaux et du Sud Ouest
Gazette d'Aunis
Glaneur
Indépendant de St Nazaire
Indépendant (La Réole)
Indépendant rochefortais
Journal de l'île de Ré
Journal de Marennes
Journal de Pontivy
Journal de Royan
Journal de Saintes et de la Charente-Inférieur
Journal du Médoc
Libération
Liberté du Morbihan
Liberté du Sud Ouest
Lorientais
Médoc
Monde
Morbihan
Mouette
Nouvelle Guyenne
Nouvelles bezardaises
Nouvelles de Lorient
Nouvellistes de Vannes
Nouvellistes du Morbihan
Ouest Eclair
Ouest Républicain
Petit Echo de l'Ouest
Petit Lorientais
Petite Gironde
Peuple
Peuple Souverain
Phare
Phare de Royan
Ploërmelais
Populaire de Nantes
Presqu'Île Guerandaise
Presse-Océan
Progrès
Progrès de la Charente-Inférieure
Progrès des Landes
Progrès du Morbihan
Prolétaire du Morbihan
Rappel du Morbihan
Rayon
Républicain
République Agricole
Réveil de l'Ile de Ré
Réveil de l'Ile d'Oléron
Réveil des Charentes
Réveil des communaux
Réveil du Blayais
Réveil Médocain
Rhétais
Rochefortin
Royan
Saintongais
Semaine religieuse du diocèse de Vannes
Semeur
Seudre
Sevigne
Sud-Ouest
Tablettes des deux charentes
Télégramme de Brest et de l'Ouest
Travailleur
Tribune du Libournais
Union de la Réole et de Langon
Union Démocratique
Union Républicaine du Libournais
Union Républicaine
Union Sociale
Vigie du Morbihan
Voix des Charentes
Voix Rochelaise

COTE MEDITERRANEENNE FRANÇAISE

Abeille Roussillonnaise
Agly
Aigle des Cévennes
Association Amicale de l'Aude
Avenir
Avenir Commercial de l'Hérault
Avenir de Nice
Bas-Languedoc
Bastia Journal
Bohème
Bon Sens
Brise du Soir
Bulletin de la Société centrale d'Agriculture de l'Aude
Cettois
Cévenole
Commercial et Maritime de Cette
Conciliateur
Conservateur de la Corse
Courrier de Céret et de l'arrondissement
Courrier de l'Aude
Courrier de Marseille
Courrier de Narbonne
Courrier du Gard
Courrier du Var
Démocrate du Var
Drapeau National
Echo de Bessège et du Canton
Echo de Cette
Echo de l'arrondissement de Lodève
Echo de l'Aude
Echo de l'Hérault
Echo de Lodève
Echos de Nice
Echo de Saint-Pons
Echo des Cévennes
Echo du Var
Eclair
Eclaireur
Eclaireur du Gard
Emancipation Sociale
Etoile des commerçants, des capitalistes et des rentiers, des propriétaires et des agriculteurs
Exposition
Figaro
Fraternelle, Gazette de l'arrondissement d'Alais
Fraternité
Furet Nîmois
Gard
Gazette de l'Arrondissement d'Alais
Gazette du Midi
Huguenot, Bulletin mensuel des Eglises réformées des Cévennes et du Sud-Est
Hyères Journal
Illustration
Indépendant d'Ajaccio
Indépendant de Lodève
Indépendant des Pyrénées-Orientales
Indépendant des Pyrénées-Orientales
Indépendant du Midi
Indépendant du Var
Indicateur de l'Hérault
Information méridionale
Journal Commercial et Maritime de Cette
Journal d'Alais
Journal de Brignoles
Journal de Cette
Journal de Grasse
Journal de la Corse
Journal de Montpellier
Journal des Pyrénées-Orientales
Journal du Département de la Corse
Journal du Midi
Journal du Var
Journal d'Uzès
Languedocien
Lessive
Libération
Lorgnette
Lorgnon
Mémorial d'Aix
Messager du Midi
Midi, Journal Républicain Libéral
Midi-Journal
Monde
Moniteur de le Corse
Moniteur de Provence
Moniteur Universel
Nice Matin (toutes éditions)
Nîmois
Nouvelliste
Opinion du Midi
Paris Match
Pascal Paoli
Passe Partout
Patriote
Patriote des Pyrénées-Orientales
Petit Baigneur
Petit Bastiais
Petit Darcenois
Petit Marseillais
Petit Méridional
Petit Paysan
Petit Provençal
Petit Régional, édition du Gard
Petit Républicain Cettois
Petit Républicain du Midi
Petit Réveil de l'Hérault
Petit Var
Pilori de la Corse
Progrès de la Corse
Progrès de l'Hérault
Propagateur
Publicateur
Rabelais
Radical
Radical de l'Aude
Radical de Marseille
Radical des Pyrénées-Orientales

Rappel de l'Aude
Région
Républicain Cettois Républicain de Narbonne
Républicain des Pyrénées-Orientales
République
Réveil de la Corse. Journal de l'appel au peuple
Réveillon
Revue Cévenole
Revue de Saint Pons
Revue Méridionale
Roussillon
Saint Raphaël Journal
Saint Raphaël Revue
Salut
Sauveur des Malades
Semaines Religieuses
Sémaphore
Sentinelle du Midi
Sentinelle Toulonnaise
Sifflet
Solidarité
Tablettes d'Allais
Toulonnais
Toulonnais
Tribune du Midi
Union
Union des Propriétaires
Union du Var
Union du Var
Union Républicaine
Union Républicaine de l'Arrondissement d'Allais
Var
Vie Toulonnaise
Viganais

COTES DE NOUVELLE-CALEDONIE

Bulletin du Commerce
France Australe
Nouvelles-Calédoniennes

COTES DE LA REUNION

Annales Maritimes et Coloniales
Courrier de Saint-Pierre
Courrier Républicain
Créole de l'Île de La Réunion
Créole du Lundi
Démocratie
Journal Communal de l'Île de La Réunion
Journal de l'Île de La Réunion
Malle
Moniteur
Nouveau Salazien
Patrie Créole
Peuple
Port de Saint-Pierre
Progrès
Quotidien
Témoignages

COTES DE MAYOTTE

Al Balad
Lettre de Malango
Mayotte Hebdo
Upanga

Annexe 4. Un exemple de RETEX : celui de la gestion de crise des 25-26 octobre 2010

Dans le cadre du programme PREPARTOI, un RETEX a été réalisé concernant la gestion de crise du tsunami des 25-26 Octobre 2010 [sous presse]. En voici quelques extraits traduits.

« Un Plan de Secours Spécialisé Tsunami (PSS Tsunami) existe pour La Réunion et a été approuvé par l'Arrêté préfectoral n°1773 du 16 juillet 2008. Le PSS Tsunami[26] fournit un guide pour l'interprétation des bulletins d'information ou d'alerte diffusés par le PTWC -JMA et le déclenchement d'alertes locales. Il considère la localisation et la magnitude du séisme potentiellement tsunamigène pour en déduire un niveau d'alerte et des mesures d'information et de sauvegarde. Au total, 11 zones sources sont considérées, essentiellement localisées sur la marge indonésienne. Cinq classes de magnitude sont établies à partir de Mw = 7,5. En dessous de cette magnitude, La Réunion est considérée comme non concernée par un risque de tsunami.

Le PSS attribut à Météo-France le rôle de veille et de transmission des bulletins d'alerte du PTWC-JMA à la Préfecture. La Préfecture est l'autorité chargée par le PSS de prendre la décision de déclencher ou non un niveau d'alerte jaune, orange ou rouge. Après visa du Préfet ou de son représentant, l'alerte est diffusée par différents moyens.

Le 25 octobre 2010, après réception du bulletin du PTWC indiquant un risque local pour l'Indonésie, Météo-France indique à la Préfecture que La Réunion n'est pas concernée, considérant qu'une alerte locale pour l'Indonésie signifie une absence de probabilité d'effets régionaux ou transocéaniques.

Cette interprétation de Météo-France - qui n'a d'après le PSS qu'un rôle de transmission et non d'interprétation - entraine ainsi le non suivi du PSS. Ce suivi aurait entrainé le déclenchement d'une alerte de niveau orange correspondante à une hauteur de *runup* attendue comprise entre 0 et 2 m. Le suivi du PSS aurait engendré la mise à quai des embarcations des ports de plaisance et l'interdiction d'activités en bord de mer. Les navires marchands auraient été maintenus ou envoyés au large. Les 25 et 26 octobre 2010, l'alerte descendante n'est pas activée. C'est l'inverse qui se produit : l'information est transmise du bas de la chaine d'alerte (populations et autorités portuaires) jusqu'à la Préfecture (Figure 128).

[26] Disponible en ligne : http://www.risquesnaturels.re/pdf/PSS%20TSUNAMI.pdf

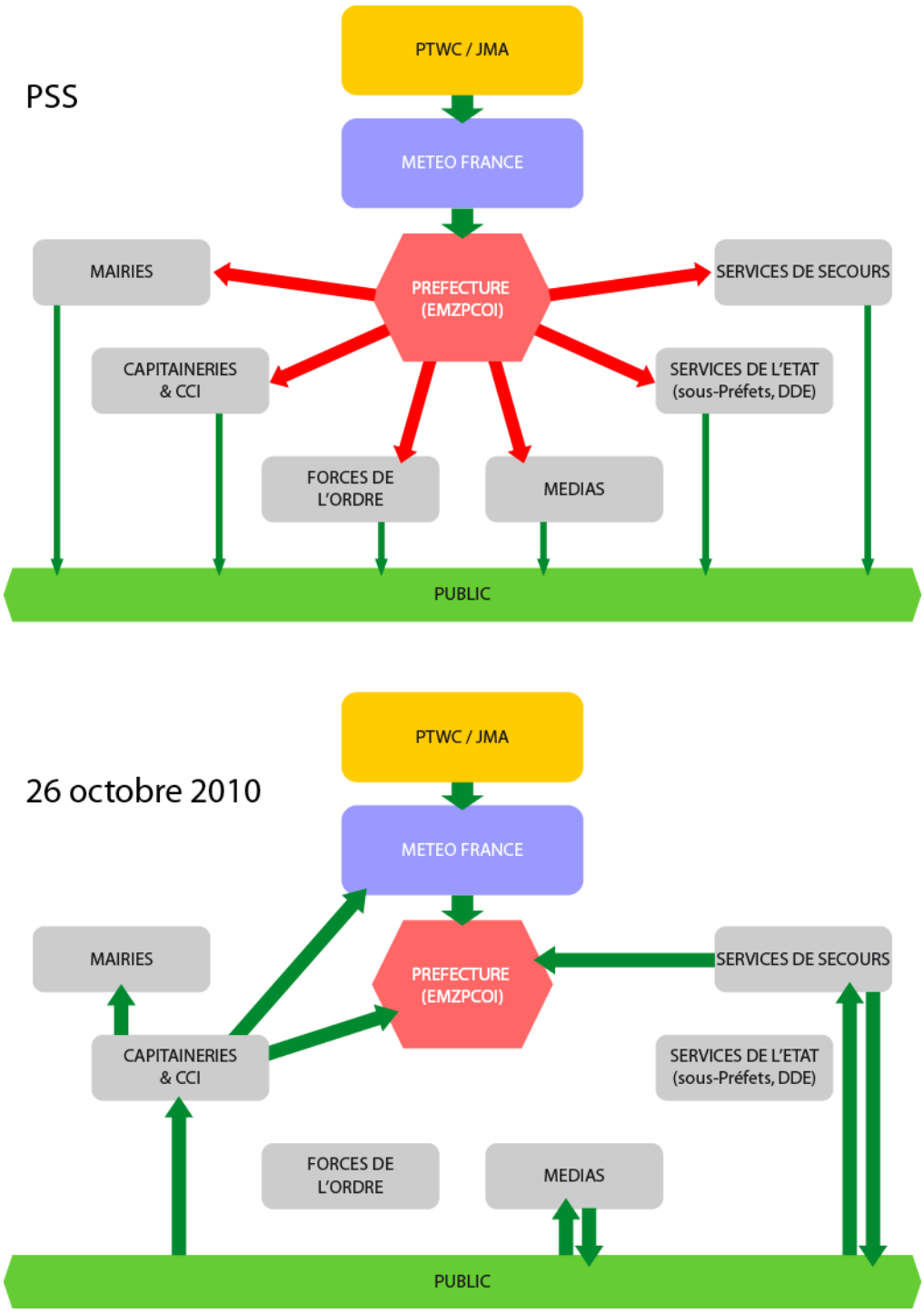


Figure 128. Protocole de diffusion de l'alerte prévu par le PSS et alerte remontante du 26 octobre 2010.

Pêcheurs et plaisanciers ont observé les premiers effets du tsunami à partir de 2:30 LT le 26 dans 3 ports réunionnais (Figure 129).

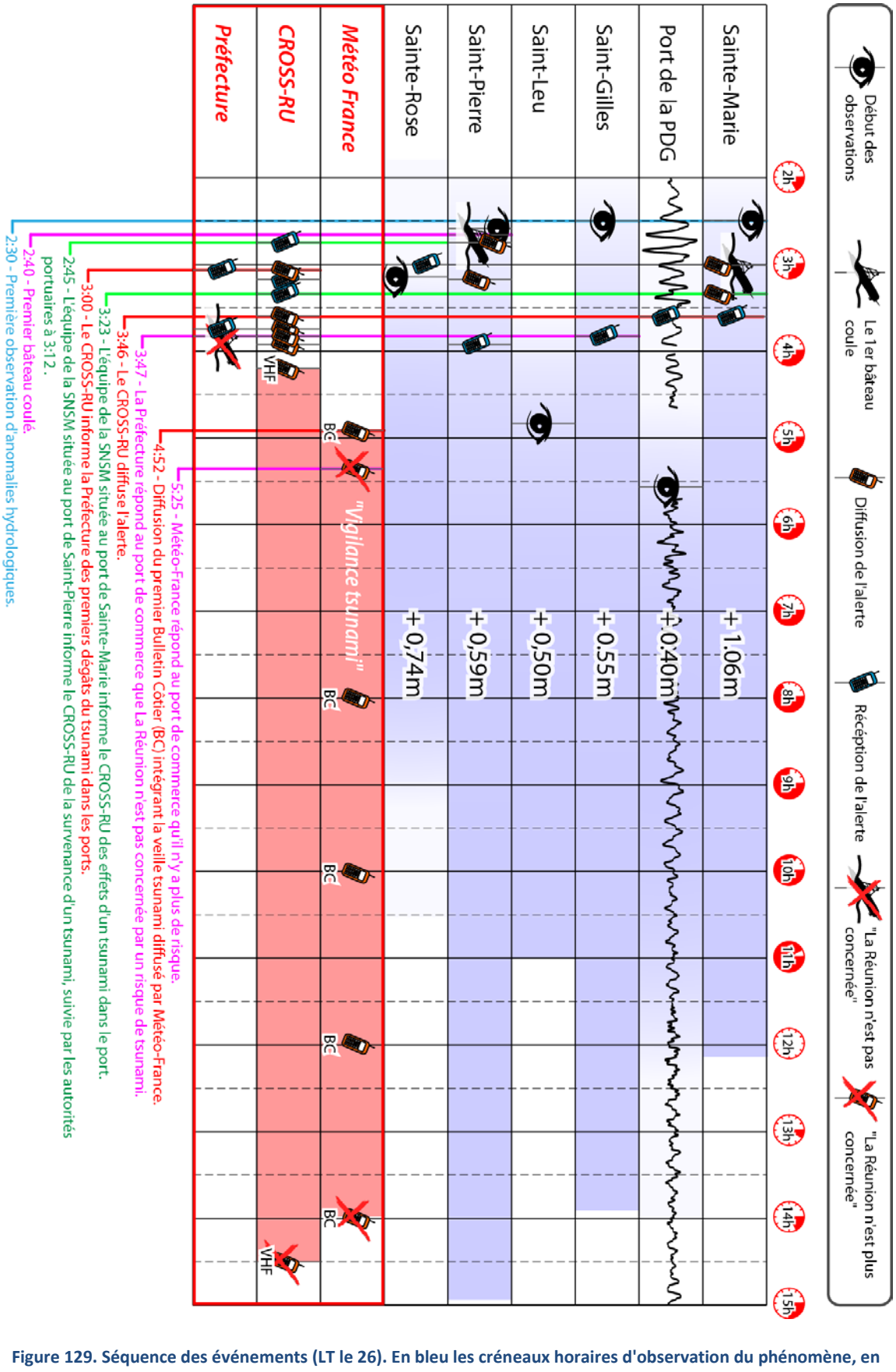


Figure 129. Séquence des événements (LT le 26). En bleu les créneaux horaires d'observation du phénomène, en surimpression les élévations du niveau océanique générés dans chaque port.

C'est au port de Saint-Pierre que les effets sont les plus importants, avec une surcote de plus d'1 m. A 2:50 LT, les autorités portuaires, alertées par des plaisanciers, transmettent l'alerte au CROSS-RU l'informant des perturbations hydrologiques observées et de la perte d'une embarcation. Près de 30 minutes plus tard, la SNSM basée au port de Sainte-Marie alerte à son tour le CROSS-RU. Ce n'est qu'à 3:46, près d'1h après le premier appel des autorités portuaires de Saint-Pierre que le CROSS-RU active la “Vigilance tsunami” (mesure de précaution non prévue dans le PSS), informant l'ensemble des autorités portuaires d'une menace tsunami. Pêcheurs et plaisanciers sont officiellement alertés par VHF à 4:15 LT.

Malgré la réception de plusieurs appels l'informant des effets perçus dans les ports, la Préfecture maintient sa position et n'engage aucune mesure de mise en sureté des personnes et biens exposés. La Préfecture réfute l'existence d'un risque de tsunami lorsqu'elle est contactée à 3:47 LT par les autorités du port de commerce. Ces mêmes autorités contactent alors Météo-France qui les renseigne à 5:25 LT : "La Réunion n'est plus concernée" par un risque tsunami. Par précaution, les autorités du Port Est interdisent l'accès au port aux navires en approche, leur demandant de rester au large. A noter que Météo-France informe les usagers du risque de tsunami de 4:32 à 14:00 LT le 26 par l'intermédiaire de son Bulletin Côtier ».

Annexe 5. Caractéristiques du produit Litto3D

PROJET LITTO 3D : LA RÉUNION ET SON LITTORAL EN RELIEF

« La technologie au service de l'environnement »

Objectifs

Le projet Litto 3D repose sur le partenariat du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) et de l'IGN (Institut Géographique National). Suite aux catastrophes de l'Erika et du Prestige, l'Europe a vraiment pris conscience de l'importance du littoral et a recommandé le 30 mai 2002 aux états membres de procéder à un inventaire détaillé du littoral.

Le produit Litto3D est une base de données altimétrique unique et continue terre-mer donnant une représentation tridimensionnelle de la forme et de la position du sol sur l'ensemble de la frange littorale. Bathymétrie et altimétrie sont alors mises en relation, chose qui auparavant n'avait jamais été effectuée entre ces deux organismes.

Contrairement à la métropole où le Litto3D se réserve des relevés d'un littoral linéaire et continu, La Réunion (ainsi que Mayotte) a eu la chance de bénéficier d'un relevé sur la totalité de son territoire du fait de sa surface relative.

Le but final du projet Litto 3D est d'obtenir une connaissance plus précise des milieux marins, littoraux et terrestres.

Spécificités

Ce référentiel couvre l'ensemble de l'île en intégrant la zone côtière jusqu'à une profondeur de l'ordre de 40-50 m, ce qui représente une surface de 450 km² pour le volet mer et 2500 km² pour le volet terrestre.

À La Réunion, le produit livré correspond a un modèle numérique de terrain (MNT) continu terre-mer avec des précisions respectives de 20 cm en « Z » (précision altimétrique) pour une « maille » ou résolution de 1 m sur le domaine terrestre et de 30 cm en « Z » pour 5 m de résolution sur l'espace marin.

Concernant, le « Cœur de l'île » (hors partie littorale intégrée dans Litto3D), une précision en Z de 20 cm (1 m sur les zones arborées de rempart) et un maillage de 5 m sont garantis comme limite minimale par l'IGN.

À titre de comparaison, l'actuel référentiel possède une résolution de 2 à 8 m selon les zones pour un maillage de 25 m.

Principe d'acquisition

- **partie émergées - Lidar* topographique**

Un lidar topo est un distance-mètre laser (dans les longueurs d'onde proche infra-rouge) porté par un vecteur aérien (un avion en général). Le laser émet des impulsions à haute fréquence (quelques dizaines de kilohertz). Un système de balayage (en général un miroir oscillant) dévie le faisceau laser de part et d'autre de la trace de l'avion, de façon à couvrir une bande de terrain en un seul passage.

- **partie immergée - Lidar bathymétrique**

Les levés bathymétriques sont réalisés par les technologies lidar bathymétrique (et un sondeur multifaisceau pour les eaux profondes). Le lidar bathymétrique ne peut pénétrer la mer que sous certaines conditions de clarté de l'eau.

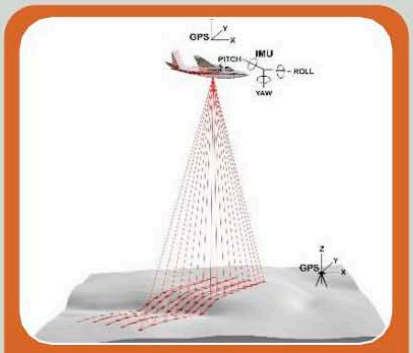
- **calcul de coordonnées**

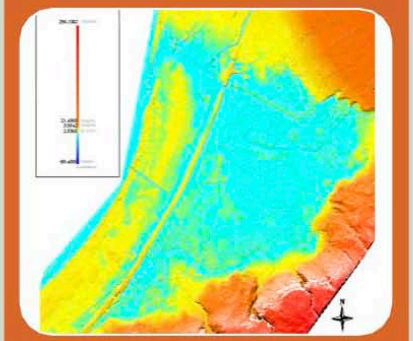
La distance à un objet ou à une surface est donnée par la mesure du délai entre l'impulsion et la détection du signal réfléchi. Afin de déterminer des hauteurs dans un repère absolu, un lidar doit être associé à un système de positionnement (GPS par exemple) et une centrale d'attitude.

Une fois l'acquisition terminée, on obtient une densité de 1 point/25m² pour la partie littorale et de 2 points/m² pour la partie terrestre.

Les éléments de sursol (bâtiments, végétation, etc.) sont post-traités afin d'obtenir un Modèle Numérique de Terrain décrivant le sol.

Le Litto 3D est disponible sous deux formes : un semis de points tridimensionnels et un modèle numérique de terrain (MNT).





Quelques exemples

1 - Principe d'acquisition
2 - Rivière Saint-Denis
3 - Cirque de Cilaos
4 - Saint-Paul Centre

*LIDAR : Light Detection and Ranging

Source : extrait de MEEDDM [2011].

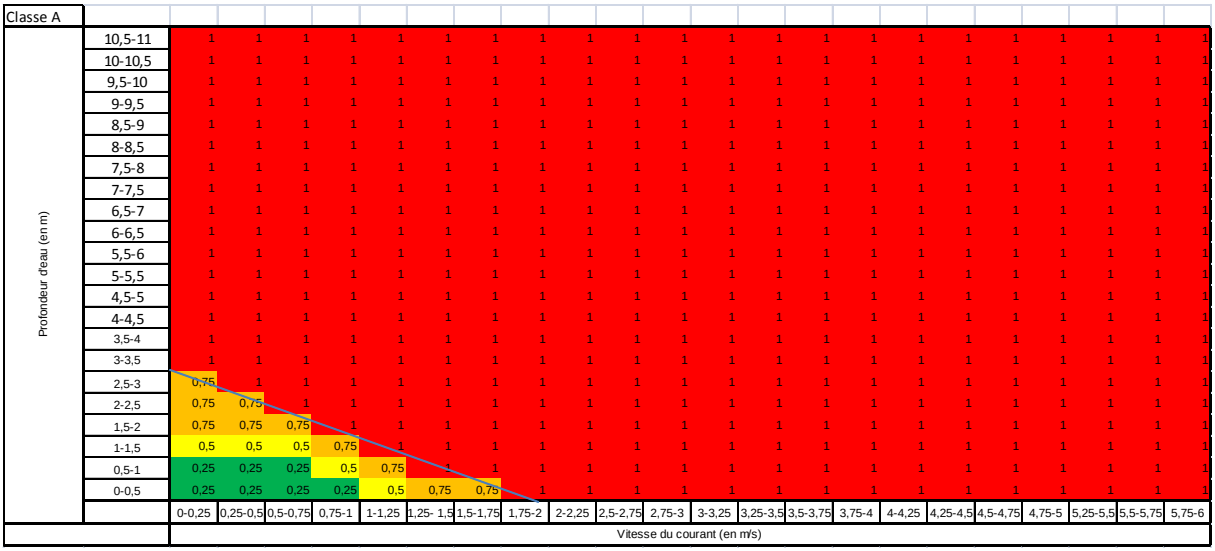
Annexe 6. Matrices de probabilité de décès des individus en fonction de la hauteur d'eau et la vitesse du courant

Dans le cadre du programme MAREMOTI, des matrices de probabilité de décès ont été développées [Leone *et al.* 2011b]. Elles permettent d'évaluer la probabilité de décès des individus qu'ils soient à l'intérieur ou à l'extérieur d'un bâtiment en se fondant sur les hauteurs et vitesses des flux submergeant.

A L'INTERIEUR D'UN BATIMENT

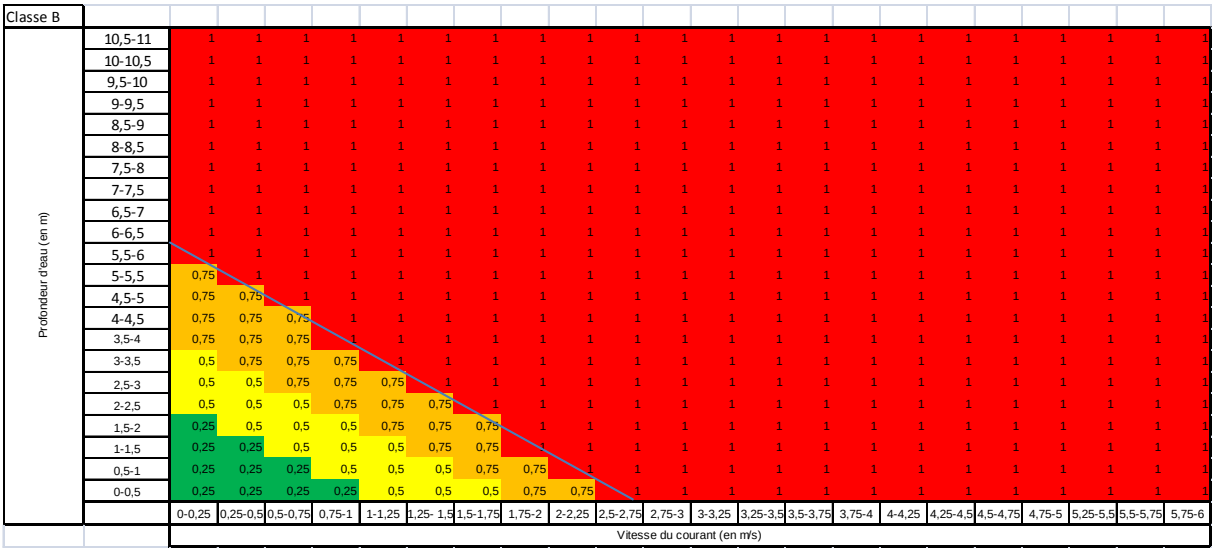
Probabilité de décès pour une personne située à l'intérieur d'un bâtiment, au rez-de-chaussée				
Code couleur	**Probabilité de décès**	**Facteurs dominants**	**Description**	**Facteurs aggravants probables**
1	Très élevée	Facteur structural : destruction totale du bâtiment	Dans cette situation la probabilité de décès pour une personne à l'intérieur d'un bâtiment, est à son maximum. Les constructions sont structurellement compromises par le flot d'inondation parfois jusqu'à la destruction totale du bâtiment.	Facteur structural : présence de grandes ouvertures
0.75	Elevée	Facteurs psychosociologiques : comportement à risque des individus face à la catastrophe. Facteurs géographiques : proximité d'un espace refuge	Une minorité de personnes pourra trouver refuge, par exemple en accédant à l'étage du bâtiment (en supposant qu'il y en est un). Cependant, il faut que les individus prennent les décisions les plus rationnelles. Certaines personnes peuvent entreprendre des activités risquées comme la conduite dans l'eau ou la prise de risques inutiles dans les eaux.	
0.5	Moyenne	Facteurs physiologiques : âge, sexe. Facteurs géographiques : proximité d'un espace refuge	Les décès vont probablement être concentrés parmi les personnes les plus vulnérables par exemple les enfants, les personnes âgées ou encore les personnes handicapées. Ces personnes malgré leur mobilité réduite pourraient atteindre un espace refuge proche (étage).	
0.25	Faible	Facteurs géographiques	Les personnes prisent dans le flot d'inondation sont en danger.	
0	Nulle à très basse			

CLASSE A



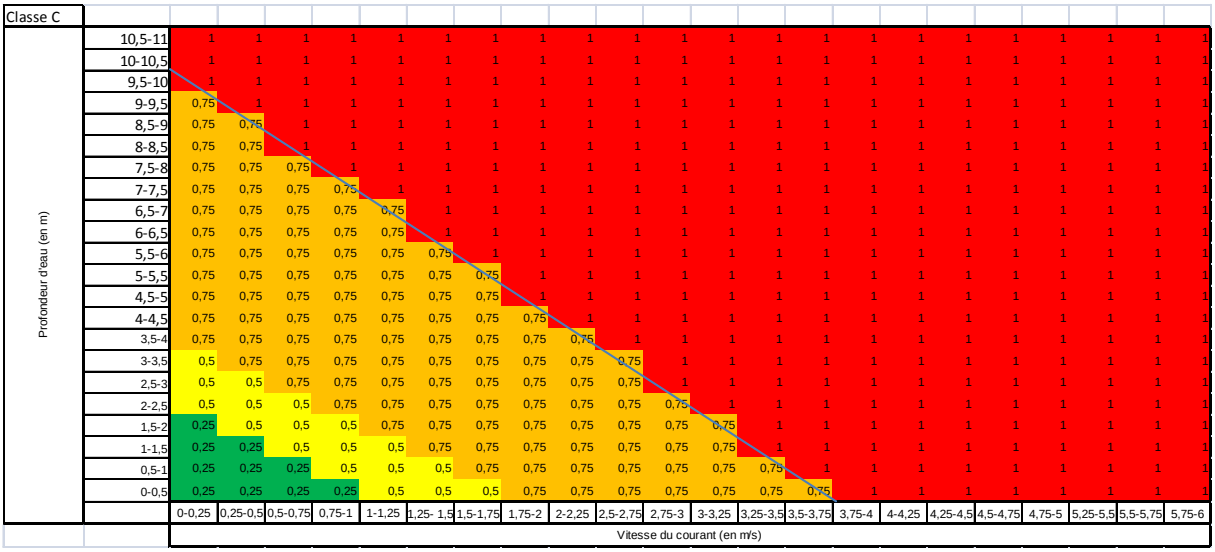
Facteur aggravant : si grande ouverture et PDC > 0 and PDC < 1, PDC+0.25.

CLASSE B



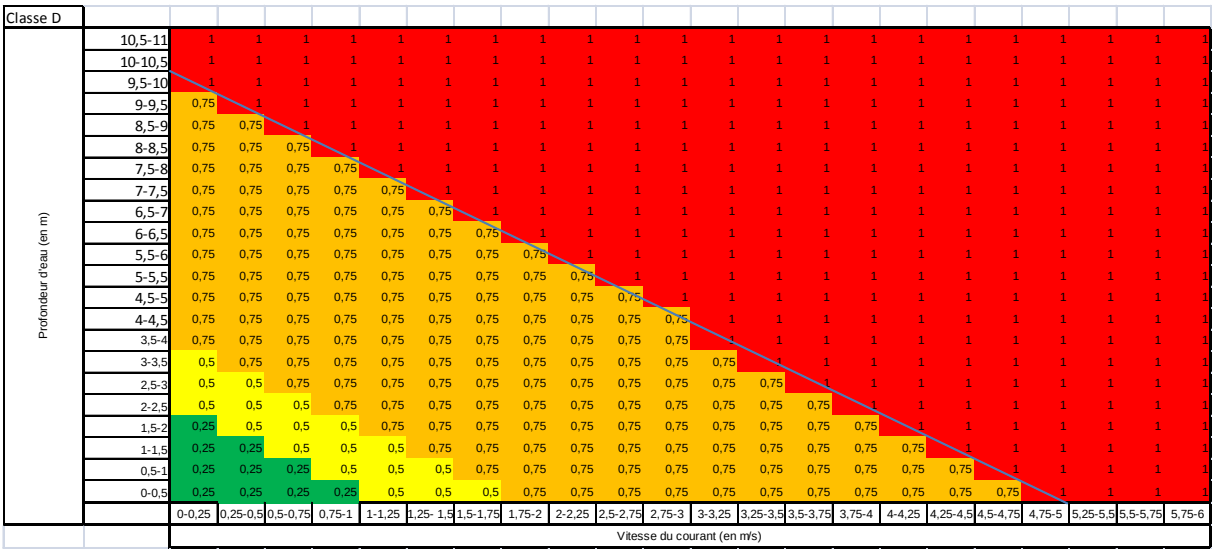
Facteur aggravant : si grande ouverture et PDC > 0 and PDC < 1, PDC+0.25.

CLASSE C



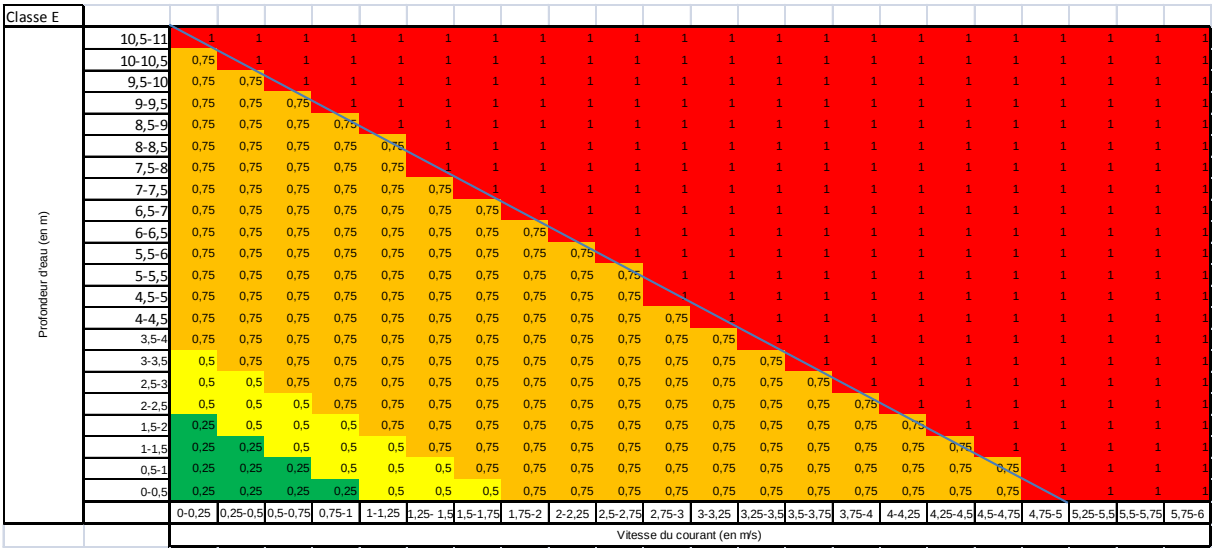
Facteur aggravant : si grande ouverture et PDC > 0 and PDC < 1, PDC+0.25.

CLASSE D



Facteur aggravant : si grande ouverture et PDC > 0 and PDC < 1, PDC+0.25.

CLASSE E



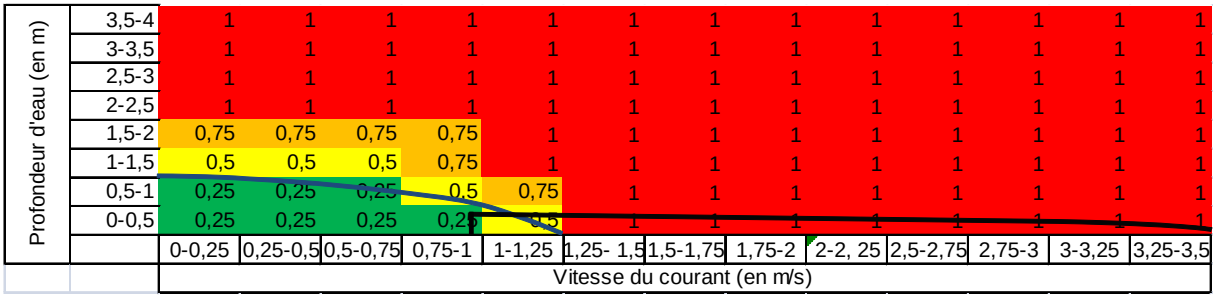
Classe E	Profondeur d'eau (en m)	0-0,25	0,25-0,5	0,5-0,75	0,75-1	1-1,25	1,25- 1,5	1,5-1,75	1,75-2	2-2,25	2,5-2,75	2,75-3	3-3,25	3,25-3,5	3,5-3,75	3,75-4	4-4,25	4,25-4,5	4,5-4,75	4,75-5	5,25-5,5	5,5-5,75	5,75-6
	10,5-11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	10-10,5	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	9,5-10	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	9-9,5	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	8,5-9	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	8-8,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	7,5-8	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	7-7,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	6,5-7	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	6-6,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	5,5-6	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	5-5,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	4,5-5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	4-4,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3,5-4	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3-3,5	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2,5-3	0,5	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1
	2-2,5	0,5	0,5	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1
	1,5-2	0,25	0,5	0,5	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1
	1-1,5	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1
	0,5-1	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1
	0-0,5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1
		Vitesse du courant (en m/s)																					

Facteur aggravant : si grande ouverture et PDC > 0 and PDC < 1, PDC+0.25.

A L'EXTERIEUR D'UN BATIMENT

La probabilité de décès pour une personne située à l'extérieur d'un bâtiment				
Code couleur	**Probabilité de décès**	**Facteurs dominants**	**Description**	**Facteurs aggravants probables**
1	Très élevée	Facteurs géographiques : proximité d'un espace refuge	L'exposition au risque de l'individu est plus importante lorsqu'il est situé à l'extérieur d'un bâtiment. Il est directement exposé à l'aléa, pour de telles vitesses et hauteurs d'eau, la probabilité de décès d'une personne est maximale.	Facteurs géographiques : densité de débris. A l'intérieur d'un véhicule
0.75	Elevée	Facteurs psychosociologiques : comportement à risque des individus face à la catastrophe. Facteurs géographiques : proximité d'un espace refuge	Une minorité de personnes pourra s'abriter, à condition qu'un espace refuge soit suffisamment proche. Cependant, il faut que les individus prennent les décisions les plus rationnelles. Certaines personnes peuvent entreprendre des activités risquées comme la conduite dans l'eau ou la prise de risques inutiles dans les eaux.	
0.5	Moyenne	Facteurs physiologiques : âge, sexe. Facteurs géographiques : proximité d'un espace refuge	Les décès vont probablement être concentrés parmi les personnes les plus vulnérables par exemple les enfants, les personnes âgées ou encore les personnes handicapées. Ces personnes ne pourront pas atteindre un espace refuge à temps.	
0.25	Faible	Facteurs géographiques	**L**es personnes prisent dans le flot d'inondation sont en danger.	
0	Nulle à très basse			

DENSITE DE DEBRIS FAIBLE



DENSITE DE DEBRIS MOYENNE

Profondeur d'eau (en m)	0-0,25	0,25-0,5	0,5-0,75	0,75-1	1-1,25	1,25- 1,5	1,5-1,75	1,75-2	2-2, 25	2,5-2,75	2,75-3	3-3,25	3,25-3,5
3,5-4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3-3,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2,5-3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2-2,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1,5-2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1-1,5	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,5-1	0,5	0,5	0,5	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0-0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1
	Vitesse du courant (en m/s)												

La densité moyenne équivaut à une probabilité densité faible +0,25.

DENSITE DE DEBRIS FORTE

Profondeur d'eau (en m)	0-0,25	0,25-0,5	0,5-0,75	0,75-1	1-1,25	1,25- 1,5	1,5-1,75	1,75-2	2-2, 25	2,5-2,75	2,75-3	3-3,25	3,25-3,5
3,5-4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3-3,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2,5-3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2-2,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1,5-2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1-1,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,5-1	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0-0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Vitesse du courant (en m/s)												

La densité forte équivaut à une probabilité densité faible +0,5.

Annexe 7. Comparaison graphique des effets des tsunamis connus dans les collectivités françaises

La Figure 130 illustre sous forme de frises chronologiques l'ensemble des événements connus ayant affecté les collectivités françaises. Cette figure montre pour chaque événement les valeurs maximales de *runup* mesurées, leurs conséquences (pertes matériels et/ou humaines), ainsi que les délais entre déclenchement à leur source et impact à la côte.

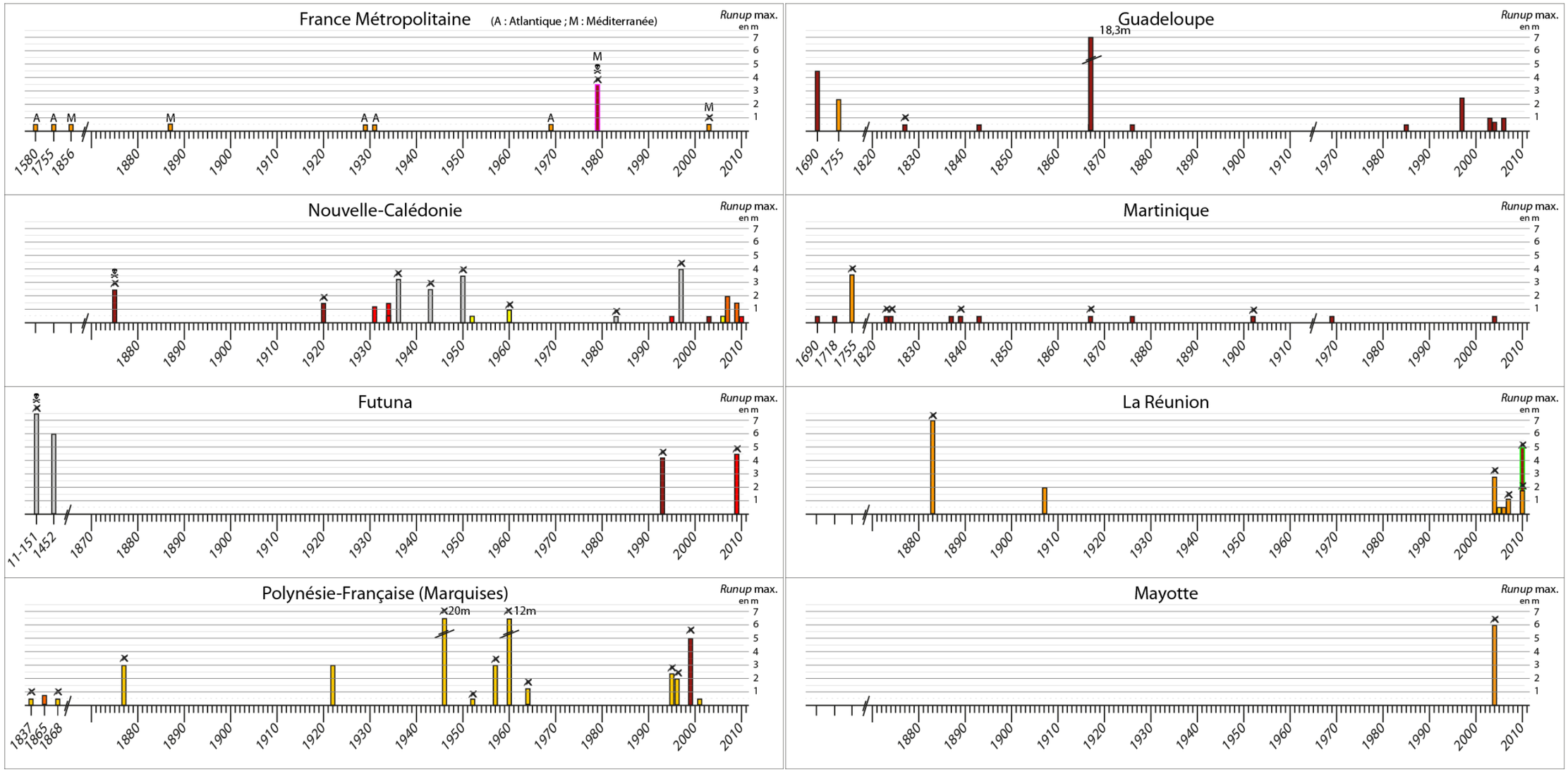


Figure 130. Bilan comparatif de l'aléa tsunami et de ses effets sur les littoraux français.

XL

Résumé et mots clés

Résumé

Bien souvent segmentées, les approches visant à évaluer le risque tsunami se contentent tantôt d'évaluer l'aléa, tantôt d'estimer les enjeux et leurs vulnérabilités, ce bien souvent de manière disciplinaire. Les différents spécialistes des composantes du risque (géophysiciens, modélisateurs, géographes, économistes, sociologues, etc.) travaillent à des échelles différentes, parlent un langage qui leur est propre. Les opérationnels de la sécurité civile tentent tant bien que mal d'y puiser des solutions de gestion de crise.
La démarche proposée dans cette thèse consiste à fédérer l'ensemble de ces composantes pour une évaluation intégrée du risque tsunami. Elle présente des méthodes relatives à l'évaluation : (1) de l'historique de l'aléa et sa modélisation selon différents scénarios probables, (2) des enjeux humains et structurelles suivant les dynamiques spatio-temporelles de la fréquentation humaine des lieux exposés à l'aléa (scénarios d'enjeux), et (3) des capacités de réponse des institutions en charge de la sécurité civile. La confrontation des scénarios d'enjeux et de gestion de crise aux scénarios d'aléas permet une évaluation des dommages potentiels dans des conjonctures spécifiques.
La démarche, appliquée à trois sites exposés à forts enjeux, en métropole (Antibes) comme en Outre-mer (La Réunion et Mayotte), apporte ainsi une méthode d'évaluation complète du risque tsunami. Elle fournit aux opérationnels des outils et des solutions de gestion de crise (sélection de zones refuge, modélisation des temps d'évacuation etc.), et des recommandations pour limiter les impacts de futurs événements (préparation et information des populations). Elle fait le lien entre sciences dures, sciences sociales et gestionnaires du risque à travers une approche intégrée et appliquée de l'évaluation du risque.

Mots clés

Gestion des territoires ; évaluation du risque ; gestion du risque ; tsunami ; géomatique ; modélisation ; simulation multi-agents ; France.

The tsunami risk in France: methodological contributions for a scenario-based integrated tsunami risk assessment.

Abstract

The existing approaches for the assessment of the tsunami risk mostly consist in assessing the hazard and the various vulnerabilities independently, in a segmented way. The various specialists involved in evaluating the risk components (geophysicists, modelers, geographers, economists, sociologists, etc.) work at different scales, speak their own language. Civil defense operationals somehow try to draw solutions for crisis management.
The approach proposed in this thesis is to combine all of the above mentioned components to provide for an integrated tsunami risk assessment. It presents methods for the assessment of: (1) the history of the hazard and its modeling, based on various scenarios (hazard scenarios), (2) the human and structural stakes through a dynamic approach (vulnerabilities scenarios), and (3) the capacity of institutions in charge of civil defense to provide appropriate response (crisis management scenarios). The combination of these hypothetical situations provides a spatial assessment of potential damages under specific circumstances.
The approach developed in this thesis is applied to three sites of important stakes, in continental France (Antibes) as in Overseas territories (La Réunion and Mayotte), and provides a method for a comprehensive assessment of tsunami risk. It provides operationals with tools and solutions for crisis management (selection of tsunami-shelters, modeling of evacuation times, etc.), as well as recommendations to limit the impact of future events (awareness and preparedness). This thesis makes the connection between hard sciences, social sciences and risk managers through an integrated and applied approach of risk assessment.

Key words

Territory management; risk assessment; risk management; tsunami; geomatics; modeling; multi-agent system; France.