



HAL
open science

Le risque de tsunami dans les Alpes-Maritimes, quelles réalités ? Quelles méthodes d'analyses de l'aléa et de la vulnérabilité ?

Laurie Boschetti

► To cite this version:

Laurie Boschetti. Le risque de tsunami dans les Alpes-Maritimes, quelles réalités ? Quelles méthodes d'analyses de l'aléa et de la vulnérabilité ?. Sciences de la Terre. Université Côte d'Azur, 2020. Français. NNT : 2020COAZ4050 . tel-03177637

HAL Id: tel-03177637

<https://theses.hal.science/tel-03177637v1>

Submitted on 23 Mar 2021

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

Le risque de tsunami dans les
Alpes-Maritimes, quelles réalités ?
Quelles méthodes d'analyses de l'aléa et de
la vulnérabilité ?

Laurie BOSCHETTI

Laboratoire Géoazur – UMR 7329

**Présentée en vue de l'obtention
du grade de docteur en Sciences de la Terre
et de l'Univers
de l'Université Côte d'Azur
Dirigée par : Emmanuel TRIC
Co-encadrée par : Damienne PROVITOLO
Soutenue le : 2 octobre 2020**

Devant le jury, composé de :
Johnny DOUVINET, Professeur, Avignon
Université
Franck FIORELLI, Commandant, SDIS 06
Franck LAVIGNE, Professeur, Université Paris 1
Damienne PROVITOLO, Directrice de
recherche, Géoazur
Damien SERRE, Professeur, Université de la
Polynésie Française
Emmanuel TRIC, Professeur, Université Côte
d'Azur

Ecole doctorale Sciences Fondamentales et Appliquées
Unité de recherche : Laboratoire Géoazur – UMR 7329

Thèse de doctorat

Présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences
Spécialité Sciences de la Planète et de l'Univers
de l'Université Côte d'Azur

par

Laurie BOSCHETTI

Le risque de tsunami dans les Alpes-Maritimes, quelles réalités ? Quelles méthodes d'analyses de l'aléa et de la vulnérabilité ?

Thèse dirigée par Damienne PROVITOLO et Emmanuel TRIC

Soutenue le 2 octobre 2020

Devant le jury composé de :

Rapporteurs :

Johnny DOUVINET, Professeur, Avignon Université

Franck LAVIGNE, Professeur, Université Paris 1

Examineur :

Damien SERRE, Professeur, Université de la Polynésie Française

Invité :

Franck FIORELLI, Commandant, SDIS 06

Directeurs de thèse :

Damienne PROVITOLO, Directrice de recherche, Géoazur

Emmanuel TRIC, Professeur, Université Côte d'Azur

*A mes parents, mon frère,
et à toutes les personnes parties trop tôt*

RESUME

Les tsunamis sont des phénomènes complexes qui se produisent à la suite de différents types d'évènements (tremblements de terre, glissements de terrain, éruptions volcaniques). Leur ampleur varie selon la source et l'intensité de l'évènement précurseur, la morphologie du plateau continental, la distance aux côtes. Bien que la grande majorité des tsunamis se produit dans le Pacifique, environ 15 % des évènements mondiaux (NOAA, 2017) sont survenus en Méditerranée. Le littoral des Alpes-Maritimes n'est pas épargné puisque deux évènements majeurs ont impacté ces côtes : le tsunami du 23 février 1887, qui fait suite au séisme Ligure (origine sismique), et le tsunami du 19 octobre 1979, généré par l'effondrement d'une partie des travaux de l'aéroport de Nice (origine gravitaire). Les Alpes-Maritimes sont un territoire qui regroupe de nombreux enjeux notamment humains, économiques, matériels, principalement sur sa frange littorale. De plus, la population est peu sensibilisée à ces évènements du fait de leur faible fréquence. La présence et l'augmentation des enjeux, associée à la potentialité de la survenue d'un évènement, ont amené la Commission Océanographique Intergouvernementale des Nations Unies à appeler à se préparer aux tsunamis en Méditerranée.

Le risque est mobilisé ici comme étant la combinaison de la survenue d'un phénomène, ici le tsunami, et de la vulnérabilité d'enjeux qui composent un territoire, le littoral azuréen. Nous avons ainsi cherché à savoir quel était le risque de tsunami le long du littoral azuréen. Pour se faire, une analyse détaillée de l'aléa et de la vulnérabilité a été nécessaire, avec pour chaque composante, une méthodologie particulière et la réalisation d'une cartographie. Une première étude se concentre sur l'analyse de l'aléa tsunami dans les Alpes-Maritimes, en identifiant et en caractérisant sa magnitude et son intensité. Celle-ci passe par la réalisation de simulations numériques qui permettent l'obtention de données brutes (*runup*, courant, étendue spatiale de l'inondation, etc.). Une nouvelle échelle d'intensité a été proposée afin de coupler les hauteurs d'inondation, les courants et les dégâts à la côte et en mer (vulnérabilité biophysique). Une seconde analyse s'est concentrée sur l'analyse du territoire grâce à l'étude de la vulnérabilité territoriale. Cette dernière se focalise sur les enjeux majeurs, c'est-à-dire les points stratégiques du territoire, faisant ressortir les espaces sensibles. Une fois ces deux composantes analysées séparément, leur combinaison a permis d'obtenir une évaluation du risque de tsunami sur le littoral. Deux méthodes ont été proposées : une première utilisant une approche indicielle (sous forme de trois niveaux d'indice) afin de combiner deux composantes du risque, celles de l'aléa et de la vulnérabilité ; une seconde par normalisation. Cette thèse multidisciplinaire, à la confluence entre sciences de la terre et sciences humaines, démontre que le risque de tsunami dans les Alpes-Maritimes existe et qu'il est à inclure dans la prévention des risques et dans la gestion du territoire.

Mots clés : risque, aléa, vulnérabilité, enjeux, tsunamis

ABSTRACT

Tsunamis are complex phenomena that can result from various natural events, such as earthquakes, landslides, or volcanic eruptions. Their amplitude is driven by source characteristics and intensity of the precursor event, continental shelf morphology, and distance to the coast. Although most of tsunamis are located in the Pacific ocean, 15 % of mondial events happened in the Mediterranean Sea (NOAA, 2017). The coastlines of the Alpes-Maritimes are not spared, and have been impacted by two main events : the February 23, 1887 tsunami, which followed the Ligurian earthquake, and the October 19, 1979 tsunami, caused by the collapse of a part of the new harbour construction at the Nice airport. The shoreline of the Alpes-Maritimes concentrates many human, economical, and material assets. Besides, because of the low tsunami frequency, its population is only poorly aware of the associated risk. The presence and the increased development of coastal assets, along with the potential occurrence an event, have led the Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations to call for preparedness for tsunamis in the Mediterranean Sea.

Here, risk is defined as the association of a phenomenon occurrence, *i.e.* a tsunami, with the vulnerability of a territory's assets, the Côte d'Azur coastline. We aim at identifying and characterizing tsunami risk along the French Ligurian Riviera. To do so, we analyze and produce hazard and vulnerability maps using specific methodologies. We first focus on tsunami hazard analysis in the Alpes-Maritimes, identifying and characterizing its magnitude and intensity. Numerical simulations were performed to obtain raw data (runup, current, spatial extent of the flood, etc.). We propose a new tsunami intensity scale combining flood heights, currents and damage to the coast and at sea (biophysical vulnerability). Second, we investigate the territorial vulnerability of the region, concentrating on its main strategic assets and highlighting sensitive areas. We then built on the separate analysis of these two components to assess the coastal tsunami risk. We use two different approaches: the first one is index-based (with three index levels), while the second is normalization-based. This multidisciplinary work, at the confluence between Earth and Human sciences, demonstrates that tsunami risk exists in the Alpes-Maritimes and that it should be integrated in risk prevention and in the gestion of the territory.

Key words : risk, hazard, vulnerability, issues, tsunami

REMERCIEMENTS

La thèse, mais quelle aventure ! On m'avait prévenu qu'il s'agissait d'une vraie expérience de vie et qu'il était difficile de l'expliquer sans l'avoir vécu. J'avais donc conscience que j'allais vivre quelque chose de peu commun, je ne m'attendais toutefois pas à une telle aventure humaine ! Je vais essayer de retranscrire ici ce périple et je m'excuse d'avance si j'oublie certains d'entre vous. Ces remerciements sont à l'image de cette thèse, c'est-à-dire beaucoup trop long, vous pouvez donc vous rendre directement à la partie vous concernant.

Mes premiers remerciements vont à Damienne Provitolo, qui me suit depuis le stage de Master 2 et qui m'a donné l'opportunité de poursuivre sur cette thèse. Bien que nos chemins scientifiques se soient éloignés, j'ai beaucoup appris de nos collaborations et de nos échanges sur le risque et la résilience. Merci de m'avoir permis d'assister à différents congrès nationaux et internationaux. Merci à Emmanuel Tric pour s'être lancé dans cette aventure. Bien que n'étant pas spécialiste du domaine et étant occupé par différentes responsabilités, il a toujours trouvé le temps pour être disponible.

Je souhaiterais remercier les membres du jury Johnny Douvinet, Franck Lavigne, Damien Serre et Franck Fiorelli d'avoir accepté d'examiner ce travail de thèse. Un merci particulier à Damien Serre qui a accepté de participer à la soutenance depuis l'autre bout du monde, à une heure peu commune pour une soutenance. Je le remercie également pour avoir fait partie de mon comité de thèse avec Sébastien Migeon. Merci à tous les deux.

Cette thèse avait pour partenaire socio-économique le SDIS 06. Je tiens à les remercier pour cela. Je souhaite adresser tous mes remerciements au Commandant Franck Fiorelli, pour sa disponibilité, sa bienveillance, sa gentillesse et pour m'avoir permis de rencontrer grand nombre de ses collègues que je remercie également. Merci au Lieutenant-Colonel Frédéric Castagnola, pour m'avoir fait participer à un module IMPACT ; au commandant Nicolas Franck, pour les informations qu'il nous a donné sur les inondations d'octobre 2015 ; au Commandant Maxime Yvrard, des pompiers de Monaco, pour nous avoir reçu et pris le temps d'échanger sur les résultats obtenus ; et à Sandra Giuglaris pour sa gentillesse, son écoute et nos différents échanges.

J'aimerais remercier les organismes financeurs de cette thèse : la région PACA et l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), pour les trois premières années. Je remercie tout particulièrement l'OCA qui a accepté de financer une thèse en Sciences Humaines. Puis l'Université de Nice pour le financement de la quatrième année via un ATER. Merci à Stéphane, Louis et Carole qui ont accepté de m'intégrer à l'équipe enseignante, ceci aura été l'occasion pour moi de tester mes capacités d'enseignement.

Je souhaiterais dire un grand merci au LabEx DynamiTe pour l'organisation de l'école d'été de Catane. Merci au comité d'organisation, Sandrine Robert, Franck Lavigne et Véronique Dupont, et aux différents intervenants. Je tiens particulièrement à remercier Franck pour son accessibilité et sa bienveillance. Je remercie également l'ensemble des participants, et plus particulièrement : Julie, Fanny, Pauline, Annabelle

et Virginia. Merci à Pierre qui a veillé à ce que tout se passe bien avant, pendant et après l'école d'été. J'ai grandement apprécié nos discussions. Ce fût une belle expérience pour moi que de me retrouver entouré de géographes et de gens qui comprenaient mon langage. Merci aux collègues du projet Com2SiCa pour les différents échanges que nous avons pu avoir, merci à Alexandra, pour ses paroles encourageantes, et merci à Alice pour les soirées improbables à Washington DC. Je tiens également à remercier Benoit pour les nombreuses discussions que nous avons pu avoir, plus intéressantes les unes que les autres. Je remercie plus largement l'ensemble des personnes qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de cette thèse.

Merci aux collègues du laboratoire

Le laboratoire est un endroit où un thésard passe énormément de temps, je remercie donc l'ensemble du personnel et de la direction pour la qualité de vie et l'ambiance qui règne au sein de Géoazur.

Je voudrais dire un énorme merci à Mansour Ioualalen, qui a pris le temps de m'expliquer une petite partie de son savoir sur les tsunamis et la modélisation numérique. Merci d'avoir toujours été à mes côtés, dans les bons et les mauvais moments, de n'avoir rien lâché et de m'avoir mené au bout, malgré de nombreuses discussions houleuses et de gros désaccord sur les volets vulnérabilité et risque de cette thèse.

Mes remerciements vont également à Christophe Larroque, pour le temps qu'il m'a accordé tout au long de cette thèse, que ce soit pour m'expliquer la géologie de la zone Ligure, les différents travaux réalisés par le passé, ou pour de relecture. Je souhaiterais également remercier Anthony et Lucie, pour les différents cours et échanges sur les tsunamis ; Philippe et Boris pour leurs conseils et leur écoute ; et Frédérique pour sa bienveillance.

Le laboratoire a la chance d'avoir un super service administratif qui fait un boulot génial en un temps record. Merci à toutes ! Un merci particulier à Sandrine, merci pour le temps que tu as pris pour m'écouter dans les moments de doutes. Merci à Valérie pour sa gentillesse et sa disponibilité ; à Candice pour toujours avoir facilité la paperasse liée aux missions ; à Véro, pour sa bienveillance et pour toujours rendre service (même à des heures improbables) ; à Emilie, Magalie et Fabienne.

Je souhaite remercier Corinne pour les différentes fêtes de la Sciences partagées. Mes remerciements vont également à Clémence pour son investissement au sein de l'OCA et pour m'avoir intégré à divers événements de vulgarisations scientifiques telle que la Nuit des Coupoles Ouvertes.

Ces cinq ans auraient été bien plus compliqués sans le service informatique. Merci pour les petits dépannages ou les gros débogages. Un merci tout particulier à JB qui a réinstallé 2 fois mon ordi en moins de deux ans. Lionel merci pour ton aide pour préparer la soutenance. Merci à David et Caroline pour vos aides diverses et variées.

Un ENORME merci à Jenny, la fée du labo ! Je ne sais même pas par où commencer. Merci pour tout ce que tu fais pour que tout le monde travaille dans de bonne condition. Tu te plies toujours en mille pour tout le monde. Merci de m'avoir aidé à changer de bureau plusieurs fois, merci pour les sauvetages d'ArcGis, les heures passées à m'aider à préparer les cartes ou encore les parties de belotes. Merci pour ton soutien, tu es là dans les bons comme dans les mauvais moments. MERCI !

Docteur Guillaume, un très grand merci à toi. Tu as été d'un énorme soutien, surtout sur la fin (qui s'est éternisée). Merci d'avoir pris du temps pour moi, que ce soit pour m'écouter et m'épauler ou pour parler science (même si c'était des sciences molles ^^). Tu as toujours été là pour me motiver, pour me soutenir et pour avoir les bons mots au bon moment. Je te remercie pour tout ça !

Gueorgui et ton rire tellement communicatif. Merci pour les moments partagés, souvent autour d'un café, d'une bière ou d'un verre de vin. Christophe, c'était un plaisir de partager cette dernière année à tes côtés, même si tu trouves toujours une excuse pour éviter les apéros. J'espère qu'un jour tu m'expliqueras la différence entre du Ricard et du Pastis ^^. Merci Cédric pour ton écoute, tes relectures de chapitres. C'était toujours sympa de jouer de la samba avec toi, même si tu joues à contre temps :-p. Monsieur Maurin ! Que de partie de rigolade avec toi ! On se croise au prochain buffet.

Merci aux collègues du midi, pour leur bonne humeur et leur bienveillance : Audrey, Laure, Marianne, Marie, Mireille, Yvonne, Christophe R., Davide, François, Jean-Xav, Marc, Sylvain.

Merci aux doctorants et post-doc

Au cours de ces 5 années, j'ai changé plusieurs fois de bureaux et de co-bureau. Merci à Luc et Maëlle pour les premières années de thèse. Maëlle tu as été d'une grande aide pour me renseigner sur toutes les galères administratives, toujours prête à répondre à mes questions de jeune doctorante et à vouloir m'enseigner l'art des plantes (j'ai malheureusement un don pour les faire mourir). Tu as longtemps été le liant entre les nouveaux et les anciens du labo, toujours à inclure les arrivants, à organiser pleins d'activités et de soirées. J'ai adoré partagé le bureau avec toi. Luc, merci pour ta chaise de bureau, elle a été d'une grande utilité sur toute la fin de thèse.

J'ai ensuite eu la chance de partager le bureau avec Carlo (dit le moche ou Charle miller) et Jean (dit Jeanjean ou Johnny Little Princess). Bureau qui s'est rapidement transformé en véritable colocation. Ce bureau ne serait pas complet sans y inclure Pavlos. Tu étais le rayon de soleil du bureau. Un merci ne suffit pas à dire l'importance que vous avez eu au cours de cette thèse. On m'a souvent demandé comment je faisais pour bosser avec vous dans le bureau, mais personne ne se rend compte que c'est en grande partie grâce à vous que je suis arrivée au bout. Merci pour tous ces moments partagés (au labo et en dehors), pour vos encouragements, vos mots gentils, les cafés et les bières, les volleys et les parties de pétanques-fléchettes (il va vraiment falloir faire breveter ce jeu).

Théa, la reine des moches, la déesse de l'alcool, la grosse #\$\$%&, tous ces petits surnoms te vont tellement bien. Il y a tellement de choses pour lesquelles je dois te remercier. Déjà merci d'être là, d'être un véritable pilier, surtout sur cette fin de

Remerciements

thèse. Un énorme merci pour avoir été mon coach de soutenance ! Pour avoir repris plusieurs fois les slides et pour avoir subis de très nombreuses répètes. Bref, merci pour tout ce que tu as fait pour moi que ce soit pour la thèse ou pour le perso. T'es une meuf en or.

Un grand merci à mes voisines de pallier Albane et Alex. Vous avez débarqué il y a une année, vous faites parties des bébés doctorantes et pourtant vous avez pris une place hyper importante dans mon quotidien. Vous êtes aussi des nanas en or, toujours prêtes à faire plaisir aux gens, toujours dispo et toujours là avec une petite phrase motivante. Alex t'es une tête en bois comme j'en connais peu et Albane tu bouges ton œuf comme personne, bref vous faites un sacré duo.

Un énorme merci à mon comité de soutien de fin de thèse (Théa, Albane, Alex, Carlo, Jean, Guillaume et Jenny) ! Vous avez été super importants que ce soit pour m'aider à trouver la motivation, pour garder le moral, ou tout simplement pour me faire rire. Bien que n'étant pas du domaine, vous m'avez quand même donné des conseils précieux et votre présence à vraiment fait la différence. Donc Merci !!!

Zoé, ma compère de thèse et de la Yaute. On a eu des parcours et des difficultés similaires, qui font que tu es certainement celle qui me comprend le mieux. Merci pour les heures passées ensemble à parler (très voir trop souvent de la thèse), pour ta bonne humeur, ton enthousiasme et ta capacité de cohésion. Sara, tu resteras mon idole ! J'admire ta capacité à gérer ta thèse et ta vie privée en parallèle. Alors que je ne m'en sortais déjà pas avec ma thèse, tu as réussi à faire une thèse, te marier, construire une maison et faire 2 magnifiques bébés ! Et bien sûr tu es toujours dispo pour les copines quand elles ne vont pas bien. T'es une super personne et une super maman. Merci à toi, Vincent, Zayn et Ayla.

Nico, tu resteras celui avec qui j'ai regardé le dernier épisode de GOT. Merci pour tes encouragements, tes conseils (sur la thèse et sur les films) et tes meringues !!! Flo, tu as une motivation et une positivité à toute épreuve. T'es le roi de la blague improbable. Je ne les comprends pas toutes mais j'avoue que beaucoup me font rire. Avec Nico vous êtes toujours là pour les gens, pour organiser les cadeaux et faire des gâteaux (qu'on adore manger). Merci à vous 2 !

Serge, je t'ai découvert sur le tard, surtout pendant le confinement et ça a été une très belle surprise. J'ai découvert quelqu'un de super marrant et qui dispose d'une grande capacité à déchiffrer mes dessins moches, ce qui n'est pourtant pas toujours évident. Encore merci pour les cadeaux Secret Santa ! Pierre, merci pour le soutien surtout autour du rendu et de la soutenance. Vu qu'on était quasi synchro on a vécu des choses similaires à très peu d'écart. De voir que ta soutenance s'était bien passée m'a beaucoup rassurée pour la mienne. Encore bravo Docteur !

Le labo est plein de latinos qui ont formé un gang bien sympa. Merci Hanz pour les cafés, Maria-José pour les anecdotes sur l'équateur, Carolina pour ta gentillesse, Hector, Tomas et Daniel pour votre bonne humeur et pour m'avoir permis de danser la salsa avec de « vrais » latinos (je peux cocher ça de ma *bucket list*), Daniel et Henri pour m'avoir fait découvrir les *arepas* et la culture vénézuélienne, Joseph pour tes encouragements. Diego, merci pour ta bienveillance, ta gentillesse, et pour avoir partagé avec moi ta vision de la vie et tes questionnements, j'ai beaucoup apprécié

nos discussions. J'espère pouvoir un jour aussi bien communiquer avec vous en espagnol que vous le faites en français.

Je remercie plus largement l'ensemble des doctorants : Caro, les discussions sont toujours intéressantes à tes cotés ; la *team* des italiens joueurs de volley Tiziano et Marco ; Christelle, merci pour l'organisation du Secret Santa ; une pensée particulière pour les futurs docteurs : Seb et Lionel ; la nouvelle brochette de doctorants : Josselin (qui essaie désespérément de me voler mon bureau) et Alexandre ; Asmae, Oubaida, Athul et tous les autres. Merci au post-doc, toujours partant pour des apéro plage, Andrea et Chao.

Merci aux anciens du labo

Une grosse pensée aux anciens doctorants, avec qui j'ai partagé plus ou moins de temps. Tout d'abord Stephen (dit Bibounet), rencontré sur sa fin de thèse donc en mode encore plus ronchon. Malgré tes perpétuelles plaintes et ta vision négative du monde, t'as un petit cœur tout mou. Merci pour tes encouragements sur la fin de thèse et pour avoir suivi ma soutenance au milieu de la nuit ! S'en suit forcément Alex, mon compère de café, de tartes citrons et de séries. Tu m'as énormément fait rire que ce soit par tes blagues, tes jeux de mots, ou par les (trop) nombreuses actions improbables dont toi seul a le secret. Merci à tous les deux pour les nombreuses heures passées au Roots et les nombreuses bières partagées. L'équipe du Roots ne serait complète sans Borhan (mon mari), merci pour ces moments.

Mathilde, ton grain de folie est contagieux, ainsi que ta bonne humeur. J'ai suivi tes pas culinaires sur la fin de thèse, non pas à base de pâtes au pesto, mais de pâte crème-ketchup. Tu resteras pour moi madame « Libérée, délivrée ». Virginie, merci pour tes précieux conseils et pour ton écoute. Alexiane, j'ai toujours été impressionnée par ta capacité à gérer les choses et à obtenir ce que tu voulais. T'étais la source d'information du labo lorsqu'on avait un problème. Merci pour tous tes conseils et tes encouragements.

Vicky, tu as été la rencontre surprise de cette thèse. Merci pour ces nombreuses discussions en réelles ou par messages interposées. Elles sont toutes plus intéressantes les unes que les autres. Tu m'as aidé à prendre de la distance et à réaliser certaines choses. Je suis encore une fois désolée pour les délais de réponses, qui sont toujours beaucoup trop long. La thèse étant bouclée, les délais devrais être plus raisonnable.

Merci à Emmanuelle et à Giulia pour avoir suivi avec moi une formation riche en questionnements et en remises en question. Merci pour leur bienveillance, leurs remarques toujours constructives et leurs encouragements. J'en profite pour remercier Catherine Briet pour l'organisation de cette formation, ainsi que pour sa gentillesse, sa compréhension et ses encouragements.

Un merci tout particulier à Matthieu. Merci pour ta présence et ton soutien (même à distance), pour la visite de Toulouse, de Gaillac et de ses environs (mais quel beau pays !). Et merci d'avoir fait le déplacement pour venir à la soutenance. Maud, mon petit papillon de la montagne, tu as été un vrai « coup de foudre » amical. On n'a jamais travaillé ensemble, on ne s'est jamais côtoyée dans le quotidien, et pourtant tu

Remerciements

es une devenue une vraie amie, sur qui je peux compter, qui m'a encouragé, qui m'a soutenu et qui est là en cas de pépin.

Plus largement, je remercie Flore, Laure, Clément, Edouard, Kevin, Quentin, Milton, Nicolas, et tous les autres.

Merci aux gens du sud

En arrivant dans la région j'ai eu la chance d'habiter avec des garçons géniaux. Le « casting » a été haut en couleur mais a donné une bonne idée de ce qu'allait être la suite. Céd, j'ai tout de suite su en te voyant débarquer avec ton trafic plein à ras bord et tes 10 poules qui avaient traversé la France, que tu n'étais pas un mec comme les autres. Malgré ton caractère auquel on finit par s'habituer, tu es un mec en or ! Toujours dispo, à l'écoute, prêt à faire plaisir et toujours *ready* pour faire la fête et passer de la super musique. *Pull up* !!! Papito, le musicien de la coloc, qui arrive à énerver les enfants de l'autre côté du vallon à force de jouer du trombone. Merci pour avoir fait en sorte que je reste une année de plus à la coloc. Les discussions avec toi sont toujours intéressantes et on apprend toujours beaucoup de chose ! Et merci pour l'initiation au canyoning. Jojo, je retiendrais de ces quelques mois passés ensemble ta maniaquerie, mais pas que. J'adore te retrouver et passer du temps avec toi. Merci de m'avoir entraîné dans un *road trip* au pays des montons et des buveurs de whisky. Raph, ça a été un vrai plaisir d'habiter avec toi. Tu m'as ouvert les yeux sur pleins de sujets de par ton militantisme et tes nombreuses interrogations sur le monde. Mister de La Melchiorrette, tu as ramené un petit coup de peps dans la coloc en amenant dans tes valises Jaja. T'es aussi un mec super, toujours dispo pour les copains. Encore merci à vous ! Vous êtes parmi mes plus belles rencontres de ces dernières années. Je vous love.

Pendant qu'on est dans les colocs, je voudrais remercier la coloc de Mougins (dit la Maison du bonheur, la coloc de Carlo ou encore la coloc de Dédé). Merci pour votre hospitalité, pour toujours ouvrir la maison que ce soit pour un apéro, un barbac, une soirée, ou venir squatter 1 mois. Dédé, t'es un mec super qui adore contredire les gens, on va dire que ça fait partie de ton charme. Alison tu es une vraie Maman pour la coloc. Merci pour les pancakes et les gaufres du week end. Noémie, tu es la meilleure préparatrice d'apéro. Gaël, c'est toujours super intéressant d'échanger avec toi sur pleins de sujets différents. Une pensée aux anciens colocs Will et Andy. Je tiens également à remercier la coloc de Garbejaire (Octave, Nono, Gilou, Coco, et Franklin). Les soirées jeux et les soirées concerts sont toujours cool avec vous.

Un très grand merci à la formidable famille des Sambati ! J'ai découvert grâce à vous l'univers de la samba et de la batucada, et j'ai pu rencontrer des gens géniaux avec des valeurs, des engagements (on n'est pas la batuc « officielle » des manif pour rien ^^), toujours prêt à jouer et à faire du bruit (ou jouer de la musique ça dépend ^^). Djijou merci pour tout ce que tu donnes, pour ta patience, pour ta gentillesse, bref pour tout ! Mimi, même si tu fais peur au premier abord, t'es une nana exceptionnelle avec un cœur énorme !!!! Merci à mon formateur officiel de surdo, j'ai nommé le grand Vivi !!! Merci à tous les copains (Maëva, Avila, Hélène, Sabine, Patriste, Lolotte, Benoit, Théo, Anne-Laure, Alice, Dim, Jess, Jeff, Jacques, Laurent, Mu, Polo, Renaud, François, Zézé, Jean-Luc, Guillaume, Gilles, Aude, Dopo, Roberto, Audrey, Imen...)

de m'avoir accueilli comme vous l'avez fait ! Vous avez rendu ces cinq années encore plus belles. *M'en bati sieu Sambati !*

Merci à Nathalie et Erik pour leur précieux conseils et pour leurs encouragements au bord du bassin. Ces moments m'ont permis de couper de la thèse et de m'aérer (ou plutôt de m'inonder) la tête.

Merci aux copains d'Annecy et d'ailleurs

Ca fait plusieurs années maintenant qu'on ne se voit plus quotidiennement mais vous faites toujours parti de ma vie, même si ces dernières années je n'ai malheureusement pas toujours été disponible.

Dodo, mon rayon de soleil ! Tu as une capacité à me donner le sourire et à me faire rire quand je suis au fond du trou qui est assez exceptionnelle. Merci pour ces nombreuses heures passées au téléphone à faire de l'assistance psychologique, pour tous les moments passés ensemble, les week end improbables à Vence, à Bruxelles ou encore à Riga, et merci de m'avoir hébergé un mois complet pendant le confinement. *I'll be there for you baby !* (traduction : Je serai là pour toi poulette ;-))

Merci aux copains de jeunesse qui sont encore là malgré la distance, les années qui passent et les vies qui changent. Rom, merci d'être toi et d'être toujours là pour me soutenir et chercher avec moi les différentes solutions possibles. Fab, merci pour ta bonne humeur et ton entrain. On traverse des passes et des remises en questions similaires et je sais qu'avec toi je peux trouver une écoute attentive et des conseils précieux. Ju, plus de trente ans et toujours une bouille d'enfant. C'est toujours une partie de rigolade quand on se croise. J'attends les prochaines blagues avec impatience ;-p Antho, merci pour les différents moments partagés ensemble. C'est toujours un plaisir de se croiser et de voir que les choses n'ont pas changé. Merci à la famille Gay pour leur gentillesse et leur compréhension, surtout sur la fin de thèse.

Puf-Puf ! Lulu, c'est quand même grâce (ou à cause) de toi que je me retrouve docteur aujourd'hui. C'est toi qui m'a poussé à prendre ce stage en M2 lorsque je n'arrivais pas à me décider. Tu as toujours eu une âme de maman, à prendre soin des gens que tu aimes, moi y compris, que ce soit du temps de la fac quand on habitait ensemble ou encore aujourd'hui. Donc merci à toi ! Billou, ou plutôt Doc Whitefoot, merci pour tous les moments de rigolade passés ensemble et pour tes blagues (plus ou moins « grasse », pour rappel on est des filles !). Les moments passés ensemble sont toujours des bulles d'oxygène et des petits retours dans le passé.

En parlant de retour dans le passé, un grand merci au Gang des saucisses !!!! Tous les moments passés avec vous sont des capsules spatio-temporelles qui renvoient directs au lycée. Ça fait du bien de temps en temps d'avoir de nouveau la mentalité d'une ado de 16 ans. Céline, Coco, Océ et Vicky, vous êtes des nanas génialissimes !!! Merci d'être là quelle que soit la situation, quel que soit le problème. Vos retours et vos conseils sont toujours précieux. Je vous love les saucisses !

Merci à tous les autres copains d'Annecy, d'avoir été là ces dernières années. Merci à Rom1, un de mes plus vieux copains, pour les voyages, les moments passés ensemble et pour tes encouragements ; à Sara, pour les week end de découverte de

la Finlande ; à Bribri, pour toujours veiller sur moi (même depuis l'autre bout de la planète), pour rester mon coloc de cœur, pour être mon binôme de bonbon et pour m'avoir offert Roger (d'ailleurs faut qu'on en parle...) ; à Sylvain, ma papote, pour ses encouragements ; à Marine, ma jumelle, pour être présente depuis la maternelle ; à Coco pour les vidéos de Biquette qui changent les idées (un jour elle sera une star d'internet, c'est sûr !) ; à Mel, Jue, Johanna, Quez, Chou, Bast, Antoine, et à tous les autres. Merci !

Un merci un peu spécial à l'équipe de Biarritz (Lorrenzo, Rom, Lulu, Fab, Antho, Seb, Marie, Pierrick, Caro, Milou, Ju, Bast, Clem, Quez, Johanna, Billou, et les autres). Ces escapades m'ont permis de faire de vrai break. Merci pour toutes ces parties de rigolades, de cache-cache, ces soirées (plus ou moins beaucoup trop arrosées) et pour ces sessions de surfs. Rdv en 2021 ;-)

A tous les gens qui ont été mis sur ma route tout au long de ce périple, pour me soutenir, m'aider à avancer, à me faire prendre conscience de certaines choses. Merci à Chris, pour ta bienveillance, ton écoute, ta disponibilité, pour m'avoir ouvert les portes de ton chalet quand ça n'allait pas, et pour être toujours là pour moi. J'ai encore bcp à apprendre de toi ! Merci à Bernadette, pour m'avoir accueilli, pour les nombreuses discussions et pour tous les moments passés ensemble qui sont toujours très riches en émotions et en enseignements. J'espère qu'il y en aura d'autres bientôt. Merci à Martine pour les discussions partagées et pour ta guidance. Merci à toute l'équipe de Mypam, rendez-vous à la prochaine retraite.

La famille <3

Enfin je souhaite dire une immense merci à ma famille !!!

Merci à l'ensemble de la famille Boschetti : aux tontons et tatas, Pierre, Martine, François, Bernard et Danielle ; aux cousins/cousines, Lulu, Marion, Tom, Baptiste et Clem ; leurs moitiés, Sibylle, Mariam et Célène ; et à la nouvelle génération, Arya, Amezia et Marty ; qui sont d'un grand soutien et qui sont toujours prêt à boire un coup et faire la fête. Merci à Zaza et Pachoud, pour les nombreux samedi et dimanche passés en leur compagnie, pour les patates sautées, les poulets et les côtes de bœuf. Vous êtes comme des troisièmes grands-parents, merci pour tout !

Thomas, on a vécu pas mal de chose ensemble tout au long de ces 32 années. Merci de m'avoir soutenu dans cette aventure, d'être toujours présent pour me faire rigoler, d'être toujours prêt à partir en voyage. Et merci d'avoir tenu à assister à la soutenance et d'avoir été présent jusqu'au bout.

Un grand merci à mon Papa, qui a su me soutenir et être présent tout au long de cette thèse. Merci d'avoir cru que je pouvais obtenir ce titre de médecin, ou plutôt de docteur ^^ . Merci pour tout ce que tu as fait pour moi tout au long de ma vie. Merci pour les incalculables trajets, les nombreux déménagements, dépannages et tout le reste. Et merci de t'être donné la peine de lire l'intégralité de thèse et d'avoir porté de l'intérêt à mes travaux. Je remercie également Laurence et Patou pour avoir relu et corrigé les fautes d'orthographe de ce manuscrit, et il y en avait beaucoup. Lolo, merci pour ta gentillesse et pour toujours te plier en quatre pour rendre service.

Merci à la famille Cavalli et plus particulièrement à Jean-Pierre et Odile. Merci d'être toujours présent et de prendre soin de Maman et Nounette quand on est loin.

Un énorme merci à ma petite Maman qui a toujours cru en moi, qui a toujours été là et qui m'a toujours soutenue dans les bons comme dans les mauvais moments. Merci pour tout ce que tu fais pour moi, depuis que je suis petite et jusqu'à aujourd'hui. Je n'aurais pas pu passer à autre chose sans clore ce chapitre, et ça tu l'as compris Tu t'es énormément investie pour que cette thèse aboutisse et pour que j'arrive au bout. Je te remercie également pour tes corrections. Une grosse pensée pour Nounette toujours prête à donner pleins d'amour.

Bibi, merci pour être toi. C'est toujours génial de passer du temps avec toi et de voir que notre complicité est toujours là, malgré les années. Je suis fière d'être ta grande-sœur et de tout ce que tu as accompli.

A tous, un ENORME merci !

SOMMAIRE

Résumé.....	I
Abstract.....	III
Remerciements.....	V
Introduction générale.....	1
Partie I. Le risque de tsunami : quelle réalité à l'échelle mondiale et européenne ? Quelle intégration dans les documents réglementaires français ?	13
Introduction de la Partie I.....	15
Chapitre 1 : Le risque de tsunami : de l'échelle mondiale à méditerranéenne	17
Chapitre 2 : Le littoral azuréen, un territoire exposé à des tsunamis locaux.....	31
Chapitre 3 : De la surveillance à l'alerte des tsunamis en France	45
Chapitre 4 : Les outils et les plans de prévention, d'urbanisme et d'information à la population dans le domaine des risques et des catastrophes – Quelle place pour le risque de tsunami ?	65
Conclusion de la partie I.....	81
Partie II. L'aléa tsunami – De la compréhension du phénomène à sa cartographie grâce à l'utilisation de modèles numériques	83
Introduction de la Partie II.....	85
Chapitre 5 : Le tsunami, un évènement extrême : de l'observation à sa caractérisation	87
Chapitre 6 : Proposition d'une nouvelle échelle d'intensité de tsunami	105
Chapitre 7 : De la modélisation à la cartographie de l'aléa tsunami	135
Chapitre 8 : Cartographie de l'aléa tsunami en zone Ligure – Mise en application de l'échelle d'intensité.....	153
Chapitre 9 : Cartographie de l'aléa tsunami le long des Alpes-Maritimes via la méthodologie semi-quantitative du risque	179
Conclusion et Discussion de la Partie II	195
Partie III. De l'approche théorique de la vulnérabilité et des enjeux à l'obtention d'une cartographie de la vulnérabilité territoriale du littoral azuréen.....	203
Introduction de la Partie III.....	205
Chapitre 10 : Des enjeux à la vulnérabilité territoriale	207
Chapitre 11 : Une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité territoriale.....	225

Chapitre 12 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale des communes littorales des Alpes-Maritimes exposées au risque de tsunami.....	259
Conclusion de la Partie III – Limites de la méthodologie proposée et perspectives.....	277
Partie IV. L’analyse du risque : proposition de deux méthodologies d’analyse et mise en application dans le cas de la survenue d’un tsunami sur le littoral azuréen	281
Introduction Partie IV	283
Chapitre 13 : Proposition de deux méthodologies d’analyse du risque de tsunami.....	285
Chapitre 14 : Application des deux méthodologies d’analyse territoriale du risque sur la Côte d’Azur	299
Chapitre 15 : Cartographie à grande échelle du risque de tsunami sur quatre communes du littoral azuréen.....	317
Conclusion de la Partie IV – Analyse comparative des deux méthodologies proposées	349
Conclusion générale et perspectives.....	361
Bibliographie.....	379
Table des matières	399
Table des Figures.....	409
Table des Tableaux	415
Table des Equations.....	419
Glossaire.....	423
Table des Annexes.....	4239
Annexes	433

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis que l'homme est sur terre il a dû faire face à un certain nombre de catastrophes naturelles : les éruptions du Santorin (-1500 av. JC) et du Vésuve (79), le séisme de Constantinople (557), la méga-catastrophe (séisme, tsunami, incendie) de Lisbonne (1755), l'éruption de la Montagne Pelée (1902), la crue de la Seine (1910), le séisme de Kobe (1995), l'ouragan Katrina (2005), ou plus récemment la méga-catastrophe (séisme, tsunami, accident nucléaire) de Tohoku (2011).

Ces catastrophes affectent les populations et les territoires et peuvent avoir de graves conséquences économiques. Les catastrophes naturelles fascinent (Delimeau, 1978) par leur soudaineté, leur puissance (Provitolo, 2011) et par les questions scientifiques qu'elles soulèvent.

Les méga-catastrophes ont toujours été présentes. Elles peuvent être aggravées au sein des villes qui sont également paradoxalement les espaces les mieux préparés pour y faire face et réduire les vulnérabilités urbaines (Provitolo, 2002). Par le passé, de grands incendies se sont déclarés à cause de la manière de vivre de l'époque (chauffage au poêle, éclairage à la bougie, etc.) et de la structure des villes (rues étroites, favorables à la propagation des feux, matériaux moins résistants, insalubrité, etc.) (Dubois-Maury et Chaline, 2002).

Aujourd'hui d'importantes avancées ont été faites notamment d'un point de vue technique (construction parasismique, digues, barrages, etc.). Néanmoins, certaines méga-catastrophes peuvent être amplifiées par les activités anthropiques (Pigeon, 2010). Le dernier exemple en date est celui de Tohoku avec un séisme-tsunami-accident nucléaire, en mars 2011.

Les évènements d'une extrême ampleur sont généralement propices à un éveil global des consciences. Ceci est d'autant plus le cas depuis que les médias permettent de vivre la crise de l'intérieur. Lors des attentats du World Trade Center à New-York, le 11 septembre 2001, la moitié de la planète était à Manhattan depuis son salon. Lors du tsunami en Thaïlande de 2004, les premières images ont été relayées à une échelle mondiale, permettant aux personnes ne connaissant pas ce phénomène de le voir en condition quasi-réelle derrière un écran. Ces catastrophes, surmédiatisées participent à une prise de conscience globale de l'existence de ces phénomènes peu courants.

Il faut donc malheureusement souvent attendre un évènement majeur et destructeur pour qu'une prise de conscience ait lieu que ce soit au niveau des politiques, des organismes (locaux à internationaux), des populations locales ou touristiques, etc. L'effondrement d'un pont autoroutier à Gênes (2018) a par exemple suscité de nombreux débats, aboutissant à une grande campagne d'expertise sur l'état des ponts français.

Les catastrophes naturelles sont inévitables (on n'empêche pas un tsunami ou un séisme de se produire) et les aggravations ou évènements anthropiques sont souvent incontrôlés. En revanche, les dégâts (principalement humains) pourraient être moindres si la population avait conscience de la dangerosité des différents aléas et

surtout si elle avait connaissance des comportements à tenir s'il venait à se produire. Une prise de conscience individuelle doit également prévaloir.

La catastrophe est généralement associée à la notion de risque. Tous deux sont liés mais restent toutefois bien distincts. La principale différence se situe dans le fait qu'un risque « *relève du probable mais reste non réalisé* » (Veyret, Reghezza, 2005, Mines) ; alors que la catastrophe correspond à un événement qui s'est produit, qui s'est déroulé et qui a généré des dégâts. Un risque potentiel peut ou non se transformer en catastrophe (Dauphiné et Provitolo, 2013). La catastrophe devient ainsi « *le risque réalisé* » (Aublet, 2014).

L'approche du risque, et donc des catastrophes, a évolué au cours du temps. Les études et analyses de risques se sont longtemps focalisées sur les événements en tant que tels, donc sur l'aléa, afin de les comprendre, de les contenir, de les prédire. On parle d'approche « *aléa centrée* ». Pour Walter (2008), « *les sociétés du passé [...] pensent avant tout à tirer parti de leur expérience des catastrophes* ». Il était donc primordial pour elles de revenir à un système territorial fonctionnel et à limiter autant que faire se peut et dans la mesure du possible ce type d'évènement.

Cette dernière a longtemps été la doctrine principale du risque. Elle présente toutefois certaines limites, la principale étant qu'elle n'intègre pas le territoire et la société sur lesquels se produisent ces événements. Leur rôle n'est toutefois pas négligeable puisque certains chercheurs ont mis en avant que « *des aléas identiques peuvent avoir des conséquences très différentes selon l'époque et la société considérée* (White, 1973 ; Burton et coll., 1993). » (Veyret et Reghezza, 2006).

Si pour un événement identique, ou du moins similaire, les conséquences varient selon le territoire impacté, c'est que l'analyse unique du risque ne suffit plus et qu'il est nécessaire d'intégrer une composante davantage sociale et sociétale. Apparaissent alors les études de risques intégrant la vulnérabilité.

La vulnérabilité est longtemps restée « *la laissée pour compte* » de l'analyse de risque, due à l'histoire de la recherche sur le risque et du concept même de vulnérabilité (Veyret et Reghezza, 2006). Ce dernier, polysémique, a nécessité de nombreuses études afin de cerner à la fois le concept et son application. Il fait aujourd'hui partie intégrante des études de risques, du moins en géographie.

Les réflexions portant sur le risque ont permis de ne plus le considérer comme une fatalité. Il est devenu « *un fait de responsabilité et il est devenu un enjeu politique, éthique, social, objet de nombreuses polémiques autour de son identification et ensuite des moyens de le prévenir.* » (Le Breton, 2017). Il constitue donc une réelle cible de réflexion qui nécessite sa prise en considération dans les politiques et développements locaux.

Qu'il s'agisse de catastrophe ou de risque, se pose la question du lien et de la relation entre la nature et la société (Veyret et Reghezza, 2005). Il est donc nécessaire d'avoir à la fois une composante physique et une composante humaine, vulnérabilité et/ou résilience.

Avec le développement urbain toujours croissant, il est plus que nécessaire de bien comprendre le risque, ce qu'il représente et les différents éléments qu'il met en jeu. Différents types de risques naturels existent, pouvant avoir des impacts à différentes échelles de temps et d'espace. Le tsunami est un des risques dont ces variations peuvent être les plus importantes, puisqu'il peut avoir une échelle locale et donc toucher uniquement une zone délimitée, ou une échelle plus globale, pouvant impacter un océan entier. La temporalité associée va également connaître des variations importantes.

Contexte de l'étude et problématique principale :

Considérant que la plus grande partie du globe est constituée d'eau et qu'environ 40 % de la population mondiale vit à moins de 60 km des côtes (COI, 2008), le tsunami est l'une des plus grandes menaces planétaires. Encore peu connu il y a une quinzaine d'année, il a été propulsé sur le devant de la scène médiatique suite au tsunami de décembre 2004 qui a impacté les littoraux de l'océan Indien.

Dans l'imaginaire collectif, un tsunami est souvent considéré comme une vague de plusieurs mètres voire plusieurs dizaines de mètres de haut. Ces cas de figures sont possibles, par exemple les tsunamis de 2004 et 2011. Ce sont des événements extrêmes qui sont généralement générateurs de dégâts importants. Un tsunami peut également être de taille plus modeste, quelques dizaines de centimètres de haut, et également générer de nombreuses pertes. Une fois encore, il s'agit de la combinaison d'un événement et d'un territoire.

Bien que la plupart des tsunamis mondiaux se produisent dans l'océan Pacifique, environ 15 % des événements s'étant produit depuis – 1 600 avant J. C. ont eu lieu en mer Méditerranée. Certains littoraux sont davantage exposés que d'autres, c'est le cas notamment des littoraux français, et plus particulièrement ceux des Alpes-Maritimes. Deux événements emblématiques ont été recensés : le tsunami d'origine sismique de 1887 en mer Ligure et celui d'origine gravitaire de 1979, localisé et contenu dans la Baie des Anges.

Peu sensibilisée à ce type d'évènement du fait de leur faible fréquence, la population oublie que ces littoraux sont des espaces à risque. Or, de par son dynamisme (économique, touristique, etc.) et son attractivité, les littoraux azuréens concentrent de nombreux enjeux (humains, matériels, économiques, etc.). Dans ce contexte d'augmentation des aléas et des enjeux, la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) des Nations Unies, appelle à se préparer aux tsunamis en Méditerranée (Projet Neamtic, 2013).

Les tsunamis sont des phénomènes soudains, qui se produisent brutalement et qui ne disposent pas toujours de signes précurseurs. Dans le cas de phénomènes sismiques, le séisme lui-même et parfois un possible retrait significatif de la mer, doivent justement servir d'avertissement afin que les populations se mettent en sécurité. Quoiqu'il en soit, la première vague peut arriver très rapidement sur les littoraux. Ceci est d'ailleurs le cas pour les événements pouvant frapper les littoraux des Alpes-Maritimes puisqu'il a été estimé suite à des simulations numériques réalisées sur des scénarios de séismes locaux, que le tsunami frapperait les côtes en

dix – quinze minutes à partir de sa génération, c'est-à-dire du séisme (Ioualalen et col., 2010).

Le risque de tsunami et les effets associés sont mal connus de la population (locale et touristique) et des élus. A la différence d'autres risques comme les inondations ou les séismes, qui sont connus, étudiés et qui font l'objet de nombreuses réglementations (Plan de Prévention du Risque d'Inondation du Var à Nice par exemple, ou le Plan de Prévention du Risque Sismique à Nice), le risque de tsunami n'est pas ou très peu intégré aux stratégies de prévention.

L'ensemble de cette combinaison : i) laps de temps très court ne permettant aucunement le déclenchement d'une alerte efficace prévenant les populations ; ii) l'absence de sa prise en compte dans les stratégies de prévention ; iii) sa méconnaissance par la population ; en font un objet d'étude à fort enjeu sociétal. Ce travail de recherche part justement de ce constat. Il s'agit donc d'un événement soudain qui peut venir brutalement s'abattre sur ces littoraux.

Le territoire azuréen a, ces cinq dernières années, été frappé par plusieurs événements brutaux, qui sont venus déstabiliser et impacter son fonctionnement. Nous pouvons citer les inondations meurtrières de 2015 (Boschetti et coll., 2017) et l'attentat terroriste du 14 juillet 2016. Ces événements de sources diverses, bien que différents d'un tsunami, ont été des véritables exemples de désorganisation du territoire suite à un événement brutal. Ils ont souligné la non préparation de la population et des autorités à faire face à un événement imprévu à cinétique rapide.

Les réflexions de ces travaux de recherche ont donc porté sur divers aspects du risque, qu'il s'agisse de l'aléa, de la vulnérabilité ou du risque en lui-même.

Dans l'objectif de traiter au mieux ce sujet, différentes questions nous ont permis de faire avancer notre réflexion. Quelles sont les notions indispensables à cette étude (risque, aléa, vulnérabilité, enjeux) ? Quels travaux similaires (étude de risque) ont été réalisés et peuvent nous être utiles ? Comment réaliser l'étude de vulnérabilité et l'étude de risque de tsunami ? Quel scénario de tsunami prendre en compte ? Quelle va être l'étendue de l'inondation en cas de tsunami ? Quelles données prendre en compte pour l'analyse de l'aléa ? Quelles sont les particularités du littoral azuréen ?

[L'aléa, une approche historique du risque :](#)

Les risques et catastrophes ont toujours pesé sur la terre. Les hommes ont, pendant plusieurs siècles, pensé que les catastrophes étaient le fruit de la colère d'un ou de plusieurs dieux. Face à de tels événements, ils adoptaient un comportement fataliste et cherchaient, notamment dans les sociétés occidentales, à s'en prémunir par des sacrifices, puis en menant des processions ou rogations (Delumeau, 1978). C'est ce que G.Y. Kervern (1995) nomme le passage de « l'âge du sang » à « l'âge des larmes ».

Puis, à partir du XX^{ème} siècle, avec le développement de la science, les hommes se sont peu à peu intéressés aux différents phénomènes physiques générateurs de

risques et les ont ainsi perçus de manière plus rationnelle. C'est ce que G.Y. Kervern (1995) nomme « *l'âge des neurones* ». Quelle que soit l'origine de la menace, ces approches du risque se retrouvent sur le fait que le phénomène physique est central, c'est donc lui l'objet d'étude principal. Il s'agit donc d'étude centrée sur l'aléa.

La notion d'aléa peut désigner, soit les caractéristiques d'un phénomène, soit la probabilité d'occurrence et d'intensité d'un phénomène dans une région donnée au cours d'une certaine période (Dauphiné et Provitolo, 2013). Les aléas peuvent être d'origine naturelle, technologique ou sociale. Les études de risques dites « *aléa-centré* » n'analysent le risque que par la composante physique, se limitant donc généralement à la construction d'ouvrages de protection.

Cette approche, davantage ingénieriale, propose donc principalement des solutions techniques, qui se retrouvent encore aujourd'hui, notamment via les Plans de Prévention des Risques et les zonages associés (Veyret et Reghezza, 2005). Ici, « *La société n'est envisagée que comme victime passive* » (Veyret et Reghezza, 2006). La limite principale est donc la non prise en considération de la société et du territoire. Cependant, pour la réalisation d'une analyse de risque « complète », il est nécessaire de disposer de données sur l'aléa, comme par exemple son emprise spatiale, sa magnitude ou encore son intensité.

Dans le cadre de ces travaux nous focalisons notre attention sur les aléas d'origine naturelle, plus spécifiquement sur les tsunamis qui constituent le cœur de notre recherche. Des simulations numériques de propagation de tsunami ont été réalisées au laboratoire Géoazur sur la faille Ligure, principale source tsunamigène de la région. Ces dernières servent donc de base à la réalisation de réflexion et d'analyse de l'aléa tsunami sur le littoral azuréen.

Nous nous sommes ainsi interrogée sur plusieurs aspects, à la fois conceptuels et méthodologiques, mais aussi appliqués. Les simulations numériques nous apportent des données objectives de zones d'inondation, de hauteur de vague et de courant. Mais qu'elles sont leurs limites ? Comment les interpréter afin que ces dernières soient significatives ?

Une de nos réflexions s'est portée sur les différentes échelles de magnitude et d'intensité existantes. Quelles sont les échelles proposées par la communauté scientifique ? Sont-elles utilisables ? Applicables ? Correspondent-elles à notre besoin ? N'étant pas le cas, nous avons proposé une échelle d'intensité permettant le croisement des données brutes de courants et de hauteurs de vagues, ainsi que la vulnérabilité biophysique.

L'apport de l'analyse des enjeux et de la vulnérabilité aux analyses de risque :

Les sciences humaines se sont, au fil du temps, intéressées aux questions des risques naturels et plus particulièrement à la place de l'humain et du territoire dans ces questionnements. La vulnérabilité, concept polysémique, s'est imposée comme la composante humaine et sociétale des analyses de risque. Longtemps liée à l'exposition d'un territoire à une menace, elle désigne « *à la fois les dommages et la possibilité de subir ces dommages* » (Veyret et Reghezza, 2005).

Il peut donc aussi bien s'agir des dégâts occasionnés sur les populations, que du positionnement (physique et « conceptuel ») de ces populations par rapport aux aléas. L'exposition a donc été un élément clé puisqu'elle correspond au facteur pris en compte pendant de nombreuses années, et encore aujourd'hui, pour déterminer une zone à risque.

L'exposition, bien qu'aléa centré, a permis à la vulnérabilité d'évoluer pour s'en extraire peu à peu, jusqu'à parfois s'en extraire complètement. Différentes approches de la vulnérabilité ont ainsi vu le jour, certaines plus sociales, d'autres plus territoriales ; elles avaient toutes comme ambition l'intégration de la variable humaine aux réflexions sur le risque. Une analyse de vulnérabilité peut ainsi être réalisée selon diverses méthodologies.

La vulnérabilité est ainsi directement reliée aux risques et aux dégâts potentiellement observés en cas de catastrophe. « *Les catastrophes révèlent la vulnérabilité et permettent ainsi de mieux comprendre les facteurs d'augmentation du risque de catastrophe et permet d'observer concrètement les conséquences d'un aménagement* » (Moatti, 2015). La composition du territoire et la présence de différents enjeux influent directement sur le risque. « *En modifiant l'organisation d'un espace (en limitant l'urbanisation, en redistribuant certains enjeux...) on peut réduire ou au contraire aggraver le risque.* » (Veyret et Reghezza, 2005, Mines).

Ici, l'évaluation de la vulnérabilité du territoire se base sur la méthodologie de D'Ercole et Metzger (2009), ainsi que sur l'approche indicielle de Gleyze (2005). La vulnérabilité est ainsi étudiée via les enjeux majeurs du territoire, espaces stratégiques susceptibles de subir et d'amplifier les dégâts. Il est donc nécessaire de les identifier et de déterminer comment les analyser et déterminer leur vulnérabilité.

Le bassin méditerranéen dispose de littoraux historiquement densément peuplés. Une grande concentration d'enjeux se retrouve ainsi potentiellement exposée aux tsunamis. Les Alpes-Maritimes, territoire à la fois densément peuplé et exposé à l'aléa tsunami constituent donc une zone d'étude de référence.

Se pose ainsi différentes questions, portant sur les enjeux, sur la vulnérabilité et également sur le risque :

- **Conceptuelles** : sur l'évolution du concept de vulnérabilité et les différentes approches existantes ;
- **Méthodologiques** : comment s'approprier la méthodologie de D'Ercole et Metzger ? Quels enjeux prendre en considération ? Comment évaluer leur vulnérabilité ?
- Mise en **application** : Quels sont les enjeux du littoral azuréen ? Comment sont-ils répartis ? Quelle est la vulnérabilité territoriale des Alpes-Maritimes ?

[Le risque en milieu urbain, une multitude d'enjeux concentrés sur un territoire exposé :](#)

La définition générique (Équation 1) du risque est définie comme étant : « *la probabilité d'occurrence de dommages compte-tenu des interactions entre processus physiques d'endommagement (aléas) et facteurs de peuplement qui est la*

vulnérabilité » (Pigeon, 2012). Le risque correspond au croisement entre une composante physique, l'**aléa** et une composante humaine, la **vulnérabilité**.

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité}$$

Équation 1 : Représentation du risque intégrant l'aléa et la vulnérabilité

Le risque dans le domaine des risques et des catastrophes correspond à l'arrivée d'une menace (aléa) sur un territoire contenant des enjeux potentiellement vulnérables. Il s'agit donc de « *la conjonction d'un aléa - ici un tsunami, non maîtrisable - 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).* » (Sahal, 2011). La formulation du risque peut alors s'écrire (Blaikie et coll., 1994) (Équation 2):

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times (\text{Enjeux} \times \text{Vulnérabilité})$$

Équation 2 : Représentation du risque intégrant l'aléa, la vulnérabilité et les enjeux

Dans ces travaux, nous considérons que les enjeux sont inclus dans le terme générique « vulnérabilité », c'est pourquoi la représentation la plus simple du risque (Équation 1) a été conservée. Elle permet de distinguer, d'un côté, les études physiques portant sur l'aléa et, de l'autre, les analyses du territoire davantage approchées par les sciences humaines et sociales.

Le risque met donc en lien des phénomènes naturels et des sociétés ; c'est pourquoi ce dernier est d'autant plus problématique dans les systèmes urbains. La ville concentre en effet un grand nombre d'enjeux (humains, organisationnels, économiques, etc.) essentiels au fonctionnement et qu'il convient de protéger. « *Les villes sont aussi le cœur localisé et matérialisé de systèmes économiques, politiques, institutionnels et logistiques, éléments essentiels non seulement du fonctionnement urbain mais des sociétés modernes en général.* » (Metzger et D'Ercole, 2011).

Pour Metzger et D'Ercole (2011) le risque en milieu urbain ne se limite pas en un point, en une zone, mais dispose d'échelles spatiales variables qui peuvent s'étendre au-delà des limites communales : « *[...] ce qui affecte un espace particulier dans une ville peut impacter l'ensemble de l'agglomération, ce qui affecte une ville peut avoir des conséquences bien au-delà du territoire affecté.* »

La zone d'étude de ces travaux, les Alpes-Maritimes, et plus particulièrement le littoral, est un territoire fortement urbanisé, contenant de nombreux enjeux majeurs. Ce territoire exposé aux tsunamis est donc considéré comme étant potentiellement à risque face à cet aléa. Quel est le risque de tsunami réel sur le littoral azuréen ? Cette interrogation soulève d'autres questionnements : Comment combiner l'aléa et la vulnérabilité pour obtenir une cartographie du risque ? Quelle méthodologie peut être utilisée ? Comment la mettre en application ? Pour répondre à ces interrogations, deux méthodologies d'analyse du risque de tsunami seront présentées.

Objectifs de ce travail de thèse :

Les risques et les catastrophes sont un domaine d'étude vaste qui mobilise de nombreuses connaissances et plusieurs disciplines. C'est tout naturellement que ces travaux se sont orientés vers une étude transdisciplinaire. Les cindyniques sont souvent scindées entre les sciences dites naturelles qui ont une entrée par l'aléa et les Sciences Humaines et Sociales (SHS) qui essaient de s'extraire complètement de l'évènement pour analyser la vulnérabilité du territoire sans tenir compte de l'aléa.

L'ambition de ces travaux et de ce manuscrit est de produire un document accessible et compréhensible à tous, c'est-à-dire aussi bien au géographe qu'au physicien. C'est d'ailleurs tout l'art du géographe, être à la jonction de plusieurs disciplines et d'être en mesure d'en faire le lien. La géographie « *travaille aussi à définir des objets « -hybrides- », issus d'une construction intégrant faits de nature et de société. Cette hybridation [...] est fondamentale dans la compréhension du risque et dans sa gestion.* » (Veyret et Reghezza, 2005).

Ces travaux, réalisés au laboratoire Géoazur, ont pu être possible grâce à une bourse de thèse financée par l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA) et la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur (PACA). Cette thèse bénéficiait également d'un partenariat avec le Service Départemental d'Incendie et de Secours des Alpes-Maritimes (SDIS 06), qui a été une aide précieuse tout au long de ces travaux.

Ce manuscrit est organisé en quatre parties. Après une contextualisation de l'étude, il est organisé selon l'évolution des réflexions autour du risque. L'aléa tsunami sera tout d'abord analysé et étudié ce qui permettra l'obtention d'une cartographie de l'aléa tsunami sur les côtes des Alpes-Maritimes. Une analyse du territoire sera ensuite effectuée, faisant ressortir les espaces sensibles du littoral. Et finalement une étude du risque de tsunami sur le littoral azuréen sera réalisée grâce à l'application de deux méthodes d'analyse.

La première ([Partie I](#)) est une contextualisation de l'étude. Elle passe par la réalisation d'un inventaire des tsunamis historiques s'étant produit en Méditerranée ([Chapitre 1](#)), puis dans les Alpes-Maritimes ([Chapitre 2](#)). Une focalisation est également faite sur la question de la prévention du risque de tsunami à l'échelle nationale et locale ([Chapitre 3 à 4](#)).

La deuxième partie ([Partie II](#)) se concentre sur l'aléa, via la présentation des tsunamis ([Chapitre 5](#)), de leurs particularités et de leurs mécanismes. Une échelle d'intensité est ensuite présentée ([Chapitre 6](#)). Elle fait suite au constat qu'aucune échelle existante ne répond à nos besoins. Celle-ci sera mobilisée par la suite pour la mise en place d'une méthodologie de l'aléa dans sa globalité ([Chapitre 7](#)). Les résultats obtenus sont présentés sous forme de cartographie ([Chapitre 8 et 9](#)).

La troisième partie ([Partie III](#)) cherche à s'extraire de l'aléa pour se focaliser sur le territoire et les enjeux qui le composent. Un point conceptuel est d'abord fait afin de poser les définitions utilisées ([Chapitre 10](#)). Une méthodologie d'analyse du territoire grâce à l'analyse des enjeux majeurs est ensuite proposée ([Chapitre 11](#)). Et enfin une application est réalisée sur le littoral azuréen aboutissant à l'obtention d'une cartographie de la vulnérabilité territoriale ([Chapitre 12](#)).

La quatrième et dernière partie de ce manuscrit ([Partie IV](#)) consiste en la combinaison des études d'aléa et de vulnérabilité pour obtenir une analyse de risque. Deux méthodes sont ainsi proposées ([Chapitre 13](#)). Elles sont tout d'abord appliquées à l'ensemble des communes littorales ([Chapitre 14](#)) et sont ensuite appliquées à échelles communales ([Chapitre 15](#)) afin de faire ressortir les particularités locales.

PARTIE I

LE RISQUE DE TSUNAMI : QUELLE REALITE A L'ECHELLE MONDIALE ET EUROPEENNE ? QUELLE INTEGRATION DANS LES DOCUMENTS REGLEMENTAIRES FRANÇAIS ?

*« On avait oublié que la mer se déchaîne
Qu'elle n'est plus sur les côtes un ruisseau innocent
Et qu'elle se transforme en un monstre de haine
Alors qu'elle semble vous bercer d'un miroir de confiance. »*

Elperu, 2005

INTRODUCTION DE LA PARTIE I

De tout temps, les territoires ont été impactés par des phénomènes naturels, plus ou moins violents et plus ou moins fréquents. Les menaces varient selon les territoires, en fonction de la géographie et de la géologie locale. Des zones sont régulièrement soumises à de fortes pluies, génératrices d'inondations, d'autres à des phénomènes gravitaires, d'autres encore à des phénomènes sismiques. Une grande majorité de ces espaces n'est pas soumise à un phénomène unique mais à une multitude, qui peuvent parfois se combiner.

A l'exposition d'un territoire à une menace vient s'ajouter l'occupation humaine. C'est parce qu'il y a une superposition entre les espaces urbanisés et l'emprise spatiale d'un ou des aléas que des enjeux se retrouvent dans des zones à risques. L'Homme a ainsi cherché à comprendre ces phénomènes, à les étudier, à s'en prévenir et à (essayer de) s'en protéger. Aujourd'hui, l'approche dominante de la gestion des risques et des catastrophes est la **prévention**.

Cette dernière ne se limite pas à une approche aléa-centré focalisée sur la réalisation d'ouvrages de protection, mais englobe une multitude de composantes basées sur l'anticipation (Dauphiné et Provitolo, 2013) :

- a. L'étude des phénomènes, des aléas et du risque qui menacent un territoire
- b. La veille et la surveillance de ces phénomènes afin d'aboutir à un système d'alerte
- c. L'information et la formation des populations afin qu'elles soient en mesure de comprendre les messages d'alertes et d'avoir des comportements adaptés.
- d. L'intégration des risques dans les réflexions d'aménagement et dans les plans d'urbanisme
- e. Analyser la vulnérabilité d'un territoire afin de pouvoir agir sur sa réduction
- f. Organiser la gestion de crise et les moyens de secours afin que les acteurs institutionnels soient en mesure d'agir efficacement lorsqu'un évènement majeur se produit.
- g. Réaliser des bilans et des retours d'expérience suite à une catastrophe, l'objectif étant de faire ressortir les points positifs et négatifs afin d'adapter l'alerte, les outils, la gestion, etc., pour une crise future.

La quasi-totalité de ces actions sont mises en place avant une catastrophe, à l'exception du retour d'expérience. Certaines actions sont lancées ou accélérées suite à une catastrophe, car elles donnent un aspect concret à la menace qui provoque souvent une prise de conscience globale. Ici, une focalisation est faite sur les phénomènes de submersion et plus particulièrement sur les tsunamis.

Les éléments présentés ci-dessus vont servir de ligne directrice pour lancer une première réflexion sur le risque de tsunami et son intégration en terme de prévention à l'échelon national et à échelle locale, plus particulièrement sur le littoral azuréen. Cette partie est découpée en quatre chapitres.

Les deux premiers présentent la réalité de la présence des tsunamis en Méditerranée ([Chapitre 1](#)) et dans les Alpes-Maritimes ([Chapitre 2](#)) grâce à une approche historique. Il s'agit donc d'une première approche de l'étude des phénomènes (a).

Les deux chapitres suivant se concentrent davantage sur l'aspect prévention. Le troisième chapitre s'intéresse à la surveillance et l'alerte des tsunamis en Méditerranée (b). Un dernier chapitre ([Chapitre 4](#)) permet la réalisation d'une synthèse des différents outils et plans existants dans le domaine des risques (c, d, f). Nous chercherons à savoir si le tsunami apparait dans ces derniers ou s'il est un oublié de ces documents officiels.

Il s'agit donc d'une partie introductive qui permet de faire un point sur la réalité d'un tsunami sur le littoral azuréen, ainsi que de présenter les divers actions et outils le concernant.

CHAPITRE 1 : LE RISQUE DE TSUNAMI : DE L'ECHELLE MONDIALE A MEDITERRANEENNE

Le tsunami, évènement brutal, est un phénomène qui vient généralement frapper les littoraux sans que ces derniers n'aient été préparés à cela. Il correspond au déplacement d'une masse d'eau océanique issu d'un choc ou d'un mouvement brutal appliqué sur une partie des limites englobant le volume d'eau concerné. Ce choc est généralement associé à un premier évènement, ressenti (séisme, éruption volcanique) ou non (glissement sous-marin). Ceci pouvant augmenter son pouvoir de surprise.

Les tsunamis sont portés sur la scène médiatique suite à des évènements d'une extrême ampleur. Les deux évènements emblématiques mondiaux de ces deux dernières décennies sont le tsunami du 26 décembre 2004 en Asie du Sud-Est et celui qui a frappé les côtes japonnaises le 11 mars 2011. D'autres évènements ont suivi comme ceux du 28 septembre et du 22 décembre 2018 en Indonésie. L'ensemble de ces derniers se sont produit dans l'océan indien et l'océan pacifique.

Dans l'imaginaire collectif, les tsunamis ne se produisent que dans ces espaces. Un tsunami peut pourtant se produire dans une mer, un lac ou un fiord. La mer Méditerranée a d'ailleurs vu par le passé se produire plusieurs tsunamis. Ce chapitre se concentre justement sur la localisation de ces évènements au sein d'une mer fermée afin de montrer l'intérêt de réaliser ce type d'études.

Ce chapitre se structure en trois parties : une première qui se concentre sur la répartition mondiale des tsunamis, la deuxième se focalise sur les différents types de tsunamis s'étant produit en mer Méditerranée et la troisième présente les principaux territoires impactées par les tsunamis le long des littoraux méditerranéens.

1. Une inégale répartition à l'échelle mondiale

La NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) dresse un listing des tsunamis historiques de -1610 avant J. C., à aujourd'hui (NOAA, 2019). Ce dernier recense 2 500 évènements, dont 1 200 sont des tsunamis dont la source a pu être confirmée. Ce listing, mis régulièrement à jour, aussi bien pour les évènements historiques que pour les évènements récents, a fait l'objet en 2016 d'une cartographie spatialisant l'ensemble des tsunamis, leur origine (sismique, volcanique, gravitaire ou inconnue), ainsi que le nombre de décès directement lié au tsunami, ou pouvant être causé par la source géologique (séisme, glissement sub-aérien, volcan) de 1610 avant JC à 2017 (Figure 1).

Les tsunamis sont entrés sur la scène médiatique suite à l'évènement qui a frappé l'Asie du Sud-Est le 26 décembre 2004. La méga catastrophe du 11 mars 2011 est venue comme une pique de rappel et a remis cet aléa sur le devant de la scène. Bien que les connaissances et la prise de conscience générale aient considérablement augmentées suite à ces deux évènements, il reste dans l'imaginaire collectif que ce

type d'aléa se produit dans le Pacifique et dans l'océan Indien. Peu font le lien avec le fait que ceci peut se produire plus près de chez nous, dans des bassins de tailles moins importantes, comme en Mer Méditerranée.

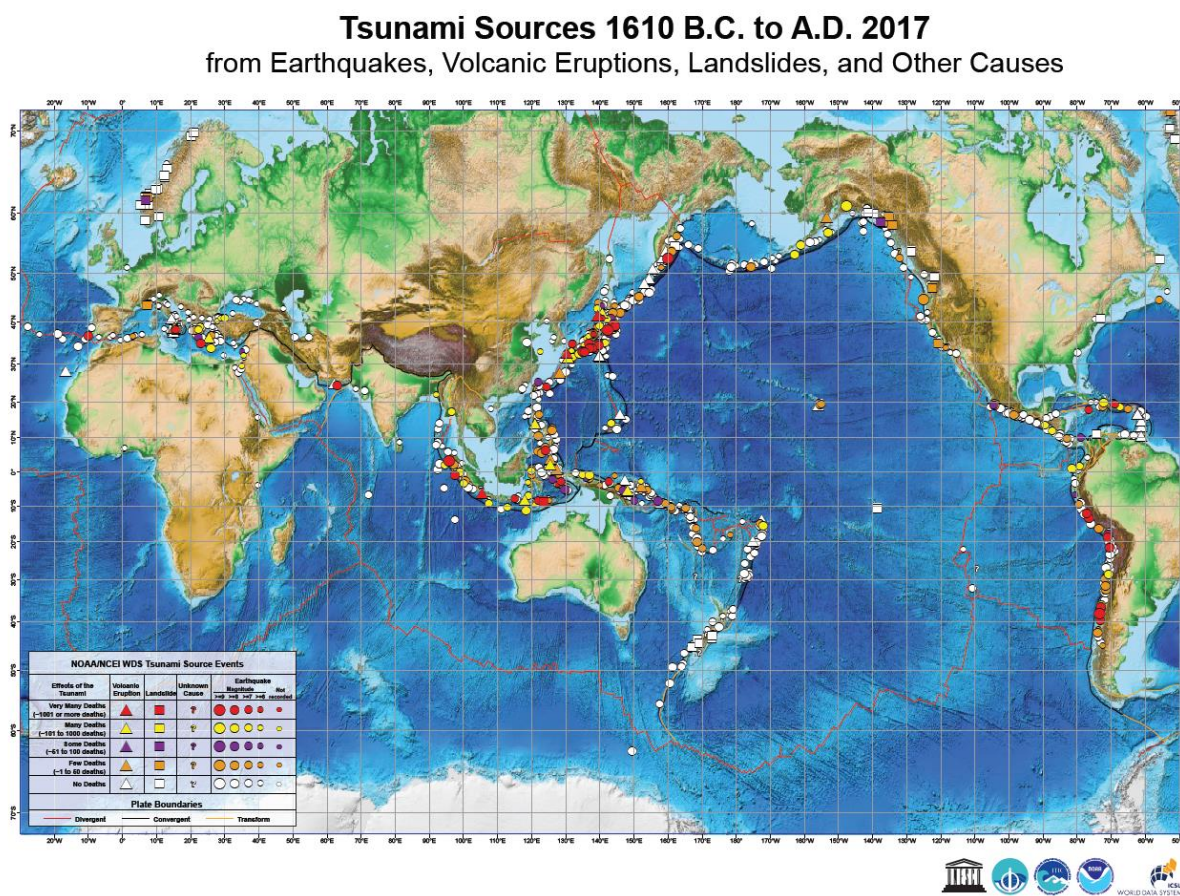


Figure 1 : Cartographie des tsunamis s'étant produit de - 1600 avant J. C. à 2017, incluant les tsunamis d'origine sismiques, gravitaires, volcaniques et autres
Source (NOAA)

Il existe ainsi une idée fortement ancrée que les tsunamis n'auraient lieu que dans le bassin Pacifique. La Figure 2 met en lumière le fait que, même si la plus grande majorité des événements se produit effectivement dans l'océan Pacifique, le bassin méditerranéen arrive en seconde position. Ses littoraux, fortement anthropisés, pourtant souvent indiqués comme peu exposés aux tsunamis, représentent 15 % des événements mondiaux.

C'est notamment pour cela que la NEAMTIC (North-Eastern Atlantic, Mediterranean and Connected seas) appelle à protéger les rivages méditerranéens du risque de tsunami. Géologiquement, la Méditerranée comprend en effet des zones de subductions et des failles intra-plaques, à l'origine de séismes et d'éruptions volcaniques importants, eux mêmes générateurs potentiels de tsunamis. Elle est également composée de failles actives génératrices de séismes, comme la faille Ligur, sur laquelle notre recherche porte spécifiquement.

La mer des Caraïbes et l'océan Atlantique représentent quant à eux 9 % des événements mondiaux. La mer des Caraïbes est une zone de subduction active

fortement marquée par d'importantes failles et donc présentant une forte activité sismique et volcanique. A l'inverse, l'océan Atlantique est relativement stable d'un point de vue tectonique et présente peu d'évènements. Quant à l'océan Indien, avec 6 % des évènements, il voit la quasi-totalité des tsunamis se concentrer en Indonésie, et plus particulièrement au niveau de l'île de Java, le long de la zone de subduction entre la plaque indo-australienne et la plaque eurasienne.

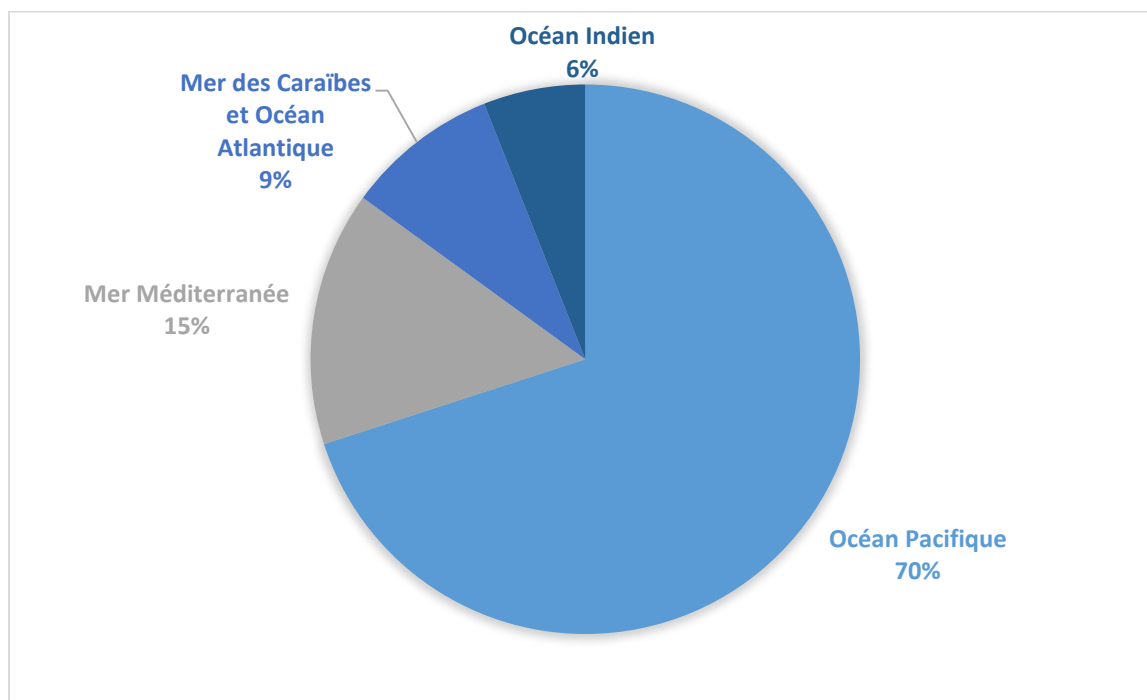


Figure 2 : Répartition des évènements tsunamigéniques de - 1 600 avant J.C. à 2017 dans les différents bassins (NOAA, 2017)

La mer Méditerranée est une mer intercontinentale, quasi fermée, située en limite de plaques, entre la plaque eurasienne et la plaque africaine. Elle fait le lien entre l'Europe au Nord, l'Afrique au Sud et l'Asie à l'Est. Cette position en fait un espace sensible aux séismes, aux éruptions volcaniques et donc aux tsunamis. A. Dauphiné et D. Provitolo (2001) ont réalisé un état des lieux de ces catastrophes et ont montré que « l'histoire de la Méditerranée » a été ponctuée de catastrophes. L'importance du nombre de phénomènes dans ce bassin nous a incité à réaliser un inventaire historique non exhaustif des tsunamis en Méditerranée.

2. Les tsunamis majeurs ayant impacté la Méditerranée, de l'Antiquité à nos jours

La Méditerranée est un territoire habité depuis plusieurs millénaires. Elle est le berceau de grandes civilisations comme la civilisation grecque, romaine, ou encore égyptienne. La forte présence humaine historique le long des littoraux méditerranéens a généré un espace à forts enjeux humains et économiques. Depuis l'antiquité, de nombreux évènements naturels catastrophiques se sont produits, dont des tsunamis. Ont été retrouvés, pour certains de ces évènements (plus ou moins lointains), des

écrits, des peintures, des photographies permettant d'obtenir des informations historiques sur les phénomènes passés et leurs impacts sur les littoraux. Plus récemment, les enregistrements de mesures physiques permettent d'observer et de comprendre ces phénomènes.

Cette mer quasi fermée dispose de deux ouvertures : le détroit de Gibraltar à l'extrémité sud-ouest et le canal de Suez au sud-est, faisant respectivement la jonction avec l'océan Atlantique et l'océan Indien. La Méditerranée est la deuxième zone tsunamigène mondiale, avec 15% des événements mondiaux (NOAA, 2017). La partie suivante propose un inventaire d'événements majeurs ayant impactés les différentes rives et bassins de la Méditerranée.

2.1. Inventaire des tsunamis majeurs s'étant produit en mer Méditerranée

Le National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) est en charge d'une base de données regroupant l'ensemble des tsunamis s'étant produits à l'échelle mondiale, de – 2 000 AJ à aujourd'hui (novembre 2019). Cette dernière répertorie 298 tsunamis dans le bassin méditerranéen sur cette période. Notons que l'événement de référence de cette étude, le tsunami dans la Bassin Ligure du 28 février 1887, n'apparaît pas dans cette base de données. Nous pouvons donc supposer que cette dernière est incomplète et que davantage d'événements se sont produits.

Ne pouvant pas détailler l'ensemble des événements relevés dans la base de données de la NOAA, ces informations ont été croisées avec les travaux de nos prédécesseurs afin de sélectionner les événements principaux. Cette sélection se base sur 44 tsunamis déterminés comme majeurs par Papadopoulos et coll. (2014), auxquels ont été ajoutés les événements relevés par la BD Tsunami (BRGM 2007, 2009, 2012) pour obtenir une liste de 50 événements (tableau récapitulatif en annexe, Annexe 1).

Papadopoulos et coll. (2014) proposent de détailler cette historique de manière géologique, via le découpage du bassin méditerranéen en 22 aires géologiques. Cette thèse portant sur les tsunamis extrêmes et brutaux, avec un temps d'arrivée court sur les littoraux, une approche géologique ne semblait pas adaptée. Une entrée moins traditionnelle, basée sur les temps d'arrivées, est apparue plus juste pour faire la distinction entre les différents événements historiques. En effet, une arrivée rapide d'un tsunami sur les côtes peut mettre en péril la population et mettre à mal les opérationnels, de par le temps de réaction limité.

Bien que riche en information, la base de données des tsunamis historiques proposée par la NOAA dispose de cette donnée concernant les temps d'arrivée à la côte que pour peu de cas. En revanche, l'éloignement à la source est disponible. Cette éloignement à la source et le temps d'arrivée du tsunami permettent à la NOAA de réaliser une classification des tsunamis (Tableau 1) en trois catégories :

- Les **tsunamis locaux**, dont la source est située à moins de 100 km des côtes, ou dont le temps d'arrivée à la côte est inférieur à 1h.

- Les **tsunamis régionaux**, dont la source est comprise entre 100 km et 1000 km des littoraux impactés, ou dont le temps d'arrivée de la vague est compris entre 1 h et 3h.
- Les **télé-tsunamis**, dont le tsunami peut provoquer des dommages sur des littoraux à plus de 1000 km de l'origine de celui-ci, ou dont le temps d'arrivée dépasse 3h, depuis sa génération.

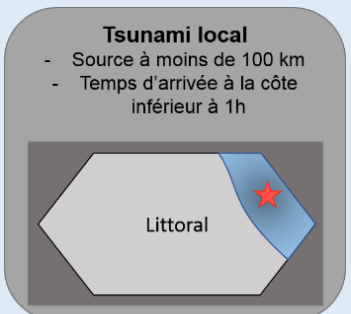
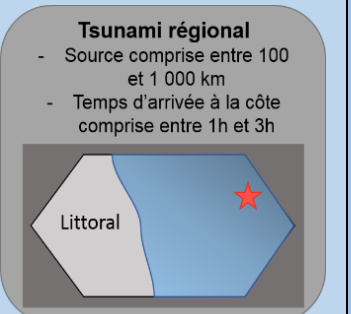

	Tsunami locaux	Tsunamis régionaux	Télé-tsunamis
Sources	Séismes locaux, glissements de terrain	Séismes, éruptions volcaniques	Séismes de subduction, éruptions volcaniques
Distance parcourue par le tsunami	< 100 km (baies)	100 à 1 000 km (échelle synoptique)	> 1 000 km (trans-océanique)
Temps d'arrivée	< 1h	1h à 3h	> 3h
Exemple d'évènement	Tsunami faisant suite au séisme Ligure du 23 février 1887	Tsunami suite au séisme de Boumerdes du 21 mai 2003	Tsunami de l'océan Indien du 26 décembre 2004
Schéma	<p>Tsunami local</p> <ul style="list-style-type: none"> - Source à moins de 100 km - Temps d'arrivée à la côte inférieur à 1h 	<p>Tsunami régional</p> <ul style="list-style-type: none"> - Source comprise entre 100 et 1 000 km - Temps d'arrivée à la côte comprise entre 1h et 3h 	<p>Télé-tsunami</p> <ul style="list-style-type: none"> - Source à plus de 1 000 km - Temps d'arrivée à la côte supérieur à 3h 

Tableau 1 : Tableau représentant la typologie de tsunami proposé par la NOAA accompagné de schémas explicatifs

En combinant la typologie proposée par la NOAA et les évènements historiques (Figure 3) considérés comme majeurs dans le bassin méditerranéen, il apparaît que la moitié des évènements (25 tsunamis soit 50%) sont des tsunamis locaux, c'est-à-dire dont la source est à moins de 100 km des côtes impactées ou dont le temps d'arrivée est inférieur à 1h. Ce type de tsunami, bien qu'impactant une zone plus restreinte, a un fort pouvoir destructeur sur les littoraux à proximité. Le cas d'étude présenté dans cette recherche, un tsunami dans le bassin Ligure, fait partie de cette catégorie. De par la forte urbanisation et la forte concentration d'enjeux sur les littoraux, un tsunami local le long de la côte Ligure pourrait avoir des conséquences désastreuses.

Un tiers (16 tsunamis soit 32%) sont des tsunamis régionaux dont la source est légèrement plus éloignée des côtes et l'étendue des dégâts plus importante. Seulement 6 % des évènements retenus sont des télé-tsunamis, soit 3 tsunamis relevés sur les 4 000 ans de données. Ces évènements, d'une extrême puissance, sont destructeurs, aussi bien au niveau local que global. Il arrive que ces évènements traversent un bassin océanique, surtout lorsqu'il s'agit d'un bassin fermé de taille raisonnable, comme la mer Méditerranée. Un certain nombres d'évènements (6 soit

12%) n'ont pas de renseignements quant à la distance de la source par rapport à la côte. Une focalisation est faite sur chaque type de tsunami, afin de faire ressortir leurs particularités et de les illustrer par des événements historiques majeurs associés.

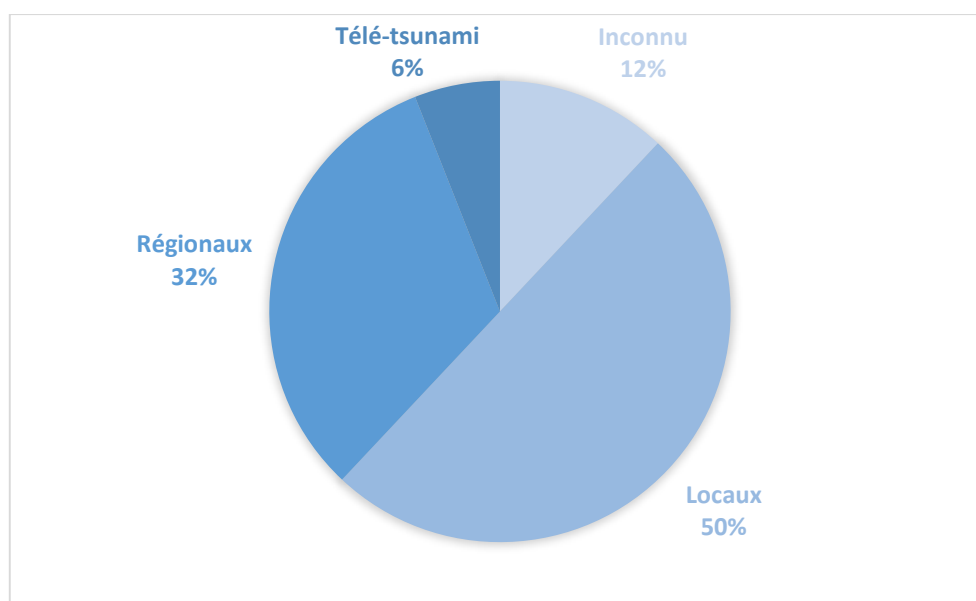


Figure 3 : Graphique représentant le type de tsunami (locaux, régionaux et télé-tsunami) pour la sélection de 50 événements retenus comme majeurs pour la région Méditerranée

2.2. Tsunami locaux, une arrivée rapide sur les littoraux, ne permettant pas une alerte et une évacuation organisée

Les tsunamis locaux sont définis comme des événements générés à une faible distance des côtes (à moins de 100 mètres). Cette proximité de la source engendre une arrivée très rapide de la vague sur les littoraux, moins d'une heure d'après la NOAA. Ces événements sont particulièrement intéressants puisqu'ils ne permettent pas aux autorités d'avoir le temps d'agir ; la population doit donc être en mesure de déceler les signes précurseurs et évacuer les zones sensibles afin de se mettre à l'abri. Cela sous-entend que la population a connaissance de l'existence et de l'exposition du territoire à ces événements et qu'elle sait comment agir et quels comportements tenir pour assurer sa sécurité.

Un grand nombre des événements historiques s'est produit bien avant que des outils de prévention ou de gestion soient mis en place ; ce n'est pas pour autant qu'aucun savoir n'était acquis, ni qu'aucune trace historique n'est disponible. En effet, pour les événements récurrents, les connaissances se transmettaient de génération en génération, favorisant ainsi la culture du risque.

Parmi les événements majeurs relevés, 25 sont considérés comme étant des tsunamis locaux (Figure 3). Une dizaine d'événements a eu lieu sur les côtes grecques, zone fortement sismique, composée de nombreuses failles au fonctionnement complexe. Ces tsunamis ont été générés par des séismes de magnitudes comprises entre $M_w = 6 - 7.5$. Peuvent être cités les événements de - 373 avant JC, le 15 mai

1748, et le 7 février 1963 en mer Egée ; ceux de juin 1402, du 3 mai 1481, et du 31 janvier 1741 sur l'île de Rhodes ; ou encore celui de l'île de Kos de 554.

En mer de Marmara, des séismes de magnitude de $M_w = 6.5 - 7.6$ ont été générateurs de tsunamis en 447, en 1344, en 1766 et plus récemment en 1999 lors du séisme d'Izmit. L'Italie, et plus particulièrement la Sicile, a par le passé été impactée par des tsunamis générés par une source proche. Celui du 4 février 1169 fait suite à un épisode sismique et volcanique (Venzke et coll., 2002) et aurait causé la destruction de plusieurs villes et villages, dont Catane. La marge algérienne, zone sismique importante, est composée à la fois de failles actives à terre et en mer. Cette dernière est responsable de nombreux séismes générateurs de tsunamis, comme les événements du 2 janvier 1365, du 6 mai 1773, du 21 et 22 août 1856, du 9 septembre 1954 et du 10 octobre 1980 (Soloviev et coll., 2000).

Le bassin Ligure, situé entre la France et l'Italie, a par le passé connu des événements sismiques importants, dont l'un a été générateur d'un tsunami : l'évènement du 23 février 1887. A cet événement sismique s'ajoute un événement gravitaire, celui du 16 octobre 1979, faisant suite à l'effondrement d'une partie de l'aéroport de Nice Côte d'Azur pendant des travaux d'agrandissement. Ces deux événements sont davantage détaillés dans le chapitre suivant (Chapitre 2).

Le séisme du 20 juillet 1564, qui a frappé la vallée de la Vésubie, est emblématique pour la région de part les dégâts occasionnés dans cette vallée. Il est pourtant rarement fait état d'un tsunami associé. Il est toutefois inclus dans la base de donnée de la NOAA, ainsi que dans l'inventaire historique des tsunamis en France, réalisé par le BRGM (BRGM, 2012). Dans ce dernier, le tsunami est considéré comme ayant une origine gravitaire au large de Nice. Il s'agirait donc d'une combinaison d'évènement : un séisme générateur d'un glissement sous-marin, provoquant à son tour un tsunami.

D'autres espaces ont par le passé été impactés par des tsunamis locaux, c'est le cas par exemple de l'Espagne, de la Croatie, de Chypre, d'Israël, de la Syrie ou encore du Liban. Ces événements n'ont pas été retenus ici comme tsunamis majeurs, mais il faut garder en tête que ces territoires sont exposés à des événements rapides et brutaux, ne laissant que très peu de temps à réaction. Regardons à présent les tsunamis régionaux historiques ayant impacté la mer Méditerranée.

2.3. Tsunami régionaux, une alerte et une évacuation possible

Contrairement aux tsunamis locaux, les tsunamis régionaux sont des événements qui peuvent permettre une alerte et une évacuation organisée. De par leurs caractéristiques physiques, les vagues générées vont être en capacité d'atteindre des côtes situées entre 100 km et 1 000 km, ou dont le temps de propagation nécessaire à la vague pour atteindre les côtes est compris entre 1h et 3h.

Ces tsunamis, bien qu'ayant un rayon d'action plus large, s'ils viennent à se produire à proximité des littoraux, vont coupler effets locaux et régionaux. Parmi la sélection de tsunamis historiques de Méditerranée, 16 sont des tsunamis régionaux, soit 32 %. Les territoires impactés sont la Grèce, l'Italie, ou encore l'Algérie.

Tout comme elle est fortement impactée par des tsunamis locaux, la Grèce a par le passé connu des événements régionaux (8 tsunamis majeurs sont comptabilisés). La plupart de ces derniers font suite à un séisme de magnitude comprise entre $M_w = 6.7 - 8$. L'évènement régional historique le plus ancien se serait déroulé en – 426 avant JC et aurait fait suite à un séisme de $M_w = 7.1$ dans la mer Egée (Soloviev et coll., 2000). D'autres phénomènes similaires ont été répertoriés, en 142, en 1303, en 1867, en 1948 et plus récemment le 20 juillet 2017 et le 25 octobre 2018.

Le double évènement du 20 juillet 2017 est intéressant puisque le séisme s'est produit en période estivale, sur des littoraux à fort attrait touristique, mais de nuit. Le bilan des dégâts fait état de ceux causés par le séisme mais pas de ceux concernant le tsunami. Nous pouvons supposer que si le tsunami associé s'étaient produit à la même période mais de jour et non plus de nuit, les pertes humaines auraient été considérables (front de mer très attractif). Se pose alors la question de la période à laquelle se produit un phénomène (jour, nuit, été, hiver, etc.) et la variation des dégâts potentiels générés.

L'Algérie, de par la présence de la marge algérienne, dispose d'une activité sismique relativement forte. Quatre évènements notables et générateurs de tsunamis régionaux ont été retenus : celui du 6 mai 1773, du 22 août 1856, le séisme dit d'El Asnam du 10 octobre 1980 et le séisme dit de Boumerdes du 21 mai 2003. Le tsunami du 6 mai 1773 est peu documenté, pourtant Papadopoulos et coll. (2014) le considèrent comme un des évènements important ayant eu lieu en Méditerranée. Il aurait fait suite à un séisme, dans la magnitude n'est pas déterminée.

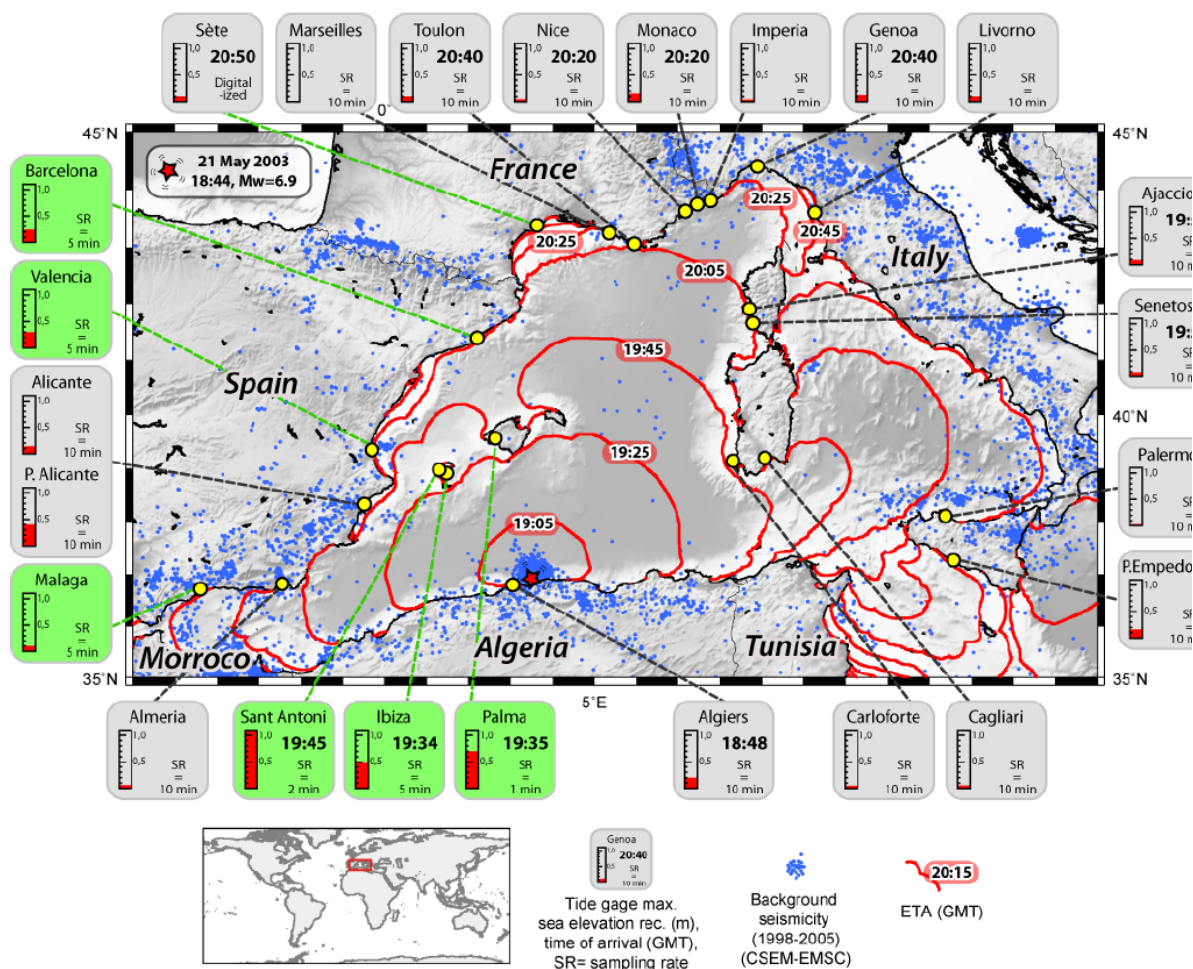
Le séisme de Boumerdes s'est produit le 21 mai 2003, avec une magnitude de $M_w = 6.7$ (Azur séisme). De nombreux dégâts humains et matériels ont fait suite à cet évènement au sein même du pays. De par la puissance de l'évènement, un tsunami a été généré, mais la rupture de la faille était telle que les côtes algériennes ont été peu impactées. La vague s'est en revanche propagée dans une grande partie du bassin. Seulement cinq minutes ont été nécessaire pour atteindre la côte algérienne la plus proche. Cette temporalité, quasi instantanée aurait pu être catastrophique si la vague avait été plus importante, ne laissant aucune action possible à la population. Fort heureusement, cette dernière ne faisait que 10 cm.

L'Espagne, et plus particulièrement les îles des Baléares, bien que de l'autre côté de la Méditerranée, sont les côtes les plus proches. Les îles ont globalement vu la vague arriver en 45 min, avec des vagues pouvant atteindre 3 m, comme ce fut le cas à Majorque. Le continent a également été impacté ; les vagues ont atteint quelques dizaines de centimètres (20 cm à Barcelone, 10 cm à Malaga), plus d'une heure après la génération de la vague. Certaines ont également été observées dans plusieurs ports méditerranéens français, notamment à Marseille et Monaco. Légèrement plus éloignées, les côtes Françaises ont été impactées par des vagues d'une dizaine de centimètres, 1h15 à 1h30 après le séisme.

De manière générale, les temps d'arrivée de la vague pourraient permettre un alerte, une évacuation et ainsi une mise en sécurité de la population, non pas sur les côtes algériennes, mais sur les côtes voisines (Espagne, France et Italie). L'Algérie apparaît comme génératrice de tsunamis tout en étant relativement protégée de ceux-

ci (Figure 4). Nous pouvons supposer que cela vient de l'orientation des failles ou de sa bathymétrie, qui lui apportent une certaine protection.

Suite à cet évènement, plusieurs études ont été réalisées afin de comprendre le mécanisme de la faille dans un premier temps, et dans un deuxième temps de simuler les potentiels tsunamis associés (Wang et Liu, 2005 ; Sahal, 2011 ; Vecchio et coll., 2014). Il s'avère que les vagues générées peuvent être suffisamment importantes pour engendrer des dégâts sur les côtes françaises (de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres, impactant principalement les plages) (Figure 4).



Ce scénario aurait donc largement pu être traité dans cette étude. Or, le choix a été fait de se focaliser uniquement sur les évènements brutaux, à dynamique rapide, sans possibilité d'alerte. Dans ce cas précis, l'éloignement de la source, et le temps d'arrivée de la vague (d'1h30 à 2h, BRGM) permettent aux opérationnels d'organiser l'alerte et l'évacuation des populations. Cet évènement n'a ainsi pas été retenu pour être l'un de nos évènements de référence.

La mer Méditerranée est ainsi potentiellement impactée par un tsunami régional dans de nombreuses régions. Plusieurs évènements historiques se sont déjà produits

et ont engendré des dégâts plus ou moins importants selon la magnitude de l'évènement générateur de la période de la journée (jour, nuit) et des particularités locales. D'autres évènements, d'ampleur plus importante, viennent, lorsqu'ils se produisent, à impacter la quasi-totalité de la Méditerranée. Il s'agit des télé-tsunamis.

2.4. Les télé-tsunami, des évènements rares en Méditerranée mais aux effets destructeurs

Les télé-tsunamis, sont les évènements les plus puissants et généralement les plus destructeurs pouvant se produire. Ils reprennent les caractéristiques des tsunamis locaux et régionaux, c'est-à-dire un potentiel impact sur les littoraux à proximité, mais généralement avec des magnitudes et des intensités beaucoup plus fortes. Ils vont également avoir la capacité de traverser des bassins plus conséquent, se propageant sur plus de 1 000 km. De par la nature multi-échelle de ces derniers, peuvent se poser des problématiques au niveau local en terme d'alerte et d'évacuation, comme pour les tsunamis locaux. Plus les littoraux sont éloignés de la source plus le délai d'arrivée de la vague va augmenter, favorisant ainsi les actions des opérationnels et permettant une alerte et une évacuation organisée de la population.

D'après les études historiques réalisées (Soloviev et coll., 2000 ; Papadopoulos et coll., 2014) trois télé-tsunamis se sont produits en Méditerranée entre – 2000 avant JC et 2018. Il est possible que d'autres évènements catastrophiques de cette ampleur se soient produits, mais il n'en est pas fait état que ce soit par manque de données solides, d'études scientifiques, pertes ou destruction de documents historique, etc.

Le télé-tsunami le plus ancien répertorié remonte au 21 juillet 365 en Crète, faisant suite à un séisme de magnitude $M_w = 8$. Le 28 décembre 1908, un télé-tsunami généré par un séisme de magnitude $M_w = 7.1$, est formé entre la Sicile et la Calabre (Italie). Un rapport des Nations Unies (Desai et coll., 2015) fait état de cette catastrophe comme étant l'une des plus meurtrières : « *Le 28 décembre 1908, le séisme de Messine et le tsunami associé dans la Méditerranée, tuèrent approximativement 123 000 personnes en Sicile et en Calabre, et est considéré comme étant la plus grosse catastrophe faisant suite à un tsunami, avant les évènements de l'océan Indien de 2004* ».

L'ampleur prise par cet évènement est certainement en grande partie due à la géographie du site. Messine se situe dans un détroit, il s'agit du point le plus proche entre la Sicile et le continent, permettant aujourd'hui des jonctions maritimes. Le séisme se serait justement généré dans le détroit (Minelli et coll., 2016), provoquant une arrivée rapide sur les deux littoraux (séparés par quelques kilomètres), ne laissant pas le temps aux populations d'agir et de se mettre en sécurité. Il a parcouru 1 500 kilomètres, impactant Malte, la Tunisie, la Libye et l'Égypte. Cette catastrophe est un évènement historique majeur pour la région et, s'il venait à se reproduire aujourd'hui, générerait des dégâts bien plus considérables étant donné l'évolution des littoraux, qui sont aujourd'hui très fortement urbanisés et peuplés.

La forte sismicité de l'arc Hellénique est à l'origine du séisme, du 9 juillet 1956 de magnitude $M_w = 7.8$, générateur du dernier télé-tsunami répertorié en date. Celui-ci a principalement frappé la Grèce, mais également la Turquie, l'Égypte, arrivant

jusqu'à la mer Adriatique en impactant la Croatie et la méditerranée occidentale, touchant également les côtes françaises. Les côtes les plus proches impactées se situent à deux kilomètres de la source, alors que les plus éloignées se situent à plus de 1 700 kilomètres.

Les télé-tsunamis, bien que très rares à l'échelle historique humaine, existent en Méditerranée. Ils sont particulièrement redoutables car ils peuvent impacter à la fois les littoraux à proximité immédiate, ne permettant pas d'alerter les populations, mais peuvent impacter également les littoraux de l'ensemble de cette mer. Certains espaces méditerranéens sont régulièrement impactés par des tsunamis, un bilan de ces zones tsunamigènes a ainsi été réalisé.

3. Des territoires davantage exposés aux tsunamis

L'inventaire des tsunamis historiques de Méditerranée réalisé précédemment a permis de faire ressortir les principaux espaces tsunamigènes de cet espace. Bien que majoritairement de source sismique (de magnitude 6 à 8), des tsunamis peuvent être générés en Méditerranée par des éruptions volcaniques ou des glissements de terrain. Quel que soit le type de tsunami, certaines zones ressortent régulièrement et s'avèrent être fortement tsunamigènes (Figure 5 et Figure 6).

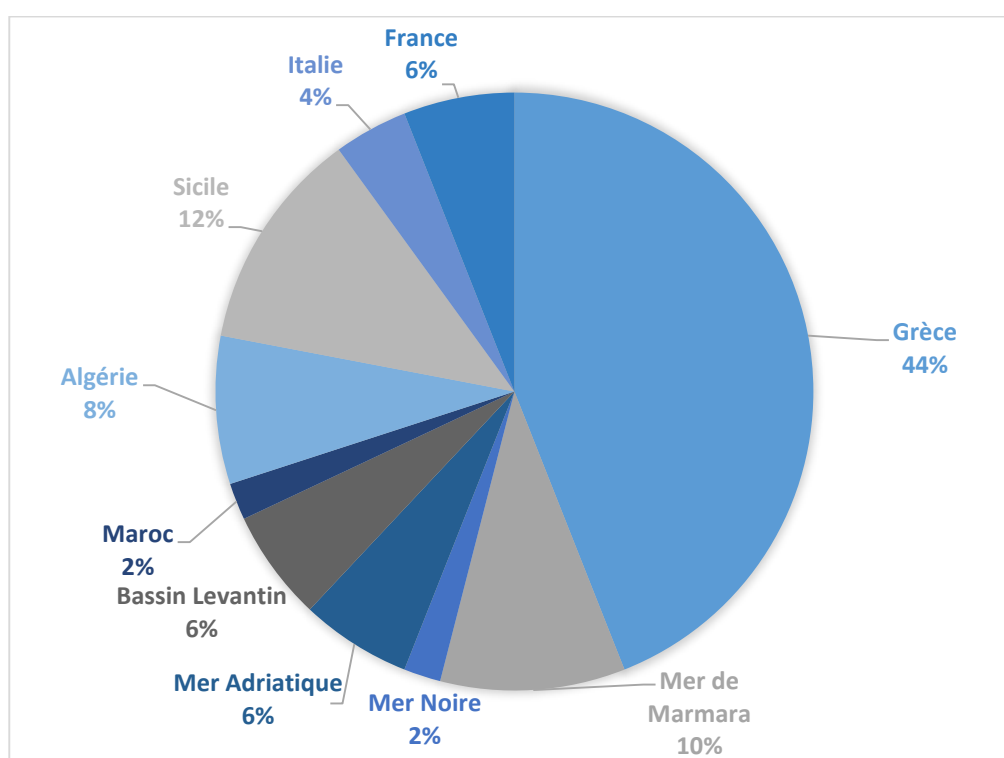


Figure 5 : Représentation graphique de la répartition géographique des tsunamis majeurs en Méditerranée

La Grèce (Figure 5 et Figure 6) est la zone la plus propice à la génération de tsunamis, avec de nombreux événements historiques. Elle représente à elle seule 44 % de l'ensemble des événements soit 22 tsunamis historiques. La Grèce est aussi

bien génératrice de tsunamis locaux que de télé-tsunamis, s'expliquant par une forte activité sismique et volcanique.

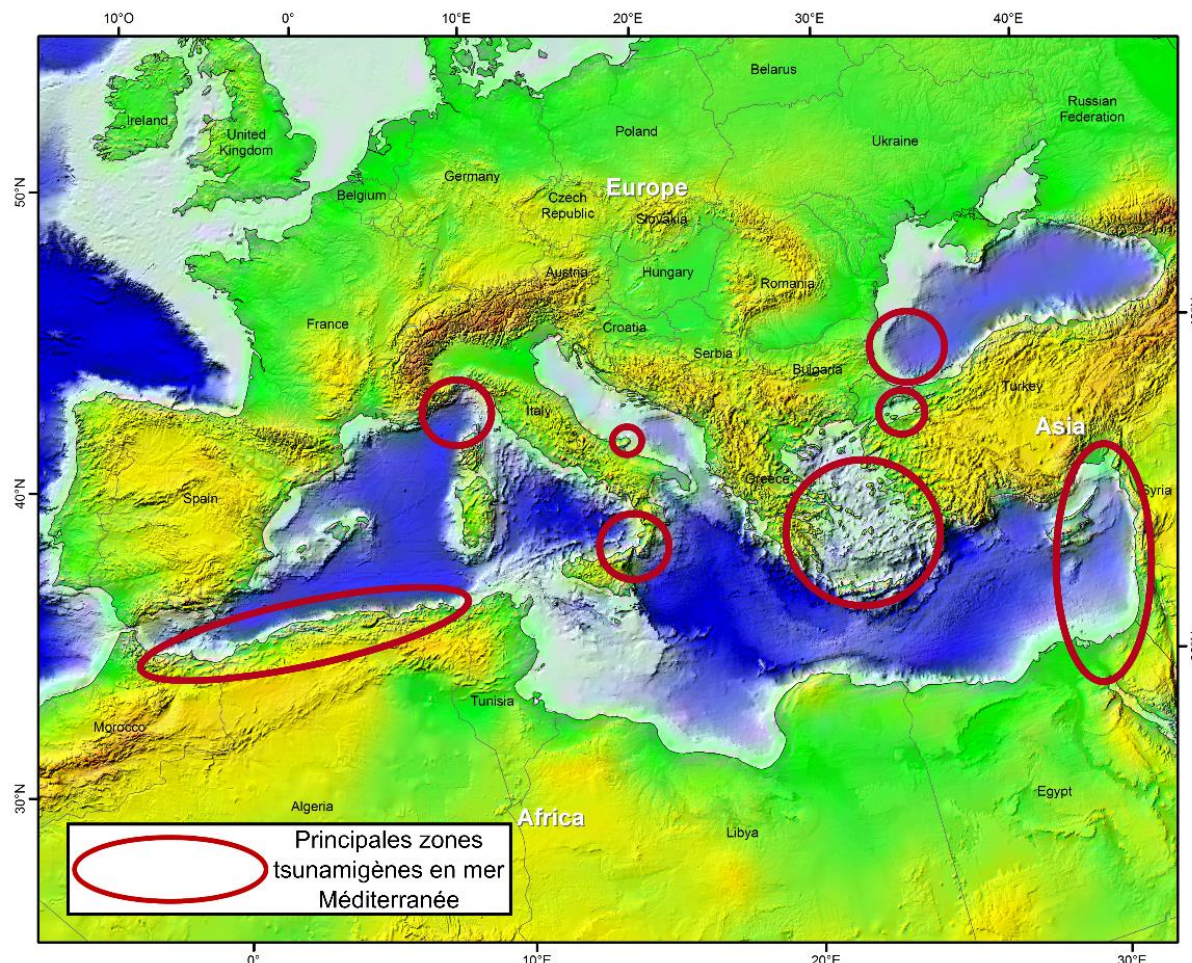


Figure 6 : Cartographie des zones tsunamigènes méditerranéennes sources des tsunamis majeurs

La Sicile (Figure 5 et Figure 6), deuxième de ce classement présente les mêmes particularités géologiques favorables à la génération de tsunamis : une forte sismicité et une zone volcanique active. Dans cet espace ont été générés 6 tsunamis, du local au télé-tsunami. Le reste de l'Italie n'a connu que 3 événements : un en Calabre, relié sismiquement à la Sicile, un au niveau de la péninsule de Gargano et le dernier au niveau du bassin Ligure (compté parmi les événements français).

La mer de Marmara (Figure 5 et Figure 6), zone sismique due à la présence d'une faille la traversant, a connu par le passé des tsunamis. Elle présente la particularité de potentiellement impacter Istanbul, capitale et mégapole aux nombreux enjeux. Si elle venait à être impactée, les conséquences en seraient catastrophiques. La mer Noire à proximité a également été le lieu d'action d'un événement historique majeur.

Le Bassin Levantin (Figure 5 et Figure 6), partie orientale de la Méditerranée, a été source de tsunamis. Ceux-ci ont par le passé aussi bien impacté Chypre, que le Liban, Israël ou encore la Syrie. L'Afrique du nord (Figure 5 et Figure 6) a également été à l'origine de ce type d'évènement. L'Algérie a la spécificité d'être génératrice de tsunamis qui l'impacte peu directement, mais qui vont principalement impacter les côtes voisines (Espagne, France).

La France ([Figure 5](#) et [Figure 6](#)) n'est pas en reste puisque des tsunamis peuvent être générés à proximité immédiate. Elle est ainsi impactée majoritairement par des tsunamis locaux, en 1564, 1887 et 1979. Comme vu précédemment, ce type de tsunamis a la particularité de se produire près des côtes ne permettant ni aux autorités ni aux populations de réagir.

Ces événements d'une rare ampleur sont également rares par leur occurrence. Ils marquent cependant la présence de tsunamis exceptionnels en mer Méditerranée. Ces littoraux ont la particularité d'être densément peuplés, fortement urbanisés et regroupent de nombreux enjeux majeurs ; ils ont donc un fort potentiel dommageable. Ces travaux se basent ainsi sur ce bilan, que le risque de tsunamis est bien présent sur les côtes méditerranéennes et que des analyses poussées doivent être réalisées afin de développer des actions pour protéger les populations (enseignement, prise de conscience, outils réglementaire, etc.).

4. [Conclusion](#)

Le risque de tsunami est donc bien réel dans le bassin méditerranéen. Ces littoraux ont la particularité d'être fortement peuplés, urbanisés et donc de réunir un grand nombre d'enjeux sur ces espaces. Lorsque l'on croise cela avec la potentialité d'une menace venant de la mer, ces territoires deviennent des zones à risques.

Une multitude d'événements majeurs se sont produits par le passé, provoquant des dégâts plus ou moins importants selon leur éloignement des côtes et selon leur puissance. Certains littoraux sont davantage impactés que d'autres, c'est le cas par exemple de la Grèce, de la Mer de Marmara ou encore de la Sicile. Les littoraux français ne sont toutefois pas en reste et ont par le passé été touchés par des tsunamis.

Ne pouvant réaliser une étude globale au niveau de la Méditerranée, ces travaux sont ciblés sur la Bassin Ligure et plus particulièrement sur les Alpes-Maritimes. Cet espace présente des spécificités locales que ce soit au niveau de la géologie, de la sismicité ou de sa structuration géographique. Elle est exposée à de nombreux aléas et a connu par le passé deux événements tsunamiques majeurs, qui vont être présentés dans le prochain chapitre ([Chapitre 2](#)).

CHAPITRE 2 : LE LITTORAL AZUREEN, UN TERRITOIRE EXPOSE A DES TSUNAMIS LOCAUX

La côte Ligure, située au sud-ouest des Alpes, à la frontière franco-italienne, est un territoire industrialisé fortement peuplé. Le département des Alpes-Maritimes est un département qui, de par sa géographie, son climat et son économie, est exposé à de nombreux aléas naturels et anthropiques. Les premiers sont d'origine **naturelle** et donc liés aux éléments, et peuvent cependant être minimisés ou au contraire accentués par l'action de l'homme. Les aléas **anthropiques**, quant à eux sont générés par les activités humaines. Elles sont généralement liées à l'industrie, à la génération d'électricité (barrages, centrales nucléaires), ou encore directement aux actions de l'homme, comme les attaques terroristes.

Cette thèse se focalise uniquement sur les aléas naturels et plus particulièrement les tsunamis. Le contexte géologique est l'un des plus actifs de la Méditerranée occidentale avec des séismes récurrents, des glissements de terrains (sub-aériens et sous-marins) et des tsunamis (e.g., [Eva et Rabinovich, 1997](#) ; [Migeon et coll., 2011](#)). La quasi-totalité d'entre eux ont été générés par des séismes, à l'exception du tsunami du 16 octobre 1979, généré par un glissement sous-marin au voisinage de l'aéroport de Nice Côte d'Azur.

Un rapide état des lieux des différents aléas pouvant impacter ce territoire est présenté. S'en suit une explication succincte du fonctionnement de la géologie locale, pour enfin aborder les deux événements emblématiques de la région, que sont le tsunami faisant suite au séisme du 23 février 1887 et le séisme d'origine gravitaire du 16 octobre 1979. Ce descriptif est réalisé à partir d'une analyse d'archive afin d'obtenir des informations quant aux dégâts occasionnés.

1. Une géographie particulière génératrice de nombreux événements soudains et brutaux

Le département des Alpes-Maritimes est situé à l'extrémité sud-est du territoire métropolitain français, à la frontière de l'Italie. Il appartient à la Région Sud-Provence-Alpes-Côte d'Azur (Sud PACA), avec cinq autres départements : les Alpes-de-Haute-Provence, les Hautes-Alpes, les Bouches-du-Rhône, le Var et le Vaucluse. Ils s'étendent sur un territoire de 4 300 km², qui a la particularité d'allier les montagnes au nord (Alpes du Sud) et la mer au sud (mer Méditerranée) ([Figure 7](#)).

Ces grandes disparités de reliefs sont à l'origine de la présence de nombreux aléas sur le territoire départemental. Sont en effet aussi bien inclus les aléas associés aux reliefs comme les événements gravitaires (avalanches, glissements de terrain), que ceux liés aux littoraux comme les risques de submersion (tempête ou tsunami), ou encore ceux associés à l'urbanisation comme le ruissellement urbain ou les risques industriels.

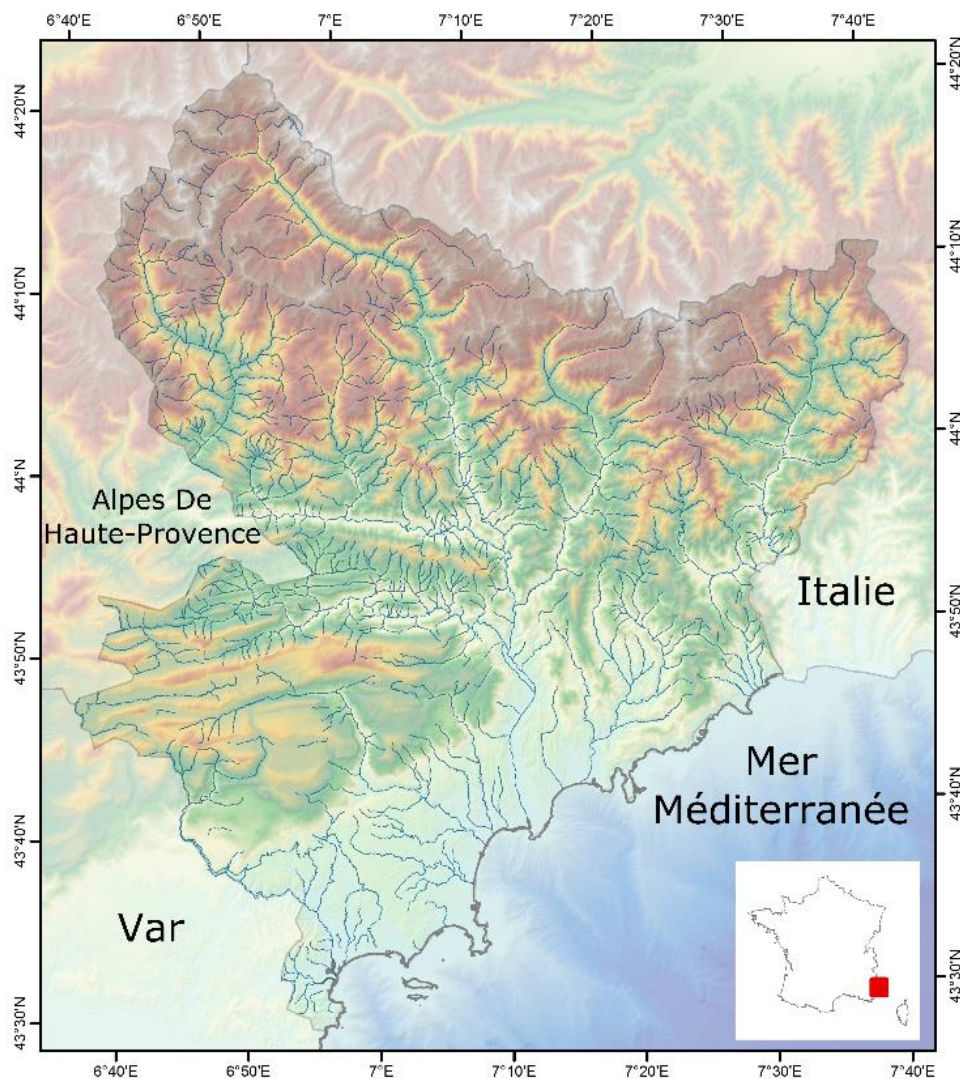


Figure 7 : Cartographie du relief des Alpes-Maritimes
Sources : L. Boschetti (2019)

Les aléas climatiques (les pluies, les orages, les tempêtes, les vents violents, la neige, le verglas, la grêle, la canicule et les épisodes de grand froid) sont également présents dans le département. Le territoire est régulièrement soumis à un grand nombre de ces événements, mais c'est leur aspect extrême qui fait qu'ils se transforment en éléments destructeurs. Ils sont généralement prévus par Météo France, qui est en charge des prévisions météorologiques et des alertes au niveau national. Les épisodes de verglas, neigeux et de grand froid impactent principalement l'arrière-pays et les régions montagneuses. Le littoral est quant à lui davantage touché par des épisodes pluvieux d'une forte intensité (potentiellement générateurs d'inondations).

Les inondations, qui frappent cette partie du territoire français, font généralement suite à des pluies extrêmes. Trois événements ont particulièrement impacté le littoral azuréen ces 25 dernières années : crue centennale du Var en 1994, les inondations du 3 octobre 2015, et celles de novembre et décembre 2019. D'un point de vue de l'alerte et de la gestion de crise, ces événements ont été traités différemment. Le premier, en 1994, n'a pas surpris les acteurs puisque la crue, bien

que rapide, a été annoncée, permettant la mise en place de la cellule de crise. Les inondations du 3 octobre, bien qu'annoncées de plus faible ampleur par Météo France, ont surpris les acteurs institutionnels et la population. Cet événement a remis en cause de nombreuses pratiques, qu'il s'agisse de gestion de crise, d'alerte à la population, ou de connaissance du risque par les citoyens. Les dernières, correspondent à plusieurs événements (22 au 24 novembre, 1^{er} décembre, 20 décembre), ont montré les évolutions et les mesures prises depuis 2015. Bien que des dégâts aient été occasionnés, aucune perte humaine est à déplorer.

A l'ensemble de ces aléas s'ajoute le tsunami. Celui-ci, présent en Méditerranée (Chapitre 1) et plus particulièrement dans la bassin Ligure, a par le passé impacté les Alpes-Maritimes. Deux événements emblématiques sont retenus : celui du 23 février 1887 et celui du 19 octobre 1979. Cet espace présente des spécificités locales que ce soit au niveau de la géologie, de la sismicité ou de sa structuration géographique.

2. Des spécificités géologiques locales, une zone à forte sismicité propice à la génération de tsunamis

La Riviera franco-italienne se situe à la jonction des Alpes Occidentales Sud et du bassin océanique Ligure (Larroque et coll., 2009). A terre, la ceinture Alpine correspond aux Alpes Ligure et aux arcs de Nice et Castellane, qui sont poussés vers le sud depuis 15 Ma (e.g. Gidon et Pairis, 1992 ; Laurent et coll., 2000). La déformation du front alpin est plus ou moins co-extensive à la côte Ligure (Sage et coll., 2011).

Au large, la marge nord Ligure expose des caractéristiques typiques d'une faille de rift continental, avec des blocs inclinés délimités par failles (listriques) à pendage sud-est (Rhéault et coll., 1984 ; Rollet et coll., 2002). Le bassin Ligure se serait développé dans un contexte d'arrière arc (Doglioni et coll., 1997) qui se serait ouvert de l'Oligocène ancien au Miocène précoce à l'arrière de la zone de subduction des Pouilles et en partie au sein de la ceinture des Alpes occidentales (Westphal et coll., 1976 ; Edel et coll., 2001 ; Gattacceca et coll., 2007).

La côte ligure a la particularité d'avoir un plateau continental étroit, suivi d'une pente rapidement forte. De par cette bathymétrie et l'étude des sédiments et leurs dépôts, de nombreuses traces de glissements de terrain ont été observées montrant que ce phénomène n'est pas isolé (Migeon et coll., 2011). Ainsi, de nombreux travaux ont vu le jour afin d'analyser l'aléa tsunami dans cette région (Ioualalen et coll., 2010, 2014 ; Hassoun, 2014 ; Kelner, 2018).

Le bassin Ligure est une des zones les plus sismiques d'Europe occidentale, comprenant la faille Ligure, également appelée LFS (Ligurian Fault System). Cette faille, de 80 km de long, est orientée selon un axe NE-SO (selon un azimut de N55°E). Il ne s'agit en fait pas d'une seule faille continue, mais d'un réseau de failles actives. La Figure 8 représente la sismicité locale, qui apparaît relativement dense à terre, et non négligeable en mer. Se pose alors la question de l'exposition de ces territoires, fortement anthropisés et aux fortes densités de population, aux aléas sismiques et tsunamiques.

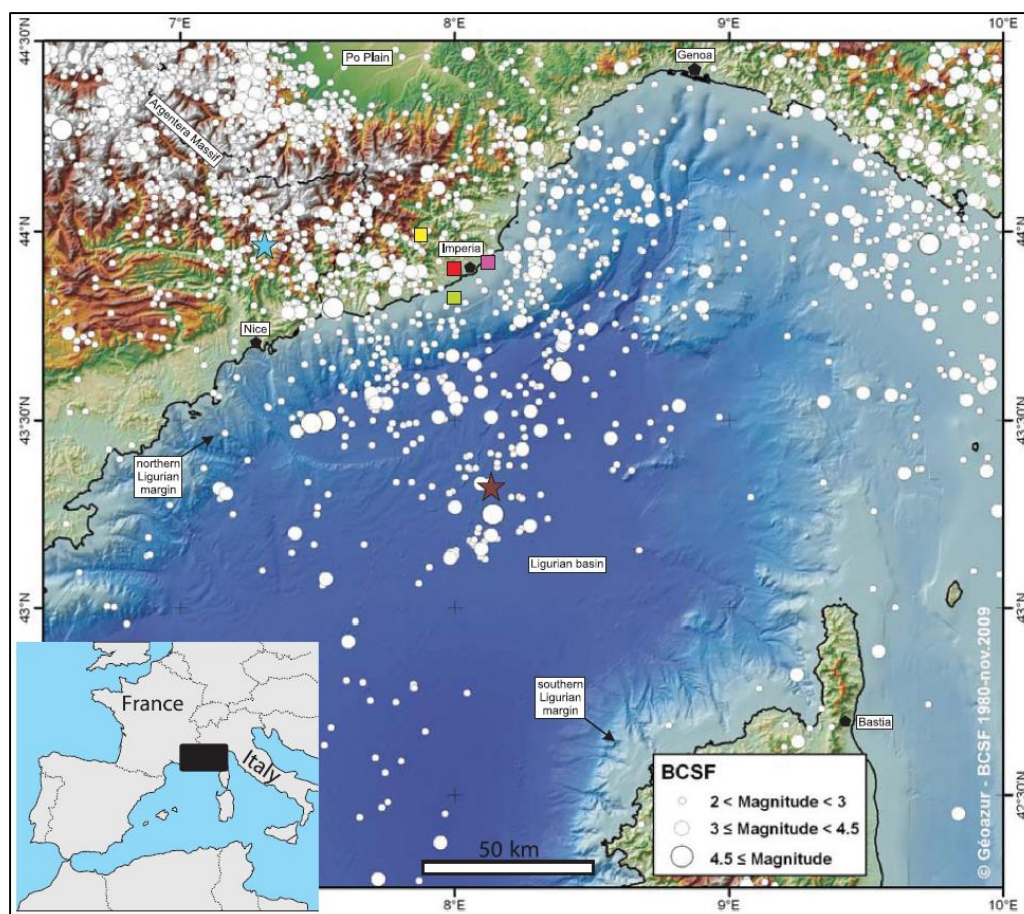


Figure 8 : Carte de la sismicité en zone Ligure durant la période 1980-2010

(Catalogue du Bureau Central Sismologique Français (<http://www.franceseisme.fr/>) tirée de Larroque et coll. (2012). Compilation de diverses sources : Institut Géographique National (IGN), le Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, NASA), et l'Institut Français de Recherche et d'Exploration de la Mer (IFREMER). Les magnitudes de ces séismes sont comprises entre 2 et 4.7. Les étoiles de couleurs correspondent approximativement aux épicentres du séisme du 20 juillet 1564 (étoile bleue) et du 19 juillet 1963 (étoile marron). Les carrés de couleurs correspondent aux précédents emplacements supposés de l'épicentre du séisme de 1887 (avant Larroque et coll. 2012) dont la magnitude est désormais estimé à 6.7 – 6.9 (Ioualalen et coll., 2014)

Bien que fortement sismique, la région Ligure ne fait face qu'à une sismicité modérée (Figure 9), avec peu de séismes potentiellement tsunamigènes. Il arrive cependant que certains séismes plus puissants que la moyenne soient générateurs de tsunamis, comme cela a pu être le cas lors de l'évènement du 23 février 1887, dont la magnitude a été estimée à $M_w = 6.7 - 6.9$ (Larroque et coll., 2009, 2012).

De par son aspect exceptionnel, que ce soit en terme de puissance de l'évènement ou de dommages occasionnés, cet évènement est apparu comme crucial à étudier. Les dégâts ont en effet été observés sur une grande partie du bassin Ligure, avec des dommages plus importants en Italie et à l'est du département, car plus proche de l'épicentre. La partie suivante s'intéresse donc aux dégâts engendrés par ce dernier, et présente également une deuxième catastrophe, celle du 16 octobre 1979, tsunami d'origine gravitaire.

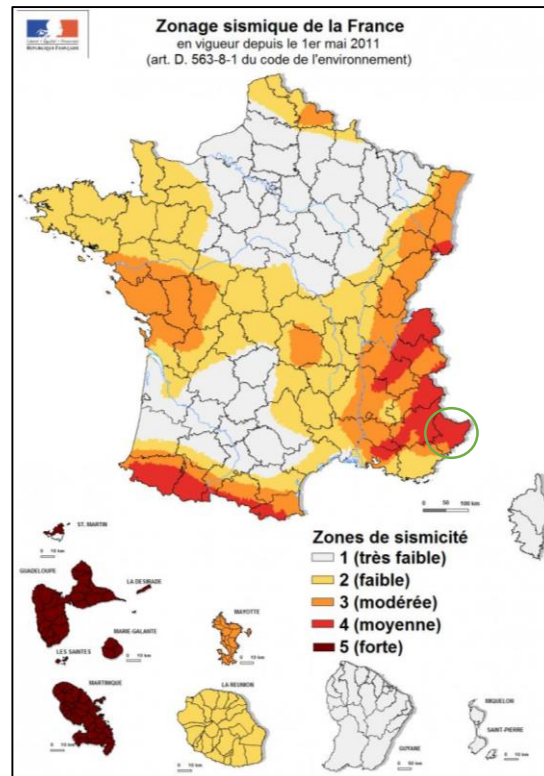


Figure 9 : Carte du zonage sismique français
Carte du zonage sismique française
(<http://www.georisques.gouv.fr/articles/zonage-sismique-de-la-france>).
Le cercle vert marque la région PACA

3. Un littoral exposé à l'aléa tsunami, deux évènements historiques majeurs

Le littoral azuréen, zone d'étude de ces travaux, est exposé aux submersions marines par tsunami. Il a connu plusieurs évènements sismiques et tsunamiques marquants qui ont impacté les littoraux et leurs sociétés. Deux dates peuvent être retenues : 1887 et 1979. Ces deux évènements ont généré des dégâts importants qu'il s'agisse de pertes humaines ou de de dégâts matériels. Afin de les présenter, une étude bibliographique et un travail d'archive ont été réalisés.

3.1. L'évènement majeur, le tsunami généré par le séisme Ligure du 23 février 1887

Le 23 février 1887 un séisme sous-marin frappe la mer Ligure et aurait été ressenti jusqu'en Suisse, en Autriche et dans les Pyrénées (Larroque et al. 2012). Trente minutes après ce tremblement de terre, un tsunami déferla sur le littoral, principalement sur les villes de Nice et Gênes et aurait engendré des dégâts sur plus de cent kilomètres de côte. Les vagues les plus hautes auraient atteint deux mètres sur certaines portions du rivage. Peu d'informations sur les dégâts occasionnés par le tsunami sont disponibles. Des dégâts ont toutefois été générés sur l'ensemble du

littoral franco-italien. A échelle plus locale, comme à Nice, d'avantage d'informations sont disponibles.

3.1.1. Des dégâts occasionnés le long du littoral Ligure

Le séisme de 1887 est relativement récent, mais est cependant trop éloigné dans le temps pour avoir des données précises. Il est donc difficile d'obtenir des données sur ce séisme et le tsunami qui suivit car plus aucun témoin vivant ne peut apporter de l'aide aux chercheurs. Les seules sources d'informations sont les coupures de presse de l'époque, ainsi que les quelques récits écrits laissés.

La Riviera italienne, située à proximité de la zone de rupture de la faille, a connu des dégâts considérables. Plusieurs villes, aussi bien situées sur le littoral que dans l'arrière-pays, ont été impactées, soit par les secousses sismiques, soit par la submersion marine par tsunami.

Le 23 février correspond pour l'année 1887, au mercredi des Cendres qui représente, pour la religion Catholique, l'entrée en Carême. Cette cérémonie religieuse sera marquée par la mort d'un grand nombre de personnes. En effet, le peuple italien, très pratiquant, se réunit en masse dans les églises. Ceci va être observé à Diano Marina, mais surtout à Baiardo.

Ce petit village, situé à une quarantaine de kilomètres du littoral ligure, n'a connu que très peu de pertes matérielles, mais un bilan humain très lourd. La quasi-totalité des villageois étaient regroupés dans l'église lors du tremblement de terre, qui a provoqué l'effondrement de la voute sur la foule, faisant un bilan humain de 220 personnes. La (Figure 10) représente l'effondrement de la voute des suites du séisme et les ruines de l'église tels qu'il est encore possible de les visiter aujourd'hui.

Côté français, le littoral azuréen semble avoir été relativement épargné en comparaison à la partie italienne. Toutefois, de nombreuses vallées ont été impactées, parmi lesquelles, la vallée de la Roya, la vallée de la Vésubie, la vallée de la Tinée, la vallée du Var supérieur, la vallée du Cians et la vallée de l'Esteron (*Azur Séisme*). De nombreux petits villages, situés dans l'arrière-pays, ont vu leurs maisons lézardées ou détruites en partie, ou encore des cheminés tombées.

Menton, ville française la plus proche de l'épicentre, est celle qui a connu le plus de dégâts. La quasi-totalité des maisons ont été touchées, soit de manière superficielle (quelques fissures), soit de manière beaucoup plus profonde, pouvant aller jusqu'à l'effondrement partiel. La Figure 11 représente des photographies d'époque prises peu de temps après le séisme. Des pans entiers de murs se sont écroulés, laissant de nombreux sinistrés.

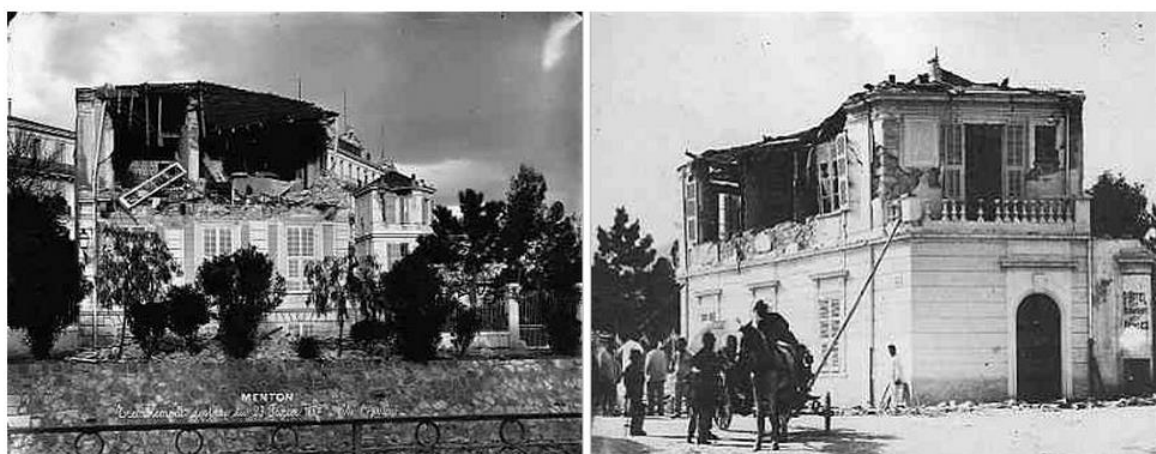
La ville de Nice n'a pas été épargnée par cette catastrophe et a, elle aussi, subi son lot de dégâts. La ville de Nice, principal centre urbain, a fait l'objet d'écrits et de descriptifs quant à l'évènement et aux dégâts associés. Ces documents sont toujours disponibles à l'heure actuelle, notamment aux archives départementales. Certains d'entre eux sont présentés ci-dessous.



Figure 10 : Eglise de Bajardo (Italie) après le séisme de 1887 et de nos jours

La première photographie a été prise suite au tremblement de terre et montre les dégâts occasionnés suite à l'effondrement du toit. La deuxième est une photographie de l'intérieur de l'église aujourd'hui (2017). La troisième est une photographie de l'extérieur avec un panneau précisant que l'église a été détruite suite au tremblement de terre du 23/02/1887.

(Photographies de M. Zanti, 2017)



Effets du séisme de 1887

Villas situées en bordure du Carei. De nos jours le cours d'eau est entièrement couvert, à cet endroit se trouve les jardins Biovès.

(Collection Didier Moullin)

Figure 11 : Effets du séisme de 1887 sur la ville de Menton

(Sources : Azur séisme)

3.1.2. Des dégâts occasionnés à Nice, récit d'époque

Le journal local de l'époque, *Le Petit Niçois* (24/02/1887), permet de reconstituer l'évènement et d'identifier les comportements de panique qu'il a pu générer.

« La première oscillation a été presque imperceptible, quelques personnes à peine l'ont sentie. Huit minutes après, une seconde oscillation ébranlait les maisons sur leurs bases. C'était comme un déchirement. Tout craquait, les murs, les meubles, les cloches sonnaient, les chiens aboyaient, des personnes effarées, tremblantes sautaient de leur lit et s'empressaient de quitter leur domicile. [...] »

A 6 heures 5, la troisième oscillation se produit. Des femmes se couchent par terre s'évanouissent, les enfants poussent des cris, c'est un spectacle déchirant. On ne se sent plus en sûreté et l'on court plus loin dans la campagne, à la recherche d'un endroit découvert. »

Guy de Maupassant (1850-1893) a également écrit de petits récits à ce sujet. *Tremblement de Terre*, tiré de ses chroniques, décrit comment l'écrivain a personnellement vécu la catastrophe.

« Je dormais profondément quand je fus réveillé par d'épouvantables secousses. Pendant la première seconde d'effarement, je crus tout simplement que la maison s'écroulait. Mais comme les soubresauts de mon lit s'accroissaient, comme les murs craquaient, comme tous les meubles se heurtaient avec un bruit effrayant, je compris que nous étions balancés par un tremblement de terre. Je sautai debout dans ma chambre et j'allais atteindre la porte quand une oscillation violente me jeta contre la muraille. Ayant repris mon aplomb, je parvins enfin sur l'escalier où j'entendis le sinistre et bizarre carillon des sonnettes tintant toutes seules comme si un affolement les eût saisies ou comme si, servantes fidèles, elles appelaient désespérément les dormeurs pour les prévenir du danger. »

Les dégâts occasionnés ont été nombreux, mais moins importants que ne le laissait présager les secousses. Le journal *Le Petit Niçois* (24/02/1887), réalise un état des dégâts selon différents quartiers. Les vieux quartiers semblent avoir relativement bien résisté aux secousses. La population semblait s'attendre à des dégâts plus importants de par la vétusté du bâti.

« On ne peut encore calculer les dégâts qui ne sont qu'imparfaitement connus. Disons cependant qu'ils sont beaucoup moindres qu'on n'était en droit de le prévoir. [...] »

Voilà, croyons-nous, racontés à la hâte, tous les dégâts occasionnés par le terrible phénomène, dans les vieux quartiers qui ont, disons-le bien vite, pour rassurer notre population, admirablement résisté aux secousses. »

Le tsunami généré par le séisme est en revanche quasi inexistant des récits, ce qui peut montrer une méconnaissance du phénomène, ainsi que son incompréhension.

Le Petit Niçois (24/02/1887) écrit quelques lignes à ce sujet :

« Les eaux du nouveau bassin du port ont subi le contrecoup des trépidations du sol. Elles sont montées tout d'un coup de 50 centimètres et ont immédiatement baissé d'autant. »

Le fait a été constaté par plusieurs personnes. Il en résulterait que les vibrations de la croûte terrestre sur le territoire de Nice ont eu une amplitude de près d'un demi-mètre ».

Guy De Maupassant parle succinctement de ce phénomène dans ces chroniques :

« Quelques instants après la première secousse, la mer s'est brusquement retirée, laissant à sec des bateaux de pêche et des poissons sur le sable. Les petites sardines frétilaient, un gros congre rampait en fuyant, mais on ne songeait guère à le poursuivre. Puis, un flot haut de deux mètres, plutôt un soulèvement qu'une vague, est venu couvrir la plage et la mer enfin a repris son niveau. »

Sous la panique, une partie de la population niçoise préfère fuir la ville et migrer vers les campagnes. Cela a pour conséquence une saturation des différents moyens de transports, ainsi qu'un aspect encore plus chaotique de ville fantôme pour les quartiers les plus délaissés.

« Nice est en déménagement. Les voitures disputées à coups de louis, les omnibus des hôtels, les tramways bondés de monde, de malles, de paquets, fendent difficilement la foule. On quitte Nice, les uns se rendent à la campagne, les autres sont à la gare oubliant que le danger est général, que le tremblement de terre n'est pas circonscrit dans le périmètre de Nice, mais s'étend de Gênes au-delà de Marseille. » (Le Petit Niçois, 24/02/1887).

Une autre partie de la population envahit les rues et déserte tous les bâtiments. Le Petit Niçois (24/02/1887) donne plusieurs informations,

« Les maisons sont toutes abandonnées, toute notre population est dehors [...] » Les gens se regroupent au niveau d'espaces ouverts, tels que la place Masséna, le Jardin Public ou la Promenade des Anglais.

« Sur la place Masséna, la foule est nombreuse, on apporte des chaises et l'on s'installe. »

« A la promenade des anglais la foule est grande. Des tentes sont dressées sur la plage, où des ménages entiers sont venus se réfugier. »

Le fait que de nombreuses familles viennent se réfugier au niveau des plages pour se mettre à l'abri d'une éventuelle nouvelle secousse, tant à révéler que la population méconnaît l'existence d'un risque de tsunami déclenché par un séisme. En effet, les plages seraient peut-être épargnées de possibles effondrements en cas de séismes, mais seraient les premières touchées par un tsunami. Ces réactions sont intéressantes puisqu'elles révèlent comment une population agit face à un événement précis. Bien que l'époque ne soit plus la même, des réactions comportementales similaires sont aujourd'hui encore observées (Provitolo et Dubos-Paillard, 2012).

Le fait que la population se regroupe sur les plages est un fait qu'il faut relever, puisqu'il montre bien un manque de connaissance, à la fin du XIX^{ème} sur l'existence de ce risque. Qu'en est-il aujourd'hui ? Les personnes auraient-elles tendance à se réunir sur les plages pour se « protéger » d'un séisme ? Si tel est le cas, une campagne d'informations sur les comportements à adopter et les trajectoires de déplacement à privilégier serait alors indispensable. Ces interrogations vont plus loin que notre sujet mais sont traitées notamment dans le cadre de différents programmes de recherche, le projet européen Astarte et l'ANR Com2SiCa.

Le séisme de 1887 sert donc de référence à notre étude et est retenu pour étudier l'aléa, cartographier les zones littorales submergées par une submersion marine par tsunami, et aborder les questions de vulnérabilité de ces espaces fragiles. Un second événement, d'origine non sismique mais gravitaire, a également impacté

le territoire par le passé : le tsunami du 16 octobre 1979. Bien que n'étant pas retenu comme évènement de référence, cet évènement très localisé puisqu'il s'est pratiquement limité à la Baie des Anges, mérite de s'y attarder. Cet aspect local implique une arrivée rapide de la vague sur les côtes, permettant difficilement d'anticiper l'évacuation des populations.

3.2. Le tsunami local du 16 octobre 1979, un évènement d'origine gravitaire

Le 16 octobre 1979, alors que des travaux d'agrandissement sont réalisés au niveau de l'aéroport de Nice (Figure 12) un gros volume de matériaux s'est décroché entraînant un glissement sous-marin. Ce déplacement de matière a engendré un tsunami, atteignant une amplitude de 3 mètres à certains endroits. La photographie ci-dessous montre l'avancée des travaux avant la catastrophe (à gauche), et la partie qui s'est effondrée (à droite).

Le tsunami fut ressenti sur une large zone ($\approx 180\text{km}$) de Hyères à Menton. Antibes a été fortement impactée, principalement les quartiers de la Salis et de La Garoupe, de par leurs proximités quasi-immédiate au site, et leurs situations à la perpendiculaire de la vague.

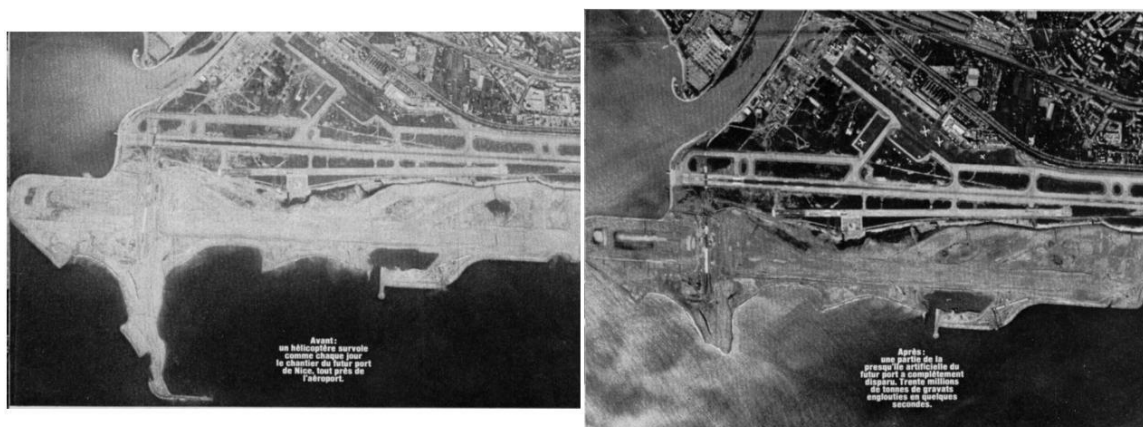


Figure 12 : Photographie des travaux d'agrandissement de l'aéroport et du port de Nice, avant et après la catastrophe
(Sources : La mouette laurentine)

L'explication des causes de ce tsunami fait toujours aujourd'hui l'objet de controverses. Pour les autorités, le glissement survenu au niveau de l'aéroport de Nice peut avoir différentes origines : un séisme sous-marin ou un glissement sous-marin. Le glissement sous-marin, de taille conséquente, serait survenu au large, au niveau de la confluence des canyons du Var et du Paillon.

Là encore deux hypothèses : des petits glissements progressifs permettant à la pente de retrouver son état d'équilibre (érosion régressive), ou une baisse du niveau de la mer d'environ 2,50 mètres entraînée par ce déplacement de masse, exposant les fondations des travaux à l'air libre, provoquant une surcharge (l'eau diminuant la masse) et donc son écroulement. C'est cette dernière qui a officiellement été retenue

par le rapport d'expertise rédigé par G. Filliat. Il n'est nullement mentionné une possible action des travaux d'extension de l'aéroport.

Ces hypothèses sont réfutées par de nombreux scientifiques, plus particulièrement G. Dan, N. Sultan et B. Savoye (2007) et S. Migeon et coll. (2011). D'après leurs recherches, aucun séisme n'a été enregistré dans cette période par l'observatoire de Monaco, en charge de l'observation sismique à cette époque. La première hypothèse est donc peu probable. Enfin, l'érosion régressive est un phénomène lent, qui ne peut se mettre en place en quelques jours. De plus, une baisse du niveau de la mer bien plus importante aurait été nécessaire pour provoquer une telle déstabilisation.

Du point de vue géologique, l'emplacement du chantier sur la zone de l'aéroport pose plusieurs problèmes. Etant à l'embouchure du Var, de nombreux sédiments se déposent, pouvant provoquer une instabilité du sol. L'aéroport se situe à l'extrémité de la croûte continentale, sur des dépôts grossiers stables. En revanche, à l'emplacement des travaux d'agrandissement, la composition change, regroupant des matériaux plus fins. Il est également important de noter qu'une nappe phréatique passe sous l'aéroport, lessivant les matériaux les plus fins. Il semblerait que quelques jours avant la catastrophe, de grosses précipitations se soient abattues sur la région, augmentant le lessivage. Le fond, sur lequel reposait le chantier étant fragilisé, le poids des matériaux aurait suffi à provoquer le glissement.

C'est cette hypothèse, soutenue par les scientifiques, qui est retenue par la communauté scientifique, puisque pour eux, les travaux sont à l'origine de ce glissement. Il faut cependant noter que des études sur le fond avaient été réalisées avant le lancement des travaux, mais les connaissances de l'époque n'étaient pas suffisantes pour déceler les risques. Il semblerait que par la suite des procès-verbaux aient été enregistrés, pointant sur le chantier des événements inquiétants, annonciateurs de la catastrophe.

Huit victimes ont été dénombrées : sept ouvriers ont perdu la vie directement à cause de l'effondrement et une personne périt à cause du tsunami qui frappa Antibes (Sahal, 2011). De nombreux dégâts matériels ont également été causés.

Quelques coupures de presse sont disponibles et permettent d'avoir une idée du chaos survenu au Cap d'Antibes. Le quotidien Nice Matin, dans un article intitulé « Antibes : tout un quartier dévasté », publié quelques jours après le drame, donne une description des dégâts occasionnés.

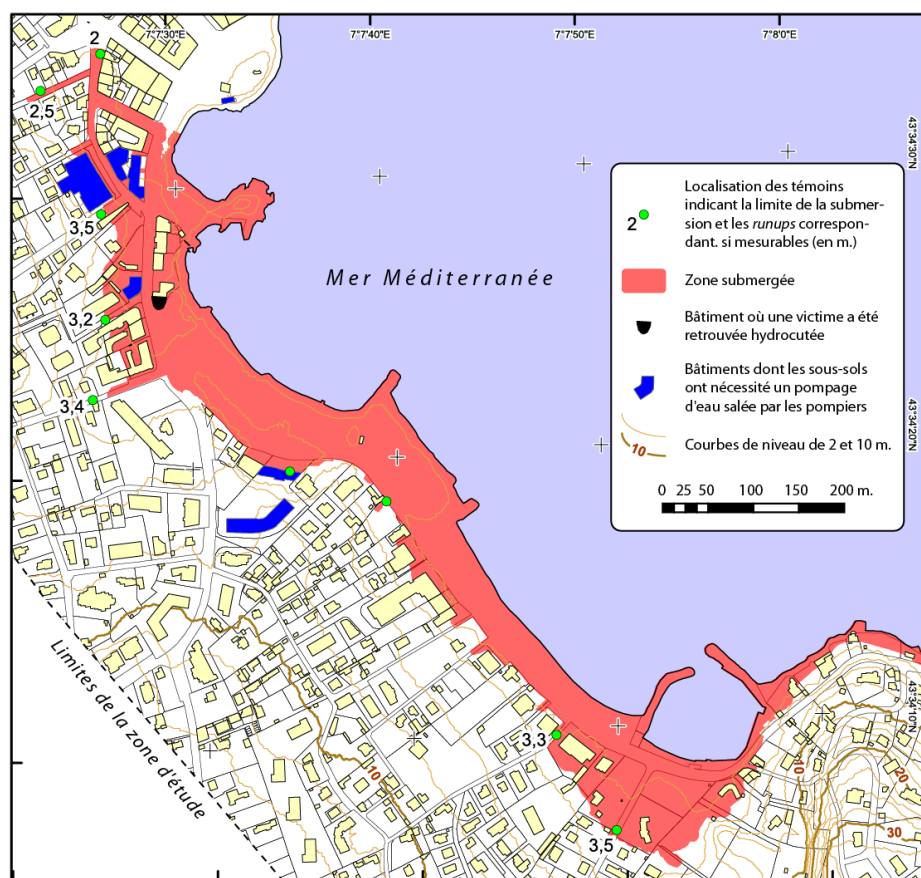
« En se retirant, la mer a livré une véritable vision d'apocalypse : des voitures dressées contre les réverbères ou transportées au milieu de ce qui était encore, quelques heures auparavant, un massif de fleurs ; des vitrines défoncées, des maisons laissant échapper de gros bouillons, par toutes leurs ouvertures, la mer qui les avait envahies. Des bateaux retournés, d'autres portés sur la jetée. Et partout de l'eau, la boue, la peur. »

La procédure étant toujours en cours, les documents ont été mis sous scellés pour une durée de 100 ans. Il est donc relativement difficile d'obtenir des informations concrètes et précises sur ce qui s'est produit ce 16 octobre 1979.

A. Sahal (2011) a étudié cet événement dans les détails en s'attachant plus particulièrement à la plage de la Salis située à Antibes. Son travail de terrain (enquêtes

après de la population, analyses d'archives) a permis d'obtenir une cartographie des zones impactées et des hauteurs d'eau atteintes sur cette commune (Figure 13). Cette étude est unique, puisqu'elle est la seule à ce jour à avoir été réalisée, et concerne un espace limité (Antibes) ainsi qu'un évènement précis (celui de 1979).

Ce choix n'est pas anodin. En France métropolitaine, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur présente la plus forte récurrence de séismes. Dans le cadre de cette recherche, sera uniquement développé l'évènement de référence, c'est-à-dire celui faisant suite au séisme Ligure de 1887. Ce dernier a été générateur d'un tsunami ressenti sur tout le littoral azuréen (élévation de l'ordre de deux mètres sur plus de trente kilomètres de côtes).



Le littoral azuréen, n'est pas uniquement exposé au tsunami. Il est également exposé à des risques d'origine naturelle ou industrielle, et à des menaces terroristes, qui ont par le passé produit des évènements brutaux conduisant à des catastrophes. Nous pouvons par exemple citer les inondations du 3 octobre 2015 et l'attaque terroriste du 14 juillet 2016 à Nice.

4. Conclusion

Les Alpes-Maritimes sont un département exposé à de nombreux aléas, dont le tsunami. Deux évènements historiques ont par le passé impacté ce territoire : le tsunami d'origine sismique du 23 février 1887 et le tsunami d'origine gravitaire du 19 octobre 1979. Ces deux tsunamis locaux ont été destructeurs le long de ces côtes. Nous pouvons ainsi supposer que dans l'hypothèse où un évènement similaire venait à se produire aujourd'hui, les dégâts seraient considérables.

Le risque existe sur ce territoire exposé puisqu'il est composé de nombreux enjeux majeurs. C'est la combinaison de ces deux composantes qui génère le risque. Aujourd'hui, le littoral azuréen est un territoire densément peuplé, à fort pouvoir attractif, le département offrant de nombreux emplois. Il s'agit également d'un territoire touristique, de loisirs et d'affaires, qui attire une population française et étrangère tout au long de l'année.

CHAPITRE 3 : DE LA SURVEILLANCE A L’ALERTE DES TSUNAMIS EN FRANCE

La prévention du risque englobe de nombreux éléments, dont la surveillance, la vigilance et l’alerte. Les systèmes d’observation sont propres à chaque aléa puisque leurs fonctionnements sont différents. Certains peuvent être couplés, comme par exemple les tsunamis et les séismes, puisque la plupart des tsunamis sont générés par des séismes. L’observation des séismes permet de déterminer si ceux-ci sont potentiellement tsunamigènes. Les tsunamis disposent également de réseaux d’observation et d’alerte qui leurs sont propres. L’alerte, quant à elle, est générique pour l’ensemble des événements pouvant se produire sur le territoire (événement naturel, industriel, terroriste, etc.).

La préparation à un aléa passe par sa connaissance et par la structuration des différentes organisations qui sont en charge de son observation, de la diffusion de connaissances et de l’alerte. « *L’alerte naît sur fond de veille, de surveillance, de vigilance ou d’avertissement.* » (Douvinet et coll., 2019).

Les échelles spatiales et organisationnelles sont imbriquées car des institutions différentes sont mobilisées. Ici, une focalisation est faite sur les structures en charge de l’observation et de l’alerte des tsunamis. Puis l’alerte nationale est détaillée afin de comprendre son fonctionnement global, de l’émission de l’alerte auprès des autorités à l’arrivée aux populations. Sont finalement présentés les différents outils favorisant l’alerte de la population.

1. Des structures de surveillance et de veille des tsunamis à différentes échelles

De par le passé, plusieurs tsunamis se sont produits à l’échelle mondiale, causant de nombreux dégâts humains et matériels. Au cours du XX^{ème} siècle, à la suite de plusieurs tsunamis destructeurs, les Nations Unies ont décidé de créer en 1960 la **Commission Océanographique Internationale** (COI ou IOC en anglais). Cette organe de l’UNESCO a pour mission la réduction du risque de tsunami au niveau international. Elle a été mandatée pour fédérer ses états membres afin de réduire le risque de tsunami.

Dans un contexte global d’augmentation des aléas naturels, anthropiques, climatiques, mais surtout de l’augmentation des enjeux, la COI appelle à se préparer aux tsunamis en Méditerranée (Projet NEAMTIC, 2013). Cette commission coordonne depuis 2005 la mise en place de systèmes d’alertes aux tsunamis, au niveau mondial. Contrairement aux séismes, dont la prédiction de leur déclenchement est encore impossible, certains tsunamis (régionaux et télé-tsunamis) peuvent être repérés avant qu’ils n’atteignent les côtes. Ceci permet aux autorités concernées de lancer l’alerte auprès de la population, ainsi que leur évacuation. Ce type de dispositif est extrêmement important et peut sauver de nombreuses vies.

Les **Groupes Intergouvernementaux de Coordination (GIC)** ont été créés à la suite de grandes catastrophes. Aujourd'hui, quatre GIC se répartissent la veille des tsunamis à l'échelle mondiale :

- le **Pacifique Tsunami Warning Center (PTWC)**, dans le Pacifique
- l'**Indian Ocean Tsunami Warning Center (IOTWC)**, dans l'océan Indien
- le **North Eastern Atlantic Mediterranean and connected seas Tsunami Warning Center (NEAMTWS)**, en Atlantique Nord-Est, Méditerranée et les mers adjacentes
- le **Tsunami and Other Coastal Hazards Warning System for the Caribbean and Adjacent Regions (ICG/CARIBE-EWS)** dans la zone caribéenne.

Les travaux entrepris pour cette recherche portant sur le bassin Méditerranéen, nous allons à présent nous intéresser plus particulièrement au fonctionnement du NEAMTWS, pour ensuite pouvoir descendre à l'échelon national.

1.1. La surveillance dans la zone Méditerranée - Nord Atlantique

Le NEAMTWS, antenne régionale de la COI, est le centre d'alerte au tsunami centré sur l'Atlantique Nord-Est et la Méditerranée. Son rôle est i) d'évaluer le risque de tsunami dans les bassins Atlantique Nord-Est et Méditerranéen ; ii) d'émettre et de transmettre les alertes aux tsunamis ; iii) de former les populations exposées à ce risque encore peu ou mal connu. La COI supervise la mise en application de ces actions, avec comme objectif final un fonctionnement national autonome. Il est composé de 39 pays membres¹ (Figure 14) qui disposent de littoraux sur ces bassins à risques.

L'information et la formation de la population de cet espace se fait via le *North-eastern Atlantic and Mediterranean Tsunami Information Center (NEAMTIC)*. La COI a conscience que la réduction du risque de tsunami, passe par la sensibilisation et la préparation de la population. C'est pour répondre à cette mission que le NEAMTIC a été créé. Il permet donc de fournir à la population des informations concernant les systèmes d'alertes, le risque de tsunami, ainsi que les comportements à avoir en cas d'évènements de submersion marine (tsunamis, tempêtes, etc.).

Plusieurs antennes nationales (NTWC, acronyme venant de la formulation anglaise : *National Tsunami Warning Center*), se sont développées au sein du NEAMTWS. A ce jour, cinq ont vu le jour (Figure 15) :

- le **CENTRE d'Alerte aux Tsunamis (CENALT)** en France, a en charge la surveillance de trois zones sismiques menaçant les côtes françaises, situées en Méditerranée Occidentale (Bassin ligure, littoral maghrébin et sicilien) et dans l'Atlantique Nord-Est (au niveau du détroit de Gibraltar) ;
- Le **Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute (KOERI)** en Turquie ;
- le **National Observatory of Athens (NOA)** en Grèce ;

¹ Pays membres du NEAMTWS : Albanie, Algérie, Allemagne, Belgique, Bulgarie, Cap Vert, Croatie, Chypre, Danemark, Egypte, Espagne, Estonie, Fédération de Russie, Finlande, France, Géorgie, Grèce, Islande, Irlande, Israël, Italie, Liban, Libye, Malte, Maroc, Mauritanie, Monaco, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Suède, Syrie, Tunisie, Turquie, Ukraine.

- le **Centro di Allerta Tsunami (CAT)** à l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) en Italie ;
- et l'**Instituto Português do Mar e d'Atmosfera (IPMA)** au Portugal.



Figure 14 : Pays membres de la North-Eastern Atlantic and Mediterranean Tsunami Warning Center (NEAMTIC)

Ces pays, dotés d'un NTWC, font partie des pays les plus actifs sismiquement en Europe et ont déjà connu au cours de leur histoire des séismes et des tsunamis importants. C'est le cas par exemple du Portugal avec le séisme et le tsunami qui ont détruit une grande partie de Lisbonne en 1755, ou encore du tsunami de 1908 qui a fait de nombreux dégâts à Messine, sur les côtes Siciliennes. Nous allons à présent nous focaliser sur le CENALT, antenne se focalisant sur les côtes françaises.

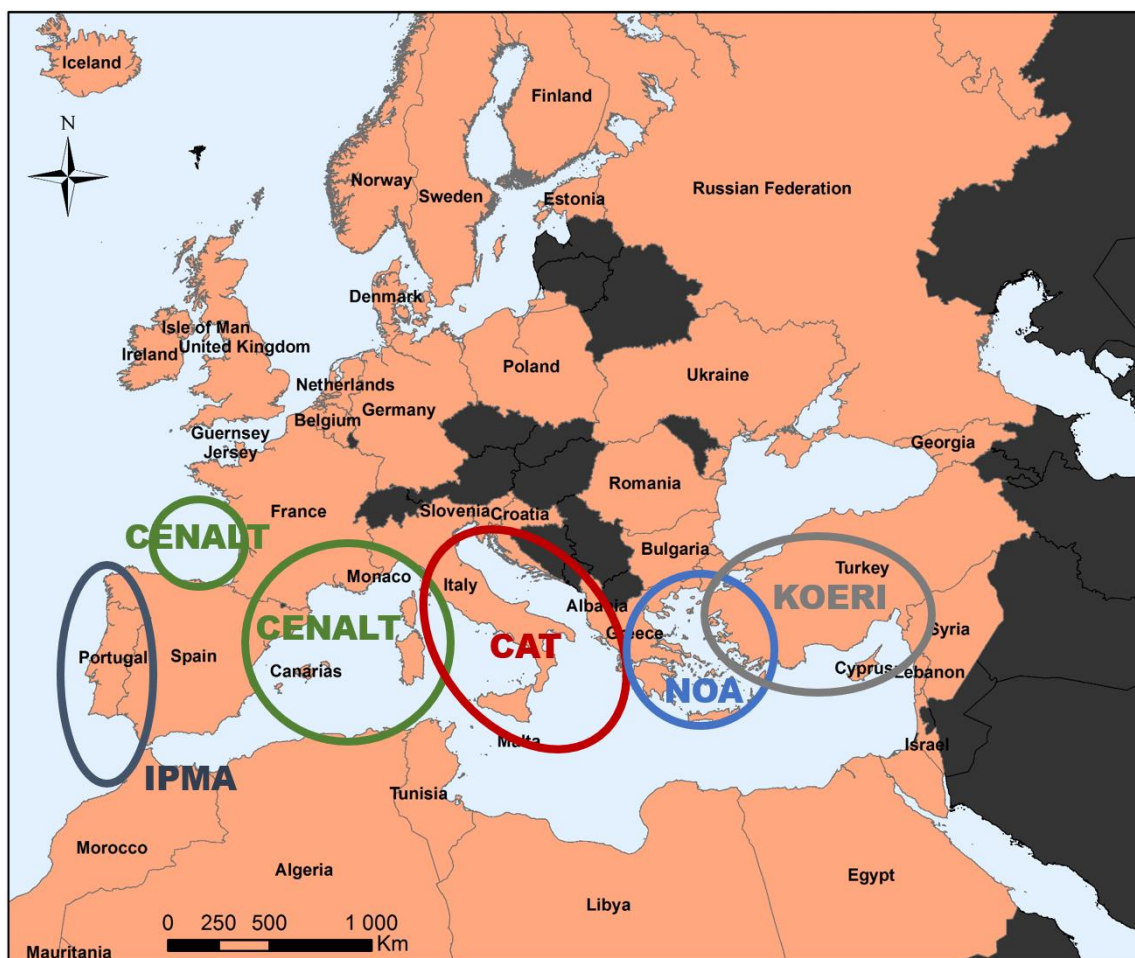


Figure 15 : Localisation des différentes antennes du NEAMTWC

1.2. La surveillance et la veille nationale

L'arc méditerranéen occidental est exposé à plusieurs sources génératrices de tsunamis (Italie, Sicile, Algérie, etc.). Les côtes françaises méditerranéennes sont exposées à des tsunamis d'origines sismiques locaux (bassin Ligure) ou régionaux (marge algérienne). Ces littoraux, en plus d'être exposés à la menace, regroupent un grand nombre d'enjeux humains et économiques, pouvant causer de nombreux dégâts.

Les antennes locales de la NEAMTW ont été créées pour prendre en compte les particularités locales et pour faire le lien avec le ou les états impactés par un ou des phénomènes détectés. Le CENALT (Centre d'Alerte aux Tsunamis) tient justement ce rôle pour la France. Il a en charge la surveillance de trois zones sismiques menaçant les côtes françaises, situées en Méditerranée Occidentale (Bassin Ligure, littoral maghrébin et sicilien) et dans l'Atlantique Nord-Est (au niveau du détroit de Gibraltar) (Figure 16). Ces zones ont été déterminées comme étant possiblement tsunamigènes.

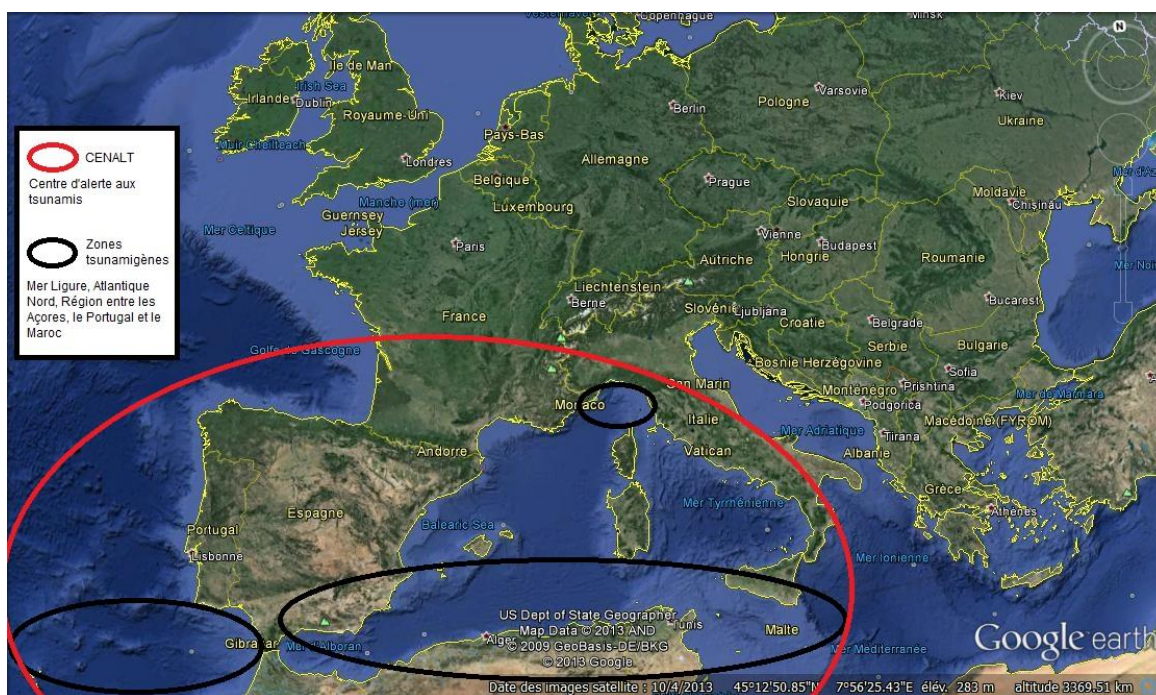


Figure 16 : Cartographie des zones tsunamigènes menaçant les côtes françaises
Sources : info-tsunami. Fond de carte : Google Earth.

Le bassin Liguro, situé entre la France métropolitaine, l’Italie et la Corse, présente une zone de danger, car elle contient une faille active, la faille Liguro, génératrice par le passé de tsunamis, comme ce fut le cas lors du séisme de 1887. Le littoral maghrébin est quant à lui exposé à la marge algérienne, génératrice de plusieurs séismes ces dernières années, comme par exemple le séisme de Boumerdes (Algérie) du 21 mai 2003. Ces failles sont les principales sources sismiques potentiellement génératrices de tsunamis pouvant impacter la région Provence-Alpes-Cote-d’Azur.

Le CENALT, en plus de son rôle de veille et de surveillance, a également un rôle important dans le déclenchement de l’alerte. Il est en lien avec les autorités françaises et est le seul organisme disposé à le faire. La partie suivante est dédiée au fonctionnement de l’alerte.

2. L’alerte nationale, une organisation adaptée aux tsunamis locaux ?

L’alerte est défini, pour la sécurité civile, comme la « *diffusion par les services de l’état d’un signal destiné à alerter des individus, des institutions et/ou des entreprises, face à l’imminence ou la survenue d’un danger susceptible de porter atteinte à leur intégrité physique.* » (Douvinet et coll., 2019).

L’alerte est un point clé de tout évènement puisqu’elle permet de prévenir la population de la survenue d’une perturbation, d’un évènement extrême dont il faut se protéger. Si l’alerte est possible et qu’elle peut être effectuée en amont la population va pouvoir évacuer et se mettre en sécurité dans de bonnes conditions. Si cette

dernière ne fonctionne pas, ou si elle ne peut être effectuée dans les temps, comme ceci est fortement possible sur le littoral azuréen en cas de tsunami local, la population se retrouve livrée à elle-même.

L'alerte nationale fonctionne à l'identique quelle que soit la menace. L'organisme en charge de l'alerte varie d'un phénomène à l'autre et peut varier selon la localisation de l'évènement. Ici, le CENALT est en charge de la détection et de l'alerte, puis l'information est reprise à l'échelon national pour redescendre à l'échelle locale et arriver jusqu'aux populations.

2.1. Le CENALT, une structure indispensable à la détection et l'alerte de tsunamis en France métropolitaine

Le tsunami de 2004 a marqué un tournant mondial dans l'intérêt et la préoccupation des scientifiques et institutionnels à la question des tsunamis. La France n'échappe pas à ce constat. L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) mandate un sénateur français, Roland Courteau, pour réaliser un rapport portant sur l'état de l'évaluation et de la prévention du risque de tsunami en France (métropolitaine et d'outre-mer). Ce dernier a été validé en 2007. Il met également en lumière la problématique de l'alerte qui s'avère être inexistante à cette époque, et souligne dans ses recommandations l'importance de définir un système d'alerte cohérent, nécessaire selon lui à la diminution de la vulnérabilité des sociétés face à ce risque particulier. Un nouveau document portant sur la même thématique a été édité par le Sénat le 21 mars 2019.

Le CENALT, Centre National d'Alerte au Tsunami a été créé en 2009 et est opérationnel depuis le 1 juillet 2012. Il fait suite à la fois aux recommandations du rapport du Sénat et à la fois à une demande faite par l'UNESCO, relative au fait que l'ensemble des mers et des océans doit être couvert par un dispositif d'alerte. Il est piloté par le Ministère de l'Intérieur, via la Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises (DGSCGC), et par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, via la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR). Il est coordonné scientifiquement par le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) dans des locaux situés en banlieue parisienne, à Bruyères-le-Châtel. Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) et le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) contribuent également à son fonctionnement et à sa richesse scientifique.

La mission principale du CENALT est d'alerter en temps réel, c'est à dire 24h/24, 7j/7, les autorités nationales en charge de la protection de la population. Il informe également les autorités des pays riverains de la Méditerranée occidentale, susceptible d'être impactés en cas d'évènements majeurs. L'alerte est dans un premier temps donnée aux autorités nationales de la sécurité civile françaises, représentées par le Centre Opérationnel de Gestion Interministérielle des Crises (COGIC). Il s'agit de **l'alerte montante**. Dans un second temps, le CENALT informe les autres pays potentiellement impactés par le tsunami généré. L'ensemble de ces actions doivent s'effectuer en moins de 15 minutes.

Le CENALT est en charge de la France métropolitaine. Il existe une zone floue au niveau de l'observation et de l'alerte pour les départements et territoires d'Outre-Mer puisque le CENALT n'en a actuellement pas la charge, principalement par manque de moyens humains. Dans son fonctionnement actuel, un seul opérateur est d'astreinte, ce qui s'avère insuffisant s'il faut surveiller également l'ensemble des autres bassins liés à l'éloignement des territoires français.

Afin de pouvoir lancer l'alerte, un réseau de surveillance des séismes et des tsunamis est indispensable. Le CENALT utilise le réseau sismique français et les réseaux sismiques étrangers de la région Méditerranéenne et Atlantique Nord-Est. Au total, c'est une centaine de stations sismiques qui ont été installées et qui permettent la surveillance de ce bassin.

Le CENALT dispose d'une **matrice de décision** (Annexe 2), mise en place afin d'aider le choix ou non de l'alerte. Elle permet de déterminer quel type de bulletin doit être émis au COGIC lorsqu'un séisme potentiellement tsunamigène se produit en Méditerranée. Ces matrices de décision ont été construites à partir de deux critères : la position de l'épicentre et la magnitude du séisme source. Elles varient selon que le séisme se produit en Méditerranée occidentale, donc relativement proche des côtes françaises, ou en Méditerranée orientale, plus éloignée et donc potentiellement moins impactant, sauf en cas de télétsunami. Cinq cas de figures engendrent une **alerte tsunami** par le CENALT :

- En cas d'un séisme de surface en Méditerranée occidentale, à proximité immédiate des côtes (au large ou à moins de 40 km à l'intérieur des terres) et dont la magnitude du séisme est comprise entre 6.5 et 7. Séisme générant un tsunami local disposant d'une capacité de propagation inférieure à 400 km.
- En cas d'un séisme de surface en Méditerranée occidentale, à proximité immédiate des côtes (moins de 40 km) des côtes, dont la magnitude est supérieure à 7 et dont le tsunami généré peut se propager sur plus de 400 km, et donc causer des dégâts, dans l'ensemble du bassin.
- En cas d'un séisme de surface en Méditerranée occidentale, non loin des côtes (au large ou entre 40 km et 100 km à l'intérieur des terres) d'une magnitude de 6.5 à 7, dont le tsunami généré est caractérisé comme étant régional. Sa propagation est toutefois inférieure à 400 m.
- En cas d'un séisme de surface en Méditerranée occidentale, non loin des côtes (entre 40 et 100 km), pour un séisme d'une magnitude de plus de 7, dont le tsunami généré peut se propager sur plus de 400 km. Il est caractérisé en tsunami régional.
- En cas de séisme de surface en Méditerranée orientale, non loin des côtes, pour un séisme d'une magnitude de plus de 8.3 et dont le tsunami généré peut potentiellement causer des dégâts au niveau des côtes françaises.

L'ensemble des autres cas de figures ne génère pas une alerte tsunami, mais seulement des **avertissements de tsunamis** ou des **bulletins d'informations**.

Dans le cas du séisme Ligure, nous sommes dans les conditions d'un séisme de surface (à 15 km de profondeur), dont la source se situe à une trentaine de kilomètres des côtes (Larroque et coll., 2012). Le séisme généré a été évalué à une magnitude $M_w = 6.9$. Le tsunami ainsi généré aurait probablement un potentiel

destructeur à moins de 400 km de la source. Une alerte tsunami devrait alors être éditée.

Depuis sa création en 2012, le CENALT a transmis 44 messages à destination du COGIC, soit une moyenne de 6 alertes par an. En revanche, il a traité 2 100 évènements au niveau de ses bassins d'action, les bassins Méditerranéens et Atlantiques Nord-Est. Un seul avertissement international (alerte de niveau orange) a été émis suite à un séisme en mer d'Alboran (le 25 janvier 2016) de magnitude $M_w = 6.2$. Trois messages d'informations (alerte de niveau jaune) ont été communiqués en Méditerranée Orientale, donc sans potentiel impact sur les côtes françaises. Les messages d'alertes émis précisent les départements potentiellement impactés et, pour chacun, les niveaux d'alerte attendus, l'estimation de l'heure d'arrivée de la première vague et les instructions correspondantes.

Ce centre présente cependant une limite principale. En effet, une alerte effectuée par le CENALT sera valable dans le cas d'un tsunami régional ou d'un télé-tsunami et non pour un tsunami local. Or, en cas de séisme au niveau du bassin Ligure, le tsunami engendré serait local ; le temps d'arrivée serait donc très court, rendant inefficace une possible alerte donnée par le CENALT.

Les dirigeants commencent à prendre conscience du problème lié à la rapidité de l'alerte, comme le souligne le rapport du Sénat du 21 mars 2019 : « *Le risque zéro n'existe pas, mais un système d'alerte peut réduire considérablement le nombre de pertes de vies humaines, à condition que la chaîne d'informations et de décisions fonctionne avec rapidité, de bout en bout et arrive jusqu'aux populations.* ». Une focalisation sur le fonctionnement de l'alerte à l'échelle française est indispensable à la compréhension globale de l'alerte.

Une fois l'alerte émise par le CENALT, l'Etat prend la main sur l'alerte via le COGIC. Regardons de plus près le fonctionnement de l'alerte en France.

2.2. L'alerte française, une organisation verticale avec une structure centrale

Une fois l'alerte lancée par l'organisme en charge de l'antenne nationale de la COI, chaque état dispose de son propre système d'alerte et de sa propre structure organisationnelle. Ici nous nous focalisons uniquement sur le fonctionnement de l'alerte française. Celle-ci se compose en deux parties distinctes : l'alerte montante et l'alerte descendante.

L'alerte montante (Figure 17) correspond à l'observation, à l'obtention et au traitement des données physiques d'un évènement, nécessitant ou non une alerte. Si cela est le cas, un message d'alerte est édité par le CENALT et envoyé au COGIC. S'il est considéré que l'évènement n'est pas dommageable pour les littoraux français, des bulletins d'informations ou des avertissements de tsunamis sont émis par le CENALT, toujours à destination du COGIC.

Le COGIC est le maillon indispensable au bon déroulement de l'alerte puisqu'il fait la jonction entre l'alerte montante et l'alerte descendante. Il fait le lien et assure le

passage d'information entre les centres d'alertes (CENALT pour les tsunamis, Météo France pour les phénomènes climatiques, etc.), les centres opérationnels et les différents ministères. S'il vient à dysfonctionner, cela peut avoir des conséquences dramatiques sur les populations, dernier maillon de la chaîne.

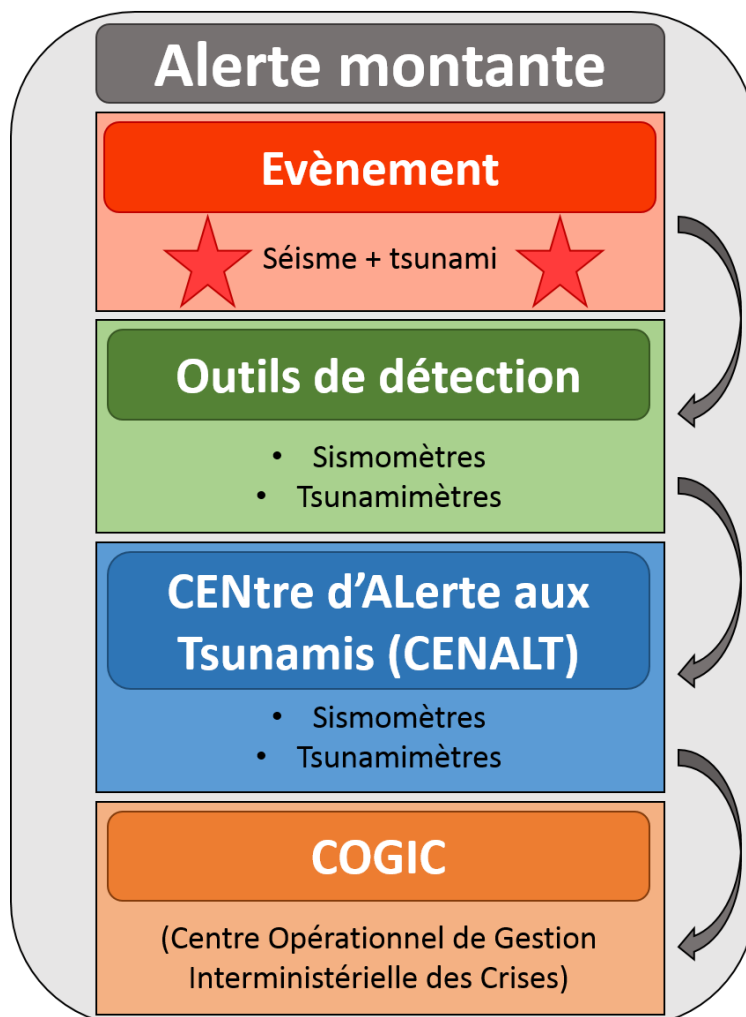


Figure 17 : Schéma explicatif de l'alerte montante. De la génération d'un tsunami à l'émission de l'alerte.

Le COGIC est un organisme dépendant du Ministère de l'Intérieur, qui fonctionne en permanence (24h/24 et 7j/7). Cette instance organise et commande la gestion de crises affectant la sécurité civile lors de catastrophes naturelles et/ou technologiques. Selon l'évolution de la situation, il décide de l'envoi supplémentaire de moyens humains et matériels. Lorsque la situation est trop importante pour être gérée avec les moyens locaux, l'armée peut être déployée en renfort.

L'alerte descendante (Figure 18) constitue la partie de l'alerte en direction des autorités situées à différents échelons (départemental, communal, etc.), l'objectif étant d'atteindre les populations afin de les prévenir du danger avant que celui-ci ne se produise. Le COGIC est donc à la base de cette alerte. Une fois qu'il dispose de l'information, il va la transmettre aux instances concernées.

En cas d'alerte tsunami envoyée par le CENALT, un signal sonore se déclenche au COGIC afin de signaler l'importance et surtout la rapidité de traitement avec laquelle doit être traitée cette alerte. Ceci n'existe que pour les tsunamis de par ses particularités qui en font un événement brutal à cinétique rapide devant être traité immédiatement. Le message d'alerte est pris en charge par l'équipe de service, constituée d'un officier, un opérateur et un transmetteur.

Une fois l'alerte validée, l'alerte descendante se déploie. Sont alors informés les **préfectures de départements** potentiellement impactés, les **préfectures de zone de défense et de sécurité** (les Alpes-Maritimes dépendent de la zone Sud), les **SDIS** et les centres opérationnels d'autres ministères qui doivent disposer de cette information. C'est à la préfecture de département d'informer les communes concernées. Ce sont les maires des communes qui sont responsables de la sécurité et qui sont en charge de l'alerte auprès de la population. De nombreux échelons sont donc présents entre le lancement de l'alerte et l'arrivée de l'information à la population, première exposée à l'évènement.

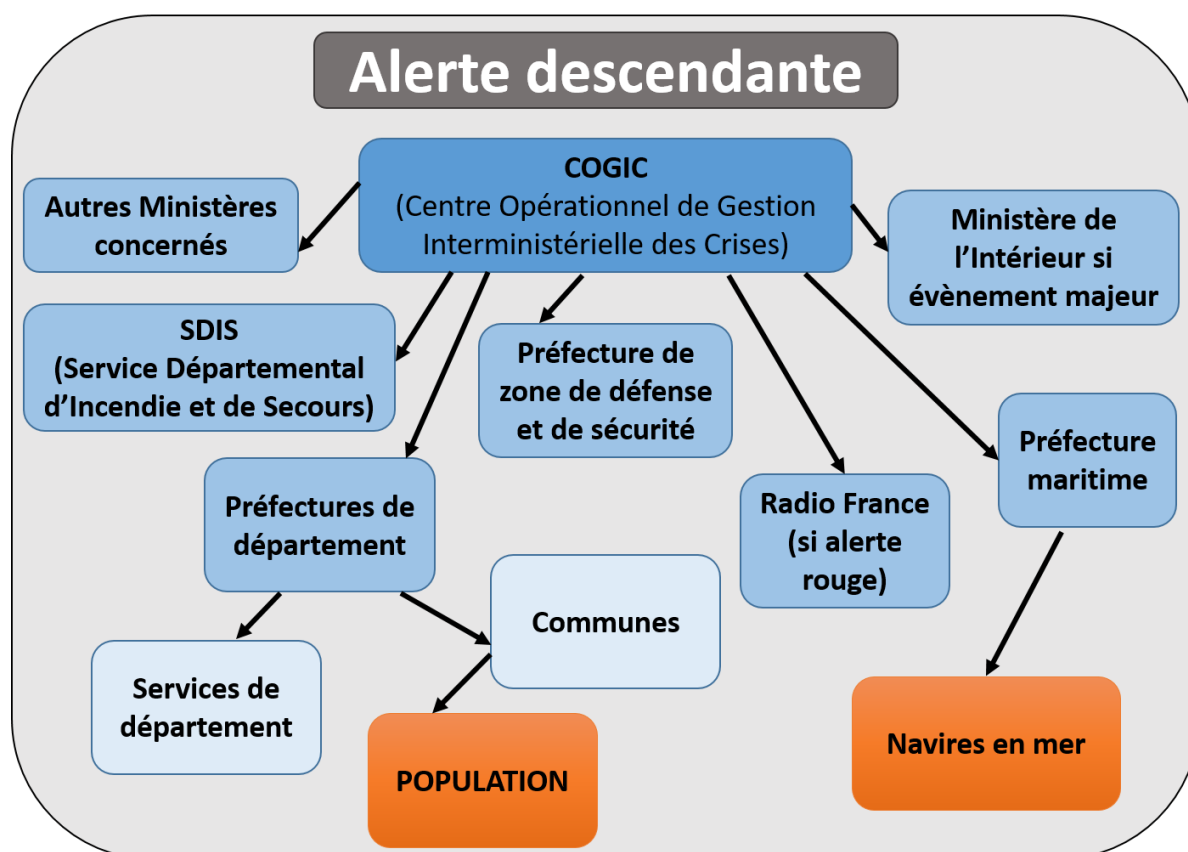


Figure 18 : Schéma explicatif de l'alerte descendante. Du COGIC à la population.

En cas d'alerte de niveau rouge, l'officier peut demander une diffusion de l'alerte sur les canaux de Radio France, permettant de court-circuiter l'ensemble de la chaîne d'alerte et de gagner en temps. Dans le cas d'un tsunami nous pouvons toutefois nous interroger sur l'impact que peut avoir ce dispositif, car peu de personnes sont susceptibles d'écouter la radio dans les lieux fortement exposés comme les plages ou les promenades. D'un autre côté il suffit que quelques personnes soient à l'écoute et

reçoivent l'information pour la diffuser plus largement autour d'eux. L'utilisation des réseaux sociaux pourrait être un bon complément.

Pour la partie maritime, les préfetures maritimes sont informées par le COGIC et informent les navires en mer de l'arrivée de ce phénomène. Il leur est alors demandé de rester en mer et de ne pas rentrer au port. La vague étant quasi imperceptible au large, les bateaux sont en sécurité en restant éloignés de la côte. A l'inverse, en revenant au port, ils s'exposent à la vague et peuvent être directement impactés. Ils peuvent également être source de dommage s'ils viennent à être mobilisés par le courant et à leur tour devenir une menace pour ce qui les entoure.

Le projet du plan ORSEC des Alpes-Maritimes est focalisé sur les séismes et les tsunamis. Il prévoit une diffusion de l'alerte plus détaillée (Figure 19) à partir du COGIC. D'autres organismes sont ainsi directement informés comme le Centre Opérationnel de la Fonction de Garde-Côtes (COFGC), la Cellule Ministérielle de Veille Opérationnelle et d'Alerte (CMVOA), le Centre de Planification et de Conduite des Opérations (CPCO), le Service de Veille Opérationnelle de le Police Nationale (SVOPN) et le Centre Opérationnel des Services de Secours et d'Incendie de Marseille (COSSIM).

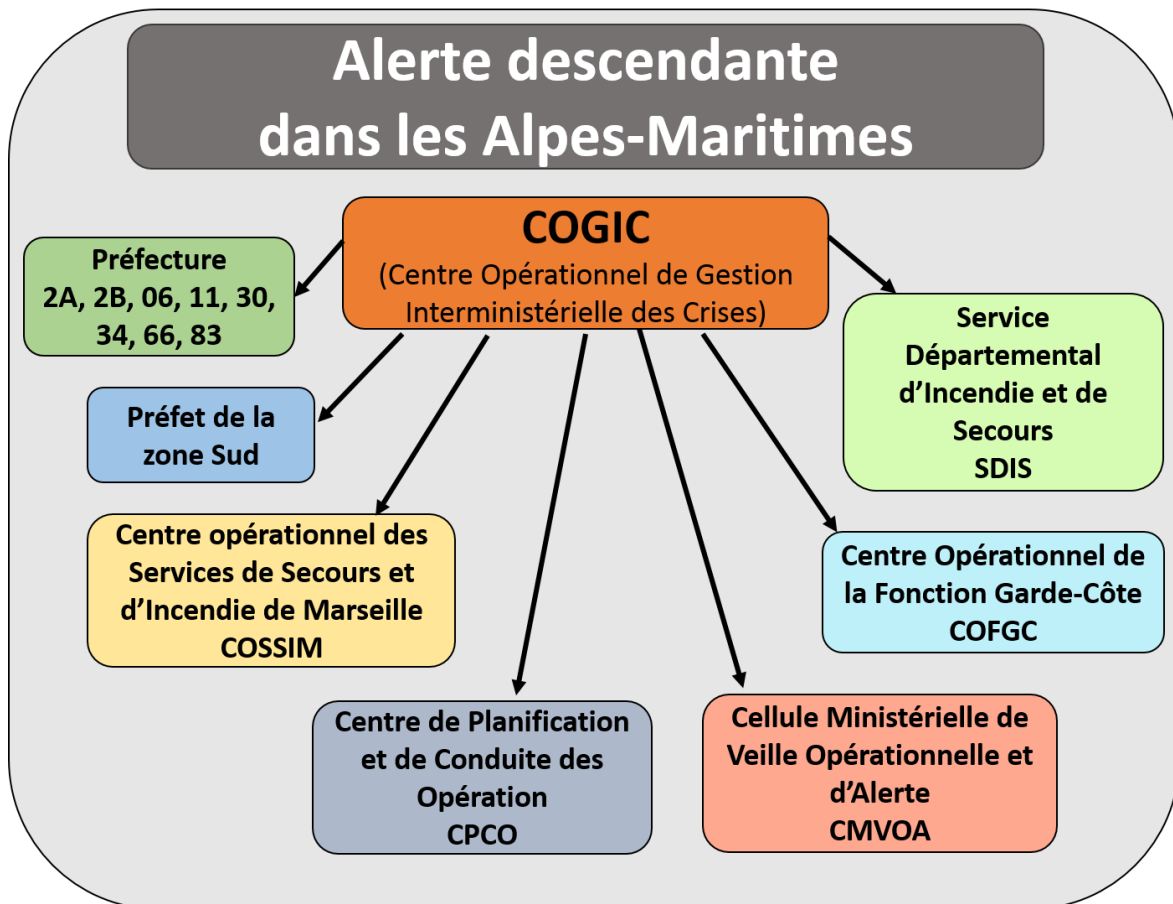


Figure 19 : Schéma représentant l'alerte descendante à partir du COGIC comme pensé dans le projet du Plan ORSEC des Alpes-Maritimes portant sur les séismes et les tsunamis.

Les intermédiaires sont donc nombreux entre la détection de la menace et l'arrivée de l'information à la population. Plus il y a d'échelons plus il y a de potentialités de dysfonctionnements et plus cela rallonge le délai de transmission de l'information. Ce système d'alerte français est applicable dans le cas d'un tsunami régional ou d'un télétsunami mais s'avère inefficace en cas de tsunami local car les temps trop courts d'arrivée de la vague ne permettent pas à l'ensemble de la chaîne d'alerte (montante et descendante) d'être mise en action. Or, en cas de dysfonctionnement, nous pouvons nous interroger sur l'arrivée de l'information à la population. Il faudrait donc s'intéresser sur la mise en place d'un second protocole d'alerte spécifique aux tsunamis locaux permettant une alerte rapide et efficace de la population.

Certains exercices effectués, à Cannes (Alpes-Maritimes) et à Sausset-les-Pins (Bouches du Rhône) notamment, ont démontré la complexité et la méconnaissance de certains opérateurs, entraînant une « lenteur » de la transmission de l'information, remettant en cause la possible alerte même en cas d'évènements régionaux. Le Sénateur Courteau, fortement impliqué dans la problématique tsunami a conscience des particularités de ce type d'évènements et a déclaré dans le rapport du Sénat du 21 mars 2019 : « *Les délais de réactions étant très courts, aucune place ne peut être laissée à l'improvisation.* ».

L'exercice tsunami réalisé le 5 novembre 2018 à Cannes (date symbolique qui correspond à la journée mondiale de sensibilisation aux tsunamis) a d'ailleurs démontré la préparation partielle du COGIC puisque l'alerte a mis plus de 45 minutes à arriver jusqu'à la commune. L'équipe de permanence n'a pas suivi la procédure générant des difficultés et un allongement du délai de l'alerte. Le CENALT de son côté a rempli sa part du contrat puisque le message est arrivé au COGIC dans les délais définis (8 minutes).

Dans le rapport du Sénat, Jean-Bernard Bobin, chef du service de la planification et de la gestion des crises au ministère de l'intérieur, relativise les erreurs commises lors de cet exercice. Il précise que pour le scénario joué, un séisme d'origine sismique au large des côtes françaises avec un temps d'arrivée d'une heure quinze, même avec mauvais fonctionnement du COGIC l'alerte arrivait « de justesse » jusqu'à la commune, puisque vingt-cinq minutes les séparaient encore de l'arrivée de la vague. Dans l'hypothèse d'un séisme dans le bassin Ligure, en cas de fonctionnement « normal », l'alerte est déjà peu susceptible d'arriver jusqu'à la population, alors en cas de retard la vague arriverait avant l'alerte. Ceci est une des craintes du Sénateur Courteau qui, dans une de ces interventions, précise qu' « *Il ne faudrait pas que la vague arrive avant l'alerte* ».

Ce type d'exercice est donc crucial pour d'une part placer le personnel en situation de gestion de catastrophe afin qu'il puisse se former et appliquer les procédures dans des situations similaires. D'autre part, il permet de faire ressortir les dysfonctionnements et de les corriger pour que le jour où un évènement se produit, les équipes connaissent la procédure à appliquer. Le gain de minutes, ou du moins la non perte de temps, est précieux et peut sauver de nombreuses vies.

Il a été évoqué dans ce rapport du Sénat en date du 21 mars 2019, une réflexion sur la diminution de traitement de l'alerte et donc une simplification de la chaîne d'alerte descendante. Il semblerait que la problématique majeure à cette simplification

soit la détermination des responsabilités en cas de catastrophe et de dysfonctionnement. Pour l’heure, le COGIC, au centre de toute la chaîne d’alerte, est le principal responsable en cas de problèmes majeurs.

L’alerte française est donc organisée, hiérarchisée et est testée afin de s’assurer de son bon fonctionnement. Comme nous l’avons précisé à de nombreuses reprises, le cas d’un tsunami en mer Ligure est un cas à part puisque, de par sa rapidité d’action, l’alerte a de grandes chances de ne pas arriver à temps ou d’être inefficace. Les acteurs et décideurs ont conscience de ce point sensible. Jean-Bernard Bobin pointe d’ailleurs cela « *Si cela vient des côtes italiennes, nous n’avons que dix à quinze minutes et il faut dans ce cas miser sur la sensibilisation des populations à ce risque et à la détection de signaux.* ».

Il souligne ainsi un point intéressant et crucial, un complément à l’alerte, la sensibilisation de la population à ce risque rare et inhabituel sur ce territoire. D’autres approches sont d’ailleurs à creuser et à développer. Certains outils existent afin de faciliter l’alerte de la population.

3. L’alerte de la population grâce à différents outils

L’alerte à la population est à la charge des maires. L’Etat joue toutefois également un rôle dans l’alerte via le Système d’Alerte et d’Information des Populations (SAIP). Il s’agit d’un ensemble d’outils ayant pour mission d’alerter les populations d’un danger imminent et de l’informer sur la nature du danger et sur les comportements à tenir (Ministère de l’intérieur), l’objectif étant d’assurer la mise en sécurité et la protection de la population. Plusieurs outils sont aujourd’hui utilisés, parmi lesquels : les sirènes, les télé-alertes, les applications pour *smartphones* ou les réseaux sociaux.

3.1. Les sirènes, un ouïl historique

Les sirènes sont un héritage de la dernière guerre et des bombardements associés. Elles font partie de ce dispositif et sont encore aujourd’hui en service et utilisées pour alerter la population. Le département des Alpes-Maritimes compte 18 sirènes reliées au système SAIP, localisées dans les zones déterminées comme étant à risques, avec de forts enjeux et une forte densité de population (Alpes-Maritimes) :

- la vallée de la Siagne est particulièrement équipée car soumise au risque d’inondation. On les retrouve ainsi à Saint-Cézaire-sur-Siagne, Auribeau-sur-Siagne, Cannel, Mandelieu-la-Napoule et Cannes ;
- des communes le long du Var disposent également de sirènes : Saint-Laurent-du-Var et Villars-sur-Var ;
- le long du Paillon : Contes ;
- d’autres centres de vie importants disposent de sirènes reliées à ce réseau : Antibes, Grasse.

De par leur positionnement, il semble que les sirènes soient principalement localisées dans les communes ayant connu par le passé des inondations. D’autres

communes disposent de sirènes, mais ne sont pas reliés au réseau SAIP. C'est le cas par exemple de la ville de Nice, avec la présence de sirènes à la colline du château.

Il est prévu de renforcer ce dispositif avec un ajout de 5 000 sirènes sur l'ensemble des territoires exposés aux risques naturels et industriels, c'est-à-dire à répartir sur l'ensemble du territoire français (les zones SEVESO sont généralement favorisées au détriment d'autres aléas). Il est toutefois envisagé de placer certaines de ces sirènes sur le littoral méditerranéen à Nice, Cannes, Antibes, Cagnes-sur-Mer, Toulon et la Seyne-sur-Mer (J.B. Bobin, [rapport Sénat 2019](#)). Il n'est toutefois pas précisé comment est effectué ce choix. S'agit-il d'une demande des mairies concernées, ou la détermination de zones à équiper en priorité est faite en fonction de la détermination de certains enjeux ?

L'utilisation des sirènes dans les dispositifs d'alerte soulève plusieurs problèmes. Le premier est lié à leur entretien et leur maintenance, qui sont en grande partie à la charge des mairies. Il y a donc de grandes irrégularités d'une commune à l'autre, selon les priorités déterminées et la vétusté de ces dernières qui demandent un certain coût pour être réparées ou changées. La deuxième difficulté est le manque de connaissances de la population du signal émis. Le signal des sirènes doit être émis rapidement, sans « *laisser le temps à une hésitation, mais on ne cherche pas pour autant à fournir un message exhaustif.* » (Douvinet et coll., 2019).

Tout le monde a connaissance du test des sirènes le premier mercredi du mois, généralement autour de midi ; il est donc commun de les entendre. Le réflexe, lorsqu'elles viennent à sonner, est de se questionner sur le jour afin de savoir si cela correspond au test mensuel. Dans l'hypothèse d'une alerte réelle, nous pouvons nous interroger sur la connaissance de la population quant au signal émis et si cette dernière sait quel comportement associer à ce signal. Les sirènes ne précisent pas la source du danger et donc quel comportement adopter : s'il faut sortir (séisme) ou plutôt se confiner à l'intérieur d'un bâtiment (accident industriel).

En cas de danger, le signal d'alerte à la population correspond à trois séquences d'une minute quarante-et-une secondes, espacé par un silence de cinq secondes ([Figure 20](#)). Ce signal ne fait pas la distinction entre les différents risques. C'est à chacun de savoir à quel risque il est exposé et quelles sont les mesures à tenir. Il y a donc un travail d'information et de formation à faire auprès de la population afin qu'elle puisse agir de manière adéquate à chaque situation.

Les sirènes ne sont pas un outil d'alerte optimal à cause du manque de régularité d'entretien, de la non représentation directe du danger annoncé, de son vieillissement et de la non prise en considération de l'évolution des territoires. Leur utilisation est de plus en plus remise en cause (Douvinet et coll., 2019). D'autres outils ont été développés ou sont en cours de développement, comme les services de télé-alerte.



Figure 20 : Plaquette d'information à la population sur l'alerte. Quel est le signal d'alerte et quels sont les comportements à avoir pour se mettre en sécurité et obtenir de l'information

3.2. Le système de télé-alerte, un outil basé sur le volontariat

La télé-alerte est un système d'alerte qui permet de toucher un grand nombre de citoyens grâce à l'envoi massif de messages d'alerte. Il peut s'agir d'un SMS, d'un message vocal ou d'un courriel. Cet outil s'applique à l'échelle communale et est activé par le maire. La problématique majeure est que cela fonctionne généralement par volontariat et inscription. Chaque citoyen doit donc se sentir concerné par la problématique et lui-même faire la démarche d'inscription au système, devenant ainsi acteur de sa propre protection. Le second problème est que le message peut s'avérer peu clair, un effort doit donc être fait de la part des acteurs institutionnels. C'est pourquoi les messages sont généralement écrits en avance.

La ville de Nice est dotée de ce système. Le document permettant l'inscription est joint au DICRIM de la ville sous forme de flyer (Figure 21) et est disponible sur internet. Le long du littoral, d'autres communes sont dotées de cet outil : les communes de la communauté d'agglomération des Pays de Lérins (Théoule-sur-Mer, Mandelieu-la-Napoule, Cannes, qui ont mutualisé le développement de ce dernier), Antibes, Villeneuve-Loubet, Cagnes-sur-Mer, Saint-Jean-Cap-Ferrat, et Monaco.



Figure 21 : Exemple de communication pour des systèmes d'alerte. Flyer distribué par la ville de Nice pour expliquer le fonctionnement du service de télé-alerte et comment s'y inscrire. Et exemple de formulaire d'inscription au service de télé-alerte, ici celui de Villeneuve-Loubet.

Dans le cas de Monaco, il est précisé que sont ajoutées au message d'alerte des informations sur les comportements à tenir. Ce complément est judicieux puisqu'il permet aux personnes ne disposant pas des connaissances nécessaires de se mettre ou de rester en sécurité. Les communes qui ne sont pas citées sont celles pour lesquelles nous n'avons pas trouvé l'information. Soit ce système n'existe pas, auquel cas il serait intéressant de le mettre en place, soit il existe mais n'est pas facilement trouvable auquel cas il conviendrait de favoriser sa visibilité.

3.3. Les applications smartphone

Certaines de ces communes, Nice et les Pays de Lérins, ont également développé une application pour smartphone permettant à la fois d'obtenir des informations sur les risques présents sur la commune, et d'être alertés en cas d'évènement. Celle de Nice s'appelle « Risques Nice » (Figure 22 a) et celle utilisée par les Pays de Lérins, « My predict » (Figure 22 b, c, d), est une application indépendante informant des évènements à proximité. Elle peut donc être utilisée par tous quel que soit le lieu (de vie ou de déplacement) (Figure 22 c). Elle informe sur les alertes de lieux définis ou du lieu où l'on se trouve (Figure 22 b).

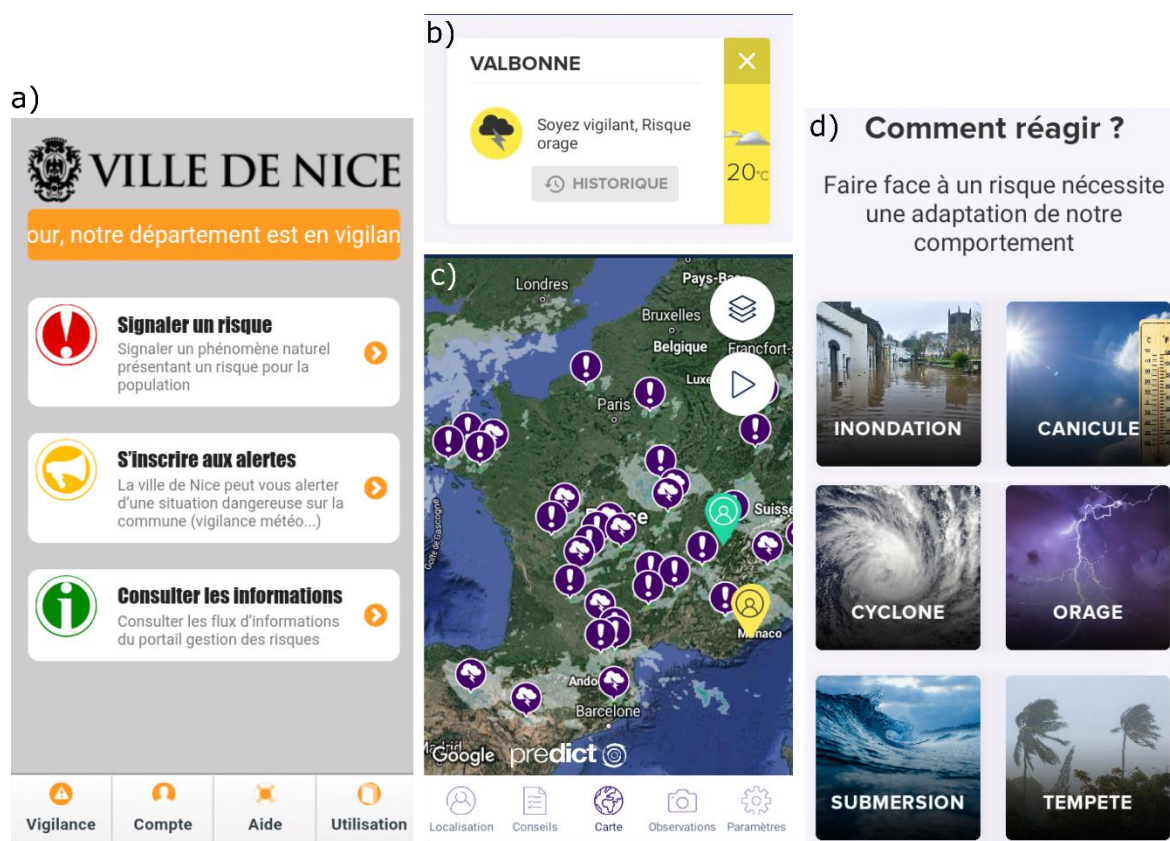


Figure 22 : Copie d'écran des applications smartphone de la ville de Nice et de My predict

Elle présente également l'intérêt d'informer sur les conduites à tenir en cas d'évènements majeurs (Figure 22 d). La submersion marine est incluse dans les aléas présentés ; nous pouvons toutefois supposer par les consignes données qu'il s'agit davantage du risque de submersion marine par tempête que par tsunami. Plusieurs informations sont toutefois transposables au tsunami, comme éviter le bord de mer, ne pas descendre dans des points bas, rejoindre un lieu sécurisé (zone refuge ou étage), etc. Cet outil est à destination d'un public plus jeune, qui dispose et sait utiliser les technologies liées aux *smartphones*.

Le Système d'Alerte et d'Information des Populations (SAIP) a également développé une application à destination de la population. Celle-ci a été mise en place suite aux attaques terroristes qui ont impacté la France ces dernières années. Elle est donc focalisée sur ce risque. Or, suite à de nombreux dysfonctionnements et de son faible impact, seulement 900 000 personnes disposaient de l'application en 2017 (Ministère de l'Intérieur) ; le Ministère de l'Intérieur a décidé de la désactiver le 1^{er} juin 2018. En revanche, un compte twitter a été ouvert permettant une alerte via les réseaux sociaux.

3.4. Les réseaux sociaux, un nouvel outil d'alerte

Les réseaux sociaux sont également efficaces pour transmettre de l'information en cas d'évènement majeur. Il peut aussi bien s'agir d'usagers lambda sur les lieux qui vont faire part de ce qui se passe dans un endroit particulier, ou d'informations officielles relayées par les comptes de la ville, de la préfecture, ou autre. Par exemple,

lors d'alertes données par Météo France, le site de la Préfecture des Alpes-Maritimes retransmet les billets de vigilance (Figure 23), auquel est ajoutée la plaquette des comportements à tenir en cas d'inondation.

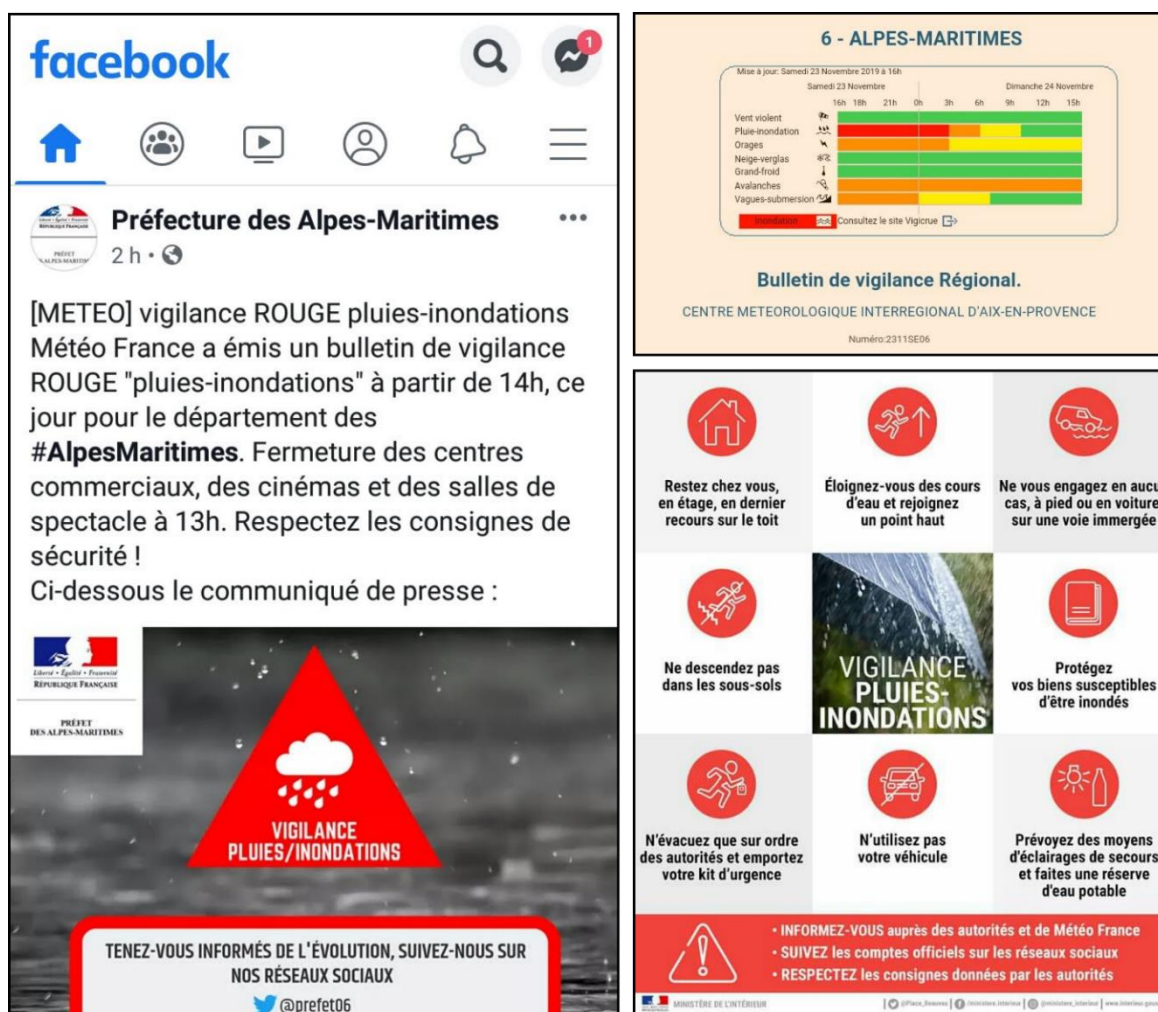


Figure 23 : Copie d'écran d'un post facebook de la Préfecture des Alpes-Maritimes en date du 24 novembre 2019, contenant l'annonce de la vigilance rouge, le billet Météo France et la plaquette des comportements à tenir en cas d'inondation.

La population est ainsi acteur de sa propre mise en sécurité. Il faut donc qu'elle soit informée et qu'elle ait connaissance des différents aléas auxquels elle est exposée, ainsi que les comportements à tenir en cas d'évènement extrême. Les outils développés sont principalement à destination des inondations, premier risque français (site du Gouvernement). La plupart ont toutefois vocation à être utilisés pour tout type de menace. Dans la mesure où l'alerte parviendrait à l'échelon local (préfecture et communes) ces outils pourraient être utilisés pour prévenir la population de l'arrivée soudaine d'un tsunami.

Se pose cependant une fois encore la question des délais d'arrivée de l'information à la population, sachant que les personnes exposées nécessitent d'un temps supplémentaire pour évacuer et se mettre à l'abri. Le développement de ce type d'outil reste favorable à la résilience d'un territoire et de ses populations. La diversification de ces derniers permet de toucher un maximum de personnes.

4. Conclusion

La surveillance et l'alerte d'un aléa sont les premiers chaînons de la préparation à un événement. Ils représentent une approche fonctionnelle, ayant pour but d'identifier la menace avant qu'elle ne frappe les côtes et ainsi réduire les pertes (humaines principalement). Dans le cas d'un tsunami, la surveillance fonctionne, puisque les événements sont identifiés et répertoriés ; en revanche, l'alerte reste difficile. S'agissant d'événements se produisant sans signe avant-coureur (à l'exception de l'événement source), il peut être difficile de les détecter avant qu'ils n'atteignent les littoraux.

Ces systèmes d'alerte peuvent se révéler efficaces pour des tsunamis d'origine sismique et dont la source est suffisamment éloignée pour permettre une alerte et une évacuation de la population. Ils présentent encore des faiblesses pour les tsunamis générés par d'autres sources que des séismes et pour les tsunamis locaux, dont les temps d'arrivée sont plus courts que ceux nécessaires au lancement de l'alerte.

Dans le cas où l'événement peut être détecté l'alerte peut être difficile et n'atteint pas forcément la population. Sont ainsi remis en question la structuration de la chaîne d'alerte, qui manque d'efficacité et de redondance, et le temps nécessaire au transfert de l'information. Les populations étant le dernier maillon, il se peut qu'elles ne reçoivent pas l'information avant que le tsunami ne frappe les côtes.

Toutefois, une meilleure compréhension du phénomène, des espaces exposés et des leçons retenues des événements passés, permettent d'approfondir la démarche afin de faire évoluer le territoire et d'intégrer la menace dans les politiques et pratiques nationales et locales.

CHAPITRE 4 : LES OUTILS ET LES PLANS DE PREVENTION, D’URBANISME ET D’INFORMATION A LA POPULATION DANS LE DOMAINE DES RISQUES ET DES CATASTROPHES – QUELLE PLACE POUR LE RISQUE DE TSUNAMI ?

La prévention des risques est un vaste domaine qui englobe l’ensemble des temporalités d’un évènement, c’est-à-dire l’ante-évènement, le pendant et le post-évènement. Des actions concrètes d’observation, de gestion de crise et de remise en état du territoire sont développées. En parallèle, des outils sont mis en place afin d’informer la population, d’assurer une cohérence entre développement et zone à risque, et d’anticiper la gestion de crise. Ceux-ci ont tous pour objectif principal de limiter les pertes, principalement humaines.

Certains de ces documents sont multirisques (par exemple les Documents d’Informations Communaux sur les Risques Majeurs), alors que d’autres se focalisent uniquement sur un seul aléa (par exemple le plan de prévention du risque sismique) (Dauphiné et Provitolo, 2013). Le tsunami étant un phénomène peu connu, est-il inclus dans les documents et les outils de prévention ? Ce chapitre cherche justement à répondre à cette interrogation en analysant les différents outils existants.

Pour ce faire, une première partie se focalise sur les documents d’urbanismes et d’aménagement. Une seconde se concentre sur les outils d’aide à la gestion de crise. Une troisième cherche à regrouper les différents outils et actions centrés sur l’information aux citoyens. Et enfin une quatrième partie fait un bilan sur la place du tsunami dans l’ensemble de ces documents et outils.

1. Le tsunami, absent des plans d’urbanisme et d’aménagement du territoire dans le domaine des risques

Les documents d’urbanisme apportent une maîtrise de l’urbanisme et du développement urbain. Deux documents principaux sont à disposition des élus : le Schéma de COhérence Territorial (SCOT) et le Plan Local d’Urbanisme (PLU). Ces derniers doivent fixer les conditions d’un développement équilibré et durable des territoires. Ils permettent une intégration de la problématique des risques dans l’aménagement du territoire. Ils sont l’occasion d’une réflexion en amont et sont à la charge des élus locaux.

Ces documents de gestion du territoire ne s’attardent pas directement sur les risques majeurs et leur gestion. Ils doivent cependant en tenir compte dans leur mise en place afin de limiter au possible le développement urbain en zone exposée à un ou plusieurs aléas, comme en zone inondable par exemple. Les **Plans de Prévention des Risques** (PPR) sont notamment annexés au PLU, encadrant le développement de l’urbanisme local. Il peut donc y avoir une contradiction entre la politique étatique

de protection de la population et les choix de développements économiques et urbains fait par les communes.

Leur rôle est d'interdire de nouvelles constructions dans les zones les plus exposées et de réglementer les nouvelles constructions dans les zones les moins exposées. Des zones sont ainsi déterminées en fonction de l'exposition à une ou des menaces, avec chacune des réglementations particulières en termes d'utilisation de l'espace et de construction.

Les PPRN couvre l'ensemble des aléas naturels : inondations, séismes, mouvements de terrain, avalanches, incendies de forêt, éruptions volcaniques, tempêtes et cyclones. **Ils n'incluent toutefois pas le tsunami.** Il peut être **multirisques**, c'est-à-dire englobant plusieurs ou l'ensemble des aléas pouvant impacter un territoire, ou **mono risque**, c'est-à-dire se focalisant sur un seul aléa comme les Plans de Prévention du Risque d'Inondation (PPRI) ou encore les Plans de Prévention du Risque Sismique (PPRS).

Le Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) est un plan de prévention concernant une ou plusieurs communes littorales. Il est spécifique aux submersions et aux érosions marines (recul du trait de côte et migration dunaire). Malheureusement, il concerne uniquement les submersions marines liées aux phénomènes climatiques, **excluant également les tsunamis.** Les inclure dans ces documents permettrait une approche plus globale et plus riche des risques littoraux.

Dans les Alpes-Maritimes, des études portant sur l'aléa submersion ont été réalisées dans le cadre de la directive inondation en 2013, et complétées en 2016. Celles-ci ont été réalisées par les services de l'Etat, avec pour finalité une portée à connaissance aux collectivités locales (communes et intercommunalité) afin que celles-ci puissent intégrer cet aléa dans les documents d'urbanismes. La démarche est intéressante, puisqu'elle prouve une prise de conscience de la fragilité et des enjeux que représentent ces interfaces entre la terre et la mer. Pourtant, l'aléa submersion marine ne concerne une fois encore que l'origine climatique et non le tsunami (Préfecture des Alpes-Maritimes).

Le tsunami n'est donc pas inclus à l'heure actuelle dans les documents d'urbanismes et d'aménagement du territoire. Qu'en est-il des outils d'aide à la gestion de crise ?

2. Outils d'aide à la gestion de crise, un début d'intégration du tsunami

Avant qu'un évènement majeur se produise, des réflexions sur différentes thématiques permettent d'aboutir à la constitution d'outils d'aide à la gestion de crise. Ces derniers permettent d'être préparés et d'être en mesure de réagir le jour où l'évènement se produit. Ils sont principalement réalisés et à destination des acteurs institutionnels, avec comme ligne directrice la protection et la mise en sécurité des populations. Deux plans existent à différentes échelles : l'Organisation de la Réponse

de la Sécurité Civile (plan ORSEC) au niveau départemental et les Plans Communaux de Sauvegarde (PCS) à échelon communal.

Le plan ORSEC (Organisation de la Réponse de la Sécurité Civile) est un programme d'organisation des secours pour faire face à une crise. Il s'applique à échelle départementale sous l'autorité du préfet. Il permet une mise en place rapide des différents moyens disponibles en cas de catastrophe afin de gérer au mieux la crise. Ce dispositif a pour objectif premier la protection de la population. Il permet de réagir à tout type de situation, souvent dans l'urgence, lorsqu'est impactée une zone dépassant l'échelon communal. Il fait le lien entre les différents acteurs de la gestion de crise : les secours (pompiers, forces de l'ordre), les collectivités (maires) et les opérateurs privés (opérateurs réseaux).

Les plans ORSEC peuvent être généraux ou spécialisés à un ou plusieurs types d'aléas. Les Alpes-Maritimes disposent d'un projet de plan ORSEC consacré au séisme et au tsunami. Bien que principalement focalisé sur le risque sismique, ce plan a le mérite de prendre en compte le tsunami. Il s'agit davantage de conseils et de consignes sur ce qu'il faudrait mettre en place pour **favoriser l'alerte** (signalétique en bord de mer, panneaux à messages variables, etc.), **l'évacuation** par l'identification des zones à évacuer et le moyen d'évacuation (voiture, transport en commun, à pied, etc.) et **l'identification de zones refuges**. Leur mise en application n'a pas encore été effectuée.

Les **Plans Communaux de Sauvegardes** (PCS) viennent en complément du dispositif ORSEC. Ils correspondent à l'échelon local de la sécurité civile et sont à destination des acteurs locaux. Ils doivent normalement être révisés tous les 5 ans et évoluer avec le territoire. Toutes les communes dotées d'un PPR doivent se munir d'un PCS.

Le PCS contient l'ensemble des documents contribuant à l'information et à la protection de la population communale. Il organise la sauvegarde des personnes en permettant à la commune de prévoir la gestion de toutes situations pouvant affecter la population. Une réflexion globale doit être faite en amont entre les différents services, acteurs et partenaires locaux. Celle-ci permet une identification des moyens (humains et matériels) disponibles, l'organisation des secours, les principales missions à réaliser (tout en sachant qu'il ne sera pas possible de prévoir toutes les éventualités), etc. La finalité doit être l'organisation de la gestion de crise adaptée à la commune pour qu'en cas d'évènement majeur le PCS puisse servir d'outil d'aide à la gestion de crise.

Ces documents d'organisation de la gestion de crise sont nécessaires au maintien des structures organisationnelles et de la protection des populations en cas de survenue d'un évènement. Ils permettent une réflexion au préalable des différentes menaces pouvant impacter un territoire et comment agir en conséquence afin de limiter au maximum les dégâts. Le tsunami, bien qu'encore grandement absent, commence à apparaître dans ce type de documents.

La population, enjeu majeur à protéger, apparaît comme étant peu active dans l'ensemble des outils présentés. Or, pour sa propre protection, il est important de la rendre active. Cela passe par de la formation et de l'information.

3. Responsabiliser le citoyen pour qu'il devienne acteur de sa sécurité

Le gouvernement tend à prendre des mesures pour informer la population car depuis la loi de modernisation de la sécurité civile de 2004, la place du citoyen au cœur de la sécurité civile est affirmée : « *Face aux risques majeurs, l'anticipation, la préparation et l'implication de chacun sont des facteurs de protection. Mieux préparés, mieux informés, vous serez en mesure d'agir et d'aider vos proches plus efficacement face à une situation d'urgence.* » (Site du Gouvernement).

Cette vision, qui apparaît comme étant la plus optimale pour la sécurité de chacun, ne peut fonctionner que si chacun se sent concerné par ces questions et ces problématiques. Le tsunami, peu fréquent et peu connu, ne fait pas exception. Il est donc nécessaire que les institutionnels agissent en conséquence pour favoriser la formation et l'information de la population. Pour ce faire, des outils existent et des actions sont mises en place.

3.1. Les outils d'information à la population

Pour que la population puisse être actrice de sa propre sécurité il faut qu'elle ait conscience des menaces auxquelles elle est exposée. Pour cela deux documents existent, l'un à échelle départementale, le Dossier Départemental sur les Risques Majeurs (DDRM) et le Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs (DICRIM).

3.1.1. Le dossier départemental sur les risques majeurs, un outil d'information sur l'ensemble des risques présents dans le département

Le Dossier Départemental sur les Risques Majeurs (DDRM) est un document réalisé par la Préfecture d'un département, regroupant l'ensemble des informations essentielles sur les risques naturels et technologiques majeurs d'un département (georisques.gouv.fr). Il contient également les mesures de prévention et de sauvegardes préconisées pour limiter leurs effets. Il est consultable en mairie et sur internet.

Le DDRM des Alpes-Maritimes date de novembre 2016. Il semble être actualisé régulièrement puisque la version précédente datait de 2013. Nous pouvons toutefois nous demander si son actualisation ne fait pas suite aux inondations d'octobre 2015 (Figure 24). Il répertorie l'ensemble des aléas présents dans le département, dont le risque de tsunami. Ce dernier est traité avec les risques littoraux (érosion côtière, submersion marine, changement climatique). Il définit le tsunami, présente les sources potentielles de la région (séisme et glissement de terrain) et fait un rapide historique des événements passés. De plus, des consignes sont données quant aux comportements à tenir (avant, pendant et après) lorsqu'un événement vient à se produire.

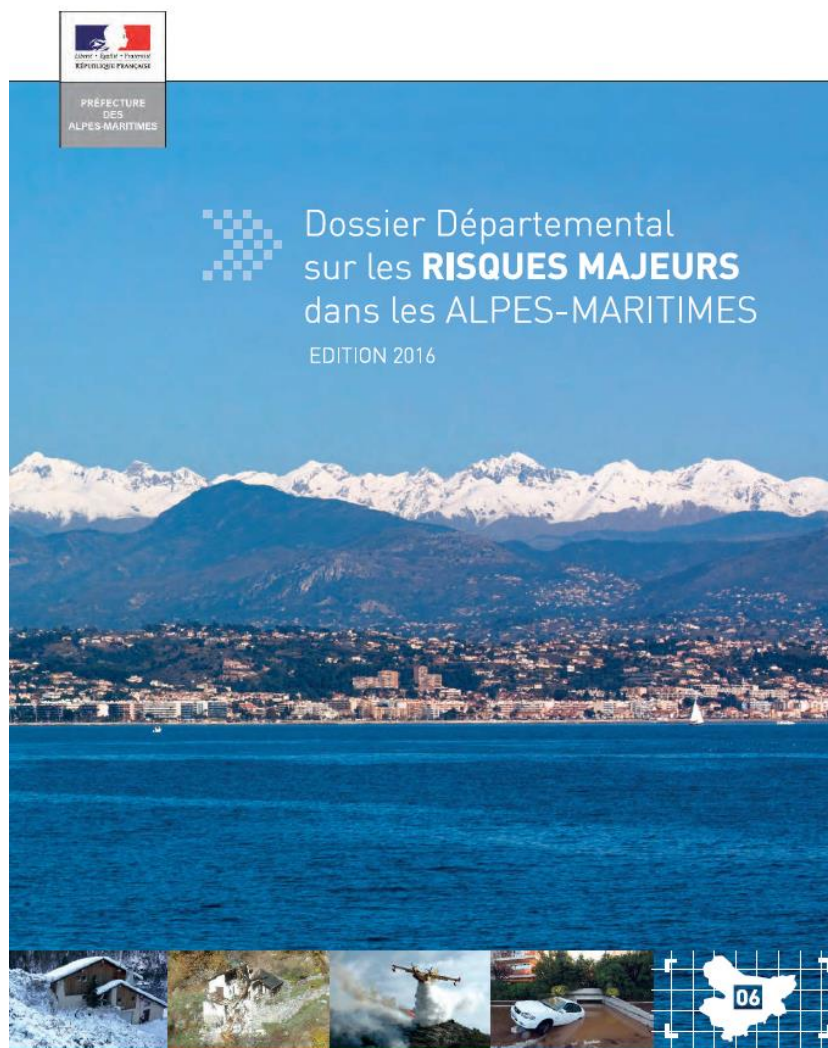


Figure 24 : Première de couverture du Dossier Départemental sur les Risques Majeurs (DDRM) des Alpes-Maritimes.

Le DDRM est l’un des rares documents faisant état du tsunami. Une fois encore cela montre une avancée dans la prise en considération de cet aléa. Il sert souvent de base et de support à la création des DICRIM.

3.1.2. Le document d’information communal sur les risques majeurs, un état des lieux réalisé par commune

Le Document d’Information Communal sur les Risques Majeurs (DICRIM) est un document réalisé par les mairies, à destination de tous les citoyens. Il s’agit d’un document officiel, à la charge du maire, qui a pour objectif d’informer les populations des risques majeurs présents sur la commune. Ces risques retenus vont être clairement expliqués et des consignes de sécurité vont être données pour les différentes phases de l’évènement (avant, pendant et après). Il est consultable en Mairie, sous forme de livret (que le citoyen peut emporter, ou qui peut être glissé dans les boîtes aux lettres), ou encore sous format informatique, téléchargeable par tous.

Son rôle premier est d'informer les citoyens sur les risques naturels et technologiques présents sur la commune, les modalités d'alertes et les comportements à tenir (avant, pendant et après) pour assurer sa sécurité et celles de ses proches. En 2019, parmi les communes qui constituent la zone d'étude de cette recherche, soit 16 communes françaises, plus Monaco mais qui ne rentre pas dans cette rubrique ayant sa propre politique, 9 disposent d'un DICRIM (Figure 25), dont 2 sont un peu développés (Antibes et Menton).

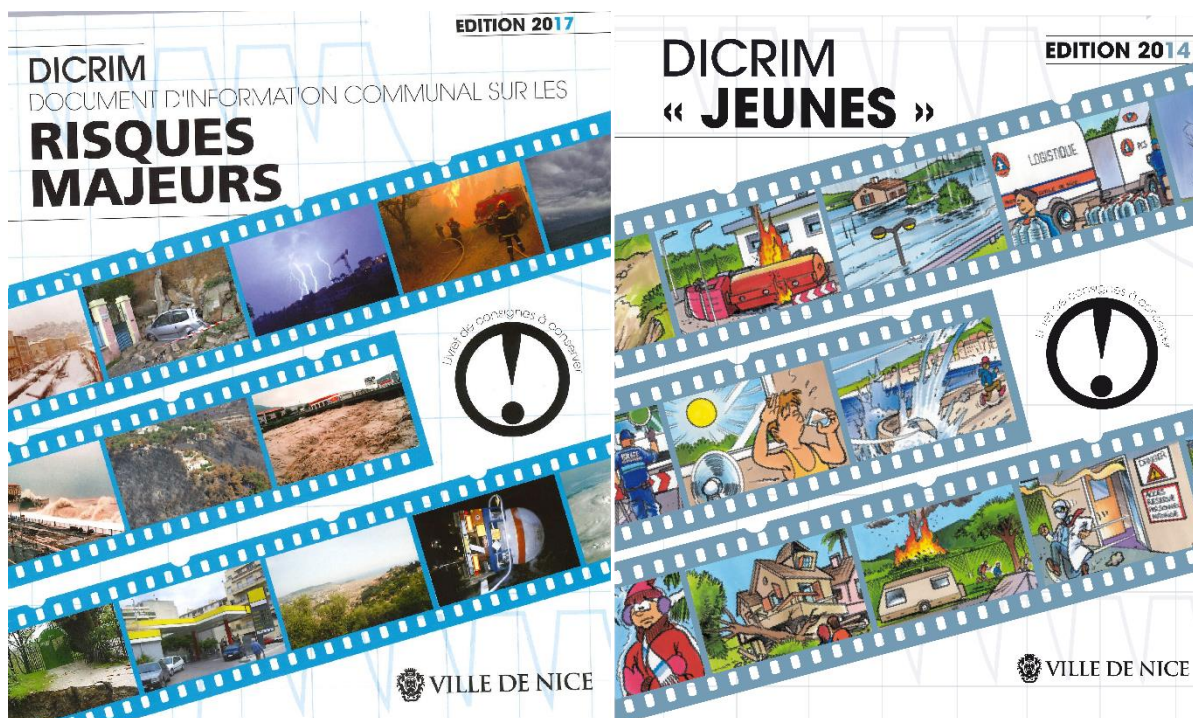


Figure 25 : Document d'information communal sur les risques majeurs émis par la ville de Nice. A gauche, le dernier DICRIM de 2017 et à droite le DICRIM jeune datant de 2014.

Plusieurs communes ont mis à jour leur DICRIM entre 2016 et 2018. S'agissant principalement de communes à l'ouest du département, nous pouvons supposer que cela fait suite aux inondations catastrophiques d'octobre 2015, qui ont dévasté les Alpes-Maritimes, et plus particulièrement les communes littorales situées à l'ouest. Cela montre une prise de conscience de la part des maires, qui mettent en place des actions, augmentant ainsi la résilience du territoire.

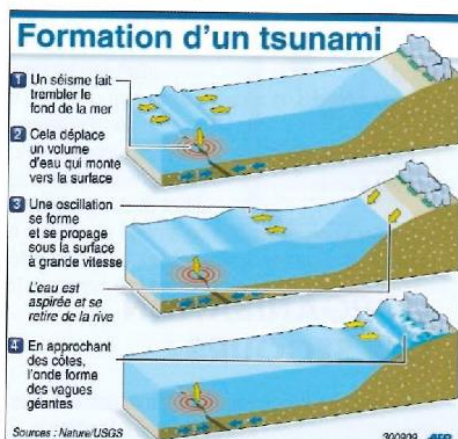
Le DICRIM est obligatoire pour les communes disposant d'un plan de prévention des risques (PPR) qu'ils soient naturels, technologiques ou miniers. En 2016, l'Etat évalue à 7 000 communes s'étant dotées de DICRIM, sur les 28 000 concernées par les PPR, soit à peine 25 %. D'après le DDRM, en 2016 sur l'ensemble du département, 163 DICRIM étaient obligatoires, pour seulement 63 réalisés, soit un peu moins de 40 %. Parmi les communes littorales des Alpes-Maritimes, une seule ne dispose pas de PPR approuvé, Saint-Jean-Cap-Ferrat, pourtant exposé à des aléas divers (sismique, incendie, etc.). Bien que marquant une grande lacune, le département des Alpes-Maritimes est au dessus des données nationales. Nous pouvons supposer que cela s'explique par une volonté et une prise de conscience politique.

Le risque de tsunami est encore nouveau et relativement mal connu. Il n’apparaît donc que très peu dans les DICRIM des communes littorales. Parmi les DICRIM disponibles sur internet, seule la commune de Cannes réserve une section complète au tsunami. Il est donc considéré comme un aléa à part entière, avec son historique et des consignes de sécurité propres. Trois communes font références au tsunami dans des parties consacrées à d’autres aléas. La commune de Théoule-sur-Mer inclut le tsunami dans les risques d’inondations côtières, et les communes de Mandelieu-la-Napoule et de Nice considèrent le tsunami comme une conséquence potentielle d’un séisme, ce qui est le cas, mais ne le prenant pas en compte directement ; aucune information n’est donnée quant aux conduites à tenir.

La commune de Nice dispose d’un DICRIM riche et pédagogique, qui est régulièrement mis à jour. **Depuis 2012 le tsunami apparaît dans le DICRIM de la commune**, il est cependant uniquement considéré comme une sous partie du risque sismique, ne précisant pas les actions à tenir. En revanche sont bien précisés les très courts délais d’arrivée de la vague (Figure 26). Nice présente la particularité d’avoir produit un DICRIM jeune (Figure 25) à destination des enfants, qui est simplifié et contenant des jeux, afin de les sensibiliser à ces problématiques. La ville de Nice dispose d’un service dédié aux risques naturels, la Direction de la Prévention et Gestion des Risques (DPGR), qui leur permet d’approfondir les études et la communication sur les risques.

LE RISQUE DE TSUNAMIS

Les mouvements verticaux du fond marin engendrés par un séisme marin, génèrent simultanément des mouvements d’eau au dessus. Les masses d’eau mises en mouvement vont alors se déplacer latéralement sous la forme de vagues de grande ampleur qui vont déferler sur une côte.



Compte-tenu de la topographie des fonds marins, de la masse d’eau relativement faible de la Méditerranée et de la magnitude moyenne des séismes, les tsunamis susceptibles d’être engendrés seraient de faibles amplitudes.

Sur la côte d’azur, il a été recensé dans le passé un certain nombre de raz-de-marée de faibles amplitudes suite à des séismes locaux (1854, 1887). En octobre 1979, un effondrement de la plateforme de l’aéroport de Nice a entraîné un raz-de-marée sur le secteur d’Antibes (retrait de cinquante mètres de la mer et génération d’une vague d’un mètre de hauteur). L’effondrement de la plateforme a fait 9 morts auprès des ouvriers travaillant sur la plateforme auxquels s’ajoute la mort d’une personne sur le rivage d’Antibes.

Scénario	Amplitude maxi	Temps d’arrivée	Secteur affecté
Séisme ligure 1887 Magnitude 6,8	2m à Antibes	10 à 15 minutes	de Saint-Tropez à Nice
Séisme côte algérienne Magnitude 7,8	2m à Nice 4m à Cannes	95 à 100 minutes	de Marseille à Menton
Glissement sous-marin côtier Volume 1 km ³	3m à Nice 4m à Antibes	10 à 20 minutes	de Saint-Tropez à San Remo

Figure 26 : Partie sur les tsunamis du DICRIM de Nice 2017

Au niveau de la prise en compte des tsunamis sur son territoire, la ville de Cannes apparaît comme la « bonne élève » locale mais également nationale. Les graves dégâts occasionnés par les inondations d'octobre 2015 ont fait prendre conscience aux acteurs, et principalement au Maire de Cannes, Monsieur David Lisnard, de l'importance d'une bonne préparation au risque majeur. Le DICRIM de Cannes (Figure 27) apparaît donc également comme un exemple. En plus d'être riche en informations, chaque section sur un aléa contient une cartographie des zones exposées de la commune.



Figure 27 : Contenu du DICRIM de la ville de Cannes sur l'aléa tsunami

La question se pose toutefois quant à la réelle efficacité de ce document. Il peut s'agir d'un manque d'intéressement de la part du public concerné, un manque de diffusion du document (disponible en mairie et généralement sur internet), ou encore un manque de clarté de ce dernier. En parallèle de ces outils, diverses actions sont entreprises pour informer et former la population.

3.2. Des actions menées en parallèle pour informer la population aux risques grâce à l'implication des pompiers

Au niveau départemental, le préfet est responsable de la sécurité civile. Il est pour cela épaulé par les SDIS (Service Départemental d'Incendie et de Secours), le SAMU (Service d'Aide Médicale d'Urgence) et des associations comme la Protection Civile ou la Croix-Rouge. Ici, une focalisation est faite sur le SDIS.

Les sapeurs-pompiers, en dehors de leurs actions de secours, ont un rôle majeur pour la prévention, l'information et la formation de la population. Le SDIS 06 est fortement engagé dans la prévention du public local. Depuis 1995, différentes actions sont entreprises à cet effet dans l'ensemble des établissements scolaires du département (Brève d'Inf06, 2017). L'objectif est de **sensibiliser un public jeune aux gestes et comportements qui sauvent, adaptés à la situation et aux différents**

risques auxquels ils peuvent être exposés. Il s'agit des Informations Préventives aux Comportements qui Sauvent (IPCS).

Cibler un public jeune permet d'éveiller dès le plus jeune âge une sensibilité à ces questions. Ceci a également l'avantage de faire parvenir une partie de l'information à certains parents via les enfants. Cette volonté est d'ailleurs clairement explicitée : « *Grâce aux actions avec les sapeurs-pompiers, ces élèves sensibilisés sur des clés d'entraide et de respect, sont nos ambassadeurs auprès de leurs proches.* » (Brève d'Inf06, 2017).

La continuité de ces actions, réalisées à des âges différents, permet de maintenir leur sensibilité et leur intérêt. La volonté principale serait que ces jeunes deviennent des citoyens qui se sentent concernés par la problématique des risques et qu'ils soient en capacité de « bien » réagir et d'avoir des comportements adaptés en cas d'évènement. Il y a également une forte volonté de rendre les citoyens acteurs de leur mise en sécurité et de celles des personnes qui les entourent, leur permettant d'assurer leur propre sécurité.

Les actions entreprises se concentrent autour de nombreux enjeux de la sécurité civile et incluent différentes actions selon les âges et les thèmes abordés. Certaines actions sont axées sur la sécurité civile, d'autres davantage sur les risques (naturels, anthropiques, industriels), certaines sont dédiées aux collégiens avec des thèmes particuliers, d'autres encore sont dédiées à la prévention des accidents domestiques ou à la sécurité routière. Dans le cadre de ce manuscrit, seules les actions en lien avec les risques sont développées. Les actions centrées sur le risque sont au nombre de deux : le module IMPACT et la formation au risque sismique dans les collèges.

Le **module IMPACT**, Immédiat Management Planification Action, a été développé au sein même du SDIS 06, par le [Lieutenant-Colonel Castagnola \(2017\)](#). Il est aujourd'hui proposé à l'ensemble du département que ce soit pour les institutions ou les structures privées. Il commence à être proposé dans d'autres départements.

Le module IMPACT ([Figure 28](#)) a été pensé comme un jeu de rôle, de manière à ce que les participants eux-mêmes choisissent les évènements et les crises qu'ils vont faire jouer à d'autres participants. Il peut aussi bien s'agir d'un accident industriel, d'une prise d'otage ou encore d'un tsunami. Deux groupes sont ainsi créés : ceux qui conçoivent et scénarisent l'exercice, la **cellule Planification**, et ceux qui le jouent et qui doivent gérer au mieux la crise générée par le premier groupe, la **cellule Action** ([SDIS, 2017](#)). L'objectif est une mise en situation se rapprochant du réel, aussi bien pour un groupe que pour l'autre.

Celui-ci a pour volonté de développer une cohésion de groupe, de faire prendre conscience de ce qu'est réellement la gestion d'une situation d'urgence et donc d'être en mesure de savoir y faire face ([SDIS, 2017](#)). De plus, vivre une situation comme celle-ci devrait aider à gérer le stress en cas de situation réelle.

Le SDIS 06 étant partenaire de cette thèse, j'ai eu la chance de participer à un module IMPACT dans un collège de Nice. Ce dernier, à destination des enseignants, a permis de jouer différents scénarios dont l'arrivée d'un tsunami avec une classe en

sortie mer ce jour-là. Les professeurs se sont tous pris au jeu et sont parvenus à gérer cette situation hypothétique.

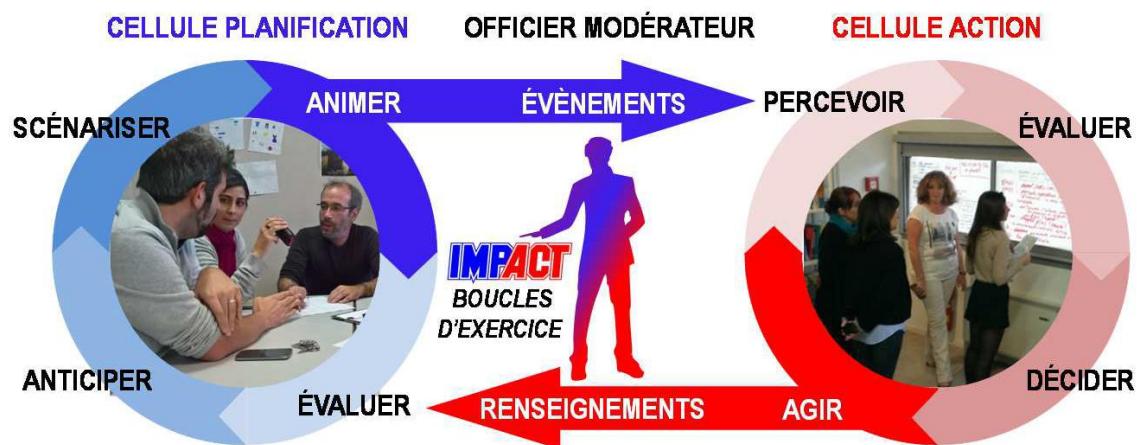


Figure 28 : Schéma explicatif du Module IMPACT
(Sources : SDIS, 2017)

Nice étant une des zones à sismicité la plus forte de la France métropolitaine, il est important de former et d'informer la population à ce sujet. Une **formation au risque sismique** est proposée dans différents collèges du département. Celle-ci se focalise sur les comportements à tenir en cas de séisme afin de se mettre en sécurité (sous une table, sous les cadrans de portes, s'éloigner des fenêtres tout en se protégeant la gorge, etc.). Sont également présentées lors de ces formations, les différentes techniques d'interventions des sapeurs-pompiers (SDIS, 2017).

Les actions centrées sur la prévention de la sécurité civile, peuvent également jouer un rôle lors d'un événement ou d'une crise puisqu'elles forment à la mise à l'abri ou à l'évacuation, à l'appel aux secours, aux gestes de premiers secours, etc. Il s'agit des actions suivantes :

- Information Préventive aux Comportements qui Sauvent (IPCS), à destination des adultes.
- Exercices d'évacuation dans le cadre des Plans Particuliers de Mise en Sécurité, qui est une continuité pour les établissements des IPCS.
- ASsistant SECurité (ASSEC), à destination des élèves de CM1 à la 2nd. Les ASSEC ont pour mission d'aider le professeur en cas de nécessité de mise en sécurité.

Les actions entreprises par le SDIS 06 sont nombreuses et couvrent de larges domaines, dont celui des risques et des catastrophes. L'ensemble de la population est visé (des écoles aux administrations, en passant par des structures privées). Il y a une volonté d'informer et de former un maximum de personne afin que chacun soit responsable de sa sécurité et soit en mesure de se mettre à l'abri en cas de crise. Ceci permet, en plus de sauver des vies, de soulager les pompiers, déjà fortement sollicités en cas d'évènement.

Le tsunami n'est pas au cœur des problématiques puisque les formations ciblent davantage les événements récurrents (inondations, séismes, etc.), il apparaît toutefois dans certaines formations, dont le module IMPACT.

3.3. Attention aux mauvais messages passés

Le manque de connaissances du risque de tsunami peut engendrer la transmission de messages inadéquats auprès des populations. Il est généralement représenté comme une vague de houle destructrice. A l'image d'une vague de surf, elle viendrait se casser et s'abattre sur le littoral. La réalité est toute autre puisqu'il s'agit davantage d'une vague de marée qui va venir immerger le littoral. Il faut donc être prudent à l'information ou aux messages envoyés à la population qui peuvent parfois être erronés avec la présentation d'images catastrophes qui ne correspondent pas du tout à la réalité.

Ce problème se retrouve dans les médias avec par exemple la couverture de Nice matin sur le risque de tsunami (Figure 29). Celle-ci diffuse un message erroné de la représentation d'un tsunami et induit en erreur quant à la puissance du phénomène. Bien que non représentative, il faut toutefois relever le fait que la une de Nice Matin ait été faite sur le tsunami. Ceci prouve une grande avancée et une volonté d'informer la population. L'ensemble des informations données dans l'article sont scientifiques et ont été écrites en collaboration avec Christophe Larroque, chercheur au laboratoire Géoazur. Seule la photo illustrative n'est pas représentative et peut discréditer le discours scientifique tenu.



Figure 29 : Une du quotidien Nice Matin du vendredi 1er mars 2019 sur le risque de tsunami dans les Alpes-Maritimes.

Ces photographies illustratives, supposées symboliser l'aléa, ne sont pas représentatives de la réalité. Les personnes sans connaissances particulières sur le sujet peuvent donc les considérer comme réelles et ainsi avoir une vision erronée de la réalité. Elles peuvent même potentiellement devenir anxiogènes de par l'aspect spectaculaire des images sélectionnées. Que ce soit pour le site du gouvernement (Figure 30) ou Nice Matin (Figure 29), aucune ne représente correctement un tsunami.

Les images sélectionnées représentent le tsunami comme une immense vague, de la taille de building, venant détruire une ville côtière. Il peut en effet, dans la réalité, s'agir d'une vague de plusieurs dizaines de mètres de hauteur, ce qui n'est pas le cas en métropole, mais il peut également s'agir d'une vague de 50 cm. Ceci laisse donc sous-entendre qu'un tsunami est forcément de grande ampleur. Il serait plus percutant d'illustrer ces propos par des photographies issues d'évènements passés (locaux quand cela est possible).

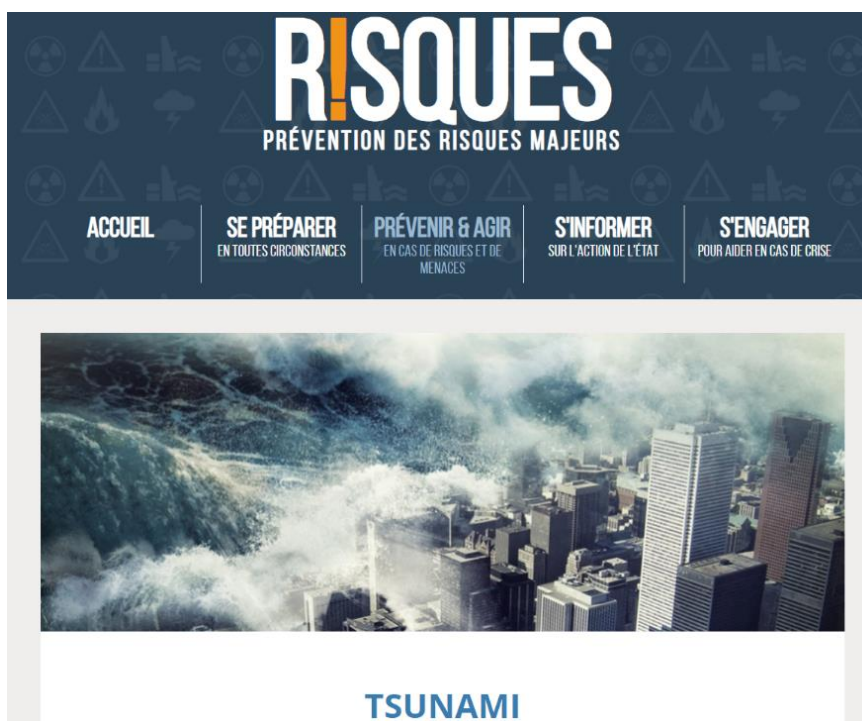


Figure 30 : Entête du site du gouvernement sur la section du risque de tsunami
<https://www.gouvernement.fr/risques/tsunami>

La réalité et la particularité du tsunami, qui ne sont pas représentées ici, sont qu'il s'agit davantage d'une vague de marée, l'arrière de la vague apparaissant comme « lisse » (Figure 31). Cette photographie a été prise au Japon, lors de la méga-catastrophe du 11 mars 2011.

Si l'on souhaite que la population se sente concernée et ne considère pas le tsunami uniquement comme un évènement démesuré, il faut être vigilant aux messages donnés. L'utilisation d'informations erronées peut avoir l'effet inverse que celui souhaité.



Figure 31 : Photographie du Tsunami du 11 mars 2011 sur la côte japonaise.

Photo issu d'une vidéo de National Geographic
(<https://www.youtube.com/watch?v=oWzdgBNfhQU>)

4. Une faible intégration du risque de tsunami dans l'ensemble de ces outils

Cette réflexion sur les différents plans et outils existants permet de faire ressortir la faible intégration du tsunami dans les différents documents et outils de planification ou de prévention. Ceux-ci sont mis en place en amont, c'est-à-dire avant qu'un événement ne se produise avec pour objectif de limiter les effets d'un événement majeur. Ils sont toutefois mobilisés à des temporalités d'une catastrophe. Certains vont avoir un rôle pendant la crise et dans sa gestion, par exemple les Plans Particuliers de Mise en Sécurité, alors que d'autres comme les DICRIM vont être utilisés tout au long de l'évènement en informant sur les conduites à tenir avant, pendant et après.

Sont ici représentés l'ensemble des plans et outils de prévention des risques (Figure 32). Ils sont classés selon qu'ils permettent d'informer la population, l'urbanisation et l'aménagement du territoire, la gestion de crise ou encore la réalisation de bilans. Les échelles spatiales de mise en application varient du département aux particuliers.

Les tsunamis sont peu inclus dans ces outils. Ils sont présents dans le DDRM, qui répertorie l'ensemble des aléas présents dans le département. Les DICRIM, qui découlent généralement du DDRM, sont de plus en plus nombreux à intégrer le tsunami que ce soit comme un aléa lié à un autre phénomène (séisme, glissement) ou comme un aléa à part entière avec des règles précises le concernant. Un plan ORSEC spécifique aux séismes et aux tsunamis est également en préparation dans les Alpes-Maritimes. Le tsunami est donc de plus en plus présent dans les documents officiels. Plus ce sera le cas plus la diffusion de son existence et du risque qu'il représente sera importante.

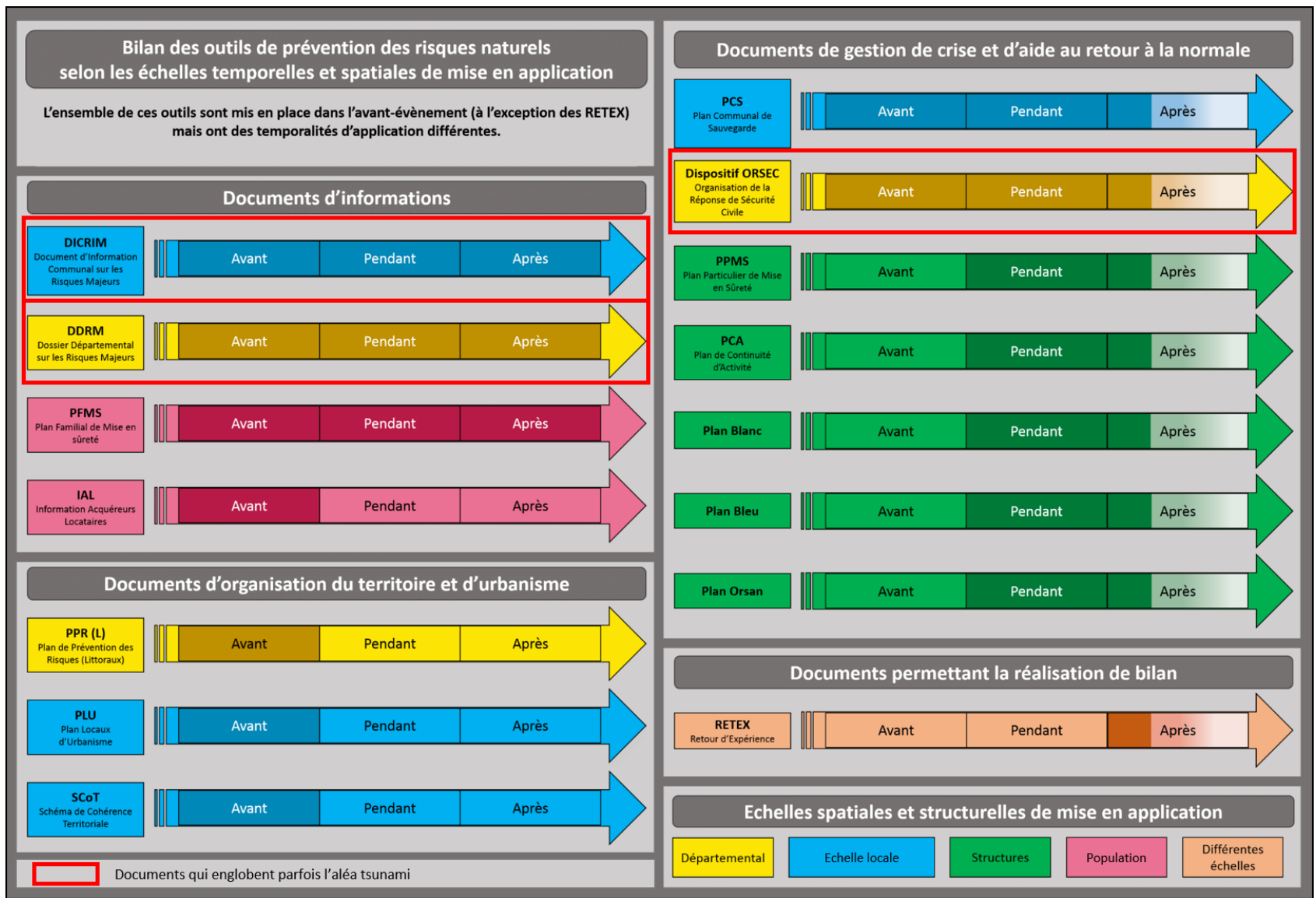


Figure 32 : Tableau synthétique des différents outils réglementaires et d'information existant dans les Alpes-Maritimes
En encadré rouge sont soulignés les outils qui tiennent compte du tsunami

5. Conclusion

Ce chapitre fait état des différentes actions et pratiques existantes à différentes échelles spatiales, temporelles et organisationnelles. Elles peuvent être structurelles (plans d'aménagement et d'urbanisme), organisationnelles (plan ORSEC) ou informatives (DICRIM). C'est la combinaison de l'ensemble de ces actions et l'évolution des mentalités, notamment le développement du « vivre avec » plutôt que de « lutter contre » qui vont permettre au territoire d'être davantage préparé.

Aucune loi dédiée au risque de tsunami n'existe à l'échelle nationale. Il est compris dans les risques naturels de manière globale, dans les PPRL par exemple (majoritairement focalisé sur les risques de submersion liés aux tempêtes et à la montée des eaux). Les outils et les plans plus locaux commencent à l'intégrer, ce qui démontre une prise de conscience de la réalité de la présence de ce risque sur les littoraux azuréens. Ceci montre également la volonté d'agir afin de mettre en place les mesures nécessaires afin d'être préparé à l'arrivée potentielle de ce phénomène.

Cette prise de conscience se fait au niveau institutionnel ; il est à présent important que des actions soient entreprises afin de transmettre l'information aux populations afin que celles-ci connaissent cet aléa (en étant réalistes dans les messages passés). Il est primordial qu'elles comprennent la complexité qu'un tsunami représente sur ce territoire, c'est-à-dire l'arrivée rapide du phénomène qui limite la possibilité d'une alerte et d'une évacuation spontanée. La population doit donc connaître les comportements à tenir et savoir quoi faire si un tsunami vient à frapper les côtes azuréennes. L'information et la formation de la population sont donc des points primordiaux sur lesquels des efforts doivent être faits.

CONCLUSION DE LA PARTIE I

La Méditerranée, zone géologiquement active, est source de nombreux phénomènes, dont des tsunamis. Elle regroupe, à elle seule, plus de 20% des événements mondiaux. Plusieurs événements historiques ont été relevés, faisant ressortir des événements locaux, régionaux et des télé-tsunamis, en fonction de l'étendue de leurs impacts (de quelques kilomètres à plusieurs centaines de kilomètres). Certains espaces ressortent plus touchés que d'autres.

Les Alpes-Maritimes sont exposées à l'ensemble de ces tsunamis, avec toutefois des sources distinctes : les tsunamis locaux ont pour origine le système de faille Ligure ou des glissements sous-marins, les tsunamis régionaux sont générés au niveau de la marge algérienne, et les télé-tsunamis, qui impactent l'ensemble du bassin, auraient une source plus lointaine, comme la Grèce.

Dans ces travaux, il a été décidé de se focaliser sur les tsunamis locaux et ce pour plusieurs raisons : (1) ce sont les phénomènes qui impactent le plus fortement le littoral azuréen ; (2) nous avons connaissance des événements historiques qui ont été étudiés et dont nous disposons de données associées ; (3) ces événements ne permettent pas une alerte à la population. Ce dernier point est primordial puisqu'en plus des particularités (géographiques, économiques, organisationnelles, etc.) de ces littoraux, il soulève la question de la connaissance de la population et plus largement de la culture du risque.

Deux événements emblématiques ont été étudiés, le tsunami d'origine sismique du 23 février 1887 et celui d'origine gravitaire du 19 octobre 1979. Il a finalement été décidé de se focaliser uniquement sur le premier, moins localisé, le second se limitant principalement à la Baie des Anges. De plus, un tsunami généré par un séisme apporte la particularité d'avoir un événement générateur potentiellement ressenti par les acteurs et la population. Ce dernier peut ainsi servir de signe précurseur à une évacuation spontanée.

La prévention du risque de tsunami dans les Alpes-Maritimes, et plus largement en France, commence à se développer mais reste largement incomplet. Si l'on reprend les différentes composantes de la prévention des risques (présentées en introduction de cette partie), plusieurs ont été abordées. La surveillance et l'alerte (b) des tsunamis sont existantes et elles s'avèrent efficace. D'autres commencent à intégrer le tsunami dans les réflexions comme les outils d'information à la population (c). D'autres encore ne le considèrent pas dans les réflexions globales, comme les plans d'aménagement et d'urbanisme (d).

La France se prépare à un événement, une crise, sans forcément en dissocier l'origine ; il n'y a donc pas de procédure spécifique pour le tsunami. Le fonctionnement de la gestion de la crise reste identique. Il n'existe à l'heure actuelle aucun plan, document, spécifique à la gestion du risque de tsunami à l'échelle nationale française. L'Etat n'a pas toujours les clés pour une bonne gestion de crise. Ceci marque un manque de préparation en amont et souligne que des évolutions et changements doivent avoir lieu. Ces éléments devront alors ressortir lors des bilans ou des Retex ;

ceci sous-entend qu'un évènement doit se produire afin de pouvoir s'adapter. Cela s'applique d'autant plus que la menace est rare et méconnue, comme c'est le cas pour le tsunami.

D'autres éléments doivent à présent être analysés afin de compléter cette liste, avec notamment la réalisation d'une étude de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque (a, e) de tsunami le long du littoral azuréen. De plus, les évènements historiques appuient la nécessité de la réalisation des travaux. C'est pourquoi une analyse de risque a été réalisée. Cette dernière passe par des analyses d'aléa, de vulnérabilité, toutes deux composantes du risque.

PARTIE II

L'ALEA TSUNAMI – DE LA COMPREHENSION DU PHENOMENE A SA CARTOGRAPHIE GRACE A L'UTILISATION DE MODELES NUMERIQUES

*« ... all models are approximations.
Essentially, all models are wrong, but some are usefull.
However, the approximate nature of the model
must always be born in mind...»*

George E. P. Box (1987)

INTRODUCTION DE LA PARTIE II

Les Alpes-Maritimes ont, par le passé, été impactées par des tsunamis par deux évènements majeurs dont un seul a été retenu dans le cadre de cette recherche, celui du 23 février 1887. Un évènement similaire est donc susceptible de se reproduire, frappant de nouveau ce territoire. Le territoire présentait une certaine vulnérabilité à l'époque, et apparaît aujourd'hui bien plus importante puisque ce dernier concentre de nombreux enjeux humains, économiques, stratégiques, etc., et qu'il est fortement attractif. Dans l'hypothèse de la survenue d'un tsunami les dégâts pourraient être considérables.

Il est donc primordial de comprendre cette menace, de l'étudier et de l'analyser. Pour se faire, l'aléa tsunami doit être présenté afin de comprendre son fonctionnement et ses particularités. L'analyse de l'aléa passe par la compréhension et la connaissance des potentielles sources tsunamigènes locales. Nous focalisant sur un tsunami d'origine co-sismique, avec comme évènement de référence celui du 23 février 1887, une analyse des travaux de nos prédécesseurs a été effectuée. Elle permet de situer l'avancée des travaux et des connaissances quant à la faille Ligure et à son fonctionnement.

Ceci passe également par l'utilisation de modèles numériques (ici le modèle *Funwave*) qui permettent de simuler et d'obtenir de la donnée continue le long du territoire. L'aléa est ainsi caractérisé par diverses données simulées numériquement comme les *runup*, l'emprise spatiale ou encore les courants. L'ensemble de ces données sont mobilisées pour établir une nouvelle échelle d'intensité de tsunami qui caractérise la menace à la fois grâce à des données physiques et à l'intégration de la vulnérabilité biophysique.

S'inscrivant dans une étude plus large, celle de l'étude du risque de tsunami sur le littoral azuréen, ces résultats seront par la suite mobilisés afin d'obtenir une cartographie du risque. Ce dernier, défini comme étant fonction de l'aléa et de la vulnérabilité, passe par deux analyses distinctes qui permettent d'étudier ces deux composantes. Ici, une focalisation est faite sur l'aléa tsunami. Une étude de la vulnérabilité territoriale est effectuée plus loin ([Partie III](#)), afin d'aboutir au risque de tsunami ([Partie IV](#)).

Cette partie focalisée sur l'aléa se décompose en cinq chapitres. Le premier ([Chapitre 5](#)) consiste en la présentation de l'aléa et de ses mécanismes. Le deuxième ([Chapitre 6](#)) s'intéresse à la caractérisation de la menace. Une nouvelle échelle d'intensité de tsunami est ainsi proposée. Un troisième chapitre ([Chapitre 7](#)) permet de faire le lien entre cette échelle d'intensité et l'aboutissement d'une analyse d'aléa plus globale, qu'il est possible d'intégrer à une étude de risque de tsunami ([Partie IV](#)). Les deux derniers chapitres ([Chapitre 8](#) et [9](#)) concernent la cartographie des résultats obtenus par l'application des méthodologies proposées.

CHAPITRE 5 : LE TSUNAMI, UN EVENEMENT EXTREME : DE L'OBSERVATION A SA CARACTERISATION

Le tsunami est un phénomène physique caractérisé par une série d'ondes qui se propagent à travers un océan, une mer ou un lac et dont les conséquences sur le littoral peuvent être dramatiques. Il existe de très nombreux témoignages écrits, et des traces géologiques qui montrent le caractère extrême, brutal et rapide d'un tsunami. Il n'en reste pas moins que son étude en terme d'aléas et de risques naturels est relativement récente.

Dans ce chapitre, l'objectif est, dans un premier temps, de décrire globalement l'aléa tsunami afin de mieux comprendre ses caractéristiques physiques. Puis, dans un deuxième temps, nous nous intéresserons aux sources de ce phénomène qui peuvent être variées. Enfin, dans un troisième temps, nous présenterons les différents outils d'observation de tsunamis.

1. Le tsunami, un aléa aux nombreuses particularités

Le tsunami est appelé aléa indirect car c'est un phénomène qui ne peut se former seul et qui trouve son origine dans différentes sources possibles. Celui-ci peut être généré par un séisme, un glissement de terrain (sous-marins ou subaériens), une éruption volcanique, un phénomène météorologique extrême ou plus exceptionnellement la chute d'objets spatiaux. Ces phénomènes entraînent le déplacement de l'ensemble de la colonne d'eau, du plancher océanique jusqu'à la surface, et qui se caractérise de ce fait par une grande longueur d'onde.

Des tsunamis surviennent chaque année dans le monde mais avec des effets extrêmement variés. La plupart d'entre eux passent le plus souvent inaperçus et ne sont détectables que par des outils appropriés, tels que les marégraphes. Les tsunamis sont recensés dans des bases de données ouvertes mondialement. A titre indicatif, d'après la base de données de la *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, à l'échelle mondiale, 13 événements ont été enregistrés en 2016, et 16 en 2017, 17 en 2018 et seulement 5 en 2019.

Ainsi, le tsunami le plus ancien reporté date de -1610 BC et correspond à une éruption volcanique sur l'île grecque de Santorin. La principale base de données existante, produite par la NOAA, débute par cette catastrophe. En France, la base de données de référence nationale a été construite par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Son catalogue français méditerranéen débute en 1564, avec un glissement sous-marin s'étant produit dans la baie des Anges, au large de Nice, faisant probablement suite au séisme de la Vésubie. Cette zone géographique correspond au terrain d'étude des travaux présentés ici.

Au cours de la dernière décennie, l'ensemble des côtes mondiales a connu un certain nombre d'événements extrêmes : Asie du Sud Est en 2004, 2006 à Sumatra, les îles Samoa en 2009, les côtes chiliennes en 2010 ou encore le Japon en 2011.

Ces derniers sont définis par [Décamps \(2007\)](#) comme étant des événements « *relativement rares en ampleur, en fréquence et/ou en durée pour un système donné, au cours d'une période déterminée – une période par rapport à laquelle il est relativement soudain.* ». Les événements extrêmes sont généralement à l'origine d'études et d'analyses, car, de par la désorganisation du territoire et les dégâts qu'ils occasionnent, ils intéressent chercheurs et politiques.

Ces catastrophes ont ainsi déclenché par leur ampleur une prise de conscience plus générale de cet aléa et du risque associé. Surveiller, analyser, modéliser, simuler, surveiller ces phénomènes sont devenus des actions concertées de recherche et de développement de la communauté scientifique et socio-économique à l'échelle internationale.

1.1. La notion de tsunami : les principales caractéristiques

Avant de parler des caractéristiques physiques des tsunamis, une précision sémantique est nécessaire : **tsunami** et **raz de marée** ne sont pas des synonymes. Les tsunamis sont inclus dans les raz de marée, mais l'inverse n'est pas le cas.

Le terme **raz de marée** est un terme générique. Il est défini par [Brunet \(1997\)](#) comme étant « *un soulèvement brutal du niveau de la mer, en une vague très haute et isolée déferlant sur le continent, et qui n'est précisément pas due aux marées* ». Il poursuit en précisant que ceux-ci peuvent provenir de deux sources : **météorologique**, via des tempêtes ou des ouragans, ou **géologique**, tel qu'un séisme ou un glissement de terrain. L'impact du raz de marée au niveau du littoral est une inondation des terres. Celle-ci varie en fonction des événements et surtout de la source de déclenchement.

Les **tsunamis** sont une des catégories de raz de marée. Ils désignent un phénomène à cinétique rapide, qui survient le plus souvent par effet de surprise. Pour la majorité d'entre eux, il s'agit d'un mouvement brutal de la masse d'eau, fruit du déplacement du plancher océanique lié à un séisme, ou à un déplacement brusque de masse solide importante, tels que des glissements ou des éruptions volcaniques.

Ce qui les différencie des autres types de submersion marine, comme les houles météorologiques, ou les marées de tempêtes, est la **source**. Dans le cas des tsunamis, un mouvement important du fond marin entraîne une déformation puis un déplacement de l'ensemble de la colonne d'eau, alors que, dans le cas des phénomènes météorologiques, seule la masse d'eau superficielle de l'océan est en mouvement, principalement à cause du vent.

Les masses d'eaux déplacées par un mouvement brusque vont générer une variation spatiale de la pression à la surface libre (gradient de pression). Ce gradient de pression va être équilibré par la force de gravité. Cela se traduit par un mouvement des particules d'eau. Ce mouvement va lui-même générer une onde marine de surface qui va se propager dans l'océan, le **tsunami** ([Airy, 1845](#)). Ces ondes se déplacent dans le bassin (il peut s'agir d'un océan, d'une mer, d'un lac, voire d'une baie), avant d'atteindre les zones littorales, pouvant ou non causer des dégâts humains et/ou matériels.

La quantité de volume d'eau mobilisée définit la plupart du temps la longueur d'onde des vagues générées. En effet, les évènements météorologiques génèrent des courtes longueurs d'ondes, de l'ordre du millimètre (vaguelettes de vent) à quelques centaines de mètres (la houle). A l'opposé, la longueur d'onde d'un tsunami peut varier de quelques kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres, bien supérieure à la profondeur des océans. Pour exemple la longueur d'onde du tsunami de Sumatra de 2004 était de l'ordre de 150 kilomètres à la génération (Ioualalen et coll., 2007a).

Pour les tsunamis de longue période, il existe une relation simple reliant la variabilité de l'amplitude de la vague à celle de la profondeur de la colonne d'eau (relation de Green). Il s'agit de l'effet de pente (*shoaling* en anglais) (Équation 3, Figure 33) :

$$a_2 \approx a_1 (h_1/h_2)^{1/4}$$

Équation 3 : Représentation de l'effet de pente

Ainsi, en s'approchant de la côte l'amplitude de la vague **augmente suivant une puissance de ¼** de l'épaisseur de la colonne d'eau. Prenons l'exemple d'un tsunami qui a été généré à la fosse par un séisme de subduction à une profondeur de colonne d'eau de 5 000 mètres et dont l'amplitude est de 1 mètre. Lorsque ce même tsunami atteint un port dont la profondeur d'eau est de 5 mètres, cette hauteur de vague sera multipliée par un facteur d'environ 5,6. Ainsi, un séisme qui sera généré près de la fosse en sera d'autant plus destructeur à la côte.

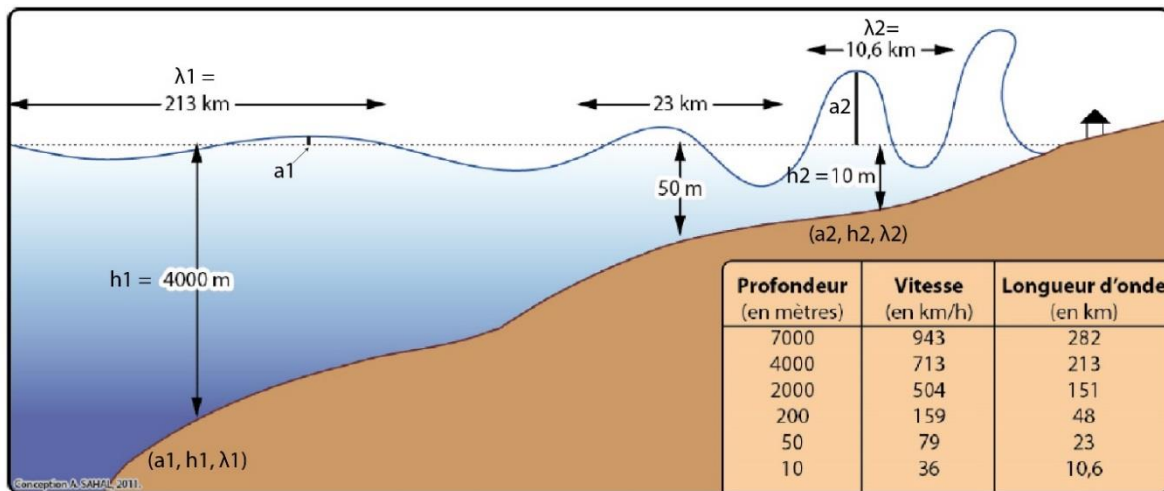


Figure 33 : Représentation schématique de l'effet de la profondeur de la colonne d'eau (h_1, h_2) sur les amplitudes (a_1, a_2) et longueurs d'onde (λ_1, λ_2) des tsunamis.

En ce qui concerne, la longueur d'onde d'un tsunami, elle **diminue suivant une puissance de ½** de l'épaisseur de la colonne d'eau (Équation 4, Figure 33) :

$$\lambda_2 \approx \lambda_1 (h_2/h_1)^{1/2}$$

Équation 4 : Lien entre la longueur d'onde et l'épaisseur de la colonne d'eau

Considérant les grandes longueurs d'onde des tsunamis à leur génération, celles-ci demeurent importantes (plusieurs kms) en zone côtière. Ainsi, le potentiel d'inondation est plus important pour un tsunami que pour une vague de longueur d'onde bien moindre. Cela s'explique par la nature des trajectoires des particules d'eau de ces ondes : en effet ces trajectoires sont circulaires pour les ondes courtes et elliptiques pour les ondes longues (Airy, 1845). Les ondes tsunamis étant très longues, les trajectoires des particules d'eau sont des ellipses très aplaties, presque horizontales (Figure 34).

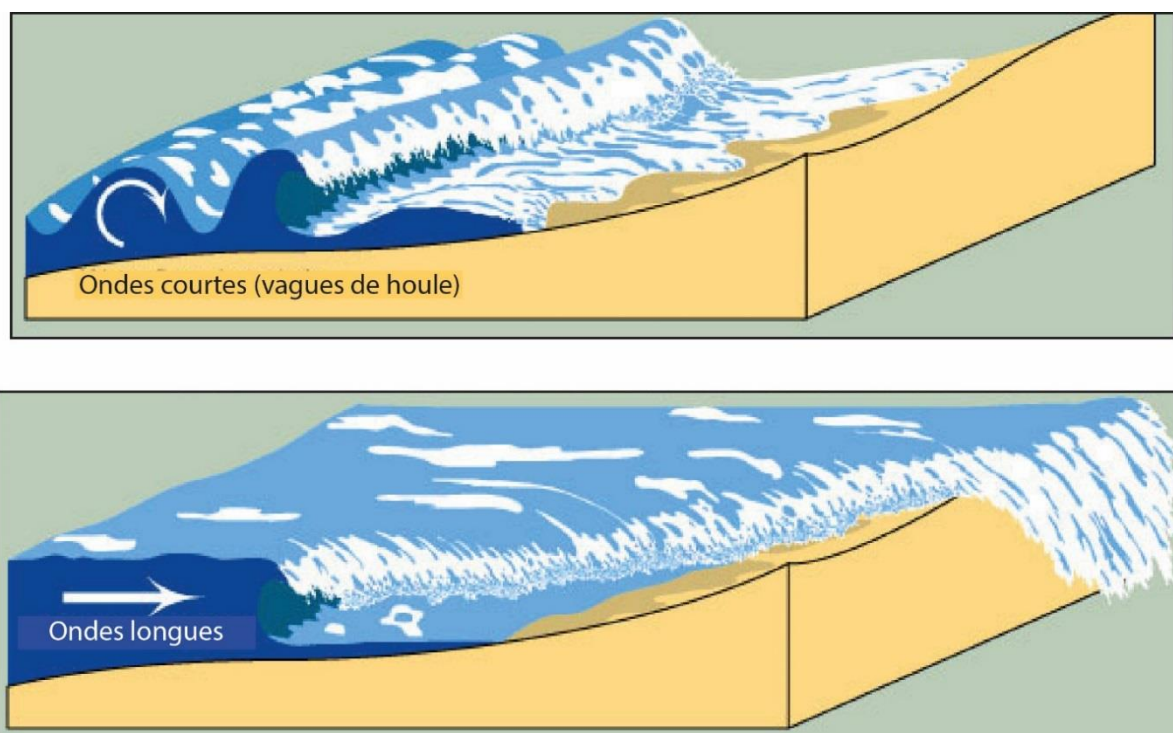


Figure 34 : Représentation schématique du comportement des ondes courtes et longues en milieu côtier : déferlement pour les ondes courtes avec trajectoires circulaires des particules d'eau et inondation pour les ondes longues avec trajectoires elliptiques des particules d'eau.

En pleine mer, les ondes de tsunamis de périodes suffisamment longues, typiquement une dizaine de minutes, se propagent à une très grande vitesse qui est fonction de la seule profondeur d'eau h . Celle-ci est approchée par (Équation 5) :

$$v \simeq (gh)^{1/2}$$

Équation 5 : Représentation de la vitesse

où g représente l'accélération de la pesanteur (9,81) et h l'épaisseur de la colonne d'eau (Figure 33).

Les ondes longues sont conservatives c'est-à-dire qu'elles perdent très peu de leur énergie par dissipation visqueuse du fait de la faible friction en milieu aquatique

(transformation d'énergie mécanique en chaleur due au frottement moléculaire). Et ce d'autant plus que ces ondes peuvent être très rapides en eau profonde (Figure 33). Ainsi, un tsunami peut traverser tout un bassin, tel que l'océan Pacifique, sans perdre de manière significative de son énergie. Par ailleurs, et du fait de la relation entre la vitesse et la profondeur de la colonne d'eau, l'heure d'arrivée d'un tsunami sur les différentes côtes qui entourent cet océan, cette mer, est prévisible puisque leur bathymétrie est généralement bien connue.

Lors du tsunami du 26 décembre 2004 de l'océan indien, qui a principalement impacté l'île de Sumatra (Indonésie), les premières vagues ont atteint les côtes indonésiennes en moins d'une demi-heure (Figure 35). L'ensemble de l'océan Indien a été impacté, avec des délais d'arrivée au rivage dépendant de l'éloignement de l'épicentre du séisme. Le Sri Lanka a été touché en deux heures, l'Inde en deux heures trente, l'Australie en cinq heures et Madagascar en huit heures (URD).

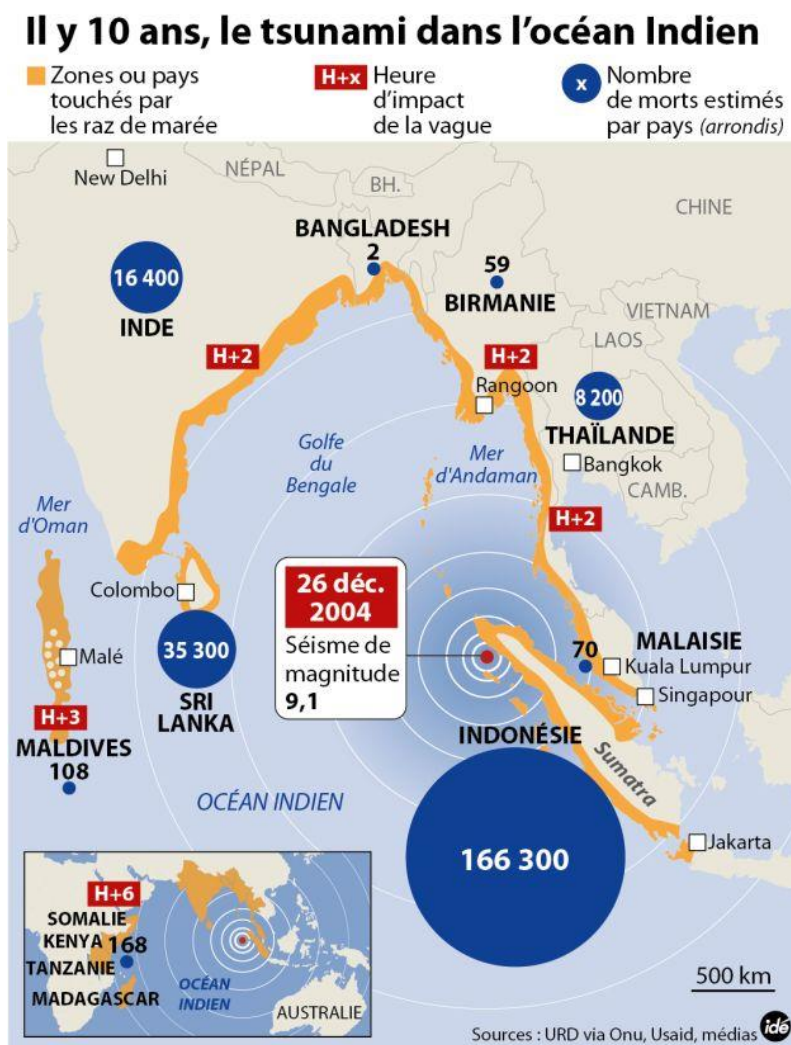


Figure 35 : Carte des pays impactés par le tsunami du 26 décembre 2004, ainsi que le temps de propagation le nombre de mort par pays (Source : URD via ONU, Usais, médias Ide)

Lors de ces **tsunamis distants** (télé-tsunamis) les délais d'arrivée permettent aux autorités et donc aux populations de se préparer à l'évènement. Dans le cadre de cette thèse, nous nous focaliserons sur des **tsunamis de champ proche** (tsunamis locaux) qui nécessitent une préparation au préalable car les systèmes d'alerte ne sont que partiellement efficaces. Dans les deux cas, certains signes annonciateurs (mouvement de retrait de la mer avant l'inondation par exemple), s'ils sont connus, peuvent faciliter l'auto-évacuation et permettre aux populations de se mettre en sécurité, d'où l'importance de l'éducation aux risques naturels, et la connaissance du territoire.

1.2. Le tsunami, des généralités de fonctionnement aux particularités spatiales

Le déroulement d'un tsunami peut généralement se décomposer en quatre phases :

- **la source**, à l'origine du déplacement de la masse d'eau (séisme, glissement sous-marin, volcan) génératrice d'ondes ;
- **la propagation** des ondes marines dans le bassin,
- **le retrait** de la mer et l'inondation de la côte, ou inversement, l'inondation puis le retrait, suivant le type de faille et l'orientation par rapport au littoral ;
- et enfin le **retour à la normale**, laissant apparaître les dégâts occasionnés.

Chaque tsunami est particulier car son origine est variable. Comme nous venons de le décrire, c'est un aléa dont l'origine est dite indirecte car il ne peut se former seul. Pour se produire, il a besoin de l'occurrence d'un premier aléa : sismique, gravitaire ou volcanique. Cela en fait donc un évènement difficilement prévisible car ces trois aléas générateurs le sont également.

En région Ligure, terrain d'étude de ces travaux, les phénomènes gravitaires (glissements sous-marins) sont plutôt localisés bien que pouvant atteindre quelques kilomètres cubes (Ioualalen et coll., 2010a ; Hassoun, 2014 ; Kelner, 2018). Pour le cas des séismes Ligure, les zones de ruptures sont relativement restreintes et variables dans l'espace (Ioualalen et coll., 2014 ; Larroque et coll. 2012). Il est donc hasardeux de déterminer si un point donné de la côte subira d'abord un retrait ou une inondation.

Pour chaque tsunami, la distribution spatiale des hauteurs de vagues n'est pas uniforme. Certaines géométries locales (effets de site) telles que les baies, les zones confinées (ports), les avancées de terres (caps) contribuent à modifier l'amplitude des vagues (amplification ou atténuation) tandis que le *shoaling* opère de manière uniforme. Ces effets de site sont principalement : les amplifications de vagues dues au phénomène de focalisation et aux résonances de baies.

- **La focalisation**

L'expression de la vitesse d'un tsunami (Équation 5) indique qu'une ligne isobathe² est aussi une ligne d'iso-vitesse de vague, il s'agit du phénomène de **réfraction** : les crêtes des vagues épousent les lignes isobathes. Ainsi, si on suppose

² Courbe d'égale profondeur, de même niveau bathymétrique

que le trait de côte est aligné avec les isobathes, la vague va se concentrer au voisinage des caps (focalisation) et s'amplifier. A l'opposé, au voisinage des baies ouvertes, la vague va diverger, se défocaliser, et finalement s'atténuer (Figure 36). En mer Ligure les caps sont nombreux : Cap d'Antibes, Cap de Nice, Cap Ferrat. Le littoral est également constitué de plusieurs baies ouvertes : baie de Nice, baie de Villeneuve-Loubet, baie de Cannes.

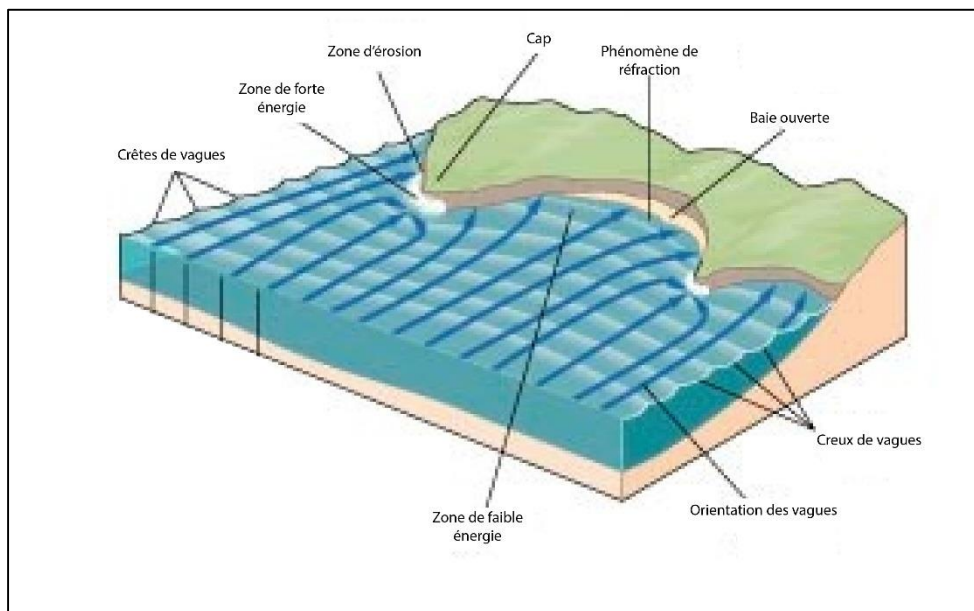


Figure 36 : Représentation schématique du phénomène de réfraction/focalisation.

- Les résonances de baie

Toute baie a sa propre géométrie (extension, courbures, profondeurs de l'eau) et donc sa propre fréquence d'oscillation qui constitue la fréquence de résonance de la baie. La surface marine étant un oscillateur naturel (Airy, 1845), toute perturbation de celle-ci va générer une vague qui va s'estomper avec le temps sous les effets dissipatifs (frottements moléculaires, frictions au fond). Cependant, lorsque cette perturbation a la même fréquence que la fréquence de résonance de la baie, **la vague va entrer en résonance** et conduire à son **amplification**.

Lors de l'arrivée d'un tsunami sur le littoral, quatre grandeurs peuvent caractériser l'impact de celui-ci (Figure 37, Figure 38) : son *runup*, sa profondeur d'inondation, la grandeur Z_{max} et la hauteur H_{max} . Le *runup* est le point à terre de plus haute altitude qui a été inondé. La combinaison de l'ensemble des runup permet de tracer une ligne d'inondation globale. La **profondeur d'inondation** est la position la plus éloignée du trait de côte qui a été inondée. Le runup correspond à une hauteur alors que la profondeur d'inondation correspond à une distance à la côte. Si l'on dispose de la topographie, en ayant l'une de ces deux composantes il est possible de retrouver la seconde.

Le Z_{max} (Figure 37) est une valeur obtenue numériquement. Elle englobe l'ensemble de la zone impactée par un tsunami, en mer et à terre. Il s'agit de l'élévation maximale de la vague vs. le niveau de la mer au repos, durant le temps de propagation.

A terre, cette valeur est la somme de l'altitude et de la hauteur d'inondation (***Hmax***). ***Zmax*** est équivalent au *runup* lorsque la hauteur de vague est nulle (zone délimitant l'inondation) et ***Zmax*** équivaut à ***Hmax*** à la limite terre-mer et en mer.

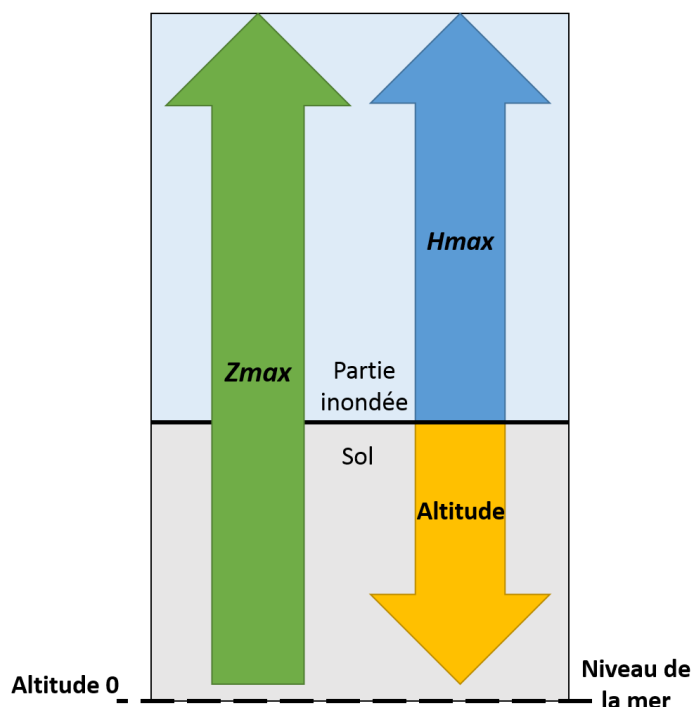


Figure 37 : Graphique explicatif de la différence entre les hauteurs ***Zmax*** et ***Hmax***

La hauteur ***Hmax*** (Figure 37, Figure 38) correspond, en mer, à l'amplitude maximale de la vague, et à terre, à la hauteur d'inondation. Elle est rarement retenue dans les études et dans les observations car on en voit rarement la trace à terre, à l'inverse du *runup*, qui lui est absolument simple à observer et à mesurer puisqu'il s'agit du dernier point inondé.

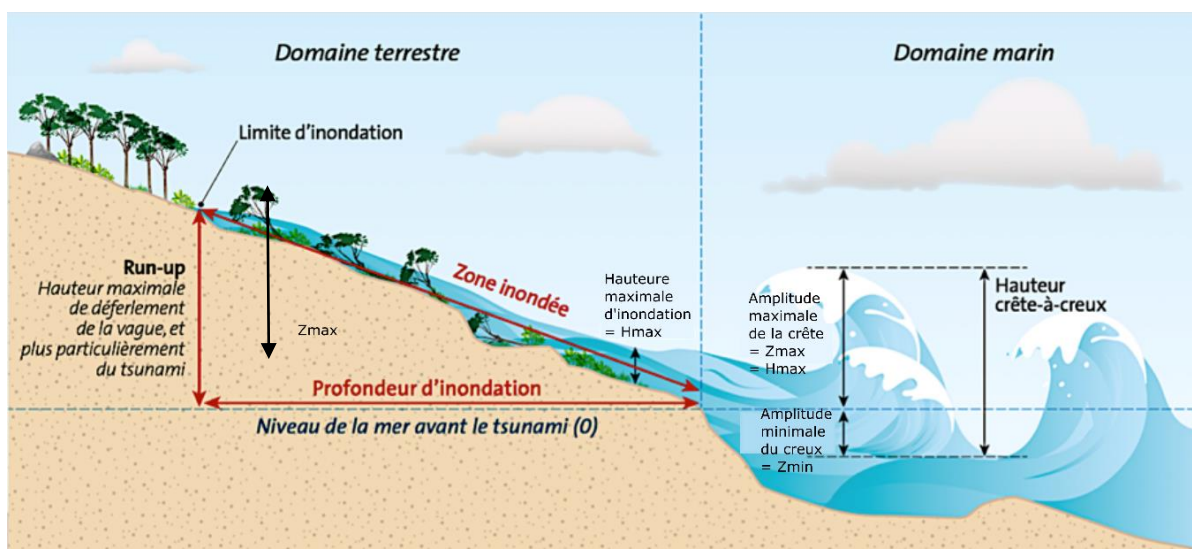


Figure 38 : Caractéristiques techniques du tsunami au moment de l'inondation
(Source : Lambert et coll., 2013)

Comme précisé précédemment, les tsunamis sont générés par des mouvements brusques de la masse d'eau. Ces derniers peuvent être classés en différents types en fonction de différents facteurs. Les tsunamis vont à présent être pris sous l'angle de leur source génératrice.

2. Des sources diverses de tsunamis à l'origine d'une inégale répartition

Les tsunamis sont des phénomènes qui ne peuvent s'auto-générer ; ils sont déclenchés par d'autres évènements tels que les séismes, les éruptions volcaniques, les glissements de terrain à terre ou en mer, les chutes de météorites (ces dernières n'ayant pour l'heure jamais été répertoriées), ou encore anthropiques avec par exemple des essais ou des lancements nucléaires sous-marins. Les tsunamis se forment dans des bassins aquatiques pouvant aller des lacs aux océans, en passant par des fjords et des mers intérieures. Du fait de la diversité des origines des tsunamis, leur répartition est inégale à l'échelle mondiale.

2.1. Le tsunami, des origines variées

La répartition des tsunamis à l'échelle mondiale peut se faire au regard de l'origine des tsunamis, ou de leur localisation (Chapitre 1). Ici, les tsunamis sont présentés à partir de leur aléa d'origine (Figure 39), c'est-à-dire selon que le tsunami a été généré par un séisme, un évènement gravitaire, ou encore des chaînes d'aléas plus complexes.

La grande majorité des tsunamis sont d'origine sismique (Figure 39) et représentent à eux seuls 81% des tsunamis générés (NOAA, 2019). Ceux-ci sont principalement situés aux limites des plaques tectoniques. On les retrouve ainsi en bordure de l'océan Pacifique, zone dans laquelle sont enregistrés les séismes les plus importants, aux Caraïbes, en Asie du Sud-Est, ainsi qu'en Europe et plus particulièrement en Méditerranée.

Les tsunamis générés par des éruptions volcaniques sont en revanche beaucoup plus rares et ne représentent que 5% des évènements. Ils se retrouvent également aux limites de plaques. Ceux-ci se situent principalement en Asie du Sud-Est, avec la présence de nombreux volcans destructeurs, comme en Indonésie, avec l'éruption du Krakatoa en 1883, qui fut l'un des tsunamis les plus destructeurs et les plus meurtriers. Nous pouvons également citer l'éruption du Santorin ~ -1610 avant J.C, et qui a été un des évènements majeurs en Méditerranée.

Certains tsunamis sont encore plus complexes à étudier car ils sont générés par des enchaînements d'aléas. Ainsi, les glissements de terrains (subaériens ou aquatiques), générateurs de tsunamis, sont eux-mêmes généralement déclenchés par des évènements brutaux tels que des tremblements de terre. Cette catégorie représente environ 6 % des évènements. Plus rarement, pour environ 4 % des cas, les glissements sont induits par des processus plus lents. On pense notamment à la déstabilisation de versant due à l'érosion ou à de fortes pluies. Ces derniers se

retrouvent principalement le long des côtes nord-américaines, dans les fiords scandinaves et en Méditerranée.

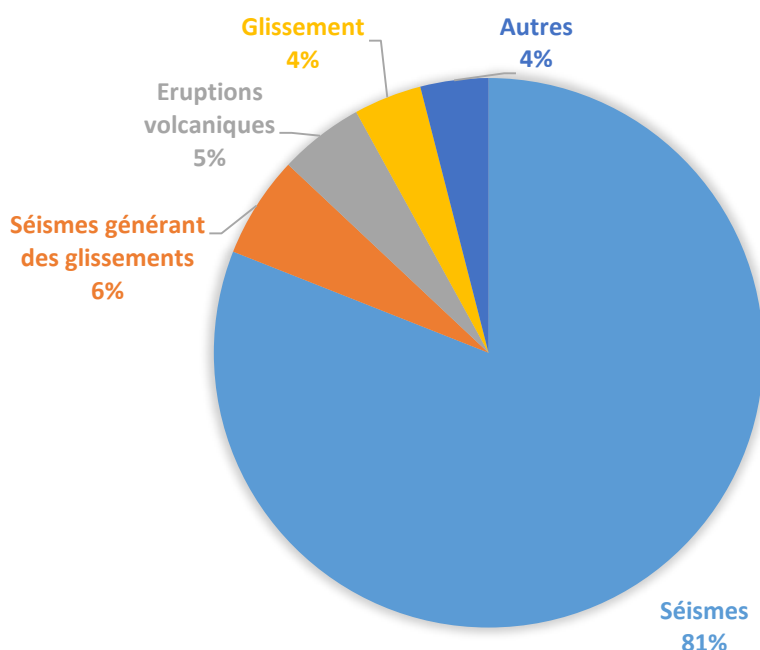


Figure 39 : Répartition des aléas sources générateurs de tsunamis
(Sources : NOAA, 2019)

La localisation globale des tsunamis étant posée, nous allons à présent nous focaliser sur les sources particulières qui sont génératrices de tsunamis et sur leurs particularités.

2.2. Les tsunamis d'origine sismique, des impacts sur de vastes étendues

La grande majorité des tsunamis générés à l'échelle du globe sont d'origine co-sismique. Ils sont dans la plupart des cas localisés à la frontière des plaques tectoniques ou sur les failles actives, zones particulièrement sismiques et pouvant générer des séismes d'une magnitude suffisante à la formation d'un tsunami. Lors des mouvements tectoniques, une partie de ceux-ci correspond à un pur glissement d'une plaque par rapport à l'autre, le résiduel du mouvement étant un blocage. Ce processus de blocage induit une accumulation de contraintes qui lorsqu'elle dépasse le seuil de résistance des roches qui la composent génère le séisme, libérant une partie de l'énergie accumulée durant le mouvement asismique.

Cette fracturation va créer des ondes sismiques qui déforment le plancher océanique, qui à son tour déplace la masse d'eau le surplombant. Cette déformation et ce déplacement seront d'autant plus importants que la faille affleure le plancher océanique et crée un escarpement. Pour qu'un tsunami significatif se produise, il faut généralement un séisme d'une magnitude supérieure à $M_w=6.5$. Avant d'aller plus loin

dans la description de ce type de tsunami, il nous apparaît important de rappeler quels sont les différents types de failles et leurs caractéristiques.

2.2.1. Les différents types de failles et leur caractérisation

Pour comprendre l'origine des séismes, il convient de rappeler les différents types de failles. Une multitude de paramètres s'ajoutent afin de les définir au mieux et ainsi caractériser un séisme.

Considérons deux blocs se chevauchant, le bloc du dessus se déplaçant vers le haut par rapport au bloc du dessous. Sur le plan vertical, si l'on considère la composante horizontale du vecteur « déplacement » (mouvement relatif des deux blocs), une **faille normale** générera une **extension** (écartement des deux blocs, Figure 40 1a), tandis qu'une **faille inverse** générera une **compression** (rapprochement des deux blocs, Figure 40 1b).

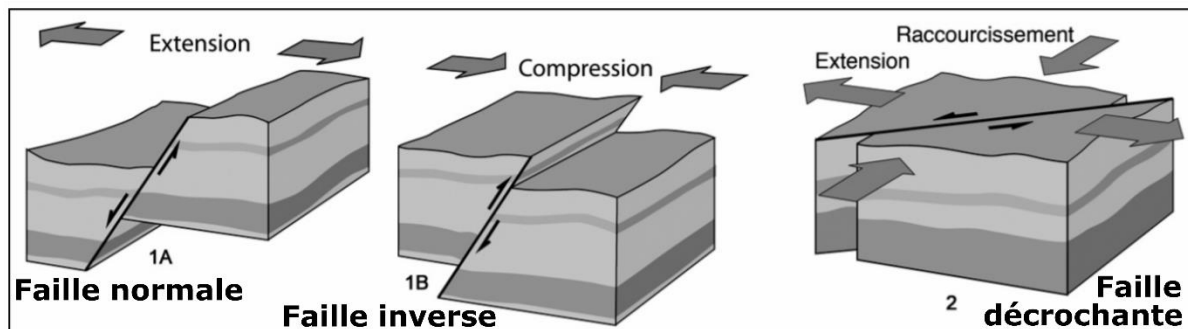


Figure 40 : Représentation schématique des différents types de failles, faille inverse, faille normale et faille décrochante.

A cela s'ajoute généralement une composante latérale du vecteur « déplacement » (s'écartant du plan vertical). Celle-ci est l'expression du **décrochement**. Il est dit « dextre » lorsque la composante est orientée vers la droite et « sénestre » vers la gauche. Lorsque la composante latérale est nulle (pas de décrochement) on parlera d'un mouvement en *pure thrust*, et quand le mouvement total se réduit uniquement à une composante latérale, on parle de cisaillement pur (*pure strike*, en anglais) (Figure 40 2).

La rupture peut se définir par plusieurs paramètres, suivant la représentation d'Okada (1985) représentés sur la Figure 42 :

- **L'azimut** (*strike angle* en anglais - Φ), représente l'orientation de la faille par rapport au nord ;
- **Le pendage** (*dip angle* en anglais - δ), correspond à l'angle de la faille par rapport au plan horizontal. Lorsque le pendage a un angle compris entre 0 et 90 degrés, nous sommes dans le cas d'une faille inverse et lorsque le pendage est compris entre 90 et 180 degrés, il s'agira d'une faille normale ;
- **Le décrochement** (*rake angle* en anglais - λ), représente la composante latérale du vecteur déplacement ;

- **La quantité de déplacement** (*slip* en anglais - Δ), est le déplacement relatif d'un bloc par rapport à l'autre (on l'exprime en mètres) ;
- **La longueur et la largeur** de la faille (L ; W) ;
- **La profondeur focale** (d_0), la profondeur de l'épicentre du séisme ;
- **Le centroïde** (x_0 ; y_0), correspondant aux coordonnées géographiques du centroïde du plan de faille.

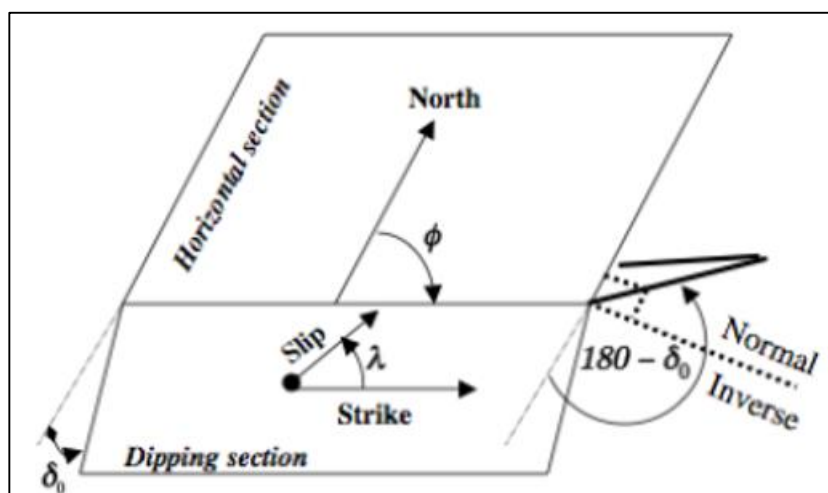


Figure 41 : Représentation schématique des paramètres physiques permettant la caractérisation d'un séisme

Cette description rapide du fonctionnement des failles et de la caractérisation des paramètres physiques d'un séisme seront nécessaires à la compréhension de la modélisation de tsunami décrite dans le [Chapitre 7](#). Pour sortir de l'aspect physique, nous allons à présent illustrer nos propos avec la présentation d'exemples de tsunamis d'origine sismique s'étant produits à divers endroits du globe.

2.2.2. Quelques exemples de tsunamis sismiques à l'échelle du globe

Quel que soit le type de faille, un séisme puissant (généralement supérieur à une magnitude de $M_w = 6.5$) et peu profond (moins de 50 km de profondeur) (CENALT) et qui se produit en mer, peut générer un tsunami. C'est le cas des événements qui se sont produits récemment, avec notamment le séisme de 2004 à Sumatra et celui de 2011 au Japon. La [Figure 42](#) montre la zone d'inondation générée par le tsunami du 26 décembre 2004. Cet événement extrême a été largement étudié par les diverses communautés scientifiques (géologues, physiciens, géographes, économistes, etc.).

De nombreux travaux ont été réalisés, aussi bien sur l'aléa physique, avec la compréhension des mécanismes sismiques et du tsunami associé (Chlieh et coll., 2007 ; Choi et coll., 2006 ; Ioualalen et coll., 2007a), qu'en sciences humaines, avec les différents dégâts ayant pu être occasionnés (Ozer et De Longueville, 2005 ; Lavigne et coll., 2009 ; Gomez et coll., 2010).

La Méditerranée présente également des événements sismiques marquants. En Méditerranée occidentale, deux failles sont connues comme ayant été génératrices de tsunamis dans le passé. Il s'agit de la **marge algérienne**, responsable du séisme

de Boumerdes du 21 mai 2003. Plus près de nous, bien que de moindre impact, la **zone Ligure** est aussi une zone sismogène et tsunamigène récurrente (séisme et tsunami du 23 février 1887, de magnitude $M_w = 6.7-6.9$, loulalen et coll. 2014). On notera toutefois, que des *runup* bien moins spectaculaires que ceux de Banda Aceh, s'ils se produisent sur des côtes fortement peuplées, comme la Côte-d'Azur, pourraient suffire à générer des dégâts importants.

Banda Aceh, nord de Sumatra, avant et après le tsunami
(les 23 juin et 28 décembre 2004)



Figure 42 : image satellite de Banda Aceh avant le tsunami du 26 décembre 2004 (image Quickbird prise le 23 juin 2004) et image satellite de Banda Aceh prise à la suite du tsunami (image Quickbird prise le 28 décembre 2004)
(Source : Gomez et coll., 2010)

La Méditerranée est un territoire qui présente un aléa modéré, mais qui présente de nombreux enjeux. Les littoraux sont densément peuplés, les populations sont peu sensibilisées et donc peu préparées à ce phénomène ; c'est pourquoi il est important d'étudier cette région. Ce travail de recherche part donc de ce constat, pour se focaliser non pas sur l'ensemble du bassin Méditerranéen mais sur les Alpes-Maritimes.

La source sismique est le cas le plus commun de formation d'un tsunami, mais d'autres aléas peuvent être à l'origine de ceux-ci, comme par exemple les phénomènes gravitaires.

2.3. Les tsunamis d'origine gravitaire, des impacts locaux

Les glissements de terrain sont également générateurs de tsunamis. Il peut s'agir d'un glissement **subaérien**, c'est-à-dire qu'une surface émergée s'effondre ou glisse dans le bassin, ou de glissement sous-marin, c'est-à-dire le glissement d'un bloc déjà immergé. Ceci inclut également les éruptions volcaniques.

A terre, les déstabilisations de versant, c'est-à-dire l'effondrement d'un pan de montagne, d'une partie de versant, d'une falaise sont notamment liées à l'érosion (hydrique, éolienne, etc.). L'apport rapide d'un gros volume de matière solide dans l'eau entraîne un déplacement de masse d'eau équivalente, qui peut se traduire sous forme d'onde tsunami. Les dégâts varient en fonction du territoire et de l'anthropisation de celui-ci. Ils peuvent être considérables si un tel évènement vient à se produire à proximité immédiate d'un territoire anthropisé.

En mer, des glissements peuvent également se produire, il s'agit alors de glissements sous-marin. Les fonds marins sont semblables aux reliefs terrestres, et lorsqu'un versant est fragilisé (de par la présence de nappes phréatiques, de gaz, de courant marin, ou de terminaison d'estuaire de fleuves), il peut s'effondrer. Si la masse déplacée est suffisamment importante et que le mouvement est suffisamment rapide, un tsunami peut alors être généré. Sous la surface, les mécanismes sont plus difficiles à étudier notamment par la difficulté d'observation et de réalisation de mesures qui nécessitent des campagnes en mer et des carottages.

Le 13 octobre 1979, à 13h57 heure locale, lors des travaux de la construction du nouveau port de Nice, le long de l'aéroport de Nice Côte d'Azur et en extension vers la mer, une grande quantité de matière sous-marine a glissé, entraînant une partie de ce nouveau port en construction. Un tsunami a ainsi été généré dans la baie des Anges, ayant des conséquences importantes (Figure 43) principalement au niveau du cap d'Antibes, et plus particulièrement dans le quartier de la Salis. Cette catastrophe a d'ailleurs été retenue comme étant l'un de nos évènements historiques de la zone d'étude de ces travaux et a été présenté au Chapitre 2.



Figure 43 : Photographie de bateaux échoués sur la digue du port de la Salis suite au tsunami du 16 octobre 1979
(Source : Nice Matin, 2009)

Bien que moins fréquents et moins étendus spatialement, ces phénomènes d'origine gravitaire peuvent avoir des conséquences dramatiques, et correspondent aux évènements les plus destructeurs localement (Sahal 2011). Le déplacement d'eau généré n'est en effet pas suffisant pour se propager sur de grandes distances, et est souvent limité aux baies.

Les tsunamis ont donc des sources diverses et chaque évènement présente des particularités qui lui sont propres, que ce soit au niveau de la géographie du site (bathymétrie, topographie, etc.), de l'urbanisation de ses littoraux, ou encore de la connaissance que peut avoir la population sur ce type d'évènement. Les généralités qui viennent d'être présentées permettent d'avoir de bonnes connaissances au niveau de la physique du phénomène. Nous nous interrogeons à présent sur les différents outils d'observation de tsunami.

3. Les outils d'observation et d'enregistrement des tsunamis

La détection précoce de l'aléa tsunami est indispensable à la mise en place d'un système d'alerte. Trois outils principaux sont indispensables à la surveillance de ce dernier : les sismographes, les tsunamimètres et les marégraphes.

Les **sismographes** ne sont pas en charge de mesurer directement des tsunamis, mais enregistrent les mouvements du sol se produisant à terre ou en mer, associés notamment aux ondes sismiques (temps d'arrivée et formes) (Péroche, 2016). A partir des données récoltées et transmises en temps réel, il est possible de déterminer la capacité tsunamigène du séisme qui vient de se produire. En effet, des observatoires ont en charge l'analyse de ces données et vont permettre d'obtenir les principaux paramètres sismiques de l'évènement (localisation de l'épicentre, magnitude, profondeur focale, mécanisme au foyer, etc.) (Péroche, 2016).

A la suite de cela, si le séisme en mer est considéré comme étant susceptible de générer un tsunami, des alertes pourront être données aux pays concernés par les zones pouvant être impactées. Cet outil s'utilise uniquement pour les séismes et ne peut donc permettre d'observer la génération d'un tsunami ayant une origine différente (gravitaire, volcanique, ou chute de météorite).

Ces observatoires sont principalement nationaux, avec par exemple l'observatoire GEOSCOPE pour le réseau français. Il est toutefois important de noter que la quasi-totalité de ces stations sont localisées à terre et non en mer, et ne peuvent donc pas remplir ce rôle. Les laboratoires de recherche peuvent également avoir cette fonction, comme le laboratoire Geoazur. Celui-ci est en contact direct avec la Préfecture de Nice et le Conseil Départemental des Alpes Maritimes afin de leur transmettre toute information en lien avec la sismicité locale. Nous pouvons donc supposer que dans le cas d'un séisme dans le bassin Ligure ce laboratoire serait le principal interlocuteur avec les institutions en ce qui concerne l'aléa. Il n'est toutefois pas en mesure de lancer une alerte tsunami puisqu'en France seul le CENALT³ est en charge de cela.

³ CENtre d'Alerte aux Tsunamis

Les **tsunamimètres**, localisés en mer, ont pour but de détecter les variations des grandes longueurs d'ondes au large, caractéristiques des tsunamis. Il s'agit de capteurs de pression placés au fond de l'océan, qui mesurent les écarts de pression qui se produisent. Ils sont ainsi en capacité de mesurer des vagues de très faibles amplitudes (quelques centimètres) caractéristiques des tsunamis lorsque ceux-ci sont en eaux profondes. Ces informations sont ensuite transmises (via des câbles directement reliés à la côte ou des bouées satellites) et traitées par des observatoires. La chaîne d'observation est complète et une alerte est alors possible en cas d'évènement important, suffisamment lointain pour que le traitement puisse être réalisé.

Les tsunamimètres présentent l'intérêt de pouvoir mesurer tout type de vagues, quelle que soit leur origine. Ils se présentent sous deux formes :

- Ceux reliés par des câbles sous-marin, relativement proches des côtes pour des raisons techniques, limitant ainsi l'analyse suffisamment en amont de la situation et donc l'alerte.
- Ceux reliés par satellites via des bouées, les bouées DART® (Figure 44), centrées dans le Pacifique.



Figure 44 : Photographie d'une bouée DART®
(Source : EDUMED ; Crédit photo NCAA)

Dans les deux cas, l'information est transmise en temps quasi réel, arrivant rapidement au centre d'alerte concerné, qui traite l'information et au besoin lance l'alerte. Dans le cas de tsunamimètres reliés par câbles, ceux-ci étant installés plus proches de la côte que les bouées, nous pouvons supposer que l'alerte n'aurait pas le temps d'être donnée, ou du moins pas de manière efficace, c'est-à-dire arrivant difficilement jusqu'à la population. Les données seraient donc utiles pour des analyses post-évènement, mais pas en tant qu'outil d'alerte permettant la mise en sécurité de la population. L'avantage de cet outil est qu'il permet de prendre en considération les tsunamis de toutes origines, et pas seulement ceux d'origine sismique, comme peut le faire le sismographe.

Le **marégraphe** est quant à lui davantage un outil d'information et d'observation post-évènement, puisqu'il enregistre les variations du niveau marin par rapport au littoral (principalement dans les ports). Il ne permet donc pas de donner l'alerte en cas de tsunami. Il est en revanche d'une grande utilité pour obtenir des données sur les différences de vagues qui ont pu être observées, ainsi que leurs périodes. Il faut cependant que les marégraphes soient en capacité de prendre des mesures régulières, permettant de justement observer ces variations. Si ces marégraphes sont

reliés à un satellite, il est alors possible de suivre l'évolution de l'évènement en temps réel. Il est intéressant car il permet de mesurer un tsunami, quel que soit sa source, qu'il ne sera cependant pas en mesure de définir.

Comme nous l'avons vu, de nombreux outils techniques permettent l'observation des tsunamis. Il est toutefois important d'ajouter, en plus des éléments techniques et technologiques, les ressources humaines, c'est-à-dire l'ensemble de chercheurs et ingénieurs qui collaborent sur cette problématique. De nombreuses personnes s'interrogent sur les mécanismes, sur les outils de mesure, sur les dégâts pouvant être occasionnés au niveau des côtes, ou encore sur l'évacuation des populations et la gestion de crise. Ce sont elles qui permettent les avancées techniques et l'amélioration des connaissances dans ce domaine. Cela étant possible uniquement grâce à l'implication des acteurs locaux, qui se questionnent et se sentent concernés par ces problématiques. Sans impulsion de leur part et sans collaboration, les études et analyses restent superficielles et ne prennent pas en compte l'ensemble de la chaîne, c'est-à-dire de l'analyse de l'aléa à la gestion de crise, en passant par l'alerte.

Pour les tsunamis générés par un séisme, comme cela est le cas dans cette étude, l'ensemble de ces outils permet une détection suffisamment en amont pour déclencher une alerte, et/ou une observation à posteriori. Dans le cas de tsunami ayant une autre source, la quasi-totalité fonctionnent, à l'exception du sismographe. Quelle que soit la source, les tsunamis locaux ne peuvent bénéficier de ces outils pour alerter la population, car les délais sont trop courts pour que cette dernière soit mise en place et soit efficace.

Ces outils permettent à la fois l'observation, l'apport de connaissance et également dans certains cas, l'alerte des tsunamis. Les données récoltées sont toutefois parsemées le long des côtes. Or, pour la réalisation d'études sur l'ensemble d'un territoire, des données (de *runup*, de courant, d'emprise spatiale, etc.) en nombre sont nécessaires. La modélisation numérique est une des solutions pour palier à ce problème.

4. Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de se focaliser sur le tsunami, de le définir et de faire ressortir ses particularités. Il était important de comprendre les différents mécanismes qui régissent un tsunami, afin d'adapter les réflexions sur son arrivée à la côte et potentiellement mettre en place des outils de surveillance et d'alerte. Ceux-ci fonctionnent pour les évènements « lents » comme les ouragans, certains types d'inondations ou les périodes de canicules. A l'heure actuelle, peu d'outils permettent de détecter les phénomènes brutaux comme les séismes et les tsunamis associés. C'est pourquoi il est important d'agir sur la connaissance des populations.

Ne pouvant s'auto-générer, le tsunami dépend de la survenue d'un premier aléa. De sources variées, l'étendue de sa propagation varie selon la puissance de l'évènement générateur. La plus grande majorité des tsunamis générés fait suite à un séisme. Ils peuvent également avoir des origines gravitaires. Une chaîne d'évènements est ainsi créée. Dans le cadre de cette recherche, nous nous focalisons uniquement sur le bassin Ligurie, ainsi que sur les séismes d'origine cosismique.

CHAPITRE 6 : PROPOSITION D'UNE NOUVELLE ECHELLE D'INTENSITE DE TSUNAMI

Les tsunamis sont des évènements difficilement observables puisqu'ils se produisent de manière brutale et sur des espaces diffus, de l'échelle d'une baie à l'échelle d'un océan. Il est donc difficile d'obtenir des données, leur caractérisation s'avère ainsi difficile. Afin de réaliser des études et des analyses scientifiques, il est souvent nécessaire d'avoir recours à la classification. Celle-ci permet de classer, de comparer, selon différents critères définis en amont, l'élément étudié. Les aléas naturels n'échappent pas à cette généralité.

Ils peuvent être organisés selon la puissance du phénomène, selon leurs impacts, selon le nombre de victimes, etc. Généralement, un tsunami est caractérisé et comparé par son *runup*, c'est-à-dire la plus haute altitude atteinte. Il s'agit de la donnée la plus facilement observable puisqu'elle correspond à la limite de l'inondation. Cette information est cependant incomplète puisqu'elle se focalise uniquement sur un aspect du tsunami : le point à terre de plus haute altitude qui a été inondé. Une autre information, l'éloignement à la source permet au National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de proposer sa propre typologie ([Chapitre 1](#)).

Ici nous allons nous focaliser sur deux éléments : la magnitude et l'intensité. Il s'agit des caractéristiques physiques d'un évènement (la magnitude) et/ou des dégâts générés (l'intensité). La magnitude peut justement être caractérisées par le *runup* ou l'éloignement à la côte, mais elle ne permet pas de préciser l'étendue des dégâts. C'est pourquoi l'intensité vient en complément. Une première partie consiste donc à la définition de ces deux notions.

Une fois le vocabulaire posé, une étude bibliographique présente les échelles de magnitude et d'intensité existantes. Face aux limites de ces dernières, une nouvelle échelle d'intensité est proposée. Cette dernière a été pensée afin de pouvoir être intégrée à une étude de risque.

1. Définition des notions nécessaires à la réalisation de classifications de tsunamis

Afin de pouvoir quantifier, classifier et/ou comparer différents tsunamis, il est nécessaire d'avoir des échelles de mesures. Plusieurs ont été proposées comme nous le verrons dans la suite de ce chapitre. Avant de les détailler il est important de différencier et de définir la **magnitude** et l'**intensité**, quelle que soit la nature de l'aléa, qui sont les éléments majeurs des réflexions sur les échelles.

La **magnitude** d'un évènement correspond à la puissance du phénomène. Elle est mesurée grâce à des paramètres physiques, comme des vitesses, des volumes ou des surfaces impliquées, ou encore des énergies. Des échelles de magnitudes sont construites spécifiquement pour chaque type de phénomène, la plus connue étant l'échelle de Richter pour les séismes. D'autres échelles existent pour d'autres aléas,

comme celle proposée par Newhall et coll. (1982), le *Volcanic Explosivity Index*, pour les éruptions volcaniques. Dans le cas d'un tsunami, on peut conjecturer que la magnitude est directement reliée à la hauteur de vague maximale à la côte (H_{max}) ou à son *runup* (c'est-à-dire la plus haute altitude atteinte), le *runup* étant plus facilement observable ou mesurable. D'autres paramètres physiques sont parfois utilisés pour caractériser la magnitude d'un tsunami, comme le courant (en nœud ou $m.s^{-1}$) ou l'énergie potentielle.

L'intensité d'un aléa, ne doit pas être confondue avec la magnitude. Elle correspond aux impacts observés ou ressentis par l'homme et aux effets provoquant des dommages variés sur le système, notamment sur les constructions, les territoires, les écosystèmes et les paysages. Pour une magnitude identique, l'intensité d'un phénomène diffère en fonction de l'endroit car les effets varient selon des particularités territoriales (effets de site, type de construction, densité, etc.). Un même évènement pouvant impacter, à des niveaux divers, différents territoires, il est d'usage pour qualifier l'intensité globale de l'évènement de retenir l'intensité maximale s'étant produite sur l'un des territoires. Plusieurs échelles d'intensité existent en fonction des phénomènes, avec notamment l'échelle de Mercalli pour l'intensité sismique, celle de Beaufort pour les vents, ou encore celle de Saffir-Simpson pour les ouragans. Il y avait donc nécessité d'en définir une ou plusieurs pour les tsunamis.

La magnitude et l'intensité sont majoritairement utilisées dans un vocabulaire sismique. Peu de définitions de ces éléments se focalisent uniquement sur les tsunamis, et lorsque cela est le cas, il est difficile de trouver un consensus. Il en va de même pour les échelles de magnitude et d'intensité proposées par la communauté. Ces dernières sont nombreuses et elles se focalisent chacune sur des éléments particuliers (*runup*, hauteur de vague à la côte (H_{max}), énergie, ressenti par la population, dégâts sur les bâtiments, pertes humaines, etc.). Nous détaillerons, à la suite de cette partie, les différentes échelles et en réaliserons une analyse critique. Sur cette base, nous proposerons une nouvelle échelle de tsunami, qui a pour originalité de combiner magnitude (hauteur d'eau et courant) et intensité (dégâts potentiels à terre et en mer).

Bien que ces notions de magnitude (M_T) et d'intensité (I_T) s'appuient sur des définitions complexes, il est tout à fait possible d'imaginer un lien fonctionnel entre les deux en introduisant la notion de vulnérabilité biophysique des personnes et des infrastructures (VB_{PI}). Cette relation peut être exprimée de différentes façons sachant que pour une même magnitude de tsunami (une même vague), l'intensité de l'évènement (les dégâts et pertes) dépendra de la vulnérabilité de la zone concernée. Cette fonction peut donc prendre la forme ci-dessous (Équation 6). Son choix dépendra du contexte de la démarche envisagée.

$$I_T = f(M_T, VB_{PI})$$

Équation 6 : Représentation de l'intensité

Ce paramètre de vulnérabilité biophysique correspond à l'approche la plus souvent mobilisée par les assureurs. Elle est basée sur l'étude de l'endommagement possible ou réel des différents éléments exposés, avec évaluation des pertes humaines, matérielles, économiques, environnementales, etc., et donc une estimation des coûts financiers (Provitolo, 2012).

Les impacts générés par un aléa sont donc au centre de l'étude. Le territoire n'est alors pas pris en compte dans sa globalité (non prise en compte de la gouvernance, des réseaux, des relations et interactions entre les différents éléments du système). Seule la vulnérabilité biophysique est retenue comme cadre de réflexion pour élaborer des échelles d'intensité. En effet, les vulnérabilités sociale (Brooks, 2003) et territoriale (D'Ercole et Metzger, 2009) sont trop complexes et spécifiques à un territoire pour être intégrées dans les échelles globales d'intensité dont l'objectif est d'établir des comparaisons entre tsunamis.

A partir de l'Équation 6 il est alors possible de dresser le Tableau 3. Il est construit sur la même logique que le tableau à double entrée de Manche (1998) qui permet de quantifier le risque en fonction de niveaux d'aléa et de vulnérabilité (Tableau 2).

Risque	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité moyenne	Vulnérabilité forte
Aléa faible	Risque faible	Risque faible	Risque moyen
Aléa moyen	Risque faible	Risque moyen	Risque fort
Aléa fort	Risque moyen	Risque fort	Risque fort

Tableau 2 : Niveaux de risque en fonction de l'aléa et de la vulnérabilité.
(Source : Manche, 1998)

Les deux limites de l'Équation 6 sont $M_T = 0$ et $VB_{PI} = 0$, et $M_T = \infty$ et $VB_{PI} = \infty$, ce qui explique qu'elles ne sont pas incluses dans le tableau d'intensité (Tableau 3). En effet, une magnitude nulle ($M_T = 0$) correspondrait à une absence d'évènement, l'intensité n'aurait alors pas de sens car il n'y aurait pas d'impact sur la vie quotidienne. De même, une vulnérabilité nulle ($VB_{PI} = 0$) correspondrait à un espace déserté, sans trace humaine. De plus, les limites $M_T = \infty$ et $VB_{PI} = \infty$ n'ont pas de sens car aucune grandeur physique, e.g., la magnitude M , n'est infinie (seuil de déferlement de vagues, dissipation), et une vulnérabilité infinie apparaît inconcevable.

Intensité	Vulnérabilité biophysique faible	Vulnérabilité biophysique moyenne	Vulnérabilité biophysique forte
Magnitude faible	Intensité faible	Intensité faible	Intensité moyenne
Magnitude moyenne	Intensité faible	Intensité moyenne	Intensité forte
Magnitude forte	Intensité moyenne	Intensité forte	Intensité forte

Tableau 3 : Niveaux d'intensité en fonction des niveaux de magnitude et de vulnérabilité.

Aux conditions aux limites sont également associées d'autres conditions qui permettent de valider l'Équation 6.

- (a) La détermination de la magnitude d'un tsunami d'origine co-sismique, ne se base pas sur la magnitude du séisme (M_w) car elle est corrélée à la magnitude du tsunami (M_T) (M_w et M_T sont dépendantes). Nous retenons en revanche M_T , associée à la hauteur de la vague au large, prescrite par les mécanismes au foyer du séisme (déterminant également la magnitude du séisme (M_w)).
- (b) Nous supposons que l'intensité (I_T) varie spatialement pour chaque évènement tsunami. En effet, la magnitude (M_T) dépend des effets de sites, et par conséquent elle varie spatialement. La vulnérabilité biophysique (VB_{PI}) varie également car les territoires et les populations ne sont pas tous également préparés et les normes et les usages différent d'un lieu à un autre.

Pour illustrer ces notions, prenons l'exemple du tsunami du 26 décembre 2004 de l'océan Indien. Lors de cet évènement, les côtes du Bangladesh, au nord du golfe du Bengale, ont été relativement épargnées. En effet, dans cette zone, le plateau continental est très étendu (il peut atteindre jusqu'à 200 km de largeur), les fleuves du Gange et du Brahmapoutre ont creusé un canyon sous-marin au-delà de leur estuaire. [loulalen et coll. \(2007b\)](#) ont montré que la présence de canyons sous-marins et l'étendue du plateau ont tendance à atténuer la vague de tsunami entrante par un processus de défocalisation. Ainsi, pour un même séisme et donc un même tsunami initial, aussi bien les magnitudes, que les intensités du tsunami diffèrent entre les côtes du Bangladesh et celles de Sumatra ou de Thaïlande : cela est dû à la variation des effets de sites.

Le temps d'arrivée de la vague varie également en fonction de l'éloignement de la source. Lors de l'évènement du 26 décembre 2004 ([Figure 35, Chapitre 5](#)), la vague est arrivée quasi immédiatement sur les côtes indonésiennes. Aucune alerte de la population ou d'évacuation organisée n'a pu être mise en application. L'évacuation et la mise en sécurité de la population s'est donc faite par **auto-évacuation**. Cette dernière s'est révélée inefficace du fait de la méconnaissance de la part des locaux et des touristes, de ce qu'est un tsunami et des comportements qu'il aurait fallu adopter pour tenter de se mettre en sécurité ([Provitolo et coll., 2015](#) ; [Léone et coll., 2010](#)).

Cette carte ([Figure 35, Chapitre 5](#)) ne fait pas état des magnitudes ou des intensités de cette méga-catastrophe, mais elle se focalise sur le temps d'arrivée et le nombre de victimes. Il est intéressant de souligner que de grandes disparités existent en terme de pertes humaines. Sans tenir compte de l'Indonésie, car trop proche de l'épicentre, des pays avec un temps d'arrivée de la vague similaire ont été impactés de manière très différentes en terme de vie humaine.

En effet, le Sri Lanka, dont la vague a atteint les côtes en deux heures, a été fortement impacté par le tsunami avec plus de 35 000 victimes. En revanche, la Birmanie, dont le temps d'arrivée de la vague est similaire, ne décompte que cinquante-neuf victimes. Nous pouvons donc supposer que la différence provient à la fois d'éléments naturels comme la topographie du site et des effets de sites, mais

également de paramètres liés à la vulnérabilité du site comme la structure des bâtiments, la connaissance de la population ou encore sa préparation, un biais peut toutefois apparaître avec une sous-estimation du nombre de victimes par exemple. La magnitude de l'évènement et la vulnérabilité du territoire sont donc bien deux éléments distincts et complémentaires qui permettent l'étude de l'intensité.

2. Des typologies de classification de tsunamis selon la magnitude, les dégâts occasionnés et l'intensité

Les phénomènes physiques naturels, tel que les aléas sismiques, gravitaires, ou tsunamiques, impactent plus ou moins fréquemment les sociétés humaines. Dans le but de dissocier, d'analyser, de comparer différents évènements d'un même type (les séismes, les tempêtes, les tsunamis, etc.) des classifications de tsunamis ont été mises en place par la communauté scientifique et par les grandes organisations internationales. Nous distinguons et détaillons ici trois catégories de classification : les échelles de magnitudes, les échelles de dégâts et les échelles d'intensité. Les échelles clés qui ont servi de base à la création d'une nouvelle échelle d'intensité de tsunami seront davantage détaillées. Une synthèse de l'ensemble de ces échelles sera présentée afin de faire ressortir les caractéristiques principales.

2.1. Les échelles de magnitude qui mesurent l'aléa

A l'image de l'échelle Richter pour les séismes, les tsunamis disposent également d'échelles de magnitude permettant la caractérisation de l'aléa. Il n'existe toutefois pas une échelle qui fasse l'unanimité au sein de la communauté scientifique. Ceci peut s'expliquer par le fait que les tsunamis s'avèrent difficilement caractérisables de par la présence de nombreuses variables et par la difficulté d'effectuer des mesures directes d'un évènement.

De plus, cet aléa est moins étudié car moins fréquent que les séismes, ce qui explique l'existence de certaines lacunes, notamment au niveau de la mise en place d'une échelle de magnitude commune. Soulevons toutefois que de nombreuses études portent sur l'océan Pacifique et plus particulièrement sur le Japon, pays fortement touché par ce type d'évènement et fortement impliqué dans la recherche scientifique.

Parmis les évènements historiques majeurs s'étant produits au Japon, nous pouvons citer : ceux du 1 septembre 1923, du 2 mars 1933, du 12 juillet 1993, du 25 septembre 2003, ou encore du 11 mars 2011 (NOAA, 2019). Nous allons à présent nous attarder sur trois échelles qui nous paraissent intéressantes de par les paramètres utilisés (*runup*, hauteur d'eau, énergie, etc.) : l'**échelle d'Abe**, celle de **Murty-Loomis** et celle de **Soloviev**.

L'**échelle de magnitude d'Abe** (1979), reprise par **Hatori** en 1986, se focalisent sur des tsunamis d'origine co-sismique. La définition donnée présente l'avantage de lier l'amplitude et la magnitude à la distance de l'épicentre. Il s'agit donc d'une réelle mesure de la magnitude, puisqu'elle ne se focalise que sur des paramètres physiques

liés à l'aléa et non sur les dommages. Cette définition de la magnitude est utilisée par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) dans son catalogue de tsunamis historiques allant de – 1600 à aujourd'hui. Elle a également vocation à permettre une comparaison entre les différents événements, mais elle n'est que trop peu renseignée.

D'autres chercheurs ont tenté de proposer des définitions de magnitudes basées sur des paramètres différents de la hauteur de vague. Ce fût par exemple le cas pour **Murty et Loomis (1980)** dont la méthode de calcul de la magnitude est basée sur l'énergie potentielle (E) d'un tsunami. Ceci présente l'intérêt d'offrir une gamme de magnitude plus large, elle reste cependant difficilement applicable. En effet, l'énergie ne se mesure pas mais nécessite d'être calculée. On peut faire une analogie directe avec le moment sismique⁴ (M_0) ou la magnitude (M_w).

L'échelle de magnitude de Soloviev (1970) présente l'intérêt de permettre le calcul de la magnitude et de faire le lien avec des échelles d'intensité, celle **d'Imamura-lida (lida et coll., 1967)** et celle de **Sieberg-Ambraseys (Ambraseys, 1962)**. Pour la réalisation de ses travaux, Soloviev a répertorié un ensemble de tsunamis dans une base de données portant sur l'océan Pacifique, et s'est attaché à la hauteur de vague pour caractériser la magnitude. Pour ce qui concerne les impacts de tsunamis, c'est à dire l'intensité, **Soloviev (1970)** met en relation les hauteurs d'inondations avec les échelles d'intensité proposées par Imamura-lida (lida et coll., 1967) et Sieberg-Ambraseys (Ambraseys, 1962).

Cette échelle a été utilisée pour évaluer **l'intensité** de nombreux tsunamis, dans l'océan Pacifique dans un premier temps, de par les travaux de Soloviev, puis dans un second temps à une échelle plus globale. Elle est en effet utilisée par la NOAA via la base de données tsunami *NGDC/NOAA*⁵, institution américaine, et par le *NTL/ICMMG*⁶, laboratoire russe. Elle est donc encore aujourd'hui l'une des plus communément utilisées.

Il n'existe donc pas une unique échelle de magnitudes et différents paramètres peuvent être utilisés pour caractériser un tsunami. Nous allons à présent détailler des échelles de dégâts pouvant être occasionnés à la côte.

2.2. Une focalisation sur les dégâts pouvant être couplée avec des échelles de magnitude afin d'obtenir des échelles d'intensité

Tout comme certains auteurs se focalisent sur la magnitude, d'autres se focalisent sur l'analyse des dégâts. Nous nous concentrons sur trois études, proposant des classifications originales : **Sieberg-Ambraseys (Sierberg, 1923, 1927 ; Ambraseys, 1962)**, **Papadopoulos et Imamura (2001)** et **Léone et coll. (2007)**. Ces travaux ont été couplés aux travaux de prédécesseurs afin de faire le lien entre dégâts et magnitude, le plus souvent correspondant à la hauteur d'eau.

⁴ Le moment sismique correspond à l'énergie sismique du séisme et est directement lié au déplacement au niveau de la faille.

⁵ *National Geophysical Data Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration*

⁶ *Novosibirsk Tsunami Laboratory of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics*

La première échelle d'intensité a été produite par **Sieberg** en 1927, et a été modifiée par **Ambraseys** en 1962. Elle a été produite à la demande d'une sous-commission du Comité Sismologique Européen (*ESC pour European Seismological Commission*) spécifique aux tsunamis. Cette échelle est également appelée *ESC-Tsunami scale* et représente la force de la vague en un lieu donné. Elle se compose de 6 degrés d'intensité établis à partir des observations faites, à savoir si le tsunami a été ou non ressenti par la population.

Cette échelle tient compte des dommages matériels occasionnés et des pertes humaines. Elle a l'avantage de combiner des données d'observation liées à l'évènement avec des données quantitatives ou qualitatives relatives aux dégâts à la côte. Elle s'avère grandement détaillée, ce qui permet de déterminer des niveaux d'intensité différents selon la localisation. Cette échelle a été combinée par **Soloviev** à ses travaux, dans le but d'obtenir l'intégralité des composantes de l'intensité, c'est-à-dire la magnitude et les dégâts.

L'échelle d'intensité proposée par **Papadopoulos et Imamura (2001)** ([Tableau 6](#)) se concentre uniquement sur la vulnérabilité biophysique de l'évènement et se détache complètement de la magnitude. Trois éléments principaux permettent sa détermination : les dégâts occasionnés sur la population, sur les bâtiments et sur les objets (bateaux, les structures sous-marines aquacoles, les sites naturels de protection, etc.). Elle se compose de 12 niveaux, comme l'échelle d'intensité sismique de Mercalli, dont elle s'inspire. Bien que se focalisant sur les dégâts à la côte, un lien entre l'intensité et la hauteur de la vague à la côte a été réalisé. Pour se faire, les auteurs ont croisé cette échelle avec celle proposée par **Shuto (1993)**. Elle est davantage détaillée plus loin dans ce chapitre.

Les échelles de magnitude et d'intensité présentées jusqu'à présent ont été pensées par des chercheurs issus des sciences de la terre, qui s'attachaient à étudier l'aléa. Les géographes, de par leur approche focalisée non pas sur l'aléa mais sur le risque, notamment par l'intégration des composantes territoriales et sociétales, se sont peu à peu intéressés à la caractérisation des évènements tsunamis. Une échelle d'intensité a d'ailleurs été proposée par un groupe de chercheurs, l'**échelle « macro-tsunamique »** ([Leone et coll., 2007](#)). Cette dernière permet un croisement entre les niveaux d'endommagements et la vulnérabilité structurelle (et non fonctionnelle) du bâti.

Cette échelle a pour objectifs principaux de quantifier et de spatialiser l'endommagement du bâti dans un secteur géographique précis. Celle-ci permet également de retrouver la zone de déferlement. Il s'agit donc d'une échelle d'intensité plus fine au niveau du territoire que les échelles proposées par les prédécesseurs. Elle est cependant plus laborieuse à déterminer car elle demande de grandes campagnes de terrain et ne peut par conséquent pas être appliquée sur l'ensemble des territoires impactés en cas de télé-tsunami, qui rappelons le, peuvent impacter des territoires à plus de mille kilomètres de la source.

Une mise en relation est toutefois réalisée par la suite ([Tableau 8](#)) entre l'échelle proposée et les hauteurs d'eau (considérée ici comme élément prédominant de la mesure de la magnitude). L'échelle de Papadopoulos – Imamura ([Papadopoulos et coll.](#),

2001) est également reportée dans le tableau afin de donner un élément de comparaison.

Les échelles que nous venons de présenter ont été construites en s'extrayant du phénomène physique et sans tenir compte dans leur réalisation des caractéristiques physiques (magnitude), pour ne se focaliser que sur les dégâts (vulnérabilité biophysique). Il est toutefois intéressant de noter que l'ensemble de ces auteurs cherchent à combiner les niveaux de dégâts qu'ils proposent à des hauteurs d'eau, c'est-à-dire à une magnitude, peut-être pour des questions de correspondance ou de facilité de « lecture ». Nous nous intéressons à présent aux échelles d'intensité à proprement parlé.

2.3. Echelles d'intensité qui mesurent les effets d'une catastrophe

Les échelles d'intensités de tsunami sont également nombreuses. Elles s'appuient et sont construites selon différents critères, qui varient selon les auteurs. Aucune ne fait l'unanimité au sein de la communauté scientifique. Nous allons détailler les principales afin de faire ressortir leurs particularités pour ensuite pouvoir déterminer celles qui pourront servir de base à la nouvelle échelle d'intensité que nous souhaitons proposer. Pour rappel, nous définissons **l'intensité** comme étant la combinaison de la **magnitude** (*runup*, hauteur de vague, énergie potentielle, etc.) et de la **vulnérabilité biophysique**, c'est-à-dire des dommages (humains, matériels, économiques, etc.). Une corrélation doit ainsi être faite entre les classes de dégâts proposés et la magnitude de l'évènement, souvent caractérisée par la hauteur de vague.

Les échelles d'intensités de tsunami sont également nombreuses. Elles s'appuient et sont construites selon différents critères, qui varient selon les auteurs. Aucune ne fait l'unanimité au sein de la communauté scientifique. Nous allons détailler les principales afin de faire ressortir leurs particularités pour ensuite pouvoir déterminer celles qui pourront servir de base à la nouvelle échelle d'intensité que nous souhaitons proposer. Pour rappel, nous définissons **l'intensité** comme étant la combinaison de la **magnitude** (*runup*, hauteur de vague, énergie potentielle, etc.) et de la **vulnérabilité biophysique**, c'est-à-dire des dommages (humains, matériels, économiques, etc.). Une corrélation doit ainsi être faite entre les classes de dégâts proposés et la magnitude de l'évènement, souvent caractérisée par la hauteur de vague.

Le premier à introduire le concept de magnitude d'un tsunami est [Imamura \(1942, 1949\)](#), dont les travaux ont été repris par [Iida \(1956, 1958, 1970\)](#) et [Iida et coll. \(1967, 1972\)](#). Ces travaux portent principalement sur des tsunamis d'origines co-sismiques dans l'océan Pacifique basée sur la hauteur de la plus haute vague observée. Ces définitions sont certes empiriques mais elles se veulent représentatives : elles ont le mérite de proposer un lien entre les hauteurs de vagues et la nature des dommages matériels, aussi bien que corporels. Elles ont également l'avantage de lier les tsunamis sources, c'est-à-dire la hauteur de la vague au large, aux tsunamis côtiers, de façon empirique également.

Il est vrai que cette échelle a tout d'abord été conçue en se focalisant uniquement sur la magnitude et l'élément physique qu'est le tsunami ([Imamura 1942, 1949](#)). Toutefois, les trente ans qui séparent les premiers résultats d'[Imamura \(1942\)](#) à

ceux de [Iida et coll. \(1972\)](#) ont permis à cette échelle de se développer et de se diversifier avec l'apport des dégâts occasionnés. Si nous revenons à notre définition de l'intensité, celle-ci englobe à la fois la magnitude et les dommages. Pour nous, l'échelle d'Imamura-Iida serait donc une échelle d'intensité et non une échelle de magnitude. Cette dualité fait cependant la force de cette échelle, puisqu'elle permet de lier hauteur de vagues (au large et à la côte) et dégâts, ce que peu d'échelles proposent.

Les événements catastrophiques de 2004 (en Asie du sud-est) et de 2011 (au Japon) ont marqué un véritable tournant dans l'étude des tsunamis, notamment par le fait qu'il s'agissait d'événements d'une rare ampleur. De plus, pour la première fois, ils ont pu être observés, mesurés, suivis, aussi bien sur le plan physique avec les différentes mesures de l'aléa, que sur les plans humains, territoriaux et économiques de par l'ampleur des pertes directes et indirectes occasionnées. De ces observations, [Lekkas et coll. \(2013\)](#) ont proposé une nouvelle échelle d'intensité des tsunamis, se composant de 12 niveaux établis à partir de 6 critères : la puissance du phénomène (*runup*, hauteur de la vague au rivage), les impacts humains, les effets sur les objets « mobiles », les dégâts sur les infrastructures, les effets géophysiques, les impacts sur le bâti.

La magnitude de l'événement est prise en compte à la fois via la hauteur de l'événement et l'emprise spatiale de l'inondation. De plus, les dégâts sont très largement détaillés, et ce par la mise en place de nombreuses catégories. Un tel niveau de détail favorise la détermination d'intensité locale et donc les variations spatiales. Cette échelle d'intensité est donc complète et propose de s'intéresser à un grand nombre d'éléments, ce qui en fait sa force. Toutefois sa mise en application risque de s'avérer laborieuse et de nécessiter beaucoup de temps. De nombreuses données doivent en effet être récoltées, puis analysées, et ce à différentes échelles de temps et d'espace.

D'autres échelles d'intensités ont été proposées par la communauté scientifique : celle de **Shuto (1993)**, de **Lynett et coll. (2014)** et celle utilisée par les **plans de préventions des risques** (d'inondation). Ces dernières sont présentées de manière plus détaillée, puisque ce sont elles qui vont servir de base à la construction de la nouvelle échelle d'intensité proposée.

[2.4. Zoom sur les échelles utilisées pour la construction d'une nouvelle échelle d'intensité](#)

De nombreux chercheurs se sont interrogés sur différentes méthodes permettant la classification des tsunamis. Nous avons vu que certains se focalisaient sur la magnitude, d'autres sur les dégâts, d'autres encore sur l'intensité. Parmi l'ensemble des échelles proposées, nous en avons retenu quatre qui correspondent davantage à notre objectif de départ : la création d'une nouvelle échelle d'intensité de tsunami couplant courants et hauteurs d'eau aux dégâts.

2.4.1. L'échelle d'intensité de Shuto et de Koshimura

Une échelle de mesure d'intensité a été proposée dans les années 1990 par **Shuto** (1993) (Tableau 4). Il définit l'intensité d'un tsunami (Équation 7) en fonction de la hauteur locale maximale du tsunami selon la fonction suivante :

$$i = \log_2 WH_{max}.$$

Équation 7 : Représentation de l'intensité d'après Shuto (1996)

Pris tel que présentée ci-dessus, il s'agirait davantage d'une échelle de magnitude que d'une échelle d'intensité car la fonction se focalise uniquement sur l'évènement physique. Les effets de sites et de pente sont inclus dans la hauteur de vague maximale. Cette classification, en comparaison à celle d'Imamura-lida (lida, 1958), ne tient pas compte de la formation de la vague, de sa magnitude à sa génération, et de la magnitude de la source (séisme, etc.). Cette magnitude (les hauteurs de vagues) va ensuite être associée à des dommages potentiels et à des degrés d'intensité (Tableau 4). Ceci permet pour chaque intensité, d'associer les dégâts potentiels occasionnés sur les différentes structures, ainsi qu'un *runup* indicatif.

Intensité I	0	1	2	3	4	5
	Maison en bois	Partiellement endommagé	Démoli			
Maison en pierre	Résistant				Démoli	
Bâtiments renforcés	Résistant					Démoli
Bateaux de pêche		Dégâts naissant	Dommmages > 50%	Dommmages = 100%		
Ouvrages de protection anti-tsunami	Dommmages négligeables Arrête les charriages Atténue les tsunamis		Dommmages partiels - Arrête les charriages	Endommagés Inefficaces		
Structures sous-marines aquacoles	Dégâts naissants					
Village de faible altitude		Dégâts naissants	Dommmage > 50%	Dommmage = 100%		
Maximum des <i>runup</i> (m)	1	2	4	8	16	32
Intensité I	0	1	2	3	4	5

Tableau 4 : Tableau représentant l'échelle d'intensité de tsunami proposée par Shuto (1993)

Sa construction s'appuie sur des données historiques japonaises sur les tsunamis. Ces travaux ont d'ailleurs été grandement utilisés par le gouvernement japonais pour mesurer les dégâts liés aux tsunamis, nombreux dans cette région du globe. L'auteur propose une relation empirique entre l'aléa tsunami et la vulnérabilité de certaines structures comme les bâtiments, selon s'ils sont en bois ou en pierre, les

bateaux de pêche, ou encore les ouvrages de protections. Paradoxalement, cette échelle ne prend pas en compte les pertes humaines.

L'échelle de Shuto est bien une échelle d'intensité car elle combine à la fois la magnitude, avec la prise en compte des *runup*, et les dégâts occasionnés à différents types de structures, c'est-à-dire la vulnérabilité biophysique. Nous pouvons néanmoins suggérer que la classification des édifices est sujette à discussion : comment intégrer les habitations précaires, qui sont nombreuses dans maintes zones côtières ? Sont-elles incluses dans le terme « maison en bois » ?

Cette échelle d'intensité a par la suite été reprise par **Koshimura et coll. (2009)** pour obtenir le *Tsunami fragility*, une échelle de mesure permettant d'estimer les dommages liés aux tsunamis. Cette analyse statistique s'appuie sur de la télédétection, des modèles numériques, des enquêtes de terrain ou encore sur des archives.

L'objectif de cette échelle de mesure proposée par **Koshimura et coll. (2009)** était donc de proposer une nouvelle échelle d'intensité qui permette de relier l'aléa tsunami (la magnitude) et la vulnérabilité structurelle. Toutefois, elle s'avère difficile d'utilisation de par son approche statistique. De plus, aucune échelle de classification n'est proposée. Il s'agit davantage d'une méthodologie statistique permettant de faire ressortir les corrélations entre les données de magnitude et les dégâts (la vulnérabilité structurelle).

2.4.2. L'échelle d'intensité de Papadopoulos - Imamura

L'échelle d'intensité de **Papadopoulos et Imamura (2001)** combine la magnitude et les différents dégâts pouvant être occasionnés par un tsunami. Elle intègre (**Tableau 5**) ainsi à la fois les effets observés ou ressentis par l'homme (ligne a) et les effets provoquant des dommages (lignes b et c). Elle est ainsi graduée de « non ressenti » à « entièrement dévastateur ».

Intensité - I	Description
I – Non ressenti	a. Non ressenti même sous les conditions les plus favorables.
	b. Aucun effet.
	c. Aucun dommage.
II – Ressenti « ça et là »	a. Ressenti par quelques personnes à bord de petites embarcations. Pas d'observation faite à la côte.
	b. Aucun effet.
	c. Aucun dommage.
III - Faible	a. Ressenti par la plupart des personnes à bord de petites embarcations. Observé par quelques personnes à la côte.
	b. Aucun effet.
	c. Aucun dommage.
IV – Largement observé	a. Ressenti par toutes les personnes à bord de petites embarcations et par quelques personnes à bord de bateaux importants. Observé par la plupart des gens à la côte.
	b. Quelques petites embarcations sont déplacées à terre.
	c. Aucun dommage.
V - Fort	a. Ressenti par toutes les personnes sur les bateaux importants et observé par tous à la côte. Quelques personnes sont effrayées et courent vers des zones en hauteurs.
	b. De nombreuses petites embarcations sont déplacées violemment à terre, quelques-uns se percutent et d'autres se retournent. Des traces de couches de sable sont laissées au sol lors du retrait (lorsque les conditions sont favorables). Inondation limitée des terres agricoles.

	c. Inondation limitée des aménagements extérieurs (e.g. jardins) lorsqu'ils sont à proximité de la côte.
VI – Dommages légers	a. De nombreuses personnes sont effrayées et courent vers des zones en hauteur.
	b. La plupart des petites embarcations sont violemment déplacées à terre, se percutent brutalement les unes contre les autres ou se retournent.
	c. Quelques structures en bois sont endommagées ou inondées. La plupart des bâtiments de maçonnerie résistent.
VII- Dommages	a. La plupart des personnes sont effrayées et essaient de courir vers des zones en hauteur.
	b. De nombreuses petites embarcations sont endommagées. Quelques gros bateaux oscillent violemment. Des objets de taille et de stabilité variables se renversent ou dérivent. Une couche de sable et une accumulation de galets sont laissés après le retrait de la mer. Quelques structures sous-marines aquacoles sont emportées.
	c. De nombreuses structures en bois sont endommagées, quelques-unes sont démolies ou emportées. Endommagement de niveau 1 et inondation de quelques bâtiments de maçonnerie.
VIII- Dommages sévères	a. Tous les gens fuient vers des zones en hauteurs, et quelques-uns sont emportés.
	b. La plupart des petites embarcations sont endommagées, beaucoup sont emportées. Quelques bateaux plus importants sont déplacés à terre ou se percutent les uns contre les autres. Des gros objets sont emportés. Erosion et dépôts sur les plages. Vaste inondation. Dégâts légers sur les sites naturels de protection contre les tsunamis (forêts et mangroves) ; arrêtent les dérives d'objets ou de personnes. De nombreuses structures sous-marines aquacoles sont emportées et quelques-unes sont partiellement endommagées.
	c. La plupart des structures en bois sont emportées ou démolies. Endommagement de niveau 2 de quelques bâtiments de maçonnerie. La plupart des bâtiments renforcés résistent, quelques-uns sont endommagés au niveau 1 et des inondations sont observées.
IX – Destructif	a. Beaucoup de personnes sont emportées.
	b. La plupart des petites embarcations sont détruites ou emportées. Beaucoup de bateaux plus importants sont violemment déplacés à terre, quelques-uns sont détruits. Vastes érosions et dépôts sur la plage. Affaissement du sol à certains endroits. Destruction partielle des sites naturels de protection contre les tsunamis ; les arbres arrêtent les dérives d'objets ou de personnes. La plupart des structures sous-marines aquacoles sont emportées et beaucoup sont partiellement endommagées.
	c. Endommagement de niveau 3 dans de nombreux bâtiments de maçonnerie, quelques bâtiments renforcés subissent des endommagements de niveau 2.
X – Fortement destructif	a. Panique généralisée. De nombreuses personnes sont emportées
	b. La plupart des gros bateaux sont violemment déplacés à terre, de nombreux sont détruits ou percutent des bâtiments. De petits rochers du fond de la mer sont déplacés à terre. Les voitures se retournent et dérivent. Du pétrole se déverse (marée noire potentielle), départs d'incendies. Affaissement du sol étendu.
	c. Endommagement de niveau 4 de beaucoup de bâtiments de maçonnerie, quelques bâtiments renforcés souffrent d'endommagement de niveau 3. Digués et berges artificielles s'effondrent.
XI – Dévastateur	a. /
	b. Réseaux vitaux interrompus (eau, électricité, gaz). Incendies importants. Le retrait de l'eau emporte des voitures et d'autres objets en mer. De gros rochers du fond de la mer sont déplacés à terre.
	c. Endommagement de niveau 5 dans de nombreux bâtiments de maçonnerie. Quelques bâtiments renforcés souffrent d'endommagement de niveau 4 et beaucoup d'endommagement de niveau 3.
XII – Entièrement dévastateur	a. /
	b. /
	c. Pratiquement tous les bâtiments de maçonnerie sont détruits. La plupart des bâtiments renforcés souffrent d'endommagement de niveau 3 et plus.

Tableau 5 : Tableau représentant l'échelle de douze niveaux d'intensité proposé par Papadopoulos et Imamura (2001)

(traduit de l'anglais) (a) perceptions et impacts sur les populations, (b) effets sur les objets autres que le bâti (bateaux, végétation, etc.), (c) dommages sur le bâti (édifices).

Cette échelle a pour ambition première une généralisation des échelles d'intensité permettant une application aux différents événements qui se produisent afin de pouvoir les comparer si le besoin en est. C'est pourquoi, elle a été conçue en essayant de se détacher des paramètres physiques, en étant la plus précise possible

dans le choix du nombre de niveaux et dans le détail de leur description. Ceci lui permet de faire la distinction entre deux événements présentant des similitudes dans les effets observés (Papadopoulos et Imamura, 2001) et de faire ressortir les particularités spatiales pour un événement unique.

Elle semble à première vue se concentrer uniquement sur les dégâts occasionnés à la côte. Or, un lien (Tableau 6) a été réalisé entre l'intensité proposée et la hauteur de la vague à la côte, à partir de l'échelle de Shuto (1993) (Tableau 4). Le tableau (Tableau 6) obtenu permet ainsi de comparer les deux échelles d'intensité, celle de Papadopoulos-Imamura et celle de Shuto, et la hauteur à vague à la côte associée aux différents degrés d'intensité.

<i>I</i> – Intensité (Papadopoulos-Imamura 2001)	<i>H</i> _{max} (en m) (Shuto 1993)	<i>i</i> – Intensité (Shuto 1993)
<i>I</i> – <i>V</i>	< 1.0	0
<i>VI</i>	2.0	1
<i>VII</i> - <i>VIII</i>	4.0	2
<i>IX</i> – <i>X</i>	8.0	3
<i>XI</i>	16.0	4
<i>XII</i>	32.0	5

Tableau 6 : Tableau représentant la corrélation possible entre l'échelle d'intensité *I* proposée par Papadopoulos et Imamura (2001) et la hauteur maximale de vague associée *H*_{max}, et l'intensité *i*

Papadopoulos et Imamura (2001) précisent cependant que cela n'est valable que dans certains cas. En effet, un tsunami présentant des *runup* importants (de l'ordre de dizaines de mètres), s'il s'abat sur des zones inhabitées, ne va présenter qu'un faible niveau d'intensité, car la vulnérabilité est très faible, voire nulle. Ce fut le cas par exemple des phénomènes qui se sont produits dans la baie de Lituya (en Alaska). Des traces géologiques avaient été observées et inexplicables, mais sans dégâts humains ou matériels car la baie était inhabitée (vulnérabilité nulle). L'évènement du 10 juillet 1958 a permis de comprendre l'origine des traces observées : un tsunami.

En revanche, si le même phénomène vient à se produire dans une zone fortement peuplée, comme sur la Côte d'Azur par exemple, l'intensité retenue sera alors extrêmement forte. Ainsi, à partir du cinquième niveau d'intensité, correspondant à un niveau « fort », une hauteur de vague indicative a été associée (Tableau 6) par les auteurs. Elle ne permet pas de calculer directement la magnitude de l'évènement, il est donc nécessaire de faire le lien avec une autre échelle pour obtenir l'ensemble des éléments composants l'intensité.

2.4.3. Une échelle prenant en considération les effets des courants et des effets en mer

Une manière originale d'étudier l'intensité des tsunamis a été proposée par Lynett et coll. (2014), grâce à l'utilisation des courants générés par les tsunamis. Comme nous l'avons vu précédemment, les échelles de magnitude et d'intensité sont la plupart du temps mises en place à partir des *runup* car il s'agit de la mesure la plus

facilement observable (souvent grâce aux traces laissées par l'inondation une fois que l'eau se retire).

Le tsunami ne se limite pourtant pas à une hauteur de vague, mais apparaît bien plus complexe. Le **courant** constitue l'élément destructeur du tsunami car il permet la mobilisation de nombreux embâcles et cause les principaux dégâts humains, qu'il s'agisse de personnes emportées par le courant ou heurtées par des matériaux mobilisés par l'eau. La mesure du courant est peu commune bien que quelques mesures physiques existent (courantomètres, courantomètre à effet doppler - ADCP).

L'échelle d'intensité de [Lynett et coll. \(2014\)](#) classe l'impact des courants induits de tsunamis sur les structures marines à quai ou ancrées (bouées, embarcations). Cette échelle a été bâtie empiriquement à partir de données (dégâts et estimations des courants) recueillies en divers sites de Californie suite aux tsunamis qui ont été générés par divers grands séismes transocéaniques : le séisme des Iles Kouriles (*Kuril* en anglais) du 15 novembre 2006 de magnitude $M_w = 8.3$, celui de Maule de magnitude $M_w = 8.8$ au Chili du 27 février 2010 et celui de Tohoku, Japon, de magnitude $M_w = 9.0-9.1$ du 11 mars 2011.

Les auteurs ont ainsi montré que le seuil de déclenchement de dommages sur des structures est de l'ordre de 1.5 m/s (3 nœuds marins). Entre 1.5 et 3 m/s les dommages sont modérés alors qu'entre 3 et 4.5 m/s ils sont majeurs. Au-delà, les auteurs mentionnent des dommages extrêmes. Ils en ont déduit une échelle d'intensité ([Tableau 7](#)) comportant 6 niveaux dont les principaux seuils sont ceux mentionnés ci-dessus. Certains degrés d'intensité sont reliés aux mêmes intervalles de courants (0 et 1 ; 2 et 3). Une possible explication est l'effet des hauteurs de vagues qui peuvent être différentes pour un même courant et ainsi générer des dégâts différents.

I – Degré d'intensité	Courants de tsunamis induits associés	Effets sur les structures marines à quai ou ancrées
Degré 0	< 1.5 m/s	Aucun dégât ni impact.
Degré 1	< 1.5m/s	Petites bouées déplacées.
Degré 2	Entre 1.5 et 3 m/s	Quelques (peu) de petites embarcations à quai sont endommagées et/ou des larges bouées déplacées.
Degré 3	Entre 1.5 et 3 m/s	Des dégâts modérés sur quelques embarcations à quai (moins de 25% d'entre elles) et sur quelques navires de moyen tonnage au mouillage.
Degré 4	Entre 3 et 4.5 m/s	Dégâts majeurs sur les bateaux à quai (jusqu'à 50% des navires) et sur des larges vaisseaux au mouillage.
Degré 5	> 4.5 m/s	Dégâts extrêmes à totaux sur les vaisseaux à quai (plus que 50% d'entre eux)

Tableau 7 : Tableau synthétique représentant l'échelle d'intensité de tsunami proposée par [Lynett et coll. \(2014\)](#).

Elle s'appuie sur l'impact des courants induits de tsunamis sur les structures marines (embarquements, bouées) à quai et au mouillage.

Dans ces travaux, les auteurs utilisent les nœuds marins pour caractériser le courant. Par soucis de compréhension et de clarté, nous avons converti ces valeurs en m/s (1 nœud équivalant à 0.5 m/s). Cette échelle d'intensité sera utilisée par la suite pour réalisation d'une nouvelle d'intensité présentée plus loin (Tableau 9).

Dans l'étude de Lynett et coll. (2014) les courants ont été principalement estimés grâce à des témoignages de marins expérimentés et/ou à des interprétations d'enregistrements vidéo montrant des charriages d'objets à la surface (Wilson et coll., 2013 ; Lynett et coll., 2012, 2013). La prise en compte des courants permet aux auteurs de se focaliser principalement sur les dégâts potentiels sur les ports et baies. Les événements historiques analysés lors de ces recherches ont permis de mettre en évidence la vulnérabilité des installations maritimes lors de tsunamis, vulnérabilité liée aux chocs entre les objets mobiles et ce qu'il y ait ou non une inondation (Lynett et coll., 2014). En revanche, aucun lien n'est fait avec les hauteurs de vagues ainsi que la submersion sur les territoires littoraux.

Bien que surprenante par l'entrée que propose cette étude, l'analyse des courants et des dégâts qu'ils engendrent en mer s'avère d'une grande originalité. En effet, cette étude vient combler des lacunes au niveau de l'analyse de la magnitude, par la prise en compte du courant et non pas des hauteurs de vagues ou des *runup* comme ceci est le cas dans la plupart des autres études. Celle-ci apporte également de nouveaux éléments au niveau des effets du tsunami, souvent analysés à terre sur le bâti et non dans les ports et au mouillage. Elle présente également l'intérêt d'être une échelle d'intensité au sens strict où nous le décrivons, c'est-à-dire une combinaison de la magnitude et de la vulnérabilité biophysique, ici de structures marines.

2.4.4. Le Plan de Prévention du Risque Inondation, outil réglementaire français de lutte contre les inondations, transposables à l'étude des tsunamis ?

L'ensemble des échelles proposées précédemment ont été pensées et construites spécifiquement pour l'étude et l'analyse des tsunamis. Ici, nous proposons d'intégrer également une échelle généralement utilisée pour les inondations, celle parfois proposée dans un outil réglementaire française : les **Plans de Prévention des Risques**.

Cette classification s'inspire des résultats et analyses de plans de prévention du risque d'inondation (PPRI), instruments de l'Etat français dans le domaine de la prévention des risques naturels. Le PPRI s'applique aux crues et s'intéresse aux impacts sur les populations et les aménagements urbains et/ou agricoles (PPRI, 1999). Cette échelle de risque mettant en jeu deux paramètres de la magnitude (hauteur d'eau et courant) est couramment utilisée pour les inondations et crues dans les PPRI. Elle est inscrite dans les guides méthodologiques du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire (PPRN Thau, 2012, Figure 45).

Tout comme l'aléa tsunami, les paramètres de l'aléa sont la hauteur de submersion et la vitesse d'écoulement des eaux de crue. Cette échelle propose de

façon empirique les effets possibles de ces deux paramètres sur les populations en milieu inondable. Les inondations étant un phénomène récurrent en France, cette échelle a été alimentée par des retours d'expérience. Mais qu'en est-il en mer aux abords de la côte ?

Nous supposons que certains éléments contenus dans les PPRI, en particulier la mise en relation de la hauteur d'eau et du courant (Figure 45), sont susceptibles de s'appliquer à l'aléa tsunami. Il suffit pour cela de prendre en compte l'hypothèse d'onde longue pour laquelle les courants de tsunamis sont quasiment horizontaux, tout comme les crues. Ces courants ont d'ailleurs la même propension à charrier les objets et obstacles mobiles. Nous proposons donc d'appliquer cela à l'aléa submersion marine par tsunami.

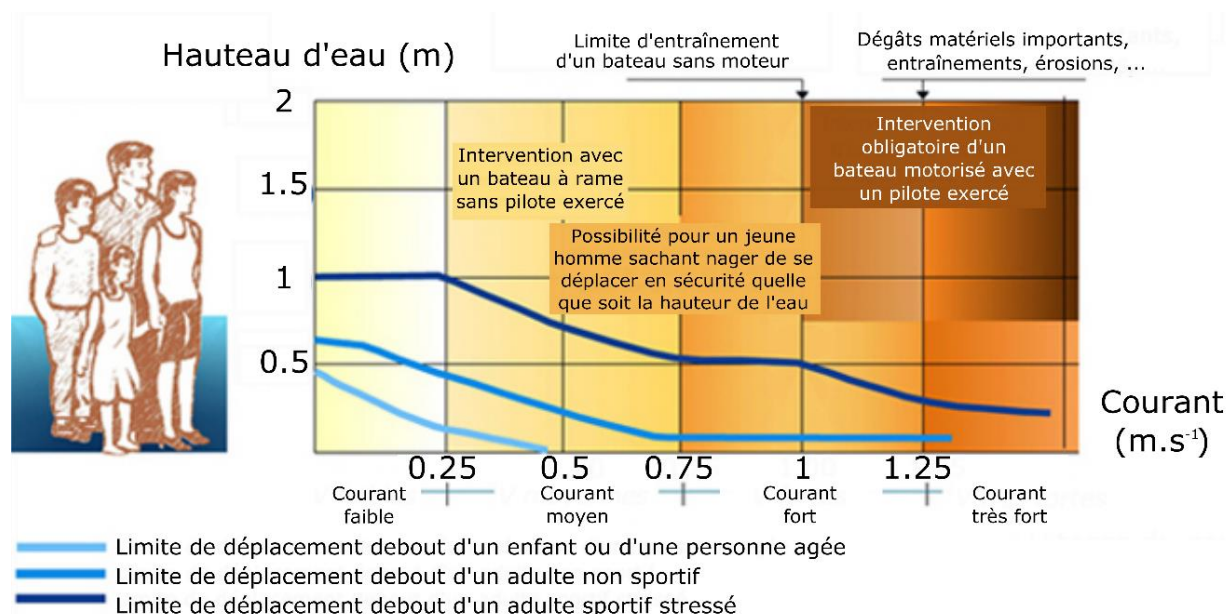


Figure 45 : Schéma représentant les limites de déplacement en cas d'inondation inscrit dans les Plans de Prévention au Risque d'Inondation par les autorités françaises (PPRN Thaux, 2012).

U (m/s) représente la vitesse du courant de crue, H (m) représente la hauteur de la colonne d'eau submergeantes. Les courbes empiriques présentent les limites de déplacement debout d'un enfant, d'un adulte non-sportif et d'un adulte sportif en état de stress. Elles sont issues de retours d'expériences

L'action exercée par les courants, et les hauteurs d'inondation sont présentées dans la Figure 45. La faiblesse de ce document est qu'il n'est pas clairement détaillé et aucune échelle d'intensité n'est associée, c'est-à-dire qu'aucune caractéristique n'est fournie. En revanche des seuils sont donnés :

- La hauteur de vagues de 0.5 m, pour laquelle l'aléa commence à être pris en compte a été choisie dans les PPR pour les raisons suivantes (PPRN-Thau, 2012): « à partir de cette valeur, il a été montré qu'un adulte non sportif - et à plus forte raison un enfant, une personne âgée ou à mobilité réduite - rencontrent de fortes difficultés de déplacements, renforcées par la disparition totale du relief (trottoirs, fossés, bouches d'égouts ouvertes, etc.) et l'accroissement du stress. Outre les difficultés de mouvement des personnes, cette limite de 0,5 m d'eau caractérise un seuil pour le déplacement des véhicules : une voiture commence à flotter à partir de

0,3 m d'eau et peut être emportée dès 0,5 m par le courant aussi faible soit-il. Une hauteur de 0,50 m d'eau est aussi la limite de déplacement des véhicules d'intervention classiques de secours. »

- De même pour le choix de la vitesse de courants seuil de 0.5 m/s (PPRN-Thau, 2012) : « à partir de 0,5 m/s, la vitesse du courant devient dangereuse pour l'homme, avec un risque d'être emporté par le cours d'eau ou d'être blessé par des objets charriés à vive allure. La vitesse d'écoulement caractérise également le risque de transport d'objets légers ou non arrimés ainsi que le risque de ravinement de berges ou de remblais. Il est clair que, dans le cas d'une rupture de digue, ce paramètre devient prépondérant sur les premières dizaines de mètres. »

Ces seuils permettent principalement de déterminer les seuils de magnitude, donc de l'aléa. Des informations sont toutefois associées à ces derniers afin de déterminer les difficultés de déplacement, il s'agit donc dans une certaine mesure de l'analyse de l'intensité, ciblée sur les déplacements humains. Nous proposons à présent une synthèse de l'ensemble des échelles de magnitude et d'intensité que nous avons relevée dans la littérature.

2.5. Synthèse des échelles de magnitude et d'intensité de tsunami existantes

La première échelle d'intensité de tsunami a été proposée par Sieberg (1927). Depuis, la caractérisation des tsunamis n'a cessé d'être détaillée et améliorée grâce aux travaux de nombreux chercheurs. Plusieurs échelles ont ainsi été développées au cours du temps et ont permis pour certaines de se focaliser sur la magnitude et pour d'autres sur l'intensité. Papadopoulos et Imamura (2001) et Papadopoulos (2003) font un bilan de ces dernières, qu'ils synthétisent par la suite dans un tableau que nous avons étoffé (Tableau 8).

Plusieurs échelles ont ainsi été proposées par la communauté scientifique, faisant état soit de magnitude, soit d'intensité. Depuis 1923 et les travaux de Sieberg, une dizaine d'échelle a été proposée (Imamura 1942, 1949 ; Ambraseys, 1962 ; Iida et coll. 1972 ; Shuto, 1993 ; Papadopoulos et Imamura, 2001, etc.), mais aucune ne fait l'unanimité. Ceci démontre donc la difficulté d'analyse des tsunamis. De par son emprise spatiale, la détermination de la magnitude et de l'intensité peut s'avérer laborieuse. Les paramètres d'analyse sont multiples (runup, hauteur d'eau, courant, etc., pour la magnitude ; dégâts humains, ressenti de la population, dégâts sur le bâti, etc., pour la vulnérabilité biophysique).

Nous avons observé qu'un flou existait et persistait quant à la bonne qualification de ces échelles. Certaines sont définies comme des échelles de magnitudes, alors qu'elles se focalisent sur les dégâts ou l'intensité, et inversement. Nous avons ainsi corrigé ces erreurs en reclassifiant ces échelles selon nos définitions de la magnitude et de l'intensité.

Les couleurs attribuées dans le Tableau 8 tiennent compte de ces modifications : en bleu foncé apparaissent les échelles de magnitude, en bleu moyen les échelles se focalisant sur les dégâts et en bleu clair les échelles d'intensité. Apparaissent

également dans ce tableau différentes informations comme : les éléments pris en compte pour sa mise en place, le nombre de classes proposées pour l'échelle, ou encore la formule proposée pour le calcul de la magnitude.

Auteurs et dates	Nom de l'échelle	Type d'échelle lors de sa conception	Type d'échelle d'après nos critères	Eléments pris en compte	Formule de calcul de la magnitude	Nombre de classes d'intensité
Sieberg (1923, 1927) Repris par Ambraseys (1962)	Sieberg-Ambraseys Ou ESC-Tsunami scale	Intensité	Focalisation sur les dégâts. Une échelle d'intensité est obtenue lorsqu'elle est couplée avec l'échelle de magnitude de Soloviev	Force de la vague en un lieu donné	/	6 degrés
Imamura (1942, 1949) – lida (1956, 1970) et lida et coll. (1967, 1972)	Imamura-lida	Magnitude	Intensité	Hauteur de la vague au large (H_large) et à la côte (Hmax)	$m = \log_2 WH_{max}$	6 degrés
Soloviev (1970)	Soloviev	Intensité	Magnitude, mais lorsqu'elle est couplée à l'échelle de Sieberg-Ambrasey elle devient une échelle d'intensité	Moyenne des hauteurs à la côte (H)	$i_s = \log_2 \sqrt{2}(H)$	/
Abe (1979, 1981, 1985) Repris par Hatori (1986)	Abe	Magnitude	Magnitude	Amplitude maximale crête à creux (H) et la distance entre l'épicentre et le marégraphe (Δ)	$M_t = a \log H + b \log \Delta + D$	/
Murty – Loomis (1980)	Murty-Loomis	Magnitude	Magnitude	Prise en compte de l'énergie potentielle (E)	$ML = 2 (\log E - 19)$	/
Shuto (1993)	Shuto	Intensité	Intensité	Lien entre dommages et hauteurs de vagues	$i = \log_2 h$	6 degrés
Papadopoulos et Imamura (2001)	Papadopoulos - Imamura	Intensité	Focalisation sur les dégâts. Une échelle d'intensité est obtenue lorsqu'elle est couplée avec l'échelle de Shuto	Dégâts occasionnés sur : la population, le bâti, les objets	/	12 degrés
Léone et coll. (2007)	Echelle d'intensité « macro-tsunami »	Intensité	Focalisation sur le bâti. Une échelle d'intensité est obtenue lorsqu'elle est	Croisement entre niveaux d'endommagement et vulnérabilité du bâti	/	6 degrés

			couplée avec celles de Papaopoulos-Imamura et Shuto			
<i>Lekkas et coll. (2013)</i>	The New Integrated Tsunami Intensity Scale (ITIS-2012)	Intensité	Intensité	6 critères parmi lesquels : la puissance du phénomène, les impacts humains, les effets sur les objets, les dégâts sur les infrastructures, les effets géophysiques, les impacts sur le bâti	/	12 degrés
<i>Lynett et coll. (2014)</i>	Lynett	Intensité	Intensité	Courant	/	6 degrés
Plan de Prévention du Risque d'Inondation	PPRI	Intensité	Intensité	Hauteur d'eau et courant	/	4 degrés
Echelle de magnitude		Echelle se focalisant sur les dégâts			Echelle d'intensité	

Tableau 8 : Tableau représentant les différentes échelles de magnitude et d'intensité existantes (d'après Papadopoulos et Imamura 2001)

Cette première partie a permis de faire une synthèse des différentes échelles de magnitude et d'intensité de tsunami existantes. Ces dernières présentent des similarités et des différences dans les différents éléments qu'elles prennent en compte, que ce soit au niveau de la magnitude (*runup*, hauteur d'eau, courant, etc.) ou de la vulnérabilité biophysique (vulnérabilité du bâti, dégâts à terre, en mer, etc.).

Ce bilan permet de faire ressortir la diversité des échelles, mais surtout le manque de consensus qu'il peut y avoir au niveau de la communauté scientifique. La partie suivante porte sur la présentation d'une nouvelle échelle d'intensité de tsunami, que nous appliquerons par la suite sur le littoral azuréen. L'idée est de permettre le lien entre l'aléa tsunami et l'exposition du territoire, pour aboutir à la vulnérabilité de cet espace.

3. Proposition d'une nouvelle échelle d'intensité combinant magnitude et impacts sur milieux terrestres et marins

De nombreuses échelles permettent une analyse de l'aléa tsunami, chacune faisant ressortir des points particuliers de cet aléa. Toutefois, aucune de celles présentées dans la partie précédente n'apporte entière satisfaction, car soit trop vague, soit trop spécialisée, soit trop laborieuse à mettre en place. De plus, passant par de la modélisation numérique pour obtenir les données d'aléa, certaines échelles ne peuvent être utilisées. Il nous est alors apparu important de mettre en place notre propre échelle d'intensité, qui répond à la définition d'intensité donnée, c'est-à-dire que celle-ci correspond à la combinaison de la magnitude et de la vulnérabilité biophysique.

Avant la mise en place d'une nouvelle échelle d'intensité de tsunami, il nous a fallu faire un bilan quant au cadre de travail, au type de données que nous souhaitions utiliser et enfin ce que nous souhaitions faire ressortir de cette échelle. Une fois le cadre d'étude et les conditions d'analyse posés, il convient d'expliquer comment s'est faite la création d'une nouvelle échelle d'intensité de tsunami, via la présentation des différents éléments de magnitude pris en considération, et les différentes échelles d'intensité existantes ayant servi de support à la création de la nouvelle échelle. Nous présenterons à la fin de cette partie la nouvelle échelle d'intensité mise en place.

L'ensemble des travaux présentés dans cette partie ont été réalisés en collaboration avec M. Ioualalen, mécanicien spécialiste des tsunamis et de leur simulation numérique au laboratoire Géoazur. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication (Boschetti et Ioualalen, 2020) disponible en annexe (Annexe 4).

3.1. Réflexions permettant d'aboutir à une nouvelle échelle d'intensité de tsunami

Le cadre de ces travaux se résume à des simulations numériques de propagation et d'impact de tsunamis reposant sur des scénarios de rupture sismique. L'objectif est donc la détermination d'une échelle d'intensité de tsunami utilisable avec des données obtenues par simulations numériques. Les sorties du modèle numérique, ici *Funwave*, donnent accès aux hauteurs de vagues maximales, à une estimation du *runup* (altitude du plus haut point inondé), ainsi qu'aux zones d'inondation. Sont également fournis les vitesses du courant induit par les tsunamis. Les tsunamis étant des ondes longues, ces courants induits sont horizontaux et homogènes sur la colonne d'eau (Airy, 1845).

Nous avons réalisé les trois cartographies (1) de hauteurs maximales de vagues, (2) des zones d'inondation et (3) de courants maximaux pour trois scénarios de rupture de faille. Celles-ci seront présentées dans le Chapitre 8 avec les résultats de la cartographie d'intensité. Nous avons opté pour une échelle de l'aléa s'appuyant sur ces trois grandeurs, correspondant ici à notre **échelle de magnitude**.

Pour ce qui concerne l'impact potentiel de la magnitude sur les populations et structures, c'est à dire l'intensité, nous nous sommes appuyée sur quatre échelles existantes que nous avons par la suite combinées. Il s'agit de celle de **Shuto (1993)**, **Papadopoulos et Imamura (2001)**, **Lynett et coll. (2014)** et celle utilisée dans les **PPR**. Nous en avons établi les limites grâce à une analyse théorique (théorie linéaire) et empirique (résultats de simulations numériques) reliant les paramètres que sont les **courants maximaux** (CUR_{max}) et les **hauteurs maximales** (H_{max}) des vagues de tsunami.

Nous avons ainsi couplé l'échelle d'intensité PPRI de crue avec l'échelle d'intensité de **Lynett et coll. (2014)** grâce aux échelles d'intensité de **Shuto (1993)** et **Papadopoulos et Imamura (2001)**. En effet, l'échelle de **Lynett et coll. (2014)** prend également en compte les hauteurs de vagues et courants mais elle s'applique aux impacts en milieu marin : dommages sur les structures marines flottantes (embarcations principalement). Les échelles de **Papadopoulos et coll. (2014)** et de **Shuto (1993)** permettent le lien entre ces deux premières.

La théorie linéaire des ondes longues de tsunamis, a été développée dans une publication (Boschetti et coll., 2020) afin de mettre en perspective le couple (H_{max} , CUR_{max}). Cette démonstration ne sera pas développée dans le corps de ce manuscrit mais est disponible dans l'article présenté en annexe (Annexe 5). Il faut toutefois retenir qu'il n'est pas possible de réduire les domaines où existe un couple (H_{max} , CUR_{max}).

3.2. Les éléments de la magnitude pris en compte pour la réalisation de cette nouvelle échelle d'intensité de tsunami

La mise en place de cette nouvelle échelle se fait à la fois sur des éléments liés à la magnitude et à la vulnérabilité. Ici nous nous focalisons sur les premiers. Elle passe donc par une discussion de l'action exercée par les courants, le degré d'inondation et les hauteurs des vagues.

- **Le courant de tsunami.**

L'expression approximative du courant maximal (Boschetti et Ioualalen, 2020) indique que plus la vague est haute, plus le courant serait important et donc moins seraient résistantes les personnes et les structures à cet aléa (accroissement de l'intensité de l'aléa). Toutefois, des courants forts avec cependant une faible hauteur d'inondation pourraient être plus destructeurs que des hauteurs d'inondations plus importantes mais avec de faibles courants induits. Cela est particulièrement observable sur les plages et les fronts de mer (Vidéo Com2sica) où la population balnéaire est particulièrement vulnérable.

La navigation maritime deviendrait également plus difficile : cela limiterait le sauvetage en mer ainsi que la possibilité de sortie d'un port ou d'une rade pour s'abriter au large, entraînant potentiellement des dégâts sur les navires et/ou dans les ports. La potentielle capacité de charriage d'objets conséquents sera également accru, ce qui va d'autant amplifier l'intensité de cet aléa car les eaux risquent d'être plus « chargées ». Lors du retrait de la vague, plus les courants sont importants, plus elle charriera (et ensevelira au large) ce qu'elle aura emporté.

- **Les hauteurs de vagues.**

Plus la vague est haute, plus, *a priori*, l'inondation est importante. Ceci est surtout vrai lorsque la vague rencontre des obstacles tels que des digues et des murs verticaux portuaires : une vague plus haute que l'obstacle favorise sa progression à terre. Dans le cas contraire, la vague se réfléchit, inhibant l'inondation. Ce phénomène est généralement extrêmement destructeur, puisque l'eau qui passe par-dessus les ouvrages de protections se retrouve généralement « bloquée » de l'autre côté du mur, sans moyen de s'écouler. L'inondation est alors aggravée, et les dommages, humains et matériels, considérables.

Ces ouvrages de protection ont globalement un effet négatif sur la perception du risque par la population. En effet, les personnes situées de l'autre côté du mur se sentent en sécurité, car protégées par une digue ou autres, et n'ont pas conscience

du risque encouru, ce qui fausse leur perception du risque (Provitolo et coll., 2017). C'est malheureusement ce qui s'est produit lors de la tempête Xynthia en février 2010 à la Faute-sur-Mer. Ce phénomène s'applique aux tsunamis et plus globalement à tout type d'inondation (principalement les crues) lorsque les territoires contiennent des ouvrages de protections.

Trivialement, plus la vague est haute, plus le volume d'eau impactant une personne et une structure sera important et plus grand sera l'impact (accroissement de l'intensité de l'aléa) avec des difficultés ou l'impossibilité de s'en extraire. Ceci est accentué par la capacité de charriage d'un tsunami dont les vitesses sont quasiment uniformes et horizontales (Airy, 1845) : les eaux sont alors chargées. Lors du retrait de la vague, plus la vague sera haute, plus elle charriera (et ensevelira au large) ce qu'elle aura emporté.

- [L'inondation.](#)

Le degré d'inondation est prioritairement un résultat des hauteurs de vagues et non de la force des courants. Les impacts dus aux courants et hauteurs de vagues s'étendent spatialement avec eux puisque l'inondation croît (avec les hauteurs de vagues). Cette information sur l'étendue de l'inondation est cruciale pour faire le lien avec la vulnérabilité biophysique, donnant l'emprise spatiale de l'aléa ce qui permet de faire ressortir les zones potentiellement exposées.

Ainsi, dans cette étude, nous ferons le choix de prendre en compte l'inondation comme aléa induit par le tsunami, *i.e.*, un des déterminants de l'intensité, et non comme un paramètre de celui-ci. Il s'agit donc d'un aléa induit. Les paramètres seront la vitesse des courants et les hauteurs de vagues ou *runup*.

[3.3. Les échelles existantes prises en compte pour la construction de cette nouvelle échelle d'intensité de tsunami](#)

En nous basant sur les travaux de nos prédécesseurs présentés plus haut dans ce chapitre, a été élaboré une échelle d'intensité qui combine hauteur d'eau, courant, dégâts à terre et en mer. Cette échelle a par la suite été appliquée au terrain d'étude qu'est la Côte-d'Azur et à nos hypothèses de travail (les résultats sont présentés dans le [Chapitre 8](#)).

L'échelle proposée à vocation à être plus particulièrement utilisée pour les études de l'aléa tsunami s'appuyant sur des simulations numériques de propagation et d'impact de tsunamis et non sur des mesures déduites de l'observation. La plupart des simulations numériques se base sur des tsunamis générés par un séisme. Il pourrait tout aussi bien s'agir d'un évènement ayant pour source un glissement.

Le bref état de l'art que nous avons réalisé précédemment a permis de faire ressortir les échelles d'intensité faisant usage des deux variables qui nous intéressent, c'est-à-dire les **hauteurs de vagues** et les **courants**. Nous avons ainsi basé cette

réflexion sur les travaux de [Lynett et coll. \(2014\)](#), [Papadopoulos et coll. \(2001\)](#), [Shuto \(1993\)](#) et sur des PPRI.

Nous avons tout d'abord focalisé notre attention sur les PPRI qui prennent en compte les hauteurs d'eau et les courants induits pour les inondations et les crues fluviales, premiers aléas en France et en Europe. En effet, l'aléa tsunami peut également mobiliser de grands volumes d'eau avec des débits importants et se produire de manière soudaine, comme peuvent l'être les pluies cévenoles ou méditerranéennes.

Sont ainsi mis en relation les courants et les hauteurs d'eaux, tout en faisant ressortir l'habileté de la population à s'extraire ou non d'une inondation ou d'une submersion ([Figure 45](#)). Sont également pris en compte la vulnérabilité des personnes (l'âge, la forme physique). En effet, un enfant et une personne âgée seront rapidement limités dans leurs mouvements et déplacements (à plus de 0.50 m d'eau et pour un courant supérieur à 0.50 m/s), alors qu'un adulte en bonne condition physique sera en mesure de se déplacer dans davantage d'eau (jusqu'à 1 m d'eau sans courant) ou de courant (jusqu'à 1 m/s dans 50 cm d'eau).

Ceci a ainsi servi de base à la construction de notre échelle d'intensité, permettant de caractériser les faibles courants et les faibles hauteurs d'eau, qui peuvent cependant avoir un grave impact sur les populations. **Les limites « d'extraction » de la zone de danger sont rapidement atteintes : au-delà d'une hauteur d'eau de 1 m et d'une vitesse de 1.5 m/s, les populations sont considérées comme étant dans une situation extrême quels que soient la hauteur d'eau et le courant.**

Il faut cependant être prudent dans l'utilisation de cette échelle pour la raison suivante : une hauteur d'eau bien supérieure à par exemple 2 m mettra en danger une personne de la même manière qu'une hauteur d'eau de 6 m. Par contre une hauteur d'eau de 6 m mettra en danger des personnes qui auraient été à l'abri à une hauteur d'eau de 2 m même à courant faible. Par exemple une personne située au premier étage d'un immeuble. Ainsi, dans l'échelle que nous voulons construire, au-delà d'une hauteur d'eau de 2 m, nous définirons d'autres niveaux d'intensité (> 3) pour des courants très faibles, ceci parce que le nombre de victimes est susceptible de croître avec la hauteur d'eau.

Par ailleurs, pour les tsunamis pouvant atteindre des hauteurs d'eau et des courants beaucoup plus importants, il convient d'étendre cette intensité aux dégâts autres qu'humains. Il nous a paru important d'inclure les dégâts potentiels en mer, sur les bateaux et autres structures marines, mais également les dégâts que ceux-ci pourraient engendrer s'ils venaient à rompre leurs amarres et ainsi être mobilisés par le tsunami. De telles menaces sont susceptibles d'apparaître au-delà des limites de hauteur d'eau et de courants proposées ci-dessus.

Afin de répondre à ces interrogations, nous nous sommes tout d'abord inspiré des travaux de [Lynett et coll. \(2014\)](#), qui mettent en relation les dégâts observés sur les structures marines mobiles lors d'évènements historiques avec les courants ([Figure 46](#)). Ces derniers nous permettent de fixer de nouveaux seuils, notamment le premier à partir duquel des dégâts sont observables : 3 nœuds ([Lynett et coll. 2014](#)), soit 1.5 m/s.

Ce seuil minimum d'impact est particulièrement intéressant, puisqu'il correspond au seuil des PPRI à partir duquel les dégâts sur les populations sont extrêmes (Figure 45). Une vitesse de 1.5 m/s est donc le seuil de transition naturel entre l'intensité à terre des PPRI et l'intensité en mer de Lynett et coll. (2014).

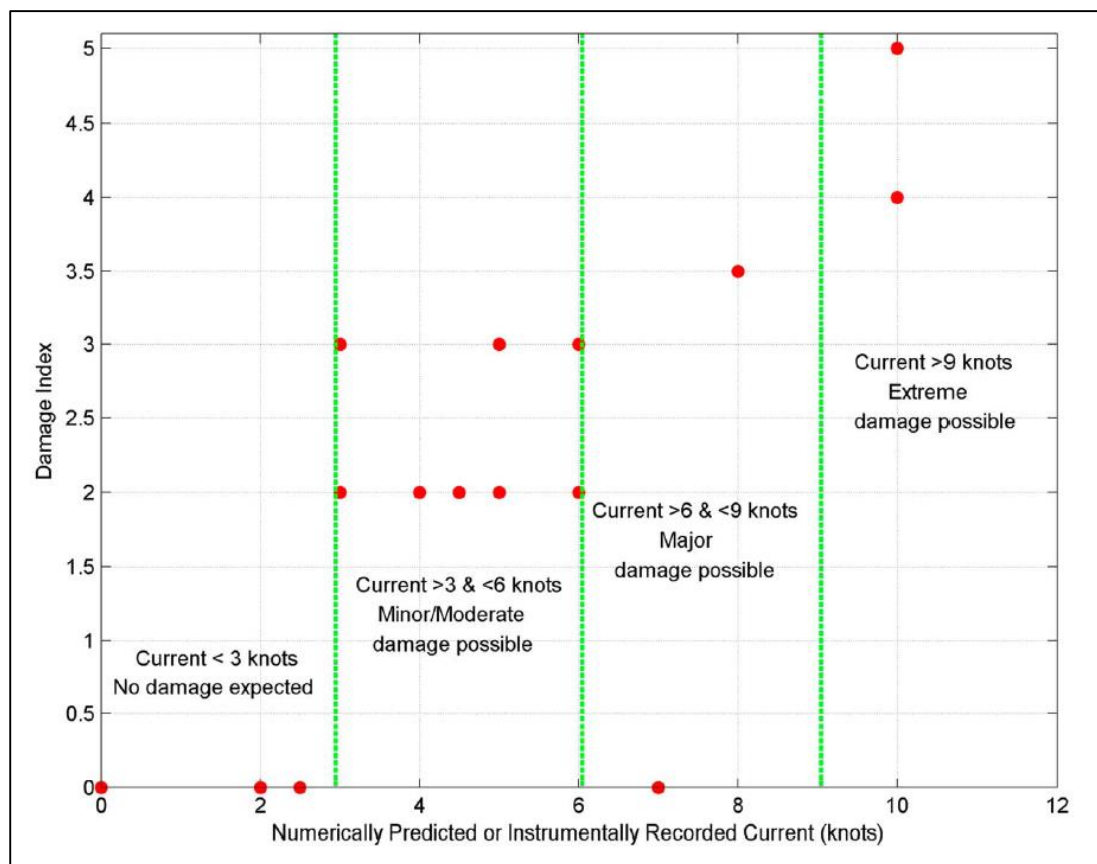


Figure 46 : Mise en relation des dégâts observés lors d'événements historiques et des courants (en nœuds)
(Lynett et coll., 2014).

L'élargissement du spectre des courants nous a amené à réfléchir à l'élargissement du spectre des hauteurs d'eaux. De nombreux travaux ont été réalisés sur la mise en relation des dégâts et des hauteurs de vagues. Nous avons choisi de nous focaliser sur deux échelles, celle de Papadopoulos et coll. (2001) et celle de Shuto (1993). La première, très détaillée, propose un grand nombre de niveaux. Elle nous a aidé à préciser les niveaux d'intensité que nous proposons. La seconde, également discutée dans Papadopoulos et coll. (2001), permet de faire le lien entre les deux échelles d'intensité et les hauteurs d'eau. Le Tableau 9 établit les liens entre les différentes échelles d'intensité, les hauteurs d'eau et les courants. Il nous a permis de déterminer des classes de hauteurs d'eau et de courant, c'est-à-dire de magnitude, pour chaque niveau d'intensité.

Les travaux de nos prédécesseurs ont ainsi permis le croisement et le recoupement d'informations aboutissant à l'obtention d'une nouvelle échelle d'intensité de tsunami. Cette dernière est à présent détaillée.

Intensité proposée	Lynett et coll. (2014)	Papadopoulos et coll. (2001)	Hmax (m)	Shuto (1993)	PPRI	BILAN
0	<1,5 m/s	I	<1 m	0	< 0,5 m <0,25 m/s	< 0,5 m <0,25 m/s
1	<1,5 m/s	II, III	<1 m	0	[0,5 ; 1[m [0 ; 0,25[m/s - [0 ; 1[m [0,25 ; 0,5[m/s	[0,5 ; 1[m [0 ; 0,25[m/s - [0 ; 1[m [0,25 ; 0,5[m/s
2	<1,5 m/s	IV	<1 m	0	[1 ; 2[m [0 ; 0,5[m/s - [0 ; 1[m [0,5 ; 1[m/s	[1 ; 2[m [0 ; 0,5[m/s - [0 ; 1[m [0,5 ; 1[m/s
3	<1,5 m/s	V	<2 m	1	[1 , 2[m [0,5 ; 1[m/s - >2 m > 1 m/s	[1 ; 2[m [0,5 ; 1[m/s - [0 ; 2[m [1 ; 1,5[m/s
4	[1,5 ; 3[m/s	VI, VII	[2 ; 3[m	1/2	[1 , 2[m [0,5 ; 1[m/s - >2 m > 1 m/s	[2 ; 3[m [0 ; 1,5[m/s - [0 ; 3[m [1,5 ; 3[m/s
5	[3 ; 4,5[m/s	VIII, IX	[3 ; 6[m	2	[1 , 2[m [0,5 ; 1[m/s - >2 m > 1 m/s	[3 ; 6[m [0 ; 3[m/s - [0 ; 6[m [3 ; 4,5[m/s
6	> 4.5 m/s	X, XI, XII	> 6 m	3/4/5	[1 , 2[m [0,5 ; 1[m/s - >2 m > 1 m/s	> 6 m [0 ; 4,5[- > 0 m > 4.5 m/s

Tableau 9 : Mise en relation des échelles de Lynett et coll. (2014), Papadopoulos et coll. (2001), Shuto (1993) et des PPRI.

Une échelle d'intensité est ainsi obtenue regroupant à la fois les impacts sur les populations et sur les structures maritimes selon la hauteur d'eau et la vitesse du courant.

3.4. L'obtention d'une nouvelle échelle d'intensité

Une fois les classes et les seuils déterminés, il a été possible de proposer une échelle d'intensité à 7 niveaux (Figure 47, Tableau 9). Cette dernière s'étend de zéro à six. Pour chaque niveau d'intensité de la Figure 47, correspond un descriptif présenté dans le Tableau 10. A chacun est attribué les informations de magnitudes (hauteurs d'eau et courants), ainsi que les potentiels dégâts occasionnés

Le premier niveau de cette échelle d'intensité est caractérisé par une intensité 0, cela ne signifie toutefois pas qu'elle soit nulle, mais qu'elle est faible, voire négligeable. Les déplacements, difficiles à cause de la hauteur d'eau et des courants, peuvent être d'autant plus compliqué en fonction de la structure de bord de mer et du sol (sable, galet, goudron, etc.).

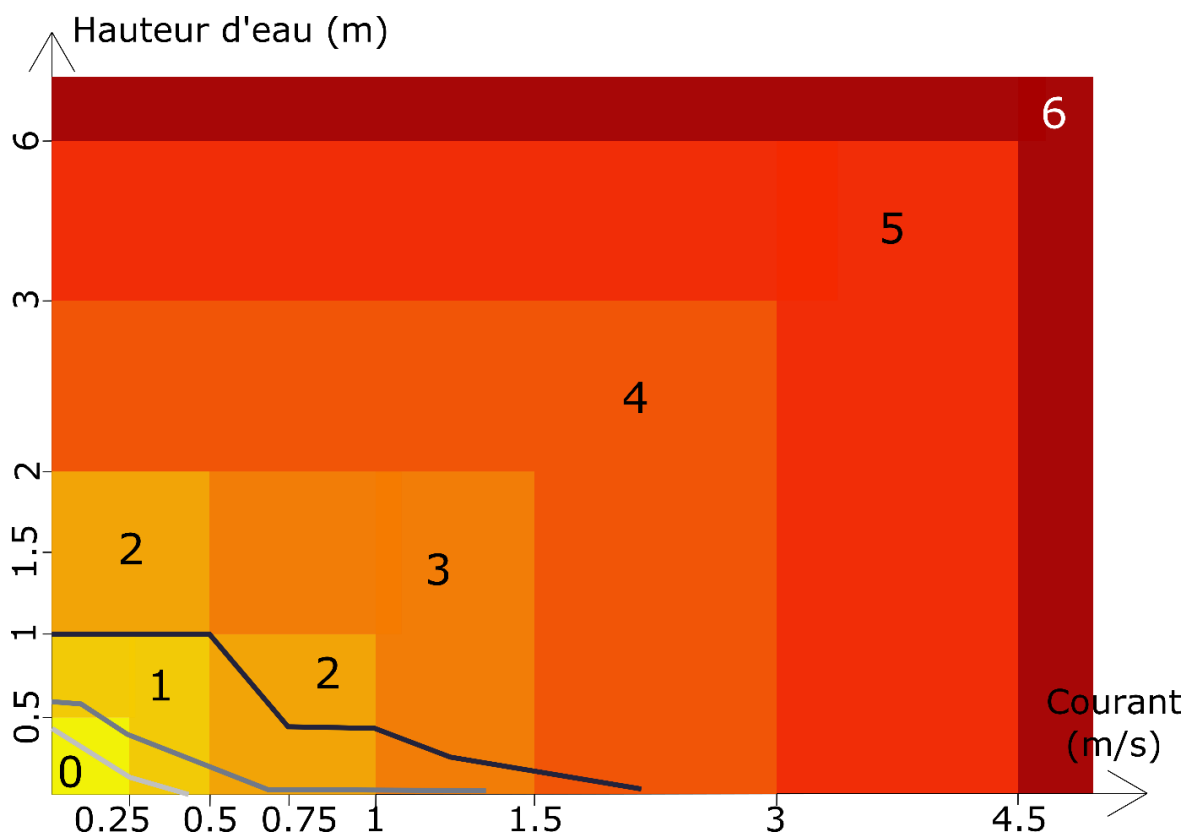


Figure 47 : Echelle d'intensité proposée en fonction de la hauteur d'eau (m) et des courants (m/s). La courbe gris claire représente la limite de déplacement debout d'un enfant ou d'une personne âgée, la courbe grise représente la limite de déplacement debout d'un adulte non sportif, et la courbe noire représente le déplacement debout d'un adulte sportif mais en situation de stress (d'après PPRI).

Cette échelle d'intensité compile l'ensemble des échelles citées précédemment (Papadopoulos et Imamura, 2001 ; Shuto, 1993 ; Lynette et coll., 2014 ; PPR, 1999, 2012), associant ainsi à niveau d'intensité à différentes caractéristiques :

- Les **dégâts humains à terre** : s'intéressent à la difficulté de déplacement et donc d'évacuation de la population, ainsi que la potentialité ou non de victimes ;
- Les **dégâts matériels à terre** : se focalisent sur le bâti et sur les structures et les objets à terre. Ils comprennent également les potentielles traces géologiques laissées par le retrait des vagues (sables, rochers, etc.) ;
- Les **dégâts en mer** : l'accent est mis sur les ports et les bateaux au mouillage ;
- La **perception du tsunami par les populations** : correspond aux éléments visuels pouvant être observés ainsi que les ressentis en mer (mouvements des bouées, mouvements irréguliers ressentis sur les embarcations, etc.). A terre, il s'agit davantage de la réaction de la population au phénomène (panique, évacuation, etc.)

Intensité de tsunami	Magnitude associée	Dégâts humains à terre	Dégâts matériels à terre	Dégâts en mer	Perception du tsunami par les populations	Prévention – Gestion du territoire
0	Hauteur d'eau et vitesse < 0,5 m <0,25 m/s	(PPR, 1999; PPR-Thau, 2012; Papadopoulos et Imamura, 2001) - Déplacement débout possible mais les enfants et les personnes âgées peuvent rencontrer des difficultés	(Shuto, 1991 ; Papadopoulos et Imamura, 2001) Pas de dégâts	(Lynett et coll., 2014 ; Papadopoulos et Imamura, 2001) - Pas de dégâts aux structures marines	(Lynett et coll., 2014 ; Papadopoulos et Imamura, 2001) - Non ressenti	(PPR, 1999; PPR-Thau, 2012) - Zones de prudence : limiter autant que possible le développement urbain ou agricole - Mise en place d'un système de surveillance - Réunions d'information publiques - Cartographie des risques
1	[0,5 ; 1[m [0 ; 0,25[m/s - [0 ; 1[m [0,25 ; 0,5[m/s	- Déplacement très difficile pour les enfants et les personnes âgées - Déplacement difficile pour un adulte non sportif - Faible probabilité de victimes	Pas de dégâts	- Pas de dégâts aux structures marines	- En mer : les petites bouées se déplacent - Ressenti par quelques personnes à bord de petites embarcations - Possiblement observé à terre	- Zones de prudence : limiter autant que possible le développement urbain ou agricole - Mise en place d'un système de surveillance - Réunions d'information publiques - Cartographie des risques
2	[1 ; 2[m [0 ; 0,5[m/s - [0 ; 1[m [0,5 ; 1[m/s	- Déplacement impossible pour les enfants et les personnes âgées - Déplacement très difficile pour un adulte non sportif - Déplacement difficile pour un adulte sportif - Augmentation du nombre de victimes potentielles	Pas de dégâts	- Pas de dégâts aux structures marines - Quelques petits bateaux sont déplacés à terre	- En mer : les petites bouées se déplacent - Ressenti par toutes les personnes à bord de petites embarcations ou par quelques personnes à bord de bateaux plus imposants	- Zones de danger : interdire le développement urbain et agricole - Mise en place d'un système de surveillance - Cartographie des risques - Mise en place d'un plan d'évacuation

					<ul style="list-style-type: none"> - Observé par le plupart des personnes à terre 	
3	<ul style="list-style-type: none"> [1 ; 2[m [0,5 ; 1[m/s - [0 ; 2[m [1 ; 1,5[m/s 	<ul style="list-style-type: none"> - Déplacement impossible pour les enfants et les personnes âgées - Déplacement quasi impossible pour un adulte non sportif - Déplacement très difficile pour un adulte sportif - Augmentation du nombre de victimes potentielles 	<ul style="list-style-type: none"> - Inondation limitée aux installations extérieures (jardins) et aux installations proches du rivage - Traces de sable laissées après le retrait des eaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Pratiquement aucun dégât aux structures marines (peu de chocs entre les bateaux) - Quelques petits bateaux sont déplacés à terre 	<ul style="list-style-type: none"> - En mer : les petites bouées se déplacent - Ressenti par toutes les personnes à bord d'embarcations (quel que soit la taille de celles-ci) - Observé par toutes les personnes à terre - Quelques personnes sont effrayées et se dirigent vers les hauteurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Zones de danger : interdire le développement urbain ou agricole. Supprimer autant que possible les aménagements existants.
4	<ul style="list-style-type: none"> [2 ; 3[m [0 ; 1,5[m/s - [0 ; 3[m [1,5 ; 3[m/s 	<ul style="list-style-type: none"> - Tenir debout est quasi impossible pour tous - Possibilité de se déplacer en nageant si le courant n'est pas trop fort - Impacts possibles avec de petits objets déplacés par le courant - Augmentation du nombre de victimes potentielles en raison du nombre plus important de victimes dans la zone surélevée 	<ul style="list-style-type: none"> - Dégâts dans un petit nombre de structures en bois - La plupart des bâtiments en maçonnerie résistent sans trop de dommages - Des objets de taille et d'instabilité variables se renversent et dérivent - Peu de radeaux d'aquaculture ont été emportés par les eaux - Des couches de sables et des accumulations de cailloux sont laissées par les eaux 	<ul style="list-style-type: none"> - 25 % des quais et/ou des petits bateaux sont endommagés - Des bateaux de taille moyenne au large sont endommagés - De nombreux petits bateaux sont violemment déplacés à terre 	<ul style="list-style-type: none"> - En mer : Les grosses bouées se déplacent - La plupart des personnes sont effrayées et se dirigent vers les hauteurs (en courant) 	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en place d'un système de surveillance - Réunions d'information du public - Cartographie des dangers - Mise en place d'un plan d'évacuation - Construction d'ouvrages de défense contre les dangers (digues) en favorisant la restauration de l'environnement (mangroves, végétation des berges, etc.)
5	<ul style="list-style-type: none"> [3 ; 6[m [0 ; 3[m/s - [0 ; 6[m [3 ; 4,5[m/s 	<ul style="list-style-type: none"> - Tenir debout est quasi impossible pour tous - Possibilité de se déplacer en nageant si le courant n'est pas trop fort - Quelques personnes peuvent être emportées - Impacts possibles avec de gros objets déplacés par le courant - Augmentation du nombre de victimes potentielles en raison du 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion des plages - Inondations importantes - De nombreux radeaux d'aquaculture ont été emportés - La plupart des structures en bois sont emportées ou démolies - Dégâts importants dans certains bâtiments en maçonnerie. - Les bâtiments en béton armé subissent de faibles dommages, 	<ul style="list-style-type: none"> - Dégâts modérés à importants aux bateaux à quai (<50% des quais et/ou des bateaux sont endommagés) - Des bateaux de tailles moyennes à grandes situés au large sont endommagés 	<ul style="list-style-type: none"> - En mer : de grandes bouées déplacées - Tout le monde s'enfuit vers les hauteurs 	

		nombre plus important de victimes dans la zone surélevée	certains sont inondés - Légers dégâts dans la forêt de protection des tsunamis (mangroves quand il y en a)	- De nombreux grands navires se déplacent violemment à terre		
6	> 6 m [0 ; 4,5[m/s - > 0 m > 4.5 m/s	- Tenir debout est quasi impossible pour tous - Possibilité de se déplacer en nageant si le courant n'est pas trop fort - De nombreuses personnes peuvent être emportées - Impacts possibles avec de gros objets déplacés par le courant - Augmentation du nombre de victimes potentielles en raison du nombre plus important de victimes dans la zone surélevée	- Des voitures sont renversées ou dérivées - Possibilité de fuites de gaz ou d'autres matières (marée noire) - Dégâts importants dans certains bâtiments en maçonnerie. - Les bâtiments en béton armé subissent de dégâts	- Dommages importants à extrêmes aux quais et aux bateaux non amarrés (>50% des bateaux sont endommagés) - Plusieurs bateaux entrent en collision avec des bâtiments	- En mer : de grandes bouées déplacées - Panique générale	

Tableau 10 : Echelle d'intensité proposée et potentiels dégâts occasionnés sur les humains et les structures marines.

- Les **mesures de prévention conseillées** : ici sont tirés des conseils et/ou des directives de construction et de prévention dont le but est de réfléchir en amont pour limiter les dégâts du phénomène (ici un tsunami mais s'applique pour l'ensemble des aléas).

La mise en place de cette nouvelle échelle d'intensité de tsunami présente une certaine originalité, de par les éléments pris en compte pour la magnitude, le courant et la hauteur d'eau, ainsi que par l'intégration des dégâts à terre et en mer. Elle présente cependant des limites, elle a été construite à partir de travaux de nos prédécesseurs et non pas des observations que nous avons réalisées. Elle nécessite donc d'être testée par une mise en application. Cette dernière est réalisée dans le [Chapitre 8](#).

4. [Conclusion](#)

Ce chapitre se focalise sur la question de la magnitude et de l'intensité du tsunami. Après une analyse bibliographique, il a été montré l'existence d'une multitude d'échelles soulignant un flou quant aux définitions des variables, ce qui entraîne de ce fait certaines incohérences dans les échelles existantes. Certaines sont considérées comme des échelles d'intensité alors que dans les faits il s'agit d'échelles de magnitude, et inversement.

L'analyse des travaux de nos prédécesseurs a permis de relever les variables importantes et originales dont il faut tenir compte. Ici, une focalisation a été faite sur les **hauteurs d'eau** (et non les *runup*) et les **courants**. Des croisements entre plusieurs échelles ont permis la détermination d'une **échelle de synthèse**. Celle-ci est très largement inspirée d'une échelle initialement utilisée pour le risque d'inondation. Elle permet justement de mettre en relation les hauteurs d'eau et les courants, ainsi que la difficulté à se déplacer associée.

Une mise en application a été réalisée sur le littoral azuréen. Avant de présenter les cartographies obtenues, une focalisation est faite sur la modélisation numérique de tsunami.

CHAPITRE 7 : DE LA MODELISATION A LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA TSUNAMI

Les tsunamis sont des événements brutaux, générés par d'autres événements et impossibles à prévoir. Ils sont donc difficiles à étudier et l'acquisition de données s'avère plus ou moins délicate selon les événements, leur localisation et leur intensité. Afin de faciliter leur étude, des modèles numériques ont été développés. Ils permettent, de manière relativement simple et rapide, d'obtenir des données calculées et simulées d'événements historiques ou hypothétiques.

L'analyse de l'aléa est un des points clés d'une analyse de risque, qui combine l'aléa et la vulnérabilité d'un territoire. En plus de la bonne connaissance d'un territoire et de ces enjeux majeurs, il est nécessaire d'avoir une bonne compréhension de la menace, ici le tsunami, de son fonctionnement, de sa récurrence et de sa zone d'impact potentielle. Ici est ainsi posée une première pierre permettant d'aboutir à une étude sur le risque de tsunami dans les Alpes-Maritimes.

Un premier point est fait quant à l'utilité de ces modèles numériques et sur les différents modèles de simulations existants. Un deuxième point s'intéresse aux travaux historiques réalisés dans le bassin Ligure et plus particulièrement sur le système de failles Ligure (*Ligurian Fault System*). Tout ceci aboutit à la sélection de trois scénarios d'étude de l'aléa. Un troisième se focalise sur la modélisation numérique via le modèle *Funwave*. Et enfin, un dernier point permet de faire le lien avec l'analyse de risque ([Partie IV](#)) présentée plus loin dans ce manuscrit.

1. La modélisation numérique de tsunamis, apports aux sciences de l'univers et aux cindyniques

La modélisation numérique est un outil qui permet d'approfondir les connaissances d'un phénomène et de faire des simulations sur un événement potentiel. Ici il s'agit de la modélisation de tsunamis d'origine sismique. Nous nous interrogeons tout d'abord sur son intérêt. Puis nous abordons les deux modélisations numériques possibles : les modèles de génération de tsunamis et les modèles de propagation.

1.1. Intérêt de la modélisation numérique

Dans ce travail nous nous intéressons à l'aléa tsunami et plus précisément l'aléa tsunami en mer Ligure. Idéalement, nous avons besoin d'observations et de mesures couvrant de façon aussi large que possible, dans le temps et dans l'espace, cet aléa. La tâche est d'autant plus ardue en zone Ligure car les périodes de retour des séismes tsunamigènes sont plutôt mal connues. Pour les tsunamis d'origine cosismique, nous ne disposons que d'un seul événement de référence, celui du 23 février 1887.

Les données d'observation sont donc statistiquement limitées. Elles ne peuvent en aucun cas servir d'appui à une étude représentative et fiable de l'aléa tsunami car nous ne connaissons pas la période de temps sur laquelle nous devons travailler (décennale, centennale, millénaire ?). A supposer que nous la connaissions, il faudrait aussi que nous ayons à notre disposition les données et observations de tous les tsunamis qui s'y sont produits, et non seulement concernant les événements les plus extrêmes. Bien entendu, ces données devraient être en mesure de couvrir toute la zone géographique qui nous intéresse.

Prenons l'exemple du tsunami de Sumatra du 26 décembre 2004. Son impact s'est fait ressentir sur plusieurs milliers de kilomètres (Figure 35) : Golfe du Bengale (Inde, Sri Lanka et Sumatra), Mer d'Andaman (Sumatra et Thaïlande) et les côtes de l'Afrique de l'Est. L'étude de l'aléa tsunami d'un tel événement nécessiterait des années d'échantillonnage des côtes touchées, sans oublier que certaines zones, comme les côtes du Bangladesh, n'ont pas été impactées comme nous aurions pu nous y attendre, et que les traces du tsunami disparaissent avec le temps. Par ailleurs, de mémoire collective, aucun autre événement de cette ampleur n'a été reporté, expliquant la non préparation des populations.

Face à ces difficultés méthodologiques, la modélisation numérique de la propagation et de l'impact à la côte des tsunamis s'avère être un outil précieux. A condition que ces simulations numériques soient précises, on se libère de toutes les contraintes énumérées ci-dessus. La précision des modèles n'atteindra jamais celle des observations, mais celle-ci est en constante progression.

Ainsi, à moindre coût, les modèles numériques permettent de simuler un grand nombre de scénarios, prenant en considération tous les événements possibles et pas uniquement les extrêmes, liés à l'aléa sismique de la zone étudiée. Les temps de calculs (de quelques heures à quelques semaines suivant les moyens de calculs) sont quasiment instantanés par rapport aux périodes d'observations requises.

Les modèles numériques permettent également, à moindre coût, d'obtenir et ainsi visualiser l'impact d'un tsunami à une échelle synoptique, *i.e.* régionale. Ainsi, le temps d'une simulation est également quasi instantané, par rapport au temps d'échantillonnage des effets *in situ* de ce même événement.

La simulation numérique d'un grand nombre de scénarios permet d'identifier les processus physiques expliquant la disparité géographique de l'impact de l'aléa. Ainsi, de façon **générique**, il peut être possible d'identifier les zones à risques et celles qui pourraient être protégées. Par exemple, [loulalen et coll. \(2007b\)](#) ont montré que les côtes du Bangladesh avaient été très peu impactées par le tsunami de 2004 grâce à la présence d'une multitude de canyons sous-marins qui ont tendance à faire diverger la vague et donc à l'atténuer par dé-focalisation.

Les événements sismiques et gravitaires n'étant pas prévisibles, il en va de même par définition pour les tsunamis qui sont, pour la plus grande majorité, une résultante de ces derniers. La détermination de scénarios sismiques et/ou gravitaires, permet de réaliser un grand nombre de simulations de la propagation et d'inondation des tsunamis potentiellement générés. Ces simulations, réalisées en amont, permettent d'analyser les impacts potentiels à terre. Celles-ci sont également utilisées

par les centres en charge de l'alerte (*i.e.* CENALT⁷ pour la France) afin de déterminer si un événement venant de se produire est potentiellement tsunamigène ou non et, si oui, quelles peuvent être les zones potentiellement touchées.

Dans le cas où les sources géophysiques seraient mal connues, voir inconnues, les modèles numériques permettent de les caractériser à minima, notamment si on les combine avec des données hydrographiques, comme les marégrammes. En effet, des marégraphes sont opérationnels depuis plus d'un siècle sur la plupart des zones portuaires. A l'origine, ils ont pour vocation à enregistrer et surveiller les marées. Par la suite, ils ont été utilisés pour enregistrer les vagues et suivre le niveau moyen des océans. Depuis quelques décennies, ils permettent de calibrer les altimètres qui eux-mêmes permettent de mesurer les anomalies de niveau de la mer.

Depuis une décennie environ, les données hydrographiques sont utilisées en complément des données sismiques (stations sismiques) et des mouvements des sols (GPS et imagerie). Elles peuvent également être utilisées seules lorsque ces données géophysiques ne sont pas disponibles. C'est le cas des événements anciens (plus d'une cinquantaine d'années). Cependant, ces marégraphes ont généralement été installés en zones abritées pour les protéger et y avoir un meilleur accès. Pour cela, ils ont généralement été installés en zone portuaire. Or ces zones sont le siège d'importants effets de sites (trait de côte complexe) qui rendent difficile leur bonne prise en compte par les modèles.

Les simulations numériques peuvent nécessiter d'important temps de calcul et de mémoire dynamique. Pour remédier à cette difficulté, les modèles numériques sont en constante progression (grilles de calcul emboîtées et/ou résolution spatiale variable dans une même grille), et s'appuient sur des données de terrain de plus en plus précises comme celles issues du réseau de mesure des vagues. A titre d'exemple on peut citer le réseau de bouées DART (*Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis*) qui est en constante progression depuis une dizaine d'années. Ces bouées sont implantées au large pour éviter précisément ces effets de site. Ces méthodologies d'utilisation des données hydrodynamiques associées au marégraphe de Gène qui a enregistré le tsunami généré par le séisme Ligure de 1887 ont ainsi été utilisées par Larroque et coll. (2012) et Ioualalen et coll. (2014) pour évaluer avec plus de précision la magnitude de ce séisme.

La modélisation numérique de tsunami se décompose en deux sous-catégories, les modèles numériques de génération de tsunamis, et les modèles numériques de propagation de tsunamis. Les premiers s'intéressent aux mécanismes de formation du tsunami, et donc à l'aléa qui permet au tsunami de se créer (généralement un séisme ou un glissement de terrain), qui va par la suite provoquer une perturbation de la colonne d'eau située au-dessus. Les seconds se focalisent sur la propagation des ondes marines et sur leurs impacts à la côte.

⁷ CENtre d'Alerte aux Tsunamis

1.2. La modélisation numérique comme outils de simulation de la génération de tsunamis d'origine sismique

Les modèles de génération de tsunamis sont différents en fonction de la source génératrice de ce phénomène (séismes, glissements). Les mécanismes de ces évènements étant différents, il faut tenir compte des spécificités de chacun. Nous nous focalisons ici sur les tsunamis générés par des séismes, qui représentent à eux seuls 81% des causes de tsunamis (NOAA 2019).

Les modèles de génération de tsunami suite à un séisme se basent sur la méthodologie mise en place par les travaux d'Okada (1985) en mécanique des roches. Cette méthodologie ne s'intéresse pas directement au tsunami, mais au déplacement du fond marin, l'objectif étant d'en calculer la déformation. Les paramètres de ruptures ont été exposés précédemment.

A partir de certains des paramètres d'Okada (1985) il est possible de retrouver la valeur du moment sismique (M_0) et la magnitude d'un séisme (M_w), grâce aux relations de Hanks et Kanamori (1979). Plusieurs de ces paramètres ont un impact sur la formation d'un tsunami, et notamment sur sa puissance. La magnitude du séisme joue un rôle crucial, puisqu'un séisme suffisamment puissant est nécessaire à la formation d'un tsunami. Ce à quoi vient s'ajouter la profondeur de la source du séisme (hypocentre), qui va influencer sur l'énergie ressentie à la surface (terrestre ou océanique).

En effet, plus cette profondeur est faible, plus la probabilité que le plancher océanique se déforme fortement est élevée, et induise donc un déplacement brutal et conséquent de la masse d'eau qui se trouve au-dessus. Il a en effet été posé comme hypothèse, que la déformation subie par le fond marin est reproduite à l'identique à la surface océanique de cette zone (ce qui se passe au fond de l'océan se passe à la surface).

La solution d'Okada (1985), la déformation du plancher océanique, est transposée à la colonne d'eau, et va ainsi correspondre à la vague initiale. Cette hypothèse est admise pour les séismes rapides (vitesse des ondes P > 1km/s) (Kajiura, 1970), car il y a un mouvement brutal des roches, libérant une grande quantité d'énergie, et favorisant donc la génération d'un tsunami. La propagation de cette vague sera alors calculée par un modèle de propagation de tsunami.

1.3. Les modèles numériques permettant la simulation de la propagation des tsunamis

Il existe plusieurs classes de modèles numériques permettant de modéliser la propagation des tsunamis. On retiendra les deux principaux : **les modèles d'ondes longues** (*shallow water*, SW), et les **modèles de type Boussinesq**. Il est important de souligner que, quel que soit le modèle de propagation utilisé, un modèle de génération de tsunami est nécessaire.

Les modèles de type Boussinesq sont dispersifs, à l'opposé des modèles SW : lorsqu'une onde est dispersive ses composantes fréquentielles se déplacent à des

vitesses différentes. Ainsi l'onde change de forme au fur et à mesure de sa propagation indépendamment de la variation des propriétés du milieu dans lequel elle se propage (changement bathymétrique, topographique) : cette modification de sa forme est intrinsèque. Elle a donc une histoire dont il faut tenir compte. Les tsunamis étant des ondes longues, ils sont généralement peu dispersifs. A l'approche des côtes, en eaux peu profondes, il est recommandé de tenir compte des effets dispersifs. Lorsque le tsunami s'est propagé au large sur des grandes distances, il convient d'en tenir compte systématiquement.

Dans cette étude, bien qu'étant plus consommateur en temps de calcul qu'un modèle SW, nous utiliserons *Funwave* un modèle dispersif (de type Boussinesq) qui a été développé par l'Université du Delaware (Wei et coll., 1995). *Funwave* inclue également un module qui permet de simuler l'inondation, i.e., le trait de côte est mobile (Kennedy et coll., 2000). Outre la physique mobilisée (SW ou Boussinesq) la qualité d'une simulation numérique dépend aussi de la précision de la grille de calcul construite et des données bathymétriques et topographiques utilisées.

Dans le cadre de notre recherche, nous nous focalisons sur la Faille Ligure qui a été l'objet de nombreux travaux. Nous avons refait les simulations décrites par [loulalen et coll. \(2014\)](#) en améliorant toutefois grandement leur précision, grâce à la construction d'une grille de calcul beaucoup plus fine : dans les premiers travaux la résolution de la grille était de 100 mètres, contre 40 mètres pour les nouvelles simulations. Une présentation rapide des travaux de nos prédécesseurs est nécessaire à la compréhension du fonctionnement de la zone.

2. Travaux de nos prédécesseurs et choix des scénarios sismo-tectoniques

Le séisme Ligure est un événement emblématique du bassin Liguro-Provençal. Il a fait l'objet de travaux scientifiques, qu'il s'agisse de chercher la source, l'épicentre et les caractéristiques sismiques, ou de chercher à reproduire les effets du tsunami le long des côtes. Le laboratoire Géoazur a été le moteur d'un grand nombre de ces travaux et l'est encore aujourd'hui avec par exemple la campagne en mer SEFASILS. Cette dernière s'est déroulée en novembre 2018, avec pour objectif principal l'acquisition de données, qui sont aujourd'hui en phase de traitement et doivent à terme permettre de mieux comprendre les failles actives au large de Nice.

Nous nous focalisons ici sur un historique rapide des travaux réalisés sur la zone. Ces derniers ont proposé plusieurs scénarios sismo-tectoniques liant des caractéristiques sismiques à un tsunami modélisé associé. Seulement trois scénarios ont été sélectionnés (S1887, SHyp et STot).

2.1. Quelques rares travaux d'analyse du tsunami co-sismique de 1887

Une compréhension à échelle fine, ici la faille Ligure, passe par une compréhension géologique plus large. L'ensemble alpin et la région Ligure sont

caractérisés par une déformation faible à moyenne (Larroque et coll., 2001). La marge nord Ligure présente un régime tectonique compressif (Béthoux et coll., 1992 ; Larroque et coll., 2001 ; Bigot-Cormier et coll., 2000 ; Béthoux et coll., 2008 ; Larroque et coll., 2009). En mer, les données récoltées pendant la campagne de sondages géophysiques marins MALISAR, ont permis l'obtention d'images de structures de surface et de sub-surface le long de la marge Ligure. Ces données ont permis à Larroque et coll. (2012) de caractériser la déformation compressive du Plio-Quaternaire, et plus particulièrement le système de faille Ligure (LFS), un système de failles actives de 80km de long au pied de la pente continentale (Larroque et coll., 2011). Le système de faille Ligure a d'ailleurs été considéré par Larroque et coll. (2012) comme étant la source du séisme destructeur du 23 octobre 1887.

Les principaux travaux de nos prédécesseurs, se focalisant sur la faille Ligure, ont porté sur la compréhension de la faille, le séisme et le tsunami associé. Ils ont été réalisés par Larroque et coll. (2009, 2012), puis complétés par ceux de loulalen et coll. (2014). Le BRGM (2011) s'est également intéressé aux tsunamis dans le bassin Ligure lors de la réalisation des BD Tsunami (Lambert, 2008 ; Lambert, 2009 ; Lambert et coll., 2011 ; Lambert et coll., 2012). Les premiers auteurs, se sont principalement intéressés à l'aspect tectonique, à la sismicité de la zone, et à la détermination du plan de faille du séisme de 1887. Plusieurs scénarios construits sur la longueur de la faille qui aurait rompu ont été proposés. Ils ont servi de source à des simulations de tsunami dont les résultats ont été comparés à la seule donnée disponible du tsunami associé à cet évènement : le marégramme de Gènes.

Les seconds auteurs (loulalen et coll., 2014) se focalisèrent quant à eux sur le tsunami généré à partir des scénarios sismiques déterminés par Larroque et coll. (2012), en reprenant l'évènement historique et en le comparant de nouveau avec le marégramme de Gènes, puis en développant des scénarios potentiels pour l'étude de l'aléa tsunami. Dans les deux cas, des simulations de tsunami ont été réalisées pour l'évènement de 1887. La différence principale a été une recalibration du marégramme de Gènes, c'est-à-dire une correction du signal qui avait été mal interprété par le passé. Ceci a permis de retrouver, parmi les différents scénarios réalisés, celui qui correspondait au mieux à cet évènement de référence, en comparant les signaux réels du marégramme à ceux obtenus par simulation numérique.

Une fois le tsunami de 1887 reconstitué numériquement (scénario S7 de loulalen et coll., 2014), d'autres scénarios ont été réalisés en simulant différentes ruptures au niveau de la faille. Deux d'entre eux ont retenu notre attention, en plus de l'évènement de référence historique de 1887 (S7). Avant de les présenter, il convient de présenter plus en détail le *Ligurian Fault System* (LSF).

2.2. Le choix des scénarios sismo-tectoniques

Le bassin Ligure est une des zones les plus sismiques d'Europe occidentale, comprenant la faille Ligure, également appelée LFS (*Ligurian Fault System*). Cette faille, de 80 km de long, est orientée selon un axe NE-SO (selon un azimut de N55°E). Il ne s'agit en fait pas d'une seule faille continue, mais d'un réseau de failles actives (Figure 48). La Figure 48 représente la localisation de la faille Ligure, ainsi que la bathymétrie de la zone. Elle s'étend le long de la Riviera franco-italienne, posant ainsi

la question de l'exposition de ces territoires, fortement anthropisés et aux fortes densités de population, aux aléas sismiques et tsunamiques.

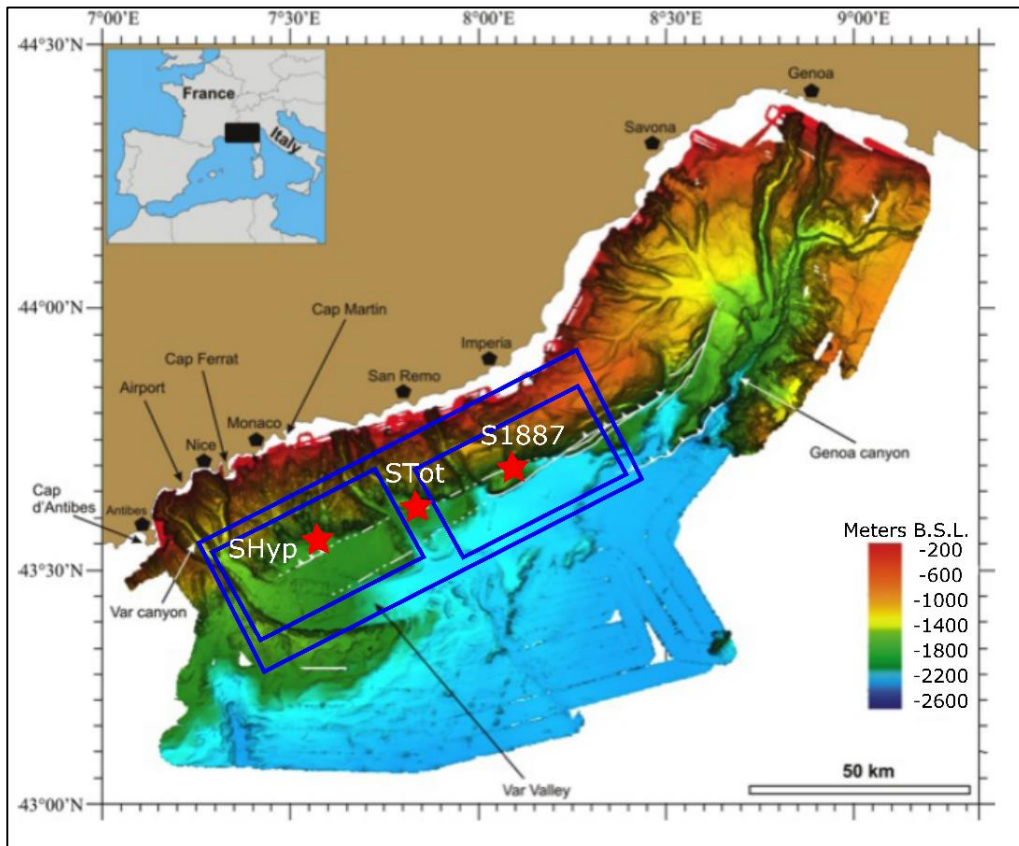


Figure 48 : Localisation du réseau de failles Ligure (en blanc) dans le bassin, la bathymétrie de la zone (campagnes océanographiques MALISAR) ainsi que le positionnement du plan de faille et des épacentres des différents scénarios utilisés (S1887, SHyp et Stot)

(D'après loulalen et coll., 2014)

BSL pour Bathymétrie référencée par rapport au niveau de la mer (Bathymetry vs. Sea Level en anglais).

Le séisme du 23 février 1887 sert de référence à cette étude de l'aléa tsunami, car il est l'évènement emblématique de la zone Ligure. De ce scénario sont déduits d'autres évènements hypothétiques pouvant caractériser au mieux l'aléa sismique associé à l'aléa tsunami. Les caractéristiques de ce séisme ont été proposées par Larroque et coll. (2012) puis par loulalen et coll. (2014). Pour cela, le marégraphe de Gènes a été utilisé et l'enregistrement a été traité (Eva et Rabinovich, 1997) laissant apparaître le tsunami induit par le séisme.

Plusieurs scénarios de séismes ont été construits grâce à (i) une étude sismo-tectonique de la région Ligure, et à (ii) l'utilisation de lois d'échelles récentes. Ces scénarios de ruptures ont servi à calculer la déformation du fond marin grâce à la méthode d'Okada (1985). L'hypothèse de mouvement rapide a été effectuée : ainsi les auteurs ont fait correspondre cette déformation avec la vague initiale de tsunami.

Pour chaque scénario, la propagation du tsunami associé a été calculée numériquement. Le marégramme de Gènes a été comparé au point de grille du marégraphe afin de voir s'il y a une concordance entre les données obtenues numériquement et les données mesurées. Le résultat du scénario S1887 est celui qui

correspond le mieux au signal observé. Les caractéristiques physiques du plan de faille sont détaillées dans le [Tableau 11](#) et sa magnitude est estimée à $M_w = 6.91$. A partir de ces travaux, deux autres hypothèses de ruptures et de tsunamis sont retenues : SHyp et STot ([Figure 48](#), [Tableau 11](#)).

Scénario	S1887	SHyp	STot
Cinématique Type de faille	Inverse	Inverse	Inverse
Centroïde du plan de faille (x_0, y_0)	(8.08°E, 43.70°N)	(7.55°E, 43.58°N)	(7.815°E, 43.640°N)
d - Profondeur focale (km)	15	15	15
L - Longueur (km)	35	35	80
W - Largeur (km)	17	17	27
∅ - Azimut	N55°E	N55°E	N70°E
δ - Pendage	16°N	16°N	16°N
Δ - Quantité de déplacement (km)	1.5	1.5	3.3
M₀ - (N m)	2.95 x 10 ¹⁹	2.95 x 10 ¹⁹	2.24 x 10 ²⁰
M_w - Magnitude (HK79)	6.91	6.91	7.51

[Tableau 11](#) : Détails des trois scénarios et les différents paramètres physiques pris en compte (selon [Ioualalen et coll., 2014](#)).

d représente la profondeur du centroïde du plan de rupture, *L* est la longueur le long de l'azimut du plan de faille et *W* est sa largeur. \varnothing est l'angle azimuth (strike en anglais), δ est l'angle de pendage (dip en anglais), l'angle de décrochement (rake en anglais) est pris à 90° (pure thrust en anglais). Δ est le déplacement maximal dans le plan de rupture (au centroïde). Le coefficient de cisaillement pris est 3.3×10^{10} Pa. M_0 est le moment sismique et M_w est la magnitude.

Un scénario de rupture se caractérise par la position et les mouvements du plan de rupture ou de faille ([Figure 48](#)). Dans un premier temps, les études morphotectoniques et macrosismiques, ont permis de déterminer sa longueur (*L*), sa profondeur focale (*d*), son azimut (\varnothing) et son pendage (δ). A partir de la longueur (*L*), ont été déduites, via des **lois d'échelles**, sa largeur (*W*), la magnitude (M_w) et le moment sismique (M_0) du séisme et le déplacement maximal (Δ) du plan de rupture. Dans ce cas précis, les lois d'échelles de [Wells et Coppersmith \(1994\)](#) ont été utilisées par [Larroque et coll. \(2012\)](#) et [Ioualalen et coll. \(2014\)](#) car elles correspondent à des lois d'échelles dédiées aux systèmes de failles inverses. De par le manque d'information il a été pris en considération que la faille n'était pas décrochante (hypothèse *pure thrust* en anglais). Tous les paramètres sont ainsi établis pour les scénarios choisis et sont représentés dans le [Tableau 11](#). Les incertitudes liées au choix de ces paramètres sont largement discutées dans [Ioualalen et coll. \(2014\)](#).

Le scénario **S1887** correspond à l'évènement historique. La rupture est localisée sur la partie est de la faille, en système de faille inverse, avec un azimut de N55°E ([Figure 48](#), [Tableau 11](#)). Dans ce cas précis, la rupture ne s'étendrait que sur 35

km (l'ensemble de la faille faisant 80 km de longueur). Un scénario similaire de par les paramètres utilisés, mais différent quant à la localisation de la rupture sur la faille a été pensé, il s'agit du scénario **SHyp**. Ce dernier correspondant en tout point au scénario S7 au niveau des caractéristiques sismiques, à l'exception de son positionnement sur la faille.

Le premier se situe sur la partie est de la faille, en Italie, au large d'Impéria, alors que le second est localisé sur la partie ouest de la faille, chevauchant les deux bords de la frontière franco-italienne, plus proche de la partie française et donc du littoral azuréen, littoral fortement urbanisé et présentant de nombreux enjeux. Dans celui-ci, le centroïde, a été déplacé vers l'ouest, donc vers les côtes françaises, et correspond à la zone n'ayant pas rompu lors de l'évènement de 1887.

Considérant la longueur et la géométrie du système de failles Ligure, un scénario extrême a été envisagé, le scénario **STot**. Ce dernier correspond à un évènement extrême où l'ensemble de la faille viendrait à rompre, c'est-à-dire une rupture de 80 km. Il répond à une injonction de l'UNESCO qui appelle à se préparer aux évènements extrêmes, ainsi qu'à une politique française lancée par l'ancienne Ministre de l'écologie, Ségolène Royale. Ces trois scénarios sont détaillés plus loin. Pour chacun, des simulations numériques de tsunamis ont été effectuées afin de déterminer les zones pouvant potentiellement être inondées, ainsi que l'étendue de ces inondations sur le territoire azuréen. Ces résultats sont cruciaux pour réaliser une analyse d'aléa et aboutir à une étude du risque de tsunami.

Les grilles de calcul et ainsi la précision de calcul ont été considérablement améliorées après [Larroque et coll. \(2012\)](#) (résolution à 200m) puis [loulalen et coll. \(2014\)](#) (résolution à 100m). Les simulations présentées dans ces travaux sont réalisées avec une résolution de 40 mètres, permettant une représentation relativement précise du territoire et notamment de la côte et de ses particularités. Un point rapide sur la construction de la grille de calcul utilisée est alors nécessaire, cette dernière permettant la réalisation des modélisations numériques

3. La modélisation numérique, *Funwave*

La modélisation numérique apparaît ici comme un outil indispensable à la compréhension de l'aléa ainsi qu'à la détermination de sa potentielle emprise spatiale le long du littoral azuréen. Cette dernière permet l'obtention de données numériques continues, qui sont analysées et étudiées afin de faire ressortir les particularités locales. Ces modèles numériques ne sont fonctionnels que si certaines données sont disponibles. Ici, sont nécessaires des données sismiques (présentées précédemment), concernant la formation de la vague initiale, et des données bathymétriques, permettant de simuler la propagation de la vague jusqu'aux côtes. Une explication rapide de la construction de la grille de calcul est réalisée, avant de s'attarder quelques instants sur les sorties de modèles et la donnée ainsi produite.

3.1. Construction de la grille de calcul et modèle numérique utilisé - Funwave

Comme nous l'avons vu précédemment, la modélisation numérique de tsunami se réalise en deux temps, le premier permettant la génération de la vague et le second la propagation de cette dernière. Pour cela, il faut créer une grille de calcul de la résolution souhaitée (ici 40 mètres) permettant ainsi au modèle numérique de tourner. De cette grille de calcul dépend la résolution des données obtenues. Plus elle est fine, plus grande sera la précision.

Le modèle dispersif de propagation non linéaire, *Funwave* (Wei et Kirby, 1995 ; Wei et coll., 1995) est utilisé dans ces travaux. Il permet de réaliser des simulations numériques de propagation des tsunamis générés par les scénarios sélectionnés. Ce modèle intègre la grille de calcul, ainsi que les paramètres de rupture définis pour chaque scénario (Tableau 11) et calcule la propagation du tsunami en chaque point de la grille et à chaque pas de temps. Kennedy et coll. (2000) and Chen et coll. (2000) ont établi une méthode de plage perméable, utilisée pour garder la portion subaérienne des grilles du modèle numériquement active et pour simplifier les calculs de *runup* sur les rivages émergés. La dissipation causée par le déferlement des vagues et la friction de fond ont été pris en compte dans les simulations (Chen et coll. 2000).

La grille utilisée est composée d'une multitude de nœuds (3 565 x 2 096), avec un pas de temps optimal de 0.075 s, permettant d'éviter les instabilités numériques, ainsi que les erreurs de troncature. La détermination de ce pas de temps dt (Équation 8) est calculée grâce au critère d'instabilité CFL (Courant, Friedrichs et Lewy) :

$$dt = \frac{0.3 \text{ Min}(dx, dy)}{\sqrt{gh_{max}}},$$

Équation 8 : Calcul pour l'obtention du pas de temps optimal

$(dx, dy) = (40 \text{ m}, 40 \text{ m})$ étant notre espacement de grille, h_{max} étant le point le plus profond de notre grille, ici 2624 m, et g est l'accélération de la gravité. Chaque simulation d'1h30 de propagation (72 000 pas de temps) requière 8 jours de temps de calcul effectif (CPU : *Central Processing Unit*), *i.e.*, une version parallèle de *Funwave* (Pophet et coll., 2011) est mise en place sur un cluster 8-coeurs.

Pour la construction de la partie française de la grille de la *Riviera* (Côte d'Azur), 7 grilles existantes ont été utilisées :

- La bande littorale a été obtenue à partir de la base de **données Litto3D**. La résolution de la bathymétrie à la côte a été améliorée de manière significative grâce à l'utilisation de **grilles de 2 mètres** couvrant l'étroit plateau continental des Alpes-Maritimes, obtenu auprès de la Métropole Nice Côte d'Azur. Ces données, de même que celles du MNT à 5 mètres pour la topographie à terre, permettent une représentation plus précise des structures côtières (ports, jetées et digues) que dans les travaux précédents (Larroque et coll. 2012, Ioualalen et coll. 2014).

- **La bathymétrie littorale à 2 mètres** a été complétée en eaux plus profondes par **une grille de données à 10 mètres** construite avec des données multifaisceaux qui ont été obtenues durant différentes campagnes en mer : CALMAR, DELTARHO1.LEG1, DELTARHO1.LEG2, DELTARHO2, PROFANS3, ESS300/1, MATOU1, MATOU2, ME-SEA I, MESIM.LEG1 (MESEA 2), MESIM.LEG2 (MESEA 2), SEADOME, TRANSRHO, MALISAR1, GMO, MALISAR2, MALISAR3.
- **une grille de résolution 10 mètres au voisinage de la côte**, construite au laboratoire Géoazur. Cette dernière a été construite pour la topographie, à partir de données de plus haute résolution : le **MNT** (Modèle Numérique de Terrain) **de résolution de 5 mètres** pour la topographie littorale au sein du département des Alpes-Maritimes (de Cannes à Menton), complété par une **grille départementale à 50 mètres** fournie par l'IGN (Institut National de l'Information Géographique) et des **données SRTM** (*Shuttle Radar Topography Mission*) à une **résolution de 90 mètres** sur le reste de la grille de calcul.
- la **grille GMRT** (*Global Multi-Resolution Topography*) **de résolution 57 mètres**.

Considérant que le modèle de tsunami utilisé impose l'emploi d'une grille cartésienne uniforme, c'est-à-dire avec une grille à intervalles constants, celle-ci a été construite avec une résolution de 40 m (horizontale et verticale) à partir de l'ensemble des grilles de calculs précédemment citées avec le logiciel *Surfer*. Pour cela, une technique d'interpolation linéaire disponible sur ce logiciel a été mobilisée. La construction de cette grille unique était nécessaire à la réalisation de nos calculs.

La grille de calcul dans le versant de la *Riviera* italienne a été construite à partir des profils iso-bathymétriques de 20 à 200 mètres de l'UNESCO IOC-IBCM (*Intergovernmental Oceanographic Commission - International Bathymetric Chart of the Mediterranean*) ainsi que des données topographiques SRTM (90 mètres). Ne disposant pas de données topographiques et bathymétriques suffisamment précises pour valider les futurs calculs, il a été décidé de ne pas intégrer la partie italienne à l'étude. Cependant, nous devons inclure la partie italienne dans notre grille de calculs afin que la vague initiale entière y soit représentée. Nous ne validons simplement pas les résultats obtenus aux côtes italiennes. La grille de calculs obtenue couvre une zone allant de Fréjus, France, à Impéria, Italie, pour la côte (Figure 49, Chapitre 8). Les limites de la grille de calculs sont : (6,80°E ; 8,57°E) et (43,19°N ; 43,95°N).

Grâce à cette résolution, ce qui n'avait pas été possible jusqu'à maintenant dans les travaux à 100 mètres de résolution (loulalen et coll., 2014), nous avons pu tenir compte de détails à la côte qui peuvent jouer des rôles fondamentaux dans la propagation de la vague et sur les dégâts à la côte. En revanche, cette résolution ne permet pas de tenir compte des phénomènes se produisant à une échelle plus fine, comme cela peut être le cas dans les travaux de Nemati et coll. (2019) réalisés à 10 mètres de résolution.

3.2. Les sorties de modèles

Ces modèles numériques permettent le calcul d'une multitude de simulations pour des scénarios différents. Chaque sortie de modèle, une grille sous forme de pixels, présente pour chaque point différentes données. La zone clé se situe à la limite

terre-mer, là où le tsunami va potentiellement impacter le littoral. Cet espace, va permettre de délimiter les zones d'inondations.

Face au danger de tsunami, l'un des enjeux est donc de définir, avec le plus de précision possible, le potentiel impact de cet aléa le long du littoral en prenant en compte trois critères fondamentaux : l'emprise spatiale de la submersion par tsunami, la hauteur d'eau (Z_{max}) et les courants (CUR_{max}). La modélisation numérique de l'aléa et sa mise en carte sous l'angle de ces trois critères est la démarche privilégiée pour assurer un diagnostic des espaces littoraux à risque de submersion. Ce choix n'est pas anodin. Il a nécessité un partenariat étroit et la mise en place d'une démarche interdisciplinaire avec les géosciences. Ces travaux ont justement été réalisés avec la collaboration d'un collègue spécialiste de la modélisation numérique et ont fait l'objet d'une publication ([Boschetti et coll., 2020](#)).

La détermination de la zone d'inondation est la donnée la plus communément souhaitée par les décideurs et les acteurs de la gestion de crise. Elle permet de faire ressortir les zones directement exposées au tsunami. L'obtention de cette donnée s'avère plus complexe qu'il n'y paraît. Plusieurs éléments rentrent en considération dans sa délimitation et chacun comporte des incertitudes. Le zonage final contient ainsi une marge d'erreur non négligeable.

Les incertitudes sur la représentation du trait de côte, et donc sur la détermination de la zone d'inondation, dépendent principalement de la précision de la grille de calcul, c'est-à-dire la taille du pixel utilisé. Plus le pixel est grand, moins bonne sera la précision et, inversement, plus le pixel sera petit et meilleure sera la précision, surtout en zones côtières.

La résolution choisie pour réaliser les études de propagation de tsunami dépend de plusieurs facteurs, dont la précision des données de bathymétrie et de topographie disponibles, et les capacités de calculs numériques (plus une grille aura une résolution fine, plus son temps de calcul sera important). Dans ces travaux, la résolution utilisée est de 40 mètres. Celle-ci influe directement sur la représentation du littoral.

Une bonne représentation de l'interface terre-mer est nécessaire afin de faire ressortir les particularités locales (digues, ports, etc.) et les effets (physiques) générés à la côte (courants, hauteur d'eau, intensité). Des erreurs de calages peuvent ainsi être créées entre notre trait de côte numérique et le trait de côte réel. Cependant, toute simulation numérique s'effectue avec un certain degré de précision de la grille de calcul, aussi fine soit elle.

Dans ce qui suit, nos résultats seront interprétés sur la base de cette résolution, malgré certains décalages que l'on pourrait rencontrer (digues, ports, etc.). Nous ferons ainsi les hypothèses suivantes :

- Un point de grille originellement à « terre » qui subit le tsunami sera trivialement un point d'inondation.
- Le dernier point de grille originellement en mer (le point le plus proche de la côte) sera aussi toujours considéré comme un point d'inondation. En effet, considérant notre résolution de 40 m, nous ne connaissons pas la position relative de ce point par rapport au trait de côte réel.

En pratique, la résolution de 40 mètres génère une potentielle incertitude de 40 mètres sur nos résultats, pouvant entraîner une représentation erronée de la côte et donc engendrer des « bizarreries » côtières. La zone d'inondation potentielle va donc être considérée selon la superposition de la grille de calcul, et des résultats obtenus, à la représentation réelle du territoire (limite terre-mer et localisation des divers enjeux). Il faut ainsi bien garder en tête que le zonage obtenu a une précision de 40 mètres, et qu'il présente un potentiel décalage des zones inondées.

Une fois ces limites techniques posées, nous allons nous attacher à la mise en indice des paramètres utilisés pour la caractérisation de l'aléa dans cette analyse de risques, c'est-à-dire l'intensité et l'éloignement à la zone d'impact. Ces deux variables incluent l'emprise spatiale de l'aléa.

4. Traitement de l'aléa pour son intégration à une étude de risque : mise en indice

Dans le cadre de ces travaux, des analyses poussées ont été réalisées sur l'aléa tsunami dans le bassin Ligure. Ces dernières font suite à de nombreux travaux entrepris depuis une dizaine d'années dans la zone (Larroque et coll., 2012 ; Ioualalen et coll., 2014). Une focalisation sur l'aléa est ainsi faite. Or, l'un des objectifs de ces travaux de thèse est la réalisation d'une étude de risques. Les données brutes obtenues ont ainsi nécessité un traitement afin de pouvoir être utilisées par la suite. Une mise en indice a ainsi été nécessaire.

Cette mise en indice se base sur les « *degrés synthétiques* » proposés par Gleyze (2001). Chaque variable est caractérisée par un facteur d'analyse, qui va être décomposé en plusieurs niveaux d'indices. Ici trois niveaux sont retenus : faible, moyen, fort, correspondant respectivement aux valeurs 1, 2 et 3. Cette démarche permet l'obtention d'une cartographie de l'aléa, qui sera à son tour composée de ces trois niveaux, permettant de caractériser l'aléa tsunami sur l'ensemble du territoire azuréen.

Deux variables ont ainsi été retenues pour caractériser l'aléa dans l'analyse de risque. La première variable est l'intensité du tsunami (I), définie au Chapitre 6, qui prend en compte les données physiques de l'aléa, à savoir le courant et la hauteur d'eau. Souhaitant inclure l'ensemble du territoire, une seconde variable a été ajoutée, l'éloignement de la zone d'inondation (E). Celle-ci indique les espaces directement exposés ou non à cet aléa. La combinaison de ces deux variables est réalisée, grâce à un tableau de croisement, permettant d'obtenir des cartes d'aléas de submersion marine par tsunami dans les Alpes-Maritimes.

4.1. L'intensité, spécificités locales liées aux courants et aux hauteurs d'eaux

Les simulations numériques de propagation de tsunami permettent d'obtenir diverses données sur l'impact qu'un tsunami peut avoir sur le littoral, comme les

courants ou les hauteurs d'inondations. A partir de celles-ci, une échelle d'intensité a été créée (Chapitre 6) et a été appliquée au littoral azuréen (Chapitre 8).

Ces résultats sont donc repris afin d'être intégrés à l'analyse de risque. Peuvent ainsi être intégrés à la fois les données de courants et les données de hauteurs d'inondation. Elle contient également des informations quant à la difficulté de déplacement des personnes et aux potentiels dégâts occasionnés (Figure 45, Figure 45, Chapitre 6).

L'échelle d'intensité de tsunami proposée contient sept niveaux, qu'il a fallu réduire en trois niveaux d'indice (Tableau 12). Nous avons ainsi considéré en aléa faible, les espaces inondés dont l'intensité est de 0. Attention, le fait qu'elle soit identifiée avec la valeur zéro ne signifie pas qu'elle soit nulle. Au contraire, cela signifie que l'aléa est présent mais que ses effets (physiques et dégâts) seront de faible ampleur. Le déplacement des personnes âgées et des enfants peut s'avérer difficile (Figure 45, Chapitre 6). Tout en étant de faible ampleur, des personnes peuvent être blessées.

Degrés synthétiques	Intensité du tsunami
Faible	Indice = 0
Moyen	Indice = 1
Fort	Indice [2 ; 6]

Tableau 12 : Mise en indice de l'aléa tsunami selon l'intensité

L'aléa moyen correspond aux zones d'impact où l'intensité est de niveau 1. Il s'agit d'inondations comprises entre 50 cm et 1 m et de courant entre 0.25 et 0.5 m/s. Le déplacement devient compliqué pour de nombreuses personnes et il existe une faible possibilité que des victimes soient à déplorer (Figure 47, Chapitre 6). En revanche, peu de dégâts matériels devraient être causés.

L'ensemble des intensités à partir du niveau 2 sont considérées en aléa fort. Les inondations dépassent 1 mètre et les courants 0.5 m/s. Nous avons regroupé l'ensemble de ces niveaux sans faire de distinction car nous avons considéré que passer un certain seuil, ici déterminé comme étant le deuxième degré d'intensité, l'évènement devient réellement dangereux pour les populations. Le nombre de victimes potentielles augmente, ainsi que les dégâts matériels potentiels (Figure 47, Chapitre 6).

Cette mise en indice est discutable, comme l'ensemble des choix réalisés, dans la mesure où ils sont forcément subjectifs et correspondent à une certaine approche. Cette indexation est basée principalement sur les populations et le danger qu'un tsunami pourrait représenter pour les personnes. Le tsunami rentrant peu dans les terres, l'enjeu principal à protéger et dont il faut tenir compte est la population. Pour nous une vague de 50 cm commence à être dangereuse pour les personnes présentes sur les plages, en particulier pour les enfants en bas âge et, passé un mètre ou 0.5 m/s, représente un réel danger pour les personnes présentes le long du littoral.

L'intensité fournit de nombreuses informations (zone d'inondation, hauteur d'eau, courant) ; elle présente toutefois la limite de se limiter à la zone directement impactée, c'est-à-dire directement exposée. La réalisation d'une analyse de risque, via une approche territoriale, nécessite la prise en considération du territoire dans son

ensemble. L'intensité n'est donc pas suffisante. Afin de palier à cela, l'éloignement, et plus précisément l'exposition par l'éloignement, a été intégrée.

4.2. Exposition directe et indirecte du territoire en fonction de l'éloignement au danger

Etudier la vulnérabilité du littoral azuréen et de sa population à la menace de tsunami nécessite de s'intéresser à l'une des composantes de la vulnérabilité : l'exposition. Généralement, l'analyse de l'exposition à un risque de submersion est restreinte à l'emprise spatiale de la submersion. Or, les outils réglementaires tels que les PPR littoraux, précisent que face à l'eau et à sa dynamique d'écoulement, le seul critère de l'étendue des périmètres inondés n'est plus suffisant pour intégrer l'aléa dans l'analyse de la vulnérabilité et du risque.

En effet, la hauteur d'eau et sa vitesse d'écoulement (Figure 47, Chapitre 6) jouent sur les vulnérabilités des populations. L'organisation du territoire, la présence d'enjeux majeurs et la préparation du territoire jouent également un rôle primordial dans cette exposition. Ici, l'exposition se limitera uniquement à l'éloignement de la source de danger afin de faire ressortir les espaces d'exposition directes (zones inondées), des espaces d'exposition indirectes (en dehors des zones d'inondation).

La zone d'inondation est cruciale à déterminer puisqu'elle permet de faire ressortir clairement les zones potentiellement inondées. Afin de pouvoir l'analyser, il a été nécessaire de déterminer des classes marquant différents éloignements de la source de danger (Tableau 13) : faible, moyen et fort. Nous focalisant dans cette étude sur l'aléa tsunami, la zone côtière est principalement impactée. Plus on s'éloigne du littoral et plus l'aléa est faible. Ici n'a pas été considéré l'aléa négligeable ou nul, car nous considérons que, bien que l'aléa n'impacte pas directement les zones éloignées du rivage, des impacts indirects sont possibles.

Degrés synthétiques	Intensité du tsunami
Faible	> 500 m de la zone d'exposition directe
Moyen	[Zone d'inondation plus 40 m d'erreur ; < 500 m de la zone d'exposition directe]
Fort	Zone d'inondation et une zone de 40 m d'erreur

Tableau 13 : Mise en indice de l'aléa tsunami selon l'intensité

Les espaces considérés en aléa fort comprennent la zone d'inondation déterminée par les modèles numériques et correspondent aux espaces disposant de données d'intensité. Comme les simulations numériques présentent une marge d'erreur de quarante mètres, nous avons pris le parti d'inclure ces quarante mètres à la zone d'aléa fort. Ceci peut avoir comme conséquence de surévaluer cette catégorie d'aléa, mais pallie toutefois les limites numériques. De plus, travaillant sur l'humain, il est préférable de surévaluer l'aléa plutôt que de le sous-évaluer et de mettre en danger des vies humaines. Cet espace a de forte probabilité d'être directement impacté par un tsunami.

Il a ensuite fallu déterminer le seuil entre la deuxième et la troisième classe. Il a été décidé de fixer cette valeur à 500 m. Bien que pouvant sembler arbitraire, elle a été déterminée suite à plusieurs réflexions. Pour se faire, nous nous sommes basée sur les attentats qui ont frappé Nice le 14 juillet 2016. Cet événement a entraîné des mouvements de foules importants lors de la fuite des personnes sur place et à proximité. Plusieurs comportements ont pu être observés : une fuite de « proximité », les personnes se sont réfugiées dans les bars, restaurants, hôtels les plus proches ; et une fuite « d'éloignement » afin d'aller le plus loin possible de la source de danger.

C'est justement sur cette dernière que nous nous sommes appuyée. Essayant de fuir le danger, des gens se sont rassemblés dans le vieux Nice, d'autres se sont rendu place Massena, l'objectif étant toujours le même, s'éloigner le plus possible. La valeur de 500 mètres semble ainsi être un bon compromis entre la volonté et la capacité d'éloignement. Il semble possible à tous (enfants, adultes, personnes âgées, personnes handicapées, etc.) de parcourir ces 500 mètres en marchant ou en courant.

Une zone comprise entre la zone d'impact directe (zone d'inondation plus quarante mètres) et 500 mètres a été construite et est considérée en aléa moyen. Cette dernière, proche de la zone d'impact, a de fortes chances d'être indirectement impactée, c'est-à-dire de connaître des perturbations et une désorganisation plus ou moins importantes. Il est également possible, en cas de sous-évaluation de la zone d'inondation ou de particularité locale non prise en considération par les modèles (pente particulière trop fine pour être prise en compte par les modèles, rôle du bâti, etc.), qu'une partie de cette zone soit directement impactée par la ou les vagues de tsunami.

L'aléa faible est composé de l'ensemble du territoire à une distance de plus de 500 m de la zone d'exposition directe. Etant un aléa localisé à la frange littorale, la plus grande partie de la zone d'étude sera considérée en aléa faible. Ceci s'applique d'autant plus au niveau des Alpes-Maritimes, où le plateau océanique est quasi inexistant, limitant la prise de hauteur de la vague et où les altitudes sont rapidement élevées, limitant la propagation de la vague. Ces espaces peuvent toutefois être indirectement impacté par l'aléa et connaître de fortes perturbations.

A présent que les deux facteurs de mise en indice de l'aléa sont déterminés, nous pouvons nous concentrer sur la méthodologie permettant l'obtention d'une cartographie globale de l'aléa tsunami.

4.3. Obtention d'une cartographie de l'aléa grâce à la combinaison de l'intensité et de l'exposition

Afin d'obtenir une seule carte d'aléa du département des Alpes-Maritimes, nous avons combiné les deux facteurs précédemment présentés : éloignement de la zone d'inondation et intensité. Pour ce faire, nous avons utilisé et adapté le tableau de croisement proposé par Gleyze (2005) pour obtenir un niveau d'aléa global (Tableau 14).

L'intensité n'étant disponible que sur la frange littorale, le reste de la commune ne dispose pas de valeur d'intensité. Ayant exclu les valeurs nulles, par soucis d'équité

et pour que le croisement soit réalisable, nous considérons que l'ensemble du territoire situé hors zones inondées, dispose d'une intensité faible. Sont ainsi exclues de ce croisement les intensités moyennes et fortes pour les espaces non directement situés en zones d'inondation. Nous obtenons un aléa tsunami décomposé en trois niveaux.

Eloignement de la zone d'inondation Intensité	Faible (> 500 m)	Moyen (< 500 m)	Fort (dans la zone d'inondation + 40 m autour)
Faible Intensité = 0	Aléa faible	Aléa faible	Aléa moyen
Moyen Intensité = 1	Aléa faible	Aléa moyen	Aléa fort
Fort Intensité ≥ 2	Aléa moyen	Aléa fort	Aléa fort

Tableau 14 : Niveau d'aléa obtenu par croisement entre l'éloignement de la zone inondée et l'intensité

L'aléa faible concerne donc les espaces hors zones impactées. La zone d'inondation, quant à elle, n'est plus décomposée qu'en deux niveaux d'aléas : moyen et fort. Les espaces d'intensité faible correspondent à un aléa moyen, alors que l'ensemble des autres niveaux d'intensité sont caractérisés par un niveau d'aléa fort. La zone d'inondation est ainsi doublement prise en compte, ce qui peut être considéré comme un biais d'analyse. Cela peut à l'inverse s'expliquer par le fait que cette zone est celle qui présente le plus de danger en exposant directement la population.

Cette méthodologie mène à une cartographie de l'aléa tsunami permettant d'avoir une vision globale de l'impact d'un tsunami sur le territoire, tout en faisant ressortir les particularités locales au niveau des zones d'inondations. Afin d'arriver à une analyse de risque, à cela vient s'ajouter la méthodologie d'analyse de la vulnérabilité territoriale. Ces éléments seront présentés plus loin dans ce manuscrit.

5. Conclusion

Ce chapitre se focalise sur la modélisation numérique de tsunami permettant d'aboutir à une cartographie de l'aléa, des données brutes dans un premier temps, puis indicelles dans un second temps. A partir de travaux de nos prédécesseurs, une modélisation plus précise a pu être réalisée, aboutissant à des données à quarante mètres. Le tsunami étant dépendant du séisme générateur, les simulations sont effectuées à partir de scénarios sismo-tectoniques proposés par Larroque et coll. (2012).

Trois scénarios ont été retenus. Deux scénarios s'étant produits à échelle humaine, donc susceptibles de se produire (magnitude faible et donc faible récurrence). Il s'agit du scénario S1887, scénario historique dont la zone de rupture est proche de l'Italie, et SHyp, similaire en tout point au précédent, à la différence qu'il est plus proche des côtes françaises, donc plus susceptible de faire des dégâts. Le dernier scénario retenu est un scénario extrême, STot, faisant suite à la rupture de l'ensemble du système de faille. Aucun événement comme celui-ci ne s'est produit de

mémoire d'homme ; nous pouvons donc supposer que sa période de retour est importante.

Les modèles numériques ont permis l'obtention de données brutes (hauteur d'eau et courant) qu'il a été possible de convertir en données d'intensité grâce à l'échelle mise en place ([Chapitre 6](#)). Ces données ont à leur tour été transformées sous forme d'indices afin d'obtenir trois niveaux d'aléas : faible, moyen et fort. Ceci s'inclut dans une étude plus large d'analyse du risque de tsunami sur le littoral azuréen ([Partie IV](#)).

Vont à présent être présentées ces résultats portant sur l'aléa et obtenus grâce à la modélisation numérique pour les trois scénarios retenus.

CHAPITRE 8 : CARTOGRAPHIE DE L'ALEA TSUNAMI EN ZONE LIGURE – MISE EN APPLICATION DE L'ECHELLE D'INTENSITE

Le chapitre précédent, focalisé sur les différentes typologies de magnitude et d'intensité, a débouché sur l'obtention d'une nouvelle échelle d'intensité. Cette dernière permet l'analyse d'un territoire soumis à un évènement. Elle présente l'intérêt d'informer à la fois sur les hauteurs d'eau, les courants et les potentiels dégâts occasionnés. Ce chapitre s'intéresse quant à lui à la présentation cartographique des résultats obtenus lors de l'application de l'échelle d'intensité au littoral des Alpes-Maritimes.

La cartographie est un outil grandement utilisé en géographie. Elle permet la représentation graphique de données brutes géolocalisées et donc l'obtention d'un visuel porteur d'informations. Elle permet également de réaliser des analyses diverses entre les différentes données. Dans le cadre de ces travaux, la cartographie permet de faire ressortir les différents espaces soumis au risque de tsunami.

L'étude de tsunami en zone Ligure ne pouvant être effectuée par relevés de données, elle passe par la modélisation numérique. Seront ainsi présentés les résultats obtenus grâce aux simulations numériques (via la modèle *Funwave*). Elles sont constituées à la fois de données brutes (courants) et de données traitées (hauteurs d'eau, intensité).

Pour ce faire, une première focalisation est faite sur les données numériques brutes le long du littoral. Il s'agit d'étudier les vagues initiales et les données brutes. Une seconde s'intéresse à la cartographie des hauteurs d'eau, des courants et des intensités, l'objectif étant une mise en application de l'échelle d'intensité déterminée précédemment ([Chapitre 6](#)).

1. Analyse des données issues de la modélisation numérique

A partir des résultats numériques de propagation de tsunamis obtenus pour les trois scénarios, nous avons réalisé une cartographie de l'exposition du littoral azuréen à l'aléa tsunami. La partie italienne n'a pu être réalisée à cause du manque de données bathymétriques et topographiques suffisamment précises. Cette cartographie présente des zones d'inondation potentielle et les estimations de *runup*.

Une approche stochastique de l'étude de l'aléa tsunami nécessiterait un nombre représentatif de scénarios aléatoires, qui doit être nécessairement très important (des centaines), afin d'en faire un traitement statistique robuste. De plus, ces simulations doivent être précises et sont coûteuses en temps de calcul et de mémoire. Une telle approche est inenvisageable car nous sommes limitée en moyens numériques et informatiques. Une autre approche, que nous adoptons ici, est de tenter de réduire le nombre de scénarios. Nous avons pris l'option de ne considérer que trois scénarios car ils sont déduits d'études approfondies qui ont été menées par [Larroque et coll. \(2009,](#)

2012). Ces analyses se sont appuyées sur toutes les données de sismo-tectoniques disponibles.

Les hypothèses retenues sont réalistes, représentatives et tsunamigènes. Ce choix a en effet été réalisé en collaboration entre des collègues de géographie et de géoscience. Ils ont été réfléchis et construits en fonction :

- de ce qui s'est produit (S1887),
- des demandes politiques quant à la détermination d'hypothèses extrêmes (STot), pour anticiper les catastrophes extrêmes malgré leur faible probabilité,
- d'une hypothèse « moyenne » SHyp pour laquelle le littoral azuréen serait davantage impacté par la submersion marine que lors de l'évènement historique et qui a une forte probabilité de se produire.

Par ailleurs, nous nous efforçons d'expliquer la distribution spatiale de cet aléa pour chaque scénario. Nous avons ainsi tenté d'extraire des caractéristiques génériques de l'aléa, *i.e.*, s'appliquant à tous les scénarios. De telles caractéristiques, si elles existent, justifient a posteriori notre nombre limité de scénarios. Pour cela, il est nécessaire d'identifier les processus physiques d'amplification et/ou d'atténuation des hauteurs de vagues à la côte.

La modélisation de tsunami s'opérant en deux temps, nous nous focalisons tout d'abord sur la vague initiale, résultat d'un modèle de génération de tsunami. Par la suite, nous nous intéressons au modèle de propagation de la vague et aux résultats obtenus.

1.1. Caractérisation des vagues initiales issues des simulations

Les vagues initiales présentées dans la [Figure 49](#), ont des hauteurs de crêtes comprises entre 34 cm et 1,12 m et des creux compris entre 13 et 45 cm. Cette dissymétrie crête - creux s'explique par la présence d'un pendage non nul ([Okada, 1985](#)). Ces cartes donnent un aperçu de l'occurrence du dipôle crête/creux à la côte. Pour le scénario S1887, la Riviera italienne connaîtrait d'abord un retrait de la mer (un creux). Pour le scénario SHyp, ce serait le cas pour la partie frontalière de la Côte d'Azur (à l'est de Nice). Pour STot, l'ensemble de ces deux zones connaîtrait ce signe précurseur de l'arrivée d'un tsunami.

Ailleurs, ces cartes ne peuvent pas nous renseigner car l'occurrence d'une crête ou d'un creux à la côte dépendra de la **propagation de la vague**, sachant que les vagues se propagent plus lentement au voisinage de la côte, du fait de la faible profondeur. En effet, les points nodaux ([Figure 49](#)), évoluent avec la propagation. Ainsi, il n'est pas toujours possible d'anticiper ce signe précurseur de retrait de la mer en zone Ligure, outre le ressenti de la secousse sismique. Par ailleurs, les faibles niveaux de creux de vagues (entre 13 et 45 cm) semblent indiquer un très faible retrait, probablement imperceptible, même si ces creux seront probablement amplifiés par la loi de Green⁸ mais de façon très faible car ils sont en eaux peu profondes.

⁸ La loi de Green est une loi d'amplification qui s'applique pour expliquer l'amplification de la vague à l'approche des côtes.

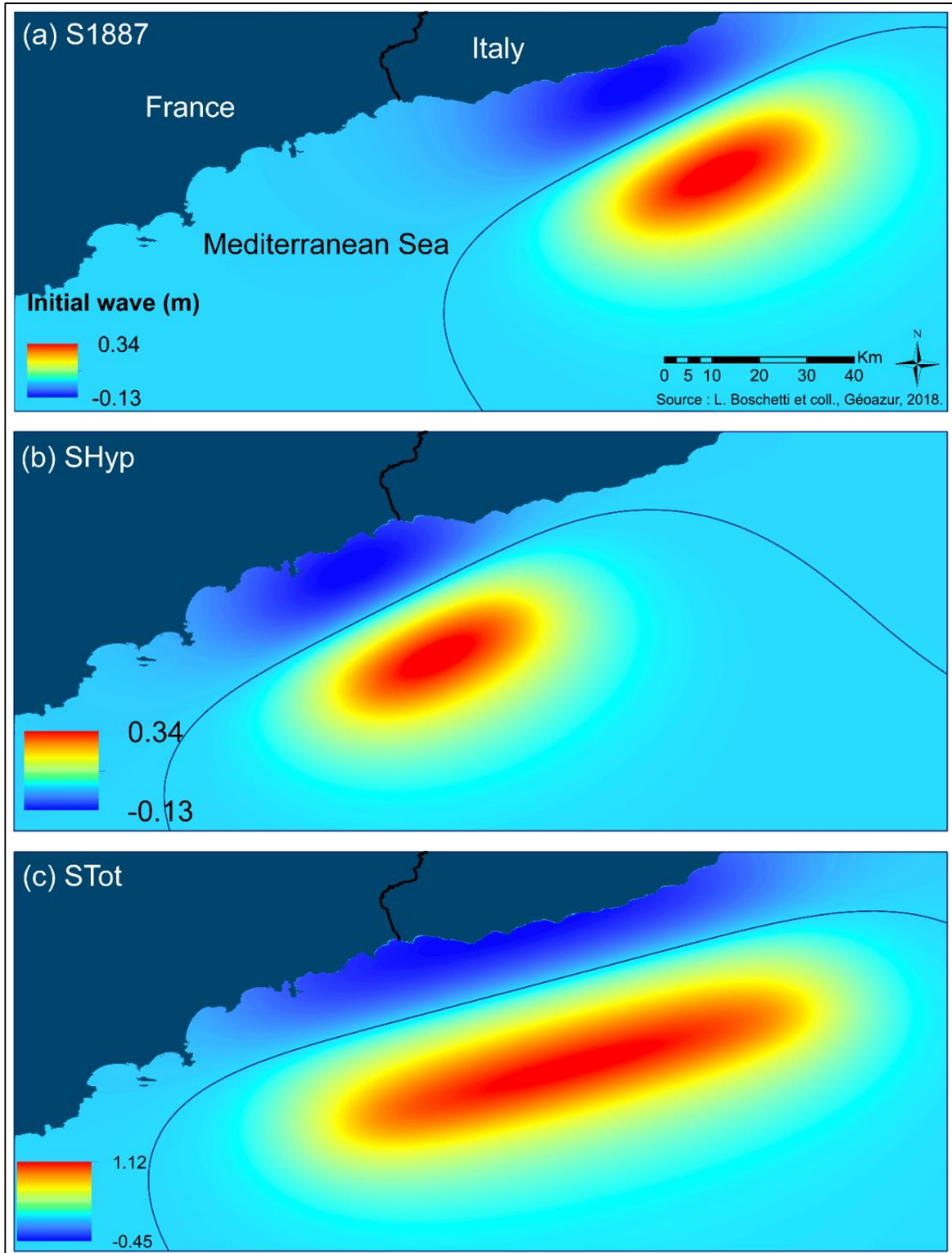


Figure 49 : Grille de calcul de la propagation des tsunamis et cartographies des vagues initiales, supposées équivalentes à la déformation cosismique du fond marin, en faille Ligure.
(a) correspond au scénario S1887 c'est-à-dire à la rupture de la partie est de la faille ; (b) représente le scénario SHyp avec la même rupture reportée à l'ouest de la faille et (c) symbolise la rupture totale de la faille, c'est-à-dire le scénario Stot. La courbe noire représente les points nodaux (zero elevation).

Naturellement, les creux suivants pourront être plus importants car ils pourront être générés en eaux plus profondes (et donc plus amplifiés par effet de pente), mais on ne parlera plus de signes précurseurs, qui ne concernent a priori que la première vague. Seules une propagation complète ou des séries temporelles nous renseigneront sur cet aspect.

Les vagues initiales étant calculées et représentées, nous pouvons à présent nous intéresser à la cartographie globale obtenue le long du littoral azuréen.

1.2. Analyse des données brutes le long du littoral azuréen

Une cartographie globale de la zone est réalisée afin de représenter l'emprise spatiale à terre, les hauteurs d'eau (H_{max}), les courants (CUR_{max}) et les intensités à terre et en mer (selon l'échelle définit dans le [Chapitre 6](#)).

Pour le volet côtier, *i.e.*, à la plage et à terre, à partir des simulations obtenues numériquement pour les scénarios retenus, S1887, SHyp et STot, une cartographie des estimations de *runup* a été réalisée sur la Côte d'Azur française, dans le but d'obtenir leurs distributions spatiales ([Figure 50](#)). Bien que les scénarios soient très distincts, les représentations cartographiques sont quasiment identiques. Nous avons en effet volontairement fait varier les palettes de couleurs correspondant aux hauteurs de vagues. Certes, celles-ci varient de façon significative d'un scénario à l'autre (entre 1 et 7 m approximativement), mais la même distribution spatiale est conservée, *i.e.*, la variation relative de hauteur de vague le long de la côte.

Dans un premier temps, signalons que la loi de Green s'applique partout sur la côte. La vague initiale, se propageant depuis le large, sera donc amplifiée à la côte immédiate, *i.e.* en région Ligure selon nos hypothèses. En effet, sur de si courtes distances, le tsunami ne sera que très peu dissipé.

Cette amplification sera ainsi modulée par d'autres processus physiques qui peuvent décupler ou atténuer cette vague initiale (focalisation, défocalisation, résonance de baies, directivité, profil de la vague initiale). Prenons l'exemple de la simulation SHyp ([Figure 50](#)) :

- Dans la plupart des baies, les isobathes⁹ sont convexes (relativement à un point de la côte). Nous savons que la ligne de crête d'un tsunami épouse les lignes isobathes (qui sont aussi iso-vélocité) par réfraction. Ainsi, le tsunami diverge et s'échappe sur ses bords (flèches vertes sur la [Figure 50](#), SHyp). Le tsunami entrant va donc être atténué, par **défocalisation** : l'amplification par effet de pente sera donc amoindrie. C'est le cas de (1) la baie située entre Théoule et Cannes (Golfe de La Napoule), (2) celle située entre Antibes et Saint-Laurent-du-Var (partie est de la baie des Anges), (3) la baie de Nice (partie ouest de la baie des Anges).

⁹ Les isobathes sont les lignes d'égales profondeurs qui permettent d'indiquer la profondeur par rapport à la surface.

- Certaines baies ont un comportement neutre car les isobathes sont rectilignes (flèches bleues de la Figure 50, SHyp). C'est le cas de la baie située entre Cannes et Antibes, le Golfe Juan, et, approximativement, de l'ensemble de celles situées entre le Cap-Ferrat et Menton.
- A l'opposé, dans la plupart des caps, les isobathes sont concaves. Ainsi, également par réfraction, le tsunami converge vers ce que l'on peut nommer une zone de **focalisation**. Ainsi, l'amplification par effet de pente sera décuplée. Ce taux d'amplification est cependant lié à la courbure des isobathes, et la position exacte de ces zones de focalisation est difficile à extraire car ces isobathes ont des formes complexes. Il n'est pas dans notre intention de détailler ces points. C'est le cas du Cap d'Antibes, de l'aéroport international de Nice Côte d'Azur, du Cap Ferrat et dans une certaine mesure de l'ensemble Pointe-Croisette et Iles de Lérins qui représentent un cap discontinu.
- Cependant, comme pour les baies, certains caps ont un comportement neutre car leurs isobathes sont rectilignes. C'est le cas du Cap de Nice

Quelles que soient nos hypothèses (S1887, SHyp, Stot) on notera que la zone entre le Cap de Nice et Menton rencontre des amplitudes de vagues plus importantes. Cela est dû : (1) à la directivité nord-nord-ouest de la propagation des vagues initiales qui sont situées à l'est du Cap de Nice (Figure 49). L'axe longitudinal du plan de rupture est beaucoup plus important que celui latéral (Figure 49) ; (2) dans la représentation d'Okada (1985), le maximum de déformation se situe au voisinage du centroïde. Ainsi, pour SHyp, l'amplitude du tsunami sera plus importante à l'ouest du Cap-Ferrat jusqu'à Menton.

Cette analyse du tsunami SHyp s'avère être générique et peut donc s'appliquer à l'ensemble des scénarios. En effet, lorsque l'on compare les cartes qui composent la Figure 50, il apparaît que les zones impactées ou celles qui seraient abritées, sont globalement identiques. La distribution spatiale (le long de la côte) relative (indépendamment de l'amplitude absolue de la vague) est identique.

Pour le volet marin : nous avons défini une zone côtière comprise entre la côte et 100 m de profondeur (~ 55 brasses, *fathoms* en anglais). Cette zone pourrait correspondre à la zone d'encreage des bateaux (à quai et au mouillage). De la même manière que Lynett et coll. (2014), nous avons représenté dans cette zone, sur la Figure 51, le courant maximum en fonction de la profondeur. Dans l'échelle d'intensité de Lynett et coll. (2014), et par conséquent de celle proposée, le seuil de 1,50 m/s correspond à la vitesse de courant en deçà de laquelle une embarcation ne subit aucun dégât, et serait hors de la zone de danger en mer. Ainsi, pour les scénarios S1887, SHyp et STot, cette valeur seuil est obtenue à des profondeurs d'eau de l'ordre de 10 m (6 brasses), 20 m (12 brasses) et 35 m (19 brasses) respectivement. Il s'agit de la profondeur, et non d'une distance, à partir de laquelle une embarcation devrait être en sécurité. Par conséquent, selon la magnitude, les embarcations devront s'éloigner du rivage, jusqu'aux zones correspondant à ces profondeurs.

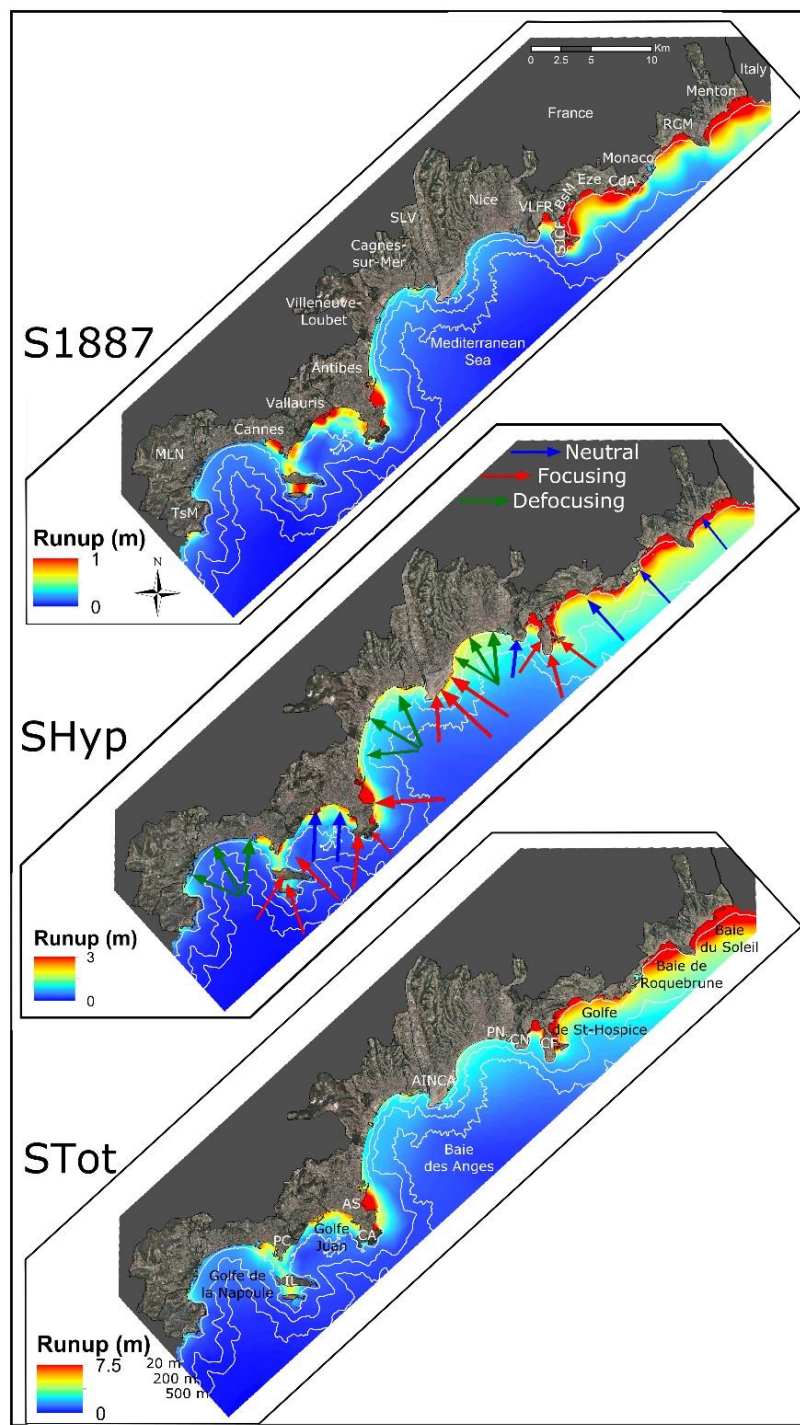


Figure 50 : Cartographie de la distribution spatiale des runups calculés numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot).

Les isobathes représentés sont : 20 m, 200 m et 500 m.

Acronymes utilisés : TsM pour Théoule sur Mer, MLN pour Mandelieu la Napoule, PC pour Pointe Croisette (à Cannes), IL pour Iles de Lerins (commune de Cannes), AS pour la plage d'Antibes la Salis, CA pour Cap d'Antibes, SLV pour Saint-Laurent du Var, AINCA pour Aéroport International Nice Côte d'Azur, PN pour Port de Nice, CN pour Cap de Nice, VLFR pour Villefranche-sur-Mer, SJCF pour Saint-Jean Cap Ferrat, CF pour Cap-Ferrat, BsM pour Beaulieu-sur-Mer, CdA pour Cap d'Ail, et RCM pour Roquebrune-Cap-Martin.

Les flèches rouges indiquent les zones de focalisation (convergence des vagues, isobathes et lignes de crêtes concaves), les flèches vertes représentent les zones de défocalisation (divergence des vagues, isobathes et lignes de crêtes convexes) et les flèches bleues signalent les zones neutres (isobathes et lignes de crêtes rectilignes).

Une fois ces particularités globales posées, il est intéressant de regarder les résultats de ces simulations à une autre échelle. Des particularités locales, d'emprise spatiale, d'hauteur d'eau, de courant et donc d'exposition peuvent alors ressortir.

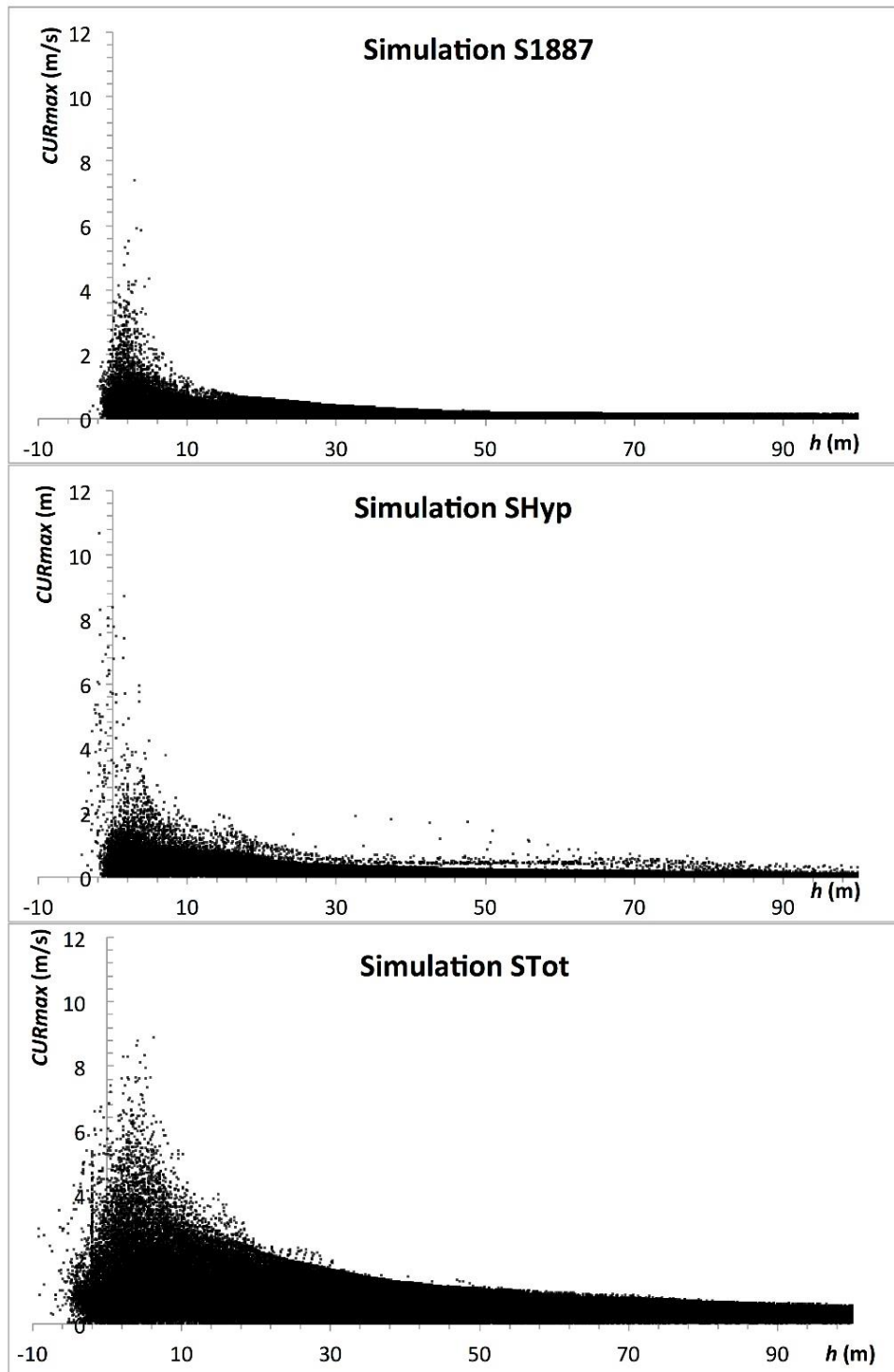


Figure 51 : Courants maximaux CUR_{max} en fonction de la profondeur de la colonne d'eau h entre la côte et 100 m de profondeur.
Les zones inondées correspondent à h négatif.

2. Cartographie de l'aléa tsunami à partir des hauteurs d'eau, des courants et de l'intensité

L'étude détaillée qui suit concerne l'aléa tsunami à la côte des Alpes Maritimes dans sa globalité et ne se limite pas à une cartographie des *runup*. Afin d'analyser l'exposition, sont détaillées les zones inondées, les hauteurs d'eau, les courants et les intensités. Pour cette dernière variable, nous nous appuyons sur l'échelle d'intensité que nous avons élaboré (Chapitre 6). Ainsi nous prendrons en compte simultanément les cartes de hauteurs de vagues maximales, les cartes de courants maximaux ainsi que les cartes d'intensité. Nous privilégierons les cartes de hauteurs de vagues à celles du *runup* car notre échelle d'intensité reprend en compte les critères de submersion des PPRIs.

Par ailleurs, les zones côtières plates (plages) ont généralement une extension de l'ordre de quelques dizaines de mètres, proche des 40 m de notre résolution de grille. Pour cela, nous considérerons que le dernier point mer initial sera un point « plage » qu'il y ait inondation ou non.

Dans le but de décrire les résultats des simulations numériques de tsunami obtenues avec un maximum de détails, nous avons décomposé l'ensemble du département des Alpes-Maritimes, en trois zones : la zone OUEST de Théoule-sur-Mer à Antibes, la zone CENTRE, comprise entre Villeneuve-Loubet et Beaulieu-sur-Mer, et la zone EST, de Eze à la frontière italienne. Reprécisons que dans ce cas d'étude, le temps d'arrivée de la vague suite à sa formation est très court (10-15 min selon [loulalalen et coll. 2014](#)). Ce délai n'est pas suffisant pour une alerte et une évacuation organisée.

2.1. Cartographie de l'aléa tsunami – Focalisation sur la partie ouest du littoral

Regardons dans un premier temps les résultats de ces simulations pour les trois hypothèses déterminées pour la partie ouest des Alpes-Maritimes (Figure 52), c'est-à-dire de Théoule-sur-Mer à Antibes. Cet espace est fortement touristique avec la fin de l'Esterel à l'extrémité ouest, zone relativement sauvage en comparaison du reste de la zone. Il en va de même pour les Iles de Lerins, qui est une zone naturelle mais qui est fortement fréquentée par les bateaux et les touristes en périodes estivales. Les villes de Cannes et d'Antibes sont toutes les deux des villes balnéaires très touristiques.

Dans le cas des hypothèses modérées, c'est-à-dire S1887 et SHyp, de manière générale, pour une magnitude inférieure à $M_w = 7$, le Golfe de la Napoule est **peu exposé à l'aléa tsunami** ($H_{max} < 0.3-0.4$ m) (Figure 52). Par ailleurs, les courants y sont très faibles, inférieurs à 0,25 m/s (Figure 53) : l'intensité y est négligeable à faible (valeur 0 pour presque toute la sous-zone). Ainsi, on se situe dans une sous-zone abritée de l'aléa tsunami. A la côte, aucun impact sur les personnes ne devrait être causé, et au large immédiat des plages (à quai ou au mouillage), il n'y a aucun mouvement à attendre des embarcations qui soit potentiellement dangereux.

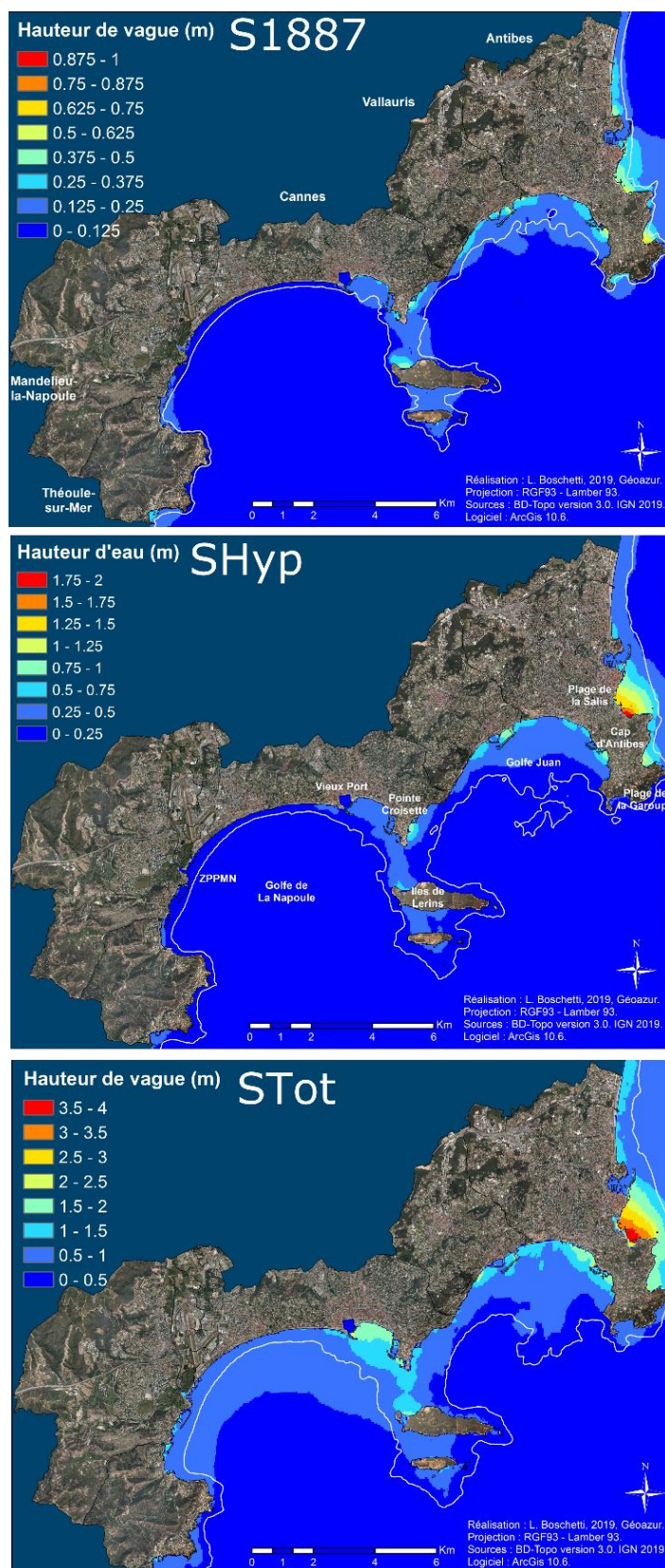


Figure 52 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale des hauteurs maximales de vagues calculées numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) pour les communes de l'ouest du département des Alpes-Maritimes.

ZPPMN pour 'zones portuaires de Plaisance de Mandelieu la Napoule'.

Les courbes blanches représentent les courbes de niveaux isobathes : 10 m pour le scénario S1887, 20 m pour SHyp et 30 m pour STot

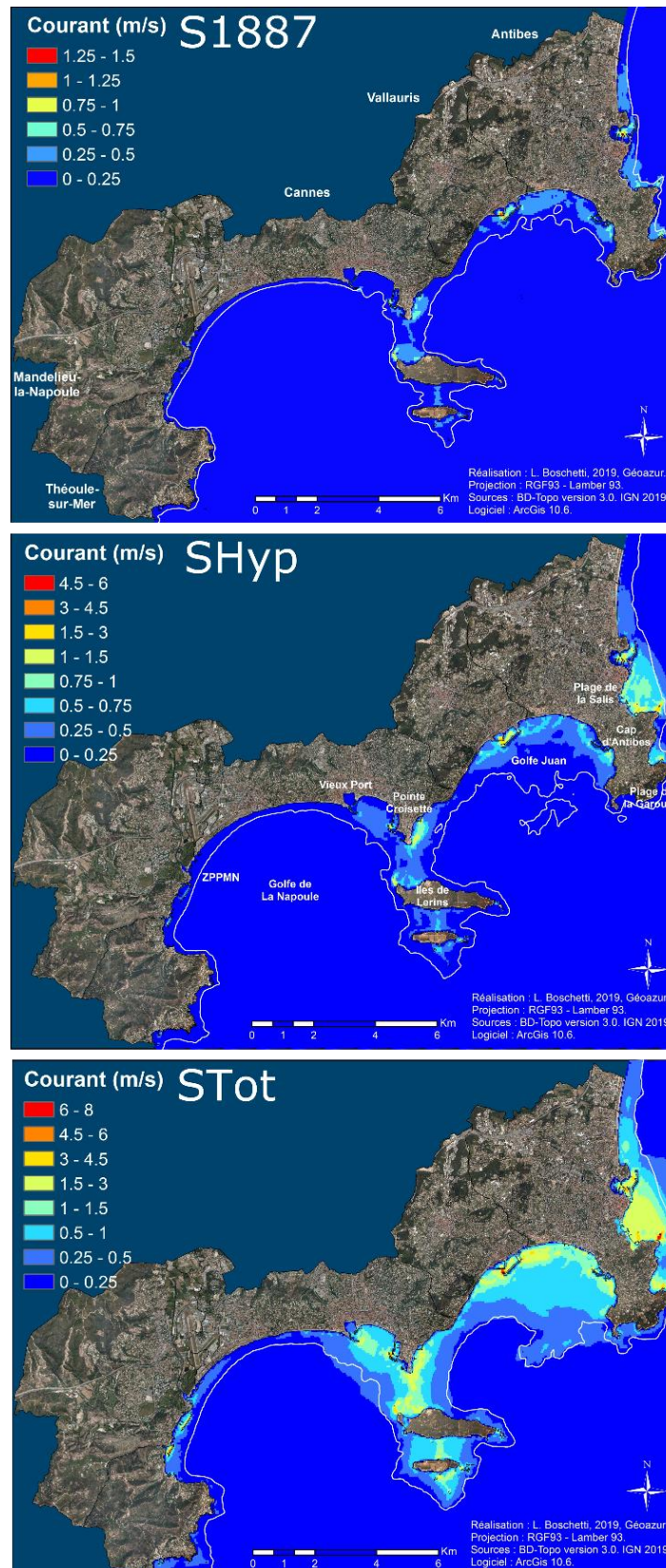


Figure 53 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale des courants maximums calculés numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) pour les communes de l'ouest du département des Alpes-Maritimes

ZPPMN pour 'zones portuaires de Plaisance de Mandelieu la Napoule'.

Les courbes blanches représentent les courbes de niveaux isobathes : 10 m pour le scénario S1887, 20 m pour SHyp et 30 m pour STot.

A l'est du port de Cannes, incluant les îles de Lérins, jusqu'à Antibes, les **H_{max} sont disparates**. Ils sont compris entre 0,3 et 1.0 m, et peuvent atteindre 1.5 m à 2 m pour la zone est du cap d'Antibes (plages de la Salis et de la Garoupe pour SHyp). On notera que pour ces magnitudes, la plage de la Salis est inondée, ainsi que la rue et les devantures au côté opposé. Or, cette plage est fortement fréquentée l'été par des familles et des touristes, ce qui en fait une zone à fort enjeu.

Dans le cas de l'hypothèse extrême, en général, **des hauteurs de vagues < 1 m et des courants < 0.5 m/s sont simulés dans le Golfe de la Napoule**. L'intensité obtenue présente ainsi la valeur 1 (Figure 55). Cet espace est constitué d'une grande zone balnéaire fréquentée par des familles de locaux et de touristes. La plage est sur certaines portions en contre bas de la route, dont l'accès se fait via des escaliers, et sur certaines autres portions au niveau de la route (Figure 54).

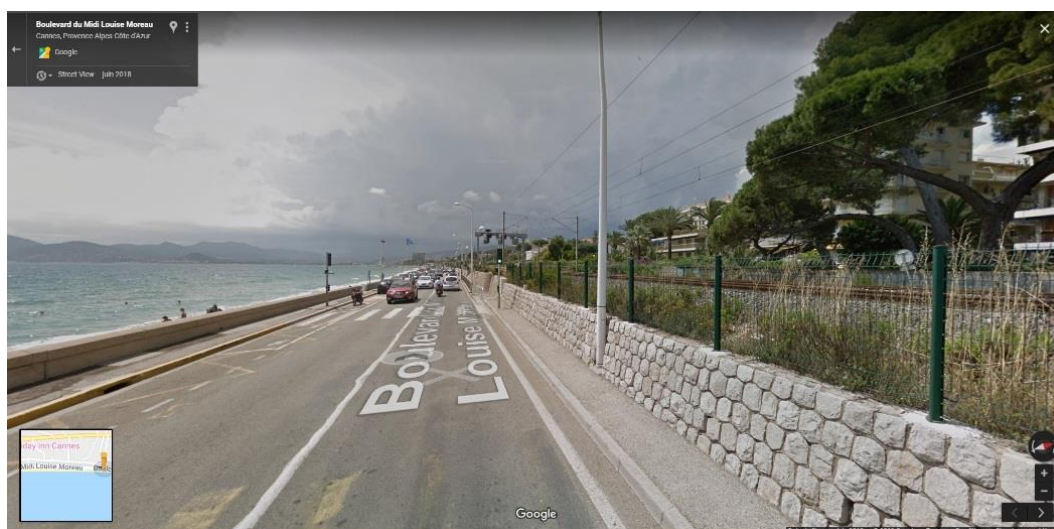


Figure 54 : Route côtière entre Mandelieu-la-Napoule et Cannes délimitée par la plage au sud et la voie ferrée au nord.

Vue vers l'ouest-sud-ouest (Google Map Inc.)

La portion entre Cannes et Mandelieu-la-Napoule présente sur une grande partie du tracé, la particularité d'aligner le long du littoral la plage, la route, puis la voie ferrée. L'accès à cette dernière est bloqué par une haute grille (environ 2,50 m) (Figure 54). Il y a donc peu d'échappatoires possibles. Les principaux axes remontant vers les terres sont en effet des souterrains. Ceux-ci peuvent être potentiellement endommagés par le séisme précédant le tsunami, ou peuvent être inondés par les vagues du tsunami si celui-ci vient à s'étendre au-delà des murets de plages. Ceci apparaît cependant peu probable dans les scénarios proposés dans cette étude, le tsunami ne s'étendant pas dans les terres et se limitant dans une grande majorité des cas aux plages. La structuration de cet espace, qui apparaît comme un facteur de vulnérabilité, pourrait engendrer une catastrophe de forte intensité. Cependant, les magnitudes calculées pour cet événement extrême sont suffisamment faibles ($H_{max} < 1$ m, $CUR_{max} < 0,5$ m/s) pour générer une faible intensité (Intensité 1) : aucune inondation n'étant simulée, la route reste une échappatoire possible.

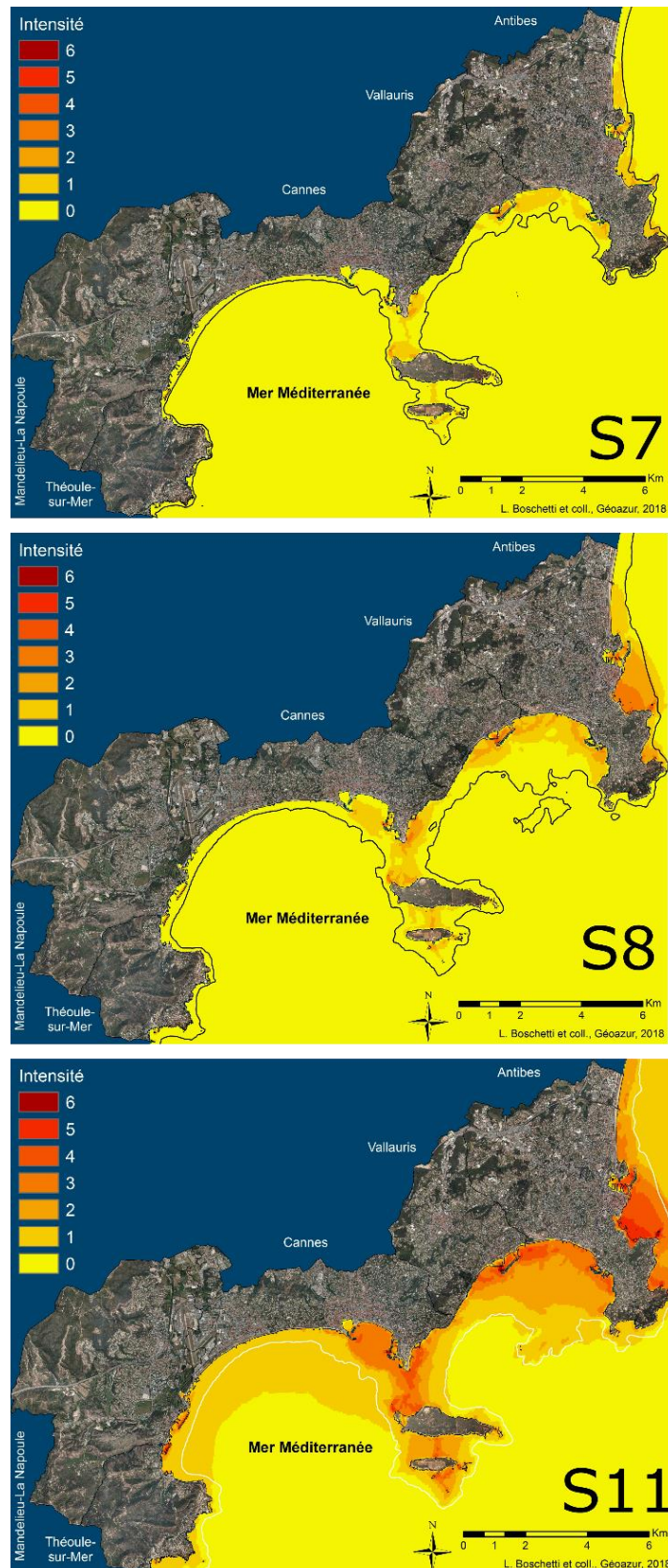


Figure 55 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale de l'intensité de l'aléa tsunami, telle que nous l'avons définie pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) et pour les communes de l'ouest du département des Alpes-Maritimes.

Les courbes blanches représentent les courbes de niveaux isobathes : 10 m pour le scénario S1887, 20 m pour SHyp et 30 m pour Stot.

Cependant, les zones portuaires de Plaisance (à quai et au mouillage) de Mandelieu-la-Napoule peuvent expérimenter des hauteurs de vagues pouvant atteindre 1,50 m (Figure 52) et des courants pouvant atteindre 4,5 m/s (Figure 53). L'intensité peut être importante (3 à 4, Figure 55) exprimant pertes humaines potentielles, et également des dégâts matériels mineurs à modérés sur les structures marines. Les embarcations pourraient éventuellement s'abriter au large, à quelques centaines de mètres du rivage (Figure 51 ; ligne blanche Figure 55) pour éviter tout dégât.

L'est de la commune de Cannes, du vieux port à l'entrée de la commune de Vallauris, en passant par le Pointe Croisette et les Iles de Lerins, **est d'avantage impacté, principalement aux zones de mouillages**. En ces zones, les hauteurs de vagues peuvent atteindre 2 m le long de la Croisette. Les courants quant à eux peuvent atteindre 3 m/s. Les intensités sont ainsi plus importantes : elles sont comprises entre une intensité 2 (provoquant peu de dégâts au large) et atteignent ponctuellement une intensité 5 (dégâts importants sur les structures marines).

Le bassin Golfe Juan est impacté par des hauteurs de vagues pouvant atteindre 2 m. A la plage, les courants peuvent atteindre 1 m/s, voire 3 m/s au mouillage. L'intensité de la zone serait donc caractérisée par un niveau 3 au maximum à la plage, ce qui signifie que les impacts humains peuvent être importants, notamment dans cette zone qui est une plage fréquentée par des enfants. Au mouillage, l'intensité atteindrait ponctuellement des valeurs extrêmes (5 et 6), provoquant ainsi des dégâts majeurs sur les embarcations, d'autant plus que celles-ci auraient à parcourir 3-4 km vers le large (Figure 52, Figure 53, Figure 55), pour dépasser la profondeur seuil de mise en sécurité et éventuellement s'abriter. Dans l'hypothèse d'une alerte de tsunami local (selon nos résultats, non montrés ici, le temps d'arrivée du tsunami serait de 10 à 15 min après le séisme), ces distances sont telles qu'une mise à l'abri ne nous paraît pas envisageable.

La pointe du Cap d'Antibes est peu impactée et ne présente pas de hauteur d'eau ou de courant significatif. En revanche, comme toujours, l'est du cap est la zone la plus fortement impactée. C'est en effet dans cette zone que l'on retrouve les plus hautes hauteurs d'eau, jusqu'à 4 m à la plage de la Salis et 2,50 m à celle de la Garoupe. Les courants sont globalement inférieurs à 3 m/s mais avec des maximums ponctuellement 6 à 8 m/s au mouillage, à ces deux plages. Les intensités sont ainsi importantes, atteignant la valeur de 5 pour la plage de la Salis, aussi bien au mouillage qu'à la plage. En plus de cela, il s'agit du seul espace très largement inondé (jusqu'à 250 m à l'intérieur des terres), avec des hauteurs d'eau et des courants importants. Ceci peut générer des dégâts catastrophiques, humains dans un premier temps, de par les hauteurs d'eau et surtout les courants, mais également matériels, destruction de commerces, déplacement d'embâcles, pouvant à leur tour provoquer des dégâts.

L'ouest du département présente donc des disparités en terme de hauteur d'eau, de courant et donc d'intensité, qui s'expliquent par la distribution des zones de focalisation (Figure 50). Ceci couplé aux différents enjeux humains, économiques, localisés sur cet espace littoral, en fait un territoire vulnérable. Regardons à présent les particularités du centre du département.

2.2. Cartographie de l'aléa tsunami – Focalisation sur la partie centre du littoral

La partie centrale du département s'étend entre Villeneuve-Loubet et Beaulieu-sur-Mer. Elle comprend l'ensemble de la baie des Anges et deux caps : le cap de Nice et le cap Ferrat. La ville de Nice se situe également dans cette zone et présente de nombreux enjeux majeurs : l'aéroport à l'ouest, le port à l'est, ainsi qu'une grande partie des structures décisionnelles (préfecture) de par son statut de préfecture de département. Une majorité des centres hospitaliers majeurs (Pasteur, l'Archet, etc.) est également sur cette commune. L'est de la zone, composée de la rade de Villefranche et du Cap Ferrat est davantage constituée de propriétés luxueuses dans un espace plus naturel.

Pour les hypothèses modérées S1887 et SHyp, de Villeneuve-Loubet au Cap de Nice, les H_{max} calculées ne dépassent jamais 0.75 m et aucune inondation du territoire n'est constatée dans les résultats de simulations numériques (Figure 56). Les CUR_{max} obtenus n'atteignent que rarement 0.75 m/s (Figure 57). Les H_{max} peuvent sembler relativement négligeables mais en zone de plage, la structure même de la plage, en contre-bas de la route, avec parfois des murs de plusieurs mètres dont les issues peuvent se situer à plusieurs dizaines de mètres les unes des autres peut poser des problèmes d'évacuation. Cet espace est donc potentiellement à risque en zone de plage car une vague de 50 cm peut être fatale pour des enfants ou des personnes âgées (Figure 47, Chapitre 6).

La présence généralisée des galets accentue l'aléa envers les populations. Par contre, le Cap de Nice, qui fait la jonction entre le port de Nice et la rade de Villefranche, est un espace relativement escarpé et gardé à l'état naturel. Il n'y a donc pas de plages mais de petites criques ou de petit accès à la mer, mais rapidement en hauteur par rapport à la mer. Il est également constitué d'une promenade littorale piétonne, et est donc principalement fréquentée par des randonneurs et des pêcheurs.

Cet espace, de par les hauteurs de vagues simulées et de par sa structure, ne présente pas une réelle zone de danger. Dans cette sous-zone l'intensité est toujours 0 ou 1 à la côte (Figure 58). A quai ou au mouillage ces faibles intensités impliquent que les embarcations sont totalement à l'abri dans cette sous-zone (Figure 47, Chapitre 6). Notons que l'aéroport International de Nice Côte d'Azur est à l'abri de l'aléa tsunami car aucune inondation n'est observée pour ces scénarios modérés.

De la rade de Villefranche-sur-Mer à Beaulieu-sur-Mer, incluant Saint-Jean-Cap-Ferrat, les H_{max} peuvent atteindre 1 m (scénario S1887) à 2 m (scénario SHyp) sans toutefois générer d'inondation (Figure 56). Au mouillage les CUR_{max} sont les plus puissants, jusqu'à 0,75 m/s pour S1887 et 3 m/s pour SHyp. Des intensités importantes sont simulées pour la rade et le port de Villefranche-sur-Mer, de 0 à 2 pour S1887 et pouvant atteindre un niveau 4 pour SHyp. Les intensités les plus fortes se situent au mouillage.

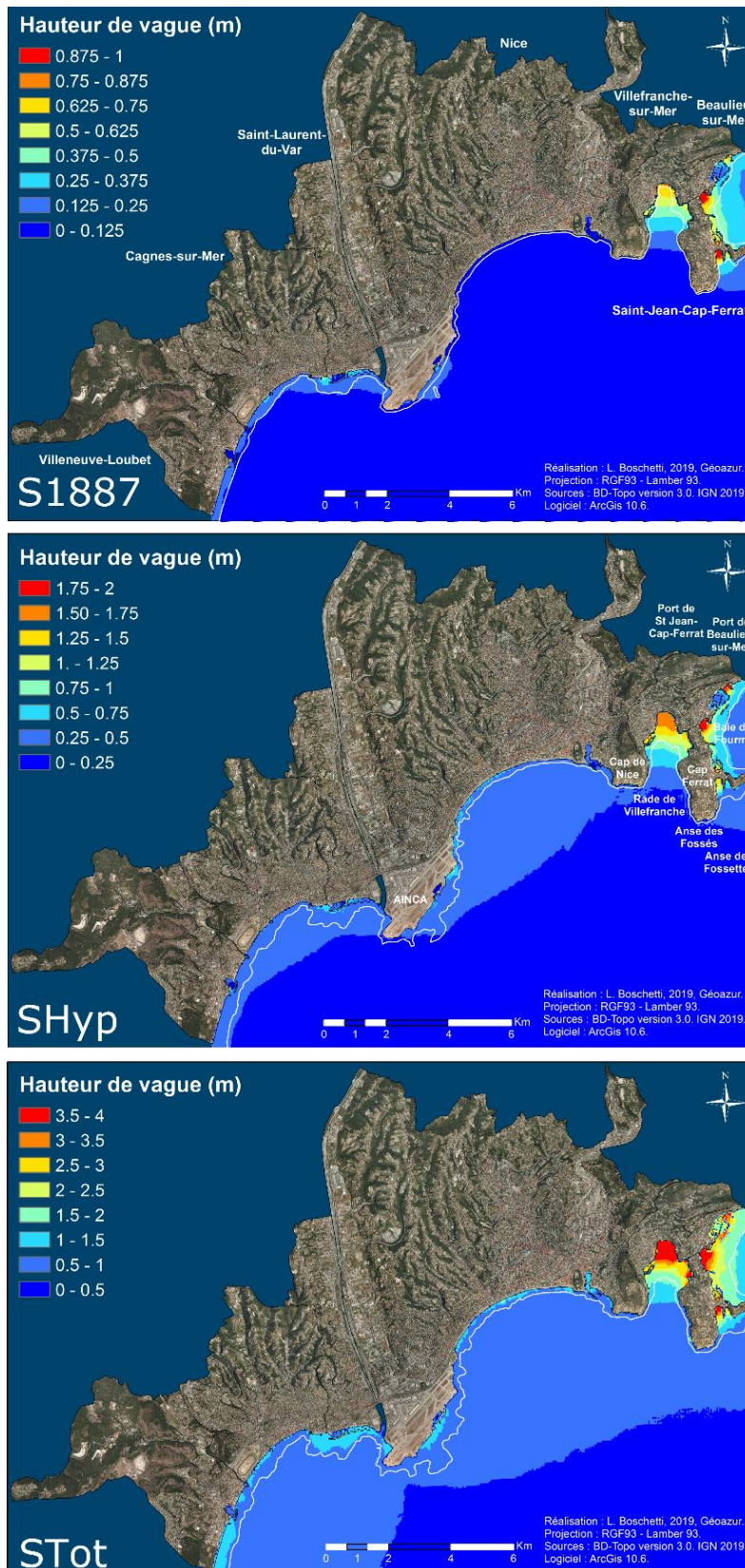


Figure 56 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale des hauteurs maximales de vagues calculées numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) pour les communes du centre du département des Alpes-Maritimes.

AINCA pour 'Aéroport International de Nice Côte d'Azur'.

Les courbes blanches représentent les courbes de niveaux isobathes : 10 m pour le scénario S1887, 20 m pour SHyp et 30 m pour STot.

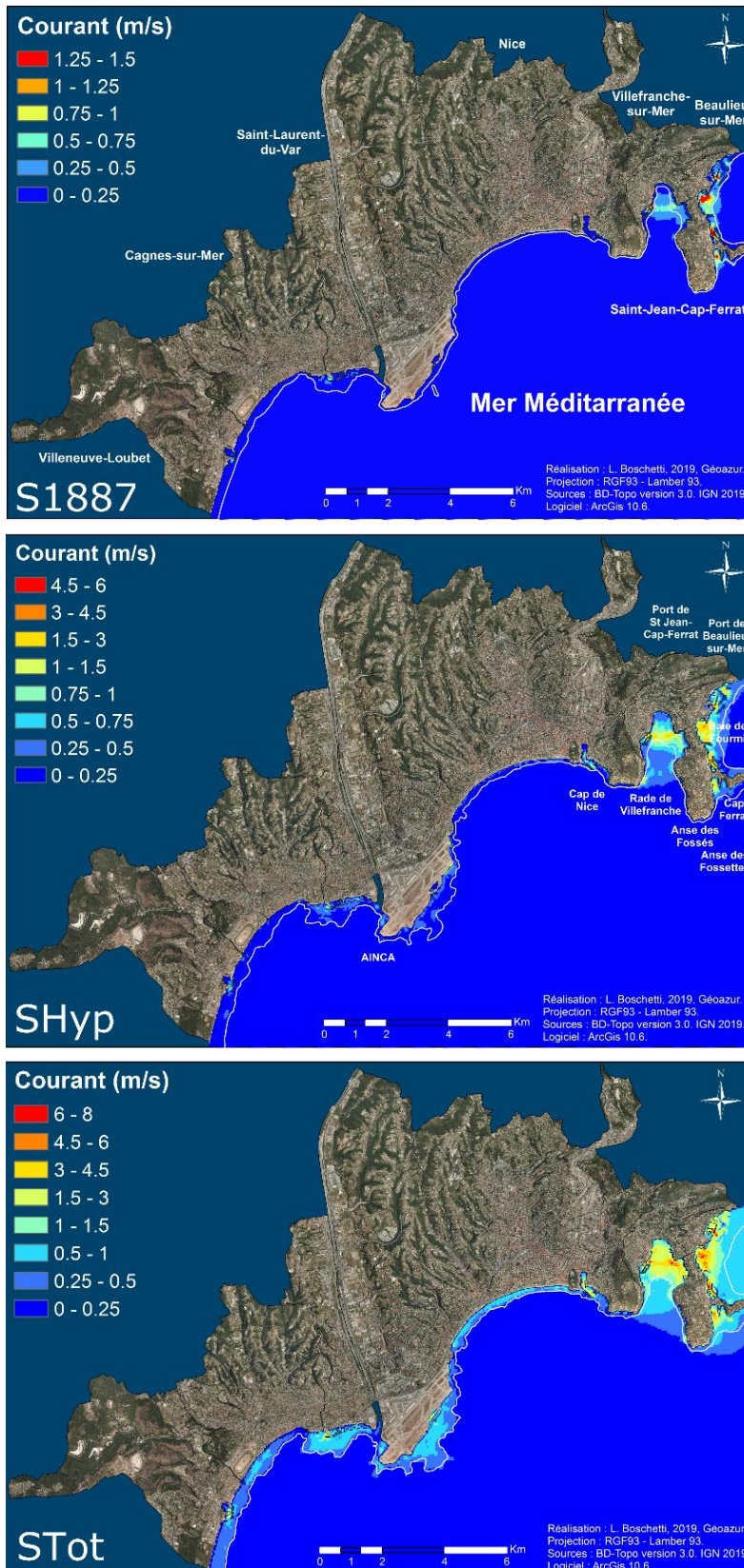


Figure 57 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale des courants maximums calculés numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) pour les communes du centre du département des Alpes-Maritimes.

AINCA pour 'Aéroport International de Nice Côte d'Azur'.

Les courbes blanches représentent les courbes de niveaux isobathes : 10 m pour le scénario S1887, 20 m pour SHyp et 30 m pour STot.

La rade est un point clé pour les bateaux principalement de plaisance, qui sont au mouillage et qui potentiellement pourraient engendrer de nombreux dégâts s'ils venaient à être dragués à quai. En effet, dans cet espace, la route est à fleur de mer, il y a donc une possibilité que les bateaux viennent s'y échouer. La plage de Villefranche-sur-Mer, d'intensité de niveau 1 pour S1887 et de niveau 2 pour SHyp, est une zone d'abri pour les embarcations. Seuls quelques points d'intensité 4 pourraient potentiellement être à l'origine des dégâts mineurs à modérés. Par contre la plage, de par sa topographie, entre mer et voie ferrée qui forme un véritable mur contre lequel peut venir s'écraser la vague, peut présenter de réels problèmes d'évacuation. Des personnes, nombreuses en période estivale, peuvent ainsi se retrouver bloquées et en difficultés pour évacuer.

L'ensemble de la partie est du Cap-Ferrat, incluant la Anse des Fossés, la Anse des Fossettes, le port de Saint-Jean-Cap-Ferrat, la Baie des Fourmis et le port de Beaulieu-sur-Mer est fortement impacté. En effet, les H_{max} sont toujours supérieures à 0.25 m pour S1887 et atteignent dans l'Anse des Fossés et au port de Beaulieu-sur-Mer les valeurs maximales de cette simulation, c'est-à-dire 1 m. Pour le scénario SHyp, celles-ci sont comprises entre 0.5 m et 2 m (également dans le port de Beaulieu-sur-Mer), sans toutefois qu'il n'y ait d'inondation. Les courants sont généralement supérieurs à 0.25 m/s pour S1887 et à 0.5 m/s pour SHyp, mais peuvent respectivement atteindre 1,5 m/s et 3 m/s dans les baies et ports. La zone est ainsi classée en intensité faible (niveau 1) à forte (niveau 4) pour ces deux scénarios. Une fois encore, les zones de mouillages présentent des courants plus importants, et donc des intensités plus fortes. Les ports de Saint-Jean-Cap-Ferrat et de Beaulieu-sur-Mer disposent d'une intensité très forte, impliquant ainsi des dégâts potentiellement importants.

Dans le cas de **l'hypothèse extrême Stot**, de Villeneuve-Loubet au Cap de Nice, les H_{max} atteignent presque toujours des valeurs de 1.5 m à 2 m sans toutefois provoquer des inondations. Les CUR_{max} simulés y sont globalement supérieur à 0.50 m/s, pouvant atteindre ponctuellement 3 m/s à l'entrée des ports de Villeneuve Loubet, de Cagnes-sur-Mer et de Nice. Les intensités correspondantes sont donc globalement fortes sur la partie littorale, et sont globalement inférieures à 3, pouvant ainsi potentiellement fortement impacter la population. Cependant de telles intensités ont peu d'impact sur les embarcations à quai et ou mouillage (Figure 47, Chapitre 6). L'aéroport International de Nice n'est pas inondé et ne serait donc pas menacé par l'aléa tsunami.

Le Cap de Nice et les parties sud et ouest du Cap Ferrat subissent des intensités faibles à modérées (niveau 1 et 2) car les CUR_{max} sont inférieurs à 0.50 m/s et les H_{max} sont inférieures à 1.5 m. En revanche, à Villefranche-sur-Mer, au port et à la plage, les H_{max} sont importantes, presque toujours supérieures à 2 m, à l'exception de la plage ou même au mouillage où elles peuvent atteindre jusqu'à 4 m. Il en est de même aux anses situées au sud-est (Fossés et Fosettes), au port de Saint-Jean-Cap-Ferrat, à la Baie des Fourmis et au port de Beaulieu-sur-Mer.

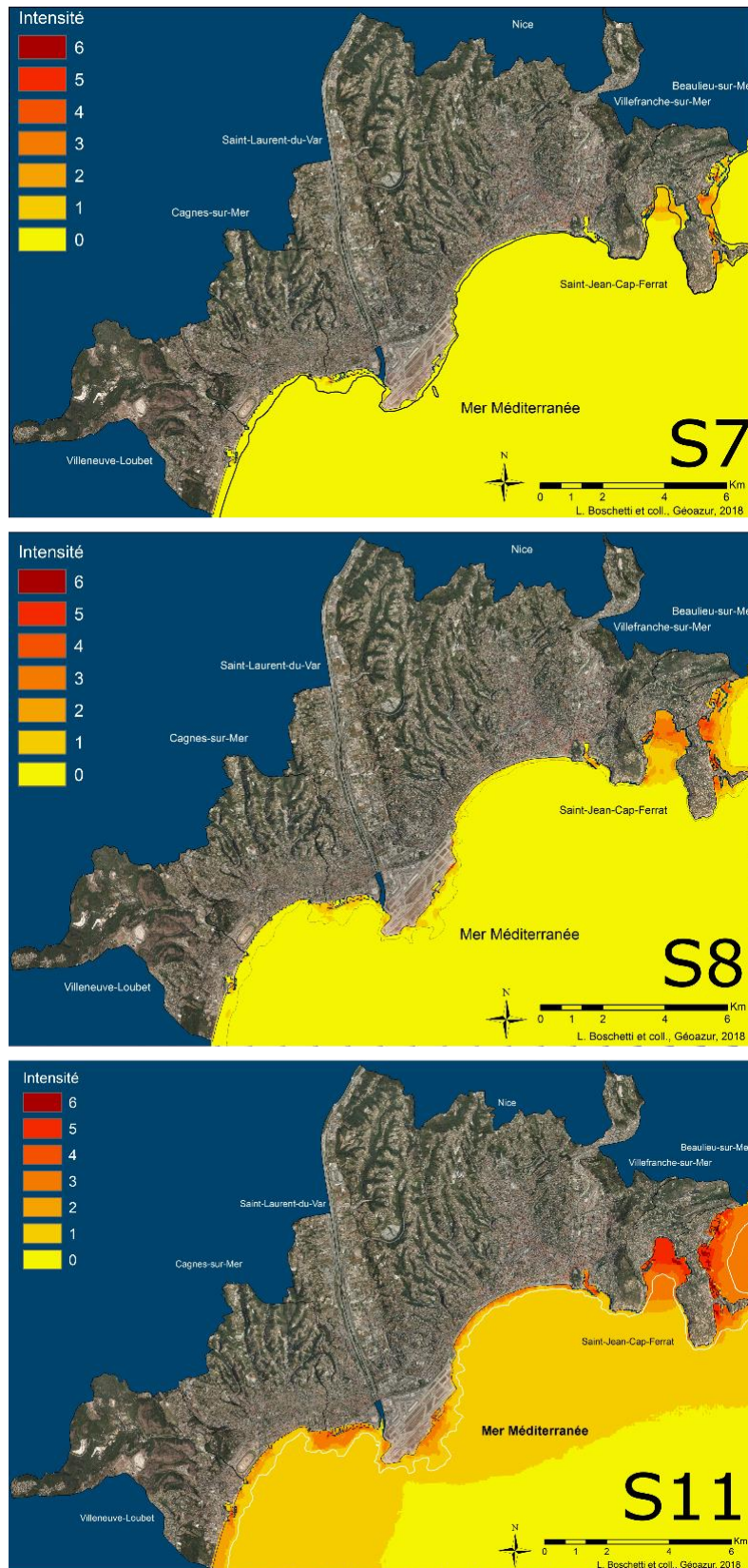


Figure 58 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale de l'intensité de l'aléa tsunami, telle que nous l'avons définie, pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) et pour les communes du centre du département des Alpes-Maritimes.

AINCA pour 'Aéroport International de Nice Côte d'Azur'.

Les courbes blanches représentent les courbes de niveaux isobathes : 10 m pour le scénario S1887, 20 m pour SHyp et 30 m pour STot.

Concernant les courants, ils sont supérieurs à 0.5 m/s pour l'ensemble de cette zone, et peuvent atteindre plus de 6 m/s à l'entrée du port de Villefranche-sur-Mer, de la Anse des Fossés, du port de Saint-Jean-Cap-Ferrat, du port de Beaulieu-sur-Mer et à l'entrée de la Baie des Fourmis. Les intensités sont donc modérées à fortes (niveau 3 à 6) pour l'ensemble de la partie littorale de ces communes, avec les valeurs maximales obtenues au mouillage. Dans ces cas précis, à la rade de Villefranche, de par sa forme particulière, et à l'est du Cap Ferrat, les bateaux au mouillage devraient quitter l'ensemble de la zone afin d'être en sécurité, car la zone d'intensité 4 (niveau à partir duquel les embarcations sont endommagées), se situe bien au-delà de la ligne de bathymétrie générale de 35 m (Figure 56, Figure 57, Figure 58).

Une fois l'ensemble des parties ouest et centre décrite, il nous reste à observer ce qui pourrait se passer en cas d'évènement tsunami sur la partie est du département des Alpes-Maritimes.

2.3. Cartographie de l'aléa tsunami – Focalisation sur la partie est du littoral

L'est de la zone, d'Eze à Menton, est la partie frontalière de cet espace. Elle est donc à la limite de l'Italie. Elle comprend également une autre frontière, celle avec Monaco, ville-état également prise en compte dans cette étude. La Principauté est importante à prendre en considération car elle comprend sur son territoire, bien que restreint, un grand nombre d'enjeux matériels, économiques et humains. L'ensemble de cette zone est la partie la plus proche de l'épicentre, quelle que soit la simulation, elle est donc potentiellement la portion du territoire la plus touchée par le séisme et par les vagues de tsunamis. La directivité de ces derniers favorise les plus hautes vagues dans le département car les vagues initiales voient leurs hauteurs maximales (tout au moins dans la Riviera française) se propager vers cette zone (Figure 50). Ceci s'accroît encore davantage lorsque l'on se rapproche de la frontière italienne.

Pour les **hypothèses modérées S1887 et SHyp**, les magnitudes inférieures à 7, génèrent des tsunamis avec des hauteurs de vagues inférieures à 1 m pour S1887 et inférieures à 2 m pour SHyp (Figure 59). Eze et le Cap-d'Ail sont impactés par des vagues comprises entre 0.25 m et 0.6 m, pour le premier scénario, et des vagues comprises entre 0.5 m et 1 m pour le second. Les courants, quant à eux, sont généralement inférieurs à 0.25 m/s, mais peuvent atteindre 0.5 m/s dans certains cas, et principalement de l'ordre de 0.75 m/s, avec ponctuellement des valeurs atteignant 1 m/s respectivement (Figure 60). Les intensités associées sont donc faibles (niveau 0 et 1), et de faible à modérée (1 à 3) (Figure 61). Ces communes ont des altitudes qui augmentent rapidement et ne disposent pas de routes directement situées en bordure de mer. Elles sont cependant constituées de nombreuses plages, plus ou moins larges, plus ou moins éloignées de la route. Une fois encore, les parties sensibles de ce territoire s'avèrent être les plages, pour les mêmes raisons qu'expliquées précédemment.

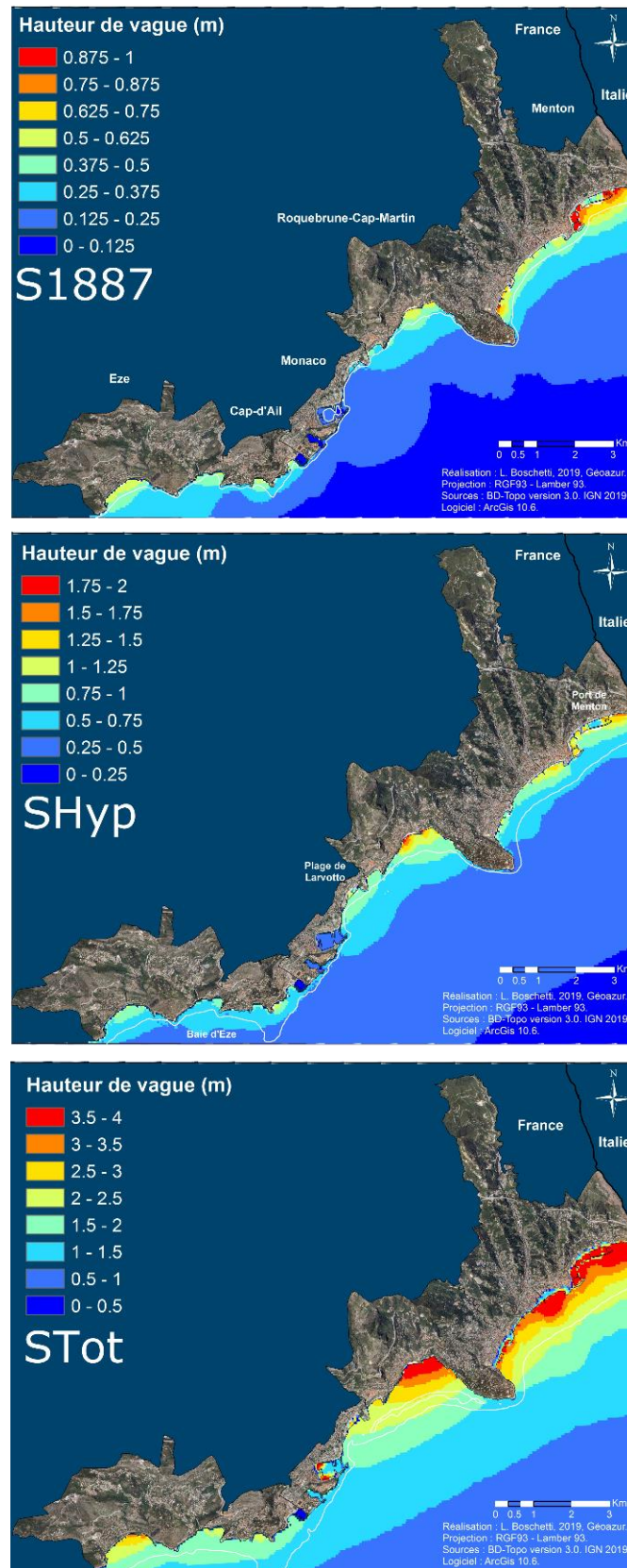


Figure 59 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale des hauteurs maximales de vagues calculées numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) pour les communes de l'est du département des Alpes-Maritimes.

Les courbes blanches représentent les courbes de niveaux isobathes : 10 m pour le scénario S1887, 20 m pour SHyp et 30 m pour STot.

La Principauté de Monaco est relativement protégée et est peu impactée par le scénario S1887, avec des vagues ne dépassant pas 40 cm et des courants inférieurs à 0.25 m/s. L'intensité globale pour la ville est donc faible (niveau 1). Le second scénario impacterait davantage la ville et plus principalement les plages situées à l'extrémité est de la ville (plage du Larvotto). En effet, des vagues peuvent atteindre 1 m et des courants de 1 m/s, prodiguant ainsi à cet espace un niveau d'intensité modérée (niveau 2). Ainsi, pour ces magnitudes, la Principauté présente globalement une intensité tsunami faible (inférieure à 2). N'oublions pas que Monaco, tout comme l'ensemble du littoral, contient de nombreux enjeux : humains, de par la forte densité de population, et économiques concentrés dans cet espace restreint.

Les communes situées plus à l'est, celles de Roquebrune-Cap-Martin et de Menton, sont les plus impactées de l'ensemble des Alpes Maritimes pour des raisons de directivité de tsunami (Figure 50). La baie de Roquebrune serait potentiellement touchée avec des vagues atteignant 0.75 m pour S1887 et 2 m pour SHyp. Les courants sont respectivement inférieurs à 0.5 m/s et inférieurs à 1.5 m/s. L'intensité est donc considérée comme faible pour le premier scénario (niveau 0 et 1), mais devient modérée dans le second, à cause des forts courants potentiels.

Cette zone littorale est principalement constituée de plages et elle est bordée par la voie ferrée. La route ne passe pas à proximité immédiate de la mer. Cet espace n'est donc pas ouvert et est compris entre mer et mur sans possibilité de franchissement, posant des questions en terme d'évacuation de la zone. La partie sud-ouest du Cap Martin est relativement épargnée dans les deux scénarios. L'ensemble de la Baie de Roquebrune-Cap-Martin jusqu'à la frontière italienne est impactée par des vagues comprises entre 0.5 m et 1 m pour S1887, et 0.75 m à 1.75 m pour SHyp.

Dans les deux cas, les valeurs maximales sont observées de part et d'autre du port de Menton. Dans le scénario S1887, les courants sont inférieurs à 0.5 m/s, mais atteignent 1.5 m/s dans la zone portuaire de Menton. Le scénario SHyp, générerait des courants allant de 0.5 m/s à 3 m/s, avec une distribution spatiale similaire à celle observée dans le scénario précédent. Cette zone est donc considérée comme disposant d'une intensité faible (niveau 1 et 2) pour l'ensemble de la baie, à l'exception de la zone portuaire de Menton qui a des intensités modérées à fortes (niveau 2 à 4) pour les scénarios S1887 et SHyp.

Bien que les hauteurs de vagues et les courants obtenus par simulation soient importants, aucune inondation n'est à déplorer sur l'ensemble de cette zone. Restent toutefois les espaces sensibles, tels que les plages, à prendre en considération et qui peuvent être fortement impactés et engendrer des préjudices en termes de pertes humaines et économiques.

Le **scénario extrême STot** apparait comme étant extrêmement impactant pour cet espace littoral. On y simule les valeurs maximales de hauteurs de vagues et de courants ainsi que les inondations les plus étendues.

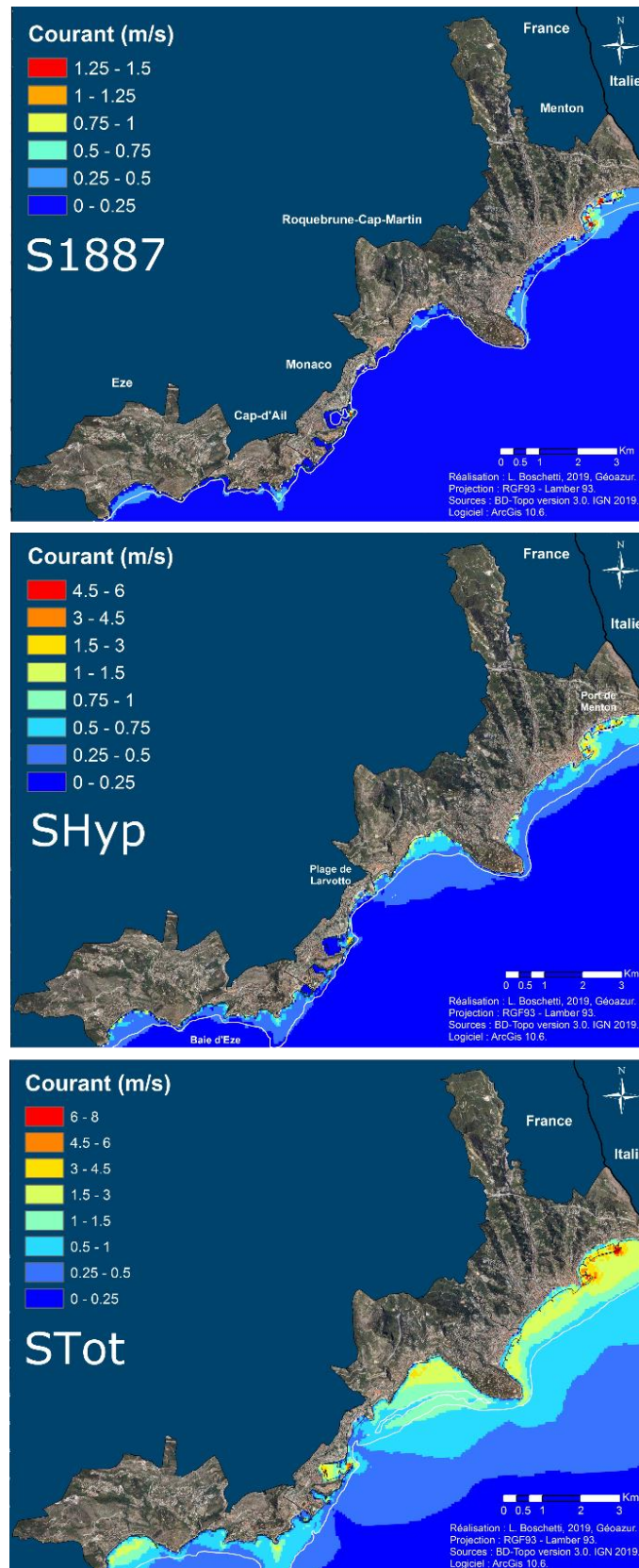


Figure 60 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale des courants maximums calculés numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) pour les communes de l'est du département des Alpes-Maritimes.

Les courbes blanches représentent les courbes de niveaux isobathes : 10 m pour le scénario S1887, 20 m pour SHyp et 30 m pour STot

Eze et le Cap-d'Ail seraient potentiellement impactés par des vagues de minimum 1.50 m, celles-ci pouvant atteindre 3.5 m dans la baie d'Eze. C'est également à cet endroit que les courants seraient les plus importants, jusqu'à 3 m/s au large immédiat, mais étant principalement inférieurs à 1 m/s sur la frange littorale. Les intensités correspondantes sont ainsi considérées comme étant fortes et très fortes (niveau 4 et 5), avec des intensités similaires à la plage et au mouillage.

La Principauté de Monaco est également impactée par des hauteurs de vagues non négligeables, comprises entre 1 m et 4 m. Le port essuie les valeurs maximales, plus particulièrement à l'intérieur de celui-ci. C'est également en cet endroit que l'on retrouve les courants les plus importants, pouvant atteindre 4,5 m/s alors qu'ils sont inférieurs à 1 m/s pour le reste du littoral monégasque. Les plages de Larvotto sont également inondées, avec des hauteurs de vagues pouvant atteindre 3 m. Les courants obtenus sont inférieurs à 1 m/s, mais dans une zone balnéaire, familiale, ces courants, couplés aux hauteurs de vagues, peuvent avoir des conséquences désastreuses. La Principauté est classée en intensité moyenne à forte (niveau 2 à 6), principalement à cause des hauteurs de vagues. Une fois encore, la différence entre les intensités obtenues à la plage et au mouillage sont similaires.

L'extrémité est du département est impactée par des vagues de grandes amplitudes, généralement supérieures à 3 m, avec des courants supérieurs à 1.5 m/s, **faisant de cet espace une zone d'intensité très forte**. Les inondations ([Figure 59](#), [Figure 60](#), [Figure 61](#)) sont importantes, surtout à l'extrémité est. Les hauteurs de vagues diminuent une fois à terre lors de l'inondation, mais elles peuvent tout de même atteindre 2.5 m à la jonction terre-mer. Il en va de même pour les courants ; ceux-ci sont globalement supérieurs à 1.5 m/s, avec des valeurs extrêmes pouvant atteindre à 6m/s dans les zones portuaires de Menton, et diminuent au rivage, atteignant toutefois 1.5 m/s à terre. Les intensités correspondantes sont ainsi élevées, entre 4 et 5 sur l'ensemble de la frange littorale.

Les intensités diminuent également une fois à terre ; la tendance de l'intensité suit celles des hauteurs d'eau et des courants. Celles-ci restent importantes sur le bord de mer, comprises entre 1 et 4 selon les endroits. Ces fortes valeurs laissent supposer de forts impacts en cas de tsunami de grande ampleur. Au large immédiat, des dégâts pouvant être générés sur les bateaux au mouillage seraient également importants. De plus, la zone de « sureté » se situe au-delà de la valeur bathymétrique générale de 35 m pour cette magnitude ([Figure 59](#), [Figure 60](#), [Figure 61](#)).

L'est du département serait ainsi fortement impacté en cas de phénomène modéré, et très fortement impacté en cas de phénomène extrême. Les plages apparaissent une fois encore comme des espaces sensibles, beaucoup étant contraintes entre la mer et des reliefs (mur ou topographie naturelle), posant de nombreux problèmes, principalement en terme d'évacuation et de mise à l'abri. Les zones de mouillages apparaissent également comme des zones sensibles, car de nombreuses zones, regroupant les plus hautes hauteurs d'eau et les courants les plus forts, sont localisées au large immédiat. De plus, dans le cas du scénario extrême, les bateaux doivent s'éloigner davantage au large afin de se mettre en sécurité.

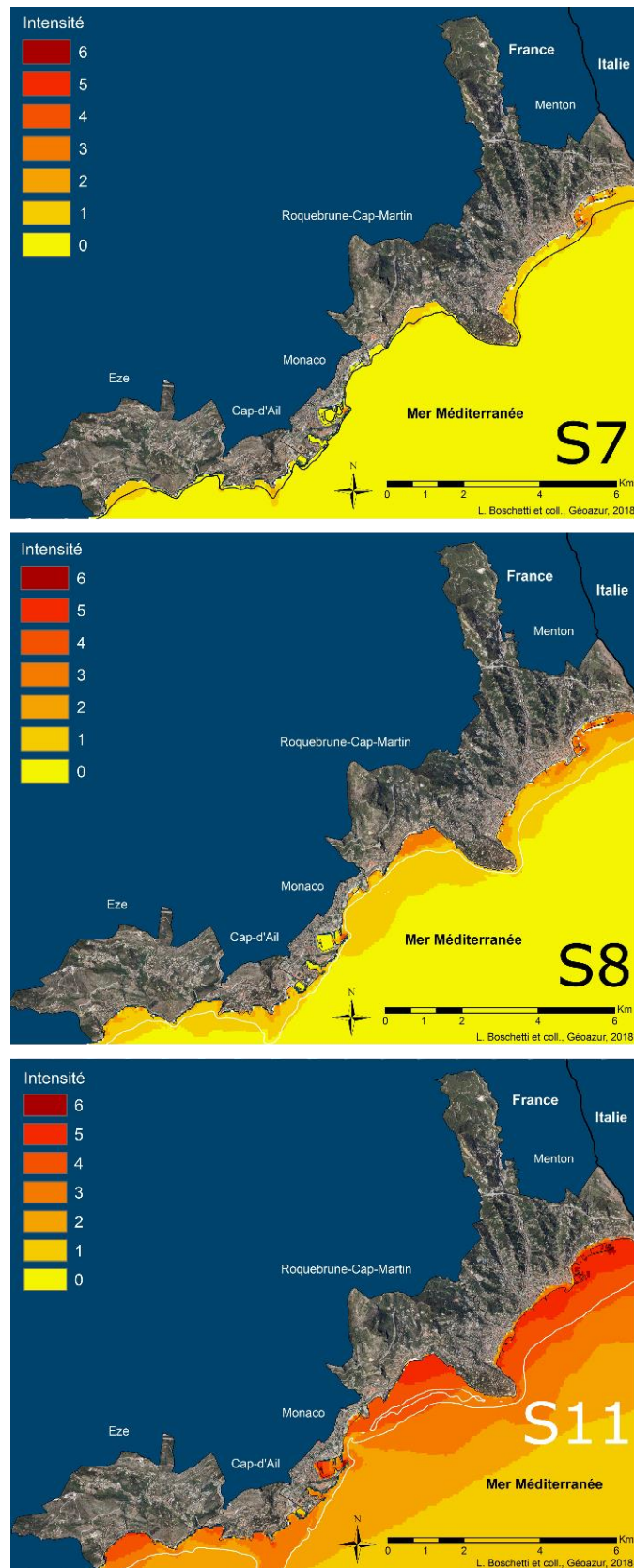


Figure 61 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale de l'intensité de l'aléa tsunami, telle que nous l'avons définie, pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) et pour les communes de l'est du département des Alpes-Maritimes.

Les courbes blanches représentent les courbes de niveaux isobathes : 10 m pour le scénario S1887, 20 m pour SHyp et 30 m pour Stot.

Pour résumer, notre cartographie de l'aléa tsunami au travers des champs de hauteurs de vagues, des courants et de la notion d'intensité que nous avons proposée montre une forte variabilité spatiale. Cette variabilité est principalement due aux effets de sites tels que la focalisation qui est due à la morphologie côtière, la position relative de la source, ou encore la directivité de la vague. La côte Ligure dans son versant français contient des zones abritées à très exposées : les caps tels que le Cap d'Antibes et le Cap Ferrat, ainsi que les baies semi-fermées telle que la plage de la Salis à Antibes sont potentiellement des zones d'impact important à cause de processus de convergence/focalisation. A l'opposé les baies ouvertes telles que la baie des Anges et la baie de Cannes, seraient moins exposées grâce à des processus de divergence/dé-focalisation. L'aspect positif est que ces dernières sont les plus peuplées, surtout en période estivale.

Nous venons de détailler les résultats des simulations numériques de tsunamis obtenus pour l'ensemble du territoire d'étude, c'est-à-dire les Alpes-Maritimes. Des disparités sont observables sur le territoire, selon les endroits et selon les hypothèses. Ces résultats restent toutefois le fruit de modèles numériques et ne représente pas LA réalité mais UNE réalité hypothétique. L'approche modélisatrice et cartographique est en effet empreinte d'incertitudes : incertitudes liées à la qualité des données, incertitudes liées à l'erreur d'estimation des hauteurs d'eau, incertitude liée à la non prise en compte de processus ou de facteurs comme la présence de murs de soutènement.

3. Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif principal une mise en application de l'échelle d'intensité déterminée au [Chapitre 6](#). L'aboutissement en est l'obtention d'une cartographie des hauteurs d'eau, des courants et des intensités liées à des tsunamis générés par la faille Ligure le long de la Côte d'Azur. Les hauteurs d'eau et les courants sont des données brutes issues de simulation numériquement (via le modèle *Funwave*). Elles sont nécessaires pour le calcul et la détermination des niveaux d'intensités.

Les résultats présentés ci-dessus concernent les dégâts potentiels que pourraient générer un tsunami de **magnitude M** et de **vulnérabilité Biophysique V_{PB}** données. Par conséquent, il s'agit de son impact direct et exclusif. Ainsi, les **effets spatio-temporels** indirects sur le territoire situé hors de la zone d'impact du tsunami ne sont pas pris en compte.

Par ailleurs, ne sont pas intégrés les effets sur les personnes (secours, police, etc.) et structures (bateaux de secours, camions pompiers, etc) qui entrent dans la zone d'impact du tsunami, après son arrivée et pendant la durée d'impact de celui-ci. L'intensité proposée ne tient donc pas compte de la totalité des effets de l'aléa tsunami. Ceci précisément parce que seule a été prise en compte la vulnérabilité biophysique, or celle-ci ne prend en considération que les dégâts directs dans la zone d'impact de l'aléa.

Cette vulnérabilité s'appuie uniquement sur des propriétés physiques, des populations et des structures (PPR, 1999 ; PPR Thau, 2012 ; Papadopoulos et Imamura, 2001 ;

Shuto, 1993 ; Lynett et coll., 2014). En aucun cas, ne sont pris en compte les aspects sociaux et territoriaux. En particulier ne sont pas pris en considération les comportements face au danger, la gestion de crise, la prévention, etc. Idéalement, il serait souhaitable d'élargir cette notion d'intensité restreinte (qui ne dépend que de (VBP)) et d'intégrer la vulnérabilité dans son ensemble, incluant en particulier les vulnérabilités sociale et territoriale.

L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une publication (Boschetti et coll., 2020). Cette dernière est disponible est annexe (Annexe 5).

Cette analyse des données brutes de l'aléa et de l'intensité s'intègre dans une étude plus large d'analyse du risque de tsunami. Ces résultats permettent d'aboutir à une analyse plus large de l'aléa (Chapitre 9), qui eux-mêmes, associés à l'analyse de la vulnérabilité territoriale du littoral azuréen (Partie III), vont permettra d'aboutir à une analyse de risque (Partie IV).

CHAPITRE 9 : CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA TSUNAMI LE LONG DES ALPES-MARITIMES VIA LA METHODOLOGIE SEMI-QUANTITATIVE DU RISQUE

Une cartographie d'aléa peut être représentée de différentes manières, selon plusieurs critères. Dans le chapitre précédent a été proposée une cartographie de l'aléa tsunami à partir de sa magnitude (les données physiques : hauteurs d'eau et courants) et de son intensité. Il s'agit de données brutes qu'il faut traiter afin de les intégrer à une analyse plus large. Ici, l'objectif est la réalisation d'une analyse de risque par une méthode semi-quantitative. Cette dernière passe par la mise en indice (3 niveaux) des variables qui composent le risque, c'est-à-dire de l'aléa et de la vulnérabilité, et donc des sous-variables qui les composent, ici **l'intensité** et **l'éloignement** de la zone de danger.

La cartographie de l'aléa tsunami par ses composantes physiques (hauteur d'eau, courant et intensité) a été en grande partie traitée dans le [Chapitre 8](#), lors de l'analyse des différents scénarios de modélisation. A cette occasion, ont été détaillées les différentes zones d'impacts, à partir de données de magnitude et d'intensités. Pour rappel, trois scénarios d'aléa ont été retenus : **S1887**, correspondant à l'évènement historique ; **SHyp**, similaire à celui de 1887 mais décalé le long de la faille vers l'ouest ; et **STot**, hypothèse selon laquelle la totalité de la faille viendrait à rompre et provoquerait un séisme d'une puissance jamais enregistré dans la région ($M_w = 7.51$). Ce dernier est donc à prendre avec précaution.

Les résultats sont détaillés selon une découpe faite d'ouest en est, selon trois sections : l'**est** du département, comprenant les communes de Théoule-sur-Mer à Antibes ; le **centre**, de Villeneuve-Loubet à Villefranche-sur-Mer ; l'**ouest**, d'Eze jusqu'à Menton, frontière avec l'Italie. Sont présentés ici les cartographies de l'aléa tsunami mis sous forme indicielle pour l'intensité, l'éloignement et enfin la cartographie globale de l'analyse de risque.

1. Cartographie de la mise en indice de l'intensité de tsunami

L'intensité de l'aléa tsunami a été largement développée dans le [Chapitre 8](#) et représentée à partir de son échelle à 7 niveaux. Dans le cadre de cette méthodologie, nous ne pouvions pas conserver l'ensemble de ces niveaux. Une classification en trois niveaux d'indice a alors été réalisée, entraînant une perte d'information. Sont ainsi considérés en aléa faible, le niveau d'intensité zéro (qui ne signifie pas nul), en aléa moyen l'intensité 1 et en aléa fort les intensités supérieures à 2.

Cette mise en indice de l'intensité a été cartographiée, mais comme les indices d'intensités ne sont localisés qu'à l'intérieur de la zone inondée (leur étendue spatiale représente d'ailleurs la zone d'inondation), une cartographie globale du littoral n'est pas exploitable. Seul ressorte les zones d'inondations importantes dans le cas du scénario extrême STot à la Salis, autour du Cap Ferrat et à Menton.

Une cartographie plus localisée et découpée en trois sections d'ouest en est (Figure 62) est alors réalisée. L'ouest du département des Alpes-Maritimes, le plus éloigné de la source quel que soit le scénario, est la partie du territoire la moins impactée. Dans le cas du scénario S1887, apparaissent seulement des espaces d'indices faible ou moyen, avec peu d'inondation. Les plages peuvent toutefois être impactées. Le scénario SHyp, dont l'épicentre du séisme est plus proche de la France, apparaît davantage impacté. Les impacts sont toujours faibles dans la Golfe de La Napoule, mais des valeurs moyennes et fortes ressortent autour du Cap d'Antibes. Le scénario extrême quant à lui est plus fortement marqué par des espaces caractérisés par un aléa fort et les zones d'inondations rentrent plus profondément dans les terres. L'ensemble du littoral est ainsi marqué d'espace d'aléa fort, avec une zone davantage marquée au Cap d'Antibes, au quartier de la Salis.

La cartographie du centre du département (Figure 63) présente les mêmes particularités liées aux différents scénarios. Le scénario historique impacte peu le littoral, mais certaines zones de plages sont impactées comme celles de la promenade des anglais. Le scénario hypothétique est marqué par une inondation similaire, avec des niveaux d'aléas plus importants : moyen et fort au lieu de faible. Le scénario extrême accentue encore davantage cela, en faisant ressortir l'ensemble du littoral d'un liseré rouge, synonyme d'aléa fort. D'important dégâts, notamment humains, peuvent en découler.

La partie est du littoral est la zone la plus proche de l'épicentre, donc la plus fortement impactée. Cet espace est toutefois marqué de reliefs plus importants, impliquant un plus grand nombre de criques et de plages de plus petites tailles qu'à l'ouest du département. Une fois encore, le scénario S1887 laisse peu de marque sur le territoire à l'exception de zones d'inondations caractérisées en aléa fort à Roquebrune-Cap-Martin et Menton (Figure 64). Le scénario hypothétique est sur la quasi-totalité de son territoire caractérisé en aléa fort. Il en va de même avec le scénario STot, avec cette fois-ci une inondation bien plus importante et fortement prononcée. Le port Hercule de Monaco, ainsi que les plages sont impactés. La totalité de la promenade entre Roquebrune-Cap-Martin et Menton dispose d'un aléa fort, couplé avec une large inondation qui rentre à l'intérieure des terres.

Cette cartographie de la mise en indice de l'intensité de tsunami permet de faire ressortir les espaces du territoire fortement impactés par le phénomène. Elle se limite donc à la zone d'inondation, c'est-à-dire une petite partie de la frange littorale. Or, souhaitant traiter le territoire dans son ensemble, l'éloignement de la zone d'inondation vient compléter la mise en indice de l'intensité.

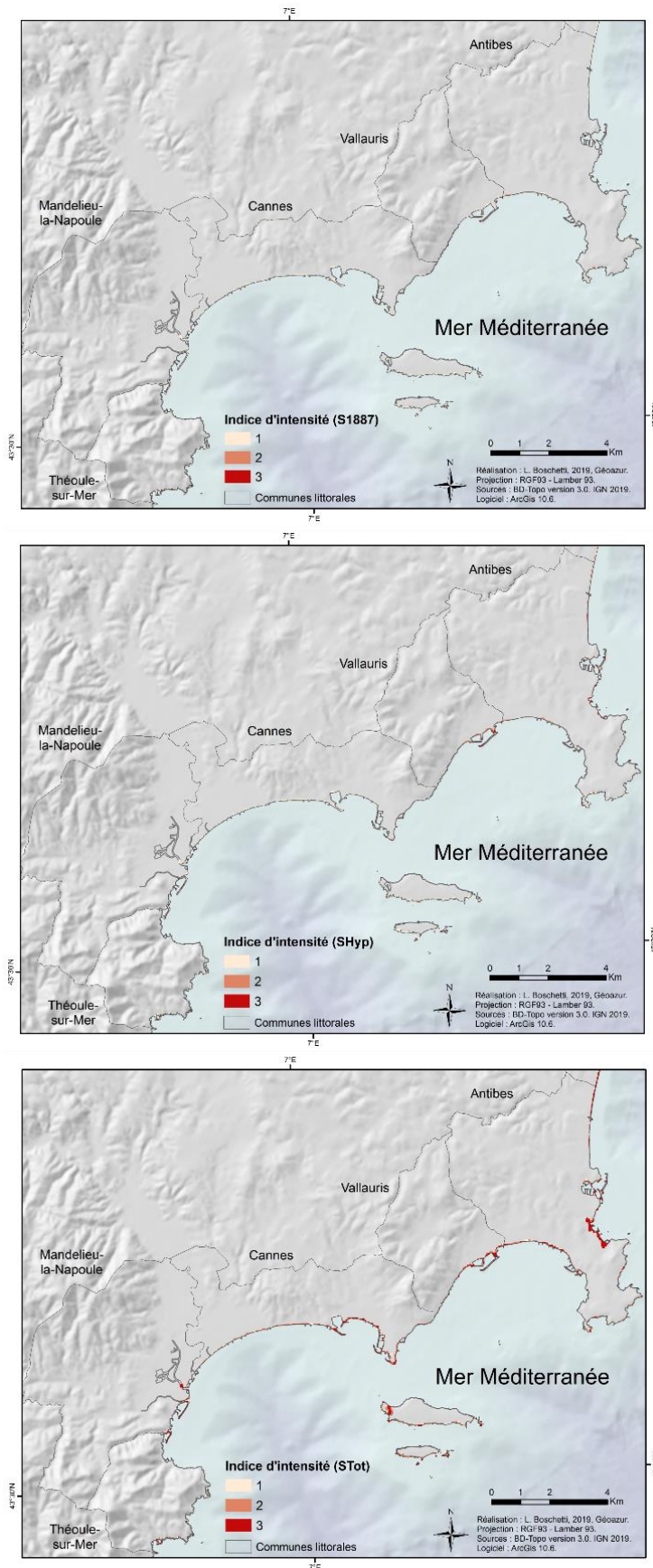


Figure 62 : Cartographie de la mise en indice de l'intensité d'un tsunami pour les communes littorales de l'ouest des Alpes-Maritimes

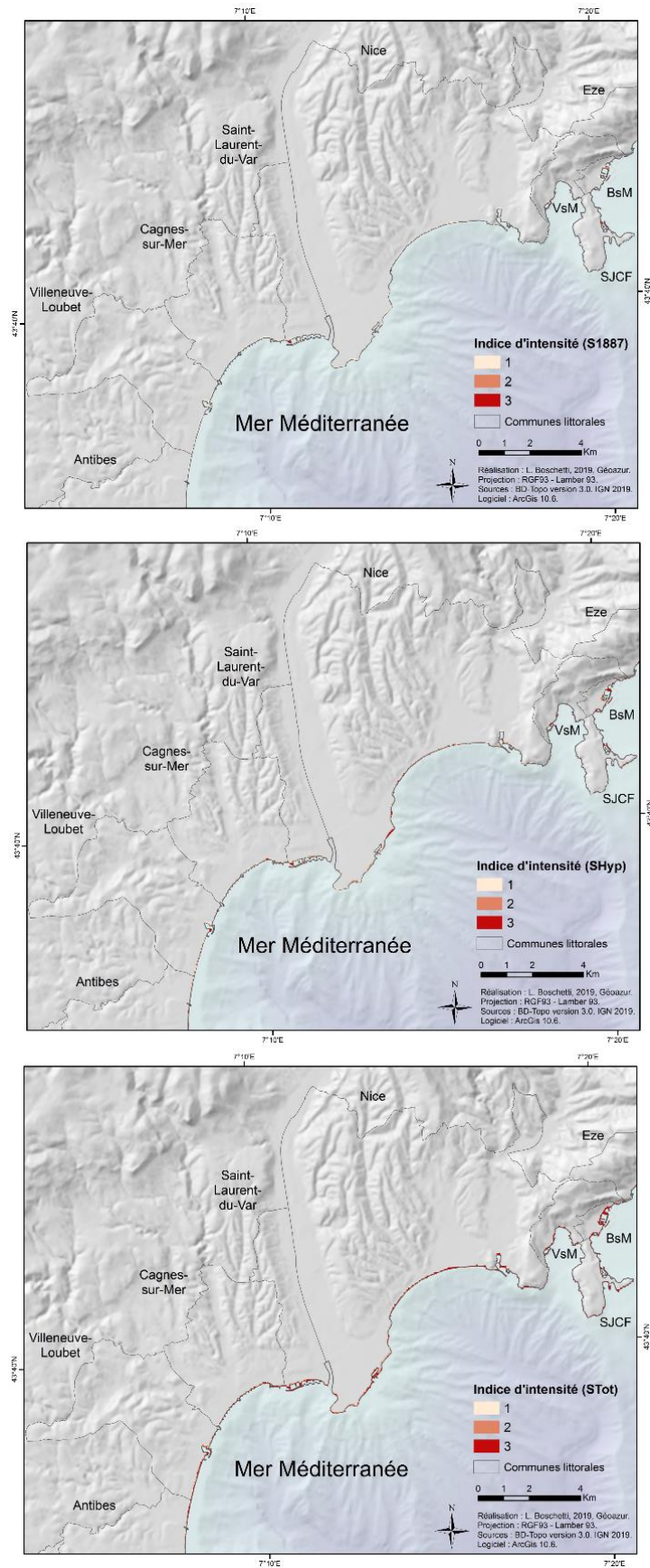


Figure 63 : Cartographie de la mise en indice de l'intensité d'un tsunami pour les communes littorales centrales des Alpes-Maritimes

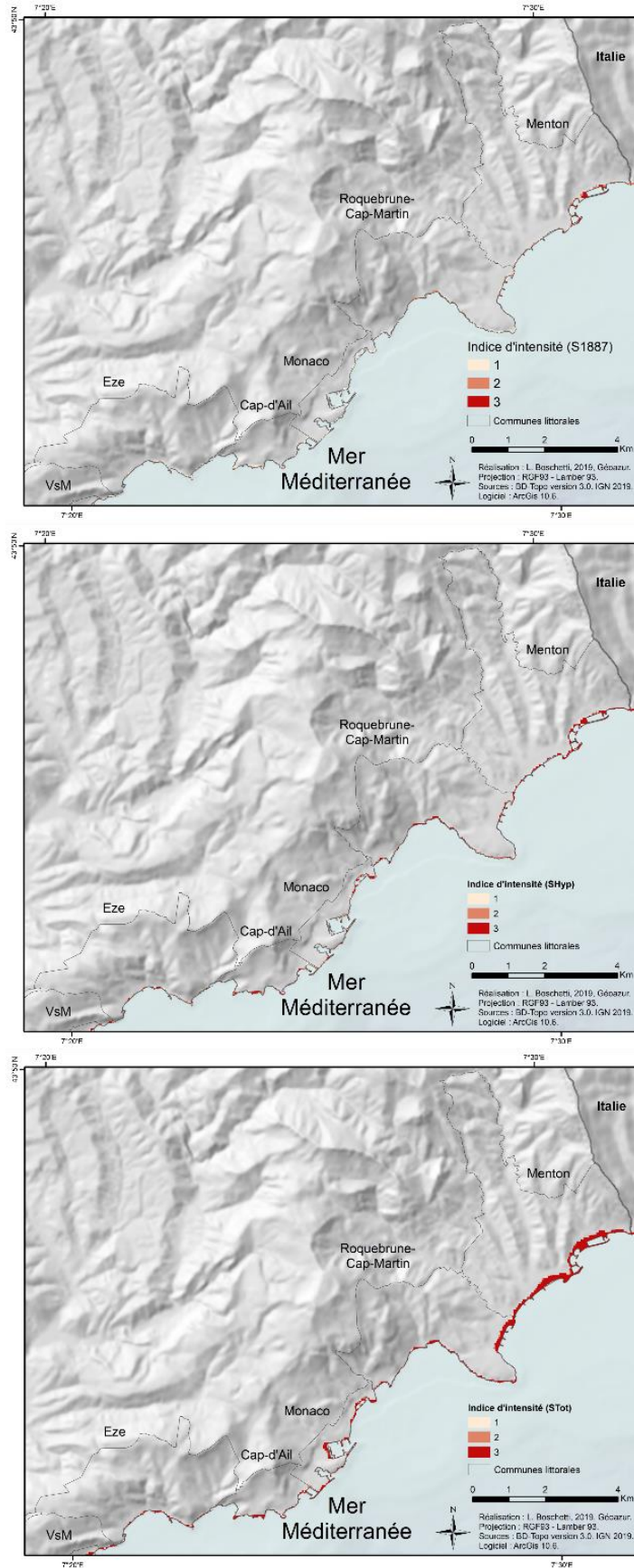


Figure 64 : Cartographie de la mise en indice de l'intensité d'un tsunami pour les communes littorales de l'est des Alpes-Maritimes

2. Cartographie de l'éloignement à la menace

L'objectif de cette étude est la réalisation d'une cartographie du risque de tsunami. Pour se faire, nous avons choisi d'utiliser la vulnérabilité territoriale qui permet de prendre le territoire dans son ensemble. L'analyse de l'aléa ne peut donc pas se limiter à sa seule zone d'exposition, surtout lorsqu'il s'agit d'un aléa localisé comme peut l'être le tsunami. De plus, a terme, il serait bon de s'extraire d'une analyse mono-aléa pour intégrer une étude multi-aléa avec la prise en considération de l'aléa générateur du tsunami, ici un séisme. Contrairement au tsunami, les effets du séisme seront plus globaux et intégreront une grande partie du territoire. C'est pourquoi nous avons pris le parti d'intégrer à l'intensité une variable d'éloignement, qui permet d'intégrer les espaces qui ne sont pas directement impactés par la menace.

La cartographie de la zone d'inondation est primordiale parce qu'elle permet de mettre en évidence les éléments et structures directement exposés à l'aléa tsunami. A l'inverse, peuvent être déterminés les espaces non exposés ou potentiellement indirectement exposés. Pour chaque hypothèse de rupture (S1887, SHyp et STot) les zones inondées ont été déterminées. A partir de celles-ci, a été défini un niveau d'éloignement signalant la potentielle dangerosité de la zone. Il faut toutefois noter que ces zones d'éloignement ont été réalisées uniformément sans tenir compte de la topographie et donc de la pente.

Pour mémoire, trois niveaux d'indice ont été déterminés. La zone d'inondation est définie avec un niveau fort (indice de niveau 3). Elle est complétée d'un espace de 40 mètres autour de la première, marquant le niveau d'erreur des simulations. Il s'agit des espaces potentiellement directement exposés.

Une zone plus large, de 500 mètres autour, marque une zone tampon, où les dégâts et perturbations peuvent être indirects. C'est-à-dire qu'ils sont liés à l'événement mais ne sont pas directement causés par le tsunami (mouvement de panique, bouchon, désorganisation globale, etc.). Celles-ci sont marquées d'un niveau moyen (indice de niveau 2). Au-delà, c'est-à-dire à plus de 500 mètres de la zone d'inondation, le territoire est toujours soumis à des perturbations indirectes mais les dégâts devraient s'atténuer. Il s'agit donc d'une zone d'aléa faible (indice de niveau 1).

L'ouest du département est faiblement impacté (Figure 65), surtout pour les scénarios S1887 et SHyp. Ceci s'explique par l'éloignement de la côte à la source. Le tsunami ne rentre que peu dans les terres le long du Golfe de La Napoule. Sont principalement directement impactées les plages, l'eau n'atteignant pas les routes. Peu de variations existent entre les trois scénarios proposés, à l'exception du cap d'Antibes et plus précisément de la plage de la Salis. Cette dernière, peu impactée dans les deux premiers scénarios, l'est fortement dans le scénario extrême.

La baie des Anges (Figure 66) est également faiblement impactée, puisque l'inondation générée par la vague ne dépasse pas non plus les plages, quel que soit le scénario. Les plages restent toutefois un espace de vie tout au long de l'année. Ces espaces sont donc sensibles et doivent être pris en considération même pour un événement de faible ampleur.

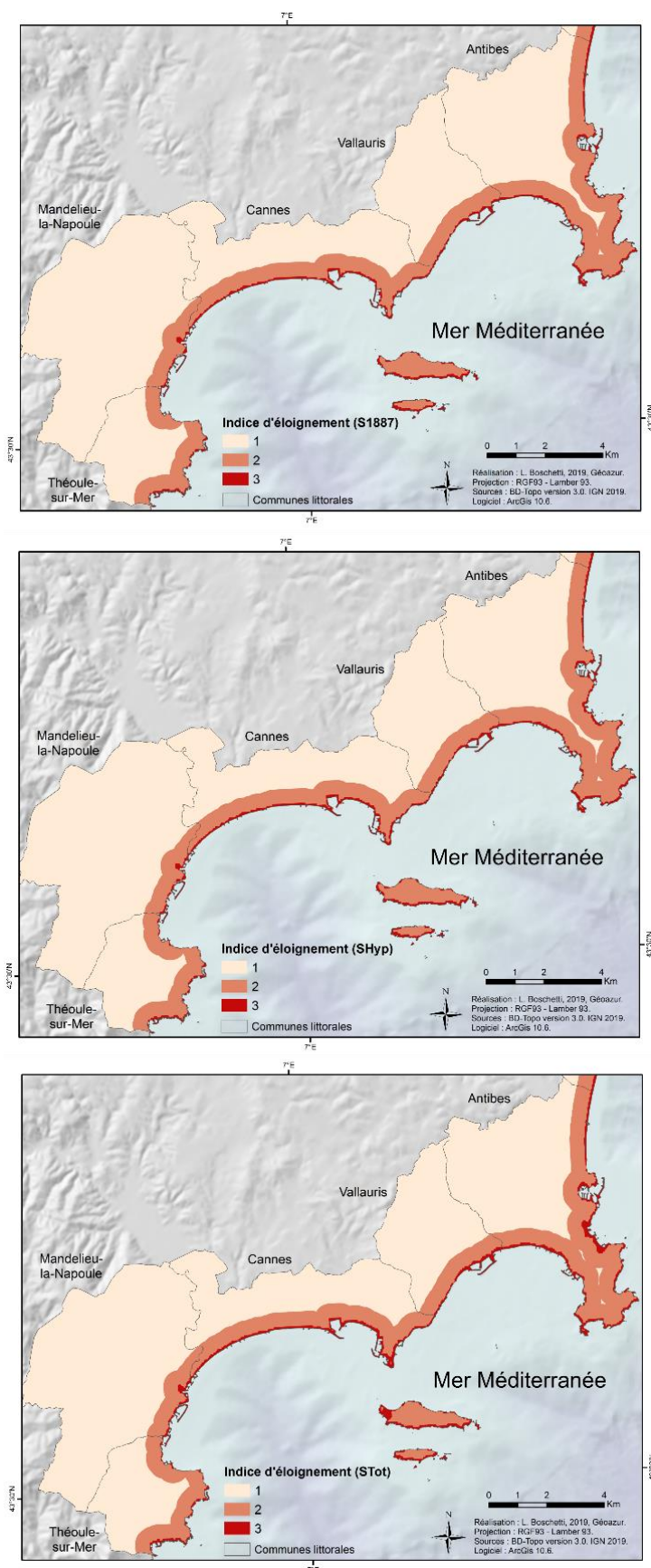


Figure 65 : Cartographie de la mise en indice de l'éloignement pour les trois scénarios dans la partie ouest du département des Alpes-Maritimes.

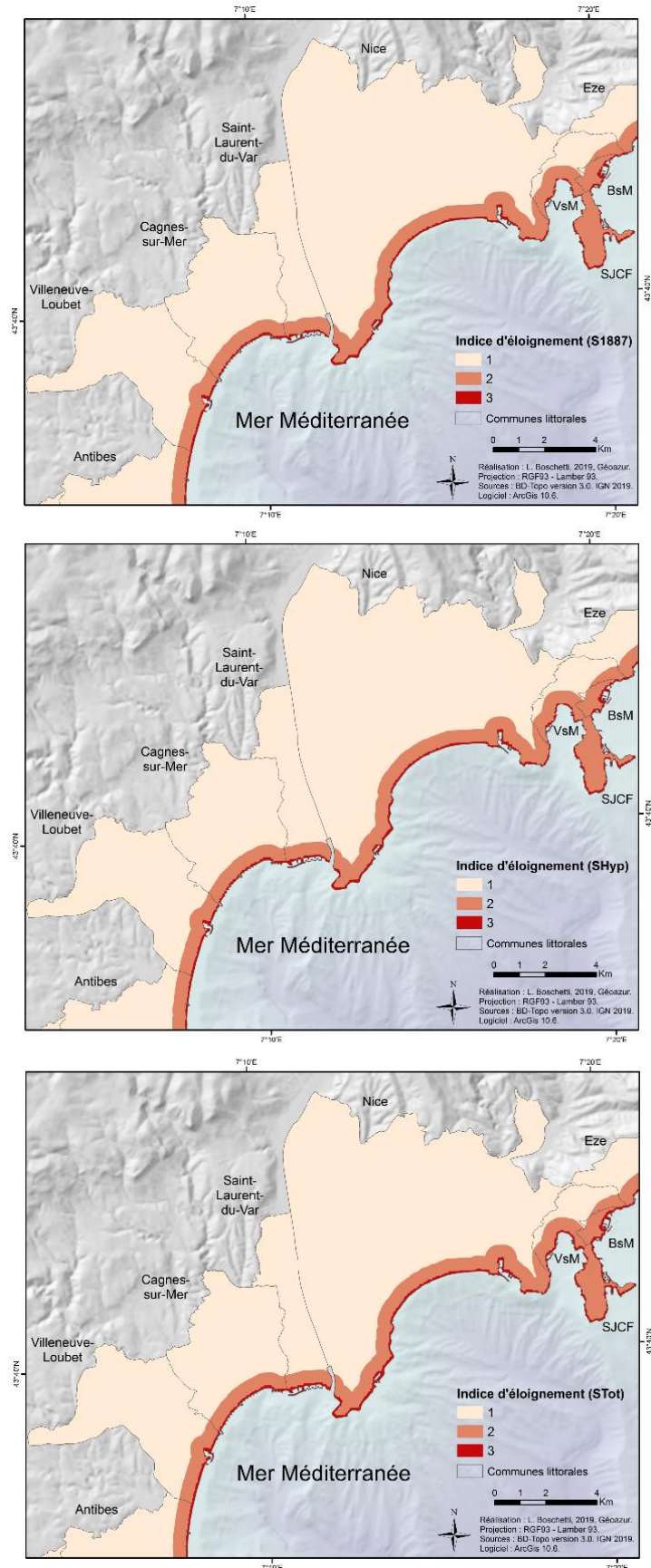


Figure 66 : Cartographie de la mise en indice l'éloignement pour les trois scénarios dans la partie centre du département des Alpes-Maritimes

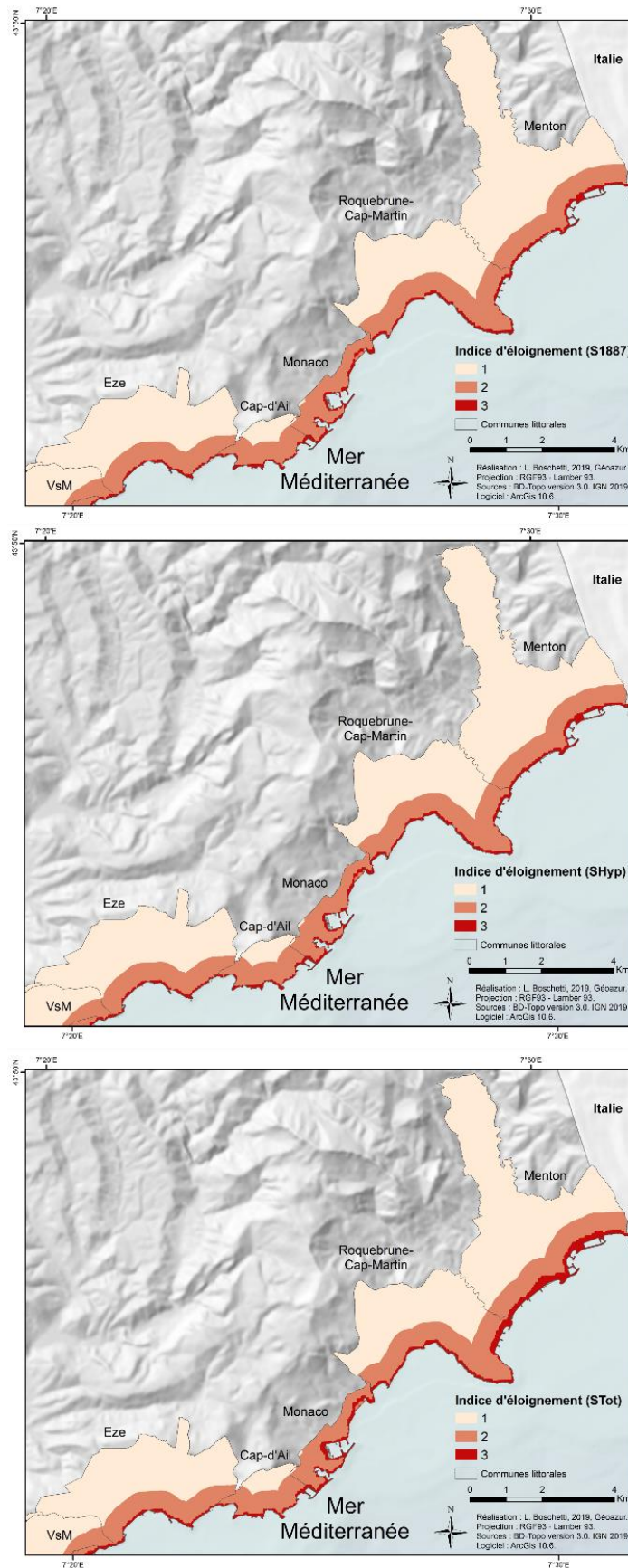


Figure 67 : Cartographie de la mise en indice l'éloignement pour les trois scénarios dans la partie est du département des Alpes-Maritimes

L'est du département est la zone la plus exposée à l'aléa tsunami Il reste toutefois faiblement impacté (Figure 67) et de grandes variations ressortent entre les différents scénarios. Dans le cas des scénarios S1887 et SHyp, l'inondation semble se limiter aux plages et aux abords immédiat du bord de mer. En revanche, dans le cas du scénario STot, une inondation bien plus importante ressort. L'extrémité est du territoire, c'est-à-dire l'ensemble du littoral du Menton au Cap-Martin, voit l'inondation rentrer de manière importante à l'intérieure des terres.

Le scénario historique, S1887, de par son éloignement des côtes françaises et de sa magnitude ($M_w = 6.9$) est le scénario le moins impactant. Le scénario SHyp, caractérisé par une source plus proche de la frontière française, impacte davantage le littoral azuréen, tout en inondant que faiblement la zone. Le scénario extrême est le plus pénalisant, principalement au niveau du Cap d'Antibes et de l'extrémité Est du département.

Cette cartographie et celle de l'intensité sont ensuite combinées afin d'obtenir une cartographie de l'aléa dans son ensemble, c'est-à-dire sur l'ensemble du territoire d'étude et non plus seulement uniquement sur la zone d'inondation.

3. Cartographie globale de l'aléa tsunami dans les Alpes-Maritimes

Les deux étapes précédentes ont consisté en la réalisation de deux cartographies distinctes des variables de l'aléa mis sous forme d'indice : d'un côté celle de l'intensité et de l'autre celle de l'éloignement de la zone d'inondation. Afin d'obtenir une valeur d'aléa global, un croisement a été réalisé grâce à un tableau permettant l'obtention de trois niveau d'aléa total : faible, moyen et fort.

Le zonage ainsi obtenu, marque en aléa fort les zones directement inondées. Les zones à proximité des celles directement inondées sont celles qui sont susceptibles d'être indirectement impactées ou potentiellement directement impactées en cas d'erreur numérique et sont caractérisées en aléa moyen. Et enfin, le reste du territoire, qui n'est pas directement impacté, mais qui peut être indirectement touché et connaitre des perturbations est défini en aléa faible.

Ces valeurs ont ainsi été mis sous forme cartographie, permettant l'obtention de cartes (une carte pour chaque scénario) à l'échelle du littoral. Une fois encore, à cette échelle, ces cartes s'avèrent difficile de lecture. Apparaît toutefois une gradation dans la visibilité des zones d'indice fort, sur la dernière apparaissent clairement les zones fortement impactées du Cap d'Antibes et de Menton.

L'ouest du littorale (Figure 68) est majoritairement caractérisé par un aléa moyen sur le littoral pour le scénario historique. Les plages du Golfe de La Napoule et autour du Cap d'Antibes sont impactées, mais aucune zone en aléa fort ne ressort. Le scénario hypothétique dispose de zones d'impacts similaires au scénario précédent, à l'exception du quartier de la Salis à Antibes qui voit s'étendre son emprise spatiale.

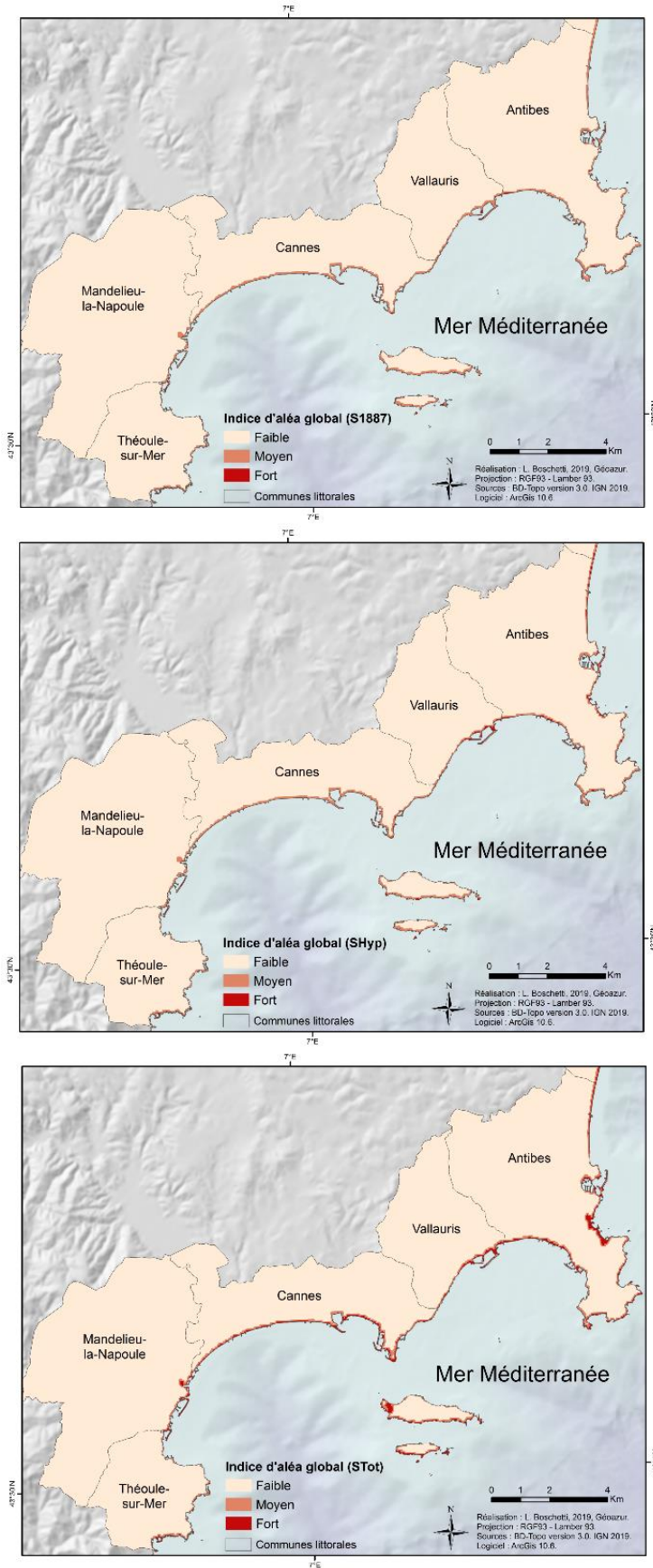


Figure 68 : Cartographie globale de l'aléa tsunami pour les communes littorales de l'ouest des Alpes-Maritimes

Quant au scénario extrême, il ressort à la fois plus puissant (aléa fort dominant) et avec une plus grande emprise spatiale. L'extrême ouest du département (Théoule-sur-Mer) est ainsi faiblement impacté. Les Golfes de La Napoule et de Juan sont majoritairement classés en aléa moyen. Le tsunami semble traversé l'île St Marguerite, plus grande île des Îles de Lerins, en sa pointe ouest. Le Cap d'Antibes voit une importante zone exposée se dessiner au quartier de la Salis. Le bord de mer à l'extrémité est d'Antibes est également impacté.

Les communes centrales (Figure 69) sont principalement impactées à Saint-Laurent-Du-Var, ainsi que les communes limitrophes du Cap Ferrat : Villefranche-sur-Mer, Saint-Jean-Cap-Ferrat et Beaulieu-sur-Mer. Le scénario S1887 atteint peu de zone littorale, laissant la frange littorale être caractérisée par un aléa moyen. Le scénario hypothétique laisse apparaître des espaces à aléa fort de manière sporadiques le long de la baie des Anges. Enfin, le scénario extrême expose une fois encore un liseré d'aléa fort sur la quasi-totalité du littoral, sans intensification notable sur une partie spécifique du territoire.

L'est du département (Figure 70), le plus exposé par sa proximité à la source, voit déjà apparaître des espaces d'aléa fort pour le scénario historique S1887. Ceux-ci sont principalement situés à Roquebrune-Cap-Martin et Menton. Le reste de la frange littoral ressort en aléa moyen. Le SHyp voit apparaître une gradation avec l'apparition de plus nombreuses zones d'aléa fort, notamment à Cap-D'ail et Monaco. Le scénario extrême apparaît comme le plus alarmiste de tous sur cette portion du territoire. Plusieurs communes seraient fortement impactées : Monaco (Port Hercule et ses plages), Roquebrune-Cap-Martin et surtout Menton. Une grande zone d'inondation se dessine et laisse présager une entrée en profondeur de l'eau dans les terres. De plus, ces zones sont caractérisées par un aléa fort, disposant donc de hauteur d'eau et/ou de courant conséquent.

Cette cartographie globale de l'aléa permet de faire ressortir les espaces du littoral qui sont exposés à l'aléa de tsunami. Ce dernier se focalise sur les littoraux, c'est pourquoi les variations spatiales de l'aléa se concentre sur ces espaces à la jonction terre-mer.

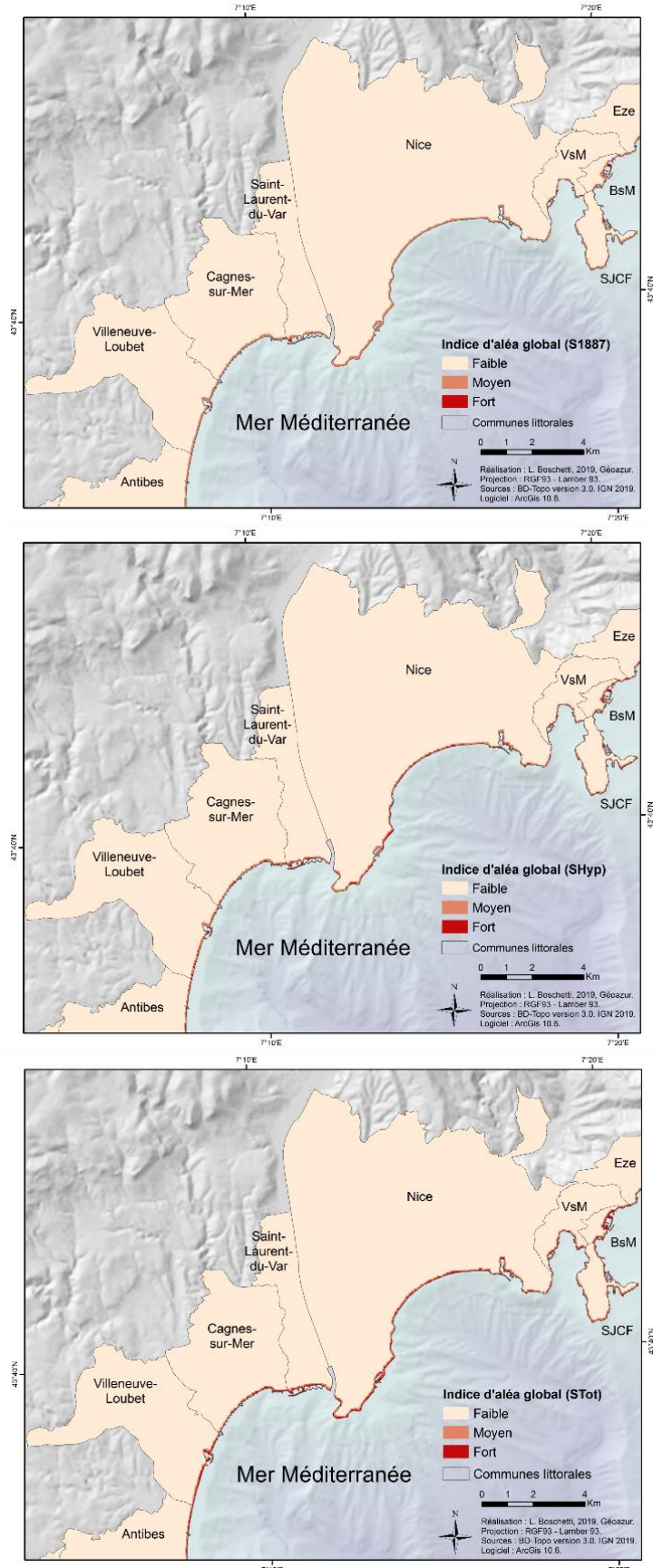


Figure 69 : Cartographie globale de l'aléa tsunami pour les communes littorales centrales des Alpes-Maritimes

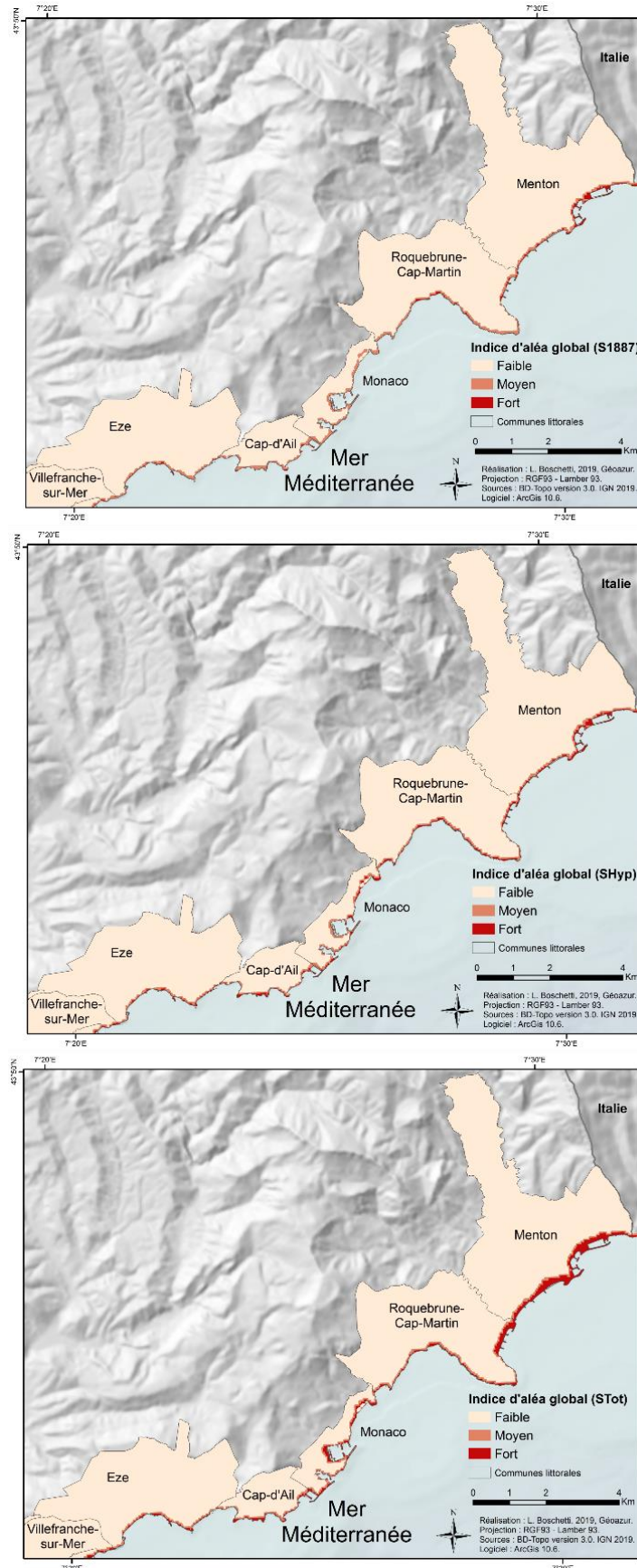


Figure 70 : Cartographie globale de l'aléa tsunami pour les communes littorales situées à l'est des Alpes-Maritimes

4. Conclusion

Cette cartographie de l'aléa global permet de faire ressortir les espaces particulièrement exposés à l'aléa tsunami. Ils correspondent aux zones d'intensité, qui caractérisent l'étendue spatiale de l'aléa. Il ressort donc que de manière générale les baies sont faiblement impactées, mais restent exposées aux vagues de tsunami de plus faibles ampleurs. Les caps quant à eux sont plus fortement exposés, le cap d'Antibes étant particulièrement frappé le long de sa partie orientale. L'est du département, principalement les communes de Roquebrune-Cap-Martin et Menton, est fortement exposé dû à sa proximité de la source.

Une fois l'aléa étudié, analysé, transformé sous forme indicielle et cartographié, il convient de faire de même pour la vulnérabilité. La réalisation d'une analyse de risque étant tributaire de celle de l'aléa et de la vulnérabilité territoriale total.

CONCLUSION ET DISCUSSION DE LA PARTIE II

Toute étude scientifique nécessite une discussion des résultats obtenus. Elle peut se faire sous différentes manières. Ici nous avons décidé de comparer nos résultats avec ceux obtenus sur le même territoire par des études antérieures. Par la suite, nous aborderons les limites du modèle utilisé et de la résolution, permettant d'introduire la question des structures verticales. Ces dernières, bien que non prises en compte par le modèle, sont présentes sur le littoral et participent très certainement à modifier les dynamiques d'inondation.

1. Précision et résolution spatiale des calculs issus des simulations numériques

Nous avons montré que la région Ligure française est exposée à l'aléa tsunami. Cela a été montré grâce à une modélisation et cartographie des zones d'inondation, du *runup*, des courants maximaux et de l'intensité de la catastrophe. Pour cela nous avons effectué des simulations numériques avec une résolution horizontale de 40 m. Des travaux récents concernant l'aléa tsunami sur la côte Est des Etats-Unis ont montré qu'une résolution de 30 m était recommandée pour obtenir une convergence des cartes de *runup* et d'inondation (Grilli et coll., 2015 ; Schambach et coll., 2018). Nos simulations sont donc dans la limite du domaine de validité tandis que celles de loulalen et al. (2014) de résolution 100 m sont à l'extérieur.

Simultanément à nos simulations avec le modèle Geowave (nécessitant une grille homogène) et une résolution de 40 m, d'autres calculs ont été menés à l'Université de Rhode Island (Nemati et coll., 2019 ; Figure 71) avec des grilles de calcul de résolution allant de 640 m à 10 m grâce à une nouvelle version de *Funwave*, *Funwave-TVD*, qui autorise l'utilisation de grilles imbriquées (Shi et coll., 2012 ; Kirby et coll., 2013). Ce papier est disponible en annexe (Annexe 3). La principale différence entre *Funwave* et la version utilisée de *Funwave-TVD* est la possibilité pour cette dernière d'imbriquer plusieurs grilles de résolutions différentes dont la précision s'accroît en s'approchant des côtes.

Il faut cependant noter que, pour un même scénario, les simulations dans les différentes grilles sont exécutées séparément dans un sens uniquement : aux frontières entre deux grilles successives, les résultats de la grille de plus faible résolution servent de conditions initiales et de bord à la grille de meilleure résolution (pas l'inverse). Ainsi les résultats obtenus avec la résolution plus fine dépendent également de la résolution plus large. Il n'est donc pas juste, a priori, d'énoncer que les résultats des calculs *Funwave-TVD/10 m* sont plus précis que ceux de *Funwave/40 m* (les nôtres). Dans tous les cas nos résultats *Funwave/40 m* sont, semble-t-il, plus précis que ceux de *Funwave-TVD/40m*.

Simplement, les simulations *Funwave-TVD/10 m* sont intéressantes car elles permettent une meilleure description des côtes, ce qui est important dans les zones portuaires ou celles ayant une bathymétrie et/ou topographie complexes. Nous

présentons dans ce travail les résultats *Funwave*/40 m, que nous comparons ci-dessous à ceux réalisés avec *Funwave-TVD* (Nemati et coll., 2019) pour validation (Figure 72). Nous montrons également ci-après le gain en précision que nous avons obtenu depuis les calculs de loulalen et coll. (2014) qui ont utilisé une grille de 100 m de résolution (Figure 72).

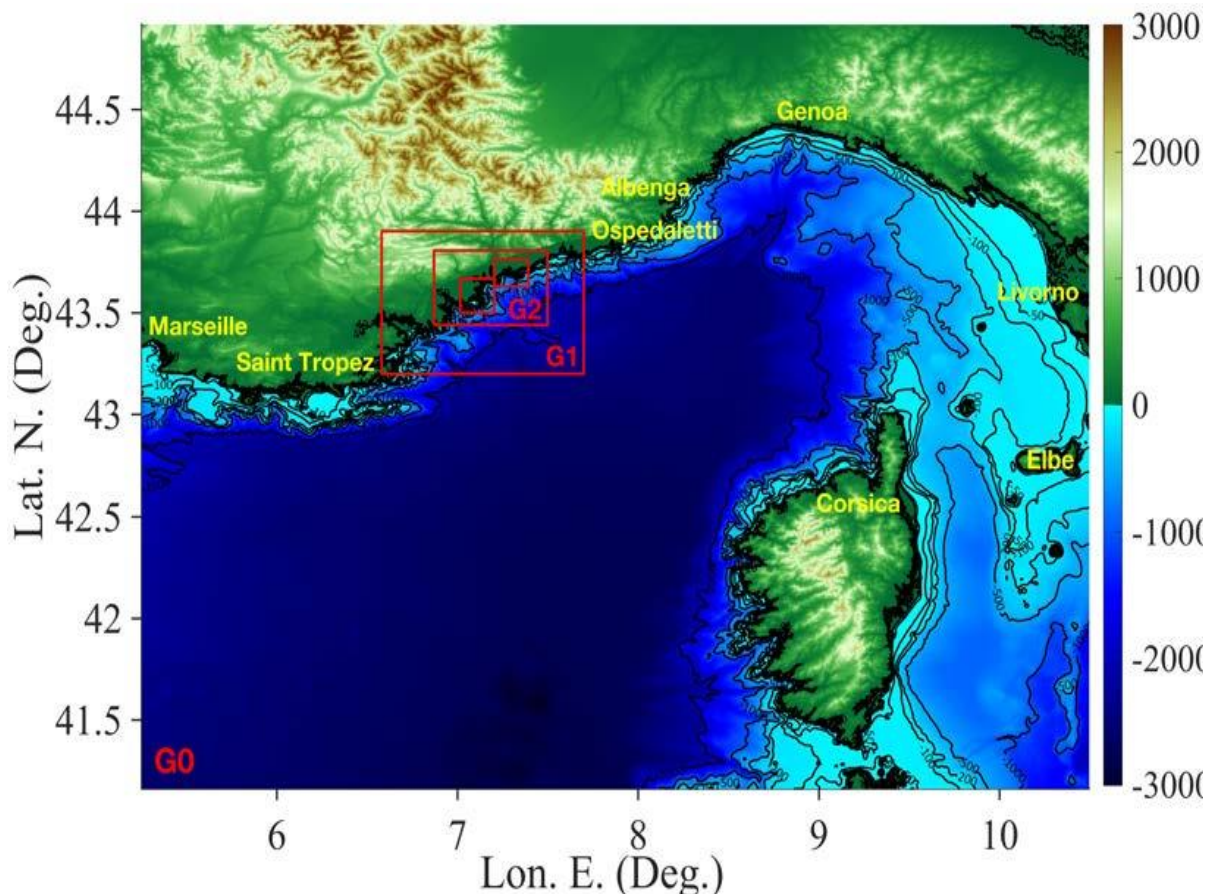


Figure 71 : Grilles de calcul imbriquées construites et utilisées avec la version *Funwave-TVD* (tiré de Némati et coll., 2018)

Les grilles ont des résolutions de 640 m (grille G0), 160 m (G1), 40 m (G2) et 10 m (grilles G3a et G3b).

Une comparaison plus détaillée est réalisée entre les différents résultats obtenus lors des différentes études portant sur la faille Ligure, avec des résolutions différentes (100m, 40m) et avec des modèles différents (*Funwave*, *Funwave-TVD*).

2. Comparaison entre *Funwave-TVD*/40 m et *Funwave-TVD*/10m.

Plusieurs études ont été réalisées au fil des ans sur la caractérisation de la faille Ligure (servant à modélisation la génération d'un tsunami), puis sur la modélisation de la propagation d'un tsunami généré. Ici sont comparés les résultats obtenus par le modèle *Funwave-TVD* à une résolution de quarante mètres et à une résolution de 10 mètres (Nemati et coll., 2019).

Le premier point à noter est la bonne convergence entre les simulations *Funwave-TVD/40 m* et *Funwave-TVD/10 m* obtenue par [Nemati et coll. \(2019\)](#) pour les trois scénarios ([Figure 72](#)). Les moyennes (*Mean*) et écarts types¹⁰ (*STD*) respectifs ne diffèrent jamais de plus de 10% (*STD* pour le scenario S11) ([Tableau 15](#)). L'erreur quadratique moyenne¹¹ (*RMSE*) est très satisfaisante pour le scénario S7 (4% seulement) et satisfaisante dans l'ensemble (ne dépasse pas 25%). Elle se dégrade (4% puis 18% et enfin 25%) au fur et à mesure que la hauteur des vagues s'accroît ([Figure 72](#)) : dans l'ordre croissant depuis S1887 puis SHyp et enfin STot.

S1887	FUNWAVE-TVD 10 m	FUNWAVE-TVD 40 m	FUNWAVE 40 m	FUNWAVE 100 m
<i>Mean</i> (m)	0.16	0.15	0.19	0.13
<i>STD</i> (m)	0.10	0.09	0.13	0.09
<i>RMSE</i> (%)		0.04	0.10	0.08
R^2		0.81	-0.03	0.27
L^2		0.23	0.53	0.45
<i>Corr.</i>		0.90	0.70	0.65
SHyp	FUNWAVE-TVD 10 m	FUNWAVE-TVD 40 m	FUNWAVE 40 m	FUNWAVE 100 m
<i>Mean</i> (m)	0.46	0.43	0.51	0.71
<i>STD</i> (m)	0.32	0.32	0.35	0.62
<i>RMSE</i> (%)		0.18	0.19	0.64
R^2		0.68	0.65	-2.93
L^2		0.33	0.34	1.14
<i>Corr.</i>		0.84	0.85	0.37
STot	FUNWAVE-TVD 10 m	FUNWAVE-TVD 40 m	FUNWAVE 40 m	FUNWAVE 100 m
<i>Mean</i> (m)	1.17	1.10	1.28	0.81
<i>STD</i> (m)	0.71	0.65	0.74	0.54
<i>RMSE</i> (%)		0.25	0.40	0.78
R^2		0.88	0.67	-0.02
L^2		0.18	0.30	0.58
<i>Corr.</i>		0.94	0.86	0.39

Tableau 15 : Moyenne (*Mean* en anglais) et Ecart Types (*Standard deviation* en anglais, *STD*) des runups pour différentes grilles de calcul avec les modèles *FUNWAVE-TVD* ou *FUNWAVE* pour les scénarios S1887, SHyp et STot.

Les autres statistiques se réfèrent aux simulations *FUNWAVE-TVD* de 10 m de résolution: l'erreur quadratique moyenne (*root mean square error* en anglais), défini comme $RMSE = \sqrt{\frac{\sum(h_{i,10} - h_i)^2}{n}}$, ou $h_{i,10}$ correspond au runup simulé au point (*i*) avec *GEOWAVE-TVD* et une résolution de 10 m et h_i est le runup au même point simulé avec les autres résolutions et/ou modèles ; le coefficient de détermination tel que $R^2 = 1 - \frac{\sum(h_{i,10} - h_i)^2}{\sum(h_{i,10} - \bar{h}_{10})^2}$; la norme définie par $L^2 = \sqrt{\frac{\sum(h_{i,10} - h_i)^2}{\sum(h_{i,10})^2}}$, et le coefficient de corrélation (*Corr*).

¹⁰ L'écart type donne une indication sur la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne. Plus l'écart type est petit plus les valeurs sont proches de la moyenne et plus il est grand, plus elles s'en écartent.

¹¹ L'erreur quadratique moyenne permet de comparer plusieurs estimateurs et d'en calculer la précision.

Cette détérioration s'explique surtout pas le fait qu'une RMSE n'est pas normée. Le coefficient de détermination¹² (R^2) est globalement proche de l'unité (entre 0.68 et 0.88), la norme¹³ (L^2) est faible (entre 0.18 et 0.33) et le coefficient de corrélation¹⁴ est proche de l'unité (toujours >0.84). La convergence entre les simulations de résolutions 40 m et celles de résolutions 10 m n'est pas parfaite mais elle est cependant raisonnable. Les simulations de résolutions s'approchent probablement plus de la réalité mais celles à 40 m peuvent être considérées comme tout à fait acceptables pour l'étude de l'aléa tsunami.

Ainsi, a priori, puisque nos simulations *Funwave/40 m* se font sur une grille unique et homogène, on peut conclure que nos simulations sont également satisfaisantes puisqu'elles ne connaissent pas les problèmes rencontrés aux frontières de sous-grilles des simulations *Funwave-TVD/10 m* et */40 m* (détaillé ci-après).

3. Comparaison entre *Funwave/40 m* et *Funwave-TVD/10m*.

Après avoir comparé deux simulations issues d'un même modèle numérique, une comparaison est réalisée entre les deux résultats issus de modèles différents (*Funwave* et *Funwave-TVD*) pour leurs résolutions les plus fines (respectivement quarante mètres et dix mètres).

Globalement, on observe une assez bonne convergence entre les deux ensembles de simulations (Figure 72). De la même manière que ci-dessus, les moyennes (*Mean*) et écarts types (*STD*) respectifs ne diffèrent jamais de plus de 10% à l'exception de la *STD* de *S7* (30%) (Tableau 15), mais cette dernière est peu représentative car les hauteurs de vagues sont très faibles. Egalement, de la même manière que ci-dessus, l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) est satisfaisante (ne dépasse pas 40%). Pour la même raison que ci-dessus, elle se dégrade (10% puis 19% et enfin 40%) au fur et à mesure que la hauteur des vagues s'accroît (Figure 72). Les coefficients de détermination et normes sont un peu moins satisfaisants que ci-dessus. Le coefficient de corrélation est très satisfaisant, étant toujours supérieur à 70%.

Les écarts entre les deux simulations peuvent cependant être partiellement expliqués par la mauvaise représentation de l'entrée du port de Nice dans les simulations *Funwave-TVD/40 m* et *10 m* (site (5) dans la Figure 72). En effet, alors que la digue de protection a plusieurs mètres de hauteur, elle contient anormalement des points d'entrée en son long dans les grilles de Nemati et coll. (2019). Ceci explique la probable surestimation des hauteurs de vagues au site (5) pour les simulations *Funwave-TVD* (contrairement aux nôtres pour lesquelles la représentation de la digue est entière) détériorant ainsi nos statistiques de façon erronée.

¹² Le coefficient de détermination (R^2) permet de déterminer la qualité d'une régression linéaire. Il varie entre 0, c'est-à-dire un éloignement des points de la droite et 1, qui correspond à un alignement parfait entre les points et la droite.

¹³ La norme

¹⁴ Coefficient de corrélation définit le degré de dépendance entre deux variables. Il est compris entre -1, corrélation négative entre les variables et 1, corrélation positive. S'il se rapproche de 0, les variables sont décorréliées.

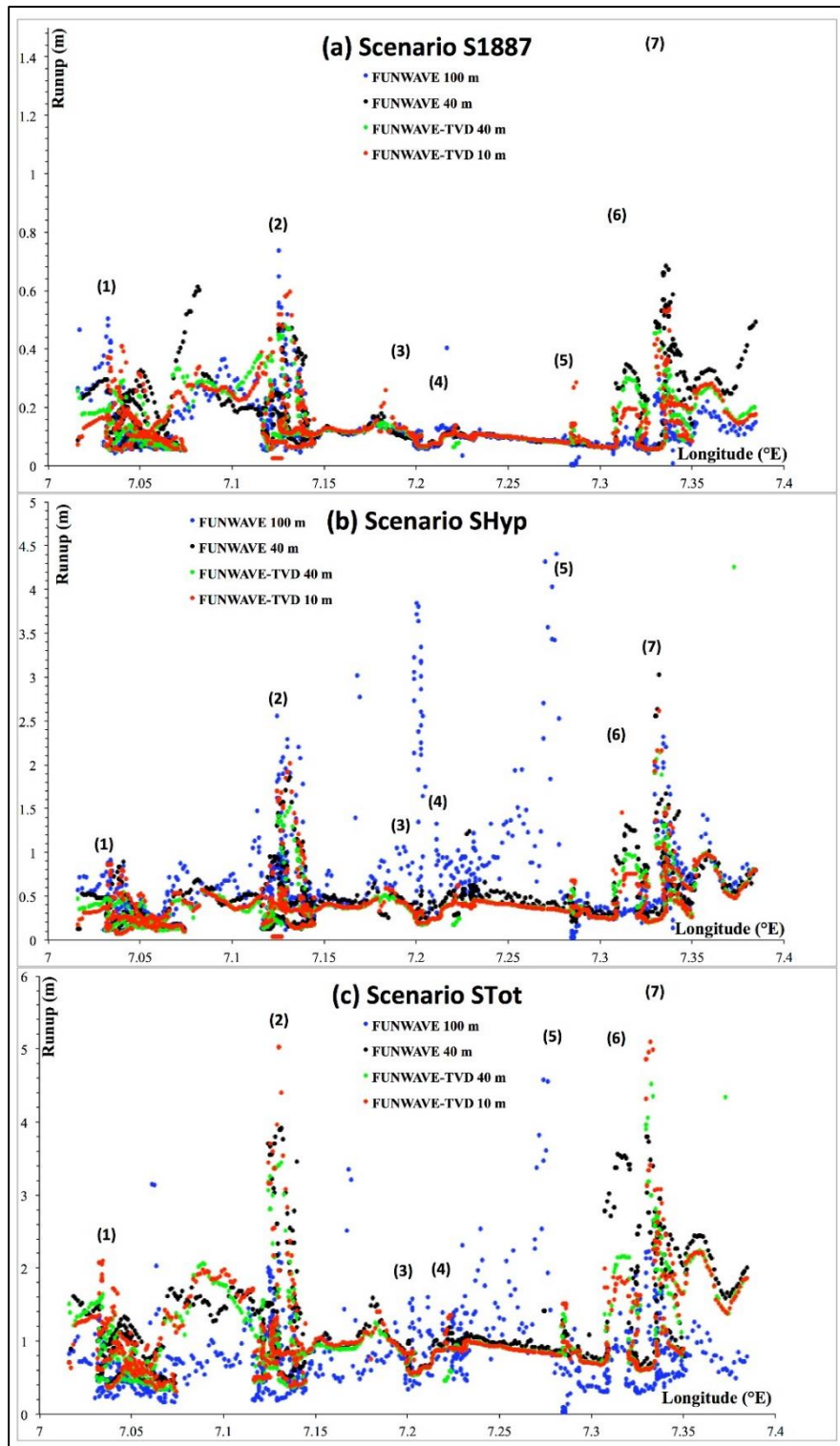


Figure 72 : Runup simulé le long de la Côte d'Azur

Avec FUNWAVE et les résolutions de 100 m (•) Ioualalen et al. (2014) et 40 m (•) (présente étude) ; avec FUNWAVE-TVD et les résolutions de 40 m (•) et 10 m (•) (Nemati et coll., 2019), pour les scénarios S&887, SHyp et STot. Les sites sont : (1) Iles de Lerins (au large de Cannes), (2) le Cap d'Antibes/plage de la Salis, (3) St-Laurent du Var, (4) l'aéroport international de Nice (5) Le port de Nice, (6) Villefranche-sur-mer, et (7) Saint-Jean Cap Ferrat. Pour simplifier la Figure nous n'avons pas inclus le runup de 28 m simulé par Ioualalen et coll. (2014) au voisinage du port de Nice.

4. Comparaison entre *Funwave*/40 m et *Funwave*/100 m.

Globalement le gain entre ces simulations et celles de [loulalen et coll. \(2014\)](#) de résolution 100 m est important ([Figure 72](#)) pour les scénarios SHyp et STot pour lesquelles leurs runups sont largement surestimés. Paradoxalement les résultats de leur simulation S1887 paraissent très proches de ceux des simulations *Funwave-TVD*/40 m et 10 m. La raison réside probablement dans les faibles hauteurs de vagues mises en jeu impliquant une très faible interaction entre les vagues et la côte (de simples réflexions).

Les autres processus côtiers (effet de pente et focalisation) ne nécessitent pas une résolution de grille très fine. Pour des hauteurs de vagues significatives (scenarios SHyp et STot) le gain est immense (cf. les très insuffisantes statistiques du [Tableau 15](#)). La prédiction de 28 m au port de Nice avec la grille de 100 m était due à la faible résolution. Un seul point de grille à l'entrée du port limite le retrait de la vague vers l'extérieur, entraînant une focalisation (accumulation) du train d'onde, qui a généré une inondation inexorable du voisinage du port et un important runup en présence d'une colline (la colline de Cimiez).

En conclusion, nos simulations avec le modèle *Funwave* et une grille de résolution de 40 m ont permis d'améliorer considérablement les cartes de runup et d'inondation de [loulalen et coll. \(2014\)](#). De même les très faibles écarts entre nos simulations et celles obtenues avec le modèle *Funwave-TVD* autorisant des grilles imbriquées avec des résolutions de 40 m et 10 m de [Nemati et coll. \(2019\)](#), confortent la pertinence de nos cartes d'aléa. Passons à présent à la question des structures verticales, et plus précisément à leur non prise en compte par le modèle.

5. Limites du modèle utilisé et de la résolution

La modélisation de la propagation d'un tsunami et plus précisément l'impact aux côtes (zones d'impact et *runup*), sont les points clés d'une étude d'aléa. Ces interfaces, qui sont conditionnées par la résolution pointent les limites de la modélisation. En effet, ces zones, qui marquent la limite de l'inondation, sont importantes car elles peuvent être un point de départ d'analyse du risque, sous l'angle de l'exposition directe des populations et des menaces au risque de submersion (ici vulnérabilité territoriale).

Les résultats de modèles que nous venons de présenter ont une résolution de 40 mètres, c'est-à-dire que chaque pixel a une longueur et une largeur de 40 mètres. Les données brutes de topographie et de bathymétrie ont une résolution de 10 mètres ; il a donc fallu réaliser une interpolation afin d'obtenir une grille de 40 mètres de résolution. Cette interpolation peut légèrement modifier le relief réel, car les points de grilles ne se superposent pas forcément. La zone littorale qui nous intéresse va, quant à elle, être dans certains cas fortement modifiée et ne plus être représentative du relief réel.

Le littoral azuréen, tout comme les littoraux fortement urbanisés de la Méditerranée, ne dispose plus de plages dites « naturelles », mais uniquement de plages « artificielles ». Le littoral des Alpes-Maritimes est quasi uniquement composé

de ce type de plages, qui doivent être entretenues régulièrement. De plus, un grand nombre de ces littoraux sont composés d'une plage, d'une structure verticale (murs, ports, promenades, routes, digues, etc.) plus ou moins haute selon les endroits, et une promenade et/ou une route. Il y a donc une réelle démarcation entre ces deux espaces : démarcation physique avec une différence d'altitude, et démarcation dans leur utilisation, la première étant uniquement récréative, la seconde étant d'avantage consacrée à la vie quotidienne et au fonctionnement du territoire, bien que dans le cas de promenade comme la Promenade des Anglais, cet espace soit également un espace récréatif. Ce mur marque donc une délimitation qu'il est important de prendre en considération. Le résultat des modèles, dont le relief a été lissé, ne peut donc tenir compte de ces structures verticales alors qu'elles sont fondamentales à nos interprétations.

Nous pouvons questionner la validité des résultats dans le cas de structures verticales. Il faut cependant noter que ce problème est récurrent pour l'ensemble des simulations de ce type et que cette problématique se retrouve pour toutes les résolutions présentées dans le point précédent (simulations *Funwave* à 100 m et à 40m et simulations *Funwave-TVD* à 40m et à 10m). Même à une résolution de 10 mètres (Nemati et coll., 2019), le relief est lissé et il ne permet pas une bonne représentation **des écarts rapides de topographie**. Il faudrait une résolution de grille beaucoup plus fine, au-dessous de 5 mètres, mais la réalisation de modèles à cette résolution pose de nombreux autres problèmes, comme la disponibilité de la donnée ou l'augmentation du temps de calcul, pour n'en citer que quelques-uns.

Pour les zones disposant de structures verticales, nous pouvons supposer que la prise en compte d'une pente par le modèle va permettre à une vague de taille conséquente de s'élever et donc potentiellement de prendre de la hauteur (dû à l'effet de pente), inondant ainsi potentiellement davantage (surestimation de l'inondation). Il serait donc possible d'obtenir une inondation des espaces situés au-delà des structures verticales, inondant ainsi une partie de la ville alors que, dans la réalité, la pente n'augmente pas de la même manière, c'est-à-dire quelle n'est pas régulière mais que l'augmentation d'altitude se fait par palier. La vague va alors se réfléchir contre le mur, ne pénétrant ainsi pas dans les terres et n'inondant que la plage.

Dans le cas de vagues moins significatives, le modèle sous-estime l'inondation réelle. La différence d'altitude entre le dernier point de grille de mer et le premier point de grille de terre est surestimée ; la pente peut donc, dans certains cas, être plus forte que ce qu'elle n'est en réalité, limitant l'inondation.

Il y a dans la région Ligure une réelle complexité dans la modélisation du risque de tsunami et donc dans la réalisation des cartes d'aléa. Le manque de précision des modèles lié à la résolution peut, par le futur, être augmentée grâce au développement de nouveaux outils et à l'acquisition des données nécessaires. Les modélisations numériques que nous venons de présenter demandent ainsi une analyse détaillée du territoire, afin de prendre en compte ce manque de précision sur le littoral.

6. Conclusion

Cette deuxième partie s'est donc focalisée sur l'aléa. Elle a permis de le caractériser grâce à l'obtention de données brutes issues de simulations numériques (hauteur d'eau et courant) et de la mise en place d'une échelle d'intensité, qui a été appliquée. Une certaine vision du risque, dite aléa centré, considérerait ceci comme une analyse de risque puisque l'étude de la menace a été faite. Celle-ci permet la connaissance de l'ampleur du phénomène et des espaces potentiellement exposés.

Ces connaissances sont alors suffisantes pour se protéger de la menace grâce à la construction d'ouvrages de protection ou l'établissement de plans tel que les Plans de Prévention des Risques (PPR). Or, le risque ne se limite pas à l'aléa. Il en est une composante mais doit être accompagné d'une analyse de vulnérabilité afin d'être complet. Cette étude de l'aléa de tsunami le long du littoral azuréen n'est ainsi que la première pierre permettant d'aboutir à une analyse complète du risque de tsunami dans les Alpes-Maritimes.

PARTIE III

DE L'APPROCHE THEORIQUE DE LA VULNERABILITE ET DES ENJEUX A L'OBTENTION D'UNE CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE TERRITORIALE DU LITTORAL AZUREEN

*« La vulnérabilité des choses précieuses est belle
parce que la vulnérabilité est une marque d'existence. »*

Simone Weil

INTRODUCTION DE LA PARTIE III

Le risque comprend une composante physique, l'aléa, qui vient menacer une composante humaine, territoriale, la vulnérabilité. Pour qu'il y ait risque il faut que ces dernières fonctionnent ensemble. Un territoire non exposé à une menace n'engendre aucun risque, tout comme un aléa qui se produit en milieu non habité, ne constituera point un danger. « *En soi, l'aléa est un élément neutre, il n'est ni bon, ni mauvais* » (Provitolo et coll., 2015, d'après Veyret, 2004). « *Si on n'a rien à perdre, il n'y a pas de risque* » (Metzger et D'Ercole, 2011).

Tout comme la seconde partie de ce manuscrit s'est focalisée sur la menace physique, c'est-à-dire l'aléa et plus particulièrement le tsunami, cette troisième partie se concentre sur la partie territoriale du risque, plus spécifiquement sur les enjeux et la vulnérabilité. L'enjeu devient donc une composante à part entière du risque. Il convient donc de « *dissocier clairement ce qu'on peut perdre (les enjeux) de ce qui peut provoquer leur perte (la vulnérabilité)*. » (Metzger et D'Ercole, 2011).

Se pose alors plusieurs interrogations : Qu'est-ce qu'un enjeu ? Quels sont les différents types de vulnérabilité ? Quelle vulnérabilité choisir ? Quel est le lien entre les enjeux et la vulnérabilité d'un territoire ? Quelle méthodologie appliquer pour réaliser une analyse de risque ?

Afin de répondre à ces interrogations, cette partie est décomposée en trois chapitres. Le premier ([Chapitre 10](#)) se focalise sur l'explication du concept de vulnérabilité et place les enjeux par rapport à ce dernier. A la sortie de celui-ci, la vulnérabilité territoriale est choisie comme étant la plus cohérente avec l'objectif souhaité, c'est-à-dire la réalisation d'une cartographie de la vulnérabilité.

Le deuxième chapitre ([Chapitre 11](#)) consiste en la proposition d'une méthodologie permettant l'analyse de la vulnérabilité territoriale. Cette dernière consiste en la détermination et l'analyse des enjeux majeurs qui composent un territoire. Ceux-ci sont ensuite combinés afin d'obtenir une cartographie globale. Celle-ci passe par la mise en indice des différents facteurs d'analyse des enjeux, permettant l'obtention de valeurs qualitatives à trois niveaux : faible, moyen et fort.

Le troisième chapitre ([Chapitre 12](#)) concerne l'exposition des résultats, par enjeux, puis de la vulnérabilité territoriale pour l'ensemble du littoral azuréen. La réalisation des différents traitements aboutissant à une cartographie des enjeux et de la vulnérabilité territoriale nécessite un traitement sous logiciel cartographique. Ici, le logiciel ArcGis 10.6 a été utilisé.

CHAPITRE 10 : DES ENJEUX A LA VULNERABILITE TERRITORIALE

Dans la partie précédente ([Partie II](#)), la notion de vulnérabilité biophysique (V_{BP}) a été largement mise à contribution. L'échelle d'intensité proposée, ainsi que son application à l'aléa tsunami en mer Ligure, s'appuie principalement sur cette dernière (V_{BP}). Néanmoins, une étude complète des conséquences de l'aléa, et plus particulièrement une étude de risque, requière d'aller plus loin dans l'analyse de vulnérabilité.

Au-delà de la V_{BP} , qui présente plusieurs limites, d'autres composantes de la vulnérabilité ont été développées : la vulnérabilité sociale, qui apporte une dimension sociale et humaine, et la vulnérabilité territoriale, qui permet une analyse du territoire dans son ensemble. Dans ces travaux portant sur l'analyse de la vulnérabilité du territoire azuréen, seule la vulnérabilité territoriale est mobilisée.

Un des objectifs de ce travail est la réalisation d'une analyse de vulnérabilité territoriale. Pour se faire, il est primordial d'analyser le territoire dans son ensemble et de se focaliser sur les enjeux qu'il contient. Ces **enjeux** correspondent aux différents éléments présents sur le territoire susceptibles d'être endommagés, voire de créer des dysfonctionnements, et qui sont exposés directement ou indirectement à l'aléa. Ils peuvent être de natures différentes.

Ce chapitre a donc pour vocation de définir tout d'abord ce que sont des enjeux et des enjeux majeurs. Par la suite, chaque vulnérabilité est prise séparément afin de faire ressortir ses particularités et ses limites. La vulnérabilité territoriale étant favorisée, l'accent est finalement mis sur la détermination d'enjeux majeurs d'un territoire.

1. Les enjeux, éléments structurant d'un territoire

Le risque généralement représenté comme la combinaison d'un aléa et de vulnérabilité s'est vu enrichi par l'apport de la notion d'enjeu. Il s'agit donc bien de l'occurrence d'un phénomène sur un espace, qui va potentiellement impacter des enjeux à la vulnérabilité plus ou moins forte ([Barroca et coll., 2006](#) ; [Metzger et D'Ercole, 2011](#) ; [Péroche, 2016](#)). Les enjeux sont ainsi définis comme « *ce qu'on risque de perdre et auquel on accorde de l'importance* » ([Metzger et D'Ercole, 2008](#)), comme « *les éléments vulnérables exposés* » ([Texier, 2009](#)).

Les enjeux représentent les éléments d'un territoire que l'on souhaite protéger, puisqu'ils sont potentiellement exposés à un aléa et sont donc susceptibles d'être impactés ([Sahal, 2011](#)). La vulnérabilité d'un enjeu est « *l'ensemble des faiblesses ou défaillances susceptibles de dégrader ou d'interrompre son fonctionnement, voire de le détruire, quelles qu'en soient les causes* » ([D'Ercole et Metzger, 2009](#)).

La notion de pertes (humaines, économiques, fonctionnelles, etc.) est donc associée aux enjeux ([Metzger et D'Ercole, 2008](#) ; [Léone et coll., 2010](#) ; [Péroche 2016](#)), puisqu'ils

correspondent aux ressources du territoire (Propeck-Ziemmermann, 2018). Ces derniers ne sont toutefois pas passifs et ne sont pas voués à subir des dégâts. Ils disposent de capacités de préparation, d'adaptation, leur permettant de réduire les dégâts potentiels (Péroche, 2016).

1.1. Des enjeux de différentes natures

Un territoire est composé d'une multitude d'enjeux, avec des fonctions particulières, plus ou moins importants pour le fonctionnement de ce dernier. Le premier pris en compte est l'**enjeu humain**, qui correspond tout simplement aux vies humaines. Leone et Vinet (2011) le définissent comme étant « *l'enjeu suprême à préserver* », l'objectif ultime recherché en cas de catastrophe étant l'absence de victimes. Certains auteurs (Metzger et D'Ercole, 2008) associent à l'enjeu population les besoins associés tel que la santé, l'éducation ou encore la culture. C'est ce que Demoraes (2004) appelle des « **enjeux communs** ».

Il peut également s'agir d'**enjeux « matériaux »**, avec les différentes infrastructures, telles que le bâti ou les réseaux (de communication, d'approvisionnement en eau et en électricité). Metzger et D'Ercole (2008) incluent à ces derniers tout ce qui touche aux réseaux (mobilité, télécommunication, vitaux) afin de parler de **logistique urbaine**. Veyret et Meschinet De Richemond (2003) distinguent les enjeux **structurels**, comprenant le bâti, les infrastructures de transport et de service, des enjeux **non structurels** composés du patrimoine culturel immatériel et des réseaux de solidarité traditionnels.

Les **enjeux économiques** sont les plus souvent mentionnés en cas de catastrophes, puisqu'ils permettent de chiffrer l'étendue des dégâts. Il s'agit donc de l'ensemble des biens matériels et immatériels impactés c'est-à-dire engendrant des pertes financières importantes. Le système d'assurance est justement basé sur l'estimation de ces pertes. C'est pourquoi de nombreuses compagnies d'assurance s'intéressent aux problématiques des risques et des catastrophes.

Ces enjeux peuvent être d'ordres **sociaux** et qui touchent au fonctionnement de la société (Aublet, 2014) ou **organisationnels**, permettant le fonctionnement des différentes fonctions de l'état, que ce soit les responsables des forces de l'ordre et de défense, le maire, le préfet. La combinaison de ceux-ci aboutit aux enjeux indispensables à la **gestion de crise**, c'est-à-dire qui apporte une aide à la population efficace (Beck, 2006 ; Dauphiné et Provitolo, 2013). Les organismes de secours (pompiers) et de santé (hôpitaux) sont également inclus à cette catégorie d'enjeux.

Certains enjeux sont directement liés aux **activités humaines**, qu'il s'agisse d'activités de services et de loisirs. Il peut également s'agir d'enjeux **patrimoniaux et culturels**, comprenant les monuments, les musées, les lieux de cultes, l'image d'un territoire (Aublet, 2014), savoir-faire (Texier, 2009). Il peut enfin s'agir d'enjeux **environnementaux** correspondant aux endommagements possibles aux écosystèmes (Aublet, 2014), aux paysages (Texier, 2009).

Les enjeux sont donc de plusieurs natures et vont varier selon l'échelle d'analyse. En effet, les enjeux d'un individu ne seront pas les mêmes que les enjeux

d'un chef d'entreprise, tout comme les enjeux d'un quartier, d'une commune, d'une région ou encore d'un état vont varier (Metzger et D'Ercole, 2008 ; Texier, 2009).

En cas d'évènement, le système territorial va voir son fonctionnement perturbé. Selon la gravité de l'évènement, les effets peuvent impacter une échelle plus large (Serre, 2015). La « *vulnérabilité induite* » ne se limite plus au territoire où se situe l'enjeu mais impacte un « *niveau d'organisation supérieur* » (D'Ercole et Metzger, 2009). Il existe donc une imbrication d'échelle en ce qui concerne la diffusion de la vulnérabilité de certains enjeux, ce qui nous amène à la question des enjeux majeurs.

1.2. Les enjeux majeurs, éléments clés d'une analyse de vulnérabilité territoriale

Les enjeux sont des éléments qui composent un territoire et qui peuvent être impactés par différents phénomènes. Les enjeux majeurs présentent la particularité d'être « *ce qui est essentiel et qu'on doit à tout prix protéger* » (Metzger et d'Ercole, 2008). Ils sont parmi « *les éléments vulnérables ceux qui le sont comparativement plus* » (Pigeon et Rebotier, 2017). Les enjeux majeurs « *permettent à l'ensemble d'un territoire de fonctionner, de se développer et de faire face à une situation d'urgence* » (D'Ercole et Metzger, 2009).

Metzger et D'Ercole (2008) démontrent ainsi l'existence d'un lien étroit entre les enjeux majeurs et le territoire. « *Il existe des mécanismes de transmission de la vulnérabilité, des enjeux majeurs vers le territoire (la vulnérabilité d'un enjeu majeur rend vulnérable l'ensemble du territoire) et du territoire vers les enjeux (la vulnérabilité spatiale, en d'autres termes un contexte spatial défavorable, fragilise les enjeux)* » (D'Ercole et Metzger, 2009). L'enjeu majeur viendrait donc, en cas de crise, transmettre leur vulnérabilité à l'ensemble du territoire, provoquant un dysfonctionnement ou un désordre majeur, aussi bien sur le plan social, politique ou économique. Ces auteurs démontrent ainsi que l'analyse de la vulnérabilité territoriale passe par l'analyse de ses enjeux majeurs.

Leurs travaux sur Quito (D'Ercole et Metzger, 2009) sont une référence dans le domaine. L'intérêt de cette méthode est d'étudier un territoire et de déterminer quels pourraient être les « points faibles », les zones à secourir en priorité en cas de déclenchement d'un phénomène. Sa particularité est qu'elle permet de cibler les espaces fragiles, ainsi que les lieux pouvant propager la vulnérabilité.

L'analyse des risques par le territoire et non uniquement par l'aléa, permet de placer les enjeux au centre de l'étude (Robert, 2012). Cette méthode revient à identifier les enjeux qui présentent de l'intérêt pour ensuite étudier leur vulnérabilité. La zone d'étude n'est plus analysée en fonction de la zone touchée par l'aléa, mais suivant les faiblesses et les points sensibles de cet espace. Il ne s'agit donc pas d'étudier la zone d'étude en fonction de l'aléa, mais en fonction des éléments qui la composent. L'exposition à la menace reste cependant une partie intégrante de la vulnérabilité.

La détermination des enjeux majeurs est donc une étape clé de l'étude de vulnérabilité territoriale puisque ces derniers vont avoir une influence directe sur le déroulement de la catastrophe et l'importance des impacts.

2. Des vulnérabilités qui influent sur la sécurité des enjeux

La vulnérabilité, l'une des composantes du risque, est définie comme « *le niveau d'effet prévisible d'un aléa sur des enjeux* » (Géoconfluence, 2019). L'analyse de la vulnérabilité est ainsi généralement faite à partir des enjeux et de leur endommagement potentiel (Veyret, 2004 ; Aublet, 2014). Plusieurs vulnérabilités ont été développées : la **vulnérabilité territoriale**, qui sert de base à cette étude de risque, la **vulnérabilité biophysique**, qui a été mobilisée pour la création d'une échelle d'intensité (Chapitre 6), et la **vulnérabilité sociale** se focalise sur les individus, les populations et les sociétés. Une présentation rapide de ces différentes vulnérabilités est ainsi faite.

2.1. La vulnérabilité territoriale, l'intégration du territoire dans son ensemble grâce aux enjeux majeurs

La vulnérabilité territoriale (V_T) est une des approches de la vulnérabilité qui prend en considération le territoire dans son ensemble et non uniquement la partie exposée à un ou des aléas. D'Ercole et Metzger (2009) ont montré l'existence d'un lien entre les enjeux majeurs (hôpitaux, secours, routes, etc.), le territoire et sa vulnérabilité. Les enjeux majeurs, en cas de crise, vont transmettre leur vulnérabilité à l'ensemble du territoire. L'analyse de cette vulnérabilité passe donc par l'étude des enjeux majeurs et de leur localisation dans le territoire.

Cette vulnérabilité « *consiste à analyser le fonctionnement d'un territoire, en identifiant et en hiérarchisant les éléments les plus importants, c'est-à-dire les « enjeux majeurs », qui permettent à l'ensemble de ce territoire de fonctionner en situation normale, et dont la perte serait la plus préjudiciable, pour l'ensemble du territoire et de ses habitants* ». (Metzger et D'Ercole, 2008)

L'aboutissement d'une analyse de vulnérabilité territoriale consiste en l'obtention d'une cartographie de celle-ci, qui doit être indépendante de la carte d'aléa. Il y a une volonté de se détacher de l'aléa et de ses effets directs. Sont localisés les éléments importants qui composent le territoire, sans tenir compte de l'emprise spatiale de l'aléa. Cette carte va donc contenir les enjeux majeurs qui sont indispensables au bon fonctionnement du territoire et qui, en cas de dysfonctionnement, vont entraîner une vulnérabilité généralisée. C'est le cas par exemple des hôpitaux ou des services de secours.

Parfois, de nombreux enjeux majeurs sont situés à proximité ou au sein de l'étendue spatiale de l'aléa, ce qui implique une vulnérabilité plus importante s'ils sont touchés. Suivant leur fonction, la vulnérabilité peut s'étendre à l'extérieur du territoire et peut même parfois atteindre le niveau national et très rarement international. Ceci pourrait être le cas si des lieux décisionnels ou de grands lieux économiques, comme la bourse, étaient impactés.

D'Ercole et Metzger (2009) distinguent 6 formes de vulnérabilité : « *les faiblesses intrinsèques des enjeux, la dépendance vis-à-vis de systèmes autres que celui dans lequel s'intègre un enjeu donné, l'exposition aux aléas et la susceptibilité*

d'endommagement, la capacité de contrôle des enjeux, les alternatives de fonctionnement, la capacité de gestion des situations de crise. ». Cette vulnérabilité s'intègre donc dans l'ensemble des temporalités d'une catastrophe (Figure 73), aussi bien en amont (faiblesse intrinsèque des enjeux, alternative de fonctionnement, etc.), que dans l'après événement (capacité de gestion de crise).

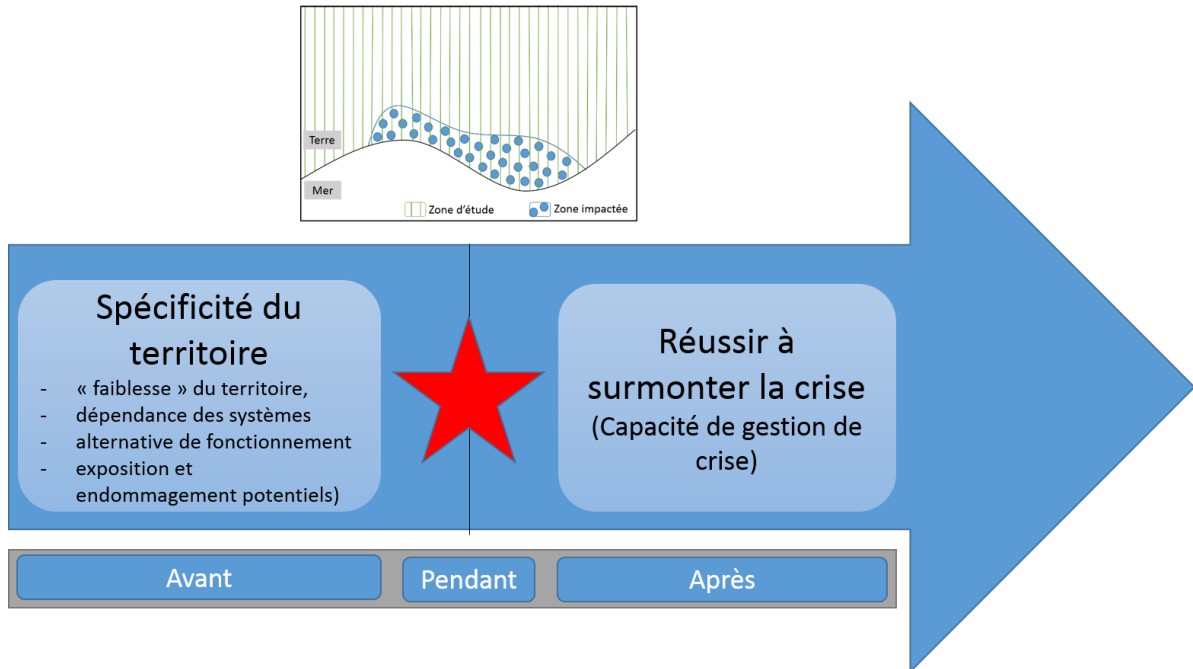


Figure 73 : Représentation graphique de la vulnérabilité territoriale (VT) intégrant à la fois ses particularités et ses caractéristiques spatio-temporelles (exemple d'une étude de risque de tsunami) (Inspiré des 6 formes de vulnérabilité de D'Ercole et Metzger, 2009)

D'un point de vue spatial (Figure 73), le territoire va être analysé dans son ensemble, en ne se focalisant pas uniquement sur les zones potentiellement inondées. L'approche est plus globale. La prise en compte plus large des aspects spatiaux et temporels permettent une réflexion sur les **effets dominos** potentiels pouvant se produire suite à un événement. « Les effets de dominos sont le fait d'un aléa entraînant par effet en chaîne l'événement catastrophique. L'aléa déclencheur, le plus souvent d'origine naturelle ou technique, produit des aléas dérivés, source de nouveaux désastres à l'intérieur ou au prolongement d'une catastrophe. Cet emboîtement territorial est souvent observé dans les supercatastrophes. » (Provitolo, 2005) L'événement de Fukushima du 11 mars 2011 est un bon exemple d'effet domino : un séisme a généré un tsunami, qui lui-même a impacté une centrale nucléaire, provoquant le dysfonctionnement de cette dernière, aboutissant à une catastrophe nucléaire.

Cette approche territoriale est celle que nous avons retenue pour mener à bien l'analyse de vulnérabilité du littoral azuréen au risque de submersion marine par tsunami. Elle a l'avantage de mettre en avant les enjeux majeurs d'un territoire et d'identifier les zones vulnérables. Avant de les identifier, une présentation rapide de la vulnérabilité biophysique et de la vulnérabilité sociale est réalisée.

2.2. La vulnérabilité biophysique, exposition directe des enjeux

Lorsque les études de risque ont commencé à porter sur la composante humaine, les premiers éléments pris en considération ont été ceux **observables** et **quantifiables** suite à un évènement. Les zones impactées et les dégâts occasionnés ont donc été les premiers facteurs de vulnérabilité. Cette vulnérabilité, qualifiée de **biophysique (VBP)**, s'appuie sur l'étude de l'endommagement possible ou réel des différents éléments exposés, avec évaluation des pertes humaines, matérielles, économiques, environnementales, etc. (Provitolo, 2012). Les impacts générés par un aléa sont donc au centre de l'étude.

Cette vulnérabilité est principalement déterminée par la nature de l'aléa, sa probabilité d'occurrence, l'exposition et la sensibilité des différents enjeux qui composent le territoire (Barroca et coll., 2013). Il y a donc bien les deux composantes, à la fois physiques représentée par l'aléa, et biologiques faisant référence aux propriétés du système affecté (Reghezza, 2006). Trois facteurs permettent d'analyser la vulnérabilité biophysique : **l'exposition** à l'aléa, la **résistance** des enjeux et leur **sensibilité** (Adger 2006 ; Dauphiné et Provitolo 2013).

Cette vulnérabilité peut également être qualifiée de « technique » car elle se traduit en milieu urbain par la mise en place de règles de constructions (parasismiques pour les séismes) et de planification via les documents règlementaires d'occupation du sol (Reghezza, 2006 ; Quenault, 2015). Elle sert de référence lors de l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN) ; c'est donc cette vulnérabilité qui est retenue par le Ministère en charge de l'Environnement et, est celle dont il recommande l'utilisation pour les études de vulnérabilité.

La vulnérabilité biophysique est la plus communément utilisée, par les décideurs et les assureurs. Elle peut être mobilisée en amont ou en aval d'un évènement, afin de quantifier les dégâts générés ou potentiellement occasionnés. Cette approche pose cependant des problèmes car elle part du postulat que tout est quantifiable et peut donc avoir une valeur économique (Reghezza, 2006). Or, qu'il s'agisse de vies humaines, de biens culturels (lieux de cultes, ruines, etc.), ou de valeurs affectives (photos, bijoux, bibelots, etc.), leur valeur dépasse la seule valeur économique.

Placée dans une dimension spatiale et temporelle, elle apparaît relativement restrictive (Figure 74). Elle se limite dans l'espace à la (potentielle) zone d'impact, sans prendre en considération les dommages indirects pouvant être générés sur une partie plus large du territoire (effets dominos). Au niveau temporel, sa quantification réelle ne peut être faite que dans l'après-évènement. Les dégâts potentiels sont toutefois estimés en amont (assurance, PPR, etc.).

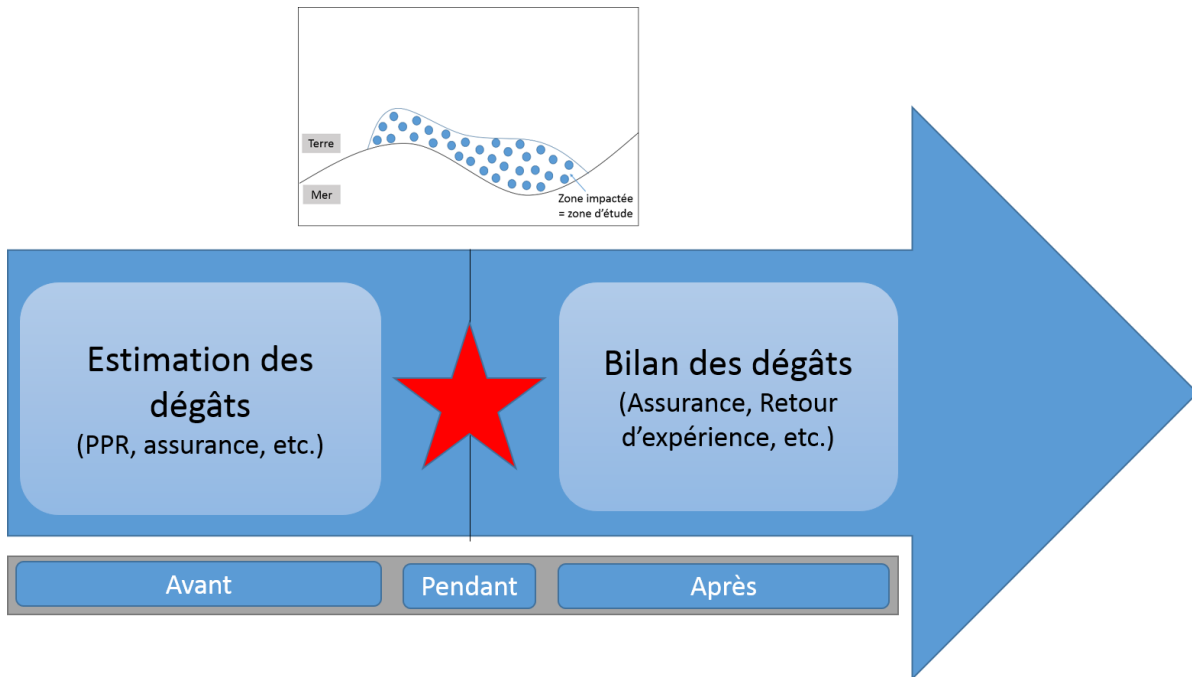


Figure 74 : Représentation graphique de la vulnérabilité biophysique (V_{BP}) intégrant à la fois ses particularités, et ses caractéristiques spatio-temporelles

Les avantages de cette approche sont, qu'après analyse, nous obtenons une vision globale des dommages de la zone d'étude, facilement cartographiable. Afin de réduire cette vulnérabilité, les solutions techniques de lutte contre les aléas vont être privilégiées (Léone et Vinet, 2011). Mais, l'inconvénient de cette vision, est qu'elle apparaît de plus en plus restrictive car elle ne prend pas en compte la dimension sociale qui accompagne le risque. La société y apparaît comme passive, victime de dysfonctionnements techniques (Quenaults, 2015). Cette réflexion donne lieu au développement d'une nouvelle vision : la vulnérabilité sociale.

2.3. La vulnérabilité sociale, les capacités des enjeux

L'approche de la **vulnérabilité sociale** (V_s) s'éloigne de la précédente qui était centrée sur l'aléa, pour se concentrer sur les sociétés. Une dimension sociale, humaine, est apportée à cette analyse, afin d'étudier la manière dont les sociétés vont être capables de surmonter une crise. Les sciences sociales ont permis l'enrichissement du concept de vulnérabilité.

Cette analyse se pose en amont de l'évènement, avant que celui-ci ne se produise. Elle correspond à une anticipation d'un aléa possible et de la manière dont il peut impacter la société. Les « faiblesses » d'une société sont présentes avant que le phénomène ne se produise. « *L'impact de l'aléa ne dépend pas seulement de l'exposition à la source de danger, mais est également conditionné par les propriétés sociales intrinsèques du territoire.* » (Quenault, 2015). La vulnérabilité sociale est donc indépendante de l'aléa, car le système est vulnérable, qu'un évènement se produise ou non, mais lui seul peut la révéler. Il y a une réelle volonté de s'éloigner de l'aléa et de l'approche « aléa centré » contrairement à la vulnérabilité biophysique.

Est également intégrée à cette approche les **capacités** dont vont faire preuve les individus et les sociétés à **anticiper**, à **s'adapter** et à se **remettre** de la catastrophe. « Plus un système est apte à se rétablir après une catastrophe, moins il est vulnérable » (Dauphiné et Provitolo, 2013). La vulnérabilité d'une société dépend alors de l'absence ou de l'incapacité à mobiliser ces/ses capacités. La vulnérabilité sociale, par le développement de ces capacités en amont et en aval d'un évènement, est directement « *lié avec la résilience et au fonctionnement des sociétés* » (Barroca et coll., 2013).

Au niveau temporel (Figure 75), cette vulnérabilité est construite antérieurement à un évènement, à une catastrophe. Il s'agit d'une propriété des enjeux qui manifestera lors d'un évènement (CapHaz-Net, 2010 ; Quenault, 2015). Elle fait également référence à l'après-évènement avec les capacités dont vont faire preuve les sociétés pour se relever. Elle englobe donc l'ensemble de la temporalité d'un évènement (avant, pendant et après).

D'un point de vue spatial (Figure 75), il n'est dans la littérature, jamais clairement spécifié son implication sur le territoire. Selon notre interprétation, la vulnérabilité sociale s'intéressant à différentes échelles sociales (individu, groupe institution, société, etc.), elle ne peut se focaliser uniquement sur la zone inondée. Elle apparait donc bien plus riche que la vulnérabilité biophysique sur les aspects spatio-temporels.

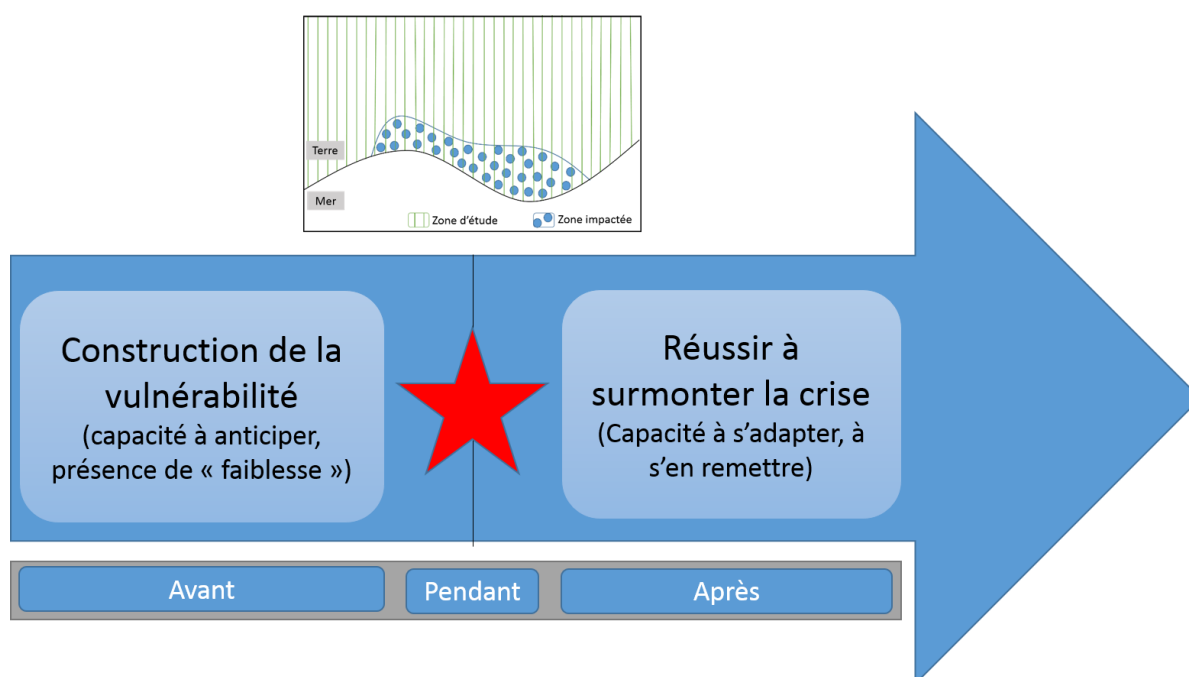


Figure 75 : Représentation graphique de la vulnérabilité sociale (V_s) intégrant à la fois ses particularités, et ses caractéristiques spatio-temporelles

La vulnérabilité sociale présente donc l'intérêt d'étudier la société dans son ensemble en faisant ressortir ses particularités et ses faiblesses. Toutefois dans nos analyses, on suppose qu'elle présente une limite spatiale n'intégrant pas le territoire dans son ensemble. Elle présente de nombreuses similitudes avec la résilience, notamment avec les notions de capacités d'anticipation et d'adaptation du système.

La vulnérabilité biophysique est celle qui a été retenue pour la réalisation de l'échelle d'intensité de tsunami (Chapitre 7). Afin de réaliser une analyse de risque, c'est la vulnérabilité territoriale qui sera utilisée, afin de faire ressortir les enjeux majeurs du littoral azuréen. Une focalisation est à présent faite sur l'identification des enjeux majeurs d'un territoire.

3. Premier pas vers le risque – Identification des enjeux majeurs d'un territoire exposé à un aléa

Les enjeux majeurs sont des éléments structurant d'un territoire. Afin de préciser à quoi ils font référence, il convient de les identifier. Etant en milieu urbain, une focalisation est faite sur les enjeux présents en ville. Cette dernière regroupe en effet les personnes, les activités et les biens (Serre, 2015). La densité des enjeux, et plus particulièrement des enjeux majeurs, est donc plus importante dans un système urbain. Sont ainsi mis en évidence où se concentrent ces enjeux majeurs, qui sont susceptibles de propager leur vulnérabilité à l'ensemble du territoire (Metzger et D'Ercole, 2008).

L'objectif est donc de « *déterminer les lieux qui permettent à l'ensemble du territoire métropolitain d'assurer ses fonctions sociales, économiques et politiques en période normale et ses fonctions de secours et d'appui à la population en période de crise.* » (D'Ercole et Metzger, 2009).

La communauté scientifique s'accorde sur l'importance de l'analyse des enjeux majeurs dans les études de risque. Une discordance s'opère quant à savoir s'il faut tenir compte de l'aléa dans la détermination de ces derniers ou non. Metzger et D'Ercole (2008) prennent position pour qu'une dissociation complète soit faite et que les enjeux soient identifiés uniquement pour leur rôle et leur vulnérabilité (propre et qu'ils peuvent propager). Il y a donc une vraie volonté de sortir de la vision aléa centrée du risque. L'aléa apparaît uniquement par le biais de l'exposition de l'enjeu à une ou des menaces, de manière à pouvoir intégrer des analyses multirisques.

C'est pourquoi nous dissocions les enjeux majeurs dits « génériques », qui sont présents quel que soit le territoire et l'origine de la menace des enjeux dits « spécifiques » qui ressortent suivant les territoires et les aléas. Une focalisation est faite sur un territoire côtier fortement urbanisé soumis au risque de tsunami.

3.1. Identification d'enjeux majeurs génériques à tous territoires et tous aléas

Afin d'appliquer cette méthode d'analyse de la vulnérabilité du territoire par les enjeux majeurs, nous nous sommes focalisée sur un territoire « neutre » dans sa globalité, l'objectif étant de faire ressortir les éléments importants que l'on retrouve dans tout système territorial et non pas sur un territoire précis. Les enjeux majeurs que nous avons déterminés sont applicables à tout aléa, qu'il s'agisse ici du tsunami, ou de tout autre aléa naturel ou non. Une distanciation à l'aléa est donc faite pour leur détermination et leur analyse.

Nous nous sommes donc interrogée sur les éléments porteurs de vulnérabilité. Pour ce faire, de nombreux travaux de nos prédécesseurs ont servi de socle : Demoraes (2004), Gleyze (2005), Beck (2006), D'Ercole et Metzger (2009). En cas de phénomènes extrêmes, certains enjeux ressortent systématiquement : les enjeux de populations, les hôpitaux, les pompiers, les centres décisionnels, les ERP (Etablissement Recevant du Public), les axes de transports (routes, voies ferrées, ports, aéroports), les réseaux vitaux (eau, électricité, gaz, etc.).

Ces enjeux majeurs sont indispensables au bon fonctionnement du territoire (D'Ercole et Metzger, 2009) et sont nécessaires pour la gestion de crise. Ce sont ceux que nous qualifions de « génériques ». Ces derniers peuvent être regroupés en catégories d'enjeux majeurs pour en faciliter leur analyse.

3.1.1. L'enjeu humain

L'**enjeu humain**, comme nous l'avons spécifié, est l'enjeu principal à maintenir et à garder en sécurité quelle que soit la menace. Sa prise en compte est complexe puisqu'il s'agit d'un enjeu mobile, que l'on retrouve sur l'ensemble d'un territoire urbain, mais dans différentes situations (dans des bâtiments, en extérieur, en voiture, etc.). Se pose donc une première question spatiale. A cela s'ajoute des notions plus complexes telles que la connaissance du risque, la mémoire du risque, la préparation, le comportement humain en cas de crise, etc. Bien que certains travaux s'intéressent à ces problématiques, comme l'ANR Com2SiCa, ces informations sont difficiles d'accès et sont difficiles à cartographier.

Certains enjeux humains sont plus facilement abordables, comme la densité de population. Celle-ci peut être considérée comme un enjeu puisqu'elle permet une meilleure connaissance de la répartition de la population qui habite sur la zone d'étude (à l'échelle communale ou à échelle plus fine, comme le quartier par exemple). Un espace densément peuplé sera plus vulnérable car la pression foncière sera plus importante. Il y aura donc plus de personnes et de biens matériels sur une même zone, donc potentiellement davantage de dommages humains et matériels.

3.1.2. Les centres décisionnels et les acteurs

Les centres décisionnels sont un des nœuds principaux de la structuration des opérations. Ils permettent de donner l'alerte, d'informer et prévenir les populations, d'initier les ordres d'évacuation, de lancer les plans de gestion de crise, ou encore de gérer les différentes opérations de gestion de crise. Ils sont rarement en zones sinistrées et ils gèrent le bon déroulement des opérations à distance.

Ils sont généralement localisés dans leurs locaux (mairies, préfectures, etc.) ou dans des locaux spécifiques prévus à cet effet, tel que le Poste de Commandement Communal (PCC) ou le Centre Opérationnel Départemental (COD). L'objectif principal est qu'ils restent fonctionnels afin de pouvoir gérer le bon déroulement des opérations, quelle que soit l'échelle (communale, départementale, nationale).

Dans les Alpes-Maritimes par exemple, le COD fixe est basé à la Préfecture, située dans la plaine du Var. En cas de dysfonctionnement ou d'évènement éloigné (dans l'arrière-pays par exemple) une unité mobile peut prendre le relais. Le COD peut également se déplacer à la sous-préfecture de département, c'est-à-dire à Grasse.

3.1.3. Les établissements de santé

Les hôpitaux représentent un des enjeux clés de la gestion de crise, car d'après J. Robert (2006), « *il existe des liens forts entre santé et gestion des désastres.* ». Ce sont en effet les centres hospitaliers qui vont recevoir les blessés et qui vont devoir pratiquer « la médecine d'urgence ». Se pose alors la question de la prise en charge de ces blessés, puisqu'il faut soigner un grand nombre de personnes en même temps et donc organiser les soins afin de pouvoir gérer l'arrivée de blessés graves.

En situation de crise, les hôpitaux doivent faire face à de nombreux problèmes, alors qu'ils peuvent eux-mêmes être fragilisés. « *La survenance d'une catastrophe vient mettre à l'épreuve le dispositif de soin : il faut gérer des problèmes majeurs (quantitatifs) dans un temps très court. Les acteurs de la santé doivent fournir une réponse rapide alors qu'ils se retrouvent eux-mêmes affectés par la catastrophe et que le dispositif de soins est éclaté : la perte des communications empêche la coordination entre établissements et chacun se retrouve isolé, parfois physiquement.* » (J. Robert 2006).

Si un établissement de santé vient à être touché, se pose alors une autre question, celle de l'évacuation de personnes vulnérables, car souvent malades, vers un autre hôpital non impacté. Une telle hypothèse poserait de nombreux problèmes, à savoir vers quel autre hôpital évacuer (quels sont ceux qui ne sont pas impactés ? les réseaux de communications permettent-ils de faire les liaisons entre les différents centres ?), ainsi que la prise en charge de ces personnes, en plus des blessés qui affluent.

3.1.4. Les organismes de secours

Les organismes de secours, dont le principal est **les casernes de pompiers** sont cruciaux car ils vont venir en aide et permettre l'évacuation des sinistrés. Dans un contexte d'évènement qui survient brutalement, leurs actions sont principalement réalisées après la catastrophe, que ce soit dans l'urgence afin de sauver des vies humaines (sortir des gens des décombres, évacuer les blessés vers les hôpitaux), ou dans l'aide à la personne (mise en sécurité des populations). Les pompiers vont agir directement en zone sinistrée afin de venir en aide aux populations, les aidant à évacuer et pouvant les diriger vers les hôpitaux les plus proches.

Cet enjeu est à la fois mobile et statique. Les pompiers sont regroupés dans des casernes, spécifiquement localisées sur le territoire et qui contiennent à la fois des ressources humaines et matérielles. Elles doivent donc s'assurer de la continuité de leur fonctionnement quelle que soit l'origine de la menace. En parallèle, les pompiers se déplacent pour venir en aide à la population, se rendant directement dans les zones

fragilisées. Leur représentation cartographique sur un territoire peut donc s'avérer complexe de part cette mobilité.

3.1.5. Les Etablissements Recevant du Public

Les ERP, correspondant aux établissements recevant du public, « désignent tous bâtiments, locaux ou enceintes, publics ou privés, accueillant, soit librement, soit moyennant une rétribution ou une participation quelconque des clients, autres que les employés. » (Préfecture de Police de Paris). Ces structures peuvent être des écoles, des établissements de santé, des cinémas, ou encore des musées. Elles sont classées selon leur capacité d'accueil (5 catégories), qui va permettre de connaître le nombre de personnes maximal pouvant être présentes dans le bâtiment, et donc, de prévoir les ressources nécessaires en cas d'évacuation.

Ils sont considérés comme des enjeux majeurs puisqu'ils regroupent à la fois des personnes (de quelques personnes à plusieurs milliers) susceptibles d'être impactées en cas d'évènement, et peuvent à la fois avoir un rôle stratégique de par la nature même de leur fonction (administrations, hôpitaux, gares, écoles, etc.). Il est donc nécessaire d'assurer leur sécurité et, selon leur fonction, la continuité de leur fonctionnement.

3.1.6. Les réseaux vitaux

Les réseaux vitaux jouent un rôle fondamental, puisqu'ils acheminent des éléments de premières nécessités tels que l'eau potable (et les eaux usées), l'électricité ou le gaz. Ces réseaux sont non négligeables puisque sans eux le territoire n'en devient que plus vulnérable : l'absence de traitement des eaux crée rapidement des problèmes sanitaires, l'absence d'électricité peut poser des problèmes de conservation de nourriture, de chauffage ou de fonctionnement de structures majeures comme les hôpitaux par exemple (bien que disposant généralement de générateurs connexes).

A ces besoins vitaux vient s'ajouter la problématique des déchets. Celle-ci est originale puisqu'elle correspond à une production du système qui nécessite d'être évacuée. « Les déchets peuvent être considérés comme des éléments en sortie du système » (Serre, 2015). Elle s'apparenterait donc à la problématique du traitement des eaux usées. La différence est qu'elle nécessite une collecte et une zone de stockage, avant de pouvoir être traitée.

Ce traitement est plus ou moins complexe selon la nature des déchets. Il peut s'agir de déchets ménagers, de gravats (en cas de tremblement de terre par exemple), de voitures (lors des inondations des Alpes-Maritimes du 3 octobre 2015 les casses se sont trouvées saturées), etc. Il peut également s'agir de la question de la gestion des corps en cas de méga-catastrophe. Par exemple, en 2020, face à la pandémie de Covid 19, des fosses communes sont creusées à New-York.

3.1.7. Les réseaux de transport

Les réseaux de transports (routes, voies ferrées, ports et aéroports) sont des enjeux majeurs puisqu'ils permettent à la population de se déplacer au sein d'une ville, ou entre différents centres urbains. Les réseaux terrestres (routes et voies ferrées), vont, en cas de crise, permettre à la fois à la population d'évacuer la zone impactée, aux secours de pouvoir intervenir (Aublet, 2014). Ceux-ci ont également un rôle post crise pour la récupération et la remise en état du territoire (apport de produits de premières nécessités, déblaiement, etc.) (Demoraes, 2014). Si ces réseaux sont coupés ou rencontrent des difficultés de fonctionnement, le territoire en sera d'autant plus vulnérable.

Des nombreuses études ont porté sur les réseaux routiers et plus particulièrement sur la mobilité des personnes, un des points clés lors de la survenue d'évènements naturels. La composition et la structure du réseau est cruciale, mais à cela s'ajoute la mobilité des personnes, leurs habitudes, leurs connaissances (et non connaissances) qui vont jouer un rôle clé en cas de crise.

En cas de crue rapide par exemple, si la population dispose des connaissances nécessaires (éviter les déplacements, ne pas aller chercher des proches (enfants à l'école par exemple), des mises en danger inutiles peuvent être évitées. Ces personnes n'ont pas conscience que, non seulement elles se mettent directement en danger, mais qu'en cas d'accident elles mettent également en danger les secours, les privant potentiellement d'intervenir en d'autres lieux.

Afin de comprendre les déplacements en cas d'évènement majeur, il est donc important de comprendre le fonctionnement des déplacements quotidiens. Ces derniers « témoignent de l'organisation des sociétés et des pratiques sociales prenant place à différentes échelles » (Demoraes, 2014).

Les réseaux maritimes (ports touristiques et/ou industriels) et aériens (aéroports nationaux ou internationaux) sont davantage spécifiques à certains territoires ils n'en restent pas moins des enjeux stratégiques. Ils permettent une desserte locale voir internationale avec des vocations touristiques et/ou commerciales. Les ports sont principalement exposés aux menaces climatiques et/ou lié à l'eau (tempêtes, tsunamis, etc.). Les aéroports peuvent être exposés à tout type de menace selon leur localisation. L'aéroport de Nice Côte d'Azur, par exemple, est construit sur une extension en mer et serait, à priori, en cas de tsunamis, l'un des premiers impactés, car tout comme les ports, il se situe à la jonction entre la mer et la terre.

Une grande majorité des enjeux majeurs sont des enjeux « génériques » applicables à la grande majorité des territoires (urbains) faisant face à tous types de menaces (naturelles, anthropiques, sanitaires, etc.). D'autres enjeux en revanche ne ressortent que face à certaines menaces. Ces travaux portant sur le risque de tsunami en milieu urbain, nous évoquerons dans la partie ci-après uniquement les enjeux majeurs liés à ce risque.

3.2. Des enjeux spécifiques à un aléa – Présentation des enjeux caractéristiques d'un tsunami

Dans le cadre de cette réflexion, cinq enjeux majeurs spécifiques ont été déterminés : les plages, les promenades et sentiers de bords de mer, les centres-villes, les campings et les zones refuges.

Les particularités d'un territoire littoral urbanisé se retrouvent dans la densité d'occupation de cette frange littorale. Les bords de mer, caractérisés par des **plages** et des **promenades** (urbanisé ou sous forme de sentiers) sont de véritables lieux de vie pour les locaux et également pour les touristes. Ils sont considérés comme des enjeux majeurs car fortement attractifs durant une grande période de l'année. Ils sont donc vulnérables par la population « utilisatrice » de ces espaces.

Situés directement à l'interface terre-mer, ils sont directement exposés aux différentes menaces venant de la mer, dont les tsunamis. En situation estivale, une forte densité de population se retrouve donc directement exposée. A cela s'ajoute d'autres problématiques comme la connaissance de ce risque particulier (directement lié à l'information de la population), l'évacuation (organisée ou spontanée), etc.

Pour faire suite aux réflexions sur l'évacuation, la structure littorale et l'histoire locale ont fait ressortir que les **centres-villes**, généralement des centres anciens piétons, pouvaient également être considérés comme des enjeux majeurs. Non seulement ils contiennent une forte densité de population (locaux et touristes), mais leurs rues étroites peuvent rendre difficiles les déplacements, surtout si des mouvements de foules viennent à se développer. De plus, ils permettent d'intégrer de manière très succincte et simplifiée l'aspect multi-risques de la réflexion globale. En effet, l'évènement tsunamique majeur de la région est d'origine sismique.

Le territoire azuréen étant un territoire fortement touristique, il est apparu pertinent d'intégrer certains espaces de vie spécifique au tourisme comme les **campings**. En plus de regrouper en un lieu restreint une forte densité de population, le type de logement proposé (tente, caravane, mobil-home, chalet, etc.) s'avère être particulièrement vulnérable face à certains aléas naturels. Les inondations d'octobre 2015 sur le littoral ont fortement impacté certains campings faisant un mort et détruisant plusieurs mobil-homes.

Les zones refuges sont des structures qui permettent l'accueil de sinistrés pour un temps plus ou moins long. Leur détermination est spécifique à la menace puisqu'elles doivent répondre à certains critères pour être efficaces. Par exemple, dans le cas d'un tsunami, elles doivent soit être suffisamment éloignées de la menace, ce qui pose des questions d'accès (temps de déplacement et difficulté de s'y rendre), soit être en zones impactées mais suffisamment en hauteur pour assurer la sécurité de la population venue se mettre à l'abri. Elles sont donc fondamentales pour la vulnérabilité d'un territoire.

Il est primordial, pour qu'elles soient efficaces, qu'elles soient déterminées en amont et signalisées par des panneaux afin que, lors de l'évacuation ou de la fuite, les personnes soient guidées en direction de ces structures. Des travaux ont été réalisés sur cette problématique et sur cette zone d'étude ([Bantegnie, 2015](#)).

Une fois que l'ensemble des enjeux majeurs ont été identifiés, il convient de les organiser afin de faciliter leur analyse. Ils sont donc rassemblés en grands groupes d'enjeux majeurs. Nous proposons ici une structuration de ces derniers.

3.3. Organisation des enjeux majeurs

L'ensemble des enjeux identifiés précédemment peut être réorganisé en grandes catégories d'enjeux. Ce classement est propre à chaque auteur. Ici, cinq catégories (Figure 76) sont proposées : les enjeux de populations, les réseaux « *softs* », les réseaux « durs » dynamiques, les réseaux « durs » statiques, les ERP et les attraits touristiques.

Les réseaux, fondamentaux à analyser, ont été dissociés en deux catégories : les réseaux dit « durs », définis par Clam (2004) comme une « *infrastructure extensive, territoriale, à grande échelle, à investissements matériels massifs, à hauts rendements quantitatifs... quelque chose en somme comme le réseau routier, ferré, électrique, gazier...* ». Les réseaux « *softs* » quant à eux, correspondent dans le domaine des risques et des catastrophes, « *aux acteurs décisionnels et opérationnels, formels et informels.* » (Provitolo et coll., 2017).

Les enjeux de population permettent d'analyser l'occupation du territoire par l'Homme. Ils regroupent la densité qui met en avant des zones à fort taux d'occupation, et les zones d'habitations. **Les Etablissements Recevant du Public** représentent des espaces « fragiles » où sont localisées de fortes concentrations de population, et donc des lieux à évacuer en priorité. Ils englobent : les établissements de santé, les ERP à public sensible (écoles, maisons de retraite, etc.) et les ERP pouvant potentiellement être utilisés comme des zones refuges.

Les réseaux « durs » sont décomposés en deux sous-catégories, les **dynamiques**, qui regroupent l'ensemble des réseaux de communication routiers, ferrés, aériens et portuaires. Ils sont dits dynamiques car ils permettent le déplacement de la population. Ils sont ainsi distingués des **statiques**, qui eux correspondent aux réseaux vitaux (eau, électricité, gaz), ne permettant pas à la population de circuler. L'ensemble de ces réseaux est indispensable au bon fonctionnement du territoire, et leur dysfonctionnement peut avoir de lourdes conséquences pour les populations (problème d'évacuation, d'arrivée des secours, accès à l'eau potable, etc.).

Les enjeux « softs » comprennent les structures décisionnelles nécessaires à la gestion de crise et à la protection des populations. Ces derniers peuvent avoir un impact sur le déroulement de la gestion de crise (qu'ils soient positifs ou négatifs). Ils regroupent : les pompiers, les structures décisionnelles de défense communales et locales et les structures décisionnelles et de défense départementales et régionales.

A cela viennent s'ajouter les **espaces ouverts à vocation touristique**, c'est à dire les plages, les promenades de bord de mer, les centres-villes et les campings. Ce sont de véritables lieux de vie et de rassemblements aussi bien pour la population locale que touristique. Bien que plus particulièrement utilisés en périodes estivales, ces espaces restent fortement fréquentés l'ensemble de l'année.

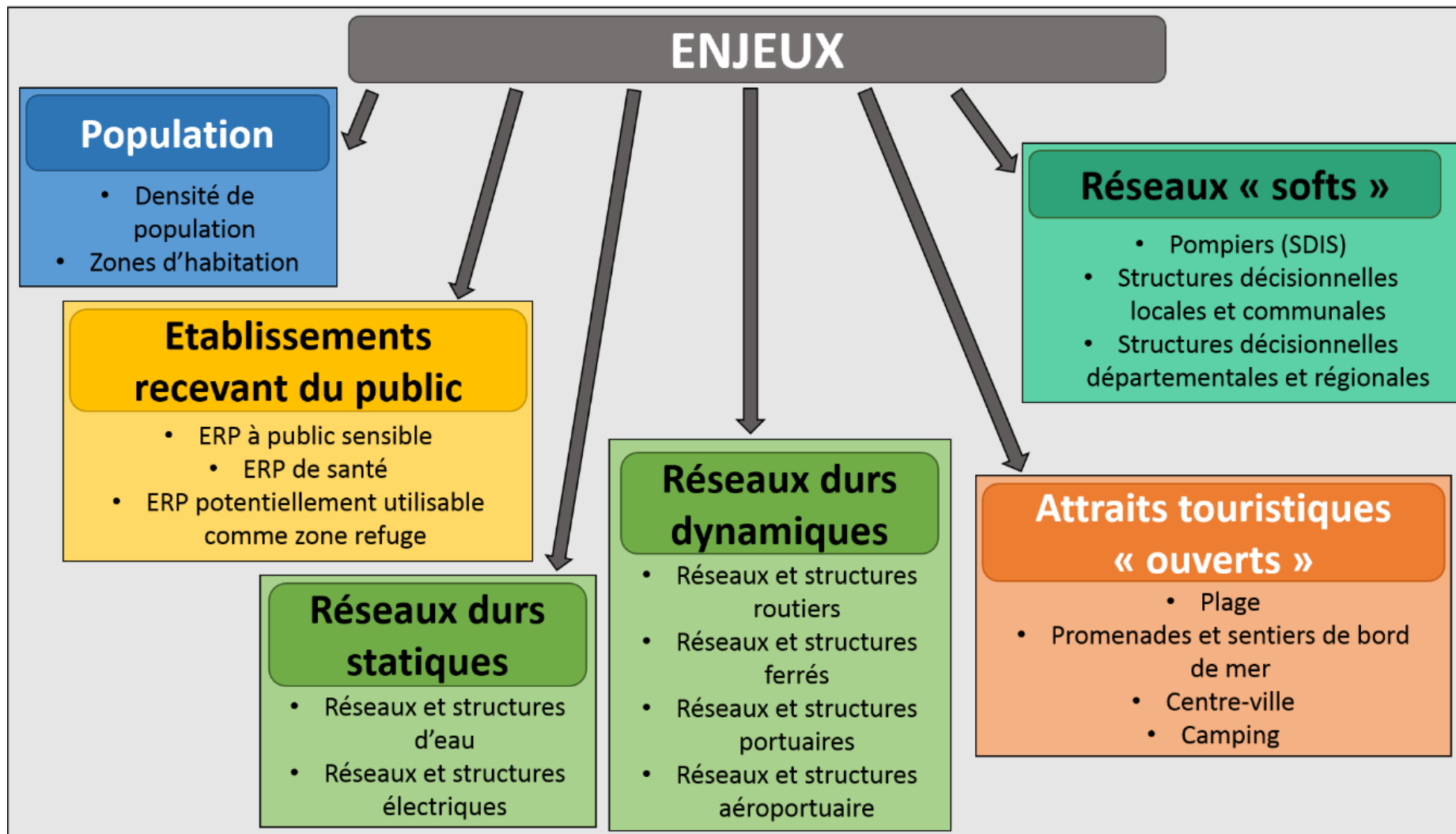


Figure 76 : Modèle conceptuel des enjeux majeurs retenu pour l'analyse de la vulnérabilité territoriale

4. Conclusion

Ce chapitre avait pour ambition de faire le lien entre la partie précédente ([Partie II](#)) centrée sur l'aléa et une approche d'avantage centrée sur la vulnérabilité, permettant d'aboutir à une analyse du risque. Il a permis de faire la distinction entre les différents types de vulnérabilité : biophysique, sociale et territoriale.

La vulnérabilité biophysique résulte de l'impact d'un aléa sur un système. L'exposition est donc au cœur de cette approche de la vulnérabilité. La vulnérabilité sociale se focalise sur les différentes capacités d'une société, d'une population, à anticiper, à se relever et à s'adapter à une catastrophe. Elle est similaire en de nombreux points à la résilience. La vulnérabilité territoriale, quant à elle, se focalise sur les enjeux majeurs susceptibles de diffuser leur vulnérabilité au territoire (en partie ou dans son ensemble).

La vulnérabilité territoriale ayant été choisie pour la réalisation de l'analyse de risque, l'accent a été mis sur les enjeux majeurs, leur compréhension et leur détermination. Plusieurs enjeux majeurs « génériques » ont été présentés (les hôpitaux, les centres décisionnels, les ERP, etc.), ces derniers étant applicables à tout type de territoire soumis à tout type d'aléa. D'autres enjeux « spécifiques » à un territoire littoral urbanisé et exposé à l'aléa tsunami ont été proposés : les plages, les promenades de bord de mer, les centres-villes, les campings et les zones refuges.

Une fois ces enjeux déterminés, ils ont pu être organisés en grandes catégories d'enjeux majeurs aboutissant à la proposition d'un modèle conceptuel. Le chapitre suivant ([Chapitre 11](#)) consiste donc au détail de la méthodologie de vulnérabilité territoriale par la détermination des enjeux majeurs, sa mise en application se faisant sur le littoral azuréen face à l'aléa tsunami.

CHAPITRE 11 : UNE METHODOLOGIE D'EVALUATION DE LA VULNERABILITE TERRITORIALE

Lorsque l'on réalise une analyse de risque d'un territoire soumis à un aléa, il est crucial de disposer à la fois de données précises sur cet aléa et de données sur les éléments composant le territoire. La réalisation d'une analyse de vulnérabilité territoriale nécessite l'analyse des enjeux majeurs de la zone d'étude. Bien qu'en essayant de s'extraire au maximum de l'aléa, la méthodologie appliquée a été adaptée pour inclure les particularités du territoire (principalement le fait que ce soit un espace littoral touristique) potentiellement exposées au tsunami.

Le chapitre précédent ([Chapitre 10](#)) a consisté en la définition de la vulnérabilité territoriale, des enjeux majeurs, ainsi qu'à leur identification. Ce chapitre se concentre sur la détermination de facteurs d'analyses de ces enjeux majeurs sélectionnés. Pour ce faire, plusieurs facteurs ont été proposés, avant d'en sélectionner un. Ce choix s'est principalement fait en fonction de la donnée disponible. Il a également été fait en tenant compte de la volonté de faire une méthodologie facilement applicable par des acteurs, donc principalement à partir de BD-Topo (IGN).

Cette analyse de vulnérabilité s'est extraite au maximum de l'aléa, jusqu'à ne pas inclure l'exposition comme facteur d'analyse. Bien que considéré par [Metzger et D'Ercole \(2008\)](#) comme un faisant partie intégrante de la vulnérabilité territoriale, nous avons pris le parti de l'intégrer à l'analyse de l'aléa. Il a d'ailleurs été détaillé dans la [Partie II](#). Bien que non directement intégré à la vulnérabilité territoriale, l'aléa reste présent dans les réflexions en amont.

Une fois les facteurs d'analyses déterminés, une mise en indice est réalisée sous trois niveaux (faible, moyen et fort). Chaque enjeu est ainsi détaillé, en précisant pour chacun le facteur d'analyse auquel est associé un tableau exposant la mise en indice. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la méthodologie d'obtention d'une cartographie de la vulnérabilité territoriale totale, c'est-à-dire au passage entre tous ces enjeux proposés et la création d'une carte de vulnérabilité territoriale unique.

[1. Détermination de facteurs permettant d'analyser la vulnérabilité et le niveau de risque d'un territoire exposé au tsunami](#)

Une fois les enjeux définis, il est nécessaire de déterminer les facteurs qui vont être utilisés afin d'analyser leur vulnérabilité. Pour chaque enjeu, plusieurs indicateurs peuvent être utilisés, avec des unités de mesures propres. Le but de cette étape est de faire le point sur les possibilités d'analyses des enjeux, selon différents facteurs proposés. Doivent être précisées les données dont on dispose. L'objectif est de faire ressortir quel est pour chaque enjeu le facteur de vulnérabilité retenu pour réaliser l'analyse du risque sur le littoral azuréen. Ici est présenté un tableau simplifié ([Tableau 16](#)) ressemblant uniquement les facteurs sélectionnés. Un tableau plus complet est disponible en annexe ([Annexe 6](#)).

Grandes familles d'enjeux	Enjeux majeurs	Facteurs d'analyse	Unités de mesures
Population	Densité de population	Densité par commune	Hab/km ²
	Zones d'habitation	Type d'espace	Qualitatif
Etablissements recevant du public	ERP à public sensible	Type de structure	Qualitatif
	ERP à fonction de santé	Type d'établissement de santé	Qualitatif
	ERP potentiellement utilisable comme zone refuge	Type d'ERP	Qualitatif
Réseaux « soft » structurels	Pompier (SDIS)	Type de caserne	Qualitatif
	Structures décisionnelles locales et communales	Type de structure	Qualitatif
	Structures décisionnelles départementales et régionales	Type de structure	Qualitatif
Réseaux « durs » statiques	Réseaux et structures d'eau	Type de structure	Qualitatif
	Réseaux et structures électriques	Type de structure	Qualitatif
Réseaux « durs » dynamiques	Réseaux et structures routières	Elévation des structures routières	Différence par rapport au niveau du sol
	Réseaux et structures ferrées	Elévation des structures ferroviaires	Différence par rapport au niveau du sol
	Réseaux et structures portuaires	Type de port	Qualitatif
	Réseaux et structures aéroportuaires	Type d'aéroport	Qualitatif
Attraites touristiques côtiers	Plages	Superficie des plages	Mètres carrés
	Promenades et sentier de bords de mer	Type de promenades ou de sentiers	Qualitatif
	Centres-villes	Eloignement du bord de mer et ancienneté de construction	Qualitatif
	Campings	Superficie	Mètres carrés

Tableau 16 : Détail des différents enjeux et facteurs pouvant être analysés dans l'étude de vulnérabilité

Lors de la réalisation d'une étude de risque, la récolte de données est un élément clé. Dans ces travaux, nous avons pris le parti d'appuyer notre analyse de vulnérabilité uniquement sur les données de la *BD-Topo* créée et fournie par l'IGN. Ce choix peut être largement contesté mais il nous est paru important, dans la réflexion et la mise en place de cette méthodologie, que cette dernière soit reproductible facilement avec des données accessibles. En effet, cette base de données est en accès libre pour les collectivités territoriales et les organismes de recherche. Riche et faisant office de référence, elle est régulièrement mise à jour et permet d'avoir des données vérifiées et récentes facilement.

Cette étude est donc un exemple de mise en application de la méthodologie de vulnérabilité territoriale proposée sur un territoire, la Côte d'Azur, face à un risque particulier, le tsunami. Les données portant sur l'aléa, courants (*CUR_{max}*) et amplitude des vagues (*H_{max}*), ont quant à elles été réalisées au sein du laboratoire et présentées dans le [Chapitre 8](#).

2. L'étude des enjeux majeurs grâce à la détermination de facteurs d'analyses

L'objectif de la réalisation de cette étude de vulnérabilité territoriale étant, par la suite, son intégration dans une analyse de risque, il convient d'appliquer la même méthodologie que celle appliquée pour l'analyse de l'aléa, c'est-à-dire l'utilisation de « *degrés synthétiques* » (Gleyze 2001). Les enjeux majeurs sont ainsi mis en indice en trois niveaux : faible, moyen, fort, d'indice respectif 1, 2 et 3. A cela s'ajoute implicitement un niveau zéro, correspondant à l'absence spatiale d'un enjeu (une mairie à une position spatiale spécifique ; lorsqu'elle est présente un niveau d'indice lui est attribué mais lorsqu'elle est absente la valeur 0 lui est attribuée).

Cette mise en indice permet l'utilisation de données à la fois qualitatives et quantitatives, et d'échelles de mesures différentes. Elle permet également le calcul d'une vulnérabilité territoriale totale grâce à l'addition de l'ensemble des indices présents en un point. Sont détaillés ici uniquement les mises en indice des éléments pris en compte dans notre analyse de vulnérabilité, à savoir les enjeux portant sur la population, les Etablissements Recevant du Public (ERP), les réseaux « *softs* », les réseaux « *durs* » et les espaces touristiques « *ouverts* » en bordure littorale. Ces éléments ont été sélectionnés car ils correspondent aux enjeux majeurs en cas de catastrophes.

2.1. La population, enjeu « primordial » dont il faut assurer la sécurité

La vulnérabilité d'un territoire est fonction de plusieurs enjeux majeurs. La population apparaît être le principal. Un évènement naturel se produisant en milieu quasi inhabité aura moins d'impact humain que s'il se produit en milieu fortement habité. Bien que l'ensemble des enjeux étudiés ait pour finalité la protection des Hommes, la population reste un enjeu à part entière.

La vulnérabilité de la population dépend de facteurs variés, tels que les niveaux de ressources financières, d'accessibilité aux crédits et à l'information, les facteurs culturels et institutionnels (Blaikie et al., 1994 ; Bolay et al., 2012 ; Becerra et Peltier, 2009), ou encore l'IDH (Indice de Développement Humain) du pays. La prise en compte de ce *panel* de facteurs nécessiterait des analyses spécifiques sur l'ensemble de notre territoire d'étude (notamment des enquêtes auprès de la population pour évaluer leur connaissance des risques, des comportements à adopter en cas de tsunami, etc.).

Nous avons opté pour une analyse de la vulnérabilité des populations au regard de leur densité (nombre d'habitants par kilomètre carré) sur l'ensemble des communes du littoral azuréen, ainsi que des zones habitées.

2.1.1. Enjeu E_1 : Densité de population

La densité de population est le premier facteur sélectionné pour analyser l'enjeu de population. Celle-ci peut s'effectuer à différentes échelles (départements, communes, quartiers, etc.). Il aurait été pertinent d'analyser la densité par quartier, faisant ainsi ressortir les particularités locales et les espaces densément peuplés. Ne disposant pas de cette donnée dans la BD-Topo, nous avons analysé les densités communales.

Le département des Alpes-Maritimes accueille en 2016 (INSEE, 2020) une population de 1 083 310 habitants, soit un peu moins d'un quart de la population de la région Sud (anciennement Provence Alpes Côte d'Azur). La densité départementale moyenne est de 252.1 hab/km², soit plus de deux fois supérieure à la densité nationale qui était de 104.9 hab/km² en 2015 (INSEE, 2016). Une grande disparité existe entre le littoral et l'arrière-pays, puisque la très grande majorité de la population vit en zone littorale (Figure 77). En effet 3 agglomérations littorales regroupent 95% de la population : Nice, Monaco-Menton, Cannes-Antibes. A cela s'oppose l'arrière-pays, faiblement peuplé et peu dense.

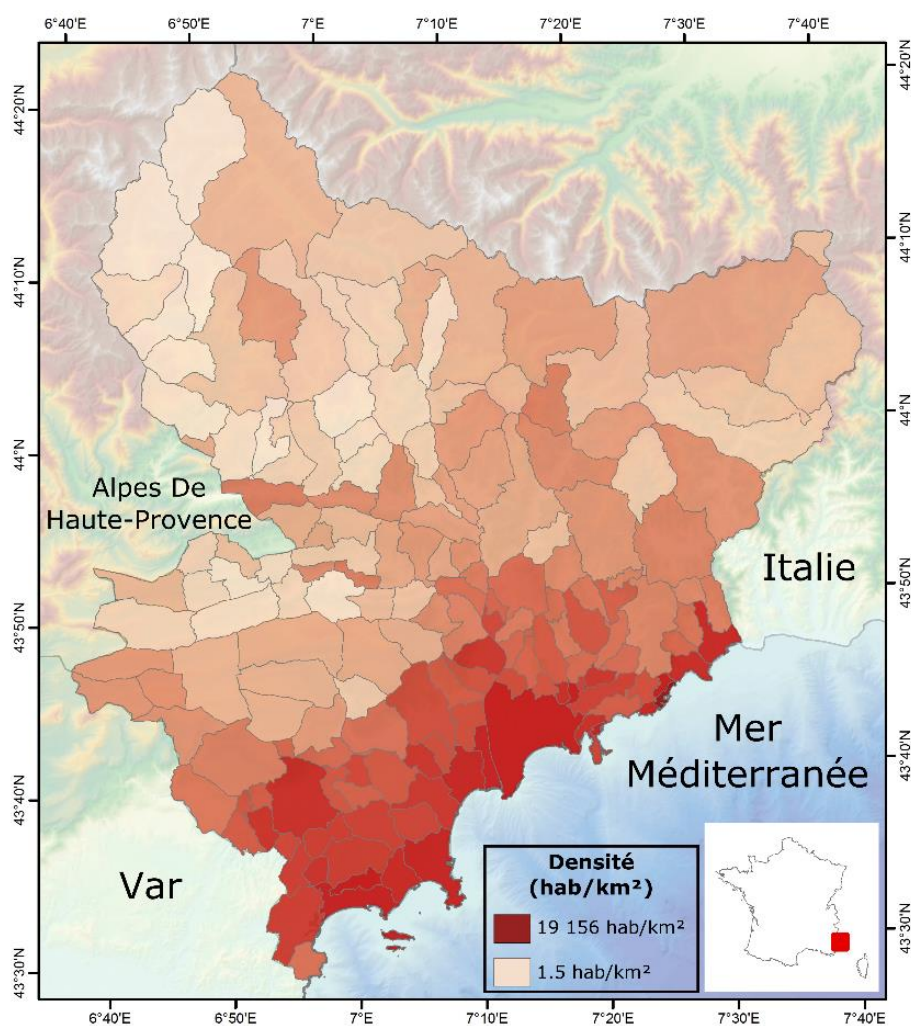


Figure 77 : Cartographie de la répartition des densités du département des Alpes-Maritimes en 2016

(Sources : BD-Topo, réalisation L. Boschetti, 2019)

Au sein du département les densités s'étendent de 1.5 hab/km² (Saint-Dalmas-le-Selvage) jusqu'à 19 156 hab/km² (Monaco). Il apparaît clairement que la frange littorale est plus fortement peuplée que l'arrière-pays. Les communes littorales disposent de densités comprises entre 140 hab/km² (Théoule-sur-Mer) et 19 155 hab/km² (Monaco). La moyenne de densité littorale est donc de 3 016 hab/km² (2 008 hab/km² sans Monaco). Ces valeurs sont donc bien supérieures aux densités nationales et connaissent de grandes variations de densité (Tableau 17), mettant en lumière les communes côtières les plus peuplées et donc présentant le plus de personnes exposées.

Degrés synthétiques	E_1 , Densité de population (hab/km ²)
Faible	< 1 000
Moyen	[1 000 ; 3 500]
Fort	> 3 500

Tableau 17 : Mise en indice de la densité de population

Ces valeurs de densité locale ont ainsi permis la classification des intensités en trois niveaux d'indices (faible, moyen, fort) La vulnérabilité faible correspond aux densités inférieures à 1 000 hab/km², la vulnérabilité moyenne comprend les densités allant de 1 000 à 3 500 hab/km², et le niveau fort s'étend au-delà de 3 500 hab/km² (Tableau 17). Ces valeurs s'appliquent uniquement pour les espaces densément peuplés comme les Alpes-Maritimes.

Ces classes doivent être adaptées au territoire d'étude dans le cadre d'une autre analyse. A l'analyse de la densité vient s'ajouter la prise en compte des zones d'habitations, qui permettent d'avoir un détail supplémentaire quant aux espaces regroupant des habitations au sein d'une commune.

2.1.2. Enjeu E2 : Zone d'habitation

La densité permet une analyse de la quantité de population sur un espace, ici en l'occurrence l'échelle communale, ce qui ne permet pas de distinction infra-communale. Pour marquer des distinctions à l'intérieur des communes, nous avons décidé de nous focaliser sur la distinction entre les espaces habités, et ceux qui ne le sont pas (ce qui ne signifie pas qu'ils ne sont pas occupés par des activités commerciales, industrielles ou agricoles).

En nous appuyant sur les données de la BD-Topo, une zone d'habitation est définie comme un « *Lieu-dit habité de manière permanente, temporaire mais régulière ou anciennement habité et à l'état de Ruines* » (BD-Topo, 2019). Elle est constituée de zones tampons réalisées à partir du bâti ; le zonage final est donc discutable.

Nous proposons l'analyse de la vulnérabilité de la population via une mise en indice se focalisant sur l'opposition entre la zone d'inondation (vulnérabilité moyenne) et les zones non habitées (vulnérabilité faible). Nous proposons de placer en vulnérabilité forte les centres-villes, les vieille-villes des communes touristiques (Tableau 18).

Degrés synthétiques	E ₂ , Typologie d'occupation du sol
Faible	Hors zone d'habitation
Moyen	Zone d'habitation
Fort	Centre-ville / village

Tableau 18 : Mise en indice des zones d'habitations

A la vulnérabilité de la population s'ajoute d'autres enjeux prenant également en considération la population. C'est le cas des Etablissements recevant du Public (ERP).

2.2. Les établissements recevant du public, sensibles à la fois par leur rôle et par le public présent

Il est nécessaire d'analyser les Etablissements Recevant du Public (ERP) lors d'une étude de vulnérabilité territoriale puisqu'ils condensent de nombreuses personnes, plus ou moins vulnérables, en des points précis du territoire. Cela signifie que ce sont des points clés du territoire puisqu'ils peuvent, en cas de sinistre, mobiliser de nombreuses ressources de secours. Plusieurs possibilités sont envisageables. Dans un premier cas, les ERP situés en dehors de la zone impactée, ne nécessitent aucune intervention de la part des secours et peuvent servir de lieux de rassemblements, ou d'accueil temporaire. La deuxième éventualité, plus problématique, serait que ces structures soient impactées, mettant en jeu la population qu'il conviendra d'évacuer.

Nous n'avons malheureusement pas à notre disposition de couche d'ERP dans le BD-Topo (elle est disponible pour certains départements mais ne l'est pas encore pour les Alpes-Maritimes). Une couche comprend toutefois les éléments du territoire tels que les administrations, les lieux d'éducation, de santé, etc. Nous sommes donc partie de cette couche pour effectuer nos analyses. Plusieurs facteurs peuvent permettre d'analyser les ERP. Avant de les exposer, nous avons pris le parti de dissocier les ERP en trois catégories : les ERP à public sensible, et les ERP à fonction particulière de santé et de potentielle zone refuge. Il faut cependant noter qu'aucune analyse n'est faite sur l'ensemble des ERP.

2.2.1. Enjeu E₃ : ERP à public sensible

Les ERP, de par la population qu'ils abritent, sont des enjeux majeurs du territoire. Ils sont catégorisés administrativement soit en fonction de leur catégorie (nombre de personnes qu'ils sont susceptibles d'admettre dans leur locaux) ou de leur type (commerce, santé, administration, etc.). Dans cette section, nous avons sélectionné les établissements recevant un public sensible. La classification a donc été effectuée en dissociant différentes structures principalement d'éducation (lycée, collège, école primaire) et paramédicale (maison de retraite, foyer d'accueil médicalisé, maisons de santé pour maladies mentales) (Tableau 19).

Degrés synthétiques	E ₃ , Type de structure des ERP à public sensible
Faible	Lycées
Moyen	Collèges, Etablissements à sections spécialisées, Foyers d'accueil médicalisé, Maisons de santé pour maladies mentales
Fort	Ecoles primaires, Maisons de retraite,

Tableau 19 : Mise en indice des établissements recevant du publics à public sensible

Sont définis en vulnérabilité faible les lycées. Bien que généralement non majeurs, les élèves, des adolescents, sont en mesure de s'auto-gérer, d'avoir une réflexion sur les mesures à tenir et ont une forme physique qui leur permet de se déplacer facilement et rapidement.

La vulnérabilité moyenne comprend les collèges, ainsi que les établissements à sections spécialisées. Les pré-adolescents du collège sont rarement à même d'être complètement autonomes. En cas d'alerte ou d'évacuation, ils doivent dépendre d'un adulte ou d'une personne référente. Les établissements spécialisés correspondent aux sections d'enseignement pour les personnes en difficultés de type SEGPA (Section d'enseignement Général et Professionnel Adapté), pour les malentendants (CRESDA - Centre Régional d'Education Spécialisée pour Déficients Auditifs) ou les structures en charge des adolescents en grande difficulté scolaire ou en situation de handicap (EREA - Etablissement Régional d'Enseignement Adapté).

Sont également inclus en vulnérabilité moyen les foyers d'accueil médicalisé, qui sont des structures d'hébergement pour adultes gravement handicapés nécessitant une assistance dans la vie courante, et les maisons de santé pour maladies mentales, établissements psychiatriques pour des périodes de moyens séjours permettant de gérer les crises et les situations d'urgence (psychiatriques).

La vulnérabilité maximale a été attribuée aux établissements dont le public est considéré comme le plus vulnérable : les écoles primaires et les maisons de retraites. Les premières, consacrées à l'éducation des enfants de 3 à 10 ans, sont vulnérables car ces derniers ne sont pas en mesure de se gérer et de se déplacer sans l'assistance et la protection d'un adulte. Ils peuvent également être effrayés par la situation et leur mise à l'abris peut s'avérer difficile. Les secondes, concentrées sur la vie quotidienne des personnes âgées, rencontrent approximativement les mêmes problématiques.

Les ERP à public sensible sont problématiques par le public qu'ils contiennent. Les ERP à fonction de santé sont sensibles pour une raison similaire (présence de malades), à laquelle vient s'ajouter la fonction même de l'établissement, permettre la prise en charge des sinistrés nécessitant des soins.

2.2.2. Enjeu E_4 : Les établissements de santé

Les établissements de santé, bien qu'à fonction particulière, sont considérés comme des ERP. Pour réaliser une analyse de la vulnérabilité des établissements de santé, plusieurs facteurs peuvent être retenus. Le nombre de lits permet, de manière approximative, de connaître le nombre de malades au sein de la structure hospitalière. Elle permet également d'avoir un ordre d'idée de la taille de ce centre. Ces établissements ont toutefois montré leur formidable capacité d'adaptation et de gestion de crise lors de la crise sanitaire liée au Covid-19 en 2020, augmentant parfois considérablement leur capacité d'accueil.

D'autres facteurs plus spécifiques aux risques, comme la présence de plans d'évacuations, ou la résistance des bâtiments (dans ce cas précis, la résistance face au risque sismique), apporteront de l'information supplémentaire non négligeable. Il est également possible d'étudier la localisation de ces centres hospitaliers par rapport à l'aléa. Ici, nous avons choisi de classer les établissements de santé en fonction de leur rôle et importance dans les soins donnés (Tableau 20).

Degrés synthétiques	E_4 , Type de structure à fonction de santé
Faible	Etablissements de réadaptation fonctionnelle
Moyen	Hôpitaux spécialisés
Fort	Hôpitaux et cliniques (dont CHU et CHR)

Tableau 20 : Mise en indice de établissements recevant du public à fonction de santé

Sont ainsi caractérisés en vulnérabilité faible les établissements de réadaptation fonctionnelles. Il s'agit d'établissements dispensant les soins nécessaires à une rééducation ou réadaptation, faisant suite à un séjour hospitalier. Les patients, bien que dépendants, sont conscients et ne nécessitent plus de soins importants. La vulnérabilité moyenne concerne les hôpitaux spécialisés, c'est-à-dire prodiguant des soins pour des maladies non somatiques (hôpitaux psychiatriques, centres hospitaliers spécialisés pour la lutte des maladies mentales). Et enfin, sont caractérisés par une vulnérabilité forte les hôpitaux et cliniques, incluant les Centres Hospitaliers Universitaires (CHU) et les Centres Hospitaliers Régionaux (CHR), généralement de capacités plus importantes et disposant de technologies de pointes.

La mise sous forme d'indice pose un problème d'éthique, puisque cela revient à classer des établissements de santé en vulnérabilité faible alors qu'ils représentent un enjeu fort pour le territoire, et ainsi donner un coût à la vie humaine. Il n'est cependant pas cohérent de mettre en même niveau de vulnérabilité l'ensemble de ces établissements de santé. A ces ERP vulnérables par leur public et leur fonction, vient s'ajouter des ERP pouvant être utilisées comme zone refuge.

2.2.3. Enjeu E_5 : ERP pouvant faire office de zone refuge

Les ERP sont des enjeux majeurs puisqu'ils constituent des points sensibles du territoire, regroupant potentiellement un grand nombre de personnes, posant des problèmes d'évacuation et de secours. A l'inverse, ils peuvent également servir de zones refuges et d'espaces de protection le temps de la crise.

Un site refuge est défini par [Mayaguezz \(2015\)](#) comme « *un espace de mise en sécurité des personnes assimilable à une zone de regroupement. Les zones de refuge doivent pouvoir accueillir plusieurs personnes pour un temps indéterminé.* ». Cet espace, défini en amont de la crise, doit permettre la mise en sécurité de la population face à un phénomène (ici le tsunami mais il peut également s'agir d'inondation, d'explosion d'usine chimique, etc.).

Les études portant sur les zones refuges sont généralement couplées à celles portant sur l'évacuation. Pour atteindre ces zones refuges il faut être en mesure d'évacuer la zone impactée et de rejoindre ces espaces prédéfinis. L'évacuation peut varier selon l'aléa. Les évacuations horizontales consistent en l'éloignement spatial de la zone de danger, alors que les évacuations verticales correspondent à une évacuation à l'intérieur même de la zone de danger mais vers le haut, c'est-à-dire à l'étage de bâtiments ou sur des reliefs.

Cette dernière est à prioriser lors d'événements rapides et brutaux ne laissant pas le temps nécessaire à une évacuation horizontale. Elle est généralement recommandée lors d'événements liés à l'eau, comme les tsunamis ou les inondations. C'est pourquoi la construction de maisons de plain-pied dans les zones inondables est peu recommandée, car les habitants ne peuvent pas se réfugier à l'étage et peuvent vite se retrouver prisonniers.

Cette analyse de la vulnérabilité par les ERP pouvant servir de zone refuge n'est pas une étude poussée des zones refuges potentielles du littoral azuréen. Des travaux ont été réalisés par [Bantegnie \(2015\)](#) permettant la détermination de sites refuges sur plusieurs communes du littoral exposées aux tsunamis. Cette étude présente la particularité d'avoir sélectionné les zones refuges à l'intérieur même de la zone impactée.

Ici, nous avons pris le parti de ne pas sélectionner l'ensemble des ERP, mais uniquement ceux disposant d'une grande plage d'ouverture, avec un accès possible à tous. Il s'agit des offices du tourisme, des musées et des centres commerciaux. Il aurait été intéressant de prendre en compte également les hôtels car il s'agit de sites ouverts 24h/24, 7j/7, généralement faciles d'accès et souvent à proximité immédiate du bord de mer, donc de la zone impactée ([Bantegnie, 2015](#)).

Les offices du tourisme sont classés en vulnérabilité faible ([Tableau 21](#)) car ils sont généralement de petites tailles et ne peuvent accueillir une grande quantité de personnes. Que ce soit au niveau de l'évacuation ou de la mise en sécurité de personnes, peu de personnes seront concernées. Les musées sont considérés comme ayant une vulnérabilité moyenne, car de tailles et d'horaires variables, leur accès peut s'avérer compliqué à cause de la présence d'un guichet d'entrée et potentiellement de portiques à franchir. Sont considérés en vulnérabilité forte les

centres commerciaux et les espaces commerciaux. Ces derniers, de grande capacité, ont des horaires d'ouverture très large dans la région (tous les jours de la semaine et parfois le soir). Il peut donc s'agir de centres commerciaux ouverts ou fermés, de zones commerciales, etc.

Degrés synthétiques	E ₅ , Type de structure d'ERP pouvant servir de zone refuge
Faible	Office du tourisme
Moyen	Musée
Fort	Centres commerciaux et zones commerciales

Tableau 21 : Mise en indice des établissements recevant du public pouvant servir de zone refuge

Ces structures commerciales rassemblent une forte densité de personnes en un endroit limité dans l'espace. Les problématiques varient légèrement entre les zones commerciales et les centres commerciaux. Les premières attirent de nombreuses personnes qui se déplacent généralement en voiture d'un magasin à un autre, pouvant entraîner des ralentissements de la circulation. En cas d'évènement majeur, l'évacuation routière pourrait devenir impossible et ralentir l'intervention des secours. Fort heureusement, ces bâtiments commerciaux sont généralement de taille importante (avec étages) et permettent d'accueillir un grand nombre de personnes. Les seconds, quant à eux, sont piétons avec des parkings à proximité. Lorsqu'ils sont couverts et à étages, ils assurent une mise en sécurité des personnes présentes.

L'analyse des ERP a ainsi été réalisée selon plusieurs facteurs et n'inclut que certains types d'ERP nous apparaissant comme les plus sensibles ou les plus stratégiques. Passons maintenant à l'analyse des différents réseaux « durs » et « softs ».

2.3. Les réseaux « soft », points clés de la gestion de crise

Les enjeux liés aux réseaux « softs » correspondent aux structures et institutions responsables de la gestion du territoire, du maintien de son fonctionnement et de sa sécurité. Le modèle conceptuel proposé tient compte de l'aspect structurel et organisationnel. Ce dernier, se focalise sur les liens entre les différents acteurs et se prête donc davantage à une analyse de réseaux. Son application cartographique s'avère délicate. L'aspect organisationnel ne sera donc pas traité dans cette section.

Afin de pouvoir traiter les réseaux « soft » cartographiquement, ils ont été analysés par leur aspect structurel, c'est-à-dire grâce aux bâtiments dans lesquels sont localisées ces institutions. La limite principale de ce choix est que leur emprise spatiale apparaît limitée à l'échelle d'un bâtiment, alors qu'ils agissent à l'échelle du territoire. Ces institutions sont détaillées en trois sections : les pompiers, les structures décisionnelles et de défenses communales et locales, et les structures décisionnelles et de défenses départementales et régionales.

2.3.1. Enjeu E_6 : Service départemental d'incendie et de secours

Les pompiers sont les premiers acteurs de secours à intervenir sur un territoire. Ils sont généralement appelés dans les accidents de la vie courante : accidents domestiques, de la circulation, arrêts cardiaques, etc. Ils interviennent également lors d'évènements plus exceptionnels tels qu'un aléa naturel, un accident industriel ou une crise sanitaire. Lors d'un évènement naturel ils doivent, en plus de la crise en cours, essayer autant que possible de continuer à répondre aux problématiques courantes. Par exemple si une personne fait un arrêt cardiaque lors d'une inondation, ils doivent tant que possible être en mesure de pouvoir porter assistance à cette personne, avant même de porter secours aux sinistrés (sauf s'il y a danger de mort).

Les missions principales du Service départemental d'Incendie et de secours (SDIS) sont (SDACR, 2010) : la prévention, la protection et la lutte des incendies, des risques naturels et des risques technologiques, la protection des personnes et des biens, l'organisation de moyens de secours, et le secours d'urgence. Ils constituent donc un enjeu majeur du territoire qui, en cas de dysfonctionnement, va augmenter la vulnérabilité et la faiblesse du territoire.

Les pompiers peuvent être vulnérables de par leur exposition, mais également être dans l'impossibilité d'améliorer la situation s'ils ne peuvent pas accéder aux zones impactées (directement impacté, routes non empruntables, etc.). Plusieurs facteurs d'analyses pourraient être utilisés comme leur localisation (exposition), les ressources humaines et matérielles dont disposent chaque caserne, le nombre de personnes impactées en cas de dysfonctionnement, le temps d'accès à une zone, leur l'importance (Etat-major, SDIS, centre d'appel, etc.), l'objectif étant de faire ressortir les casernes considérées comme indispensables et d'analyser leur capacité d'intervention en cas d'évènement majeur.

Parmi ces facteurs, nous avons décidé de retenir une classification selon l'importance par rapport au risque de tsunami (Tableau 22). La vulnérabilité faible comprend une section appelée les « forestiers sapeurs », qui est en charge de l'entretien des espaces naturels et de l'intervention en cas de feux de forêts avant l'arrivée de renforts. Dans l'hypothèse d'une analyse de vulnérabilité d'un territoire soumis aux feux de forêts, ce dernier disposerait d'une vulnérabilité plus importante.

Degrés synthétiques	E_6 , Type de caserne de pompier
Faible	Forestier sapeur
Moyen	Centres de 1 ^{ère} intervention et centres de secours
Fort	SDIS, Centres de secours principaux, centres d'incendie et de secours

Tableau 22 : Mise en indice de l'enjeu pompier

Sont considérés en vulnérabilité moyenne les centres de premières intervention et les centres de secours. Ces deux structures sont composées uniquement de pompiers volontaires d'astreintes. Il n'y a donc pas de pompiers en permanence sur les lieux. Ils ne rejoignent le centre que lors d'un départ en intervention. Nous pouvons

donc nous interroger sur leur capacité d'intervention en cas d'évènement extrême venant perturber la circulation, leur habitation ou la caserne. En cas de dysfonctionnement et de non possibilité de départ le territoire va s'en trouver fragilisé. Il s'agit toutefois de casernes de tailles modérées, ne disposant pas de grandes capacités matérielles et humaines.

Les vulnérabilités fortes caractérisent les casernes disposant de pompiers de garde sur site, permettant d'assurer des départs immédiats, c'est-à-dire les centres de secours principaux. Ces casernes ont des ressources humaines et matérielles bien plus importantes. En cas de défaillance, le territoire va s'en trouver grandement impacté.

Le SDIS dispose d'un fonctionnement départemental. Lorsqu'un département est touché, des pompiers de départements limitrophes peuvent être appelés en renfort. Lors des inondations du 3 octobre 2015, 300 sapeurs-pompiers supplémentaires d'autres départements de la zone de défense (sud dont le siège est à Marseille) sont venus prêter main forte.

Les pompiers ont donc en charge l'intervention rapide et la protection de la population. En cas de crise ils n'interviennent pas seuls. Ils sont accompagnés de structures de défenses (gendarmerie, police), le tout encadré par des structures décisionnelles (mairies, préfectures, etc.). Ces dernières fonctionnent au niveau communal, départemental, régional ou national. La suite de l'analyse découpe justement ces structures selon ces aspects spatiaux et leurs zones d'influence, en séparant celles locales et communales de celles départementales et régionales.

2.3.2. Enjeu E₇ : Structures décisionnelles et de défense communales et locales

La gestion de crise est un moment clé d'une catastrophe. Suivant l'organisation, sa préparation, son déroulé, l'évènement peut être plus ou moins bien absorbé par le territoire, et ainsi permettre un retour relativement rapide à une situation « normale » en limitant au maximum les dégâts. Même avec une certaine préparation, des imprévus s'invitent toujours et viennent perturber le bon déroulement des opérations. Les acteurs de cette gestion de crise, leurs actions, leurs relations, sont indispensables au bon déroulement de cette période cruciale.

Nous aurions pu prendre chaque acteur séparément et les traiter un par un. Nous avons trouvé plus judicieux de faire une distinction au niveau de leur échelle d'influence. Nous avons ainsi distingué les structures décisionnelles et de défenses à actions communales et locales, et celles à échelles d'action plus large (départementale et régionale).

Les structures décisionnelles locales regroupent plusieurs structures dont les Mairies qui ont la responsabilité de la sécurité de ses administrés. Aujourd'hui, de plus en plus de communes sont regroupées en Etablissement Public de Coopération Intercommunale (EPCI) leur permettant de mutualiser certaines de leurs compétences, dont celles liées à la prévention et protection des risques. Les EPCI peuvent remplacer les mairies au niveau de la gestion de crise, permettant d'homogénéiser la gestion du

territoire. Les petites communes disposent généralement de moins de moyens ; cette mutualisation leur permet d'avoir accès à des renforts matériels et humains. Se pose toutefois la question de la distance de ces communes secondaires à la commune principale, car le temps d'intervention peut être important, voir ralenti en cas de perturbation du trafic.

En plus de ces structures d'organisation locales, sont également prises en considération : les sous-préfectures et les capitaineries. Les premières, bien que dépendant d'un échelon supérieur, vont potentiellement avoir un rôle plus local. Les secondes, à l'interface entre la terre et la mer, font le lien entre les navires et le port. Les ports étant généralement les premiers impactés en cas de tsunami, il est important que ces structures aient connaissance des risques et qu'elles soient en mesure de réagir si un évènement survient. L'idéal est de garder les bateaux au large (le tsunami étant destructeur à l'approche des côtes mais pas au large) et potentiellement de faire sortir des bateaux afin de limiter les dégâts à l'intérieur du port. Se pose toutefois la question de la temporalité entre le déclenchement de l'évènement et son arrivée sur les côtes, et de la réalisation d'une telle mesure.

L'ensemble de ces structures décisionnelles est considéré comme ayant une vulnérabilité forte (Tableau 23). L'aspect défense, correspondant à la protection des populations est, quant à lui, défini en vulnérabilité moyenne. Au niveau local, il comprend les forces de l'ordre et plus précisément la police municipale. Nous n'avons pas déterminé de correspondance pour la vulnérabilité faible, car le choix d'échelle réduite limite les structures rentrant potentiellement dans cette catégorie. Il aurait été intéressant d'inclure les associations locales dans cet échelon mais elles ne sont pas considérées par la BD topo car elles varient d'un territoire à un autre.

Degrés synthétiques	E ₇ , Type de structures décisionnelles locales
Faible	/
Moyen	Structures de défenses (Police municipales)
Fort	Structures décisionnelles locales (Mairies, sous-préfecture, siège d'EPCI) et Capitaineries

Tableau 23 : Mise en indice des structures décisionnelles locales et communales

En amont, la protection permet de prévenir ce genre d'évènement et donc de mettre en place un Plan Communal de Sauvegarde (PCS), ainsi qu'une cellule de crise communale. En cas de catastrophe, cette cellule de crise, placée sous l'autorité du maire, va se réunir. Elle permet la gestion des différents services de l'Etat, ainsi que les secours. C'est elle également qui va alerter et informer la population tout au long de la crise. En cas d'évènement dépassant les limites communales, le préfet de département prend le relais et prend la charge de la gestion de crise.

2.3.3. Enjeu E_8 : Structures décisionnelles et de défense départementales et régionales

Les institutions sont les acteurs principaux dans la gestion de crise, puisque ce sont elles qui vont permettre la prise de décision et ainsi le bon ou le mauvais déroulement de la gestion de la crise. Lorsqu'un événement prend une certaine ampleur, généralement lorsqu'il touche plusieurs communes d'un département, le Préfet prend en charge la gestion des opérations. Il devient alors Directeur des Opérations de Secours (DOS). Le préfet se repose toutefois sur les structures communales qui ont la connaissance du terrain.

Tout comme l'enjeu précédent, sont pris en considération ici les structures décisionnelles et de défenses départementales et régionales. L'aspect décisionnel est assuré par les préfetures (de département principalement mais potentiellement de région, voire de zones) et les hôtels de départements. Ils vont jouer à la fois un rôle direct pendant la gestion de crise et également un rôle indirect dans l'après crise pour la remise en état du territoire. De par leur rôle stratégique, ils sont considérés en vulnérabilité forte (Tableau 24).

Degrés synthétiques	E_8 , Type de structures décisionnelles départementales et régionales
Faible	(autres) Services déconcentré de l'Etat
Moyen	Structures de défenses (Gendarmerie et Police Nationale)
Fort	Structures décisionnelles départementales et régionales (Préfetures, Hôtel de département) et structures d'observation de la mer (sémaphores)

Tableau 24 : Mise en indice des structures décisionnelles départementales et régionales

A ceux-ci s'ajoute les sémaphores. Ces structures, gérées par le ministère des armées, ont pour mission la sûreté du trafic maritime, la lutte contre les pollutions maritimes, empêcher le trafics illicites et également des opérations de sauvetages (Gouvernement). Généralement situés en des lieux stratégiques, ils ont une vue privilégiée sur la mer et ses environs. Nous pouvons donc supposer qu'ils pourraient jouer un rôle en cas de tsunami, principalement en mer.

L'aspect défense, caractérisé par une vulnérabilité moyenne, comprend la gendarmerie nationale et la police nationale. La principale différence est que la première dépend du Ministère des Armées alors que la seconde dépend du Ministère de l'Intérieur. Ces deux structures ont pour mission le maintien de l'ordre et la sécurité publique, la gendarmerie se focalisant davantage dans les zones rurales et périurbaines.

Sont considérés en vulnérabilité faible les autres services déconcentrés de l'Etat. Ceux-ci n'ont pas de rôle direct sur la gestion de crise, mais ils vont jouer un rôle dans la remise en état et l'évolution du territoire. Il peut s'agir des Directions

Régionales de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DREAL), la Banque de France, ou encore la Chambre de Métiers et de l'Artisanat.

La sous-préfecture, incluse dans la partie précédente comprenant les structures locales, aurait tout aussi bien pu rentrer dans cette section. La sous-préfecture est placée sous l'autorité d'un sous-préfet, qui lui-même est le délégué du préfet à l'échelle de l'arrondissement. Elle ne joue donc pas directement un rôle lorsque le préfet prend le contrôle des opérations ; elle peut en revanche servir d'assistance. Par exemple, dans les Alpes-Maritimes, le Centre Opérationnel Départemental (COD) est localisé dans les bureaux de la préfecture, situé dans la vallée du Var à Nice. En cas de dysfonctionnement de ce dernier, le COD est déplacé à la sous-préfecture de Grasse.

En cas d'évènement plus important, l'échelon départemental ou régional n'est plus suffisant. L'échelon supérieur, la zone de défense (zone de défense sud pour les Alpes-Maritimes) peut être mobilisée. En cas d'évènement extrême ou impactant une grande partie du territoire national, l'Etat prend directement en charge la gestion de la crise, via le Ministère de l'Intérieur. L'armée peut également intervenir en cas d'évènement de grande ampleur. Lorsque les institutions de défenses (pompiers, gendarmes, police) sont dépassées, les militaires viennent en renfort. Ce fut le cas lors des inondations d'octobre 2015 où sont intervenus les Marins Pompiers de Toulon.

En cas d'évènement extrême, dans l'hypothèse où l'ensemble du pays est impacté ou l'Etat n'est pas en mesure d'intervenir par lui-même, ne dispose pas des ressources nécessaires pour le faire, une aide extérieure peut être nécessaire (de type Aide Internationale). Pour les pays de l'Union Européenne, nous pouvons supposer qu'une aide humaine, matérielle ou financière sera mise à disposition. Ce cas d'étude, un potentiel tsunami dans le bassin Ligure, peut soulever des questionnements d'aide ou d'intervention en Italie. Nous pouvons supposer que les deux pays fortement impactés ne pourront se venir en aide.

Ces questionnements nationaux et internationaux ne concernent pas cette analyse cartographique puisque nous nous focalisons uniquement sur le territoire littoral azuréen, potentiellement impacté par un tsunami. Nous en faisons état afin de marquer sa présence et son fonctionnement. En cas de reproduction de cette méthodologie à un autre territoire, il peut être nécessaire d'en tenir compte.

2.4. Les réseaux « durs » statiques, analyse des réseaux vitaux

Les réseaux vitaux sont des enjeux majeurs, non pas au moment de la catastrophe, mais dans la gestion de crise. Ils vont permettre aux territoires impactés d'être alimentés en eau, en électricité et en gaz. Si la population est privée de ces ressources, des problèmes, principalement sanitaires, peuvent apparaître. Dans ces travaux, nous avons pris le parti de les considérer comme des réseaux durs statiques d'un point de vue humain, c'est-à-dire qui ne jouent pas de rôle dans les déplacements de populations. Les réseaux de communications (téléphone, internet, etc.) sont également inclus dans cette catégorie d'enjeux.

Les flux d'énergies circulant dans ces réseaux sont importants à prendre en considération, afin de connaître les réseaux principaux et secondaires, ainsi que la

perte d'énergie en cas de rupture de l'un d'eux. La connexité des réseaux serait également un élément intéressant à étudier mais demanderait une analyse de réseaux beaucoup plus complexe, basée notamment sur la théorie des graphes. Le problème majeur de ces facteurs est qu'ils sont pour la plupart confidentiels, car ils sont gérés par des entreprises privées, rendant difficile l'accès à l'information. Nous avons donc trouvé d'autres moyens d'étudier la vulnérabilité de ces enjeux.

Ici nous ne nous ne prenons en compte que les éléments liés aux ressources en eaux et en électricité, car la BD-Topo ne permet pas d'analyser les réseaux de gaz (conduits, cuves, etc.) et de communication (antennes, etc.). Les canalisations de gaz peuvent être importantes car elles sont nécessaires au fonctionnement du territoire et, dans le cas où elles viendraient à être impactées, peuvent causer des pollutions environnementales importantes. Elles peuvent également engendrer un sur-aléa en provoquant des explosions et des incendies. Les réseaux de communications sont également importants pour maintenir le lien entre les différents acteurs de la gestion de crise, ainsi que pour les utilisateurs civils qui peuvent chercher à contacter leurs proches, les secours et pour obtenir de l'information, etc.

2.4.1. Enjeu E_9 : Les réseaux d'eaux, primordiaux au maintien sanitaire

Les ressources en eaux constituent un des enjeux cruciaux du territoire. Elles ont longtemps été source de préoccupation pour l'Homme et ont fortement influencé son installation sur un territoire. C'est pourquoi de nombreuses villes se sont développées à proximité de cours d'eau (Paris et la Seine, Rome et le Tibre, Istanbul et le détroit du Bosphore reliant la mer Noire à la mer de Marmara, etc.). Ces positionnements offraient également de potentielles liaisons fluviales et maritimes non négligeables permettant ainsi le développement de réseaux commerciaux.

L'homme a appris à retenir, canaliser et approvisionner les villes en eaux grâce à de nombreuses structures d'ingénieries telle que la construction d'aqueduc par les Romains. Il faudra attendre la fin des années 1980 pour que la quasi-totalité de la population française dispose de l'eau courante à domicile (Veolia), soit il y a seulement une quarantaine d'années. Malgré cette courte histoire, il nous apparaît aujourd'hui normal d'avoir accès à l'eau en permanence, sans aucune difficulté. On en vient à oublier la complexité d'obtenir une eau propre et potable à nos robinets, alors qu'elle doit être captée, traitée et transportée.

A cette chaîne d'action s'ajoute l'évacuation des eaux usées et leurs traitements. Lorsque tout ceci est mis en place, les problèmes sanitaires sont quasi inexistantes. A l'inverse, les pays ne disposant pas d'approvisionnement en eaux suffisants et propres peuvent rencontrer des problèmes sanitaires avec le développement de certaines maladies comme l'hépatite A, le choléra ou encore la leptospirose.

En cas d'évènement majeur engendrant un effondrement de certains réseaux, dont les réseaux d'eau, des problèmes sanitaires peuvent rapidement apparaître. Par exemple en Haïti, suite au séisme du 12 janvier 2010, des dégâts massifs au niveau des réseaux vitaux et plus particulièrement des réseaux d'eau, associé à une difficulté de réponse du gouvernement pour une remise en état rapide, ont engendré le

développement de maladie comme le choléra faisant plus de 220 morts (Le Point, 24/10/2010).

Les ressources et le traitement des eaux sont donc des points cruciaux en cas de crise car ils permettent aux populations de continuer à avoir accès à de l'eau potable même en situation dégradée. L'eau est donc un élément primordial à prendre en considération dans une analyse de vulnérabilité territoriale. Pour cela, plusieurs facteurs peuvent être utilisés : la localisation (exposition) de ces éléments, le nombre de personnes desservies ou qui en dépendent pour retrouver un fonctionnement « normal » ou encore la forme du réseau de canalisation et leur connectivité.

Ici, la vulnérabilité des ressources en eaux est réalisée à partir du type d'installation (Tableau 25). Nous avons distingué les aménagements permettant le captage d'eau, ceux permettant le stockage, et enfin les structures de gestion de l'eau. Les premiers sont principalement constitués de stations de pompage, les seconds de bassins, réservoirs et châteaux d'eau, et les derniers de stations d'épuration.

Degrés synthétiques	<i>E₉</i> , Type de structures lié aux ressources en eau
Faible	Station de pompage
Moyen	Stockage de l'eau (châteaux d'eau, bassins et réservoirs)
Fort	Gestion de l'eau (station d'épuration)

Tableau 25 : Mise en indice des réseaux d'eau

Aux ressources en eaux viennent s'ajouter les ressources d'énergies et plus particulièrement en électricité.

2.4.2. Enjeu *E₁₀*: Les réseaux électriques, essentiel à la remise en état du territoire

Un autre élément considéré comme vital pour le fonctionnement d'un territoire est l'apport d'énergie et plus particulièrement l'apport d'électricité. Dans notre société actuelle, l'énergie est devenue indispensable qu'il s'agisse de s'éclairer, se chauffer (chauffage et eau chaude) ou encore de se divertir. La survenue d'un évènement peut potentiellement endommager les réseaux et priver de courant un grand nombre d'utilisateurs.

Ce phénomène est récurrent en cas de tempête, où les réseaux sont souvent touchés et coupés. Ce fût le cas lors de la tempête Miguel qui, dans de la nuit du 7 juin 2019, a provoqué une coupure d'électricité privant 73 500 clients de courant dans le centre-ouest de la France (Europe 1, 08/06/2019). Les coupures d'électricité sont également chose courante lors d'inondations. Celles qui ont impactées les Alpes-Maritimes en octobre 2015 ont, au plus fort de la crise, privé d'électricité plus de 70 000 foyers (Le Parisien, 04/10/2015). Le rétablissement du courant n'est possible qu'après intervention d'équipes de techniciens qui doivent généralement attendre une accalmie pour intervenir.

Le maintien de ces réseaux ou du moins leur restauration rapide est un enjeu majeur. Il permet le bon fonctionnement du territoire. En cas de dysfonctionnement, les recherches effectuées par les secours peuvent être ralenties. Cela peut également poser des problèmes au niveau de la communication. Les personnes impactées, si elles ne disposent pas de smartphones chargés, de radios à piles, ne peuvent pas obtenir de l'information (les télévisions, chaînes hi-fi, ordinateurs fixes ne fonctionnant plus). Peuvent également se poser des problèmes de gestion de crise, notamment au niveau des secours et des établissements de santé. Normalement, ces structures cruciales de gestion de crise doivent avoir un fonctionnement électrique de secours de type groupe électrogène afin d'assurer leur rôle plusieurs heures voire plusieurs jours avant le rétablissement des lignes.

Comme pour les ressources en eaux, il aurait été possible d'analyser la vulnérabilité à partir des nœuds et des potentielles ruptures de réseau, du nombre de personnes desservies ou qui dépendent de ces canalisations pour retrouver un fonctionnement « normal ». Nous avons privilégié une approche à partir du type de ligne, à savoir s'il s'agit d'une ligne haute tension (63 000 et 90 000 volts) ou très haute tension (225 000 et 400 000 volts).

Les lignes hautes tensions sont considérées comme en vulnérabilité faible (Tableau 26), car il s'agit généralement de réseaux secondaires, dont le courant a déjà été transformé pour une desserte locale. Les lignes très hautes tension, quant à elles, disposent d'une vulnérabilité forte. Elles correspondent au réseau primaire, transportant le courant sur de grandes distances. Le courant transporté n'est pas utilisable tel quel ; il est nécessaire de le transformer via un transformateur pour qu'il soit utilisable dans les foyers. Un courant intermédiaire apparaît dans les données, 150 000 volts, et a été considéré en vulnérabilité moyenne. Nous l'appellerons pour cette étude haute-tension supérieure.

Degrés synthétiques	E_{10} , Puissance du réseau électrique
Faible	Haute-tension (63 000 et 90 000 volts)
Moyen	Haute-tension supérieurs (150 000 volts)
Fort	Très haute-tension (225 000 et 400 000 volts)

Tableau 26 : Mise en indice des réseaux électriques

Nous ne disposons malheureusement pas du réseau local, permettant les dessertes à l'intérieur des communes. Ce réseau, bien plus dense, aurait été intéressant à étudier afin de voir sa structure et ses potentiels points faibles. Les réseaux « durs » ne sont pas uniquement composés de réseaux statiques. Ils englobent également les réseaux « durs » dit dynamiques, qui eux correspondent aux structures permettant le déplacement des populations.

2.5. Les réseaux « durs » dynamique, éléments structurant du territoire

Tout territoire dispose d'un certain nombre de réseaux ayant chacun un rôle particulier. Les réseaux « durs » dynamiques, c'est-à-dire permettant le déplacement des populations et des marchandises, structurent le territoire. Ils sont primordiaux puisqu'ils permettent aussi bien l'évacuation des populations que l'arrivée des secours, ou l'apport de nourriture ou de ressources. Sont ainsi pris en compte les réseaux routiers, ferrés, les ports et les aéroports.

La configuration géographique du territoire azuréen, comprise entre mer et montagne, a un impact direct sur la configuration anisotropique actuelle des réseaux de communications. L'anisotropie correspond « à des formes spatiales qui se développent d'une manière axiale » (Paulet, 2000). Si l'on regarde l'ensemble du territoire méditerranéen, nous constatons que ce phénomène se retrouve tout au long de la côte. L'un des meilleurs exemples est l'autoroute reliant l'Espagne à l'Italie, avec un tracé parallèle au littoral.

Cette anisotropie s'observe sur le réseau ferré des Alpes-Maritimes avec un axe principal pour l'ensemble des lignes de trains régionaux, des trains à grande vitesse (TGV) et de fret. Cette caractéristique s'observe également sur le réseau routier, avec trois axes principaux qui permettent de relier l'est à l'ouest, l'autoroute A8, la départementale 6007 (ancienne nationale 7) qui relie Fréjus à Menton, et la route du bord de mer, la départementale D6098 qui longe le littoral de Théoule-sur-Mer à Menton. En cas d'accident sur l'un de ces trois axes principaux, le trafic est rapidement perturbé. Ces réseaux sont soumis à des embouteillages réguliers, à cause d'une saturation des axes principaux et secondaires, ainsi qu'au manque d'accès disponible. Ces structures particulières s'observent pour les réseaux terrestres et non pour les réseaux maritimes et aériens.

L'ensemble de ces éléments confère une grande fragilité au territoire car, lors d'incidents, une paralysie locale est rapidement observée et peut rapidement se propager à l'ensemble de ces réseaux. Ceci peut poser de graves problèmes en cas de catastrophe et grandement fragiliser le territoire par manque d'évacuation possible ou simplement par incapacité des secours à circuler. Provitolo (2002) souligne ce point dans sa thèse, « *L'anisotropie et la faible connexité des réseaux de communications, obstacles au franchissement nord-sud, créent et accentuent les situations de crise en cas de catastrophe.* ».

2.5.1. Enjeu E_{11} : Les réseaux routiers, axe de communication majeur

Nous nous intéressons en priorité aux axes de circulation routiers. Le littoral azuréen a la spécificité d'être composé d'un réseau anisotrope. Cette particularité a pour conséquence : des réseaux principaux organisés majoritairement parallèles au littoral, peu de connexion entre les villes, et très peu d'axes Sud-Nord, c'est-à-dire en direction de l'intérieur des terres.

L'étude des flux circulant sur ces axes semble être un élément pertinent à prendre en compte, afin de connaître le trafic en temps normal, d'évaluer quels axes sont utilisés, s'ils sont saturés, s'il y a des heures d'affluence plus importantes (qui devraient correspondre aux heures de travail). Ces informations permettraient de réaliser des scénarios de risques selon les « temporalités » de la journée, mais elles nécessitent de réaliser une analyse à une échelle fine du territoire, ce qui ne correspond pas à la démarche entreprise dans cette étude.

Ici, souhaitant proposer une méthodologie d'analyse de la vulnérabilité du territoire applicable de manière relativement simple par une collectivité, à partir de données disponibles facilement, nous nous sommes focalisée sur la hauteur de la route par rapport au sol (Tableau 27). Nous n'avons pas directement pris sa hauteur, mais le fait qu'elle soit surélevée, à ras le sol ou sous-terrain. Nous avons comparé le risque de tsunami à une inondation. Les axes surélevés, plus hauts que le sol, présentent moins de risques d'être inondés ; ils se voient attribuer une vulnérabilité faible. Ceux au niveau du sol sont caractérisés par une vulnérabilité moyenne. Et enfin, ceux en sous-terrain, donc potentiellement inondables et inutilisables, sous peine de faire des victimes.

Degrés synthétiques	<i>E₁₁</i> , Elévation des structures routières
Faible	Routes surélevées
Moyen	Routes à ras le sol
Fort	Routes sous-terraines

Tableau 27 : Mise en indice des axes de communications routiers

Ce choix de facteurs ne permet pas de tenir compte de l'aléa générateur de tsunami. Dans cette hypothèse, le tsunami serait généré par un séisme. Or, dans un scénario sismique, la classification réalisée s'inverse. Les tunnels, disposant généralement de structures robustes, ne sont pas problématiques et seraient donc considérés en vulnérabilité faible. A l'inverse, les ponts et structures surélevées sont plus fragiles et sensibles aux secousses sismiques ; ils passeraient ainsi en vulnérabilité forte.

Le réseau routier est d'une importance majeure dans l'analyse de la vulnérabilité d'un territoire. Il permet à la fois aux personnes d'évacuer et de s'éloigner de la zone « sensible » et à la fois aux secours d'intervenir et de porter secours aux victimes. Sachant que la circulation dans les Alpes-Maritimes, et plus particulièrement sur la frange littorale, est déjà compliquée en fonctionnement « normal », le maintien de son fonctionnement même dégradé est un vrai challenge. Il est alors important d'anticiper une potentielle désorganisation du territoire et imaginer en amont de potentiels itinéraires de secours pour le SDIS par exemple, ou des itinéraires de sortie de ville conseillés. Le SDIS 06 a ainsi déterminé un itinéraire prioritaire d'intervention en cas de crise majeure (identique quelle que soit la menace). Ce premier élément est le plus crucial sur le très court terme car il est utilisé pour la fuite et l'arrivée des secours pendant la crise. Par la suite, d'autres réseaux durs dynamiques s'avèrent importants à prendre en considération.

2.5.2. Enjeu E_{12} : Le réseau ferré, un réseau peu dense le long du littoral

Le réseau ferré, bien que secondaire après le réseau routier, permet aussi bien le transport de personnes que le transport de fret, important dans cette région frontalière. Il apporte une aide non négligeable sur le littoral où les réseaux routiers sont saturés en permanence, pour relier les villes comme Cannes, Antibes, Nice ou encore Monaco. Il peut s'agir d'écoliers, de travailleurs frontaliers (26 700 frontaliers allant travailler à Monaco (INSEE, 2015)), ou encore des touristes. Il peut également s'agir de trajets régionaux (en direction de Marseille) ou nationaux, Nice étant reliée au réseau TGV.

Tout comme le réseau routier, le réseau ferré est principalement orienté d'est en ouest, reliant Marseille à l'Italie en longeant l'ensemble des communes littorales. Trois lignes ont un axe nord-sud et permettent le lien entre le littoral et l'arrière-pays :

- La ligne qui monte à Grasse, sous-préfecture du département
- le train des pignes qui permet la jonction entre Digne-les-Bains et Nice et permettant de relier l'arrière-pays niçois à la ville. Il dessert un grand nombre de communes de la vallée du Var.
- la ligne transfrontalière qui permet de rejoindre Cuneo et Turin.

Cet enjeu peut être analysé à partir de nombreux facteurs : la structure du réseau, la fréquentation du réseau, l'importance (axe principal vs axe local, l'orientation des axes (nord-sud VS est-ouest), etc. Dans le cadre de cette étude, le même facteur que celui permettant l'analyse du réseau routier a été utilisé, c'est-à-dire le niveau du réseau (sous-terrain, surélevé, etc.) (Tableau 28).

Degrés synthétiques	E_{12} , Elévation des structures ferroviaires
Faible	Voies ferrées surélevées
Moyen	Voies ferrées au niveau du sol
Fort	Voies ferrées sous-terraines

Tableau 28 : Mise en indice des réseaux ferrés

La position de la voie par rapport au sol fait ressortir les sections du réseau ayant une vulnérabilité forte, avec des passages sous un tunnel ou en sous-terrain, celles dont la vulnérabilité est moyenne, c'est-à-dire les lignes au niveau du sol, et celles à vulnérabilité faible, celles surélevées et donc potentiellement hors inondation. Le réseau ferré étant un réseau unique, en cas de perturbation en un point de la ligne, c'est l'ensemble du réseau qui va s'en trouver impacté, pouvant paralyser une partie ou l'ensemble du réseau. Ce dernier a d'ailleurs été couplé plusieurs jours lors des inondations d'octobre 2015 au niveau de Cannes, paralysant une grande partie du réseau. En anticipant les potentiels points faibles et coupures du réseau, il est possible de réaliser diverses actions pour adapter le réseau, réaliser des travaux, ou encore informer les employés et les utilisateurs.

2.5.3. E₁₃ : Les ports, portes d'entrées du réseau maritime

Les ports sont un des enjeux majeurs de cette étude car ils font la jonction entre la terre et la mer. L'eau est donc en contact permanent avec ces structures. En cas de tsunami ils sont généralement les premiers impactés. Ce constat se retrouve dans l'origine même du terme japonais tsunami qui signifie « vague de port ». Le littoral azuréen étant fortement urbanisé et touristique, de nombreuses personnes y travaillent où y vivent. Les ports sont une source économique non négligeable par les emplois générés et par le prix des bateaux. Le port est un lieu de vie à part entière, une sorte de ville dans la ville avec des enjeux humains et matériels.

La problématique des ports est complexe puisque s'additionnent les personnes sur les bateaux et les personnes à quai. On pourrait supposer que seules sont vulnérables les personnes à quai et que, sur les bateaux, les personnes sont en sécurité. Or ceci ne représente pas la réalité. Dans l'hypothèse où un tsunami correspondrait uniquement à une montée des eaux cette idée serait cohérente. Or, un tsunami est à la fois une montée des eaux mais également un courant violent. C'est la combinaison de ces deux facteurs qui va être à l'origine de la mobilisation des bateaux et donc potentiellement de la création d'embâcles. En plus des dégâts matériels causés sur ces structures, celles-ci peuvent être emportées par le courant et être à leur tour détériorées ou détruire des bâtiments, des véhicules ou même impacter des personnes.

Lorsque l'eau monte suffisamment pour sortir du port, que la puissance du courant permet la rupture d'amarres, les bateaux peuvent être mobilisés et transportés par le tsunami sur plusieurs mètres, voir kilomètres. Lors du tsunami du 26 décembre 2004, la ville de Banda Aceh a été particulièrement touchée. Les embâcles ont été nombreux et des bateaux se sont retrouvés dans les terres. Un bateau (Figure 78) est devenu l'emblème et le rappel de l'évènement et surtout de sa puissance. Il s'agit d'un bateau d'une trentaine de mètres de long qui a été retrouvé à deux kilomètres du rivage. Il est actuellement toujours à l'endroit où les eaux l'ont laissé et il constitue à présent un attrait touristique.



Figure 78 : Photographie d'un bateau d'une trentaine de mètres mobilisé par les eaux lors du tsunami du 26 décembre 2004 à Banda Aceh

Sources : <http://aiwest-dr.unsyiah.ac.id/2018/field-trips/>

L'analyse de la vulnérabilité des ports est donc nécessaire et indispensable. Plusieurs facteurs d'analyse peuvent être considérés : la localisation (exposition), le type de port (touristique, marchandise, etc.), la fréquentation, le type de fréquentation (touristes, équipages, etc.), l'existence et le type de protection (digues, ports à l'intérieur des terres, etc.). L'objectif est de déterminer leur vulnérabilité et de définir s'ils peuvent potentiellement être impactés.

Pour se faire, le facteur retenu est celui relatif à la typologie des ports (Tableau 29). La vulnérabilité faible correspond au petit port de pêche ou semi-privé de petite capacité et utilisé quasi-uniquement par des locaux. Les ports de plaisance sont définis en vulnérabilité moyenne. Le niveau le plus élevé de vulnérabilité est attribué au port de plaisance dont partent des liaisons maritimes.

Degrés synthétiques	E_{13} , Typologie des ports
Faible	Petit port de pêche ou semi-privé
Moyen	Port de plaisance
Fort	Port de départ de « routes maritimes »

Tableau 29 : Mise en indice des structures portuaires

Les ports sont les premiers impactés en cas de tsunami car à la jonction entre la vie terrestre et maritime. Aux enjeux durs dynamiques déjà présentés s'ajoutent les enjeux aéroportuaires.

2.5.4. Enjeu E_{14} : Les aéroports, ouverture nationale et internationale du territoire

Aujourd'hui, les liaisons aériennes sont plus ou moins importantes selon les territoires, avec une tendance globale à l'augmentation. De plus en plus de liaisons existent, l'avion s'étant démocratisé. Il est plus facilement abordable et est parfois plus économique que d'autres moyens de transport. Les usagers tendent donc à favoriser ce mode de déplacement pour les trajets domestiques car souvent jugé plus rapide et plus économique.

Le littoral azuréen est desservi, en plus de son réseau routier, ferré et portuaire par deux aéroports : un aéroport international et un aéroport d'aviation d'affaire. Le premier, l'aéroport Nice Côte d'Azur, est le 2^{ème} aéroport français après ceux de Paris (Charles De Gaulle et Orly confondus), et l'aéroport de Cannes-Mandelieu-La-Napoule, 2^{ème} aéroport français d'aviation d'affaire.

L'aéroport Nice Côte d'Azur représente un fort enjeu humain puisqu'il regroupe un nombre important de voyageurs en transit en un lieu restreint. Pour l'année 2018, il frôle la barre de 14 millions de passagers (Rapport annuel des Aéroports de la Côte d'Azur, 2018). Il s'agit de la 8^{ème} année d'augmentation consécutive. Un projet d'agrandissement d'un des terminaux est d'ailleurs en cours, le but étant d'atteindre les 18 millions de passagers par an. Cet aéroport dispose également d'un marché d'aviation d'affaire, dénombrant 36 000 mouvements d'avions et 31 622 en Hélicoptère. Cette forte influence annuelle en fait un lieu à secourir en priorité. Le fret

n'est également pas négligeable puisque 23 400 tonnes de marchandises ont été acheminées par de longs courriers en 2018.

De par sa position particulière, construit sur la mer, il se situe partiellement en zone inondée (Laroque et al. 2012 ; Ioualalen et al. 2014). Il est directement exposé à l'aléa tsunami et a donc de fortes chances d'être impacté. L'aéroport a d'ailleurs été à l'origine d'un tsunami local, suite à l'effondrement d'une partie des travaux d'agrandissement le 16 octobre 1979 (Kelner, 2018).

Le second aéroport, uniquement concentré sur l'aviation d'affaire, se situe à Mandelieu-La-Napoule. Il enregistre 11 978 mouvements d'avions et 13 527 en hélicoptère. Plus à l'intérieur des terres, il est moins exposé aux tsunamis. Il est en revanche exposé aux inondations. Il a d'ailleurs été impacté à plusieurs reprises, le 5 novembre 1994, ou encore le 3 octobre 2015 (Département Alpes-Maritimes).

Afin d'analyser le trafic aéroportuaire, plusieurs possibilités apparaissent : l'analyser grâce à sa localisation (exposition), à sa fréquentation (nombre de passagers par jour, par moi, par an, etc.) ou sa nature. C'est cette dernière option qui a été retenue (Tableau 30). Nous distinguons ainsi les héliports, qui sont des structures petites et qui ne demandent pas beaucoup de place pour atterrir ou décoller, les aéroports et les aéroports internationaux. Sont respectivement associées les valeurs de vulnérabilités faible, moyenne et forte.

Degrés synthétiques	E ₁₄ , Réseaux vitaux
Faible	Héliports
Moyen	Aéroport
Fort	Aéroport International

Tableau 30 : Mise en indice des structures aéroportuaire

L'objectif de l'analyse de cet enjeu est de les faire ressortir sur le territoire et de les caractériser afin de savoir s'ils sont potentiellement impactés, s'il faut potentiellement les évacuer ou au contraire s'ils peuvent servir pour évacuer et/ou déplacer les victimes, servir d'approvisionnement, etc.

Les réseaux « durs » dynamiques sont des réseaux et des structures clés du territoire puisqu'ils permettent aussi bien aux personnes d'évacuer les lieux et sont nécessaires aux secours et à la gestion de crise. Il peut s'agir de l'accès direct des secours, l'arrivée de produits de premières nécessités (nourriture, eau, médicaments, etc.) ou l'évacuation des blessés, des gravats, ou autres. Une dernière catégorie d'enjeux majeurs est développée, celle concernant les attraits touristiques côtiers.

2.6. Les attraits touristiques côtiers, fortement exposés au risque de tsunami

L'extrémité sud du département des Alpes-Maritimes a vu se développer au fil des décennies un tourisme balnéaire. Depuis un peu moins d'un siècle, les français et les étrangers ont peu à peu découvert la French Riviera et en ont fait une des destinations principales de leurs vacances estivales. Le doux climat et la proximité de

la mer ont favorisé sa mise en valeur. De nombreuses activités touristiques ont donc fait leur apparition. Le littoral s'est développé selon cette logique touristique et surtout selon cette géographie particulière. La forte population présente de juin à septembre pose de nombreux problèmes au niveau du fonctionnement « normal » du territoire ou de la gestion des risques naturels. Il peut s'agir de problèmes de circulation, les réseaux étant déjà saturés le reste de l'année, posant des problèmes en cas d'évacuation ou d'intervention des secours.

Cette forte attractivité engendre une forte concentration de personnes dans des endroits restreints comme les plages ou les centres villes. En cas d'évènement majeur, les gens pourraient avoir des difficultés à évacuer et des mouvements de panique pourraient être générés. L'attentat du 14 juillet 2016 à Nice, a justement été perpétré un jour d'été, dans une zone à forte concentration humaine. Cet évènement a fortement marqué les esprits jusqu'à occasionner des mouvements de panique encore aujourd'hui. Le soir d'un des matchs de la coupe du monde de 2018, l'explosion d'un pétard cours Saleya à Nice (rue piétonne dans la vieille ville) et généré un mouvement de panique faisant plusieurs blessés.

Un des autres problèmes liés à la forte fréquentation touristique pouvant être soulevé est la forte présence de personnes disposant de peu de connaissance des lieux, du territoire et des risques qui le composent. Une population n'ayant ni la connaissance (information et formation) des risques encourus, ni la connaissance du territoire lui permettant de se protéger et faire face à des évènements comme des séismes ou des tsunamis, sera davantage vulnérable aux dangers. Se posent également des problèmes en cas d'évacuation, car les gens ne savent pas forcément où aller pour se mettre en sécurité.

La Côte d'Azur est un espace fortement touristique tout au long de l'année. Il est donc important de prendre en considération cette population temporaire mais importante dans l'analyse de vulnérabilité du territoire. Cette section doit être adaptée en fonction des particularités du territoire pour une prise en considération d'un maximum d'enjeux humains et doit tenir compte de l'origine de la menace. Ici une focalisation est faite sur les bords de mer car l'analyse porte sur l'arrivée d'un potentiel tsunami.

Le littoral azuréen, densément peuplé et urbanisé, est un véritable lieu de vie que ce soit pour les locaux ou les touristes. Les éléments pris en considération dans cette réflexion sont localisés principalement à la jonction entre la mer et la terre, comme les plages, les promenades de bord de mer (la Croisette ou la Promenade des Anglais), les sentiers littoraux. Sont également intégrés les centres-villes, souvent piétons et densément fréquentés, ainsi que les campings, lieux de vie vulnérables de par le « type de logement » (tentes, mobil-homes, etc.). Certains d'entre eux sont vulnérables de par leur localisation, puisqu'ils seront les premiers impactés, mais pas uniquement. Nous avons tenté de déterminer des facteurs d'analyse différents de la simple localisation par rapport à l'exposition.

2.6.1. Enjeu E_{15} : Les plages, à la jonction terre-mer

Les Alpes-Maritimes, département du sud-est de la France est reconnu pour ses températures clémentes en toutes saisons. Il attire de nombreux touristes venus profiter de ce climat méditerranéen. Sa localisation en bordure de mer est un atout supplémentaire, véritable attrait touristique. C'est donc tout naturellement que les locaux et les touristes profitent de la proximité de la mer pour envahir les plages. Bien que principalement occupées l'été, elles sont de plus en plus fréquentées en hiver.

Les plages sont primordiales à prendre en considération puisqu'elles sont à l'interface même entre la terre et la mer, à l'endroit exact de la zone d'impact d'un potentiel tsunami. Qu'il s'agisse d'un tsunami de faible ampleur (quelques centimètres) ou d'un tsunami exceptionnel (plusieurs mètres de haut), les plages seront les premières impactées. Il est important de souligner le fait que quelques dizaines de centimètres de haut sont suffisant à générer de nombreux dégâts.

Les plages sont présentes sur la plus grande partie du littoral azuréen, à l'exception des zones où la topographie n'est pas adaptée (falaises, rochers, etc.). Elles peuvent être de tailles variables, de grandes plages de plusieurs kilomètres de long comme le long de la Promenade des Anglais, ou des criques de quelques centaines de mètres carrés comme celles de l'Esterel. C'est justement ce facteur qui va servir de référence pour déterminer la vulnérabilité des plages du littoral des Alpes-Maritimes (Tableau 31).

Degrés synthétiques	E_{15} , Superficie de la plage
Faible	< 10 000 m ²
Moyen	[10 000 ; 40 000] m ²
Fort	> 40 000 m ²

Tableau 31 : Mise en indice des superficies de plages

Pour ce faire, nous avons calculé la superficie des polygones fournis par la BD-Topo 2019. Les valeurs obtenues s'étendent de quelques dizaines à une centaine de milliers de mètres carrés. Des erreurs peuvent toutefois apparaître, les polygones pouvant avoir une forme légèrement différente de leur forme réelle. Les ordres de grandeur des superficies restent toutefois cohérents. Une grande variabilité de superficie des plages s'observe donc le long du littoral.

Les résultats obtenus ont ensuite été classés en 3 catégories. La première catégorie (superficie inférieure à dix mille mètres carrés) correspond principalement aux petites criques, proches d'espaces naturels (dans l'Esterel et les caps). Pour comparaison, un terrain de foot est de l'ordre de sept mille mètres carrés. Le degré fort, ayant pour seuil supérieur quarante mille mètres carrés, fait ressortir les plages présentes le long des baies ouvertes (Baies des Anges, Cannes, Menton). Le niveau intermédiaire comprend ainsi les plages plus importantes que des criques, mais plus petites que celles des grandes baies.

Ce facteur permet indirectement de prendre en compte le nombre de personnes exposées, car plus une plage est grande plus elle est en mesure d'accueillir une forte densité d'utilisateurs. Plus une plage est fréquentée plus les victimes potentielles d'un

tsunami vont être importantes. L'évacuation peut également devenir problématique, posant des questions quant aux accès (souvent les plages sont en contre bas d'une promenade avec un accès par escaliers), pouvant générer des mouvements de foules et de panique (Provitolo, 2005).

D'autres facteurs auraient pu être retenus pour analyser la vulnérabilité des plages. Nous aurions tout aussi bien pu utiliser les courants, les hauteurs d'inondation ou encore les intensités déterminés précédemment dans ce manuscrit, afin de faire ressortir les espaces où le courant et la hauteur d'inondation sont les plus importants et donc les espaces les plus sensibles pour la population. La fréquentation des plages aurait tout aussi bien pu être prise en considération afin de faire ressortir les périodes de fortes fréquentations (situées en juillet-août) et les périodes de fréquentation moins importantes.

Plusieurs actions de comptage ont été réalisées, principalement pour la ville de Nice, afin de faire ressortir les périodes de fréquentation maximale et le nombre de personnes présentes. La première, réalisée en 2014 par la ville de Nice, fait ressortir les 15 juillet comme étant la journée la plus fréquentée de l'année (Foussekis, 2019). La seconde, une campagne aérienne, a été réalisée dans le cadre du projet Com2SiCa. Elle avait pour objectif d'évaluer la fréquentation et la répartition des populations le long des plages niçoises. En plus d'une variation saisonnière, une variation horaire s'observe. Outre la différence importante entre le jour et la nuit, d'autres existent au cours de la journée, entre le matin et l'après-midi, aux périodes d'ensoleillement maximales (entre 12h et 16h).

Le type de fréquentation serait également intéressant à prendre en compte. Certaines de ces plages sont davantage fréquentées par des familles, donc avec des enfants, par des personnes âgées dont la mobilité peut être réduite, d'autres sont plus touristiques. Les problématiques rencontrées ne sont alors pas les mêmes. Les personnes d'un certain âge peuvent avoir un temps de compréhension et de réaction plus important et leur déplacement peut être difficile. Les familles peuvent être vulnérables puisqu'en cas d'évacuation, avec la volonté d'assurer la mise en sécurité de ses proches avant la sienne. Cette problématique se retrouve également avec les groupes.

Ayant pris le parti de réaliser cette analyse de vulnérabilité territoriale uniquement avec les données disponibles dans la BD-Topo, ce facteur n'a pas été retenu. Ceci pourra toutefois être le cas dans une prochaine étude.

2.6.2. Enjeu E_{16} : Les promenades et sentiers de bord de mer

Les promenades de bords de mer sont monnaies courantes le long du littoral azuréen. Ces espaces, tout comme les plages, sont envahis l'été, et restent occupés par la population locale en période creuse (d'octobre à mars). Il y a une vraie appropriation du littoral par les populations locales et par les touristes. Nous distinguons ici deux types de promenades de bord de mer, celles qui longent la côte urbanisée, les axes de communications et les plages, et celles qui correspondent aux sentiers littoraux, faisant le tour des caps et des espaces plus « sauvages ».

Les deux sont vulnérables de par leur localisation, à la frontière entre la mer et la terre, et par leur fréquentation. Ici, la vulnérabilité a été définie à partir du type de structures (Tableau 32). Les promenades urbanisées, généralement surélevées par rapport au niveau de la mer, longent généralement un axe routier. Celui-ci peut être de deux types, soit à voies doubles (voir plus) comme la Promenade des Anglais à Nice ou la Croisette à Cannes, soit à voies simples, généralement compris entre la mer d'un côté et la voie ferrée de l'autre. Les premiers, permettant une évacuation vers l'intérieur des terres, sont considérés en vulnérabilité faible ; les seconds, posant des problèmes d'évacuation sont caractérisés par une vulnérabilité moyenne.

Degrés synthétiques	<i>E</i> ₁₆ , Type de promenade et de sentier
Faible	Routes à deux voies
Moyen	Routes à une voie
Fort	Piste cyclable - sentier

Tableau 32 : Mise en indice des promenades et balades

Les sentiers littoraux, quant à deux, disposent d'une vulnérabilité forte. Ils sont en effet situés à la frontières terre-mer et donc directement exposés en cas de tsunami. Une grande partie de ces derniers est d'ailleurs régulièrement fermée lors de coups de mer, faisant ressortir leur dangerosité potentielle. De plus, bien que balisés et entretenus, ils peuvent s'avérer difficiles d'évacuation et d'accès pour les secours.

2.6.3. Enjeu *E*₁₇ : Les centres-villes

Plusieurs communes littorales disposent de centres-villes historiques. Ceux-ci étaient et sont encore aujourd'hui le cœur de la ville, regroupant des commerces, des lieux administratifs et culturels. Bien que n'étant pas uniquement à vocation touristique, il nous est apparu pertinent d'inclure ces derniers dans les enjeux touristiques. Ces centres, souvent piétons, sont généralement fortement fréquentés car ils constituent un véritable lieu de vie pour les locaux mais également pour les touristes. Le fait qu'ils soient majoritairement piétons peut engendrer des problèmes d'évacuation ou d'arrivée des secours. Nous pouvons également supposer que les centres anciens sont plus susceptibles d'être impactés par le séisme générateur du tsunami, les nouveaux bâtiments et quartiers étant normalement construits selon des normes parasismiques.

Ces centres-villes auraient pu être analysés à partir de leur fréquentation, de leur superficie, s'ils sont piétons ou non, s'ils regroupent à la fois des commerces, des administrations et des lieux de vie (type restaurants, bars, etc.). Ici nous les avons étudiés selon leur localisation couplée au fait qu'il s'agissait de centres anciens ou relativement nouveaux (Tableau 33).

Degrés synthétiques	<i>E</i> ₁₇ , Eloignement du bord de mer et ancienneté construction
Faible	Eloigné du bord de mer
Moyen	En bord de mer et centre « nouveau »
Fort	En bord de mer et centre ancien

Tableau 33 : Mise en indice des centres-villes

La vulnérabilité faible concerne les centres-villes ou les villages éloignés du bord de mer, donc non directement impactés par un évènement venant de la mer. La vulnérabilité moyenne définit les centres-villes nouveaux situés en bord de mer. Et enfin la vulnérabilité forte a été attribuée aux villages ou centres anciens situés au bord de mer. La différence entre les centres « anciens » et « récents » est que les premiers se focalisent sur les centres historiques, majoritairement piétons, qui en cas de tsunami de source sismique peuvent être affectés par de nombreux dégâts, limitant l'évacuation via ces centres.

Ne pouvant réaliser une étude précise de la structure du bâti et de la résistance des bâtiments en cas de séisme précédent le tsunami, il nous est apparu astucieux d'intégrer la faiblesse du bâti des centres-villes. Une études structurelle et architecturale pourrait être réalisée lors d'une autre étude afin d'intégrer ce type d'analyse.

2.6.4. Enjeu E_{18} : Les campings

En dehors des espaces touristiques classiques peuvent également être pris en compte d'autres espaces comme les campings. Véritables lieux de vie et petites villes, ils regroupent grands nombres de touristes français et étrangers dans un espace réduit. Ils sont également vulnérables de par leur faiblesse structurelle puisqu'il s'agit de tentes, de mobil-homes, de petits chalets et très peu de constructions sont en « dur ». En cas d'évènement majeur les personnes présentes peuvent avoir des difficultés à trouver un abri.

Lors des inondations d'octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes, plusieurs campings ont été sévèrement touchés par les eaux. Cet évènement est venu démontrer la fragilité de ces structures, parfois emportées par les eaux (Figure 79). Ces espaces sont également vulnérables par la population qui les fréquente, souvent des familles avec des enfants et des retraités. Certaines personnes vivent même plusieurs mois ou à l'année dans des campings.



Figure 79 : Dégâts occasionnés dans l'un des campings suite aux inondations meurtrières du 3 octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes
(Source Nice-Matin)

L'analyse de la vulnérabilité de ces campings aurait pu se faire via différents facteurs comme la fréquentation, le type de fréquentation (familles, personnes âgées), la localisation, etc. Ici, ils sont analysés à partir de leur superficie (Tableau 34). Tout comme les plages, nous partons du postulat que plus un camping est grand plus sa capacité d'accueil est importante et donc plus la quantité de personnes potentiellement impactées est grande.

Degrés synthétiques	E ₁₈ , Superficie
Faible	< 10 000 m ²
Moyen	[10 000 ; 100 000]
Fort	> 100 000 m ²

Tableau 34 : Mise en indice des campings

Il apparaît difficile de trouver des informations quant à la superficie des campings. La donnée généralement utilisée est le nombre d'emplacements, sans spécification particulière sur le type d'emplacement c'est-à-dire de tente, de camping-car ou encore de mobil-home. La moyenne nationale était en 2016 de 90 emplacements par camping (INSEE,2016) et un emplacement fait entre 70 et 80 mètres carrés (Economie.gouv.fr) ; nous prendrons donc une moyenne de 75 mètres carrés.

Rien qu'avec les emplacements, la superficie moyenne serait donc de 6 750 mètres carrés, sans tenir compte des lieux communs (restaurants, piscines, etc.). Nous arrondissons donc cette valeur à dix mille mètres carrés. Les campings dont la superficie est en dessous de ce seuil sont considérés en vulnérabilité faible. Le seuil supérieur, fixé à 100 000 mètres carrés, permet de faire ressortir les campings dont l'emprise spatiale est suffisamment importante pour ressortir clairement.

Afin d'étudier l'ensemble de la fréquentation touristique il aurait également été intéressant de prendre en compte ceux qui logent dans des structures différentes (hôtels, appartements, etc.). Celles-ci apparaissent toutefois moins vulnérables car il s'agit de bâtiments à structure résistante pouvant servir d'abris potentiels.

L'analyse de la vulnérabilité de ces éléments touristiques a été pensée en relation avec l'aléa étudié, ici le tsunami, c'est-à-dire que le choix des éléments touristiques aurait été différent si l'on s'était par exemple intéressé aux avalanches. De manière générale il est préférable lors d'une analyse de vulnérabilité d'arriver à s'extraire complètement de l'aléa. Or, dans ce cas précis, nous cherchons à connaître les points sensibles touristiques du territoire potentiellement exposés.

Cela permet par exemple aux secours de prévoir en amont si la zone apparaît comme une zone sensible et donc une zone où focaliser les secours. Il est vrai qu'il aurait été judicieux d'analyser la fréquentation de ces espaces afin de chercher l'existence des variations notables entre l'été (période touristique) et l'hiver (période légèrement plus creuse d'un point de vue de la fréquentation touristique) ainsi que la présence de pics de fréquentation.

2.7. Réalisation d'un tableau synthétique

Cette analyse de vulnérabilité porte donc sur 18 enjeux majeurs que sont : la densité de population, les zones d'habitation, les ERP à public sensible, les ERP de santé, les ERP potentiellement utilisables comme zone refuge, les pompiers, les structures décisionnelles et de défenses communales et locales, les structures décisionnelles et de défenses départementales et régionales, les réseaux d'eaux, les réseaux électriques, les réseaux routiers, les réseaux ferrés, les ports, les aéroports, les plages, les promenades de bord de mer, les centres-villes et les campings. Le tableau ci-dessous (Tableau 35) est une synthèse de ces enjeux, de leur facteur et de leur mise en indice.

La vulnérabilité territoriale s'intéresse au territoire dans son ensemble. Faisant autant que possible abstraction de l'aléa, elle ne se focalise que sur les enjeux majeurs, c'est-à-dire les enjeux qui peuvent en cas de dysfonctionnement propager leur vulnérabilité à l'ensemble du territoire et ainsi le fragiliser davantage et en profondeur. Ce chapitre méthodologique reprend chaque enjeu majeur précédemment déterminé et propose pour chacun une mise en indice. Celle-ci passe principalement par l'utilisation de données qualitatives classées en trois niveaux de vulnérabilité : faible, moyen et fort. Ces enjeux majeurs déterminés, l'étape suivante consisterait à croiser l'ensemble de ces derniers afin d'obtenir une seule et unique valeur caractérisant la vulnérabilité territoriale.

Enjeux E_i	Facteurs	Degrés synthétiques		
		Faible (1)	Moyen (2)	Fort (3)
E_1	Densité de population	< 1000 hab/km ²	[1000 ; 3500] hab/km ²	> 3500 hab/km ²
E_2	Zone d'habitation	Hors zone d'habitation	Zone d'habitation	Centre-ville / village
E_3	ERP à public sensible	Lycées	Collège, établissements à section spécialisées, foyers d'accueil médicalisé, maison de santé pour maladies mentales	Ecoles primaires, maisons de retraite
E_4	Santé	Etablissement de réadaptation fonctionnelle	Hôpitaux spécialisés	Hôpitaux et cliniques (dont CHU)
E_5	ERP potentiellement utilisable comme zone refuge	Office du tourisme	Musée	Centres commerciaux et zones commerciales
E_6	Pompier	Forestier sapeur	Centres de 1 ^{ère} intervention et centre de secours	SDIS, Centre de secours principaux, centre d'incendie et de secours
E_7	Structures décisionnelles et de défense communales et locales	/	Structures de défenses (police municipale)	Structures décisionnelles locales (Mairies, sous-préfecture, siège d'EPCI et capitainerie)
E_8	Structures décisionnelles et de défense	(autres) services déconcentré de l'Etat	Structures de défenses (police)	Structures décisionnelles

	départementales et régionales		nationale et gendarmerie)	départementales et régionales (Préfectures, Hôtel de département) et structures d'observation de la mer (sémaphores)
<i>E₉</i>	Réseau d'eau	Station de pompage	Stockage de l'eau (château d'eau, bassin et réservoir)	Gestion de l'eau (station d'épuration)
<i>E₁₀</i>	Réseau électrique	Ligne haute-tension	Ligne haute-tension supérieur	Ligne très haute-tension
<i>E₁₁</i>	Réseau routier	Routes surélevées	Routes au niveau du sol	Routes sous-terraines
<i>E₁₂</i>	Réseau ferré	Voies ferrées surélevées	Voies ferrées au niveau du sol	Voies ferrées sous-terraines
<i>E₁₃</i>	Ports	Petits ports de pêche ou semi-privé	Port de plaisance	Port de départ de « routes maritimes »
<i>E₁₄</i>	Aéroports	Héliports	Aéroports	Aéroport international
<i>E₁₅</i>	Plages	Superficie < 10 000 m ²	Superficie [10 000 ; 40 000] m ²	Superficie > 40 000 m ²
<i>E₁₆</i>	Promenades et sentiers de bord de mer	Routes à deux voies	Routes à une voie	Pistes cyclables - sentiers
<i>E₁₇</i>	Centres-villes	Eloigné du bord de mer	En bord de mer avec un centre « nouveau »	En bord de mer avec un centre « ancien »
<i>E₁₈</i>	Camping	Superficie < 10 000 m ²	Superficie [10 000 ; 100 000] m ²	Superficie > 100 000 m ²

Tableau 35 : Tableau synthétique de la mise en indice des différents enjeux *E_i*.

3. Comment obtenir une cartographie de la vulnérabilité territoriale à partir des enjeux majeurs ?

La réalisation d'une étude de vulnérabilité territoriale passe par plusieurs étapes. Il convient tout d'abord de déterminer les enjeux majeurs, d'identifier des facteurs d'analyse, puis de les transformer en « *degrés synthétiques* ». Ils se retrouvent alors dotés d'un indice de vulnérabilité faible, moyen ou fort, chacun correspondant à une valeur numérique (respectivement 1, 2 et 3). L'objectif est l'obtention d'une seule couche de vulnérabilité, à son tour défini en trois niveaux. Une synthèse des vulnérabilités des enjeux est alors réalisée par croisement des différentes classes d'indices suivant l'Équation 9 en un point donné pour *n* enjeux :

$$V_T = (V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n)$$

Équation 9 : Calcul de la vulnérabilité territoriale totale

L'outil "Agréger" d'ArcGis a permis d'établir cette combinaison afin d'obtenir une seule et unique couche représentant l'ensemble des enjeux majeurs du territoire azuréen. Il a ensuite été possible d'additionner l'ensemble des valeurs pour déterminer une valeur de vulnérabilité totale pour chaque entité (polygone) créée.

Soulignons ici qu'aucune pondération n'est appliquée. Théoriquement, l'ensemble des enjeux dispose de poids différents, provoquant une variation de la somme finale obtenue. N'étant pas en mesure de déterminer de coefficient de pondération, nous prenons comme hypothèse que, s'agissant d'enjeux majeurs, ils disposent tous du même poids quant à leur potentiel transfert de vulnérabilité au territoire en cas de dysfonctionnement.

Sont ainsi obtenues de nombreuses valeurs de vulnérabilité totale, qui ont été reclassées afin de passer de valeurs quantitatives à des valeurs qualitatives identiques aux précédentes, c'est-à-dire en trois niveaux de vulnérabilité : faible, moyen et fort (Tableau 36). Les valeurs théoriques obtenues sont comprises entre 0 et $3n$, n étant le nombre d'enjeux déterminés (ici 18), et trois le niveau d'indice maximum. Le maximum théorique est donc de trois fois le nombre d'indices total (ici 54).

Somme V_{ti}	Indice de vulnérabilité
[0 ; a]	Faible
[a+1 ; b]	Moyen
[b+1 ; V_{max}]	Fort

Tableau 36 : Mise en indice de vulnérabilité totale

La détermination des bornes intermédiaires est déterminée de manière linéaire et homogène. Considérant la valeur maximale V_{max} obtenue grâce au croisement V_T , nous considérons comme limite maximale de la première borne un tiers de cette valeur, soit $a = \frac{V_{max}}{3}$. La seconde comprend les valeurs incluses entre $a + 1$ et $b = \frac{2 \times V_{max}}{3}$, c'est-à-dire deux tiers.

V_{max} peut être identique à $3n$ dans l'hypothèse où une zone comprend l'ensemble des enjeux sélectionnés. Ce cas de figure reste toutefois peu probable car, par exemple, peu d'espaces combinent à la fois des hôpitaux, des écoles et des routes. Ceci peut cependant être envisageable dans une ville développée en hauteur, comme New-York par exemple, mais a peu de chance de s'appliquer sur les littoraux méditerranéens. Cette possibilité doit cependant être prise en considération.

4. Conclusion

Ici ont été détaillés l'ensemble des enjeux majeurs permettant d'estimer la vulnérabilité. Chacun a été caractérisé par un facteur d'analyse qui permet de le caractériser par un niveau d'indice faible, moyen ou fort. Les enjeux étudiés ont été déterminés (Chapitre 10) comme étant des enjeux majeurs, nécessaires au fonctionnement du territoire et/ou des enjeux sensibles à protoger (populations, acteurs de la gestion de crise, etc.).

Une méthodologie a été proposée afin de les associer pour obtenir la vulnérabilité territoriale d'un territoire. Celle-ci est mise en application dans le chapitre suivant (Chapitre 12). Il permet ainsi l'obtention d'une cartographie de la vulnérabilité territoriale, également présentée dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE 12 : CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE TERRITORIALE DES COMMUNES LITTORALES DES ALPES-MARITIMES EXPOSEES AU RISQUE DE TSUNAMI

Les chapitres précédents ([Chapitres 10 et 11](#)) étaient focalisés sur la définition des enjeux, des enjeux majeurs et de la vulnérabilité territoriale. Une méthodologie a été proposée afin d'analyser les enjeux majeurs d'un territoire afin d'obtenir une analyse de la vulnérabilité territoriale. Bien que se voulant générique, cette méthodologie a été conçue spécifiquement pour un espace précis, le littoral azuréen, soumis à un aléa particulier, le tsunami. Ce chapitre se concentre sur les résultats obtenus suite à l'application de cette méthodologie.

La cartographie de la vulnérabilité de chaque enjeu mis sous forme indicielle n'est pas présentée ici. Ayant sélectionné 18 enjeux, une présentation individuelle de tous ces enjeux ne semble pas pertinente. Quelques-uns ont été sélectionnés et vont être présentés plus en détail. Les autres cartes sont disponibles en annexes ([Annexe 7](#)). La cartographie de la vulnérabilité territoriale du littoral azuréen est ensuite présentée. Celle-ci a été réalisée grâce à l'application de la méthodologie présentée dans le chapitre précédent ([Chapitre 11](#)).

1. [Présentation de la cartographie de quelques enjeux](#)

Cette partie présente la mise en application de la méthodologie d'analyse des enjeux le long du littoral azuréen. Elle se focalise sur la présentation de la cartographie obtenue suite à l'analyse de ces enjeux majeurs. Chacun d'entre eux est ainsi représenté graphiquement le long du littoral azuréen. L'analyse a été réalisée grâce aux données de la BD-Topo.

Le parti a été pris de ne pas détailler l'ensemble des dix-huit enjeux majeurs identifiés, mais de n'en présenter qu'un échantillon. Le choix s'est porté sur deux éléments indispensables de la gestion de crise : les **établissements hospitaliers** et les **pompiers**. Le choix de ce dernier a été appuyé par le fait que le SDIS 06 soit le partenaire socio-économique de cette thèse. Deux autres enjeux ont été sélectionnés pour leur forte exposition aux tsunamis : les **ports** et les **plages**.

1.1. [Enjeu E₄ : Cartographie des établissements de santé](#)

Les établissements de santé, classés parmi les ERP, sont des points cruciaux du territoire qui présente une double vulnérabilité. Une vulnérabilité intrinsèque, liée au bâtiment en tant que tel, au public qu'il accueille, et une vulnérabilité liée à sa fonction. En cas de disfonctionnement, ces établissements vont fragiliser l'ensemble du territoire et poser de sérieux problèmes de gestion de crise.

Pour mémoire, la vulnérabilité des établissements de santé est étudiée à partir de la catégorie de ceux-ci (établissements de rééducation, CHU, etc.). Dans cette

analyse, leur représentation est surfacique, c'est-à-dire qu'est intégrée l'emprise spatiale au sol du bâtiment. Or, pour une raison de représentation graphique et d'échelle, ils sont représentés ici sous forme ponctuelle pour plus de clarté

Les hôpitaux sont inégalement répartis sur le territoire azuréen. Les villes principales comme Nice, Cannes et Antibes sont celles qui en possèdent le plus. L'importance du nombre de centres hospitaliers est principalement due au fait qu'une grande part de la population est composée de personnes âgées (Mouroux et coll., 2004).

L'analyse de la vulnérabilité des centres hospitaliers a été réalisée selon le type d'établissement de santé (Figure 80). Les vulnérabilités faibles concernent les centres de réadaptation, c'est-à-dire les établissements qui accueillent des patients nécessitant de la rééducation suite à une hospitalisation. Ils n'ont pas un rôle vital car ne permettent pas le traitement de soins lourds. Ils peuvent toutefois permettre de prendre en charge les blessés légers en cas de crise. Ils se situent principalement dans les communes littorales à l'ouest du département, à Cannes, Antibes, Cagnes-sur-Mer, Saint-Laurent-du-Var et Nice. Les communes littorales à l'est du département semblent en être dépourvues.

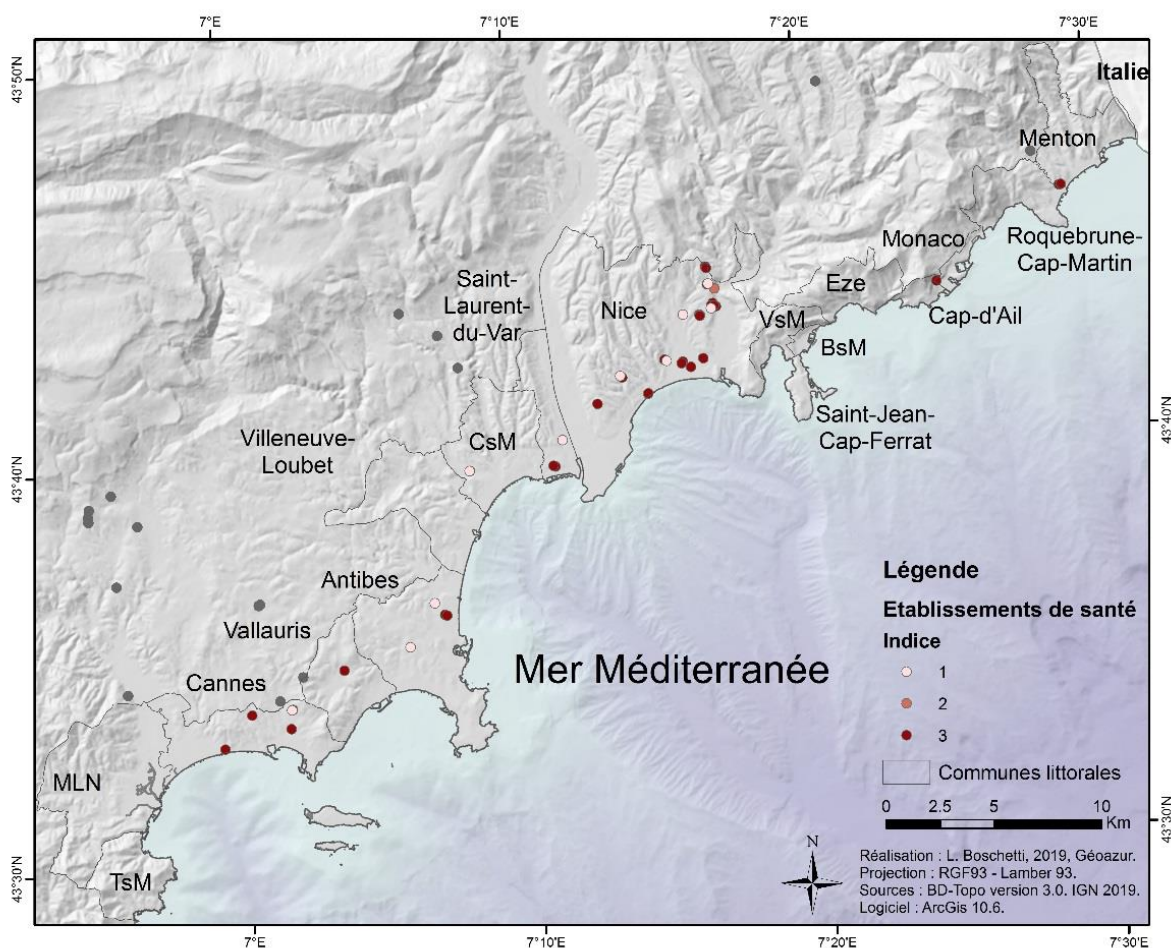


Figure 80 : Cartographie de la vulnérabilité du territoire en fonction des ERP étant des établissements de santé.

La vulnérabilité moyenne des établissements de santé est représentée par les hôpitaux spécialisés, c'est-à-dire les hôpitaux psychiatriques. Au sein du département, une seule de ces structures existe. Elle se situe au nord de la commune de Nice. Elle

n'est donc pas exposée au risque de tsunami. Cet hôpital se situe en revanche sur les bords du Paillon, fleuve qui se jette à Nice et qui a, par le passé, connu des inondations comme lors de la crue du 6 novembre 2000. Ces structures, qui accueillent des patients aux pathologies particulières, sont principalement vulnérables, tant par le public qu'elles prennent en charge, que par leur rôle potentiel dans la gestion de crise. Elles peuvent potentiellement servir de structures d'accueil de blessés légers.

Les hôpitaux et cliniques sont quant à eux caractérisés en vulnérabilité forte. Certaines communes en sont complètement dépourvues. L'extrémité ouest du département ne dispose pas d'établissements hospitaliers avant Cannes. Villeneuve-Loubet ne dispose pas non plus de ce type de structure, mais les communes limitrophes oui. Les communes situées entre Nice et Monaco ne disposent pas d'hôpitaux. En cas d'évènement, les personnes situées à Villefranche-sur-Mer, Saint-Jean-Cap-Ferrat, Beaulieu-sur-Mer, Eze et Cap-D'Ail doivent se rendre, soit à Nice, soit à Monaco pour être soignées. Roquebrune-Cap-Martin n'a pas non plus sur son territoire communale d'hôpital. En revanche, celui de Menton, est à la limite communale entre ces deux villes, ce qui permet un accès rapide aux soins. Il existe donc une sorte de vide hospitalier dans certaines zones, pouvant rendre complexe l'accès des blessés à une structure.

Certaines communes disposent à l'inverse de nombreux établissements hospitaliers. C'est le cas de Cannes et Nice. Nice représente la plus grande concentration de structures de ce type. La ville dispose d'ailleurs d'un Centre Hospitalier Universitaire (CHU) réparti sur les hôpitaux de L'Archet, Pasteur (au bord du paillon mais sur les hauteurs), Cimiez, Saint-Roch et Lerval. Tous sont suffisamment éloignés du littoral pour ne pas être impactés par un potentiel tsunami, à l'exception de l'hôpital Lanval. Ce dernier est situé sur la Promenade des Anglais, donc à proximité immédiate de l'impact. Ce centre hospitalier est important puisqu'il traite essentiellement des enfants. Il s'agit donc d'une population particulièrement vulnérable, qui le devient encore davantage par le fait qu'ils soient malades. Il est donc important que les acteurs locaux aient conscience de ce point sensible du territoire.

Voici un premier exemple d'analyse cartographique de la vulnérabilité d'un enjeu majeur, celui des établissements hospitaliers. Est à présent détaillé l'enjeu lié aux pompiers.

1.2. Enjeu E₆: cartographie des services départementaux d'incendie et de secours

Les réseaux « soft » correspondent aux réseaux d'acteurs ayant un rôle dans la gestion de crise. Ne pouvant représenter ce réseau immatériel cartographiquement, chaque enjeu que comprend cette famille d'enjeux est représenté par les structures qui les abritent. Sont ainsi considérés comme enjeux majeurs les services départementaux d'incendie et de secours, les structures décisionnelles et de défense communales et locales, et celles départementales et régionales. Ici, une focalisation est faite uniquement sur les services départementaux d'incendie et de secours, c'est-à-dire les pompiers.

En plus d'être un enjeu stratégique indispensable à la gestion de crise, l'analyse des casernes de pompier nous est apparue pertinente puisque le SDIS 06 est le partenaire socio-économique de cette thèse.

Les pompiers représentent un enjeu majeur puisqu'ils sont généralement les premiers à intervenir pour porter secours et aider la mise à l'abri de la population. Dans le cadre de cette analyse, ces derniers sont étudiés à partir d'une classification réalisée selon leur importance en cas d'évènement majeur (hors incendie), notamment au niveau de leur capacité d'action. De la même manière que pour les établissements de santé, une représentation surfacique des résultats n'est pas pertinente, les cartographies présentées utilisent une représentation ponctuelle.

Pour une grande partie des analyses, les enjeux sont analysés dans la zone d'étude, c'est-à-dire les communes du littoral directement impactées en cas de tsunami. Ici, est apparue pertinent d'inclure les casernes des communes à proximité, qui pourraient apporter un renfort. Bien que les limites communales soient représentées, une symbologie différente a été attribuée : les casernes présentes sur les communes littorales sont représentées par des cercles, alors que celles situées en dehors sont symbolisées par des losanges de plus petites tailles. Le code couleur est en revanche conservé.

La quasi-totalité des casernes du littoral (Figure 81) sont des centres de secours principaux et sont donc caractérisés par une vulnérabilité forte car ils sont primordiaux à la gestion de crise et au secours des populations. Ils contiennent davantage d'engins et de personnels, ce qui signifie qu'en cas de disfonctionnement ils augmentent la vulnérabilité du territoire. Doivent alors être gérées à la fois la mise en sécurité de la caserne, du personnel et du matériel, et l'absence de moyen (matériel et humain) pour les interventions de secours.

Sur l'ensemble du territoire d'étude, seules deux casernes sont des centres de première intervention et des centres de secours. Il s'agit de celles de Vallauris et celle de l'île Sainte-Marguerite, plus grande île des Îles de Lérins. Celles-ci sont caractérisées par une vulnérabilité moyenne. La vulnérabilité faible est inexistante de notre zone d'étude. Elle correspond aux « *Forestiers sapeurs* », spécialisés dans l'entretien de zones forestières. Ces zones sont principalement localisées dans l'arrière pays, moins urbanisé et plus sauvage.

Certaines communes sont complètement dépourvues de casernes sur leur territoire : Mandelieu-la-Napoule, Saint-Laurent-du-Var, Cap-d'Ail, Roquebrune-Cap-Martin. Pour les communes de Villefranche-sur-Mer, Saint-Jean-Cap-Ferrat et Beaulieu-sur-Mer, une seule commune est présente et apparaît sur la carte comme étant à la jonction entre ces trois communes, mais se situe administrativement sur celle de Saint-Jean-Cap-Ferrat. Le SDIS étant départemental, les communes ne disposant pas de caserne sur leur territoire sont desservies par celles des villes voisines.

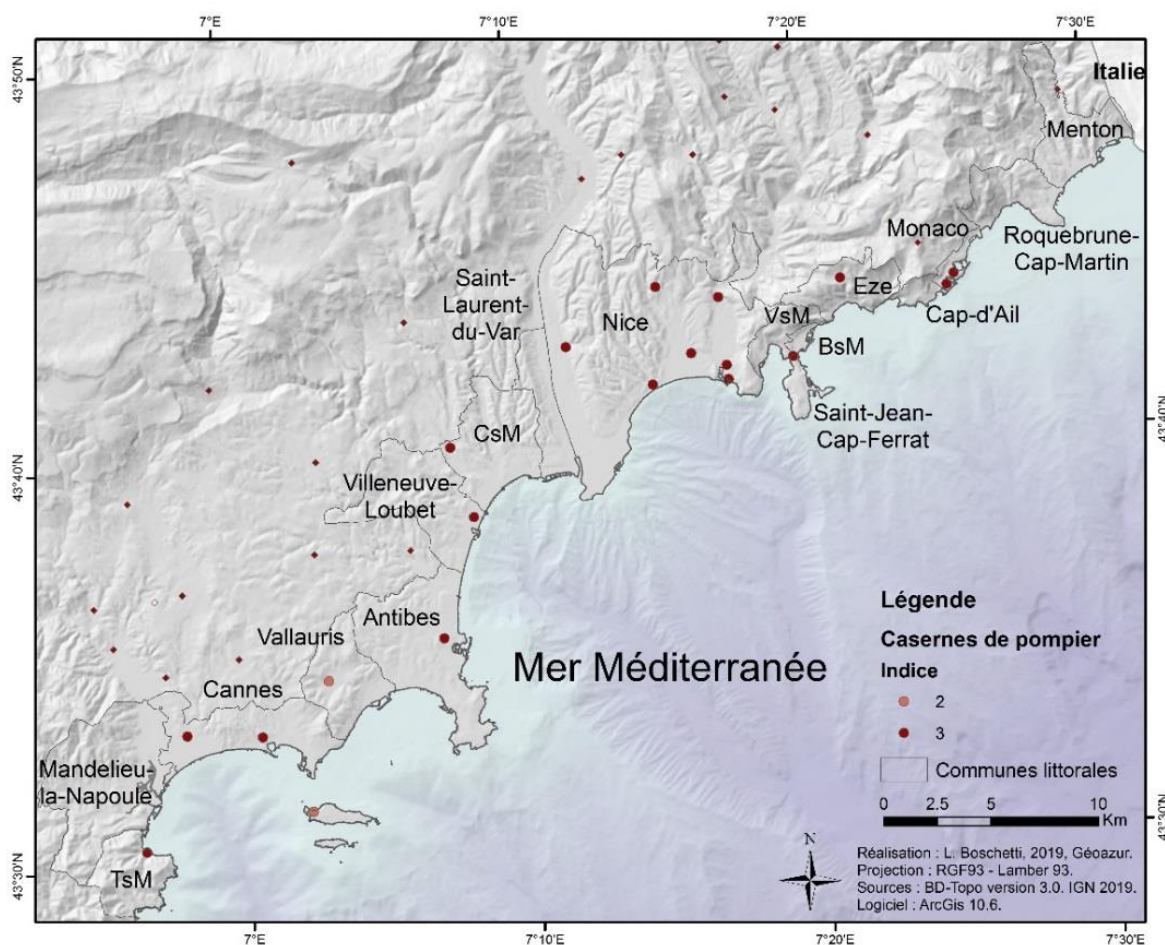


Figure 81 : Cartographie de la vulnérabilité des casernes de pompier en fonction de leur importance

Les autres enjeux « *softs* » ne sont pas développés ici mais sont disponibles en annexe (Annexe 7). Les réseaux durs, principalement des enjeux structurants du territoire, sont nombreux sur le littoral azuréen. Ici est uniquement développé l'enjeu portuaire.

1.3. Enjeu E₁₃ : cartographie du réseau portuaire

Les réseaux « durs » sont distingués en deux catégories, les statiques et les dynamiques. Les premiers concernent les réseaux vitaux (eaux, électricité), alors que les seconds se focalisent sur les axes de communications. Il s'agit donc d'éléments structurants du territoire permettant le transport de personnes et de marchandises. Ils comprennent les réseaux routiers, ferrés, portuaires et aéroportuaires. Chacun d'entre eux à son importance dans le bon fonctionnement du territoire azuréen. Il est donc primordial d'assurer leur maintien. Ici, une focalisation est faite sur les ports, à la jonction terre-mer et donc les premiers impactés en cas de tsunamis.

Les ports sont présents sur l'ensemble du territoire azuréen. Chaque ville en possède un, voire plusieurs ports principaux et secondaires. La Figure 82 montre les différents niveaux de vulnérabilité de ces éléments caractéristiques et importants (aussi bien sur le plan humain qu'économique) au niveau de cette zone d'étude.

L'analyse porte donc sur une typologie réalisée afin de différencier les petits ports de pêches des ports de plaisance.

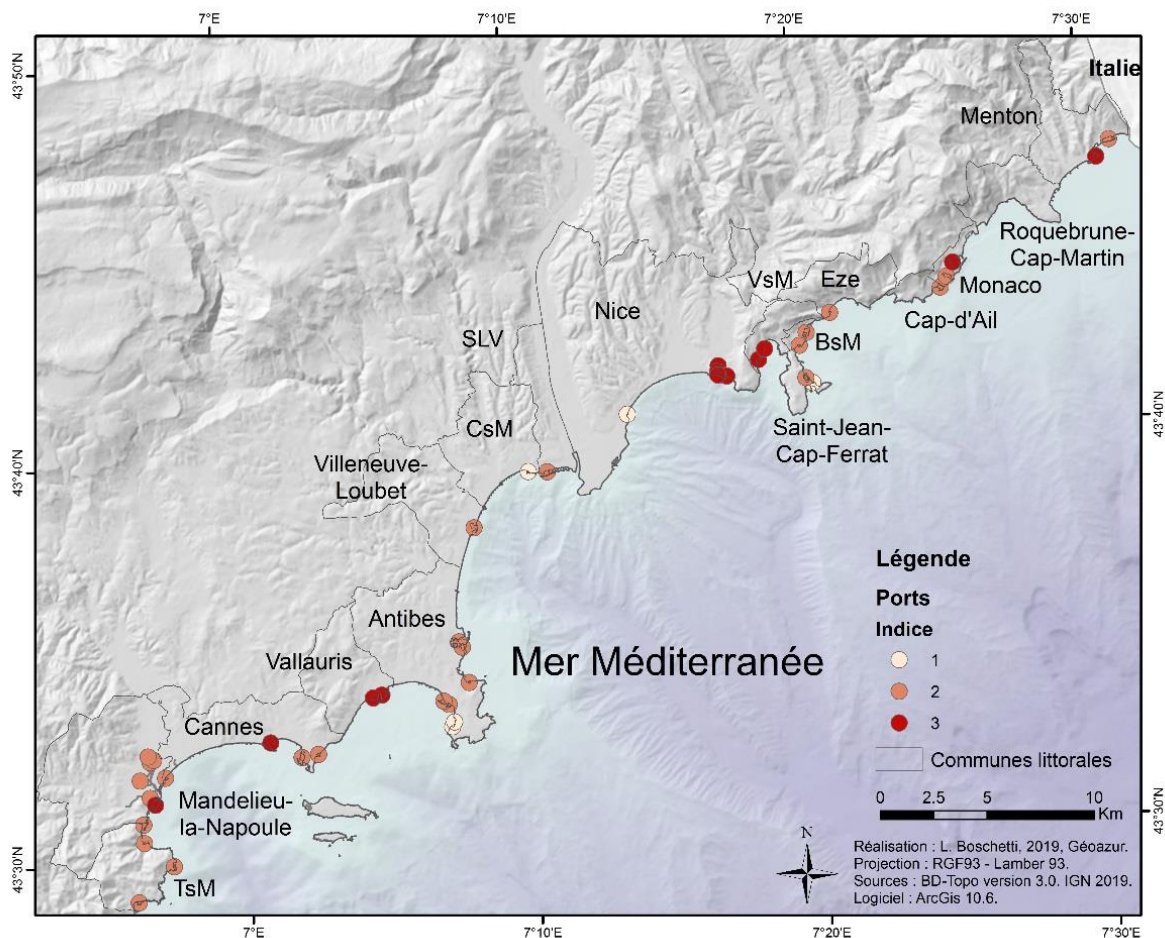


Figure 82 : Cartographie de la vulnérabilité des ports des communes littorales des Alpes-Maritimes (BD-Topo 2019)

La vulnérabilité faible a été attribuée au port de pêche, de taille modeste, ainsi qu'aux petits ports semi-privatifs. Il s'agit du port de l'Olivette et du port Mallet à l'ouest du cap d'Antibes, du port de Cros-de-Cagnes à Cagnes-sur-Mer, du port de Carras à l'ouest de Nice (à proximité de l'aéroport) et du port du Château Saint-Jean à Saint-Jean-Cap-Ferrat. Bien que moins utilisés, cela ne signifie en aucun cas qu'ils ne représentent pas un enjeu. Ils regroupent simplement peu de personnes. Les dégâts pouvant être causés par un tsunami sont donc principalement matériels.

Les ports de plaisance sont distingués en deux classes : ceux permettant des liaisons maritimes et les autres. Les premiers sont suffisamment importants pour permettre le transport de voyageurs, qu'il s'agisse de liaison locale (pour rejoindre les Iles de Lérins par exemple) ou de liaison plus lointaine (comme la Corse avec un départ du port de Nice) (Figure 83). Ces catégories de ports présentent toutes les deux des enjeux importants ; le seul élément qui les différencie est la présence d'un plus grand nombre de personnes, potentiellement moins habituées à la mer et donc plus vulnérables.



Figure 83 : Photographie du port de Nice
(L. Boschetti, 2013)

Les ports permettant des liaisons maritimes (vulnérabilité forte) sont principalement situés dans la baie de La Napoule et le Golfe de Juan. La densité des liaisons maritimes s'explique par la présence des Îles de Lérins, fortement touristiques. Des liaisons plus lointaines sont toutefois possibles au départ de Cannes et de Juan-les-Pins. Le port de Villefranche-sur-Mer ressort également. Localisé dans la rade¹⁵ de Villefranche, il permet des liaisons aux alentours. Cette rade présente des particularités puisque semi-fermée ; elle sert généralement de refuge à de nombreux bateaux qui viennent mouiller surtout en période estivale.

A l'est du département, Monaco (port Hercule (Figure 84) et Menton proposent également des liaisons maritimes de leur port. Certains de ces ports permettent l'accueil de bateaux de croisière à quai. Peu de ports ont la capacité d'accueillir de tels bateaux, puisqu'il faut des ponts de longueur suffisante et un tirant d'eau relativement profond. Le long du littoral azuréen, seuls deux ports disposent des caractéristiques demandées, le port de Nice et celui de Cannes.

Les autres ports de plaisance sont caractérisés par une vulnérabilité moyenne. Cela ne signifie en aucun cas qu'ils ne sont pas vulnérables, bien au contraire puisqu'ils regroupent des enjeux humains et économiques importants. Ils sont simplement considérés légèrement moins vulnérables car généralement composés de professionnels et de passionnés qui ont une bonne connaissance de la mer et des conduites à tenir. Certains de ces ports, considérés en vulnérabilité moyenne sont des ports importants pour la région. C'est le cas notamment du port Vauban d'Antibes. Celui-ci est un port de plaisance regroupant 1 700 bateaux sur pontons

¹⁵ Rade : grand bassin, naturel ou artificiel, ayant issu libre vers la mer et où les navires peuvent mouiller (Larousse, 2019).

(www.bateaux.com). Il est le seul port du littoral pouvant accueillir les yachts de très grandes tailles car il est le seul à avoir suffisamment de fond pour cela. En cas d'évènement majeur, de nombreux bateaux pourraient être endommagés et pourraient générer des embâcles.



Figure 84 : Principauté de Monaco

Au premier plan se trouve la ville, au deuxième le port Hercule, et au troisième la vieille ville située sur le rocher

(L. Boschetti, 2018)

L'analyse de la vulnérabilité des ports est ainsi réalisée selon une typologie et non pas par la localisation. Si cela avait été le cas, l'ensemble des ports auraient été en vulnérabilité maximale, de par leur localisation, les mettant au premier plan lors d'un tsunami. Un autre enjeu se situe en première ligne lors de l'arrivée d'un tsunami : les plages.

1.4. Enjeu E₁₅ : Cartographie des plages

Le littoral azuréen est un espace où le tourisme joue un rôle prédominant dans l'économie et dans le développement du territoire. Ces attraits touristiques regroupent pour certains aussi bien les populations locales qu'extérieures, comme les plages, les promenades ou les centres-villes.

Les plages, éléments structurant et de vie de la Côte-d'Azur, sont fragiles de par leur localisation. Elles sont directement exposées aux perturbations venues de la mer, qu'il s'agisse de pollution, de vent, de tempêtes, ou de tsunami. Elles sont également vulnérables par les utilisateurs de ces espaces. Qu'il s'agisse de familles, de personnes âgées, de personnes seules, de locaux ou de touristes, tous sont exposés. Il s'agit donc d'espaces sensibles qui peuvent considérablement augmenter le nombre de blessés ou de tués en cas de survenue d'un tsunami.

Dans le cadre de cette étude nous nous sommes focalisée sur la superficie des plages en partant du postulat que, plus une plage est grande, plus elle sera fréquentée. Le long du littoral Azuréen de grandes variations s'observent (Figure 85). Les plages soulèvent également d'autres problématiques comme leur évacuation qui peut s'avérer extrêmement problématique selon les lieux. De même que pour les enjeux précédents, une représentation ponctuelle vient remplacer une représentation réelle surfacique.

Les grandes plages, fortement fréquentées, sont globalement situées dans des zones peu escarpées à proximité des zones urbaines et principalement à l'ouest du département (moins montagneux). Elles bordent globalement les baies ouvertes. Ces plages relativement longues suivent le littoral et sont généralement en contre bas d'une promenade ou d'une route. Sont considérées dans cette catégorie les plages de la Croisette, principalement des plages privées, les plages de Juan les Pins à alternance privée et publique, l'ensemble du bord de mer d'Antibes à la limite de Saint-Laurent du Var qui sont des plages quasi uniquement publiques, la promenade des Anglais (Figure 86) composée de plages privées et de plages publiques et l'ouest de Menton.

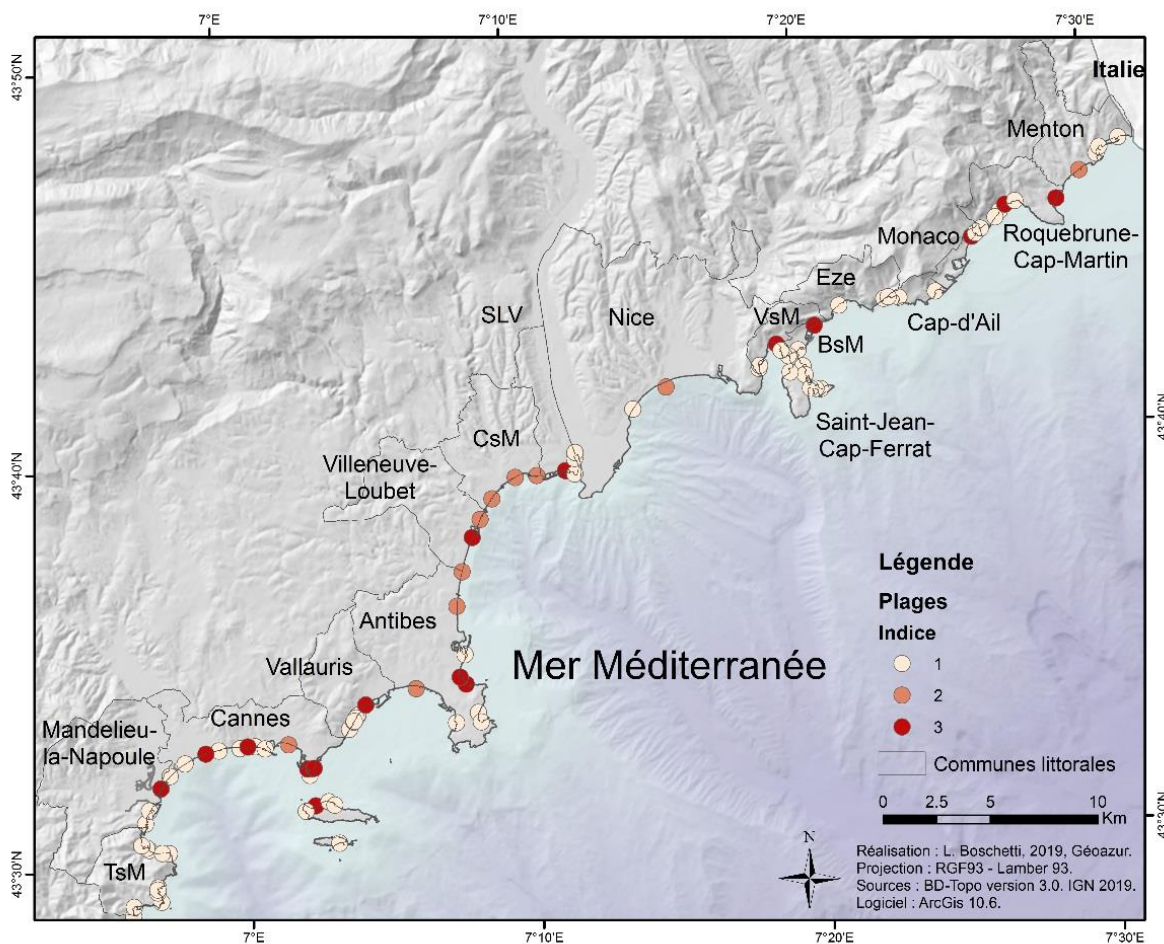


Figure 85 : Cartographie de la mise en indice des plages des Alpes-Maritimes

Les plages de superficies moyennes sont réparties tout au long du littoral. Il peut à la fois s'agir de plages longues mais peu larges, comme celles de Cannes (à l'ouest de la ville et à Palm Beach, de Villefranche-sur-Mer ou de Beaulieu-sur-Mer, à

la fois des plages plus « courtes » mais plus larges comme Mandelieu-La-Napoule, la Salis, et à la fois tout simplement des plages de taille moyenne comme celles de Saint-Laurent-du-Var, de Monaco ou de Roquebrune-Cap-Martin.



Figure 86 : Photographie de la Promenade des Anglais et des plages situées en contre bas
Source : L. Boschetti

Les plages de petites tailles sont situées tout au long du littoral. Il peut s'agir de plages dans des zones davantage découpées, escarpées comme à Théoule-sur-Mer (début du massif de l'Estérel), les Iles de Lerins, au bout du cap d'Antibes, au cap Ferrat, ou de plages situées dans des espaces restreint comme au Cap-d'Ail ou à Menton devant la vieille ville.

Voici un rapide aperçu des cartographies obtenues par enjeux. Les autres enjeux, non détaillés ici, sont disponibles en annexes ([Annexe 7](#)). Une fois l'ensemble de ces enjeux analysés et représentés sous forme cartographique, une combinaison est réalisée afin d'obtenir une cartographie de la vulnérabilité territoriale.

2. Cartographie de la vulnérabilité territoriale globale

La vulnérabilité territoriale est étudiée grâce à la détermination et à l'étude d'enjeux majeurs. Ces derniers ont été définis ([Chapitre 10](#)) et cartographiés (partie précédente). Ici, la méthodologie préposée dans le [Chapitre 11](#) a été appliqué afin de proposer une cartographie finale de la vulnérabilité territoriale. Cette dernière est réalisée à une échelle globale, c'est-à-dire pour l'ensemble du territoire azuréen. Un zoom en trois sections (est, centre et ouest du département) est ensuite réalisé afin de faire ressortir plus clairement certaines particularités locales.

2.1. Obtention de la cartographie de la vulnérabilité territoriale pour l'ensemble des communes littorales des Alpes-Maritimes

La vulnérabilité territoriale s'appuie sur la détermination des enjeux majeurs, points sensibles du territoire, qui vont faire ressortir les « points faibles » de cet espace. Une fois qu'ils ont été déterminés, analysés et cartographiés, il convient de les assembler pour obtenir une cartographie de la vulnérabilité territoriale globale.

Afin de calculer cette dernière, une agrégation des différentes couches des enjeux sélectionnés a été effectuée sous ArcGis. Une addition de l'ensemble des indices des enjeux a ensuite été réalisée dans la table attributaire afin d'obtenir des valeurs de vulnérabilité totale pour chaque polygone créé. Ayant identifié 18 enjeux, la valeur minimale admise est zéro, correspondant à l'absence totale d'enjeux, et la valeur maximale théorique est 54 (18 enjeux situés au même endroit et disposant d'un niveau de vulnérabilité maximal c'est-à-dire 3). La méthodologie appliquée a été développée dans le chapitre précédent ([Chapitre 11](#)).

Après application de cette dernière, des valeurs comprises entre 2 et 16 sont obtenues. Ces valeurs sont loin des valeurs théoriques potentielles comprises entre 0 et 54. Plus les valeurs sont proches de ce maximum plus nombreux sont les enjeux situés en un même lieu géographique. Dans ce cas précis, les valeurs sont relativement éloignées, ce qui signifie qu'un nombre limité d'enjeux se superposent.

Ces valeurs sont ensuite classées afin de revenir au trois niveaux d'indices initiaux (faible, moyen, fort). Une proposition de classement a été faite dans le [Chapitre 11](#), qui consiste, pour mémoire, à couper en trois parts égales les résultats ainsi obtenus. Une fois appliqué aux sommes calculées, voici le découpage obtenu ([Tableau 37](#)) : la vulnérabilité territoriale faible, comprend les polygones disposant d'une valeur entre 2 et 6 ; la vulnérabilité moyenne, ceux compris entre 7 et 11 ; la vulnérabilité forte, les valeurs entre 12 et 16.

Degrés synthétiques	Sommes des enjeux – Vulnérabilité territoriale
Faible	[2 ; 6]
Moyen	[7 ; 11]
Fort	[12 ; 16]

Tableau 37 : Correspondance entre les valeurs de vulnérabilité totale et le niveau de vulnérabilité

Une fois les niveaux d'indice de vulnérabilité territoriale déterminés, une cartographie de cette dernière a été réalisée ([Figure 87](#)). La zone d'étude étant la frange littorale des Alpes-Maritimes, la vision globale manque de précision et ne permet pas de soulever les particularités locales. Un premier regard permet toutefois de voir apparaître certaines communes et certains espaces comme étant plus vulnérables comme l'Aéroport International Nice-Côte d'Azur, des centres villes (Nice, Cannes, etc.), et certaines communes ressortent davantage comme Monaco.

Une première analyse rapide de la carte obtenue ([Figure 87](#)), fait apparaître une première catégorie de communes peu vulnérables. Il s'agit de Théoule-sur-Mer, Mandelieu-La-Napoule, Villeneuve-Loubet, Eze, Cap-d'Ail et Roquebrune-Cap-Martin. Une seconde catégorie présente des communes disposant d'une plus grande vulnérabilité. Il s'agit de groupes de communes :

- Cannes, Vallauris et Antibes ;
- des communes autour de Nice entre Cagnes-sur-Mer et Beaulieu-sur-Mer, c'est-à-dire la quasi-totalité des communes littorales de Métropole Nice-Côte-d'Azur (à l'exception d'Eze et Cap d'Ail) ;
- Monaco ;
- Menton.

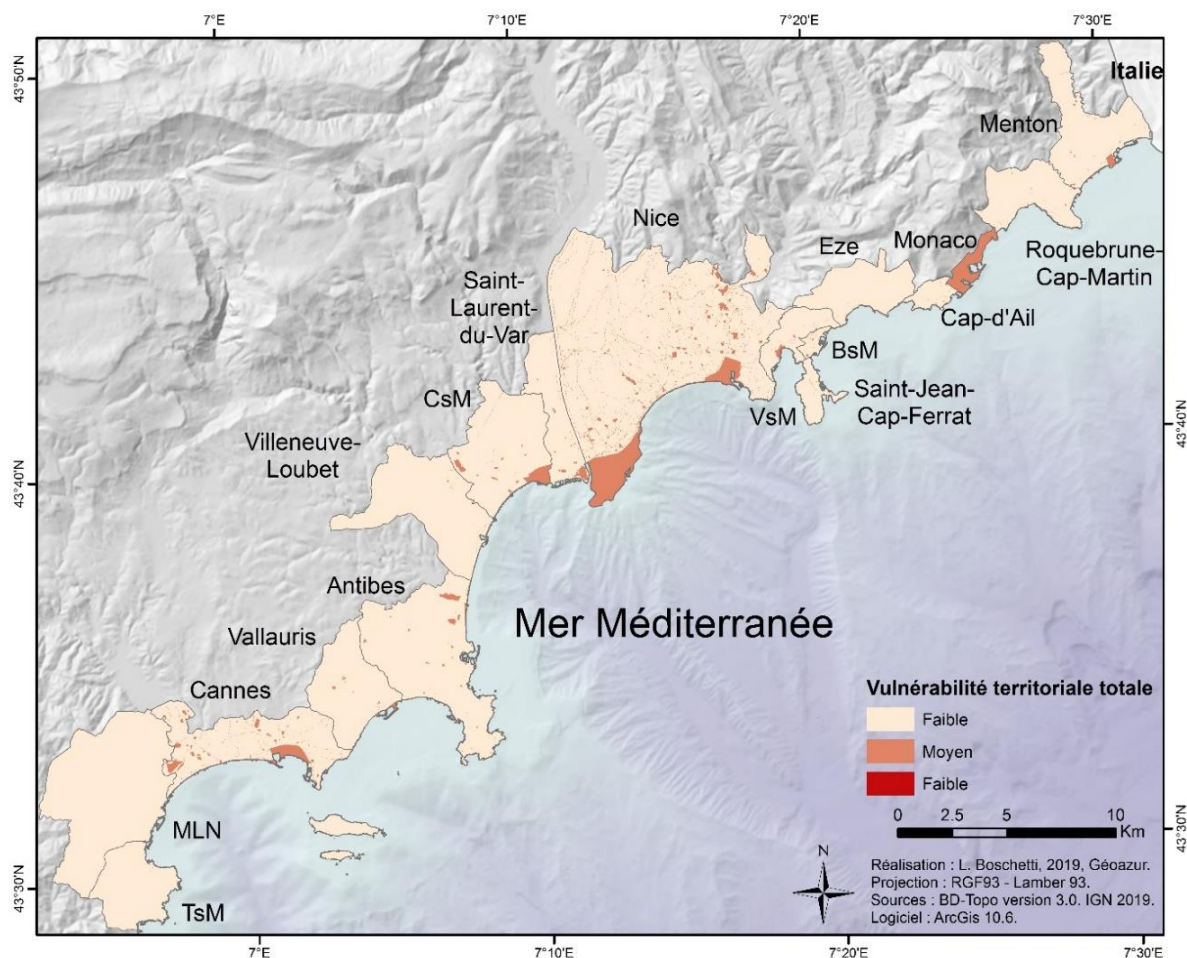


Figure 87 : Cartographie globale de la vulnérabilité territoriale le long des communes littorales des Alpes-Maritimes

Une corrélation peut être faite entre les communes présentant certaines fragilités et les espaces de vies principaux du littoral. Les espaces urbains concentrent donc plus de vulnérabilité. Afin d’avoir une vision plus précise de la vulnérabilité territoriale sur le territoire, des zooms du littoral ont été réalisés selon les trois sections précédemment utilisées, à savoir l’ouest, le centre et l’est du territoire départemental.

2.2. La vulnérabilité territoriale des communes de l’ouest du département

L’ouest du département des Alpes-Maritimes se situe à la frontière avec le département du Var et donc du massif de l’Esterel. Théoule-sur-Mer est justement située à l’entrée de ce massif et apparaît comme étant plus sauvage que les autres communes. Mandelieu-la-Napoule et Cannes forment une baie, le Golfe de La Napoule. Le cap d’Antibes, sépare le centre d’Antibes d’un côté et le centre de Juan-les-Pins (quartier d’Antibes) de l’autre.

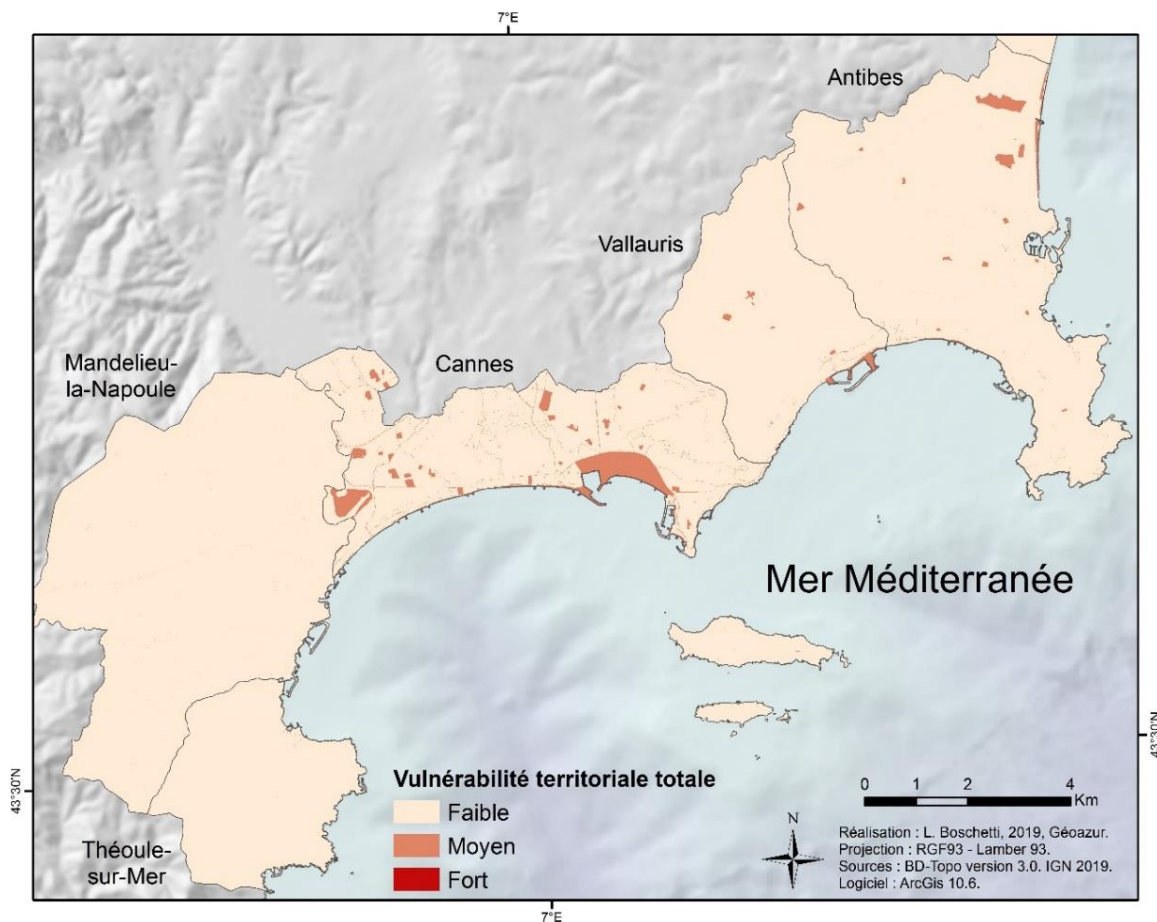


Figure 88 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale des communes de l'ouest du département des Alpes-Maritimes

Une distinction peut être faite entre l'extrémité ouest du département (Théoule-sur-Mer et Mandelieu-la-Napoule) et les trois autres communes (Cannes, Vallauris et Antibes) (Figure 88). Les deux premières communes sont caractérisées sur l'ensemble de leur territoire par une faible vulnérabilité territoriale. Des enjeux majeurs sont présents mais sont gommés par une faible densité de population et des zones habitées éparses.

Les trois autres communes (Cannes, Vallauris et Antibes) laissent ressortir davantage d'espaces vulnérables. L'aéroport d'affaires de Cannes ressort ainsi que le centre-ville et les ports de Cannes (le Vieux-Port et le Port Canto). La quasi-totalité des bâtiments qui ressortent en vulnérabilité moyenne sont des ERP, la plupart étant des ERP à public sensible, c'est-à-dire des écoles, collèges et lycées. Ressortent également des axes de communications. L'ensemble des plages se voient également attribuer une vulnérabilité moyenne.

La partie littorale de Vallauris est principalement occupée par le quartier de Golfe-Juan, qui est caractérisé par une vulnérabilité moyenne. Une fois encore, les bâtiments qui ressortent sont les écoles. Sur la commune d'Antibes, les axes de communications ressortent clairement, ainsi que les plages et les ports. Les bâtiments qui ressortent sont à la fois des ERP (toujours principalement des ERP à public sensible) et des enjeux « soft », c'est-à-dire caserne de pompier, mairie et gendarmerie.

La zone de vulnérabilité moyenne en haut à droite d'Antibes correspond à un camping, et celle du dessous correspond au centre hospitalier d'Antibes. Le bord de mer faisant la jonction entre Antibes et Villeneuve-Loubet est également considéré comme un espace à vulnérabilité forte. Cette partie du territoire est développée dans la partie suivante.

2.3. La vulnérabilité territoriale des communes centrales du département

La partie centrale du littoral comprend les communes de Villeneuve-Loubet à Villefranche-sur-Mer (noté VsM sur les cartes). Une fois encore une grande variabilité s'observe dans la distribution spatiale des vulnérabilités (Figure 89). Certaines communes sont très majoritairement caractérisées par une vulnérabilité faible (Villeneuve-Loubet, Villefranche-sur-Mer, Saint-Jean-Cap-Ferrat et Beaulieu-sur-Mer), alors que d'autres sont bien plus vulnérables, comme Nice.

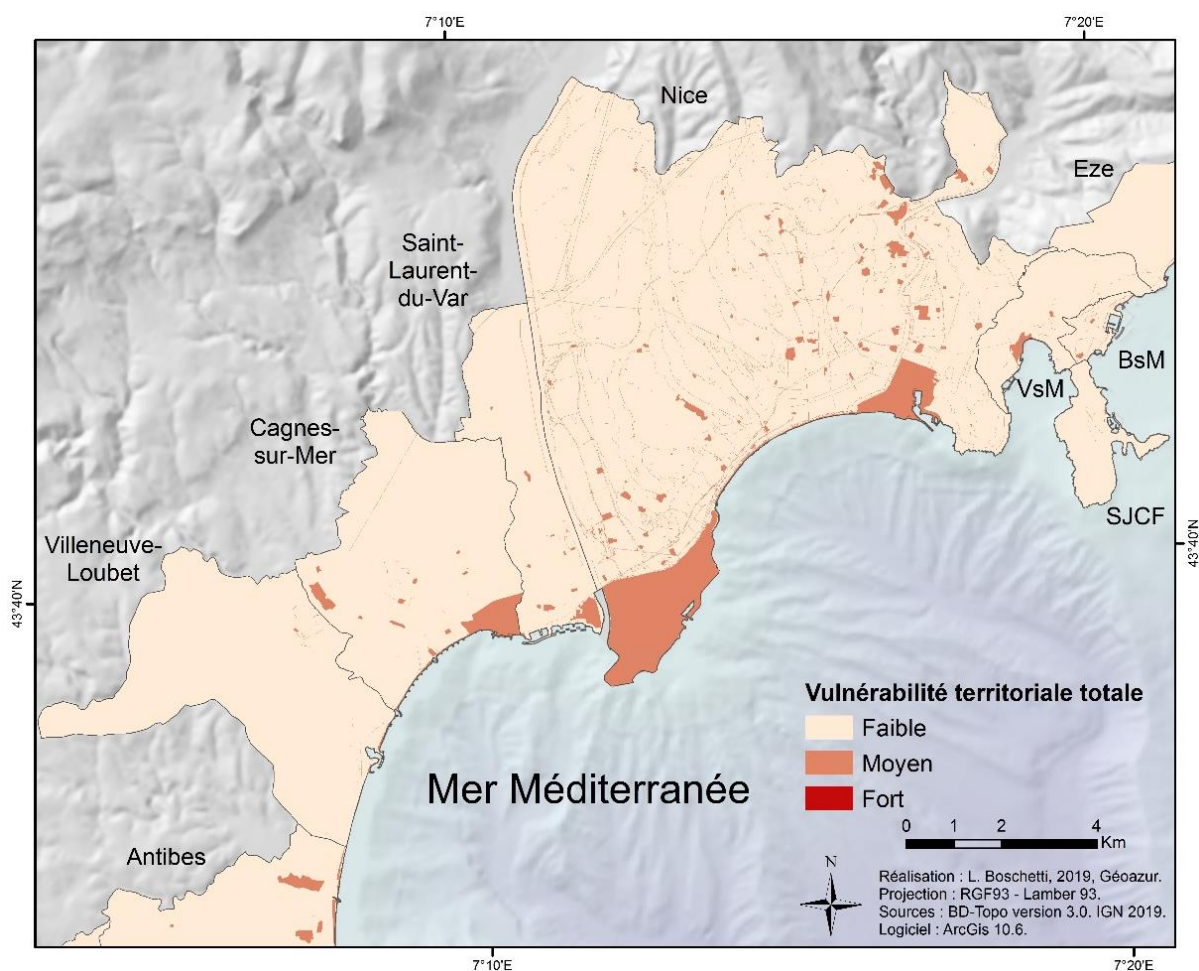


Figure 89 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale des communes centrales des Alpes-Maritimes

Quatre communes sont ainsi quasi exclusivement composées d'espaces considérés en vulnérabilité faible : Villeneuve-Loubet, Villefranche-sur-Mer, Saint-Jean-Cap-Ferrat et Beaulieu-sur-Mer. La première est majoritairement une ville dortoir. Les seuls points sensibles de son territoire sont la zone commerciale le long de

l'ancienne nationale 7 et la bordure littorale qui fait la jonction avec Antibes. Bien qu'identiquement constituées : une plage de galet, une piste cyclable, la route et la voie ferrée, les vulnérabilités obtenues sont différentes. Ceci montre l'importance que prennent les enjeux à grande étendue spatiale comme la densité et les zones d'habitation. L'indice de densité étant différent entre Antibes (densité considérée moyenne) et Villeneuve-Loubet (densité considérée faible), le niveau d'indice final va également être différent.

Les trois autres communes, structurant et avoisinant le Cap Ferrat, sont principalement caractérisées par une vulnérabilité faible. Ressortent légèrement quelques axes de communications, le centre-ville de Villefranche-sur-Mer et de Saint-Jean-Cap-Ferrat, quelques bâtiments (ERP et réseaux « *softs* ») et plages.

Les communes de Cagnes-sur-Mer et de Saint-Laurent-du-Var disposent de zones de vulnérabilité moyenne relativement conséquentes. Deux centres commerciaux sont considérés comme des zones refuges potentielles : Polygone Riviera et Cap 3000. Le premier, situé à Cagnes-sur-Mer est ouvert mais dispose d'étages pouvant servir de zones de mises en sécurité. Le second, situé à l'embouchure du Var et en front de mer, est fermé et dispose également d'étages. Ils peuvent donc servir de zones refuges mais en cas de dommages importants ils rendent le territoire vulnérable car de nombreux moyens devront être employés pour évacuer les sinistrés.

La ville de Cagnes-sur-Mer, comme de nombreuses communes, dispose d'un centre ancien, en hauteur et reculé, et un centre « nouveau » en bordure de mer. Ce dernier, couplé au port de pêcheur du Cros-de-Cagnes, forme une zone de vulnérabilité moyenne. Les principaux bâtiments visibles sont des établissements scolaires, des établissements de santé et des réseaux « *soft* » structurels.

Nice, préfecture et plus grande ville du département, est la commune la plus urbanisée et la plus peuplée du littoral français. Elle regroupe donc un grand nombre d'enjeux majeurs. De nombreux espaces de son territoire apparaissent en vulnérabilité moyenne. La densité de son réseau routier ressort particulièrement bien. Deux espaces majeurs sont caractérisés par une vulnérabilité moyenne, l'un à l'ouest et le second à l'est de la ville : L'aéroport international d'un côté, accolé à une station d'épuration, de l'autre le vieux centre et le port.

De par son statut de préfecture de département et sa forte densité de population, elle regroupe de nombreux enjeux majeurs qu'ils soient humains, économiques ou encore administratifs. Les bâtiments qui ressortent en vulnérabilité moyenne sont des établissements scolaires, des structures hospitalières (CHU) ou encore des bâtiments administratifs locaux et départementaux.

Tout comme l'ouest du département, cet espace voit d'importantes variations de la représentation spatiale de la vulnérabilité territoriale. Reste à présent à s'attarder à la cartographie de l'est du département.

2.4. La vulnérabilité territoriale des communes de l'est du département

L'est du département, frontalier avec l'Italie, est davantage escarpé et montagneux. Les pentes sont donc plus importantes et le bâti a dû s'adapter au relief. Cette espace s'étant d'Eze à Menton, en passant par le Cap-D'ail, Monaco et Roquebrune-Cap-Martin. La cartographie de la vulnérabilité territoriale de cette zone est surprenante puisque quatre des cinq communes sont quasi-exclusivement entièrement en vulnérabilité faible, alors que la dernière, Monaco, voit la totalité de sa superficie caractérisée en vulnérabilité moyenne (Figure 90).

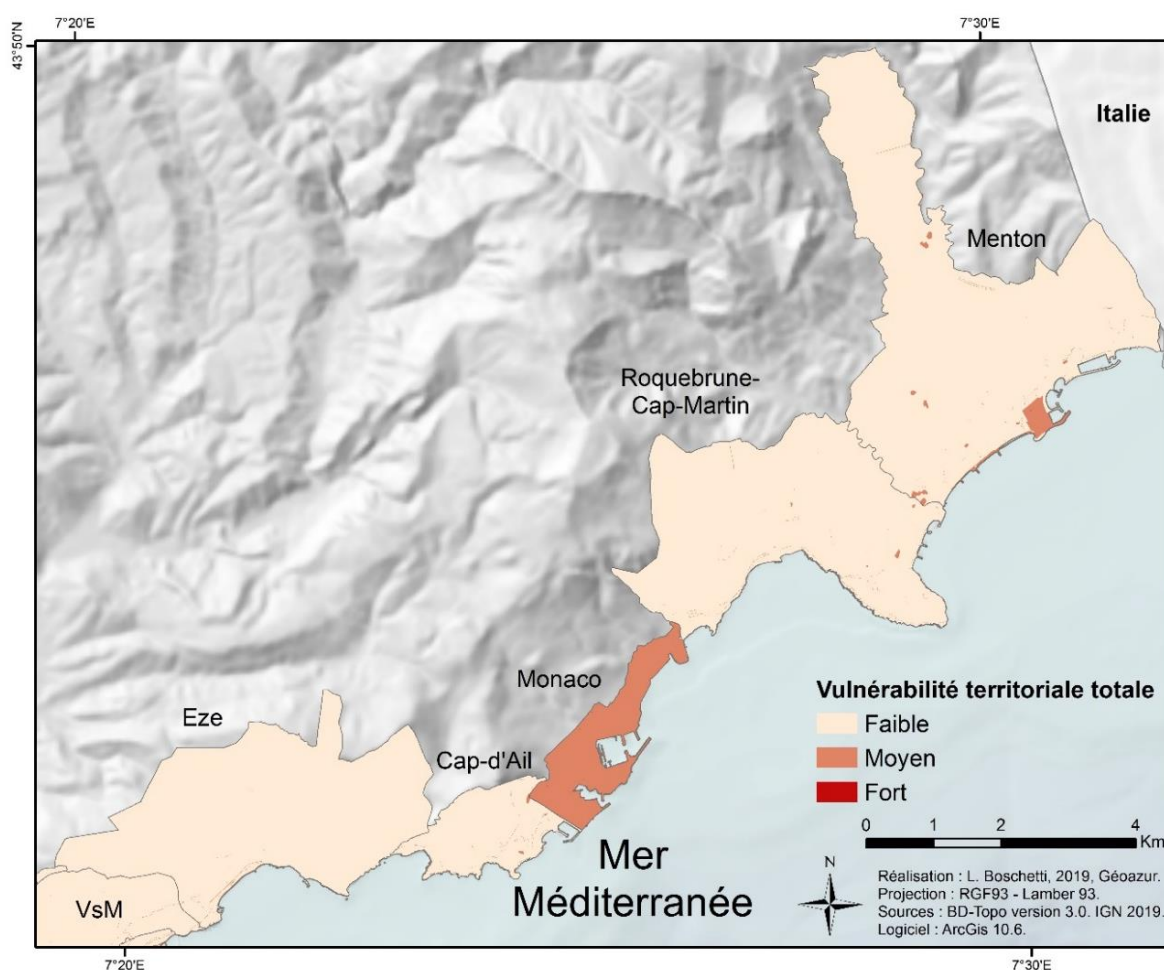


Figure 90 : Vulnérabilité territoriale totale le long des communes situées à l'est du département des Alpes-Maritimes

La faible présence d'enjeux à Eze, Cap-D'ail s'explique justement principalement par ces reliefs importants. Il en va de même pour Roquebrune-Cap-Martin et Menton mais dans une moindre mesure, le relief s'adoucissant autour de la Baie du Soleil, composée d'une multitude de petites vallées. Elles contiennent ainsi davantage d'espaces de vulnérabilité moyenne, comme une grande promenade et plages, des ERP, le centre historique et le port de Menton.

Monaco, présente de nombreuses particularités qui lui confèrent cette vulnérabilité moyenne sur l'ensemble de son territoire. Limitée spatialement, elle a dû développer divers moyens astucieux afin d'optimiser son territoire. Elle s'est ainsi

développée en hauteur, engendrant la construction de nombreuses tours, mais également depuis peu sur la mer avec un projet d'extension sur la mer, permettant à la ville de gagner six hectares d'ici 2025.

Cette ville étalée sur 2 km² comprend donc sur cet espace restreint l'ensemble des structures nécessaires au fonctionnement d'un état : institutions, hôpitaux, casernes de pompiers, écoles, commerces, etc. De plus, Monaco est réputée pour ses activités dans le tertiaire et le luxe, potentiellement générateur de dégâts supplémentaires en cas d'évènement extrême.

Les variations territoriales sont donc d'autant plus fortes à l'est du département, qui se trouve également être la zone la plus impactée en cas de survenue d'un tsunami.

3. Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif la mise en application de la méthodologie d'analyse de la vulnérabilité territoriale proposée dans le chapitre précédent ([Chapitre 11](#)) et ce pour le littoral azuréen soumis au risque de submersion marine par tsunami. Pour ce faire, l'ensemble des enjeux majeurs ont été analysés et cartographiés un à un. Ces derniers sont répartis tout au long du littoral azuréen et des particularités locales peuvent être relevées. Ils ont ensuite été assemblés afin d'obtenir une seule couche de vulnérabilité territoriale.

Cette vulnérabilité territoriale ainsi obtenue, bien que s'éloignant autant que possible de l'aléa, tient compte de l'origine de ce dernier dans la détermination des enjeux majeurs. Ici, les attraits touristiques sont principalement focalisés sur les bords de mer, principales zones exposées en cas de tsunami. L'exposition, bien qu'une des composantes de la vulnérabilité ([Metzger et D'Ercole, 2008](#)), n'a pas été retenue comme telle dans ces travaux et a été incluse à l'aléa.

Les résultats obtenus permettent l'obtention d'une cartographie de la vulnérabilité territoriale. Celle-ci fournit un grand nombre de renseignements quant à la structuration du territoire, l'organisation de ce dernier ainsi que les points faibles à retenir. Ils vont par la suite être combinés aux résultats obtenus lors de l'analyse de l'aléa ([Partie II](#)) afin d'obtenir une analyse de risque ([Partie III](#)).

CONCLUSION DE LA PARTIE III – LIMITES DE LA METHODOLOGIE PROPOSEE ET PERSPECTIVES

Cette troisième partie était focalisée sur la vulnérabilité territoriale. Un rappel du concept a été nécessaire afin de pouvoir proposer une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité territoriale. Celle-ci aboutie à l'obtention d'une cartographie de la vulnérabilité du littoral azuréen.

Un rappel des différentes vulnérabilités existantes a été réalisé, le concept de vulnérabilité ayant largement été étudié par nos prédécesseurs. La vulnérabilité biophysique, mobilisée dans la [Partie II](#) pour l'établissement de l'échelle d'intensité, se concentre sur les dégâts directs de la menace. La vulnérabilité sociale s'intéresse à la « fragilité » des individus avant qu'un phénomène ne se produise et à la manière dont ils vont être en mesure de s'en relever. Celle-ci présente de nombreuses similarités avec la résilience. La vulnérabilité territoriale se focalise sur les enjeux majeurs d'un territoire, susceptible en cas d'impact, de propager leur vulnérabilité à une zone plus étendue. C'est cette-dernière qui a été retenue pour réaliser une étude de vulnérabilité du territoire azuréen.

Un point a été fait sur l'importance des enjeux quelle que soit la vulnérabilité mobilisée. Ces derniers sont primordiaux puisqu'ils correspondent à ce que l'on souhaite protéger de la menace. Ici, la focalisation étant faite sur la vulnérabilité territoriale, l'intérêt est porté sur les enjeux majeurs, c'est-à-dire les points clés du territoire qui en cas de disfonctionnement peuvent propager leur vulnérabilité à une partie ou à l'ensemble du territoire.

Les travaux de [Metzger et D'Ercole \(2008, 2009, 2011\)](#) servent de référence en matière de conceptualisation et d'application de la vulnérabilité territoriale. Les travaux proposés ici sont grandement inspirés des leurs à une différence près : ces auteurs placent les enjeux et la vulnérabilité au centre des études de risque jusqu'à s'extraire complètement de l'aléa. Ce dernier est alors intégré à l'analyse de risque via l'analyse de vulnérabilité dont l'exposition est une composante.

Dans ces réflexions sur la vulnérabilité, nous nous sommes extrait au maximum de l'aléa, puisqu'il a été conservé comme composante principale du risque. L'analyse globale du risque concernant l'aléa tsunami, certains choix méthodologiques de la vulnérabilité ont été réalisés en fonction. Ceux-ci auraient pu être différents pour un autre aléa, notamment en ce qui concerne l'intégration d'enjeux touristiques (liés à l'enjeux humains) en bord de mer.

Cette cartographie de la vulnérabilité territoriale a pour objectif de faire ressortir les particularités locales et les espaces du territoire contenant de nombreux enjeux majeurs. Ces espaces sont ainsi des espaces sensibles, qu'il faut tenter de protéger et de maintenir afin d'éviter la diffusion de leur vulnérabilité au reste du territoire. La méthodologie proposée et utilisée ici présente l'intérêt de rentrer dans le détail et de s'intéresser à l'échelle des bâtiments. A l'inverse, certaines subtilités sont gommées par des enjeux disposant d'une plus grande étendue spatiale.

Les enjeux pris en considération pour l'analyse de la vulnérabilité territoriale disposent ainsi d'une emprise spatiale plus ou moins importante sur le territoire d'étude. La densité par exemple va couvrir l'ensemble du territoire et ainsi apporter de la donnée et de la valeur sur toute la zone d'étude. A l'inverse, de nombreux enjeux disposent d'une étendue spatiale bien plus restreinte car ils sont limités physiquement à une petite partie du territoire (bâtiment par exemple). Leur importance visuelle sera donc moindre même si leur importance s'applique sur l'ensemble du territoire.

Notons une absence quasi totale du niveau de vulnérabilité forte. Dans les faits cela n'est pas réellement le cas. Les polygones qui représentent ce niveau maximum sont trop petits et ne ressortent pas visuellement. En revanche, avec l'utilisation du zoom et de couleurs marquantes, ils apparaissent sur les cartes (Figure 91). Pour la ville de Cannes, ces espaces correspondent exclusivement à des axes de communications (lignes) et à des croisements (points) à l'intérieur ou en limite de la zone définie comme le centre-ville. Pour la commune de Nice, ce sont l'ensemble des structures du Vieux-Nice qui ressortent. Concernant l'état de Monaco il s'agit de portions de réseaux durs.

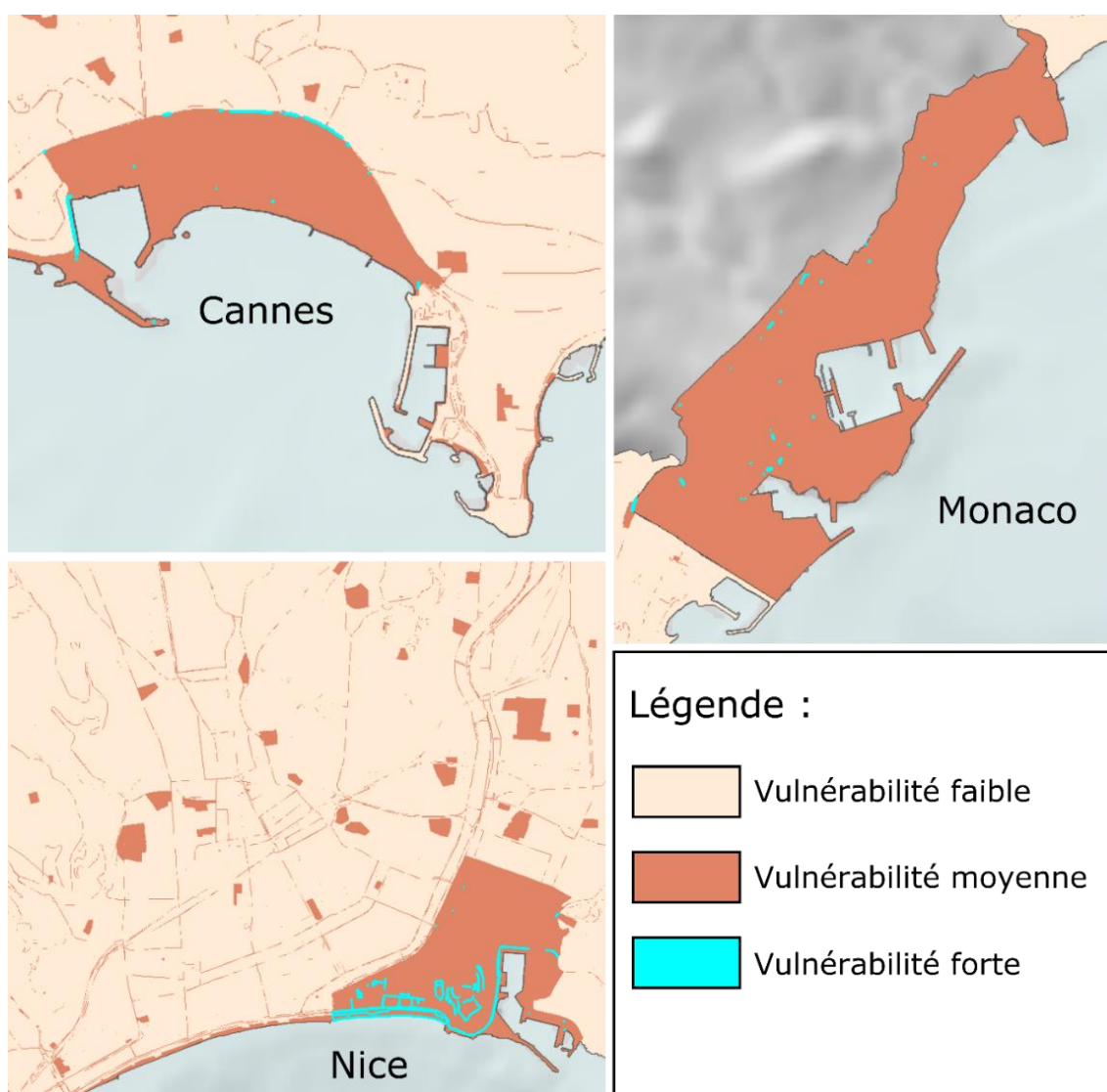


Figure 91 : Agrandissement permettant de faire ressortir les zones caractérisées par une vulnérabilité forte

L'ensemble de ce zonage obtenu s'explique par la superposition de plusieurs couches surfaciques en ces espaces particuliers (centres-villes et vieux-centres) alors que dans d'autres couches, les espaces sont davantage composés de petits éléments surfaciques (échelle d'un bâtiment ou d'une route). De plus une grande majorité des enjeux majeurs étudiés sont de petits espaces surfaciques, à l'échelle d'un bâtiment, et ressortent peu visuellement. En revanche, ceux analysés via de grandes surfaces sont clairement visibles et prennent le pas sur les premiers.

Les parties du territoire caractérisées par une faible vulnérabilité territoriale, c'est-à-dire comprenant peu d'enjeux majeurs, disposent de moins d'éléments pouvant être impactés et pouvant propager leur vulnérabilité au reste du territoire. A l'inverse, ils sont potentiellement plus éloignés de certaines structures (hôpitaux, casernes de pompiers, etc.) ce qui peut augmenter leur vulnérabilité propre.

La méthodologie d'analyse de la vulnérabilité territoriale proposée et appliquée dans cette partie présente certaines limites. Celles-ci nécessiteraient d'être palliées dans des travaux futurs. Il s'agirait principalement de réfléchir à la représentation graphique des enjeux pour que ceux à large représentation spatiale ne gommant pas ceux qui sont représentés à l'échelle d'un bâtiment. Il conviendrait également d'essayer de déterminer des coefficients de pondération, d'établir des scénarios temporels ou encore d'inclure une approche systémique.

En complément de cela, il serait intéressant de combiner ces résultats avec d'autres travaux réalisés sur cette zone d'étude. De nombreux travaux ont été réalisés le long du littoral azuréen avec des problématiques diverses. Plusieurs d'entre elles peuvent avoir un impact direct ou indirect sur la vulnérabilité de la population et/ou du territoire. Parmi ces différents travaux, nous pouvons citer :

- La **thèse de Sahal (2011)** dans laquelle il a réalisé une étude d'évacuation de la plage de la Salis (Antibes) vers une zone refuge déterminée. Cette dernière passe par une modélisation multi-agents qui permet de simuler les trajets entre la plage et une zone refuge identifiée afin de déterminer les voies d'évacuations optimales.

- Le **BRGM** a également beaucoup travaillé sur le risque de tsunami dans les Alpes-Maritimes, qu'il s'agisse (i) de la réalisation d'un catalogue d'évènement historique (Lambert, 2008, 2009 ; Lambert et Pedreros, 2012), (ii) de la simulation de l'aléa (Montfort et coll., 2012), ou encore de l'exposition des bâtiments (Terrier et coll., 2012).

- le **programme européen ASTARTE¹⁶** avait pour objectif majeur d'augmenter la résilience de population et des territoires dans la région NEAM¹⁷ et d'améliorer la préparation des populations vivant sur des côtes exposées au risque de tsunami. Différents éléments ont été analysés comme (i) la connaissance, les comportements et la perception de la population du risque de tsunami (Charpentier, 2014 ; Lopes, 2014) ; (ii) l'identification de zones refuges (Bantegnie, 2015), ou encore (iii) la simulation d'évacuation grâce à des modèles multi-agents (Evans, 2016). Dans le cadre de ce projet, de nombreux travaux ont été réalisés dans différentes régions autour de la mer Méditerranée (Héraklion, Syracuse, etc.), dont les Alpes-Maritimes, et plus particulièrement Nice, Saint-Laurent-du-Var et Saint-Jean-Cap-Ferrat.

¹⁶ Assessment, Strategy And Risk reduction for Tsunamis in Europe

¹⁷ North Eastern Atlantic, Mediterranean and connected seas region

- L'**ANR Com2SiCa**¹⁸ a pour objectif de renforcer les recherches sur les populations, justement grâce à la connaissance et l'anticipation des comportements humains. Des enquêtes en immersion, c'est-à-dire avec bande sonore et capteurs, ont été réalisées sur les plages de Nice en 2018 (Provitolo et Tricot, 2018 ; Provitolo, 2019). Ces dernières ont permis d'acquérir des données variées sur les réactions humaines à attendre en cas de tsunami. Ces données ont été traitées sous forme cartographique afin de spatialiser la connaissance sur les comportements humains et les trajectoires de déplacements associées (Foussekis, 2019).

Il ne s'agit pas ici de faire une liste exhaustive mais de donner des exemples de ce qui a pu être réalisés par le passé ou de ce qui est actuellement entrepris. Ces dernières permettent d'avoir des réflexions complémentaires sur d'autres thématiques qui peuvent augmenter ou réduire la vulnérabilité de la population et/ou du territoire.

L'ensemble de ces travaux portent à la fois sur l'aspect structurel du territoire (identification de zones refuges) et sur la population (comportements et connaissances). Il serait donc intéressant de croiser l'ensemble de ces études afin d'obtenir une analyse des plus complètes. Ces études extrêmement détaillées ont pu être réalisées puisqu'elles se concentrent sur une petite portion du territoire (à l'échelle de la commune ou du quartier). Il conviendrait donc de les étendre à l'ensemble du littoral afin d'avoir une analyse plus globale. Ce travail serait toutefois considérable. Une possibilité serait de se focaliser sur un seul espace afin d'y concentrer l'ensemble de ces études. Ceci s'applique déjà pour Nice, zone d'étude principale de la majeure partie des analyses. Or, comme le montre les travaux de Sahal (2011) et les travaux présentés dans la [Partie II](#), d'autres espaces sont également exposés et vulnérables et méritent que l'on s'y intéresse davantage, comme le quartier de la Salis à Antibes.

L'analyse de vulnérabilité proposée ici s'inscrit dans une étude plus large du risque du littoral azuréen soumis aux tsunamis. Les deux composantes du risque, l'aléa ([Partie II](#)) et la vulnérabilité, ayant été caractérisées et cartographiées, l'analyse du risque peut à présent être réalisée ([Partie IV](#)).

¹⁸ COMprendre et Simuler les COMportements humains en situation de CAstrophes

PARTIE IV

L'ANALYSE DU RISQUE : PROPOSITION DE DEUX METHODOLOGIES D'ANALYSE ET MISE EN APPLICATION DANS LE CAS DE LA SURVENUE D'UN TSUNAMI SUR LE LITTORAL AZUREEN

*« Les dangers visibles nous causent
moins d'effroi que les dangers imaginaires »*

Shakespeare

INTRODUCTION PARTIE IV

Le risque, dans le langage courant, correspond à « *la possibilité de perdre quelque chose, pour un individu, une famille, une ville, un territoire, une entreprise, une société, un pays, une organisation sociale quelle qu'elle soit* » (Metzger et D'Ercole, 2011). Le risque d'un territoire soumis à une menace est généralement considéré comme étant fonction d'un aléa, son occurrence, sa magnitude, et de la vulnérabilité des enjeux qui le constituent.

Les systèmes urbains ont contribué « *à augmenter les niveaux de risques à la fois par la concentration des enjeux, l'aménagement non adapté dans des zones dangereuses, et à aggraver les effets par une augmentation locale des niveaux d'aléas, et de la vulnérabilité* » (Serre, 2015). Ces derniers sont donc à la fois créateurs d'espaces à risques et en même temps ils refusent la menace et les pertes qu'ils représentent. Le littoral azuréen fait partie de ces espaces ; c'est pourquoi une analyse du risque de tsunami, aléa peu étudié, est nécessaire.

Pour se faire, plusieurs questionnements se posent. Méthodologique tout d'abord : Comment analyser le risque ? Quelle méthodologie utiliser ? Comment combiner l'aléa et la vulnérabilité ? Puis concernant les résultats : les Alpes-Maritimes sont-elles une zone à risque de tsunami ? Quels sont les espaces à risque fort ?

Deux méthodologies sont alors proposées. Une première, correspondant à une approche semi-quantitative, permet de combiner l'aléa et la vulnérabilité à partir des analyses présentées dans les parties précédentes (Parties II et III). Une seconde approche, dite normalisée, qui ambitionne de comparer différents événements et différentes zones d'études. Celles-ci sont appliquées au littoral azuréen, permettant d'obtenir une cartographie du risque de submersion marine par tsunami dans les Alpes-Maritimes.

Le risque étant dépendant de l'aléa et de la vulnérabilité, les trois scénarios de tsunami (S1887, SHyp et STot) sont traités séparément. Le résultat ne sera donc pas une seule et unique carte de risque, mais un ensemble de trois cartes, une pour chaque hypothèse.

Cette quatrième partie est composée de trois chapitres. Le premier (Chapitre 13) est une présentation de ces deux méthodologies d'analyse. Le deuxième (Chapitre 14) est la présentation des résultats à l'échelle du littoral azuréen. Les deux cartographies obtenues sont ainsi présentées. Le dernier chapitre (Chapitre 15) est une focalisation sur quatre communes du littoral (Cannes, Antibes, Nice et Monaco). L'ensemble de la démarche est alors repris, commençant par l'aléa, puis la vulnérabilité et enfin le risque. Ceci permet de faire ressortir des particularités locales qui ne ressortent pas lors de l'analyse globale. De plus, une comparaison peut être réalisée entre ces communes grâce à l'approche normalisée.

CHAPITRE 13 : PROPOSITION DE DEUX METHODOLOGIES D'ANALYSE DU RISQUE DE TSUNAMI

Une analyse de vulnérabilité territoriale ([Partie III](#)), couplée à une étude de l'aléa tsunami ([Partie II](#)), doivent permettre d'aboutir à une cartographie du risque d'un territoire soumis à un aléa, ici la Côte d'Azur exposée à l'aléa tsunami. Le risque est considéré comme étant fonction de l'aléa et de la vulnérabilité ; or les fonctions « *aléa* », « *vulnérabilité* » et « *risque* » s'avèrent complexes à définir. A titre d'exemple, l'aléa, qui est un élément quantifiable, peut être analysé via de nombreux facteurs : courants, hauteurs d'eau, emprise spatiale, intensité du tsunami ([Chapitre 8](#)).

La vulnérabilité territoriale, autre composante du risque, s'avère difficilement quantifiable car faisant souvent appel à des données qualitatives. Pour contourner cette difficulté, une approche indicielle a permis d'analyser les enjeux majeurs d'un territoire ([Chapitre 11](#)). Il s'agit aussi bien de données quantitatives que qualitatives, qui, grâce à la mise en indice, permettent d'obtenir une échelle commune à l'ensemble des éléments, c'est-à-dire, par exemple une échelle à trois niveaux (faible, moyen, fort) ou encore (1, 2, 3).

L'intensité du tsunami en Mer Ligure ([Chapitre 8](#)) est retenue comme étant l'un des facteurs d'analyse de l'aléa. Elles permettent d'avoir une spatialisation précise des effets du phénomène (effets physiques et dommages) en une zone donnée. Une seconde étape de traitement de l'aléa a permis l'obtention d'une cartographie de l'aléa tsunami sous forme indicielle ([Chapitre 10](#)).

Il convient d'étendre l'étude de la vulnérabilité, non plus seulement à l'évaluation des dégâts potentiels générés dans la zone d'impact (vulnérabilité biophysique) comme cela est le cas avec l'intensité, mais à l'ensemble des éléments qui permettent d'analyser le fonctionnement du territoire dans son ensemble (vulnérabilité territoriale) ([Partie III](#)).

Afin de combiner les deux variables du risque, deux approches sont proposées. Une première, semi-quantitative avec mise en indice, qui aboutit à un tableau de croisement et permet de qualifier le risque en trois niveaux : faible, moyen et fort. Elle a été la trame directrice du manuscrit et a été présentée tout au long de ce dernier. Bien que facilement reproductible et pratique d'analyse, elle ne permet pas la comparaison de différents événements. Or, dans cette étude, disposant de trois scénarios d'aléas (S1887, SHyp et STot), il serait intéressant de pouvoir comparer ces événements et le risque potentiel qu'ils génèrent le long du littoral azuréen. C'est pourquoi une seconde approche est proposée : une analyse de risque par normalisation.

Ce chapitre s'organise en trois parties. Tout d'abord, il s'est avéré nécessaire de poser des hypothèses d'analyse de risque. Elles sont applicables quelle que soit la méthodologie appliquée. Ensuite, une focalisation est faite sur la méthodologie semi-quantitative par approche indicielle. Cette dernière ne revient pas en détail sur les traitements réalisés sur l'aléa ([Chapitre 9](#)) et la vulnérabilité ([Chapitre 12](#)). Enfin, la

méthodologie du risque normalisée est introduite. Celle-ci reprend en détails les nouveaux traitements appliqués à l'aléa et à la vulnérabilité.

1. Hypothèses fixées pour la réalisation de cette étude de risque

L'aléa est défini pour la totalité d'un territoire d'étude, au niveau des zones d'expositions. Ces dernières varient selon l'aléa et selon les scénarios. Dans ces travaux, l'analyse de l'aléa a été conceptualisée par une fonction g des variables d'intensité I et d'éloignement EI (Équation 10).

$$\text{Aléa} = g(I, EI)$$

Équation 10 : Définition de l'aléa tsunami

Le risque est théoriquement défini par une fonction f (Équation 11) des variables d'Aléa et de Vulnérabilité Territoriale Vt . Cette dernière est elle-même une fonction h des variables d'enjeux territoriaux E_i .

$$\text{Risque} = f(\text{Aléa}, Vt), \text{ avec } Vt = h(E_i)$$

Équation 11 : Détermination de la fonction du risque

Dans le présent travail, nous avons tenté de définir au mieux les variables mises en jeu dans la notion de risque, qu'il s'agisse des variables d'analyse de l'aléa (indice d'intensité I (Équation 14) et indice d'éloignement normalisé EI (Équation 15) ; ou des variables d'analyse de la vulnérabilité territoriale, ici caractérisée via une liste **non exhaustive** des enjeux territoriaux E_i . En théorie, pour un territoire et un aléa donné, une connaissance de ces variables devrait permettre de quantifier la notion de risque.

Quelle que soit la méthode d'analyse choisie, semi-quantitative avec tableau de croisement, ou normalisée, une description des fonctions f , g , h liées au risque devrait tenir compte de plusieurs hypothèses. Les fonctions sont considérées **linéaires**. Il convient de déterminer quel est le poids de chaque variable I , EI et E_i , *i.e.* **leur pondération**. Il est nécessaire de définir quelle est leur **temporalité**, c'est-à-dire comment elles sont synchronisées entre elles, avec des variations jours/nuits et entre les saisons.

1.1. Première hypothèse : la fonction risque est une fonction linéaire

Une fonction linéaire est une fonction de degrés un, représentée graphiquement par une droite. Il s'agit de la forme la plus simple d'une fonction. Appliqué à la question du risque, cela signifie que les différentes variables n'interagissent pas avec elle-même et entre elles. Cette hypothèse, peut s'appliquer dans certains cas pour les

interactions entre l'aléa et la vulnérabilité. En revanche, en ce qui concerne les enjeux, cette hypothèse est plus controversée.

Les enjeux majeurs pris en considération dans cette étude, qui sont pour rappel non exhaustifs et qui correspondent aux structures stratégiques d'un territoire, peuvent dans la réalité interagir les uns avec les autres. Par exemple, le réseau routier peut avoir un impact sur d'autres enjeux comme les secours ou les hôpitaux. Ne disposant d'aucune donnée quantitative permettant d'évaluer ces interactions (physiques et statistiques), l'hypothèse de linéarité a ainsi été faite.

1.2. Deuxième hypothèse : les variables de la fonction ne sont pas pondérées

Si l'on admet que toutes ces variables sont indépendantes entre elles, on ne connaît pas leur poids respectif dans les fonctions Risque, Aléa et Vulnérabilité territoriale. Par ailleurs, même dans l'hypothèse où ces fonctions seraient connues, on suspecte que les données et informations nécessaires pour les contraindre seraient hors de portée. De plus, il peut s'avérer éthiquement difficile et questionnable d'établir une pondération des enjeux, plus particulièrement en ce qui concerne les enjeux humains.

Les croisements de deux variables utilisés dans l'approche semi-quantitatives, comme ceux proposés par Manche (1997) (Tableau 39), sont conceptuels. Leur combinaison de caractéristiques (faible, moyen, fort) aboutit à une même classification (faible, moyen, fort) sans que l'on sache réellement la frontière entre chacune des caractéristiques dans le résultat final. Dans l'hypothèse d'une pondération entre les différentes variables, les résultats seraient différents (Tableau 38).

Risque	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité moyenne	Vulnérabilité forte	Risque	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité moyenne	Vulnérabilité forte
Aléa faible	Risque faible	Risque moyen	Risque fort	Aléa faible	Risque faible	Risque faible	Risque faible
Aléa moyen	Risque faible	Risque moyen	Risque fort	Aléa moyen	Risque moyen	Risque moyen	Risque moyen
Aléa fort	Risque faible	Risque moyen	Risque fort	Aléa fort	Risque fort	Risque fort	Risque fort

Tableau 38 : Exemple de tableau de croisement entre la vulnérabilité et l'aléa avec pondération pour la détermination du niveau de risque

Ces tableaux (Tableau 38) cherchent à montrer que, dans l'hypothèse d'une pondération des variables, l'une viendrait à prendre le dessus sur l'autre. Il serait donc possible de définir le risque par sa variable la plus « forte ». Or, les études historiques aléa centrées ont démontré que la vision selon laquelle une étude de risque correspondait uniquement à une analyse de l'aléa n'était pas suffisante et incomplète. Quant à l'analyse uniquement centrée sur la vulnérabilité, elle s'avère également incomplète. Il est nécessaire d'analyser le risque pour un aléa particulier, il n'est donc pas possible de dissocier le territoire de son exposition à une ou des menaces. La pondération serait ainsi plus subtile.

Cette question de la pondération s'applique également pour les variables qui composent le risque c'est-à-dire l'aléa et la vulnérabilité. Ces deux composantes sont elles-mêmes constituées de plusieurs variables dont les liens et les poids ne sont pas connus. Dans le cas de la vulnérabilité par exemple, de nombreux enjeux sont pris en considération. Il est peu probable que l'ensemble de ces derniers dispose du même poids et de la même importance. Il est toutefois difficile de les classer, de les organiser, de les pondérer.

Dans ces travaux, nous ne parvenons à répondre ni à la question de la pondération, ni à la faisabilité de la quantification de la notion de risque. C'est pourquoi des tableaux de croisements (Manche, 1997) sont utilisés dans une approche, et dans l'autre la normalisation est utilisée. Quelle que soit l'approche, aucune pondération n'est appliquée. L'ensemble des variables dispose ainsi du même poids et de la même importance.

1.3. Troisième hypothèse : la temporalité n'est pas incluse dans la fonction risque

Un évènement se produit avec une spatialité et une temporalité particulière, qui peut avoir un impact sur la vulnérabilité du territoire ainsi que sur les dégâts occasionnés. La spatialité est comprise dans l'analyse de l'aléa et plus particulièrement dans les zones impactées. La temporalité quant à elle n'est pas directement intégrée à l'étude.

Des scénarios de risque, qui seraient fonction de la vulnérabilité du territoire et de l'aléa de référence choisis, devraient alors être mis en place. Selon l'heure de la journée ou la saison, les fréquentations et les déplacements de populations sont différents, ce qui peut augmenter ou diminuer les pertes et les dommages. Plusieurs scénarios temporels peuvent alors être envisagés : le moment de la journée (jour/nuit, heures de pointes/heures creuses), la météo (beau temps/mauvais temps, été/hiver), la période (vacances scolaires/période normale, semaine/week-end). La **temporalité** serait donc un élément primordial à intégrer à l'analyse de vulnérabilité et de risque. Elle permettrait l'établissement de scénarios et la distinction entre différentes périodes.

1.3.1. A l'échelle de la journée

L'heure de la journée pendant laquelle va se produire le tsunami, engendrera de grandes différences au niveau des dégâts. La première à noter est la différence urne-diurne. La journée, la population occupe l'ensemble du territoire, plus particulièrement les lieux publics comme les rues piétonnes, les routes, les promenades de bord de mer, les plages. Un tsunami se produisant en journée impactera un grand nombre de personnes et de dégâts. En revanche, s'il se produit dans la nuit et si l'emprise spatiale du tsunami se limite à la frange littorale, nous pouvons supposer que les dégâts seront moindres. La nuit, la grande majorité des personnes sont dans leur logement et non dans les rues, limitant les éléments exposés, et donc les dégâts. Ceci ne s'applique évidemment pas pour les mégas tsunamis, qui détruisent habitations et bâtiments et pour lesquels, quelle que soit la temporalité, les dégâts seront considérables.

Une seconde différence à noter est celle qui existe entre les heures de pointe et les heures creuses. Au sein de la même journée il existe des différences de fréquentations, qui dépendent principalement des mouvements journaliers de la population, plus particulièrement les trajets domicile-travail. Ces horaires sont fixes d'un jour de la semaine à l'autre et peuvent donc être prévus. Ils sont généralement compris entre 8 heures et 10 heures le matin, et 16 heures trente et 19 heures trente. Ces horaires sont donc fortement vulnérables à un tsunami puisque de nombreuses personnes sont sur les axes de circulations principaux (autoroute A8, routes de bord de mer comme la Croisette ou la Promenade des Anglais).

Une variation temporaire s'observe également les jours de week-end ou fériés quant à la fréquentation des bords de mer (promenades, plages). Ceux-ci sont davantage utilisés en fin de matinée, les après-midi et début de soirée. Le public peut toutefois varier selon les horaires.

1.3.2. Le rôle de la météo

La côte azurée, densément peuplée, dispose d'une population locale qui s'approprie le littoral de manière quasi-permanente, avec des activités qui diffèrent selon la période de l'année. Il est donc courant, dès qu'il fait beau, de voir des gens dehors, se promener, courir et faire du vélo sur les promenades, se reposer ou pêcher sur les plages et ce, quelle que soit la période de l'année. Un tsunami se produisant un jour de beau temps, ferait donc plus de victimes que s'il se produisait un jour de pluie.

Il existe cependant une nette différence entre les saisons. Les périodes creuses, comme l'automne et l'hiver, sont principalement composées de la population locale. En revanche, dès que le temps s'améliore, le printemps et l'été, de nombreux touristes affluent sur le littoral azuréen, augmentant ainsi la population et posant le problème du manque de connaissance du territoire par ces populations non permanentes. Les dégâts seraient beaucoup plus importants en période estivale qu'en période « creuse ».

1.3.3. Les périodes travaillées versus les périodes de loisirs

D'autres différences peuvent être observées selon la période de la semaine ; les jours travaillés ou le week-end, ou les différentes périodes scolaires : périodes normales et vacances scolaires. Quelle que soit la période, la population locale profite des différents éléments que propose la frange littorale. Il est courant le week-end, lorsque le temps le permet, de voir les promenades et les plages se remplir. Il y a une vraie appropriation du littoral azuréen par la population locale.

La période des vacances scolaires est particulière puisque la région dispose de nombreux avantages (climat, proximité de la mer et des montagnes, cadre de vie), ce qui en fait un véritable attrait touristique. Les vacances scolaires estivales sont celles qui attirent le plus de vacanciers, français ou étrangers. Ces périodes sont donc particulièrement vulnérables, en cas de tsunami.

Ces différents scénarios temporels ont principalement un effet sur les pertes humaines, pouvant les augmenter ou les diminuer. Dans cette étude, il est ainsi considéré que l'ensemble des enjeux sont concomitants, c'est-à-dire qu'ils fonctionnent tous en même temps. Cette synchronisation correspond ainsi au « *worst case scenario* ». Or, dans la réalité, la probabilité que tous ces enjeux fonctionnent simultanément est faible, notamment pour les enjeux qui accueillent du public (ERP). Par exemple, les plages sont généralement plus fréquentées lorsque les écoles ne le sont pas (vacances scolaires).

Une fois encore, l'absence de données ne nous permet pas d'intégrer la temporalité dans ces études de vulnérabilité et de risque. L'une des pistes qui permettrait d'intégrer la temporalité dans une étude de risque serait la scénarisation de l'exposition, qui serait intégrée à l'analyse de la vulnérabilité (Romeo, 2019).

Une analyse de risque est complexe par la multitude d'éléments qu'elle comprend et par la difficulté de leur mise en application. Ces différentes hypothèses permettent de cadrer les analyses de risques proposées, qu'il s'agisse de l'approche semi-quantitative ou normalisée. Les deux méthodologies proposées sont donc construites à partir de ces hypothèses.

2. Une approche géographique du risque de tsunami via une analyse semi-quantitative

Une analyse de risque peut s'avérer complexe de par le nombre de variables à prendre en considération et par la relation entre ces variables. Cette dernière est généralement représentée sous forme d'équation (Équation 12) :

$$R = f(\text{Aléa}, \text{Vulnérabilité})$$

Équation 12 : Définition du risque

Selon cette représentation, aucune indication n'est donnée quant au lien existant entre les variables aléa et vulnérabilité.

Le risque est également représenté comme le produit de l'aléa et de la vulnérabilité (Équation 13):

$$R = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité}$$

Équation 13 : Représentation du risque comme un produit

Il est considéré dans cette représentation qu'en l'absence totale de l'une ou de l'autre des variables (un des facteurs nul) le risque serait nul. Or, lors de sa mise en application, la légitimité de l'utilisation d'une multiplication se pose. A cela viennent s'ajouter de nombreux autres questionnements comme le manque de données, l'uniformité des données, la pondération, etc. L'uniformité des données, par exemple,

est palliée par la mise en indice utilisée par l'approche proposée. Mais certains éléments ne peuvent pas être compensés et peuvent apporter un biais d'analyse.

Le risque correspond donc au croisement entre un aléa et une vulnérabilité. Ces deux variables ont été étudiées séparément et ont été transformées sous forme indicielle. L'aléa et la vulnérabilité disposent ainsi d'une même échelle, fixée en trois niveaux : faible, moyen, fort. Ces variables sont croisées selon une clé de détermination à trois niveaux (Gleyze, 2001). Ces clés de détermination sont représentées sous forme de tableaux à double entrée qui permettent de quantifier le risque en fonction de niveaux d'aléa et de vulnérabilité (Manche, 1997) (Tableau 39).

Risque	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité moyenne	Vulnérabilité forte
Aléa faible	Risque faible	Risque faible	Risque moyen
Aléa moyen	Risque faible	Risque moyen	Risque fort
Aléa fort	Risque moyen	Risque fort	Risque fort

Tableau 39 : Mise en indice du risque en fonction de l'aléa et de la vulnérabilité

Trois niveaux de risques de tsunami sont donc obtenus, toujours identiques aux classes précédentes : faible, moyen et fort. Ceci s'applique parfaitement dans le cadre d'une analyse de risque focalisé sur l'aléa et la vulnérabilité territoriale. Ce croisement est un croisement théorique et conceptuel qui présente certaines limites, dont la non pondération des différentes variables. De par son approche semi-quantitative, il n'est pas possible de quantifier le risque et donc de comparer différents événements entre eux. Une approche normalisée du risque est ainsi proposée.

3. Vers une approche normalisée du risque

Les analyses de risque peuvent s'avérer complexes de par le nombre de variables prises en considération et de par l'aspect dynamique (spatial et temporel). Les méthodologies généralement utilisées sont qualitatives ou semi-quantitatives, comme celle présentée précédemment. Nous avons ici cherché à quantifier le risque afin de pouvoir réaliser une comparaison entre différents événements.

Il peut s'agir de deux événements frappant un même territoire, ici la comparaison des différents scénarios Ligure par exemple. La comparaison peut être faite pour un même événement qui frappe différents territoires, un tsunami Ligure qui touche la France et l'Italie, et ainsi comparer le risque hypothétique de ces deux pays. Ou encore, la comparaison peut être faite entre deux événements complètement distincts par leur origine et leur localisation, permettant de comparer le tsunami de 2004 dans l'océan Indien et celui de 2011 au Japon par exemple.

Pour se faire, nous proposons d'utiliser la normalisation afin d'uniformiser la donnée en des valeurs comprises entre 0 et 1. Des traitements statistiques simples peuvent ainsi être réalisés, comme la moyenne, la médiane ou l'écart type. Une comparaison peut alors être faite entre les extrêmes (minimums et maximums), ainsi que de la moyenne. Cette comparaison numérique s'accompagne d'une cartographie permettant de faire ressortir spatialement les extrêmes.

Nous présentons ici les prémices de réflexions de la mise en place d'une telle méthodologie. Les analyses de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque sont reprises afin d'appliquer une normalisation. Les différentes variables qui composent l'aléa et la vulnérabilité restent identiques. Une mise en indice demeure nécessaire ; elle ne nécessite toutefois pas une échelle d'indice uniforme en trois niveaux comme cela est le cas dans l'approche semi-quantitative proposée.

3.1. Normalisation de l'aléa tsunami qui permet une conservation de la donnée

Une approche quantitative par la normalisation de l'aléa aurait pu être réalisée à partir des valeurs mises en indices, comme proposé dans l'approche semi-quantitative. Or, cette dernière impose une perte d'information afin d'obtenir uniquement 3 niveaux d'indices (faible, moyen, fort). Il est alors apparu pertinent de reprendre les facteurs d'analyse de l'aléa afin de conserver certaines données, notamment en ce qui concerne l'analyse de l'intensité.

3.1.1. Normalisation de l'intensité d'un tsunami

Les simulations numériques de propagation de tsunami permettent d'obtenir diverses données sur l'impact qu'un tsunami peut avoir sur le littoral, comme les courants ou les hauteurs d'inondations. A partir de celles-ci, une échelle d'intensité a été créée (Chapitre 6) et a été appliquée au littoral azuréen (Chapitre 8).

Cette intensité proposée a été sélectionnée comme étant l'une des variables d'analyse de l'aléa tsunami. Elle permet en effet d'intégrer les données de courants et les données de hauteurs d'inondation (la magnitude) issues des modèles numériques. Elle contient également des informations quant à la difficulté de déplacement des personnes et aux potentiels dégâts occasionnés (Tableau 10, Chapitre 6). Nous ne nous attarderons pas ici sur la description de cette échelle d'intensité déjà présentée plus tôt dans ce manuscrit. Un tableau synthétique simplifié est toutefois présenté pour mémoire (Tableau 40).

Cette échelle d'intensité de tsunami contient sept niveaux d'indices et s'étend de 0 à 6. Attention, le fait que la valeur zéro soit intégrée ne signifie pas automatiquement qu'elle soit nulle. Cela peut aussi signifier que l'aléa est présent mais que ses effets (physique et dégâts) seront de faibles ampleurs. Le déplacement des personnes âgées et des enfants peut s'avérer difficile (Tableau 10, Chapitre 6) et des personnes peuvent être blessées.

La normalisation de l'intensité de l'aléa nous donne la relation suivante (Équation 14), l'indice maximal correspondant ici à 6.

$$\text{Intensité (I)} = \frac{\text{Niveau d'indice d'intensité}}{\text{Indice maximal d'intensité}}$$

Équation 14 : Normalisation de l'intensité de l'aléa (I)

Niveau d'indice d'intensité I	Magnitude
0	Hauteur d'eau inférieure à 0.5 m et courant inférieur à 0.25 m.s ⁻¹ .
1	Hauteur d'eau de 0.5 à 1 m pour un courant inférieur à 0.25 m.s ⁻¹ et inférieure à 1 m pour un courant compris entre 0.25 à 0.5 m.s ⁻¹ .
2	Hauteur d'eau entre 1 et 2 m pour un courant inférieur à 0.5 m.s ⁻¹ et hauteur d'eau inférieure à 1 m pour des courants compris entre 0.5 et 1 m.s ⁻¹ .
3	Hauteur d'eau entre 1 et 2 m pour un courant compris entre 0.5 et 1 m.s ⁻¹ , et inférieure à 2 m pour un courant compris entre 1 et 1.5 m.s ⁻¹ .
4	Hauteur d'eau de 2 à 3 m pour un courant inférieur à 1.5 m.s ⁻¹ et inférieure à 3 m pour un courant compris entre 1.5 et 3 m.s ⁻¹ .
5	Hauteur d'eau de 3 à 6 m pour un courant inférieur à 3 m.s ⁻¹ , et inférieure à 6 m pour un courant compris entre 3 et 4.5 m.s ⁻¹ .
6	Hauteur d'eau supérieur à 6 m pour des courants inférieurs à 4.5 m.s ⁻¹ et des hauteurs d'eau supérieures à 0 pour des courants supérieurs à 4.5 m.s ⁻¹ .

Tableau 40 : Intensité de l'aléa tsunami vs. sa magnitude.

L'intérêt de la normalisation ici est de conserver l'ensemble de classes initiales, de ne pas les réduire et ainsi conserver l'ensemble de l'information. Il y a donc un gain de précision par rapport à la méthode semi-quantitative. Cette normalisation aboutit sur des valeurs comprises entre 0 et 1. Le même exercice est réalisé pour la seconde variable de caractérisation de l'aléa, l'éloignement.

3.1.2. Normalisation de la variable d'éloignement

Reprenant les mêmes variables d'analyse que celle proposée par l'approche semi-quantitative, l'éloignement de la zone d'inondation a été intégré. Ce dernier correspond, de manière simplifiée, à l'exposition à la menace. Plus l'on se rapproche de la zone de danger, plus l'on est susceptible d'être directement impacté. Cette variable a toutefois subi quelques modifications quant à son analyse. Précédemment détaillé en trois classes, l'éloignement est ici constitué de quatre classes (Tableau 41) : négligeable, faible, moyen et fort. Il aurait tout aussi bien pu être constitué d'une multitude de classes (5, 10, 20, etc.).

La principale distinction avec la classification précédente (en trois classes) est la distinction de la zone inondée et de la zone déterminée à quarante mètres de cette dernière. La première est déterminée par les limites d'inondation défini par les sorties

de modèle numérique. La zone de quarante mètres, quant à elle, correspond à l'erreur numérique potentielle, les simulations numériques étant réalisées à partir de mailles de quarante mètres. Dans l'approche semi-quantitative, ne disposant que de trois classes, le parti a été pris d'intégrer cette marge d'erreur potentielle à la zone d'inondation. Toutefois, il s'agit d'un espace tampon dont on ne sait pas avec certitude s'il sera directement impacté ou non. Ici, disposant de plus de flexibilité quant au nombre de classes, il a été décidé de dissocier ces deux espaces.

Niveau d'indice	El : Eloignement de la zone d'inondation
0	A plus de 500 m de la zone inondée
1	A moins de 500 m de la zone inondée
2	A 40 m de la zone inondée
3	A l'intérieur de la zone inondée

Tableau 41 : Mise en indice de l'aléa à partir de l'éloignement de la zone d'inondation

La zone inondée est ainsi caractérisée par l'indice le plus fort, ici trois, puisqu'elle est directement exposée à la menace, ici une vague de tsunami. La zone de quarante mètres est, quant à elle, caractérisée par un indice moyen (2) puisqu'elle correspond à une zone d'incertitude. En l'état, on ne sait pas avec exactitude si elle est directement impactée. Si ce n'est pas le cas, elle sera indirectement touchée par les mouvements de foules ou des projections de galets.

Un troisième espace, plus large cette fois, a été défini par un indice faible (1). Ce dernier, d'un éloignement de moins de cinq cents mètres de la zone directement impactée (zone 3), est considéré comme une zone potentiellement impactée. Elle est indirectement touchée pour diverses raisons, que ce soit par le déplacement de la foule, de potentiels mouvements de panique, ou autre. Il s'agit d'une zone qui sera perturbée dans son fonctionnement « quotidien » par l'arrivée d'un tsunami. Cette valeur de cinq cents mètres est proposée avec un certain degré d'arbitraire. Il a toutefois été déterminé en tenant compte d'une distance qu'il est possible de parcourir pour toute personne (adulte, enfant, personne âgée, etc.) afin de s'éloigner de la zone d'impact.

La dernière zone, la plus éloignée de la zone d'inondation, soit à plus de 500 mètres de cette dernière, est considérée en risque négligeable. Bien que non directement impactée par un tsunami car non située en zone inondable, elle peut connaître des perturbations plus ou moins importantes (embouteillages, etc.). Dans cette étude, nous considérons que, même si un espace n'est pas directement impacté, il peut être indirectement touché. Le territoire dans son ensemble est exposé ; l'aléa nul n'existe donc pas.

Une fois mis sous forme d'indices, ces quatre zones d'éloignement sont à leur tour normalisées. Pour ce faire, l'équation suivante est appliquée (Équation 15) :

$$\text{Eloignement (El)} = \frac{\text{Niveau d'indice d'éloignement}}{\text{Indice d'éloignement maximal (3)}}$$

Équation 15 : Normalisation de l'éloignement (El)

Une fois encore les valeurs obtenues sont comprises entre 0 et 1. Les deux variables de l'analyse de l'aléa étant à présent normalisées, il est possible de combiner les deux pour obtenir un indice d'aléa de tsunami normalisé.

3.1.3. Obtention de valeurs normalisées de l'aléa grâce à la combinaison de l'éloignement de la zone d'inondation et de l'intensité

Afin d'obtenir une seule carte d'aléa comprenant l'ensemble des communes littorales du département des Alpes-Maritimes, les deux variables précédemment présentées (éloignement de la zone d'inondation et intensité) ont été combinées. Pour ce faire, il s'agit de partir des résultats obtenus précédemment, c'est-à-dire de l'éloignement et de l'intensité normalisés, tous deux compris entre 0 et 1, et d'appliquer la relation suivante (Équation 16) :

$$Aléa\ total = \frac{Intensité\ normalisée + éloignement\ normalisé}{Valeur\ maximale\ potentiellement\ obtenue\ (2)}$$

Équation 16 : Normalisation de l'aléa pour obtenir un valeur totale

L'aléa total calculé correspond donc à l'addition de l'éloignement et de l'intensité, tous deux normalisés, divisés par la valeur maximale potentiellement obtenue, c'est-à-dire 2. Est ainsi obtenu pour chaque espace du territoire d'étude une valeur, comprise entre 0 et 1, marquant le niveau d'aléa total. Une agrégation a été réalisée sous ArcGis entre ces deux couches. La formule précédente a ensuite été appliquée dans la table attributaire de la couche obtenue.

Cette méthodologie mène à une cartographie de l'aléa tsunami qui permet d'avoir une vision globale de l'impact d'un tsunami sur le territoire, tout en faisant ressortir les particularités locales au niveau des zones d'inondations. Afin d'arriver à une analyse de risque, à l'aléa vient s'ajouter la méthodologie d'analyse de la vulnérabilité territoriale qu'il convient de normaliser également.

3.2. La normalisation de la vulnérabilité territoriale

La vulnérabilité territoriale se base sur l'analyse des enjeux majeurs d'un territoire afin d'en faire ressortir les points sensibles. Dans ces travaux, dix-huit enjeux majeurs ont été identifiés, analysés et mis en indice (Chapitre 11). Leur intégration en l'état ne permet pas l'obtention d'une analyse de risque normalisée. Il convient donc de les normaliser en amont.

Pour ce faire, chaque indice est conservé à partir de son analyse indicelle (Chapitre 11). C'est au moment de la combinaison de l'ensemble des enjeux que la normalisation intervient. L'ensemble de ces enjeux sont agrégés pour obtenir une seule couche de vulnérabilité territoriale. Puis la fonction suivante est réalisée dans la table attributaire de la couche obtenue (Équation 17).

$$Vulnérabilité\ Territoriale\ Totale = \frac{VT}{\text{Nombre maximal de vulnérabilité}}$$

Équation 17 : Normalisation de la vulnérabilité territoriale totale

Là où dans la méthodologie semi-quantitative, les enjeux étaient additionnés, puis classés en trois degrés (faible, moyen et fort), ici, ils sont également additionnés mais sont divisés par la valeur théorique maximale obtenue par l'addition précédente, c'est-à-dire la somme maximale des enjeux. Dans ces travaux, disposant de dix-huit enjeux et de trois degrés synthétiques, les sommes calculées sont divisées par cinquante-quatre.

A la suite de cette normalisation de la vulnérabilité territoriale, les résultats obtenus sont compris entre 0 et 1. Leur format est donc identique à celui obtenu pour l'analyse de l'aléa. Une combinaison des deux peut alors être réalisée pour obtenir le risque normalisé.

3.3. L'analyse normalisée du risque, une combinaison entre l'aléa et la vulnérabilité territoriale

La méthodologie ici proposée passe par une normalisation de la donnée qui permet d'obtenir des valeurs quantitatives homogènes comprises entre 0 et 1. Les parties précédentes détaillent justement l'obtention de ces données pour l'aléa et pour la vulnérabilité territoriale. Le risque tel que nous le proposons (Équation 18), correspond alors à une combinaison linéaire non pondérée (addition) des données de l'aléa et de la vulnérabilité. Le tout est divisé par la valeur maximale potentiellement obtenue, c'est-à-dire 2, permettant l'obtention de valeurs normalisées. Ceci peut être représenté par l'équation suivante :

$$\text{Risque territorial } \tau = \frac{\text{AléaT} + \text{Vulnérabilité TerritorialeT}}{\text{Valeur maximale potentiellement obtenue}}$$

Équation 18 : Normalisation du risque territoriale T

A ce stade de l'analyse, nous disposons donc de deux couches de SIG distinctes, l'une pour l'aléa et l'autre pour la vulnérabilité. Ces dernières vont être agrégées afin de n'obtenir qu'une seule couche contenant l'ensemble de l'information géographique et numérique. A l'intérieur de la table attributaire de cette dernière est appliquée la formule du risque territoriale total (Équation 18) qui aboutit sur des données de risque normalisées.

Une valeur de risque normalisé est ainsi obtenue en tout point du territoire et est comprise entre 0 et 1. Il est alors possible de regarder les statistiques des données obtenues. La moyenne et les extrêmes (valeurs maximales et minimales) peuvent par exemple servir de point de comparaison entre différentes hypothèses d'aléa (ici S1887, SHyp, STot), entre différents territoires (deux communes différentes ou deux

états différents), ou encore entre deux évènements complètement dissociés à la fois par le scénario et le territoire.

Pour qu'une comparaison soit possible, il faut toutefois que la méthodologie appliquée soit identique. En revanche, le point faible de cette approche est que ces données normalisées ne permettent pas de qualifier le risque, c'est-à-dire qu'aucune correspondance n'est établie entre les données obtenues et un niveau de risque (faible, moyen ou fort).

Les données obtenues sont difficilement interprétables cartographiquement. Pour pallier à cela, nous proposons la démarche suivante. (1) Pour chaque évènement analysé (chaque scénario dans notre cas) est identifiée la valeur du risque maximum local (R_{max}). Il s'agit de relever la plus haute valeur obtenue et la localisation associée. Travaillant cartographiquement avec des données de type vecteur, ces espaces sont des polygones de taille variable. (2) L'ensemble des valeurs de risque normalisé obtenues est normalisé une seconde fois par la valeur de risque maximum local. Le risque territorial relatif est ainsi obtenu (Équation 19) :

$$\text{Risque Territorial } R = \frac{\text{Risque Territorial } T \times 100}{R_{max}}$$

Équation 19 : Risque territorial relatif

La multiplication par cent permet l'obtention de pourcentage, plus parlant que des données comprises entre 0 et 1. On parlera alors d'un taux de risque territorial relatif. Ce dernier permet de mettre l'accent sur les espaces à risque élevé pour la région (lorsque l'on s'approche de 100%) et les espaces à risque faible pour la zone d'étude (c'est-à-dire proche de 0%). La possibilité de comparaison d'un espace à un autre est alors perdue. C'est pourquoi il est important d'avoir cette double normalisation qui permet dans un premier temps de comparer statistiquement deux évènements entre eux, et dans un second temps d'obtenir des données locales qui vont être cartographiées.

4. Conclusion

Le risque est un objet d'étude qui reste complexe et présente encore de nombreuses incertitudes. Ces travaux demandent donc d'être approfondis afin de mieux contraindre cette analyse. Bien qu'analysé et étudié, « *le risque est une incertitude quantifiée, il témoigne d'un danger potentiel susceptible de naître d'un événement ou d'un concours de circonstances, mais il n'est qu'une éventualité, il peut ne pas se produire dans une situation envisagée.* » (Le Breton, 2017).

A ce stade, n'ayant aucune donnée pour estimer les divers coefficients et puissances, ceux-ci ne peuvent être utilisés. La méthodologie du risque utilisée pour la réalisation de la cartographie du risque prend donc comme hypothèses : une **linéarité** de la fonction, une **non-pondération** des variables et une **synchronisation**

temporelle des différentes composantes, c'est-à-dire qu'elles sont considérées comme étant toutes fonctionnelles au même moment.

Dans notre cas d'étude, les scénarios de ruptures proposés (S1887, SHyp et STot) n'intègrent pas le facteur temps. Le risque est ainsi évalué à partir de cette temporalité « fonctionnelle » potentiellement appliqué aux enjeux. Il serait alors possible d'estimer le même risque pour des périodes différentes (jours-nuit, hiver-été, etc.). Une estimation de l'ensemble des coefficients ou exposants pourrait constituer un enjeu de recherche et de poursuite de ce travail. Les cartes de risques présentées plus loin s'appuient sur ces hypothèses.

La poursuite de ce travail pourrait consister en une tentative d'estimation des coefficients mentionnés en s'appuyant sur des observations. Une autre manière de procéder, outre cette potentielle approche empirique de croisement de variables, serait d'en effectuer une étude probabiliste et d'intégrer des convolutions des variables mises en jeu.

Deux méthodologies ont ainsi été proposées : une semi-quantitative avec approche indicielle, passant par une mise en indice et des tableaux de croisement synthétique, et une approche normalisée utilisant également une mise en indice puis des normalisations. Chacune possède des avantages mais également des limites.

La première, davantage conceptuelle, permet avec des données à la fois qualitatives et quantitatives de caractériser aussi bien l'aléa, que la vulnérabilité ou le risque. Trois niveaux d'indices sont ainsi déterminés : faible, moyen et fort. Elle permet de qualifier le risque mais ne permet pas la comparaison entre différents événements. Les niveaux d'indices déterminés ne sont valables que pour la zone d'étude.

La seconde méthodologie cherche justement à quantifier le risque (par normalisation) dans l'optique d'une comparaison entre différents scénarios, différentes zones d'études. Celle-ci présente l'avantage de conserver un maximum de données grâce à la normalisation, là où la mise en indice engendre une perte d'information (3 catégories pour une multitude de valeurs). Elle se heurte toutefois rapidement aux difficultés d'absence de données ne permettant pas de cadrer et de définir avec précision les fonctions mathématiques nécessaires à son calcul. Elle ne permet pas non plus de qualifier le risque ; aucune correspondance n'existe entre une valeur et un niveau de risque.

Une cartographie du risque territorial est alors réalisée à partir des deux méthodologies exposées. Ces résultats permettent de faire ressortir les variabilités spatiales du risque territorial. Le chapitre suivant consiste en l'application directe de ces méthodologies et en l'interprétation des différentes cartographies obtenues, qu'il s'agisse des cartes d'aléa, d'enjeux, de vulnérabilité territoriale, de facteurs d'influence ou encore de risque territorial.

CHAPITRE 14 : APPLICATION DES DEUX METHODOLOGIES D'ANALYSE TERRITORIALE DU RISQUE DE TSUNAMI SUR LA COTE D'AZUR

Les méthodologies d'analyse de risque sont multiples et peuvent aborder divers aspects (sociaux, territoriaux, etc.). Dans ces travaux, deux méthodologies, à approches similaires, ont été proposées et détaillées dans le chapitre précédent (Chapitre 13). L'une, semi-quantitative, passe par la mise en indice des différentes variables et aboutit à une cartographie sous forme d'index. La seconde, une approche quantitative, consiste en la normalisation des variables. Sont ainsi obtenues des valeurs comprises entre 0 et 1. Elles sont ici appliquées au cas de l'aléa tsunami, dû à la sismicité locale, sur la bordure littorale des Alpes-Maritimes.

Avant de présenter ces résultats et la cartographie associée, un modèle conceptuel a été réalisé afin de synthétiser l'ensemble des informations prises en compte dans l'analyse de risque. Celle-ci nécessite en effet des analyses préliminaires de l'aléa, ici le tsunami (Partie II), et du territoire, ici les Alpes-Maritimes, qui passe par l'identification et l'étude des enjeux majeurs afin de déterminer la vulnérabilité territoriale. Quelle que soit la méthodologie utilisée, ce modèle conceptuel s'applique.

Les résultats sont présentés en deux temps : tout d'abord la cartographie du risque semi-quantitatif, puis le risque normalisé. Trois scénarios d'aléas ayant été réalisés, trois cartes de risque ont été faites, une par scénario. Pour chacune, bien que l'analyse soit réalisée à l'échelle de l'ensemble du littoral azuréen, la présentation est faite selon un découpage en trois parties (ouest, centre, est), afin que l'information soit claire sur les cartes réalisées.

1. Réflexions et réalisation d'un modèle conceptuel d'analyse du risque de tsunami

Ce modèle conceptuel a pour but de détailler la réflexion et la mise en place d'une méthodologie à la fois d'analyse de vulnérabilité territoriale et d'analyse de risque. Il est donc naturellement basé sur la définition du risque qui inclut à la fois la vulnérabilité et l'aléa et qui est généralement représentée comme suit (Équation 20) :

$$\text{Risque} = \text{aléa} \times \text{vulnérabilité} \text{ ou } R = f(\text{aléa}, \text{vulnérabilité})$$

Équation 20 : Différentes représentations du risque

Dans cette représentation, il est important de noter que théoriquement, ces deux variables sont indépendantes, décorréées. C'est l'association des deux, c'est-à-dire le risque, qui combine ces deux variables.

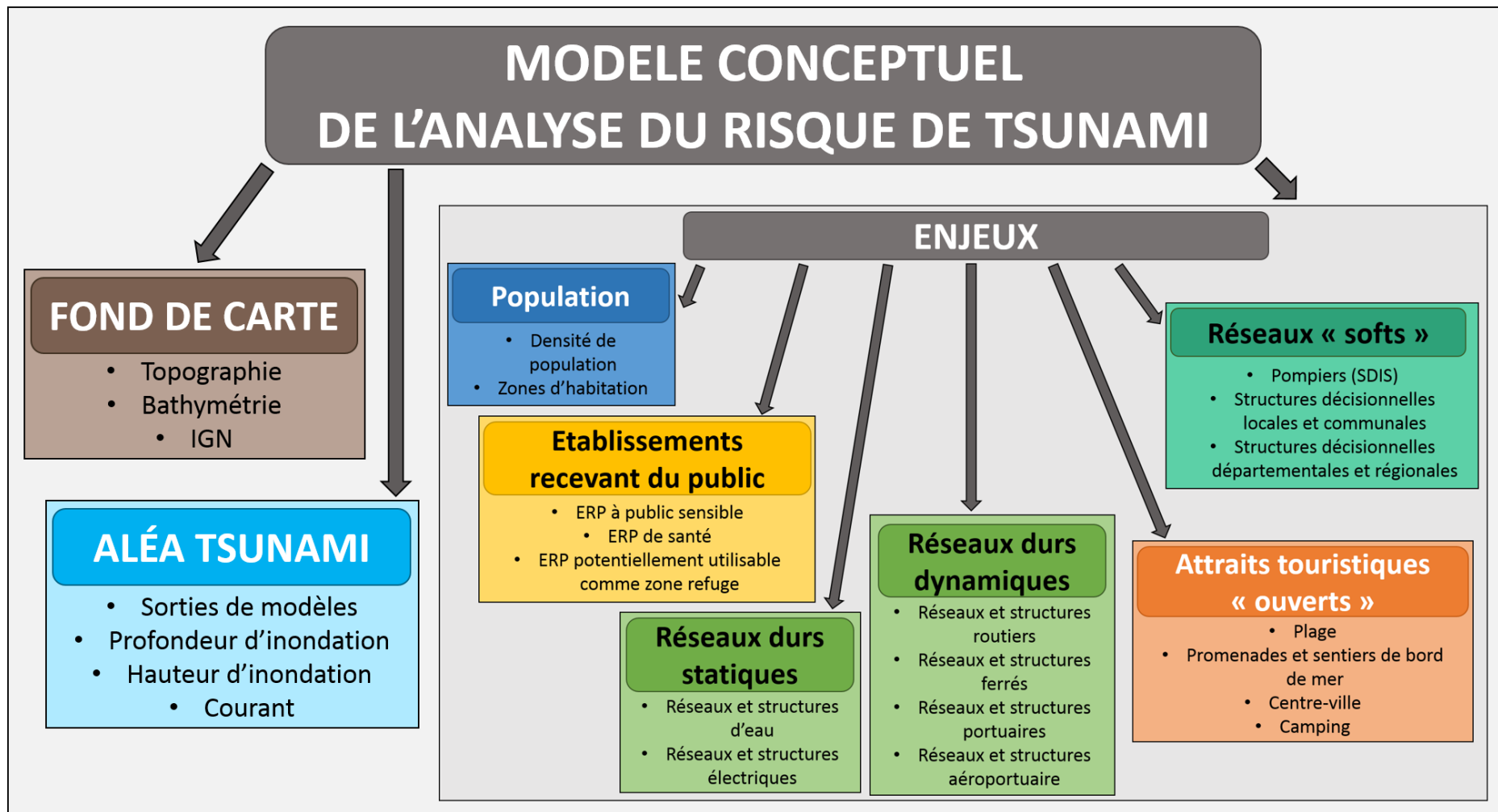


Figure 92 : Proposition d'un modèle conceptuel d'analyse du risque d'un territoire exposé aux tsunamis

La vulnérabilité englobe systématiquement des enjeux (Chapitre 10), il s'agit ici des enjeux majeurs car il a été choisi d'étudier la vulnérabilité territoriale. L'analyse des enjeux majeurs permet d'intégrer les structures principales du territoire et fait ressortir les espaces sensibles qu'il faut préserver en priorité. Lors de l'analyse de la vulnérabilité territoriale, une distance est prise par rapport à l'aléa. Le résultat d'une analyse de vulnérabilité territoriale est donc fortement similaire qu'il s'agisse d'une étude portant sur le risque de tsunami ou sur le risque de glissement de terrain par exemple. Les enjeux majeurs, cités ci-dessus (pompiers, hôpitaux, etc.) sont considérés comme étant les éléments génériques de la vulnérabilité territoriale, c'est-à-dire qu'ils sont conçus pour palier à TOUS les aléas qu'ils soient naturels ou anthropiques.

Le modèle conceptuel proposé (Figure 92) est ainsi composé de trois éléments principaux : l'espace support (fond de carte), l'aléa tsunami (sorties de modèles) et la vulnérabilité territoriale (enjeux majeurs). L'espace support permet de spatialiser l'information et de réaliser la cartographie du risque de tsunami. La cartographie du risque peut ainsi être réalisée, en combinant l'aléa et la vulnérabilité sur un espace support. Deux cartographies distinctes sont obtenues, une pour chaque méthodologie proposée. Commençons par l'approche semi-quantitative du risque.

2. Cartographie de l'approche semi-quantitative du risque – La qualification du risque via des indices

La cartographie du risque de submersion par tsunami dans les Alpes-Maritimes a été possible grâce aux étapes précédentes, c'est-à-dire l'analyse de l'aléa, via l'intensité et l'éloignement à la menace (exposition), et de la vulnérabilité territoriale, déterminée grâce aux enjeux majeurs du territoire. Deux méthodologies ont été présentées dans le chapitre précédent (Chapitre 13). Ici nous nous focalisons sur la première, l'approche semi-quantitative, qui permet la combinaison de l'aléa et la vulnérabilité grâce à un tableau de croisement (Manche, 1997).

Chaque variable du risque a été analysée séparément (Partie II et III) et mise sous forme d'indice. Sur l'ensemble de ces analyses, la mise en indice a été favorisée. Elle permet de traiter des données différentes (qualitatif et qualitatif) et d'attribuer des valeurs à la fois de qualité (niveau faible moyen ou fort) et qualitatives (respectivement 1, 2 et 3) facilitant ainsi les analyses.

Les cartes obtenues sont peu significatives et explicites à l'échelle du littoral départemental. La représentation et l'explication de ces dernières sont donc effectuées selon le même découpage que précédemment (ouest, centre et est). Ayant pris plusieurs scénarios d'aléa (S1887, SHyp, STot), trois cartes de risque sont présentées pour chaque zone géographique.

2.1. Cartographie du risque de tsunami indexé pour les communes de l'ouest du département

L'ouest du département est la partie du territoire la plus éloignée de la source sismique et donc du tsunami. Les analyses de l'aléa nous ont permis de faire ressortir le fait qu'uniquement quelques zones pourraient potentiellement être impactées, la principale étant le cap d'Antibes à cause du phénomène de focalisation sur les caps. Les espaces à risque moyen ou fort sont tous focalisés le long de la bordure littorale (Figure 93).

Quel que soit le scénario, le port de Cannes et la Croisette ressortent comme des zones à risque (fort pour le scénario extrême et moyen pour les deux autres) Il en va de même pour le port de Golfe-Juan, zone à risque moyen pour le scénario historique et à risque fort pour SHyp et STot. Les communes de l'extrême ouest ainsi que le Cap d'Antibes sont majoritairement considérées en risque faible lors du scénario S1887, à l'exception des plages de l'ouest (Juan-les-pins) et de l'est de la ville. Le scénario hypothétique est fortement similaire au scénario précédent. Apparaissent toutefois des zones d'aléa fort le long des plages d'Antibes avec des inondations légèrement plus prononcées.

Le scénario extrême expose une plus grande partie du territoire. La baie de Cannes, zone de plage, apparaît en vulnérabilité moyenne. Les parties sud des Iles de Lérins, ainsi qu'une partie centrale de l'extrémité ouest de l'île Sainte-Marguerite, sont caractérisées par un risque moyen. Ces îles, bien que non habitées (à l'exception d'une villa et d'une abbaye), sont fortement touristiques et grandement fréquentées, pouvant générer de nombreuses pertes humaines. La pointe de la Croisette, qui se situe dans le prolongement des Iles de Lérins, apparaît en vulnérabilité moyenne et forte. Il s'agit d'un espace principalement composé de plages où viennent se baigner les locaux.

La ville d'Antibes se voit plus fortement soumise au risque de tsunami ; de plus larges zones de risque moyen apparaissent à Juan-les-Pins et surtout à la plage de la Salis, et des espaces de risque fort ressortent le long de la route du bord de mer qui mène à Villeneuve-Loubet.

Cette zone, bien que la plus faiblement impactée du littoral, présente des nombreux espaces de risque moyen et quelques espaces à risque fort. Regardons à présent la cartographie du risque de tsunami pour la partie centrale du littoral.

2.2. Cartographie du risque de tsunami indexé pour les communes centrales du département

La zone centrale du littoral azuréen, qui s'étend de Villeneuve-Loubet à Beaulieu-sur-Mer, fait ressortir au premier abord des zones à risques (Figure 94) quel que soit le scénario : le port de Cros-de-Cagnes, l'aéroport de Nice, la Promenade des Anglais, le port de Nice, le port de Villefranche-sur-Mer et le Port de Beaulieu-sur-Mer.

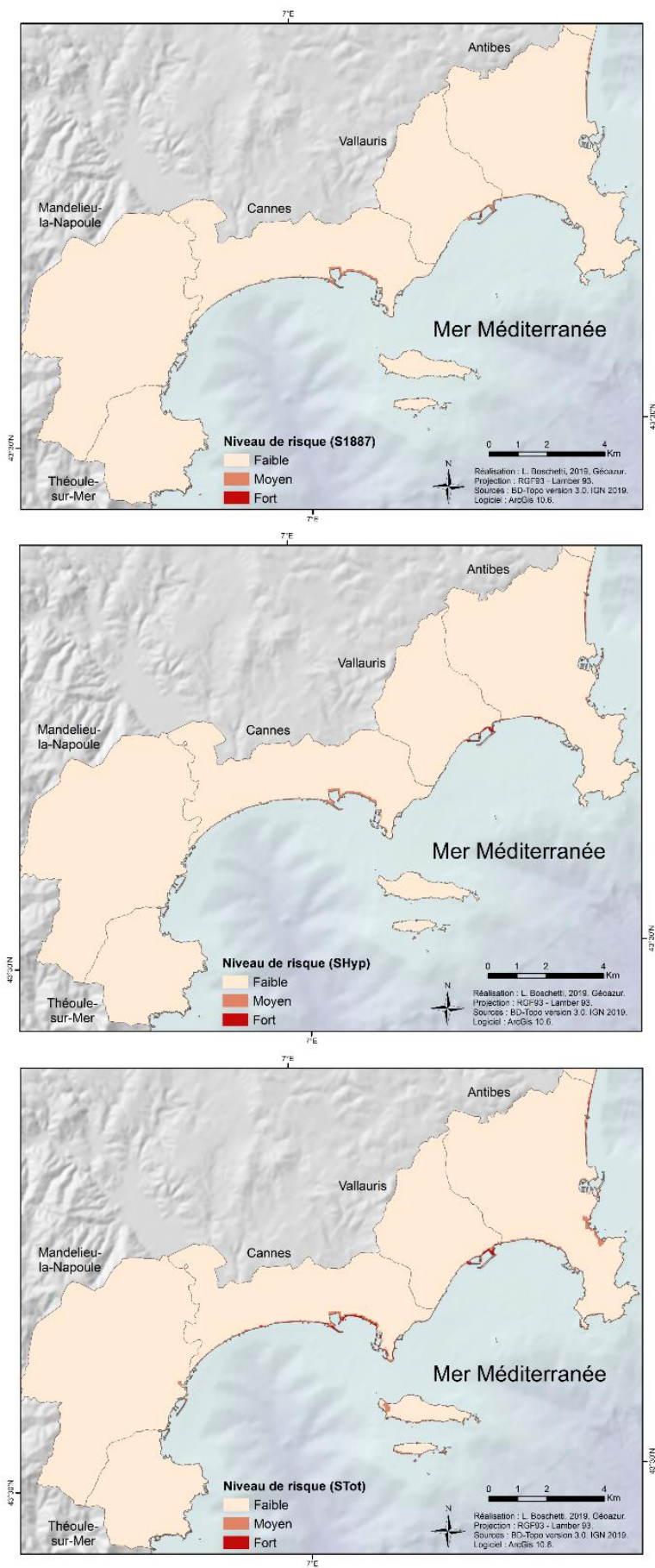


Figure 93 : Cartographie du risque de tsunami pour la partie ouest du littoral des Alpes-Maritimes

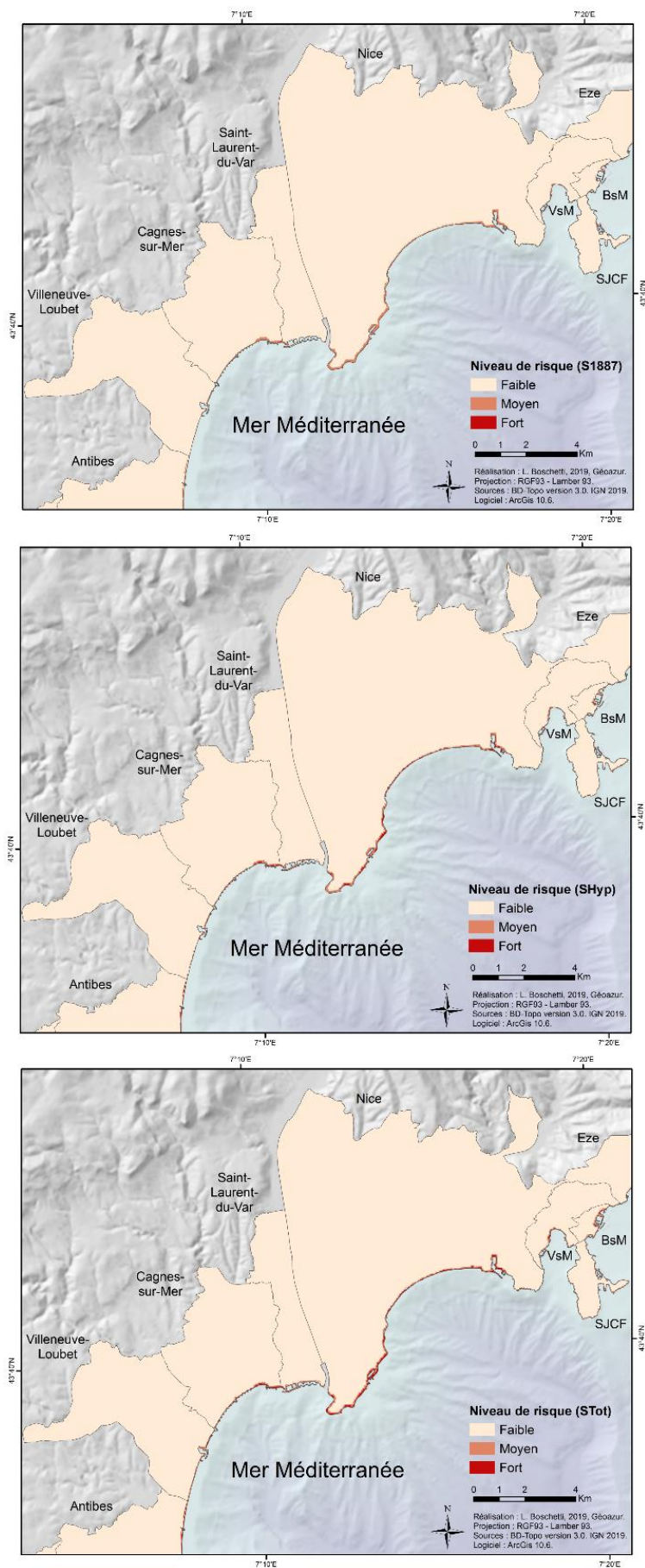


Figure 94 : Cartographie du risque de tsunami pour la partie centrale du littoral des Alpes-Maritimes

Le scénario historique ne contient pas de niveau de risque fort. Le territoire comprend des espaces de risque moyen sur l'ensemble de la Baie des Anges. Le scénario hypothétique voit apparaître des zones de risque fort le long de cette même baie : à Cagnes-sur-Mer et à Nice (Promenade des Anglais, port et aéroport). Les ports de Villefranche-sur-Mer, de Saint-Jean-Cap-Ferrat et de Beaulieu-sur-Mer conservent un risque moyen.

Le scénario extrême est bien plus prononcé sur l'ensemble du littoral et leur emprise spatiale s'élargie. La frange littorale à l'ouest de Nice reste majoritairement caractérisée par un risque moyen, avec quelques parties en risque fort. L'ensemble de la Baie de Nice, la Promenade des Anglais et ses plages, l'aéroport et le port sont également considérés en risque fort. La rade de Villefranche, zone encaissée avec peu de point de fuite possible, se retrouve également en zone de risque fort.

Une opposition s'observe entre la théorie : le cap devrait être plus fortement impacté que les baies ; et ce que nous observons : les baies ressortent comme des espaces plus à risques que les caps. Ceci s'explique principalement par le fait que les baies regroupent de nombreux enjeux (plages, promenades, ports, etc.) alors que le Cap-Ferrat, principalement composé de villas de luxe, dispose d'un moins grand nombre d'enjeux. La plus grande partie du littoral ayant été analysée, reste la partie orientale.

2.3. Cartographie du risque de tsunami indexé pour les communes de l'est du département

L'est du littoral des Alpes-Maritimes, de par sa proximité à la source est le territoire le plus exposé de la zone d'étude. Il serait donc normal de voir apparaître de grandes étendues de risque moyen et fort. Trois ressortent particulièrement (Figure 95) : Monaco (ses ports et ses plages), Roquebrune-Cap-Martin et Menton. Cet espace du littoral est l'un de ceux disposant d'une des plus grandes zones de risque (moyen et fort) le long de la baie Soleil (le long de Roquebrune-Cap-Martin et Menton)

Le scénario historique comprend de larges zones à risque moyen à Monaco, tout le long de son littoral, à Roquebrune-Cap-Martin et à Menton. Cette dernière commune dispose des seules zones à risque fort : au port et le long de la route du bord de mer. Le scénario hypothétique comprend de plus larges zones à risque sur l'ensemble des communes littorales. Seul Monaco et Menton sont caractérisées en certains endroits (ports et plages) en risque fort.

Le scénario extrême fait une fois encore ressortir Monaco et Menton, à la fois parce que ces communes comprennent des zones à risque fort et par l'étendue de celles-ci, qui disposent d'une grande emprise sur le territoire. Les autres communes voient également les zones à risque s'élargir ; elles restent cependant caractérisées par un risque faible à moyen. Un bilan peut à présent être réalisé sur l'ensemble du littoral, permettant de faire ressortir les espaces à risques, les avantages et les limites de cette démarche et des résultats obtenus.

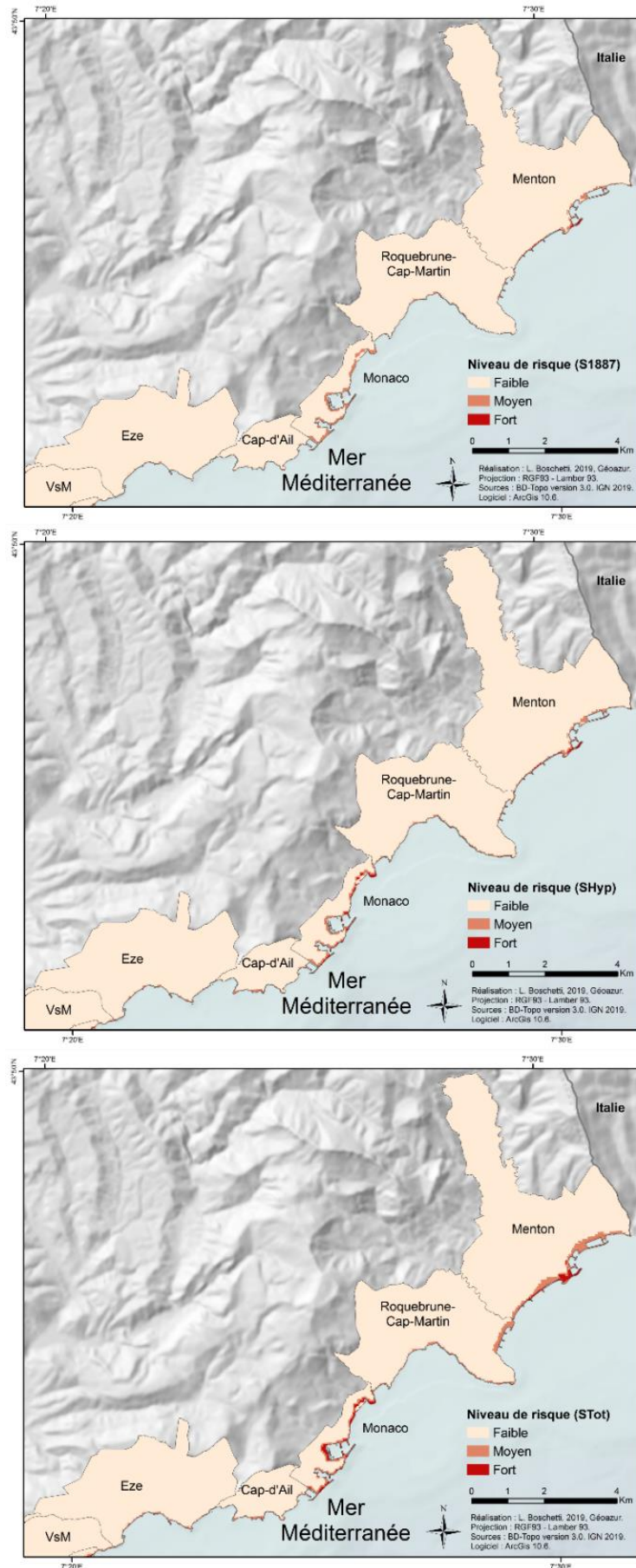


Figure 95 : Cartographie du risque de tsunami pour la partie est du littoral des Alpes-Maritimes

2.4. Synthèse de la cartographie du risque semi-quantitatif du risque

Cette méthodologie semi-quantitative permet une représentation qualitative du risque de tsunami le long du littoral des Alpes-Maritimes. Les trois niveaux d'indices ressortent distinctement, avec une centralisation des zones à risque moyen et fort le long de la frange littorale. Ceci permet de révéler clairement ces espaces directement exposés à la menace. Le territoire ressort cependant lissé, entièrement caractérisé par une vulnérabilité faible dès lors que l'on s'éloigne du littoral. Une variation spatiale aurait toutefois dû ressortir, afin de souligner la présence d'enjeux majeurs en dehors des zones d'impacts.

Certaines zones ressortent comme des espaces à risque. C'est le cas du Cap d'Antibes, de la partie orientale de la Baie des anges comprenant le Promenade des Anglais, de nombreux ports (Nice, Cros-de-cagnes, Villefranche-sur-Mer, Beaulieu-sur-Mer). L'aéroport de Nice est considéré comme une zone à risque mais cette dernière se limite aux extrémités littorales, ne touchant pas les terminaux, plus en retrait de la cote (mais en bordure du Var pour le terminal 2). La bordure littorale de Roquebrune-Cap-Martin et de Menton, villes à l'extrémité sud-est de la France, et les plus proches de la source, sont une zone à risque moyen et fort qui s'étend dans les terres, surtout pour le scénario extrême. Monaco, ville état est un territoire à risque, à la fois par le nombre d'enjeux présents (humain et économique), est également caractérisée par un risque moyen et fort.

Les ports ressortent régulièrement comme étant des espaces à fort risque. Ceci est représentatif de la réalité puisqu'un tsunami signifie littéralement « *vague de port* », et est souvent source de dégâts (bateaux qui s'entrechoquent, qui coulent, qui sont transportés sur les quais). Il faut cependant garder en tête que la précision des simulations numériques est de 40 mètres et que donc certaines représentations de structures diffèrent légèrement de la réalité.

Cette cartographie du risque de tsunami le long du littoral des Alpes-Maritimes, utilisant une méthodologie semi-quantitative, utilisant des tableaux de croisement, laisse ressortir certaines limites, la principale étant le lissage du territoire. La méthodologie quantitative a par la suite été appliquée permettant l'obtention d'une nouvelle cartographie du risque.

3. Cartographie du risque de submersion marine par tsunami le long du littoral des Alpes-Maritimes par une approche normalisée

Une analyse du risque de tsunami peut être effectuée par différentes approches. Une méthode semi-quantitative avec croisement par tableaux synthétiques a été présentée dans la partie précédente. Une approche quantitative avec normalisation est présentée, c'est-à-dire que les variables (aléas et vulnérabilité) sont normalisées afin d'obtenir des valeurs comprises entre 0 et 1.

Les étapes intermédiaires, correspondant à la normalisation de l'aléa, et donc de l'intensité et de l'éloignement, et de la vulnérabilité, ne sont pas présentées ici. Bien que différentes de celles obtenues par l'approche semi-quantitative, elles sont complexes à interpréter car comprennent des valeurs comprises entre 0 et 1, auxquelles il n'est pas possible en l'état de corrélérer d'informations qualitatives. Nous ne savons donc pas où se situe la limite entre les différents niveaux de risque. Ces derniers auraient pu être placés arbitrairement mais le résultat aurait été plus que discutable.

Nous avons donc pris le parti de présenter uniquement la cartographie du risque normalisé rapporté en pourcentage relatif local, c'est-à-dire mis en pourcentage à partir de la valeur de risque normalisé correspondant au scénario. Ce pourcentage de risque est davantage exploitable et significatif, bien qu'il soit toujours complexe de poser des limites pour délimiter les différents niveaux d'indices. Regardons à présent les résultats obtenus le long du littoral.

3.1. Cartographie du risque de tsunami normalisé le long de la partie ouest du littoral des Alpes-Maritimes

Commençons par la partie ouest du département, dont le territoire comprend deux baies ouvertes, le Golfe de La Napoule et le Golfe de Juan, un cap, le Cap d'Antibes, et des îles, les Îles de Lérins. Cette cartographie du risque (Figure 96) représente une approche quantitative avec une représentation du risque sous forme de pourcentage relatif.

Le scénario historique, présente une large bordure caractérisée par des valeurs intermédiaires (21 à 40 %), derrière laquelle l'ensemble du territoire dispose des pourcentages les plus faibles (2 à 20 %). Cette « barrière » apparaît toutefois discontinue pour les communes de Théoule-sur-Mer et Mandelieu-la-Napoule. Nous pouvons supposer qu'une fois encore cela est dû aux couches englobant l'ensemble, ou du moins la quasi-totalité du territoire communal comme la densité ou les zones d'habitations. Ces deux villes sont exclusivement caractérisées par des valeurs faibles et moyennes (de 2 à 60 %). Cette gradation permet toutefois de faire ressortir des particularités locales : axes de communication, ERP, réseaux « *softs* » et des éléments touristiques (plages, promenades et campings).

Cannes, commune densément peuplée et urbanisée, ne dispose pas d'autant de finesse, puisque seuls ressortent des espaces de gradations : plus on se rapproche de la mer plus les valeurs sont importantes. Les valeurs maximales ne sont pas atteintes mais des valeurs de risque fort s'observent (jusqu'à 80 %). Celles-ci sont localisées tout au long de la baie de Cannes, incluant les ports et la Croisette. Les îles de Lérins quant à elles sont uniquement composées de valeurs moyennes (21 à 60 %). Cette classification en zone de risque à valeurs modérées ne s'explique pas par le nombre d'enjeux présents sur ces îles, qui sont quasi-inhabitées et majoritairement touristiques (uniquement la journée), mais par son espace restreint lui conférant une valeur de risque important dû à l'éloignement.

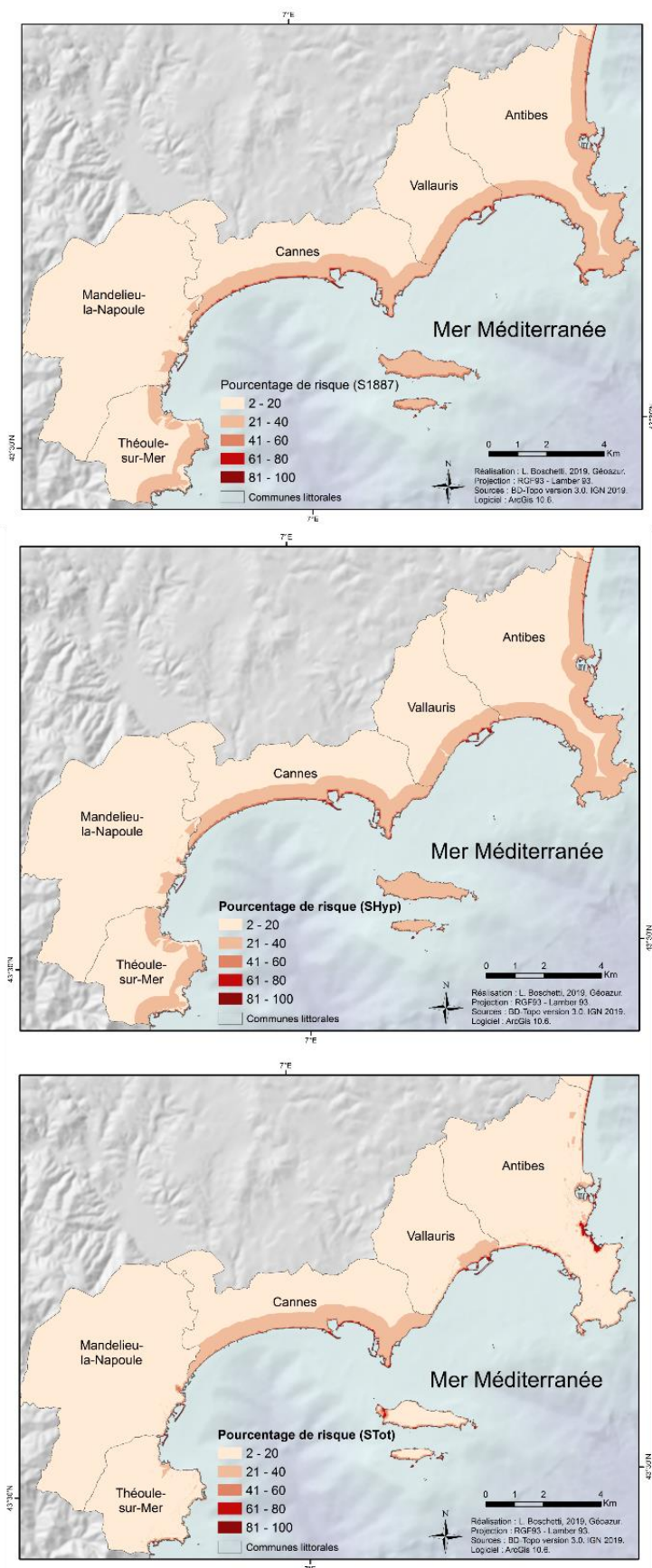


Figure 96 : Cartographie du risque en pourcentage relatif de tsunami pour la partie ouest du littoral des Alpes-Maritimes

Cette gradation s'observe également le long de littoraux des communes de Vallauris et d'Antibes. Les espaces de risque fort pour la première sont localisés au port de Golfe-Juan. La seconde, étant plus étendue et comprenant le cap sur son territoire, comprend de nombreuses zones littorales caractérisées par des valeurs de risque fort. Ces dernières sont aussi bien localisées en zones de plages (Juan-les-Pins, route du bord de mer en direction de Villeneuve-Loubet), qu'en zone portuaire (port Vauban), qu'en zone plus sauvage le long du cap. Une fois encore les valeurs maximales ne sont pas atteintes.

Cette même configuration globale se retrouve pour le scénario hypothétique, avec une délimitation entre l'arrière-pays et l'immédiate bordure littorale présentant une gradation des valeurs du risque. La distinction entre les communes de l'extrémité ouest du département (Théoule-sur-Mer et Mandelieu-la-Napoule) et celles de l'est de cette zone (Cannes, Vallauris et Antibes) est également conservée. Une perte de gradation s'observe toutefois dans la partie occidentale de la baie de Cannes avec une grande majorité de valeur moyenne (< 60%). Les ports de Cannes et la Croisette conservent de fortes valeurs.

Cette atténuation de la gradation s'observe également à Vallauris et Antibes, ne laissant un pourcentages de risque élevés (> 61 %) que le port de Golfe-Juan, les plages de Juan-les-Pins, celles de la Salis, le port Vauban et la promenade du bord de mer. Des espaces à faible risque apparaissent à proximité des littoraux sur ces deux communes et correspondent aux espaces non considérés comme des zones d'habitation (principalement des espaces végétalisés).

Le scénario extrême présente une structure de résultats différents. Une gradation est visible entre l'ouest (Théoule-sur-Mer) et l'est (Antibes). Théoule-sur-Mer et Mandelieu-la-Napoule sont caractérisés par un risque faible sur la quasi-totalité de leur territoire, même littoral. Seuls restent en risque plus élevé les ports et les plages. Cannes est la seule commune qui conserve la gradation arrière-pays / littoral. Seuls les ports, la Croisette et les Iles de Lérins conservent de hautes valeurs de risque (> 60%), qui sont des espaces fortement appropriés par les locaux et les touristes.

Vallauris ne conserve plus qu'un espace à risque Golfe-Juan (le centre-ville et le port). Antibes se voit doter de valeurs de risque fort pour Juan-les-Pins, le quartier de la Salis, le port Vauban et la route du bord de mer. La zone de la Salis est prédominante sur les autres, avec un espace qui rentre à l'intérieur des terres de manière conséquente. La perte de gradation à Vallauris et Antibes permet de faire ressortir des axes de communication, des ERP (établissements hospitaliers et scolaires) et des structures de réseaux « *softs* » (mairie, gendarmerie, etc.).

De grandes disparités apparaissent sur cet espace, avec des valeurs importantes de risques en certains espaces, mais également de faibles valeurs à d'autres. Regardons à présent les communes centrales du département des Alpes-Maritimes.

3.2. Cartographie du risque de tsunami normalisé le long de la partie centrale du littoral des Alpes-Maritimes

Le centre du département, comprenant la commune de Nice, a également été cartographié (Figure 97) via cette approche du risque. Le scénario S1887 présente sur la quasi-totalité de ce territoire une gradation entre l'arrière-pays et le littoral, des valeurs faibles (< 20 %) loin de la cote et des valeurs plus importantes en se rapprochant de la mer (jusqu'à 80%).

Seuls Villeneuve-Loubet et Saint-Jean-Cap-Ferrat ne sont pas soumis à cette gradation. Dans la première commune, un parc départemental, le parc de Vaugrenier, vient interrompre la zone urbaine et générer une importante zone de risque faible. La seconde, située sur le Cap-Ferrat est relativement sauvage pour la région et un espace est également considéré en espace non habité, bien que des villas y soient présentes, dont la villa Rothschild qui est un musée avec des jardins.

En dehors de ces communes, ce contraste s'observe, créant un liseré rouge, et donc de valeurs de risque fort (61 à 81 %) le long du littoral. Une structuration identique du territoire se retrouve pour le scénario hypothétique, ne laissant pas particulièrement ressortir d'espace en particulier. L'ensemble du littoral semble soumis à un fort pourcentage de risque de tsunami.

Le scénario extrême permet de faire une distinction entre les communes de Nice et Beaulieu-sur-Mer, conservant cette gradation vers le littoral, et les autres communes exposant davantage de variation territoriale. Les deux premières communes sont celles disposant des densités communales les plus importantes de la zone, prenant le dessus sur les autres enjeux et lissant le tout. Il faut être prudent dans l'analyse de carte puisque la bande littorale qui ressort correspond à des valeurs relativement faibles (21 à 40 %). Bien qu'étant des espaces à risque, ils ne correspondent pas aux zones à risque maximal.

Les espaces où les valeurs de risque sont les plus importantes (61 à 100 %) se situent le long de baie, comme le long de la route de bord de mer faisant la jonction entre Antibes et Villeneuve-Loubet ou la Promenade des Anglais. L'ensemble des ports sont également caractérisés par ces valeurs maximales. La quasi-totalité du territoire départemental étant analysé, reste la partie orientale.

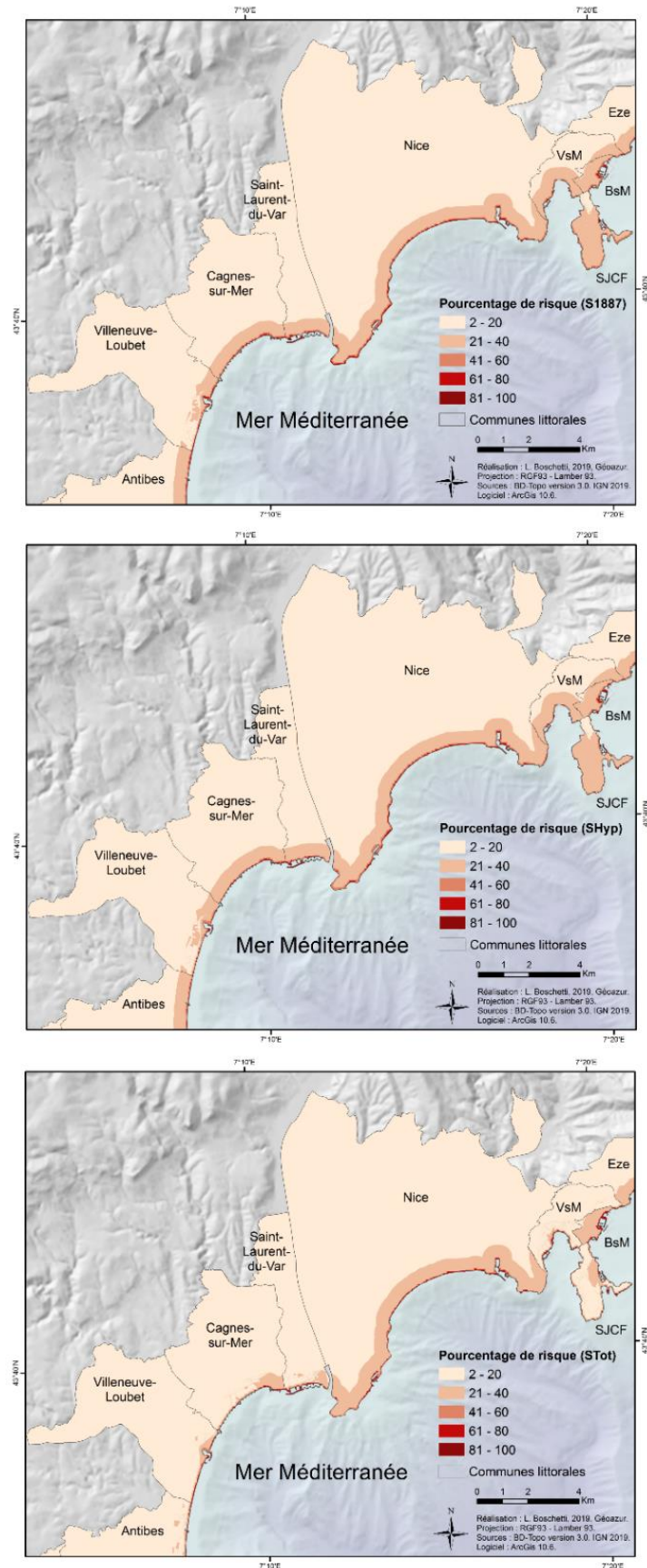


Figure 97 : Cartographie du risque en pourcentage relatif de tsunami pour la partie centrale du littoral des Alpes-Maritimes

3.3. Cartographie du risque de tsunami normalisé le long de la partie est du littoral des Alpes-Maritimes

La cartographie de l'est du littoral (Figure 98) présente les mêmes similitudes de gradation des valeurs du risque à mesure que l'on se rapproche du littoral. Une fois encore cette dernière est fortement marquée pour les scénarios S1887 et SHyp, avec une structuration des valeurs similaire. Cette gradation s'observe sur l'ensemble des communes à l'exception d'Eze, commune la moins peuplée de cette zone. Ressortent avec les pourcentages de risque les plus importants : les plages de Monaco, la grange littorale de Roquebrune-Cap-Martin et de Menton.

Le scénario extrême est une fois encore sensiblement différent des deux précédents. La grande majorité des communes littorales sont caractérisées quasi-uniquement de valeurs de risque faible (2 à 20 %), sauf sur l'immédiate bordure littorale. Ceci permet donc de faire ressortir des espaces de risque à pourcentage moyen (21 à 40 %) à l'intérieur des terres et correspondant à des enjeux majeurs comme les axes de communications, des ERP ou des structures de réseaux « *softs* ».

Une gradation de valeurs et de superficie de zone à risque s'observe à mesure que l'on se rapproche de l'Italie. Eze et Cap-D'ail disposent de peu d'espace à risque moyen à fort (41 à 80 %), alors que Roquebrune-Cap-Martin et surtout Menton, comprennent les valeurs les plus fortes (> 81 %) et leur étendue spatiale s'étend très largement dans la ville de Menton.

Monaco est particulière puisqu'étant une ville-état ; elle concentre un grand nombre d'enjeux sur un territoire restreint (2 km²). Elle est donc presque exclusivement composée de valeurs de risque moyennes à fortes (> 41 %). L'ensemble du territoire est ainsi analysé via cette approche quantitative. Un bilan général de cette méthode s'impose.

3.4. Synthèse de la cartographie du risque de tsunami par l'approche normalisée

La méthodologie appliquée pour l'obtention de cette cartographie consiste en une approche quantitative. Elle a nécessité la normalisation des variables du risque, c'est-à-dire l'aléa et la vulnérabilité, avant d'effectuer une normalisation du risque. Les valeurs ainsi obtenues ont ainsi été converties en pourcentage relatif, faisant ressortir pour chaque scénario les zones où le risque de tsunami est le plus important. Cette approche présente l'avantage d'être composée d'une multitude de valeurs, là où la méthode précédente ne permet d'obtenir que trois niveaux d'indices (faible, moyen, fort).

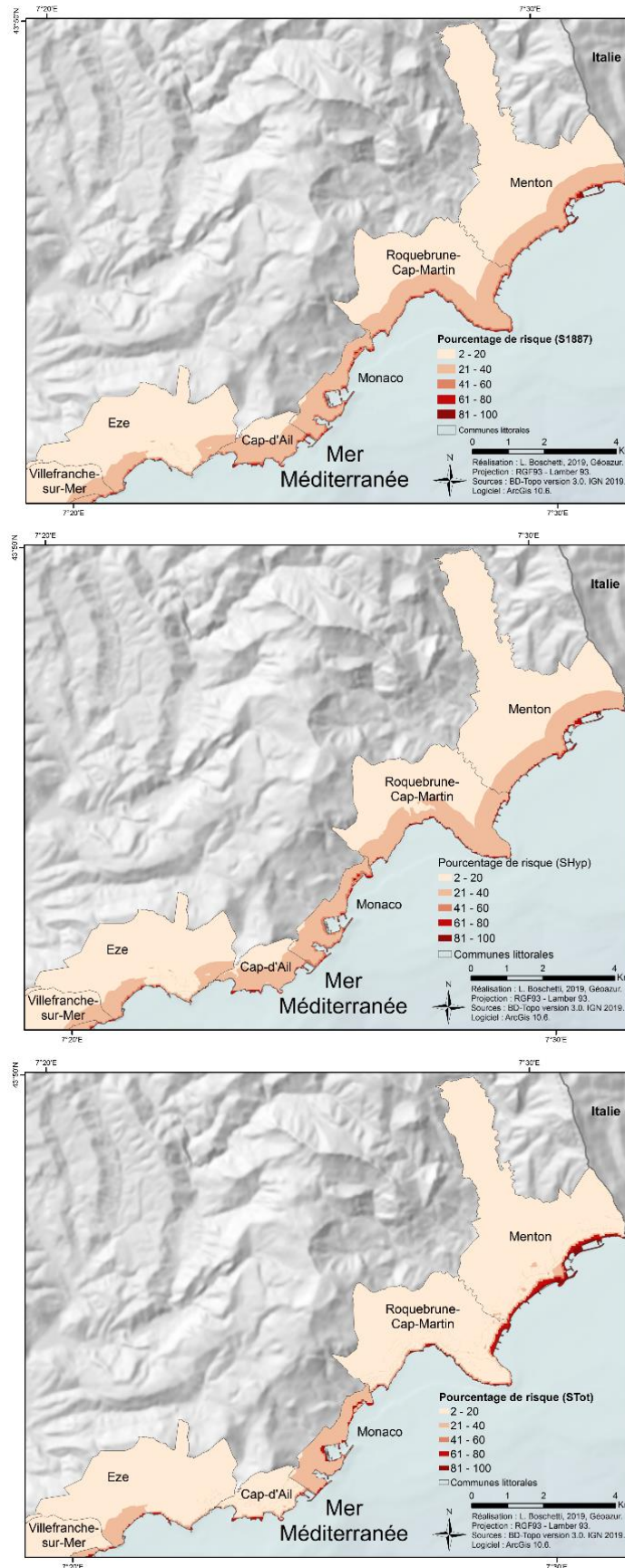


Figure 98 : Cartographie du risque en pourcentage relatif de tsunami pour la partie est du littoral des Alpes-Maritimes

En revanche, il n'est pas possible en l'état de préciser si telle ou telle valeur obtenue correspond à un risque faible ou fort. Une classification aurait pu être faite mais aurait été arbitraire. Il n'est donc pas directement possible de comparer un scénario avec un autre, ou des résultats obtenus sur deux zones d'études distinctes, la base permettant le calcul de pourcentage étant différente. Il faut également noter que plus les valeurs de risque normalisé seront proches de un plus l'étendue des valeurs sera grande. En d'autres termes, à valeur de pourcentage égale, la valeur de risque normalisée est plus petite pour S1887 et SHyp que pour STot.

Une gradation spatiale est visible sur l'ensemble des cartes obtenues : plus on se rapproche du littoral, plus les valeurs sont importantes. Pour certaines communes, cette gradation est fortement prononcée, gommant les particularités locales, alors que pour d'autres, une gradation plus marquée permet de faire ressortir en risque à valeur moyenne des enjeux majeurs situés plus en retrait du trait de côte. Une différence s'observe toutefois entre les deux scénarios de rupture partielle (S1887 et SHyp) et le scénario de rupture totale (STot). Les deux premiers sont généralement très fortement similaires, avec une bande de valeur faible à moyenne (21 à 40 %), faisant penser à une zone tampon. Le scénario extrême voit cette bande disparaître pour directement laisser apparaître les espaces de risque à forte valeur.

Nous avons pu déterminer une corrélation entre les premières communes, qui disposent souvent de densité forte, et les secondes ayant une densité plus faible. La densité étant représentée sur l'ensemble du territoire communal, elle prend le dessus sur des couches comprenant des enjeux plus localisés comme les ERP (échelle du bâtiment et non plus de la commune). Une gradation ouest / est s'observe également qu'il s'agisse des valeurs maximales ou de la superficie de ces espaces à forte valeur de risque. Plus on se décale vers l'est, plus elles sont importantes.

Plusieurs zones du territoire ressortent car disposant de valeurs de risque plus importantes. Il s'agit principalement de ports et des quartiers alentours : les ports de Cannes, de Golfe-Juan, de Juan-les-Pins, le port Vauban à Antibes, de Cros-de-Cagnes, de Saint-Laurent-du-Var et de Nice. D'autres espaces, davantage ouverts, sont également caractérisés comme ceci : la Croisette, les Iles de Lérins, la route du bord de mer Antibes-Villeneuve, l'aéroport de Nice, la Promenade des Anglais, Monaco et Menton. Certains encore, situés à proximité de caps, et donc de zones de focalisation, sont également caractérisés par des valeurs importantes : la Salis et Beaulieu-sur-Mer.

Les deux méthodologies ayant été appliquées et analysées, il convient de les comparer et de discuter les différents résultats obtenus. Ceci est réalisé dans la discussion de la [Partie IV](#).

4. Conclusion

Ce chapitre a permis une mise en application des méthodologies exposées précédemment, ainsi que la présentation des résultats obtenus. Chacune présente des avantages et des limites, demandant à l'une comme à l'autre d'être davantage approfondies. Elles permettent toutefois de proposer des résultats cartographiques de risque de submersion marine par tsunami sur le littoral azuréen.

De manière synthétique, l'extrême ouest du littoral, en plus de présenter peu d'enjeux, est très éloigné de la source et est composé d'une baie ouverte. Les communes de Cannes et Antibes, fortement peuplées, urbanisées et touristiques, présentent plusieurs zones à risque. Nice, localisée dans la baie des Anges, bien qu'étant une baie ouverte, est caractérisée sur la quasi-totalité de son littoral par un risque fort. Etant la ville la plus importante du territoire, de par son statut de préfecture, de centre de la Métropole, elle contient de nombreux enjeux majeurs sur son territoire.

L'est du littoral est plus exposé à l'aléa car plus proche de la source. En revanche, il est moins peuplé que d'autres parties du territoire et présentent ainsi moins d'enjeux. Cette section est caractérisée par un relief important entre le cap Ferrat et Cap-D'Ail. Menton, commune plus plate, est davantage habitée et regroupe plus d'enjeux. De plus, elle joue un rôle stratégique à la frontière italienne. Seule exception de cet espace, Monaco où sont concentrés le plus d'enjeux du littoral sur un territoire restreint.

Certaines de ces communes identifiées comme à risque de tsunami important vont être davantage développées dans le chapitre suivant ([Chapitre 15](#)), permettant de faire ressortir certaines particularités locales.

CHAPITRE 15 : CARTOGRAPHIE A GRANDE ECHELLE DU RISQUE DE TSUNAMI SUR QUATRE COMMUNES DU LITTORAL AZUREEN

Le chapitre précédent s'est intéressé à la présentation de la cartographie du risque de tsunami selon deux approches : une approche semi-quantitative et une approche par normalisation. Cette cartographie globale permettait difficilement de faire ressortir les particularités locales. C'est pourquoi ce chapitre est dédié à la mise en application de ces mêmes méthodologies mais à l'échelle infra-communale.

Quatre communes ont été sélectionnées pour réaliser cette analyse, à savoir Cannes, Antibes, Nice et Monaco. La première partie de ce chapitre est justement destinée à l'explication de cette sélection qui a tenu compte de plusieurs éléments aussi bien physiques (présence de caps, de baies) que territoriaux (fonction de la ville, vulnérabilité, etc.).

Pour chacune, la méthodologie d'analyse du risque semi-quantitative a été appliquée et présentée dans la deuxième partie. Ces résultats sont détaillés pour chaque commune. Une dernière partie est consacrée au risque normalisé et à la comparaison du risque pour ces territoires identifiés.

1. Une sélection de quatre villes le long du littoral azuréen

Le littoral azuréen est composé d'un ensemble de 17 communes, structurées en quatre communautés de communes différentes (Cannes Pays de Lérins, Communauté d'Agglomération de Sophia Antipolis, Métropole Nice Côte d'Azur, Communauté de la Riviera Française). Ceci peut poser des problèmes de gestion du territoire, notamment en termes de politique locale (politique de gestion des risques, gestions des déchets, etc.).

Une sélection de quatre communes appartenant chacune à l'une de ces communautés est proposée (Figure 99) : Nice, Monaco, Antibes et Cannes. Cette sélection est basée sur plusieurs critères : la distance à la source, la localisation de la commune, l'urbanisation en front de mer ou en mer, la pression touristique sur les plages et promenades de bord de mer, la forme des baies, etc.

La préfecture de département, **Nice**, fait partie des communes sélectionnées. Bassin principal de vie et d'emplois, elle concentre une forte densité de population et attire de nombreux touristes de loisirs et d'affaire. Elle regroupe un nombre important de structures organisationnelles et décisionnelles (Préfecture de Département, mairie, siège de la métropole, les services déconcentrés de l'Etat comme la Direction Départementale des Territoires ou la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement, etc.), ce qui en fait un point stratégique de la gestion de crise. Sa renommée nationale et internationale attire de nombreux touristes de loisirs et d'affaires. Elle s'est développée le long d'une baie ouverte, la Baie des Anges.

Monaco, cité-état, présente de nombreuses particularités qui nécessitent de s'y attarder. Petit état de deux kilomètres carré développé entre mer et montagne, Monaco dispose sur son territoire de toutes les structures organisationnelles nécessaires à son fonctionnement. De nombreux enjeux majeurs sont concentrés en un espace restreint, poussant la principauté à construire sur la mer. Un nouveau projet est d'ailleurs en cours de réalisation permettant de gagner six hectares sur la mer (Monaco Matin, 12/01/2020). Des caissons ont été prévu pour protéger ce nouveau quartier des coups de mer. Nous pouvons toutefois nous interroger sur leurs efficacités en cas de la survenue d'un tsunami. De par son attrait, de nombreux frontaliers français et italiens viennent y travailler, doublant en journée le nombre de la population. Nous avons d'ailleurs eu la chance d'être reçu par les pompiers de Monaco, grâce au Commandant Fiorelli (SDIS 06), afin de présenter les travaux portant sur l'aléa.

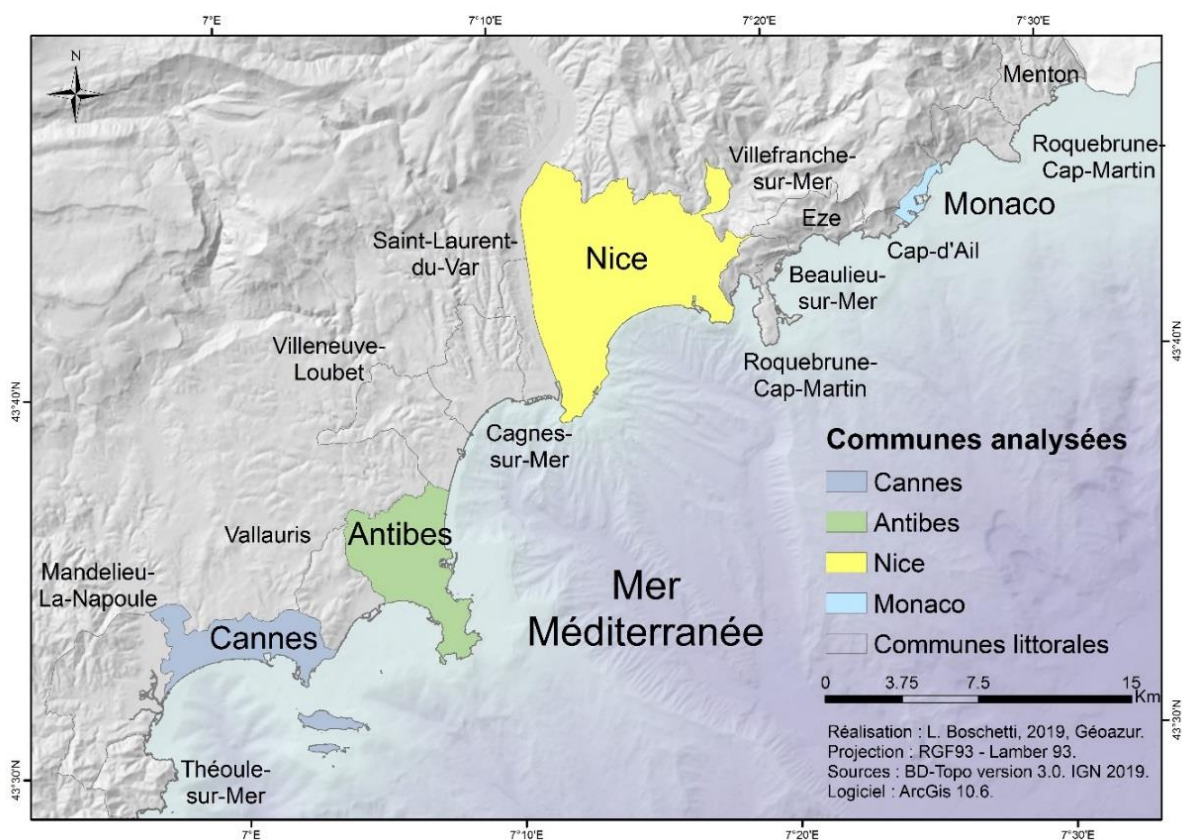


Figure 99 : Communes sélectionnées pour une analyse communale

Antibes, bassin de vie du littoral, est intéressante puisqu'elle est composée autour d'un cap, le Cap d'Antibes. La commune dispose ainsi à la fois d'espace fortement urbanisé et d'espace plus sauvage. D'un point de vue physique cette particularité est propice au phénomène de focalisation (Chapitre 5). Elle présente également la particularité d'avoir un vieux-centre piéton entouré de remparts. Ce choix a également été motivé par le fait qu'un évènement historique (le tsunami du 19 octobre 1979) a déjà frappé le cap, et plus particulièrement le quartier de la Salis.

Cannes, ville située à l'ouest du département, est également un bassin de vie important. Géographiquement, elle est localisée le long d'une baie ouverte, le Golfe de La Napoule, ce qui la rend similaire à Nice. En revanche, elle comprend les Iles de

Lérins (Sainte Marguerite et Saint Honora). Elle dispose d'une économie grandement tournée vers le tourisme de loisir et d'affaire.

Cette commune a été sélectionnée non pas pour ses particularités géographiques ou économiques mais pour l'engagement de la municipalité en ce qui concerne les questions liées aux risques et aux catastrophes. Fortement touchée par les inondations d'octobre 2015, le maire a pris de nombreuses mesures pour limiter les impacts en cas de nouvel évènement. De gros travaux ont été entrepris, de remise en état tout d'abord, puis d'information à la population, passant notamment par l'édition d'une nouvelle édition du Document Communal sur les Risques Majeurs (DICRIM) et la mise en place de réunions d'informations auprès de la population. Ceci ne se limite pas à la problématique des inondations puisque Cannes est l'une de première ville française à avoir réalisé un exercice de crise simulant l'arrivée d'un tsunami. Une prise de conscience s'est opérée quant à l'importance de la préparation et de la prévention.

Le risque de tsunami de ces communes est ainsi étudié dans un premier temps par l'approche semi-quantitative, puis par l'approche normalisée.

2. Analyse du risque semi-quantitatif à l'échelle communale

La sélection des communes étant faite, chacune est à présent détaillée tout d'abord par l'analyse de son aléa, puis de sa vulnérabilité et enfin de son risque, selon l'approche semi-quantitative avec mise en indice. La présentation de ces communes ne se fait pas par un ordre d'importance mais selon leur localisation géographique, d'ouest en est, c'est-à-dire Cannes, suivie d'Antibes, puis Nice et enfin Monaco.

2.1. A l'ouest, la ville de Cannes et sa baie

La commune de Cannes, située la plus est l'ouest est la première commune sur laquelle une focalisation est faite. Sont ainsi présentées les cartographies de l'aléa, de la vulnérabilité territoriale et du risque semi-quantitatif.

2.1.1. L'aléa tsunami à Cannes

Cannes, comme la plupart des communes, voit uniquement sa frange littorale connaître des variations spatiales de l'aléa. Ceci s'explique par l'origine de la menace, qui vient de la mer et frappe donc principalement les littoraux. L'aléa a été analysé précédemment ([Partie II, Chapitre 9](#)) et a permis d'obtenir des données issues de modèles numériques des hauteurs d'eau et du courant.

A Cannes, une dissociation s'observe entre l'est de la commune et l'ouest, le vieux port marquant la délimitation. Pour la simulation historique (S1887), les hauteurs d'inondations sont inférieures à 0.125 m à l'ouest et à 0.375 m à l'est. Dans le cas de la simulation hypothétique (SHyp), les valeurs les plus importantes se retrouvent autour du port de Moure Rouge (< 0.75 m). A l'est les hauteurs d'inondations sont inférieures à 0.5 m et à l'ouest à 0.2 m. Le scénario total (STot) présente des valeurs

bien plus importantes. Elles sont inférieures à 1 m sur l'ensemble du littoral communal, à l'exception de la Croisette (entre le Vieux Port et le Port Canto) où les hauteurs d'inondations sont inférieures à 2 m.

En ce qui concerne les courants, une opposition s'observe également entre l'ouest du département dont les valeurs sont moins importantes (pour S1887 et S Hyp : $< 0.25 \text{ m.s}^{-1}$) et l'est plus impacté (pour S1887 : $< 0.25 \text{ m.s}^{-1}$ et S Hyp : $< 0.75 \text{ m.s}^{-1}$). Le scénario extrême (STot) voit toujours des variations à l'est de la commune alors que l'ouest est stable ($< 0.25 \text{ m.s}^{-1}$). Dans le Vieux Port les courants sont $< 0.5 \text{ m.s}^{-1}$, au Port Canto ils sont $< 1.5 \text{ m.s}^{-1}$ et le long de la côte $< 1 \text{ m.s}^{-1}$. Les valeurs les plus importantes sont localisées là où il y a un grand nombre d'enjeux rassemblés, c'est-à-dire les ports, les plages et la Croisette.

Pour rappel, l'analyse de l'aléa comprend l'intensité, limitée à la zone d'inondation de l'aléa tel quel simulé par le modèle numérique, et l'éloignement à la menace, c'est-à-dire une forme simplifiée de l'exposition, construite de manière à ce que plus on s'éloigne de la menace plus l'aléa est faible. Ceci implique une redondance de la zone inondée, marquant d'autant plus cet espace comme une zone sensible.

Une cartographie de l'aléa tsunami est obtenue (Figure 100) regroupant l'ensemble des trois scénarios d'analyse. Pour mémoire, Cannes est l'une des communes les plus éloignées de la source car à l'extrémité ouest du département alors que la faille est située à la frontière franco-italienne. Le scénario S1887 comprend principalement des espaces d'aléa moyen le long du littoral. Le scénario SHyp est quasi similaire au précédent, ne laissant apercevoir que très peu d'espaces caractérisés par un aléa fort. Ceux-ci sont principalement localisés à la pointe Croisette.

Le scénario STot en revanche marque plus clairement des espaces d'aléa forts tout au long de la côte, tel un trait continu. Les Iles de Lérins sont également impactées par cet aléa, principalement sur leur côte sud et ouest. De manière générale, le territoire communal de Cannes dispose d'un aléa moyen avec des inondations limitées aux plages. Quel que soit le scénario, la limite entre l'aléa moyen et l'aléa fort est marquée par la zone d'inondation, c'est-à-dire que l'aléa fort correspond aux espaces déterminés comme étant inondés par le modèle numérique. L'aléa moyen coïncide alors à une zone d'une quarantaine de mètres ; on retrouve alors la marge d'erreur des modèles.

Une fois l'aléa étudié, l'étude des enjeux majeurs a permis d'obtenir une cartographie de la vulnérabilité territoriale.

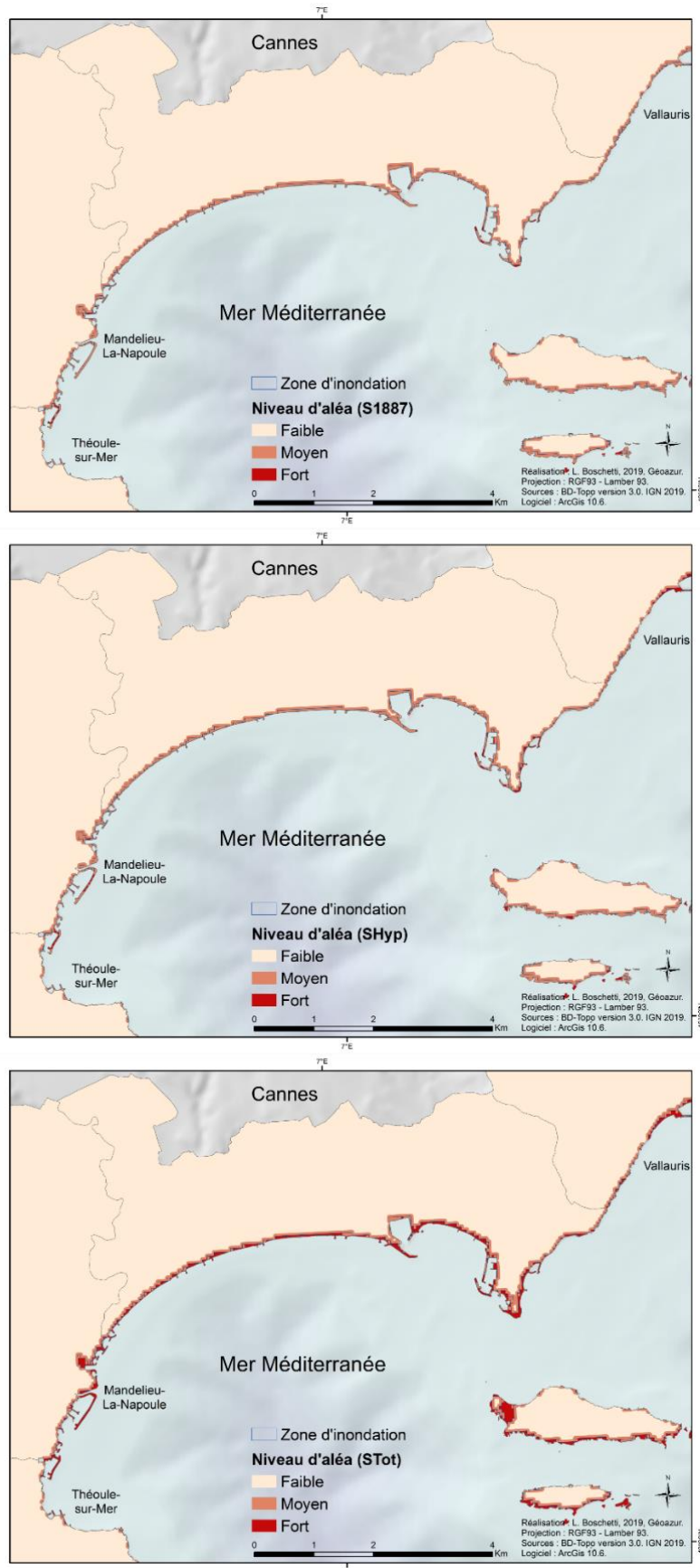


Figure 100 : Cartographie de l'aléa pour la ville de Cannes

2.1.2. Cartographie de la vulnérabilité territoriale à Cannes

Cannes, comparativement à ses voisines Mandelieu-La-Napoule et Théoule-sur-Mer, dispose d'une vulnérabilité territoriale qui varie spatialement (Figure 101). Plusieurs espaces de vulnérabilité moyenne ressortent. Le principal est le centre-ville et les deux ports qui marquent sa limite, le Vieux-Port à l'ouest et le port Canto à l'est. La Croisette permet de joindre ces deux ports. Elle sert à la fois d'axe de communication principal et est à la fois l'un de principal attrait touristique de la commune. Il s'agit d'une zone sensible de par sa forte fréquentation et par l'économie qu'elle génère (présence magasins, de restaurants).

A l'extrémité ouest de la commune ressort l'aéroport d'affaire. La quasi-totalité des « taches » de vulnérabilité moyennes qui ressortent sont des ERP, principalement à fonction de santé ou à public sensible. Quelques-unes correspondent à des structures de réseaux « soft ». Plusieurs axes de communication ressortent. Les îles de Lérins, quasi inhabitées, sont considérées en vulnérabilité faible.

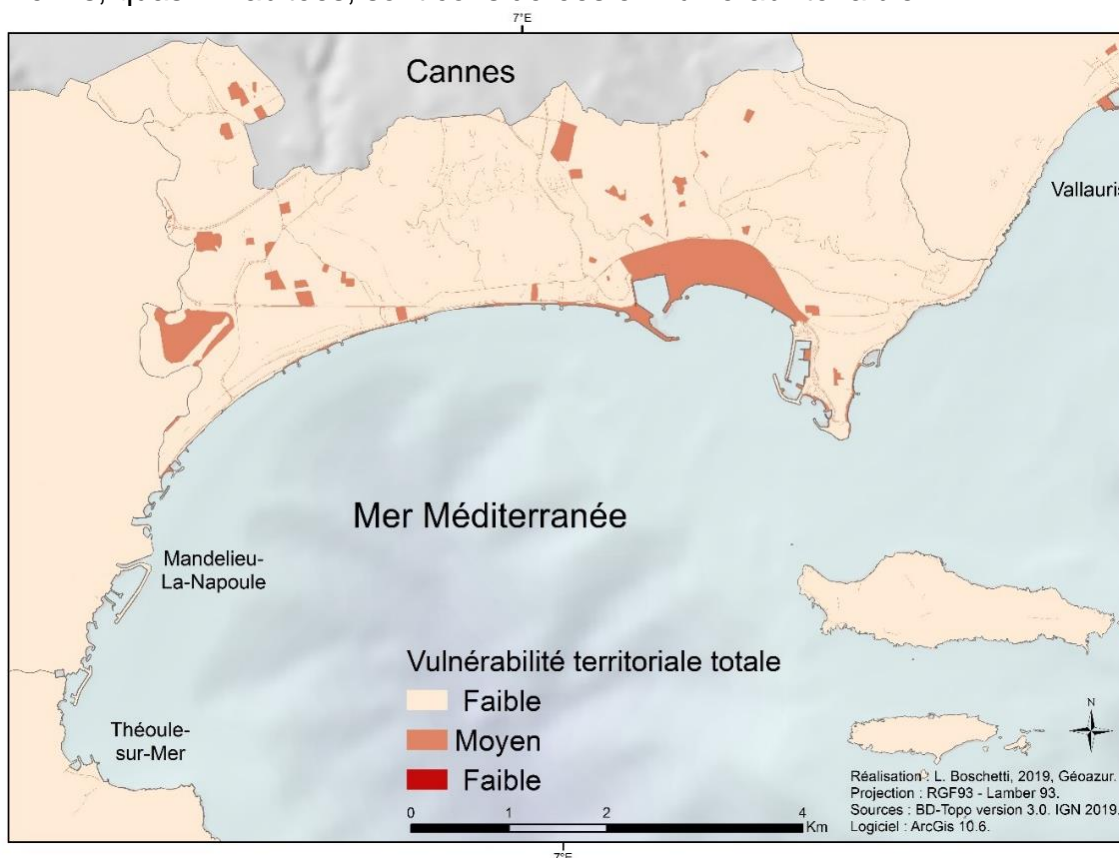


Figure 101 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale de la ville de Cannes

Disposant à présent de la cartographie de l'aléa et de la vulnérabilité, un croisement permet l'obtention d'une cartographie du risque.

2.1.3. Cartographie du risque semi-quantitatif à Cannes

Cannes, bien que disposant de nombreux enjeux majeurs sur son territoire, dispose d'un risque global relativement faible, compte tenu de son éloignement à la faille génératrice du tsunami. La cartographie du risque semi-quantitative obtenu ne présente que peu de variabilité (Figure 102), à l'exception du scénario extrême (STot).

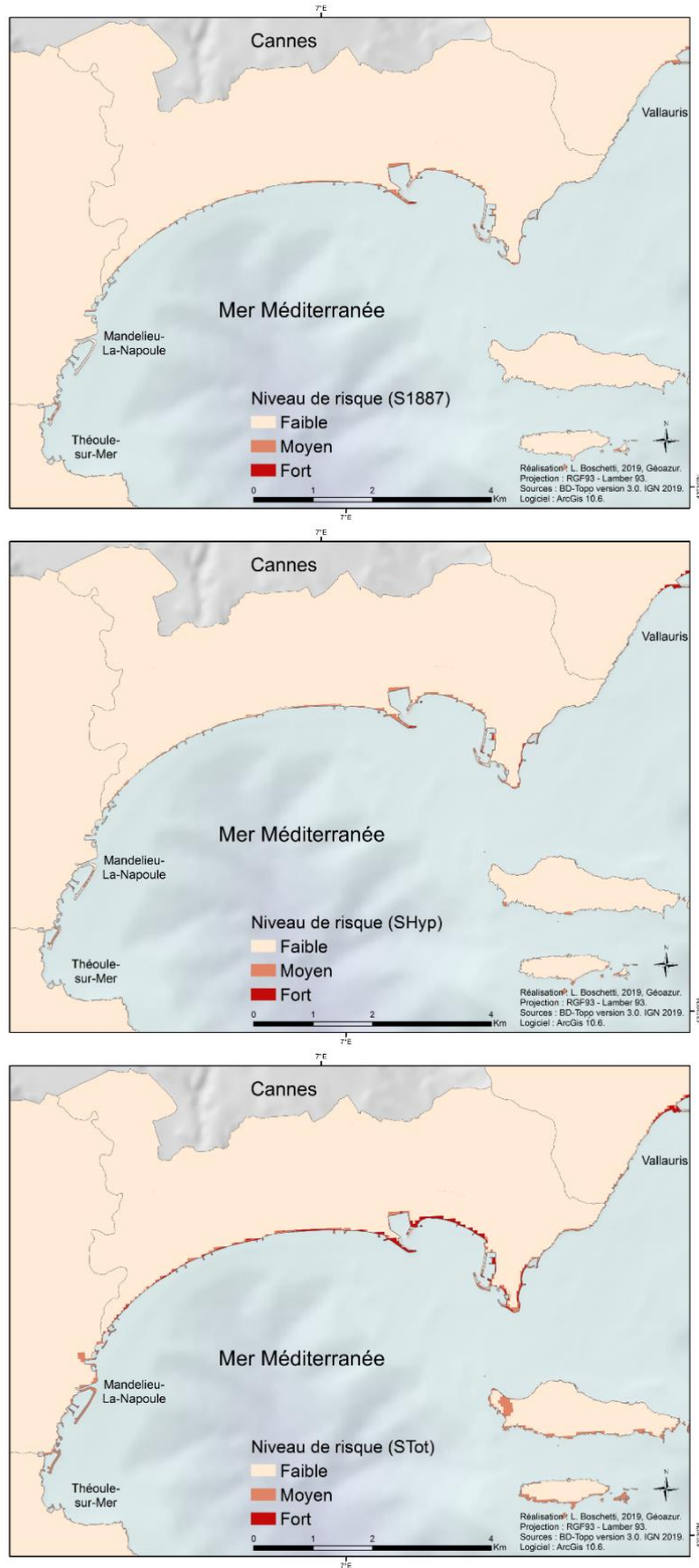


Figure 102 : Cartographie du risque semi-quantitatif à Cannes

Les résultats obtenus pour les scénarios S1887 et SHyp sont quasi identiques. Dans les deux cas, seul ressort le port et la Croisette. Les résultats du scénario extrême sont davantage marqués. La quasi-totalité du littoral ressort en risque moyen ou fort, l'ouest étant principalement caractérisé par un risque moyen, et l'est par un risque fort. Le premier est constitué de petites plages en contre bas de la route du bord de mer et de la voie ferrée. Le seconde regroupe le centre-ville, les deux ports et la Croisette, ce qui en fait un endroit stratégique, d'où sa caractérisation en niveau plus élevé. Les Iles de Lérins sont caractérisées par un risque faible, à l'exception du dernier scénario (STot) qui leur attribue un risque fort le long de la partie sud de leur côte. Ne disposant que de très peu d'enjeux et étant ainsi caractérisées par une vulnérabilité faible, cette caractérisation est due aux niveaux d'aléa déterminés.

2.1.4. Zoom sur le long de la Croisette

Le centre-ville de Cannes est développé entre ses deux ports principaux : le vieux port à l'ouest et le port Quanto à l'est. Le Boulevard de la Croisette, d'une des artères principales de la ville, fait la jonction entre les deux. Elle est constituée d'une promenade, d'hôtels et de magasins de luxes, et est bordée par une plage. Elle attire aussi bien les locaux que les touristes de loisirs ou d'affaires. Au nord de cette dernière se trouve le centre-ville.

Quel que soit le scénario d'aléa, cet espace est impacté et est considéré en risque moyen à fort (Figure 103). Dans le cas du scénario historique (S1887) le vieux port et les plages de la croisette sont caractérisées par un risque moyen. Le port Quanto est ponctuellement impacté. Le scénario hypothétique (SHyp) est fortement similaire au précédent. Le scénario extrême (STot) voit apparaître des espaces à risque fort, comme les plages de la Croisette et la digue de protection du vieux port.

Cet espace qui condense de nombreux enjeux et une forte exposition à la menace dispose donc de niveau de risque important.

La cartographie a ainsi été réalisée à une échelle plus fine afin de faire ressortir certaines particularités non visibles à l'échelle communale. La même démarche a été appliquée à Antibes.

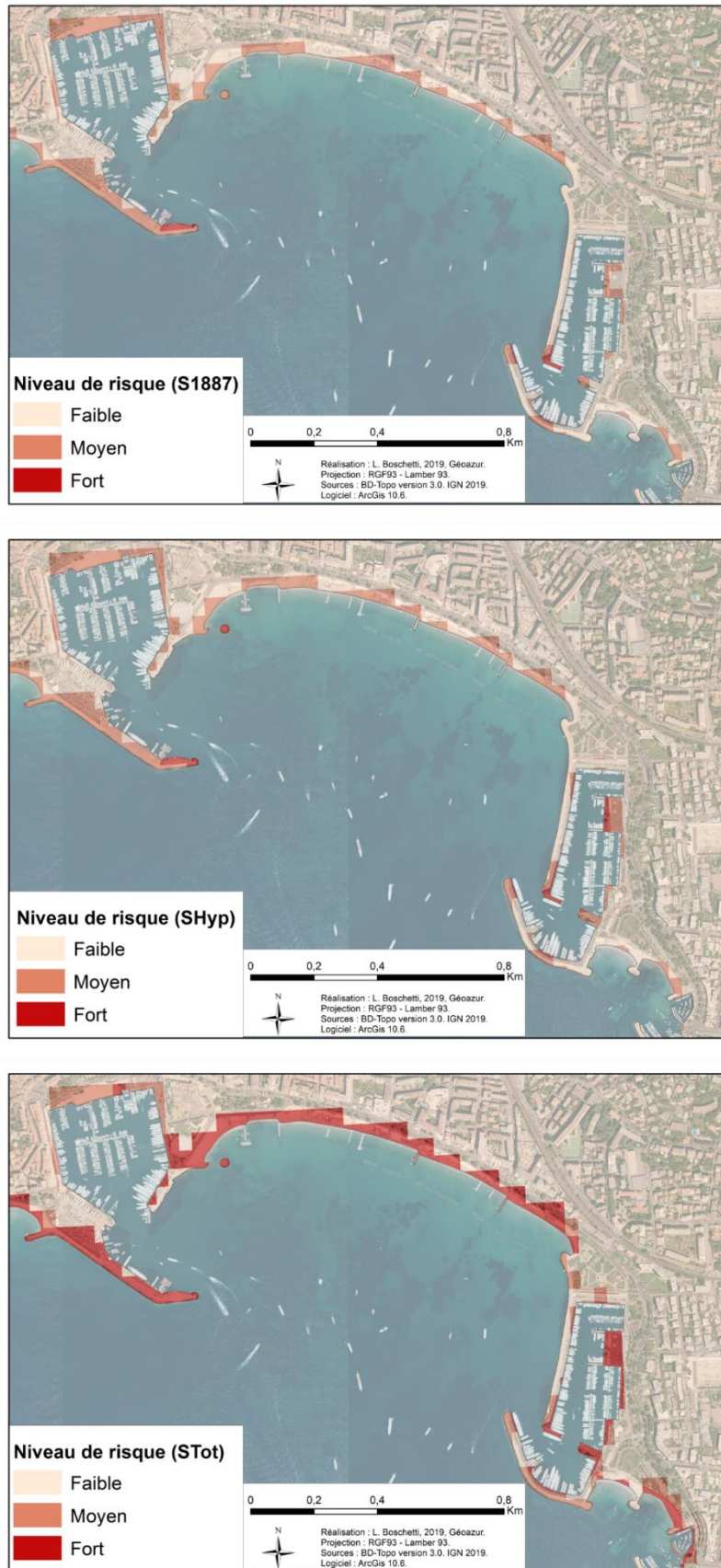


Figure 103 : Cartographie du risque semi-quantitatif le long de la Croisette à Cannes

2.2. Antibes et son Cap

Antibes présente pour particularité principale d'être développée autour d'un cap, le Cap d'Antibes. Ce dernier influe à la fois sur l'aléa et la vulnérabilité de cette dernière. C'est ce qui est présenté ci-dessous, avant de s'intéresser à la cartographie du risque semi-quantitatif.

2.2.1. L'aléa tsunami à Antibes

Antibes marque la jonction entre l'ouest et le centre du département, avec d'un côté du cap le Golfe de Juan et de l'autre la Baie des Anges. La commune est donc relativement éloignée de la source. Sa structure géologique est favorable au phénomène de focalisation, pouvant amplifier les ondes du tsunami arrivant, mais dont les effets vont être minimes voir nuls.

Les données obtenues grâce aux simulations numériques permettent d'observer des variations de hauteurs d'inondations et de courants autour du Cap. Dans le cas du scénario historique (S1887) plusieurs points ressortent : la Salis, la Garoupe, le Fort Carré et le Port du Crouton, dont les hauteurs sont inférieures à 0.625m. Il y a toutefois très peu d'inondations dans les terres. Le reste du littoral communal connaît des hauteurs d'inondations inférieures à 0.325 m.

Concernant les courants, les variations s'observent une fois encore autour du Cap, dont les principales sont à l'intérieur du Port Vauban pour le S1887, ce à quoi s'ajoute la Salis, la Garoupe et le Port du Crouton pour le SHyp. À la côte les valeurs ne dépassent toutefois pas 0.5 m.s^{-1} pour S1887 et 0.75 m.s^{-1} pour SHyp. Dans le cas du scénario STot, les courants sont inférieurs à 6 m.s^{-1} au port Vauban, à 3 m.s^{-1} à la Salis et à 1 m.s^{-1} sur le reste du littoral.

La plage de la Salis ressort comme la zone la plus fréquemment impactée et comme la plus fortement touchée. C'est là que se retrouvent les hauteurs d'eau les plus importantes mais également les courants les plus forts. D'autres espaces sont également touchés comme la plage de la Garoupe, le Port Vauban et le Port du Crouton. Des variations de niveaux d'aléa s'observent le long du littoral avec des zones d'inondations fortement marquées (Figure 104).

Le scénario S1887 génère quasi exclusivement une alternance d'espace à aléa faible et à aléa moyen, l'ensemble de la côte étant caractérisée en aléa moyen. Le scénario SHyp est davantage marqué sur le littoral, laissant apparaître plusieurs zones où l'aléa est fort. Il s'agit principalement de plages. Le scénario extrême (STot) marque fortement la côte avec des zones d'inondations importantes au quartier de la Salis. Il s'agit d'un des espaces les plus fortement impactés de l'ensemble du littoral. Il s'agit de plages, d'un port et de commerces, dont l'activité est principalement estivale. Ce quartier a, par le passé, été impacté par un tsunami d'origine gravitaire (événement du 19 octobre 1979), en faisant un espace fortement exposé au tsunami quelle qu'en soit l'origine. Des travaux ont d'ailleurs été réalisés sur l'inondation générée par cet événement historique. Nous reviendrons plus en détail dessus dans la partie discussion de cette partie.

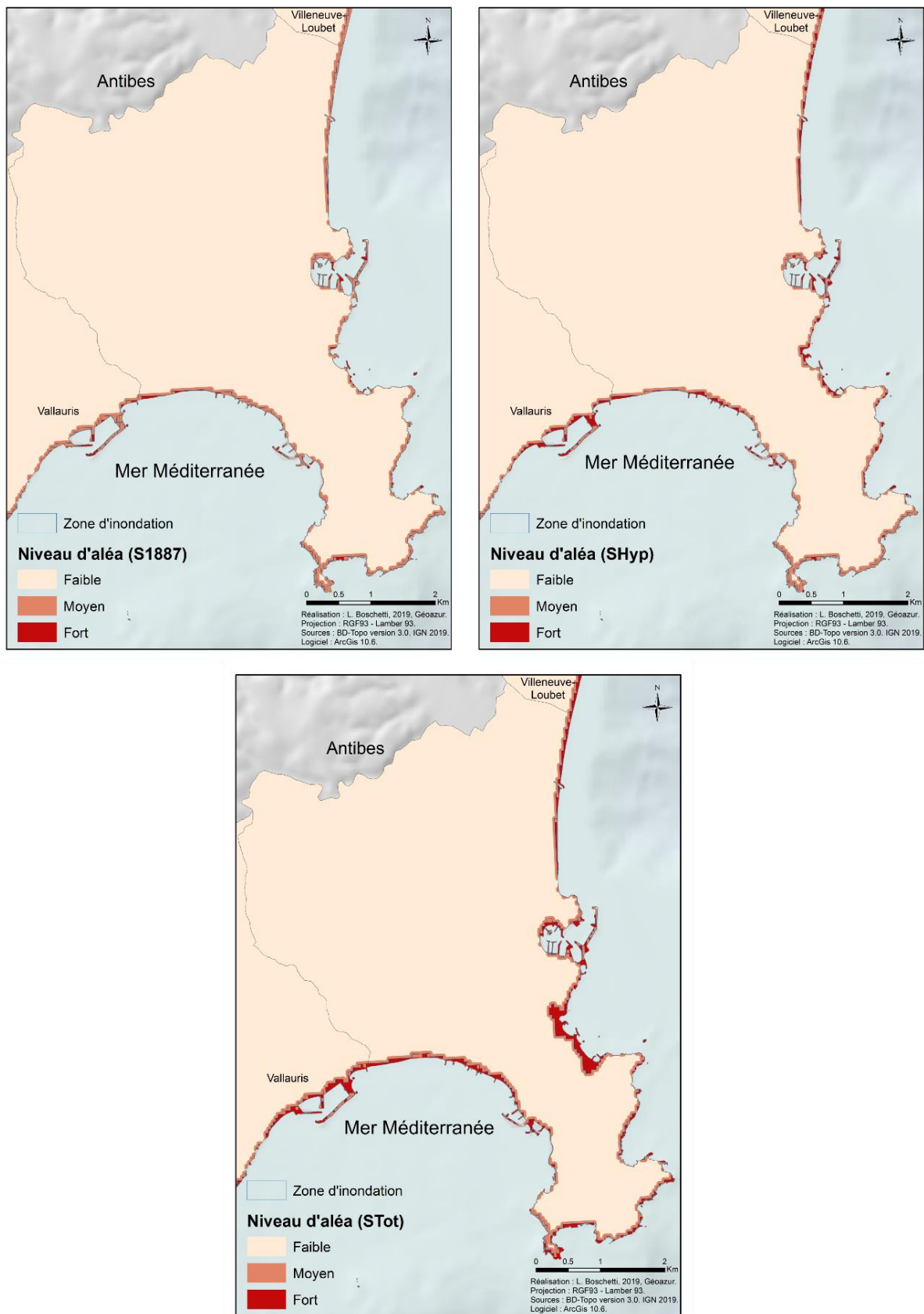


Figure 104 : Cartographie de l'aléa pour la ville d'Antibes

L'aléa rencontre ainsi certaines variabilités spatiales mettant en lumière certaines zones grandement exposées. Voyons à présent si ces dernières coïncident avec les espaces sensibles du territoire grâce à la cartographie de la vulnérabilité territoriale.

2.2.2. Cartographie de la vulnérabilité territoriale à Antibes

La commune d'Antibes, organisée autour de son Cap, voit quelques variations spatiales de sa vulnérabilité territoriale (Figure 105). Les espaces principaux qui ressortent sont les bordures littorales autour du cap, c'est-à-dire entre Golfe-Juan et Juan-les-Pins à l'ouest et après le Fort Carré, en direction de Villeneuve-Loubet, au nord. Ceux-ci sont à la fois des espaces dynamiques, qui permettent la circulation (à pied, à vélo, en voiture, etc.) et à la fois des espaces plus statiques, puisque des plages sont présentes tout du long. En cas de tsunami, ces populations seraient particulièrement exposées. Il est intéressant de souligner que les ports sont caractérisés en vulnérabilité faible, alors qu'eux aussi sont fortement exposés. La tâche principale au nord correspond à un camping, en dessous de laquelle se situe le centre hospitalier d'Antibes. D'autres points sporadiques ressortent en vulnérabilité moyenne et correspondent principalement à des ERP.

L'aléa et la vulnérabilité étant tous deux caractérisés et cartographiés, le risque a pu à son tour être déterminé et cartographié.

2.2.1. Cartographie du risque à Antibes

La commune d'Antibes combine à la fois de nombreux enjeux majeurs et un aléa fort, surtout au quartier de la Salis. La cartographie du risque semi-quantitatif obtenue (Figure 106), bien que focalisée sur la frange littorale, présente quelques variations.

Le risque de tsunami apparaît particulièrement faible dans l'hypothèse du scénario historique (S1887). Quelques espaces ressortent ponctuellement, principalement localisés aux entrées des baies (Golfe de Juan à l'ouest et Baie des Anges à l'est). L'ensemble du cap ressort en vulnérabilité faible. Le littoral présente un risque plus important pour le scénario hypothétique (SHyp), laissant toujours ressortir les espaces précédemment cités, auxquels s'ajoutent le quartier de la Salis et le Port Vauban. Le scénario extrême est similaire au scénario SHyp en ce qui concerne la localisation des espaces à risque fort ; l'emprise spatiale de ce dernier s'en trouve toutefois étendue. Ceci vaut pour les deux extrémités littorales communales, ainsi que pour le quartier de la Salis. Ce dernier apparaît comme étant particulièrement à risque, à la fois parce qu'il est directement exposé à l'aléa, et puisqu'il regroupe plusieurs enjeux majeurs (plages, ports, etc.).

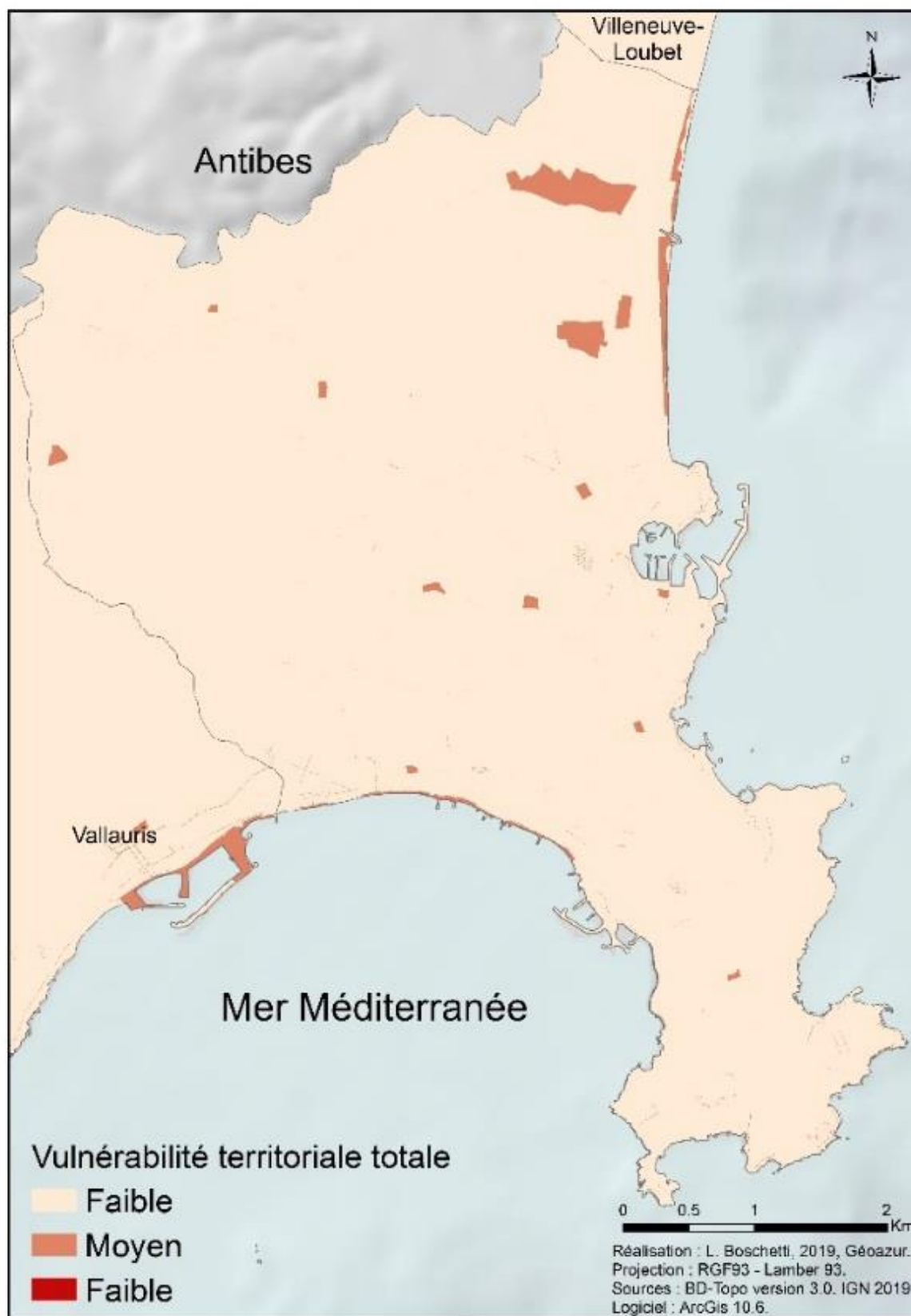


Figure 105 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale de la ville d'Antibes

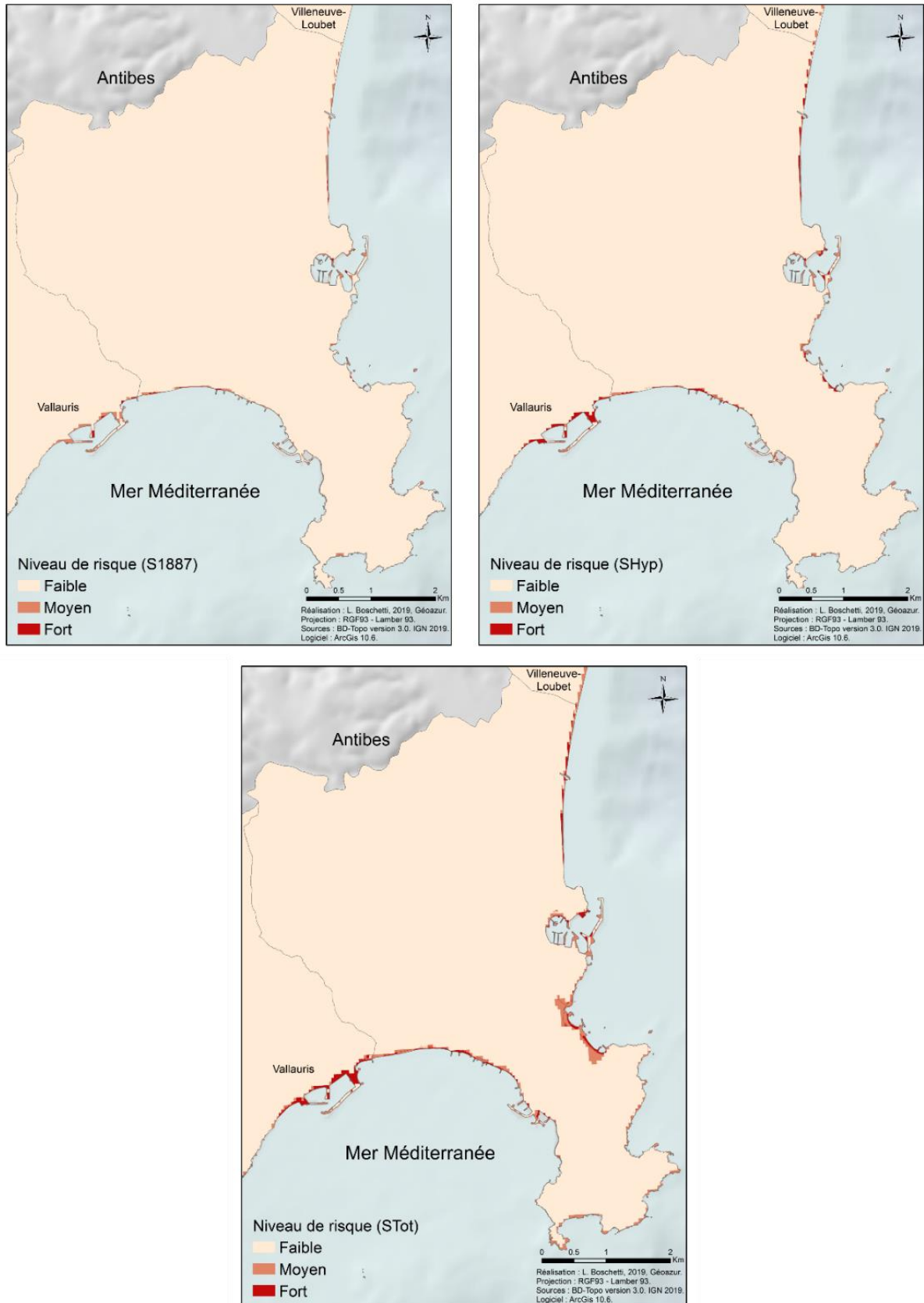


Figure 106 : Cartographie du risque semi-quantitatif à Antibes

2.2.2. Zoom sur le quartier de la Salis

Le quartier de la Salis est localisé à l'entrée nord du cap d'Antibes, le long de la Baie des Anges. Il est particulièrement exposé à l'aléa tsunami et a été par le passé impacté par les deux événements emblématiques de la région (le tsunami Ligure de 1887 et le tsunami gravitaire de 1979). Principalement résidentiel, il comprend une plage et un port de plaisance. La population qui le fréquente est donc principalement locale, avec toutefois la présence de touristes en période estivale. L'enjeu principal de cet espace est donc l'enjeu humain.

La cartographie du risque semi-quantitatif (Figure 107) est marquée par de fortes disparités entre les différents scénarios. Le S1887 impacte très localement la plage avec un risque moyen à fort. Le SHyp combine risque moyen et fort mais uniquement à proximité immédiate de la côte. Quant au STot, une zone bien plus importante est caractérisée par un risque moyen, impactant des rues résidentielles éloignées de la bordure littorale. Des zones de risque fort ressortent comme les plages, le port et des axes routiers (Boulevard James Wyllie, Boulevard Maréchal Leclerc).

Antibes apparaît donc comme disposant de littoraux à risque quel que soit le scénario. Un travail d'information serait donc à réaliser auprès de la population. Mettons l'accent à présent sur la commune de Nice.

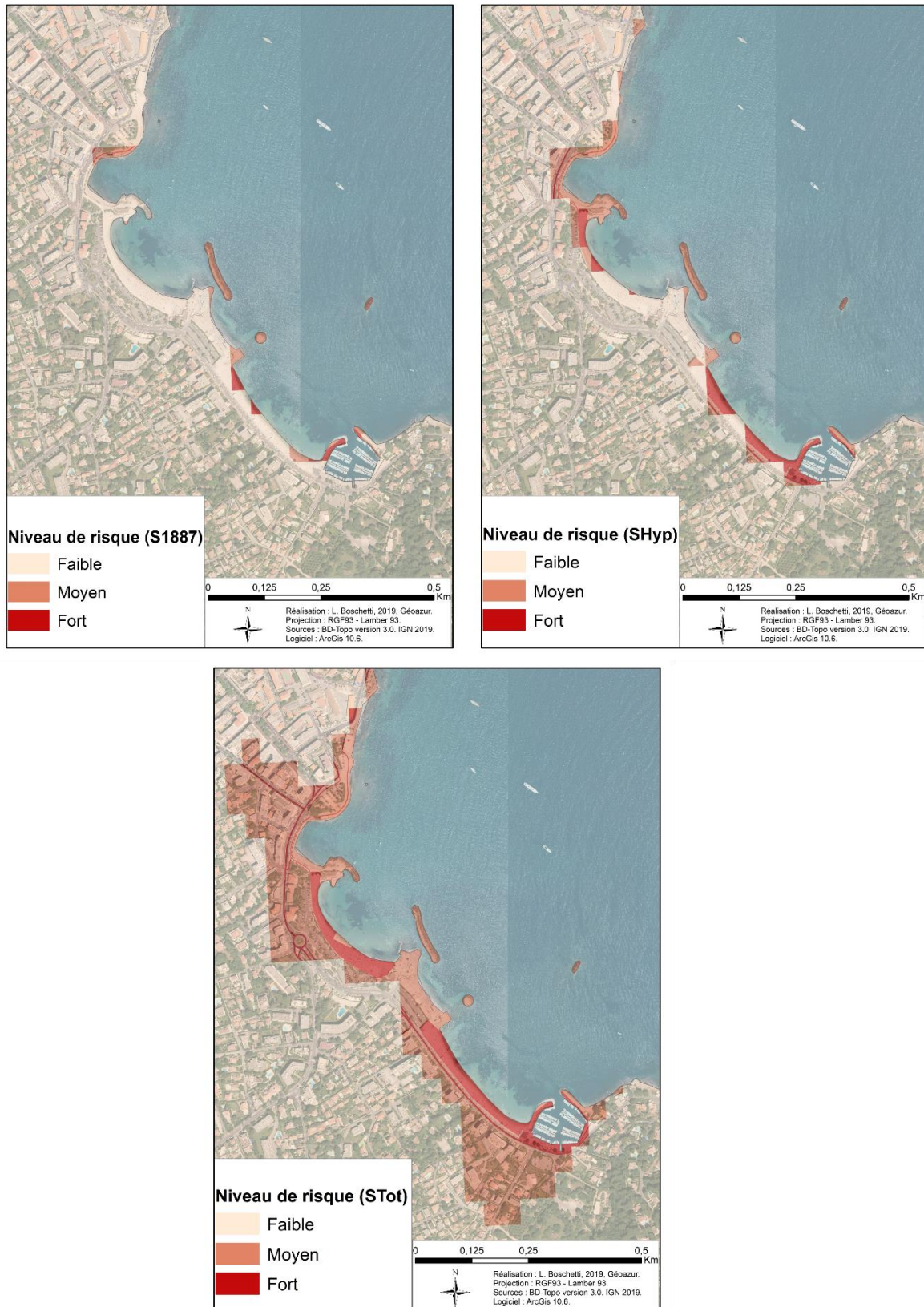


Figure 107 : Cartographie du risque semi-quantitatif au quartier de la Salis à Antibes

2.3. Nice, préfecture située le long d'une baie ouverte

Nice, préfecture du département, est une commune clé du littoral par les enjeux humains et économiques qu'elle regroupe, et également par son rôle crucial dans la gestion de crise. De même que précédemment, une focalisation est faite sur l'aléa, puis sur la vulnérabilité et enfin sur le risque.

2.3.1. L'aléa tsunami à Nice

Nice est localisée le long d'une baie ouverte, la Baie des Anges. Celle-ci est favorable au phénomène de défocalisation, ce qui peut potentiellement atténuer les effets d'un tsunami. Les données obtenues grâce aux simulations numériques permettent de faire ressortir certaines particularités. Les hauteurs d'eau obtenues pour le S1887 sont inférieures à 0.125 m sur l'ensemble du littoral communal à l'exception de l'aéroport où les hauteurs sont inférieures à 0.25 m. Une distinction est/ouest s'observe pour le SHyp et coupe la Promenade des Anglais au niveau du Centre Universitaire Méditerranée. L'est voit des hauteurs d'eau inférieures à 0.5 m et l'ouest à 0.75 m. Pour le scénario extrême (STot) les valeurs sont relativement homogènes le long de la côte et ne dépassent pas 1.5 m.

Les courants sont plus homogènes et connaissent moins de variation à l'exception des ports. Le scénario historique (S1887) voit des courants relativement faibles sur l'ensemble du littoral ($< 0.25 \text{ m.s}^{-1}$). Pour le scénario SHyp, les courants sont légèrement plus importants mais ne dépassent pas 0.5 m.s^{-1} sauf dans le port où ils peuvent monter jusqu'à 1 m.s^{-1} . Le scénario SHyp générerait des courants importants ($< 1 \text{ m.s}^{-1}$) le long de la Promenade des Anglais, pouvant rendre difficile tout déplacement. Au port, les vitesses peuvent atteindre 3 m.s^{-1} et ainsi générer des dégâts importants.

La cartographie de l'aléa tsunami pour cette commune se concentre une fois encore sur la bordure littorale (Figure 108). Le scénario historique (S1887) confère à l'ensemble de la côte un degré de d'aléa moyen. Aucun aléa fort n'est relevé. Le scénario SHyp voit apparaître des espaces où l'aléa est considéré comme fort. L'ensemble du bord de la Promenade des Anglais est concerné. Il se limite toutefois aux plages situées en contre-bas. Une fine frange de l'aéroport est en aléa fort, mais ne s'étant ni aux pistes ni aux terminaux, qui eux sont en aléa faible. Le port voit quelques « taches » de vulnérabilité forte apparaître. Le scénario extrême conserve une emprise spatiale similaire avec un léger développement d'espaces caractérisés en aléa fort. Ils restent cependant concentrés aux bordures immédiates du bord de mer, n'impactant ni la partie supérieure de la Promenade des Anglais, ni les parties fonctionnelles de l'aéroport. Le port quant à lui ressort majoritairement en aléa fort.

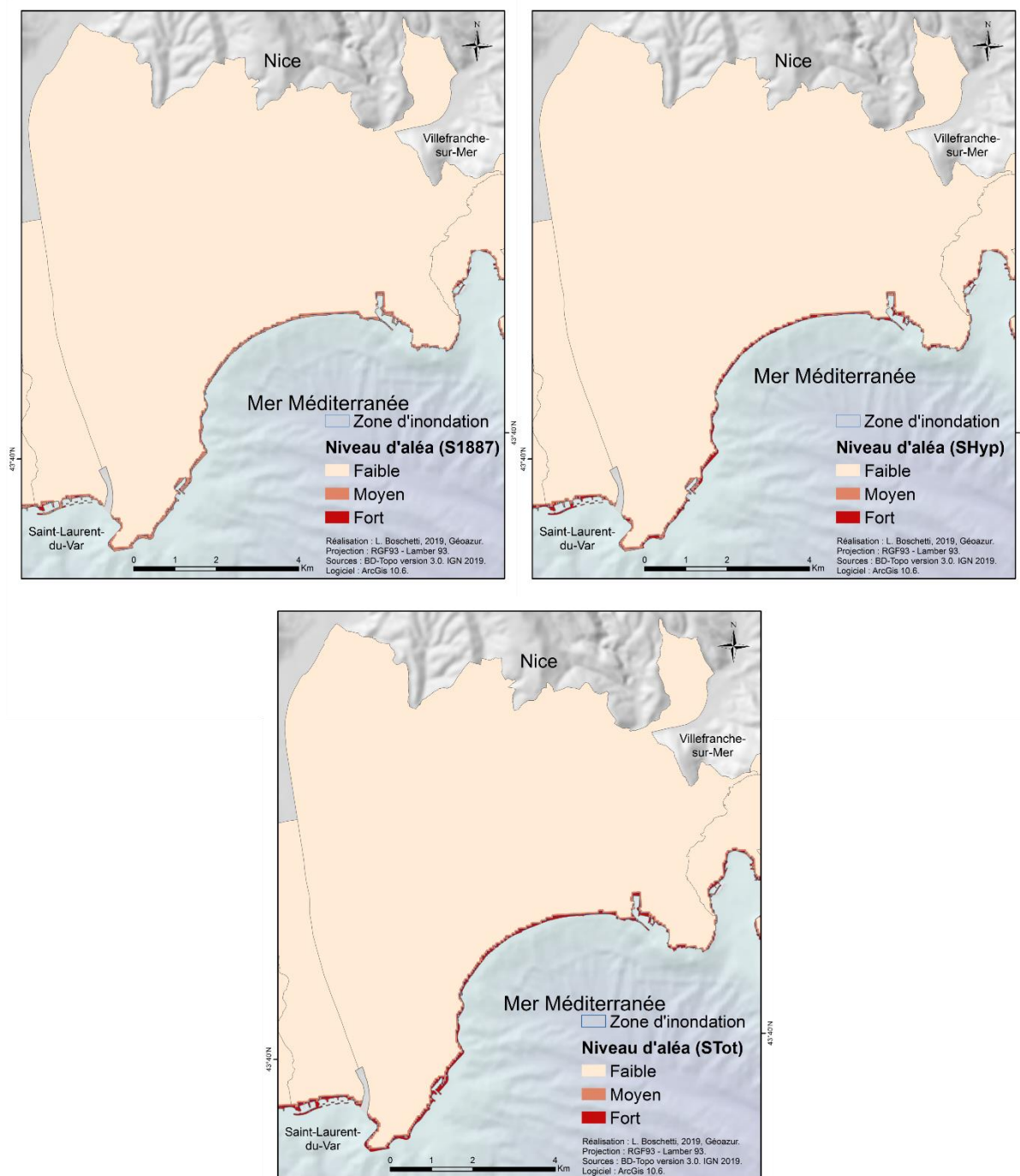


Figure 108 : Cartographie de l'aléa pour la ville de Nice

Une fois l'aléa analysé et cartographié pour l'ensemble des scénarios, l'analyse de la vulnérabilité territoriale est réalisée grâce à la détermination d'enjeux majeurs.

2.3.2. Cartographie de la vulnérabilité territoriale à Nice

Nice, de par son statut de préfecture de département, regroupe sur son territoire de nombreux enjeux majeurs. De plus, elle est le bassin principal de vie du littoral et présente une forte attractivité économique. Il est donc normal d'observer une grande variabilité spatiale de la vulnérabilité territoriale (Figure 109).

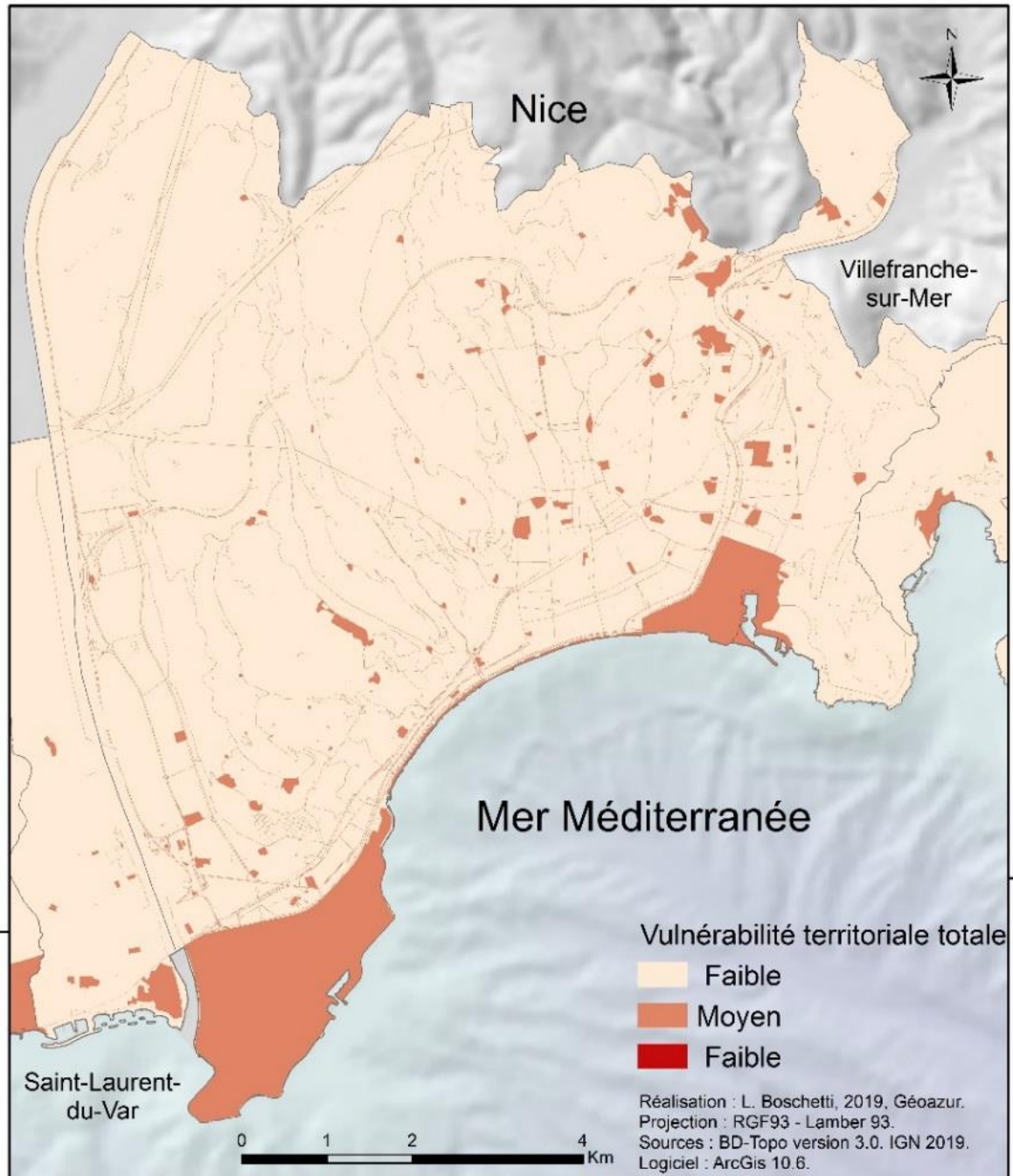


Figure 109 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale de la ville de Nice

Deux espaces ressortent particulièrement le long du littoral, l'aéroport Nice Côte d'Azur à l'ouest, et le Vieux-Nice et le port à l'est. Le premier, deuxième aéroport national, assure le transfert de plusieurs milliers de voyageurs par jours. Il s'agit donc d'un enjeu humain important. De plus, construit sur la mer, il a déjà fait l'objet d'un accident générateur d'un tsunami local (événement du 19 octobre 1979). Nous pouvons donc nous interroger sur sa potentielle vulnérabilité structurelle en cas d'un séisme majeur.

Le second correspond à la partie historique de la ville étendue aux quartiers alentours et au port. Cet espace est un espace de vie pour les locaux, mais également

un espace touristique majeur. Les vieux bâtiments qui le constituent peuvent être fortement impactés en cas de séisme, ces derniers étant construits avant les normes parasismiques. Bien que dissociée de l'aléa, la question de l'approche multi risque (tsunami et séisme générateur) se pose donc pour ces deux espaces. Ici, ne disposant pas des données et des connaissances nécessaires, une focalisation est faite uniquement sur le tsunami.

Ces deux espaces sont reliés par la Promenade des Anglais, qui longe l'ensemble de la Baie. Ces dernières, directement exposée en cas de tsunami, est un des centres névralgiques de la commune. Elle sert d'axe de communication principal entre l'est et l'ouest de la commune. Elle est également l'un des principaux espaces de détente et de loisirs de ce territoire.

Des nombreuses « taches » secondaires ressortent sur l'ensemble de la commune, avec une légère prédominance de ces dernières à l'est de la commune, le long du Paillon. On y retrouve notamment les différentes structures de l'hôpital Pasteur, CHU de Nice. Au centre de la commune, se retrouve principalement des ERP à public sensible. Au sud-ouest, derrière l'aéroport, se trouve le quartier de l'Arenas et le Centre Administratif Départemental des Alpes-Maritimes (CADAM), respectivement quartier d'affaire et cité administrative. Ils concentrent des enjeux économiques et organisationnels (réseaux « *softs* ») ainsi que de nombreux enjeux humains.

Nice connaît une variation spatiale importante de la vulnérabilité. Celle-ci, combinée avec l'analyse de l'aléa, permet d'obtenir la cartographie du risque à Nice.

2.3.3. Cartographie du risque à Nice

La cartographie du risque semi-quantitatif pour la commune de Nice (Figure 110) s'avère être similaire à la cartographie de l'aléa puisque les zones à risque moyen et fort sont concentrées sur la bordure littorale, gommant les particularités du territoire mises en avant grâce à la cartographie de la vulnérabilité territoriale totale. Les cartes obtenues sont grandement similaires.

Dans le cas du scénario historique, un bandeau continu de risque moyen relie l'aéroport au port, tout au long de la Promenade des Anglais. Seul ressort en risque fort un espace correspondant aux plages à l'extrémité est de la Promenade des Anglais, au niveau de la vieille ville. Ce cordon de risque moyen est transformé en risque fort pour le scénario hypothétique (SHyp). Ce niveau de risque devient alors dominant le long de la côte. Le scénario extrême est similaire au précédent, à la seule différence que son emprise spatiale est légèrement plus importante. L'ensemble de la bordure littorale de commune est caractérisé en risque fort et le port se voit caractérisé par un risque plus fort.

L'ensemble du littoral est donc, pour l'ensemble des scénarios, une zone à risque (plus ou moins fort selon les scénarios). Bien que ce risque soit principalement localisé sur un espace restreint, cela suffirait à impacter les personnes présentes sur les plages, posant de nombreux problèmes, notamment d'évacuation. Le port ressort également comme étant un espace à risque qui combine enjeux humains et

économiques. Les structures nécessaires au fonctionnement de l'aéroport devraient être hors de portée.

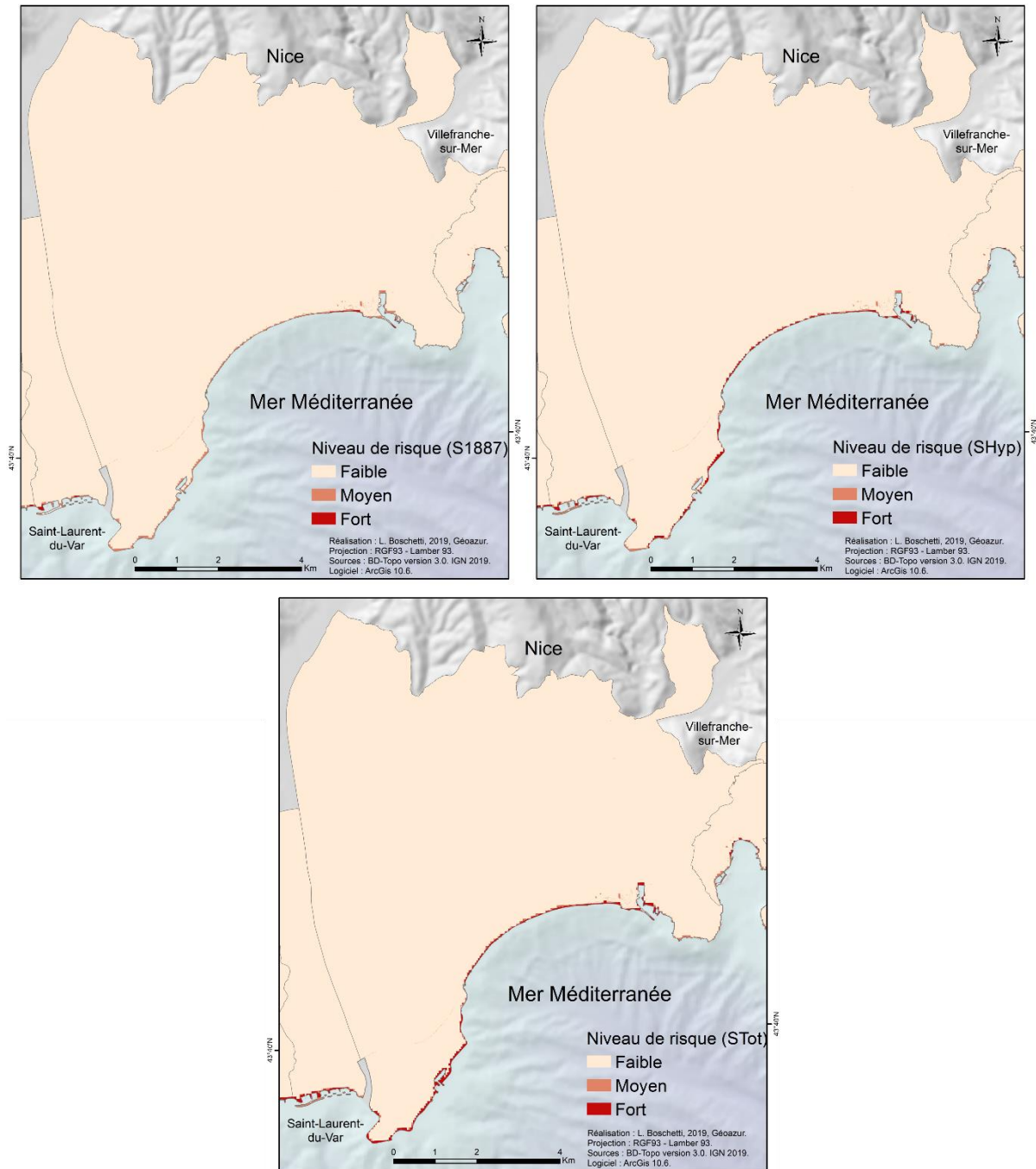


Figure 110 : Cartographie du risque semi-quantitatif à Nice

2.3.4. Zoom sur le Vieux-Nice et le quartier du port

La ville de Nice présente une vulnérabilité globalement moyenne du fait du nombre d'enjeux qu'elle contient. Ceux-ci sont localisés à divers endroits de son territoire communal. Ici, un zoom est effectué sur la vieille ville et autour du port car ce sont des espaces de vie et à forte attractivité touristique et économique.

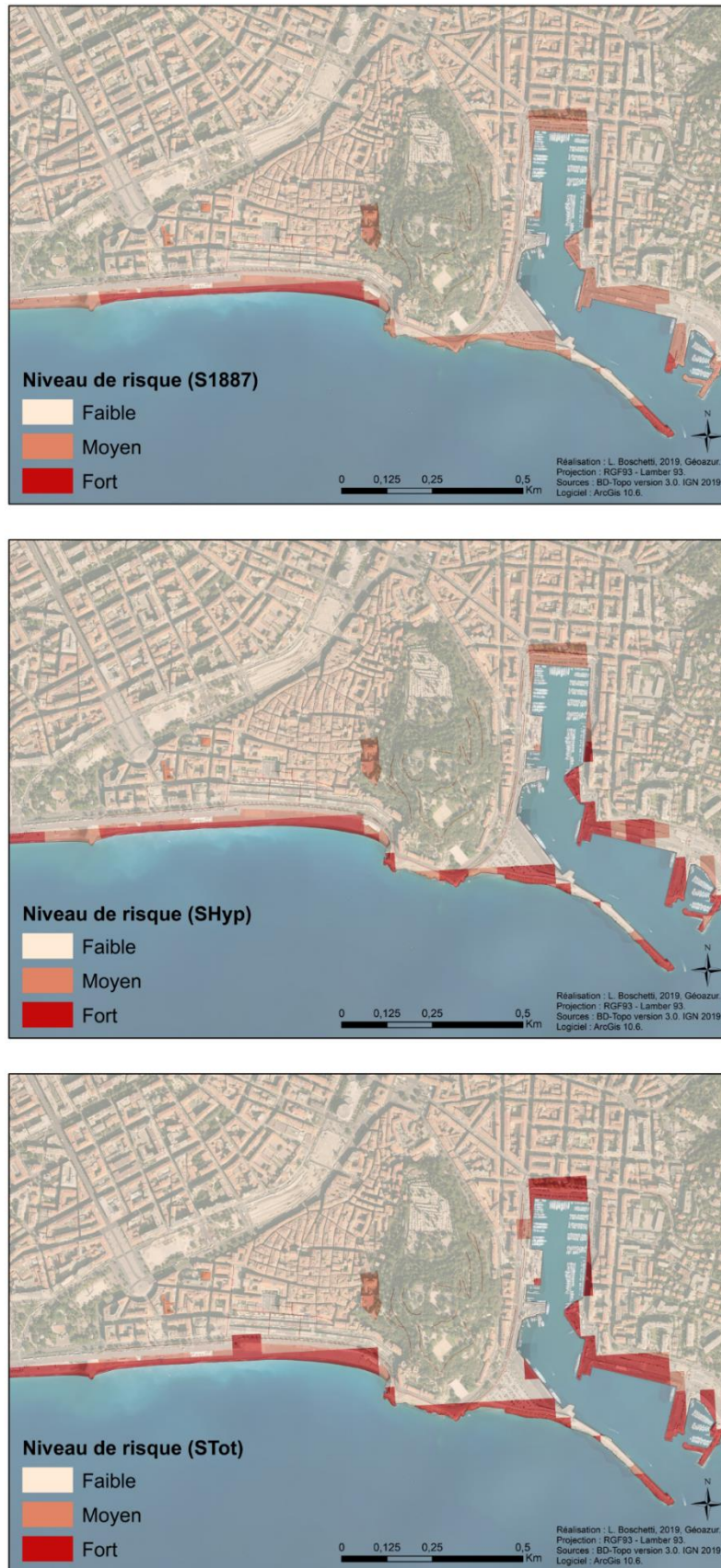


Figure 111 : Cartographie du risque semi-quantitatif dans la vieille ville et au port de Nice

L'ensemble de la frange littorale est caractérisé par un risque moyen à fort pour l'ensemble des scénarios (Figure 111). Le scénario historique (S1887) dispose d'une vulnérabilité moyenne pour le Port, certains axes de communication et ERP (Mairie et école). Les plages situées à l'est de la Promenade des Anglais (plage des Ponchettes et Castel plage) disposent d'un risque fort. Le scénario hypothétique (SHyp) est sensiblement similaire et voit s'agrandir la zone de risque fort le long des plages et du port. Le scénario extrême (STot) est très majoritairement caractérisé en risque fort le long du littoral.

Nice et les communes précédemment présentées voit le risque varié uniquement sur la frange littorale. Qu'en est-il pour Monaco, ville plus petite et concentrée sur littoral.

2.4. A l'est, la cité-état de Monaco

Monaco, est la ville sélectionnée la plus à l'est et donc la plus proche de la source du tsunami. En cas de tsunami, elle sera la première impactée et potentiellement la plus touchée des quatre. Sa taille restreinte et la quantité des enjeux présents en font un territoire primordial à étudier.

2.4.1. L'aléa tsunami à Monaco

Monaco, de par sa structuration liée aux contraintes physiques, dispose d'une grande partie de son territoire localisée à proximité immédiate de la mer. Elle dispose de nombreuses structures et infrastructures localisées à cette interface, dont 2 ports, le Port Hercule et le Port de Fontvieille, ainsi que des plages.

Les données de hauteurs d'eau et de courants obtenues pour Monaco présentent des variations importantes entre les différents scénarios. Les hauteurs d'eau du scénario historique (S1887) sont inférieures à 0.25 m sur la quasi-totalité du territoire, à l'exception des plages où elles peuvent atteindre 0.375 m. Le scénario SHyp présente une distinction est/ouest ; à l'ouest coté port les hauteurs sont inférieures à 0.5 m et à l'est, là où se trouvent les plages, les hauteurs peuvent atteindre 1 m. Dans l'hypothèse du scénario STot, les vagues générées seraient inférieures à 2.5 m aux plages mais pourraient atteindre 4 m au port Hercule.

Les courants générés par le tsunami seraient quasi nuls pour le S1887 à l'exception de l'entrée du port Hercule, entre les différentes digues, où ils pourraient dépasser les 1 m.s⁻¹. Dans le cas du scénario SHyp, les courants sont plus importants (< 0.75 m.s⁻¹) aux côtes mais peuvent atteindre 3 m.s⁻¹ à l'entrée de ce même port. Le scénario STot générerait des courants puissants : moins de 1 m.s⁻¹ aux plages et inférieurs à 6 m.s⁻¹ au port Hercule. Des dégâts pourraient alors être importants dans le port d'autant plus que la vague sortirait du port pouvant impacter les personnes à proximité et mobiliser des embâcles venant du port.

Les emprises spatiales des différents degrés d'aléa varient selon les scénarios (Figure 112). Le scénario S1887 ne fait apparaître uniquement que des espaces à

vulnérabilité faible et moyenne, même pour les zones inondées. Ceci signifie qu'en ces espaces les intensités sont faibles (donc petit courant et peu de montée des eaux).

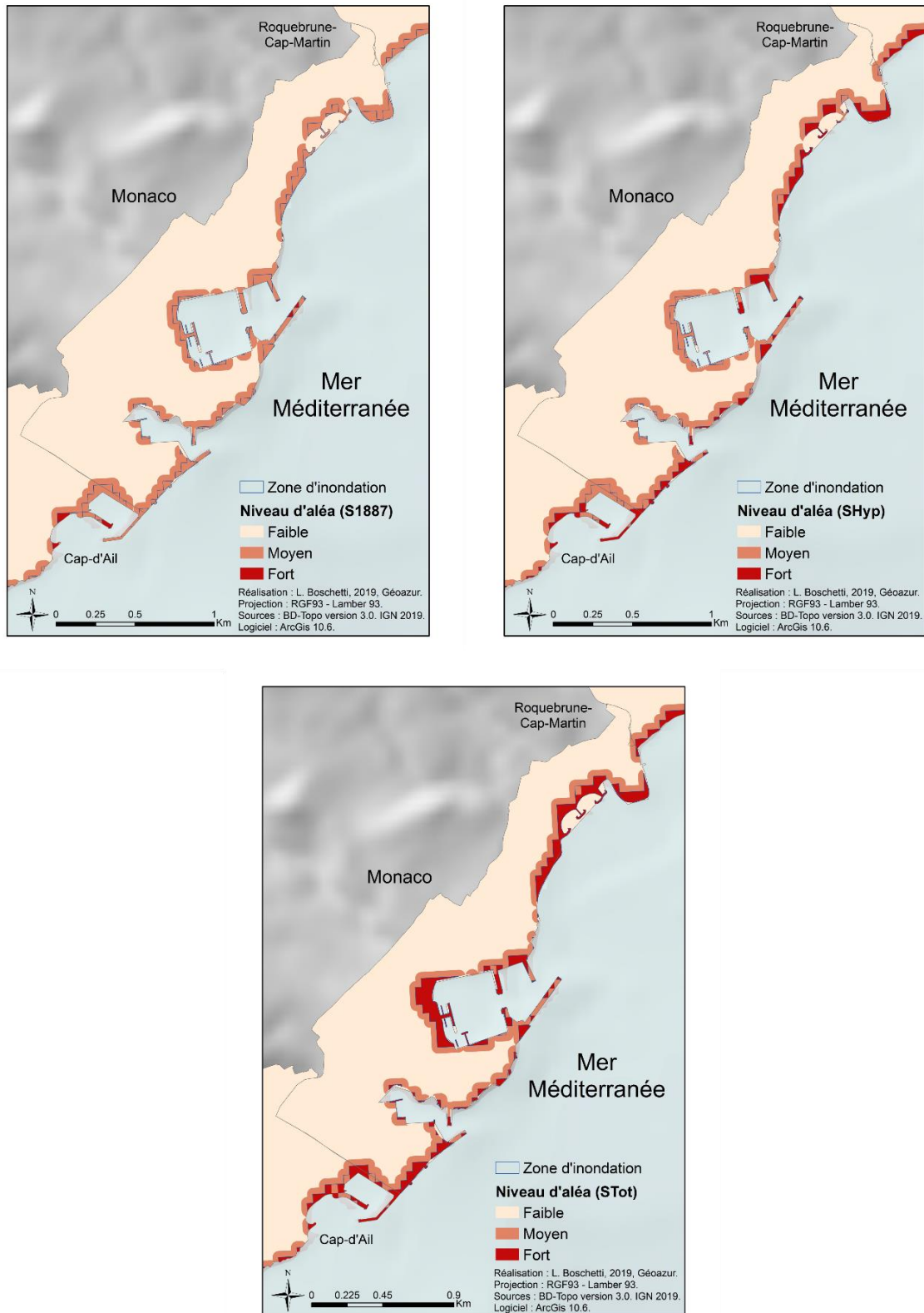


Figure 112 : Cartographie de l'aléa pour Monaco

Le scénario SHyp, grandement similaire au précédent en termes d'emprise spatiale, voit apparaître des espaces de vulnérabilité forte, avant le port de Fontvieille, le long des différentes digues du Port Hercule et le long du quartier de Larvotto. Un net changement s'opère dans la cartographie du scénario total (STot) ou une large frange caractérisée en aléa fort ressort. Cette-ci correspond en grande majorité aux zones d'inondations obtenues grâce au modèle (et dont l'intensité est supérieure à 1). L'ensemble du Port Hercule se voit ainsi caractérisé en aléa fort.

Monaco dispose d'importantes variations d'altitudes. Or ces dernières sont souvent trop brusques pour pouvoir être correctement représentées dans le modèle numérique. Il y a donc une exagération de l'inondation en ces points. C'est le cas par exemple « Le Rocher », falaise abrupte où se trouve la vieille ville, en hauteur et sans accès direct à la mer. En revanche, d'autres endroits, dont les variations topographiques sont moins importantes, peuvent être sous-évalués.

L'aléa tsunami est ainsi déterminé et cartographié. Une analyse de la vulnérabilité permet d'observer la répartition des enjeux majeurs et de faire ressortir les points sensibles de ce territoire.

2.4.1. Cartographie de la vulnérabilité territoriale à Monaco

La cartographie de la vulnérabilité territoriale de Monaco nécessite une analyse à deux niveaux. A l'échelle du littoral (Figure 15, Chapitre 13), elle ressort comme étant particulièrement vulnérable, de par la quantité d'enjeux présents sur son territoire, condensés en un espace particulièrement restreint. A l'échelle communale (Figure 113), elle ne présente que peu d'intérêt car elle est entièrement considérée en vulnérabilité moyenne. Aucune variabilité locale ne ressort. Ceci est majoritairement dû à plusieurs enjeux dont l'emprise spatiale est de la taille de l'ensemble du territoire, ce qui vient gommer les enjeux localisés comme les ERP ou les réseaux « soft » structurels. En combinant ces résultats avec les précédents, une analyse de risque semi-quantitative est réalisée.

2.4.1. Cartographie du risque à Monaco

Les deux cartographies précédentes ont permis, via la mise en application d'un tableau de croisement, de réaliser une cartographie du risque semi-quantitatif (Figure 114) pour chacun des trois scénarios d'aléa. Celle-ci, tout comme celle représentant l'aléa, présente une gradation du niveau de risque pour ces trois scénarios.

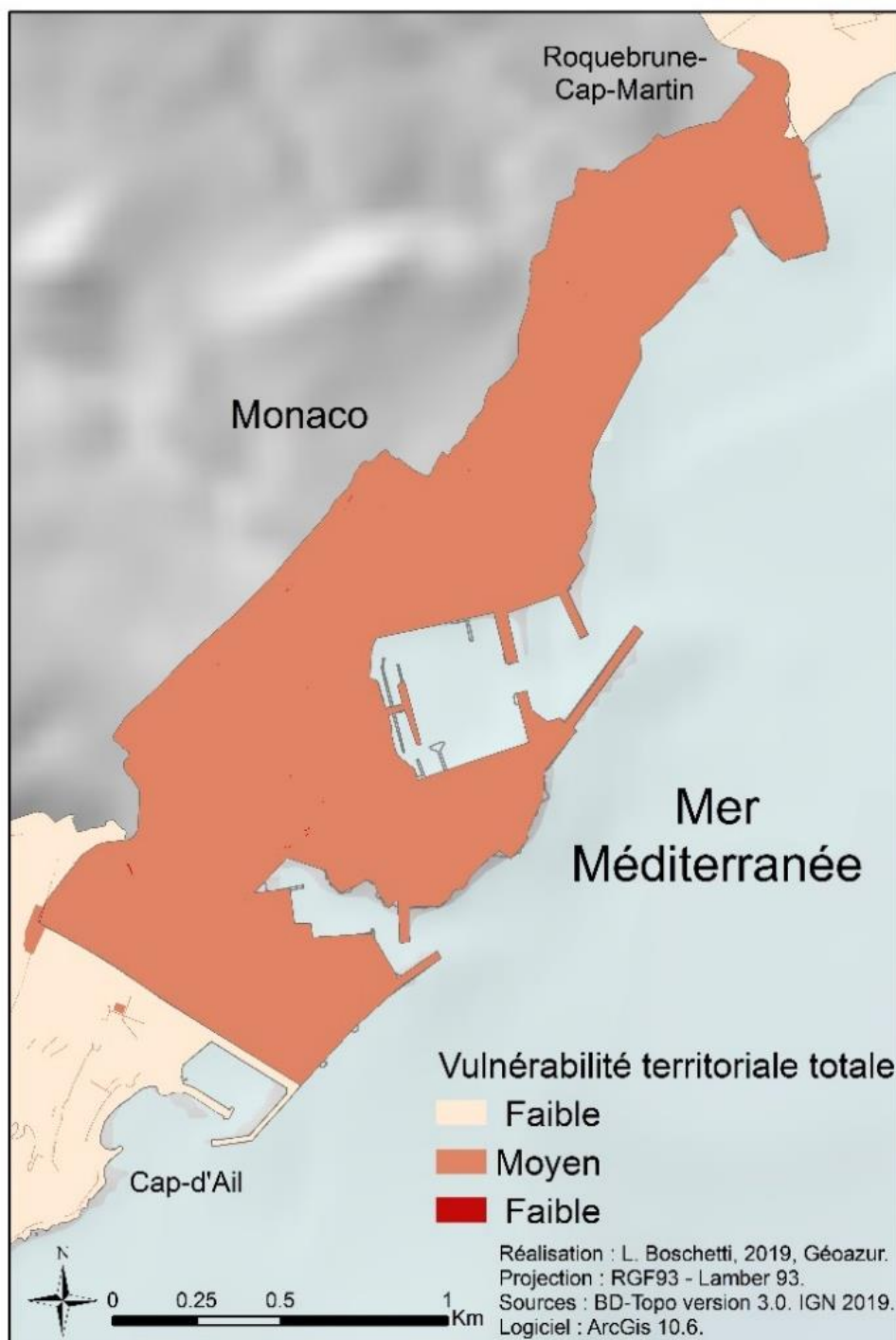


Figure 113 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale à Monaco

Le scénario S1887, laisse quasiment l'ensemble de cette cité en risque faible, à l'exception des plages du Larvotto. Le scénario hypothétique (SHyp) laisse apparaître des espaces de risque moyen disséminés le long du littoral. Les plages du Larvotto sont ici caractérisées en risque fort. Le scénario extrême (STot) forme un espace quasi-discontinue le long du littoral caractérisé en risque modéré, à l'exception des plages du Larvotto, toujours caractérisées par un risque fort. Le Port Hercule apparaît être un espace à risque modéré lors de l'évènement extrême, qui s'avère être un point stratégique au vu du nombre d'enjeux qu'il regroupe. Quel que soit les scénarios, les plages du Larvotto ressortent toujours comme étant une zone à risque.

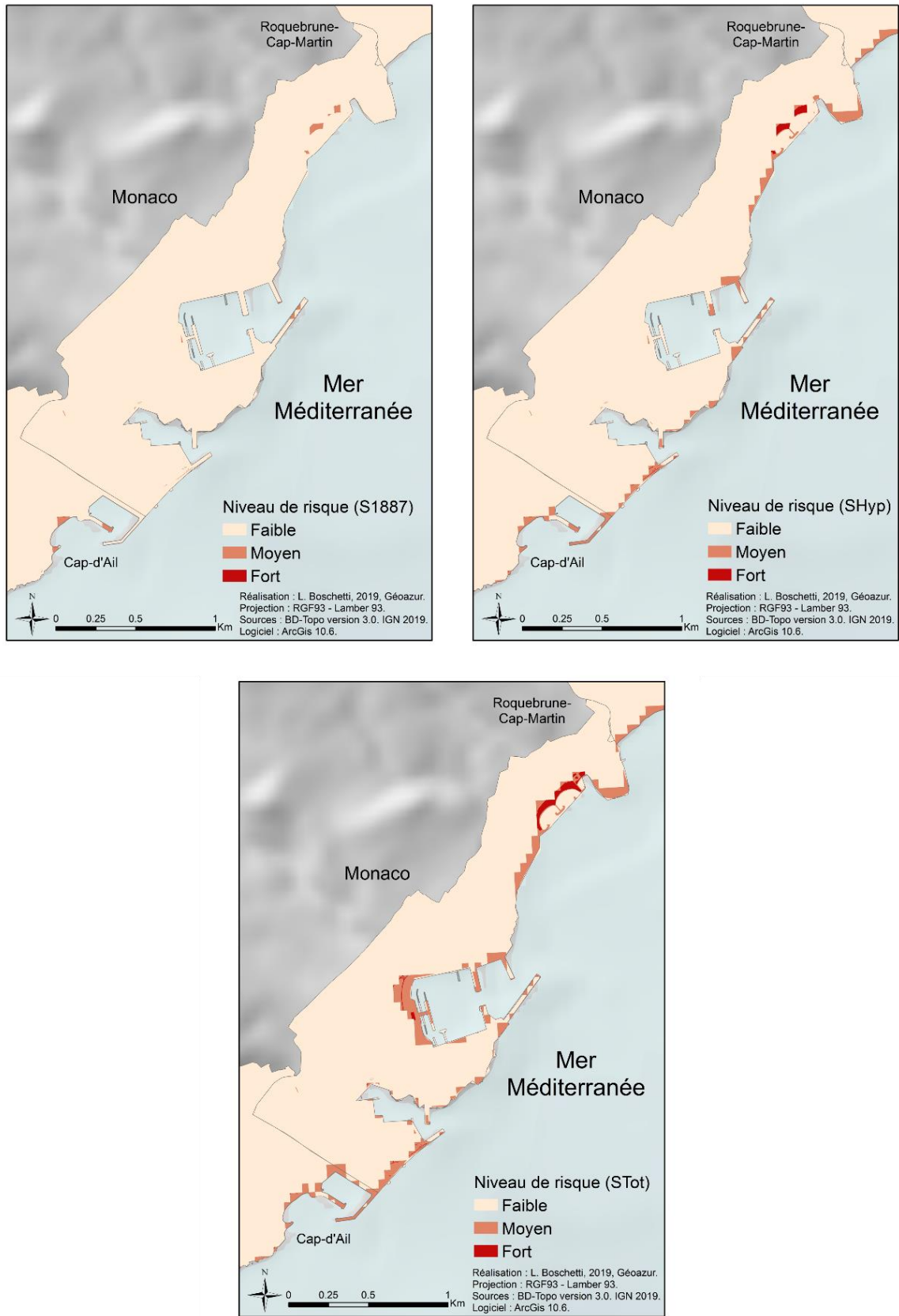


Figure 114 : Cartographie du risque semi-quantitatif à Monaco

2.4.2. Zoom sur le Port Hercule

Le port Hercule est un espace particulier qui condense de nombreux enjeux, principalement humains et économiques. Ce port de plaisance attire touristes, locaux et est générateur de nombreux emplois. Il contient de nombreux bateaux et yachts de luxes qui, en cas de dégâts, peuvent générer des pertes matérielles et économiques importantes. Il est entouré par deux zones surélevées : Monté Carlo au nord et le Rocher au sud. A l'est, une zone relativement plate, le quartier de la Condamine, fait la jonction entre les deux.

La cartographie du risque semi-quantitatif obtenue pour cet espace (Figure 115) varie fortement selon les scénarios d'aléa. Dans le cas du scénario historique (S1887) le port apparaît protégé et est caractérisé dans sa globalité par un risque faible. Le scénario hypothétique (SHyp) laisse apparaître quelques espaces à vulnérabilité moyenne, principalement le long des espaces de protections. Dans l'hypothèse d'une rupture totale de la faille Ligure (STot), le port serait grandement impacté, c'est pourquoi il est caractérisé en risque moyen, avec certaines zones en vulnérabilité forte, comme la partie nord du Boulevard Albert 1^{er} qui longent le port et qui est bordé par des habitations et des commerces.

Il faut toutefois garder en mémoire que ces résultats sont dépendants de la résolution des simulations numériques de l'aléa. La précision est donc celle du pixel, c'est-à-dire quarante mètres. Les ouvrages de protection comme les digues sont parfois sous ou sur représentés.

Le port Hercule est donc un espace qui condense plusieurs enjeux et qui est exposé à l'aléa tsunami, principalement dans le cas de l'évènement extrême (STot).

Ces analyses par communes ont permis de faire ressortir les particularités locales de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque. L'utilisation de l'approche semi-quantitative par mise en indice permet ainsi une cartographie de ces données. Cette dernière permet de mettre en lumière visuellement les espaces à risques. L'approche par normalisation est ensuite utilisée afin de pouvoir réaliser des comparaisons.

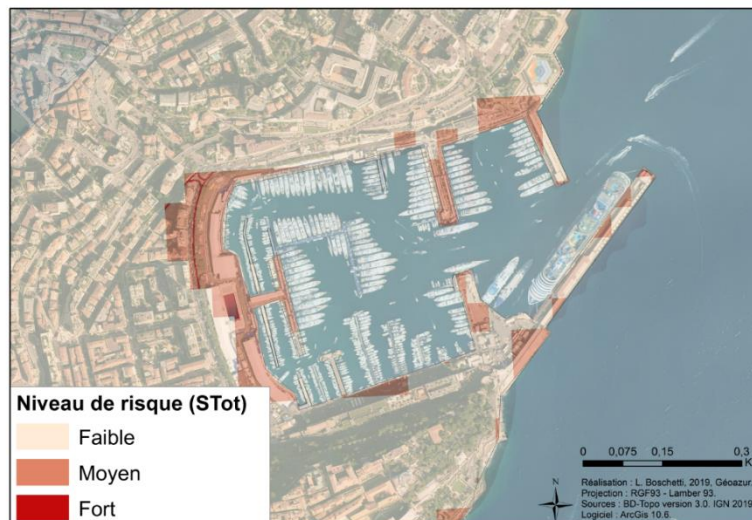
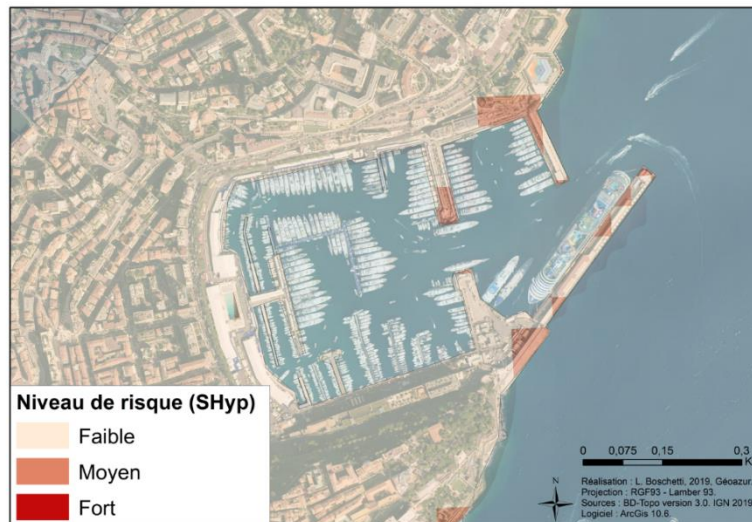
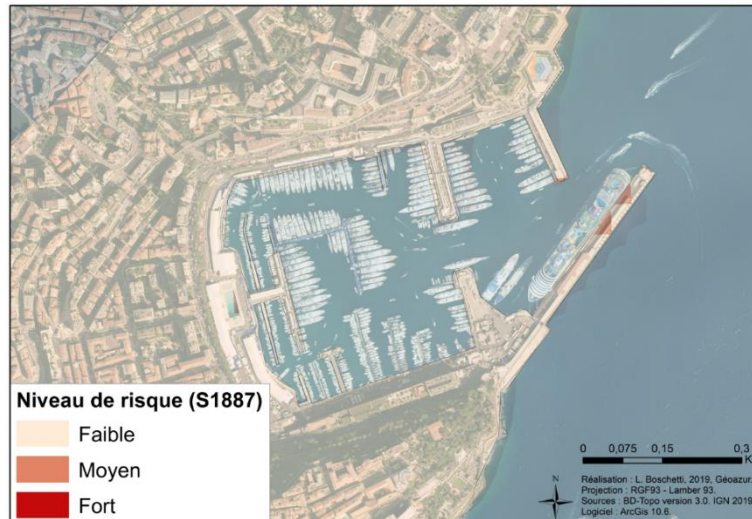


Figure 115 : Cartographie du risque semi-quantitatif au port Hercules (Monaco)

3. Le risque normalisé pour ces quatre communes

La méthodologie de normalisation du risque proposée a pour objectif la réalisation de comparaisons entre différents événements, différents territoires, etc. Pour cela, il faut que la méthodologie utilisée soit strictement identique, ce qui est le cas ici. Il est ainsi possible de comparer numériquement les différents scénarios et les différentes communes entre elles. En l'état actuel des choses, nous ne sommes cependant pas en mesure de qualifier les valeurs obtenues.

Pour chaque territoire et chaque scénario ont été déterminés, parmi l'ensemble des valeurs obtenues, les minimums et maximums, la moyenne et l'écart type. Ceux-ci sont répertoriés dans le tableau ci-dessous (Tableau 42) :

Lieu	Indicateurs	S1887	SHyp	STot
Cannes	Moyenne	0.136	0.139	0.154
	Ecart type	0.073	0.077	0.098
	Min	0.028	0.028	0.028
	Max	0.403	0.440	0.523
Antibes	Moyenne	0.111	0.118	0.139
	Ecart type	0.067	0.078	0.107
	Min	0.019	0.019	0.019
	Max	0.412	0.500	0.542
Nice	Moyenne	0.088	0.091	0.094
	Ecart type	0.049	0.056	0.065
	Min	0.028	0.028	0.028
	Max	0.370	0.514	0.569
Monaco	Moyenne	0.158	0.162	0.178
	Ecart type	0.038	0.050	0.082
	Min	0.037	0.037	0.037
	Max	0.421	0.463	0.546
Ensemble du littoral	Moyenne	0.105	0.109	0.123
	Ecart type	0.067	0.075	0.103
	Min	0.009	0.009	0.009
	Max	0.472	0.514	0.593

Tableau 42 : Synthèse des valeurs obtenues par l'approche normalisée du risque pour les communes sélectionnées et pour chaque scénario d'aléa

Les minimums et maximums fixent les bornes des valeurs obtenues. La moyenne et surtout l'écart type permettent d'analyser la répartition des individus statistiques par rapport à la moyenne. Plus l'écart type est petit plus les entités sont similaires et connaissent peu de variation. Ici, dans l'ensemble, les écarts types sont petits (compris entre 0.0384 et 0.1074). L'ensemble des valeurs est donc proche de la moyenne calculée.

L'analyse par scénario (pour un même territoire) montre pour l'ensemble des territoires étudiés qu'une gradation s'opère. En effet, les valeurs les plus faibles correspondent au scénario historique et les valeurs les plus fortes concernent le scénario extrême. Ces résultats étaient attendus vu que dans le premier la source est relativement éloignée des côtes françaises. Le scénario hypothétique, plus proche de ces dernières ne rivalise toutefois pas en puissance avec le scénario extrême, bien

plus impactant pour l'ensemble du territoire. Seule rentre en compte la variation de l'aléa.

Une comparaison par localisation laisse ressortir d'autres informations puisqu'elle ajoute à la composante aléa, la composante vulnérabilité. En effet, l'aléa varie d'un territoire à l'autre, selon son éloignement à la source et à ses particularités locales (liées à la bathymétrie), et la vulnérabilité territoriale change également selon le territoire pris en considération.

Ici l'idée n'est pas de réaliser une étude statistique poussée, mais seulement de comparer rapidement et facilement plusieurs événements. Les valeurs globales sont données à titre indicatif afin de savoir où se situe la commune par rapport à l'ensemble du littoral. Monaco ressort, pour l'ensemble des scénarios, comme disposant des valeurs de moyenne les plus importantes. Ceci s'explique par sa proximité à la source (le territoire le plus proche) et par la forte vulnérabilité territoriale de Monaco.

A l'inverse, le territoire qui dispose des valeurs de risque moyen les plus faibles est Nice. Ceci est plus surprenant puisqu'il s'agit d'un territoire qui contient de nombreux enjeux majeurs et qui est crucial pour la gestion de crise à l'échelle communale mais également à échelle départementale. Il faut toutefois relever que, bien que ces valeurs moyennes soient inférieures aux valeurs globales, les extrêmes, et plus particulièrement les maximaux, sont proches (pour STot) voir identiques (SHyp) à celles obtenues pour l'ensemble du littoral.

Les communes de Cannes et d'Antibes présentent toutes deux des valeurs moyennes de risques supérieures à celles globales. Cannes ressort comme ayant un risque plus fort qu'Antibes, mais disposent de maximums plus petits. Si un classement devait être établi, Monaco apparaîtrait comme étant la plus à risque, suivie de Cannes, d'Antibes, puis de Nice.

La représentation cartographique de ces informations peut se faire telle quelle, mais il est préférable de passer par une seconde normalisation qui permet d'aboutir au risque territorial relatif ([Chapitre 14](#)). Ces cartographies ne sont pas détaillées ici mais ont été globalement commentées dans le chapitre précédent ([Chapitre 15](#)).

4. [Conclusion](#)

Ce chapitre, focalisé sur la présentation des résultats à une échelle communale et infra-communale, a permis de faire ressortir les particularités locales de chaque ville analysée. Les espaces exposés à l'aléa tsunami ont pu être souligné et les vulnérabilités de chaque territoire ont été mises en lumière. Tout ceci a abouti à une cartographie du risque semi-quantitatif, toujours à échelle communale.

Cannes, la ville la plus éloignée de la source, présente un risque fort au niveau de son centre-ville, de la Croisette et de ces ports. Antibes, et plus particulièrement le quartier de la Salis, présente des variabilités importantes selon les scénarios. Il s'agit d'une des zones où l'emprise spatiale du risque est la plus forte. Nice connaît peu de variation sur son littoral, quel que soit le scénario. La Promenade des Anglais et le port

sont toutefois des espaces à risque moyen à fort. Monaco, ville la plus proche de la source, est caractérisé par un niveau de risque important. Le port Hercule et les plages ressortent comme étant particulièrement sensibles.

Cannes apparaît comme précurseur dans la gestion des risques et des catastrophes, notamment dans la prise en compte du risque de tsunami. Suite aux inondations mortelles d'octobre 2015, la commune s'est sérieusement penchée sur la question, devenant l'une des premières communes françaises (de métropole) à réaliser un exercice d'alerte de tsunami (le 5 novembre 2018). De plus, il s'agit d'une des communes à intégrer le tsunami dans son DICRIM comme un aléa à part entière et non comme un aléa rattaché aux séismes ou aux aléas gravitaires.

D'autres communes s'ouvrent à la problématique des événements brutaux, dont les tsunamis, qu'il s'agisse de participation à des groupes de paroles dans des projets de recherche (Com2SiCa) ou dans l'intégration de l'aléa dans des documents d'informations à la population comme les DICRIM ou le SDACR.

Cette analyse a été complétée par l'apport de l'approche par normalisation, qui permet une comparaison simple et rapide de différents événements et de différents territoires. Les deux approches sont donc complémentaires puisque l'une permet une cartographie facilement interprétable (approche semi-quantitative) et l'autre permet la réalisation de comparaisons.

CONCLUSION DE LA PARTIE IV – ANALYSE COMPARATIVE DES DEUX METHODOLOGIES PROPOSEES

Deux méthodologies d'analyse du risque permettant l'obtention de cartographies de celui-ci ont été appliquées, utilisant chacune une approche différente. La première, **semi-quantitative**, a nécessité la mise en indice de l'ensemble des composantes de l'aléa (intensité et éloignement) et de la vulnérabilité (enjeux majeurs). Plusieurs croisements ont ensuite été utilisés, nécessitant des tableaux de croisements (Manche, 1997). Le risque est ainsi qualifié et représenté sous forme d'indice à trois niveaux : faible, moyen et fort.

La seconde approche, **normalisée**, a conservé la méthode indicielle d'analyse des enjeux majeurs, en revanche, les croisements finaux ne passent plus par un tableau de croisement mais par une normalisation de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque. Les valeurs obtenues sont ainsi comprises entre 0 et 1 et ne permettent plus une qualification du risque. Pour pallier cela, une transformation en pourcentage relatif a été effectuée. Pour chaque scénario le risque normalisé maximal a servi de base au calcul de cette valeur.

Nous proposons ici de comparer les résultats obtenus pour ces deux approches, afin de voir si des similitudes existent ou s'ils diffèrent spatialement.

1. Deux approches – deux résultats distincts

Les deux approches proposées aboutissent à des cartographies distinctes. Avant même de rentrer dans les détails, certaines différences s'observent au premier regard. La [Figure 116](#) permet une mise en opposition de chaque étape de chaque méthodologie, c'est-à-dire l'obtention de la cartographie de l'aléa total, celle de la vulnérabilité territoriale et celle du risque.

Dans le premier cas, seul trois niveaux d'indice (faible, moyen et fort) sont possibles à chaque fois, alors que le second permet l'obtention d'une multitude de valeurs qu'il est possible de représenter graphiquement par un nombre de classes variables (10 dans la carte d), 6 pour la e) et 5 pour la carte final f)). Un niveau de détail différent est alors obtenu. Là où la méthodologie semi-quantitative aboutit à une cartographie lissée, la méthodologie qualitative permet l'obtention de cartes davantage nuancées.

Les cartes d'aléa globale obtenues sont considérablement différentes. Dans le cas de la première approche, seule un liseré rouge apparaît le long du littoral, correspondant à un aléa fort, lui-même bordé par un second liseré orange caractérisé par un aléa moyen. En regardant dans le détail, cette nuance peut être observée. De plus, l'ensemble du littoral semble quasi-identiquement impacté, à l'exception de la Salis. La seconde approche aboutit sur une gradation de l'aléa à mesure que l'on s'approche du littoral. Certaines frontières ressortent particulièrement, notamment la limite arbitraire des 500 mètres. Une distinction peut être faite entre les différentes

zones d'impacts potentielles: la Croisette, Juan-les-Pins et surtout la Salis ressortent distinctement.

Les cartes de vulnérabilités obtenues (Figure 116 b, Figure 116 e) sont celles qui présentent les différences visuelles les plus flagrantes. La première apparaît trop limitante puisqu'elle ne représente que deux niveaux de vulnérabilité, faible et moyen, le niveau fort caractérisant des espaces trop petits pour être significatifs et observable à l'échelle communale. Ressortent toutefois les éléments principaux (ERP, réseaux « *softs* », etc.). La seconde laisse ressortir davantage d'information visuelle puisque de nombreux patches de couleurs et de valeurs différentes ressortent. Ne sachant cependant pas à quoi correspondent réellement les valeurs, il est impossible de les interpréter en l'état.

L'analyse de risque étant une combinaison (tableau de croisement dans un cas, fonction linéaire avec normalisation dans l'autre) les remarques faites pour l'aléa et la vulnérabilité s'appliquent aux cartes de risques obtenues (Figure 116 c, Figure 116, Figure 116 f). La cartographie du risque sous forme indicielle apparaît lissée, avec seulement quelques espaces du territoire localisés en bordure immédiate du littoral qui ressortent (la Croisette et les ports de Cannes, le port de Golfe-Juan, Juan-les-Pins, la Salis et la route du bord de mer reliant Antibes à Villeneuve-Loubet). La cartographie du risque transformé en pourcentage relatif, quant à elle, permet une gradation des valeurs du risque, faisant ressortir, de manière plus ou moins prononcée, certaines zones. Les espaces cités précédemment ressortent également.

Les cartographies de la vulnérabilité et du risque présentent des variabilités spatiales surprenantes : certaines communes voient apparaître des variations sur leur territoire (par exemple Cannes, Vallauris et Antibes), alors que sur d'autres communes (Théoule-sur-Mer et Mandelieu-La-Napoule) elles sont moins importantes voir quasi-inexistantes. Une corrélation peut être faite avec les couches de zonages globales (densité, zones d'habitation, etc.) qui viennent fausser et parfois lisser les couches uniquement composées de bâtiments et donc à petites emprises spatiales. Nous pouvons donc nous interroger sur l'intégration de ces couches et les conséquences qu'elles ont sur les résultats finaux.

Cette partie avait pour objectif d'exposer les avantages et limites des deux approches. Bien que différentes, ces dernières peuvent mener à des résultats similaires. Comparons donc à présent les différents résultats obtenus.

2. Des résultats distincts qui font ressortir des similitudes dans les espaces à risque

Les cartographies obtenues présentent de nombreuses différences visuelles, mais aboutissent-elles sur les mêmes conclusions globales ? Cette partie s'intéresse à cette réflexion afin d'analyser si, quelle que soit l'approche et la méthodologie utilisées, les espaces où le risque est le plus important restent identiques. L'ensemble des cartes ayant été détaillées précédemment, ces dernières sont présentées succinctement afin de faire ressortir uniquement les espaces du territoire caractérisés par un risque fort ou de hautes valeurs de risque de tsunami.

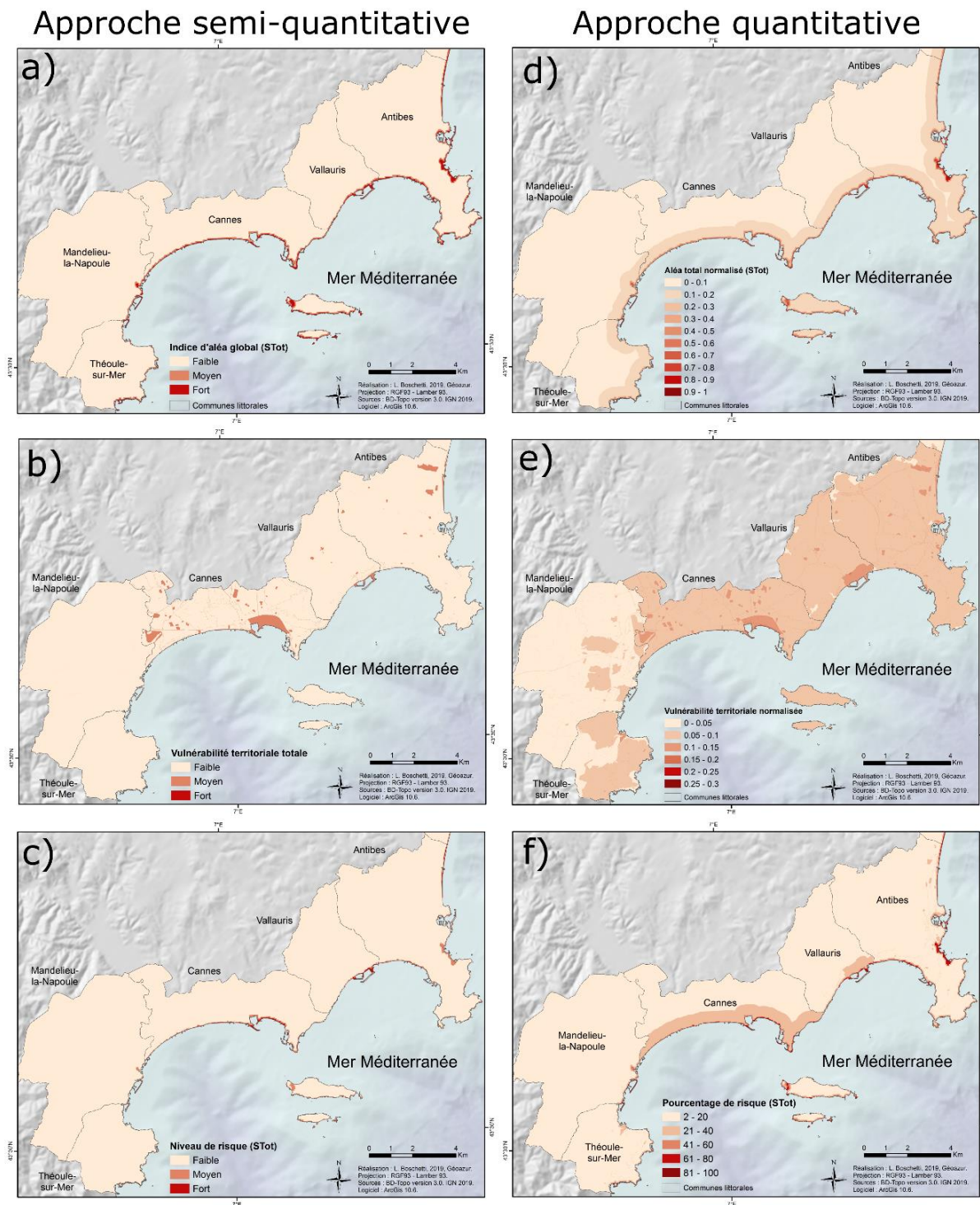


Figure 116 : Comparaison de résultats cartographiques selon les deux approches pour l'ouest du département des Alpes-Maritimes exposé au scénario extrême

2.1. Similitudes des zones à risque de tsunami à l'ouest du littoral

L'est du département, le plus éloigné de la source sismique et donc du tsunami, est constitué de deux baies, d'un cap et d'îles. Une variation de peuplement et d'importance des villes s'observent entre l'est (Antibes, Cannes et Vallauris) et l'ouest (Théoule-sur-Mer et Mandelieu-la-Napoule), les premières étant des centres de vie centraux du littoral, les deuxièmes, bien qu'urbanisées, sont plus sauvages et marquent l'entrée du massif de l'Estérel.

Cette opposition est fortement marquée sur les cartes finales (Figure 117) quel que soit le scénario d'aléa choisi. L'extrême ouest, trop éloigné de la source, soumis au phénomène de défocalisation et disposant de peu d'enjeux, ressort peu marqué par le risque de tsunami. Cannes et Vallauris, bien que légèrement plus proche de la source, restent toutes deux relativement éloignées de celle-ci et sont également soumises au même phénomène. En revanche, elles disposent de nombreux enjeux sur leur territoire, ce qui leur confèrent des valeurs de risque plus important.

La Croisette à Cannes est bordée à l'ouest par le vieux port et à l'est du port Canto. Ce sont des espaces qui ressortent systématiquement comme des zones à risque moyen et fort. Il s'agit à la fois d'un espace de vie pour les locaux mais également d'un espace prestigieux, symbole de glamour, puisque c'est là que depuis plus de soixante-dix ans se déroule le festival de Cannes. Elle est composée à la fois de plages, d'une promenade et d'une rue commerçante bordée de boutiques et d'hôtels de luxe.

Les ports alentour contiennent de nombreux bateaux plus ou moins luxueux. Tout ceci en fait un espace sensible susceptible d'être frappé par un tsunami. Cette commune, fortement touchée par les inondations meurtrières d'octobre 2015, est devenue un élève modèle des questions relatives à la préparation des populations aux aléas. Elle a d'ailleurs été l'une des premières communes française à organiser un exercice d'alerte au tsunami, le 5 novembre 2018, afin de tester le système d'alerte et l'évacuation du littoral.

Golfe-Juan, quartier littoral appartenant à la commune de Vallauris est un village balnéaire composé d'un centre-ville, de plages, de restaurants en bord-de mer et d'une promenade. Fortement fréquenté en période estivale, il est lui aussi considéré comme un espace à risque.

Antibes fait la jonction entre les baies de l'ouest et la baie des Anges à l'est grâce au Cap d'Antibes. Ce dernier est particulièrement exposé, plus spécifiquement sa partie est, puisqu'en plus d'être soumis à la focalisation il est dans l'axe de la propagation des vagues. Le quartier de la Salis est le plus fortement exposé avec une inondation qui peut pénétrer en profondeur dans les terres (SHyp et STot). Celui-ci est constitué de plages, d'immeuble résidentiel et touristique et d'un port (Figure 118) et regroupe une forte population en période estivale. Un tsunami a déjà par le passé impacté ce territoire : celui du 18 octobre 1979, faisant suite à un glissement de terrain sous-marin à proximité de l'aéroport.

Approche semi-quantitative

Approche quantitative

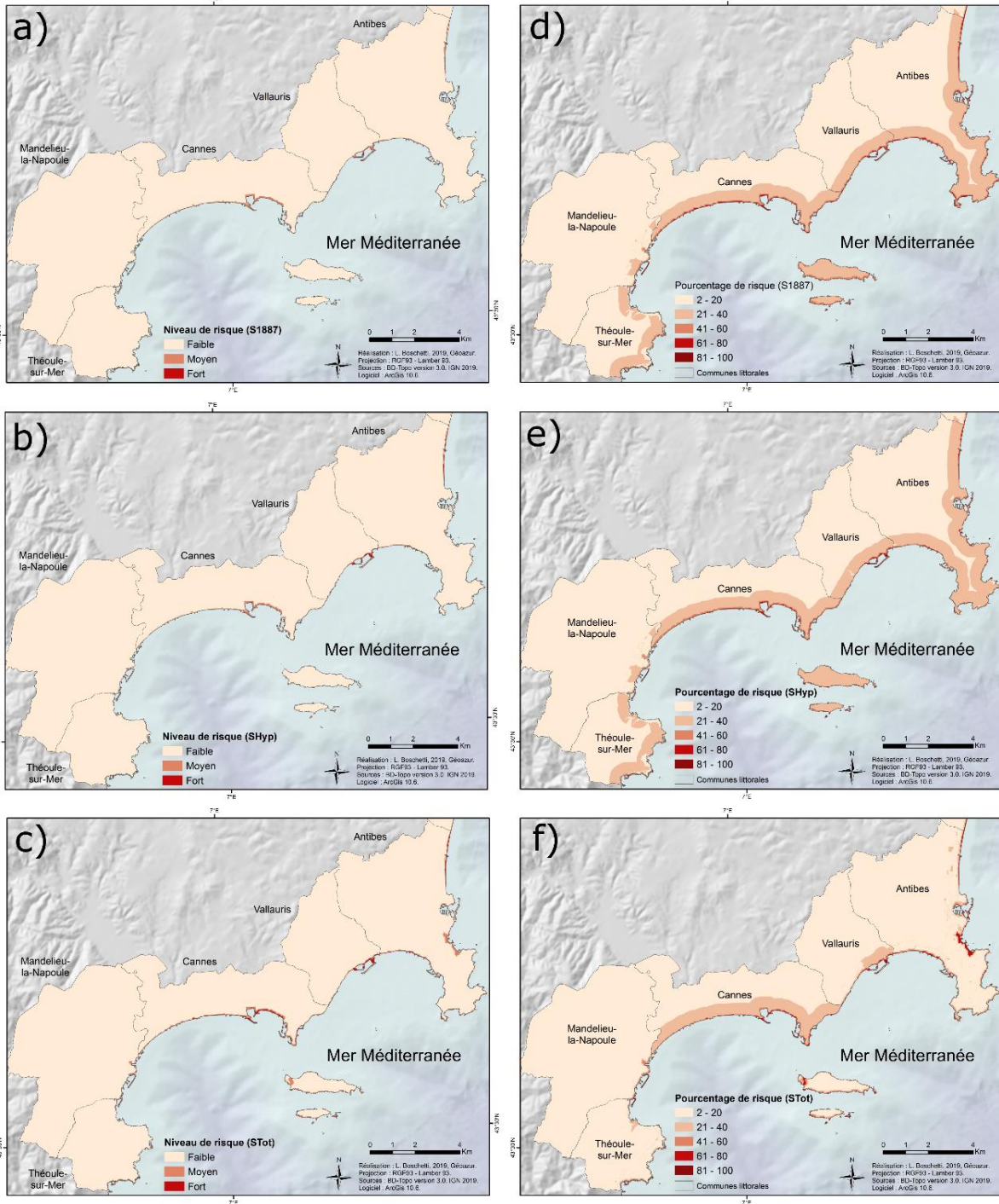


Figure 117 : Cartographies du risque de tsunami dans l'ouest des Alpes-Maritimes selon deux approches (semi-quantitative et quantitative) et pour les trois scénarios d'aléa



Figure 118 : Photographie du port de la Salis
(L. Boschetti, 2020)

Juan-les-Pins, quartier d'Antibes situé à l'entrée ouest du cap, apparaît de manière plus ou moins prononcée suivant les méthodes utilisées. Légèrement marqué par la méthode semi-quantitative, il ressort clairement avec l'approche quantitative. Il est à la fois impacté par l'aléa et comprend plusieurs enjeux majeurs (des plages, une promenade, un port, une zone d'habitation, etc.). Le port Vauban et la vieille ville d'Antibes n'apparaissent pas via la première approche mais ressortent clairement dans la seconde. Le port peut potentiellement être impacté, il y a toutefois peu de chance que la vieille ville d'Antibes soit touchée, cette dernière étant encerclée par des remparts (Figure 119). Ce port, l'un des plus importants de la région et le seul à pouvoir recevoir parmi les plus grands yachts du monde car lui seul est suffisamment profond.

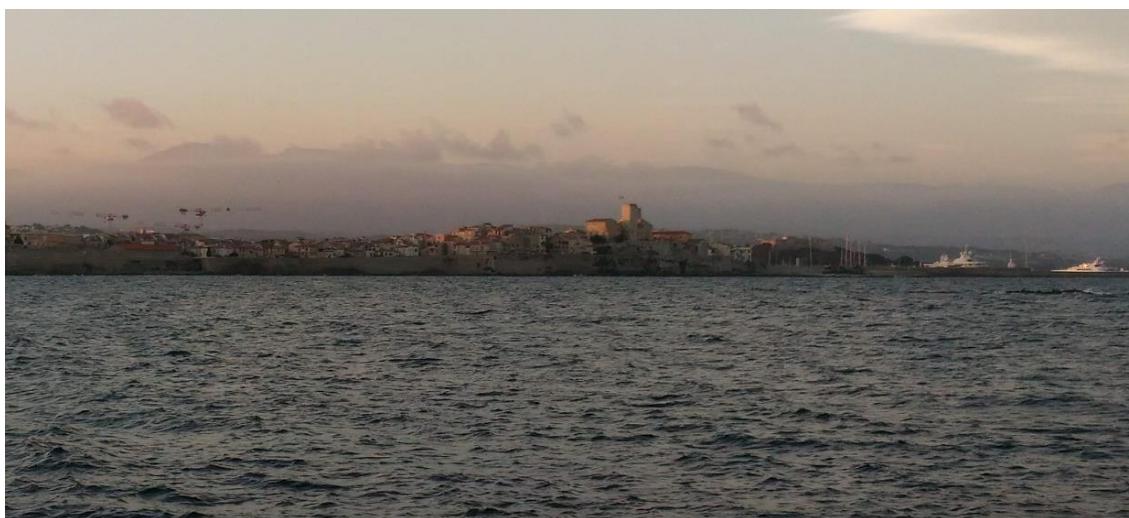


Figure 119 : Photographie d'Antibes et de ses remparts
(L. Boschetti, 2020)

L'extrémité littorale de la commune est constituée d'une section reliant Antibes à Villeneuve-Loubet. Elle est constituée de plages, d'une piste cyclable, d'une route et de la voie ferrée. Cet espace relativement confiné présente peu de points de sortie (peu de passage sous la voie ferrée existe). Il est pourtant exposé à la menace est comprends plusieurs enjeux majeurs (plages, axes de communication).

L'est du littoral, bien que plus faiblement exposé (à l'exception du Cap d'Antibes) présente plusieurs espaces à risque, qui sont pour la plupart des espaces de vie importants pour les locaux et les touristes.

2.2. Similitudes des zones à risque de tsunami au centre du littoral départemental

Le centre du département s'étend de Villeneuve-Loubet à Beaulieu-sur-Mer et contient la commune de Nice, préfecture du département des Alpes-Maritimes. Cet espace comprend la Baie des Anges, bordée par le Cap d'Antibes à l'ouest à le Cap Ferrat à l'est. Il s'agit donc d'une zone de baie ouverte à l'exception des communes du cap.

Le long de la partie ouest (Figure 120) ressort systématiquement le port de Cros-de-Cagnes (sur la commune de Cagnes-sur-Mer). Il s'agit d'un port de pêcheurs, de plages, d'une promenade et d'un centre-ville. Véritable lieux de vie pour les locaux, ce territoire est, comme le reste du territoire, touristique. Bien qu'exposé, il ressort principalement pour les enjeux qu'il contient.

L'ensemble du littoral niçois est considéré comme une zone à risque. L'aéroport international d'un côté, deuxième aéroport de France, permet des liaisons nationales et internationales. Composé de deux terminaux, ces derniers ne semblent pas directement impactés car ils sont situés légèrement en retrait du front de mer. Les passagers présents devraient donc être en sécurité. Les pistes en revanche pourraient être impactées, ce qui peut avoir pour conséquence d'affecter le trafic aérien et conduire à son arrêt total. Ceci pourrait avoir des répercussions, en cas d'évènement majeur, sur l'évacuation des victimes, l'arrivée de secours, le transport de matériel, etc.

La promenade des Anglais, qui longe l'ensemble du littoral de la commune de Nice, de l'aéroport jusqu'au port, est également une zone à risque fort. Structurellement, elle est composée de plages de galets, d'un mur (plus ou moins haut et plus ou moins pentu), d'une promenade, de bâtiments (résidentiels ou des commerces) (Figure 121). Elle est l'un des points phares et prestigieux du littoral local, à l'instar de la croisette à Cannes.

Elle constitue un véritable lieu de vie, une artère névralgique, elle est un véritable symbole de Nice, qu'il s'agisse d'instant de la vie quotidienne (axes routiers, balades, plages, points de rencontre, etc.), d'évènements (marathon, *Iron Man*, carnaval, etc.) ou sites touristiques. C'est pourquoi les attentats du 14 juillet 2016 ont aussi violemment marqué les niçois. De par l'horreur lié à l'évènement lui-même, mais également par la zone impactée, comme si le cœur de la ville lui-même avait été touché.

Approche semi-quantitative

Approche quantitative

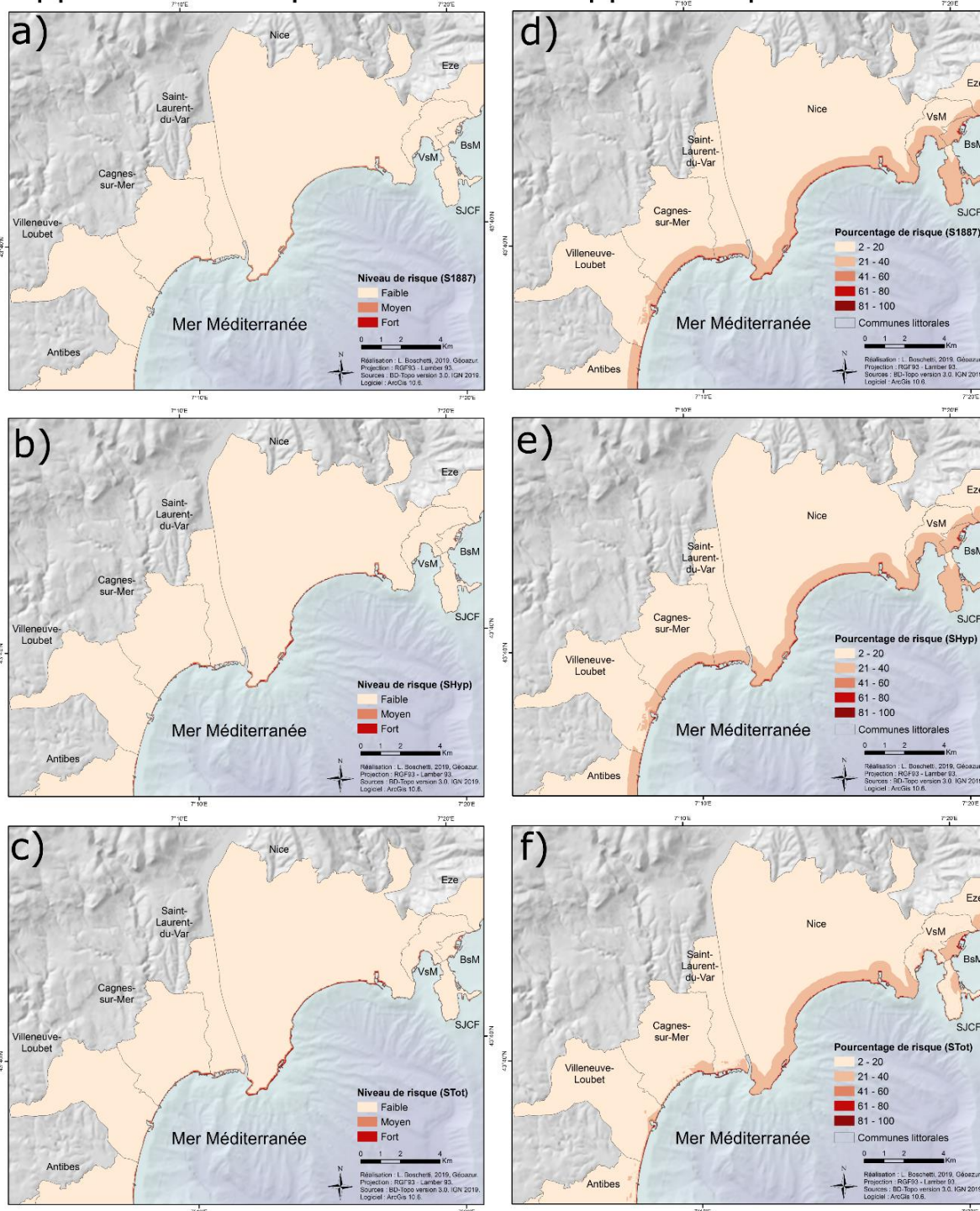


Figure 120 : Cartographies du risque de tsunami pour les communes centrales des Alpes-Maritimes selon deux approches (semi-quantitative et quantitative) et pour les trois scénarios d'aléa

Face au risque de tsunami, la promenade étant surélevée, il y a de forte chance que l'eau n'atteigne pas la route. En revanche, les plages en contre bas peuvent être problématiques. Suivant les endroits, seul des escaliers permettent l'accès (entrée et sortie) à la plage. Or, si une évacuation doit se faire précipitement, nous pouvons nous interroger sur sa réalisation et sur les problématiques engendrées (difficulté de déplacement dans les galets, difficultés à sortir de la plage, mouvement de panique, etc.)

Le port, à l'est de la ville, est protégé par une digue. Celle-ci semble ne permettre qu'un abri potentiel face à un tsunami. Composé à la fois d'un port de tourisme et de commerce, il est l'un des ports permettant la jonction entre la Corse et le continent. Son impact serait donc dommageable pour de nombreuses liaisons maritimes.



Figure 121 : Photographie de la Promenade des Anglais à Nice
(L. Boschetti, 2020)

La rade de Villefranche et plus particulièrement le port et le centre-ville de Villefranche-sur-Mer sont également des espaces à risque. Entourée de falaise, la ville se situe en hauteur. Elle n'a donc que peu de chance d'être directement impactée par un tsunami. Elle dispose toutefois de toute une frange littorale au raz de l'eau (Figure 122), qui elle peut être touchée. Ces espaces sont constitués de plages dont l'évacuation sur les hauteurs peut s'avérer délicate.

Contrairement à ce que l'on pouvait attendre, la commune de Saint-Jean-Cap-Ferrat, directement située sur le Cap, ne ressort que peu. Il ne s'agit donc pas d'une zone à risque principale. Ville résidentielle composée en grande majorité de villas, elle ne contient que peu d'enjeux majeurs. De plus, ses littoraux sont relativement sauvages, bordés d'un sentier littoral.

Le port de Beaulieu-sur-Mer apparaît systématiquement comme un espace à risque. Il est considéré comme modéré pour l'approche semi-quantitative et avec des valeurs fortes pour l'approche quantitative. Une fois encore, il faut être prudent avec la caractérisation des ports puisqu'ils sont soumis à la marge d'erreur des modèles.

Ce territoire central, exposé au risque de tsunami, présente plusieurs zones à risque de long du littoral, à savoir principalement des ports, des plages et des promenades.



Figure 122 : Photographie de la rade de Villefranche
(L. Boschetti, 2019)

2.3. Similitudes des zones à risque de tsunami à l'est du littoral départemental

L'est du département présente de nombreuses particularités qui devraient être favorables à sa caractérisation en risque fort. Il s'agit de l'espace du territoire le plus proche de la source et donc le plus durement touché (à l'exception du Cap d'Antibes). Il contient sur son territoire des villes importantes (Monaco et Menton) rassemblant de nombreux enjeux majeurs. Les résultats obtenus (Figure 123) sont donc cohérents avec ces observations.

Monaco ressort de manière prédominante à l'échelle du littoral. L'ensemble des éléments nécessaires au fonctionnement d'un état sont regroupés sur un territoire restreint (deux kilomètres carré). Cet espace condense ainsi un grand nombre d'enjeux majeurs, potentiellement exposés à une menace, ici un tsunami. Etant conscient des risques auxquels la principauté est exposée, de nombreux travaux de prévention sont réalisés notamment par les pompiers de Monaco. Nous avons d'ailleurs eu l'occasion de nous entretenir avec le Commandant Yvrard, responsable du Bureau Opération, Transmissions, Planification de la Principauté, afin de lui présenter nos travaux portant sur l'aléa tsunami.

Le littoral est constitué de deux ports, le port de Fontvieille et le port Hercule, tous deux considérés en zone à risque. Ce dernier contient un grand nombre de yachts de luxe, pouvant générer des dégâts économiques importants en cas de destruction de ceux-ci, mais pouvant également causer des dégâts supplémentaires dans l'hypothèse où ces derniers viendraient à être déplacés hors de l'eau et viendraient taper contre les bâtiments.

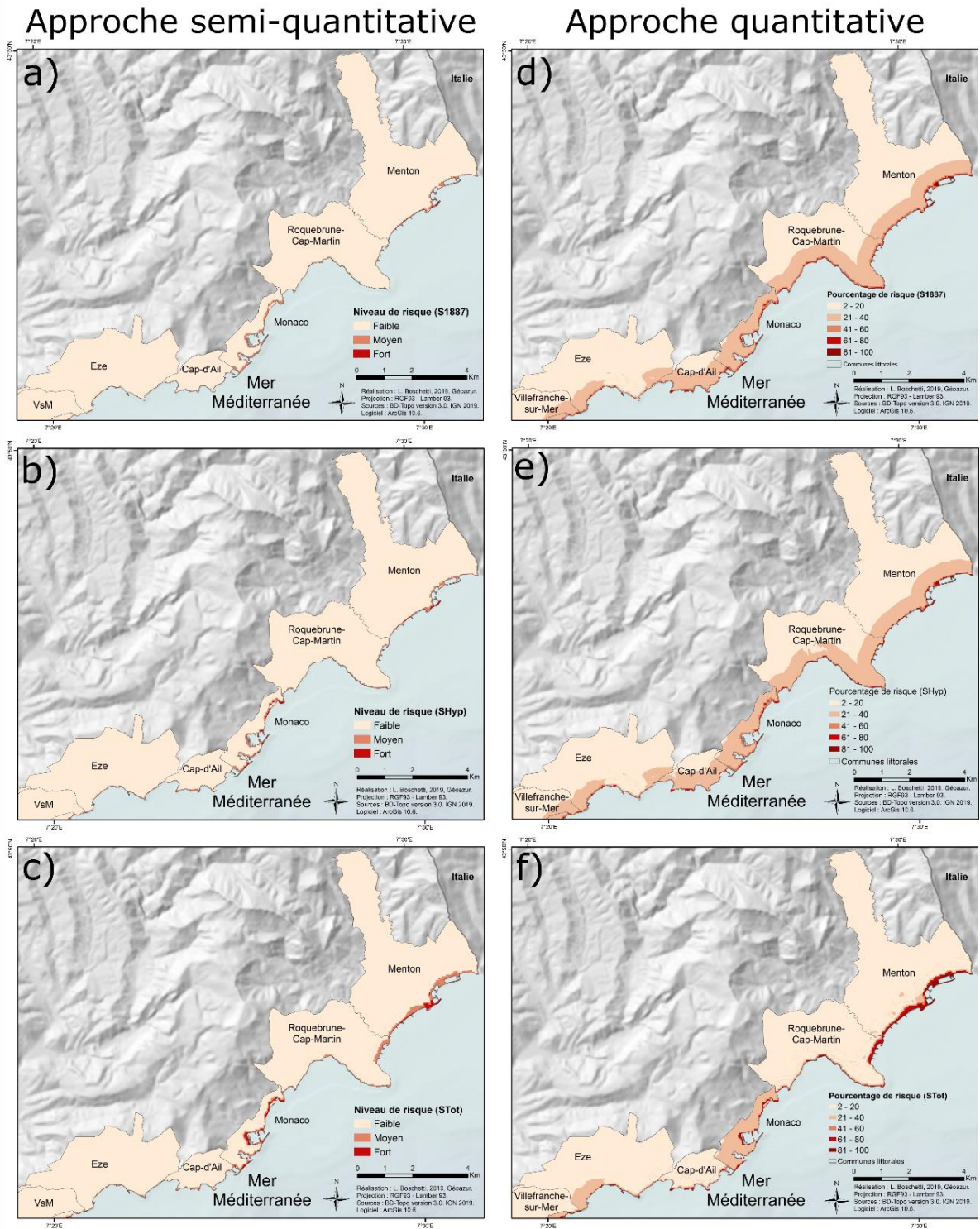


Figure 123 : Cartographies du risque de tsunami pour les communes de l'est des Alpes-Maritimes selon deux approches (semi-quantitative et quantitative) et pour les trois scénarios d'aléa

Les plages de la Principauté de Monaco, à l'extrême est du territoire, sont également des espaces à risque. Ces dernières sont-elles aussi localisées en contre bas d'une promenade, soulevant également des questions quant à la potentielle évacuation des gens sur les plages. Contrairement à la Promenade des Anglais où l'évacuation se fait quasi exclusivement que par des escaliers, ici des rampes d'accès remplacent les escaliers. L'évacuation s'en trouve ainsi facilitée.

La totalité du littoral mentonnais est considérée comme étant une zone à risque et s'étend jusqu'à Roquebrune-Cap-Martin. Cet espace est le plus proche de la source et il est couplé à une topographie propice à la propagation de la vague dans les terres. La commune dispose ainsi de la plus grande zone à risque du département. La ville présente la particularité d'être bordée par une promenade et des plages, avec en certains endroits des restaurants et des commerces. Il s'agit donc d'un littoral approprié par les locaux et les touristes.

Ce littoral, frontalier avec l'Italie, comprend une topographie particulière puisqu'il dispose de nombreux reliefs. Une zone tampon, faisant la jonction entre la terre et la mer, permet toutefois un accès à la mer et dans certains cas le développement de nombreuses structures touristiques (plages, restaurants, etc.). Ces espaces, bien que restreints, constituent des zones de danger.

3. Conclusion

L'ensemble des parties précédentes ([Parties II](#) et [III](#)) avaient comme ligne directrice l'étude du risque de tsunami. Le risque a été analysé dans ces travaux par deux approches. Les composantes de ce dernier restent toutefois inchangées, puisque dans les deux cas l'aléa a été analysé par l'intensité et l'éloignement de la menace, et la vulnérabilité a été étudiée par la détermination et la mise en indice de ses enjeux majeurs. Seule diffère donc les combinaisons réalisées. Les résultats s'avèrent toutefois différents.

Il en ressort que les deux approches proposées sont complémentaires. Ceci n'est pas flagrant lorsque l'on regarde uniquement les représentations cartographiques qui en sont faites. L'approche semi-quantitative est à favoriser pour cela. La qualification du risque résulte sur des cartes simples de lecture et d'analyse. L'approche normalisée est plus complexe à analyser puisqu'on ne sait pas directement à quoi correspondent les valeurs obtenues. En revanche, elle permet de réaliser des comparaisons simples de plusieurs événements, plusieurs scénarios, ou plusieurs territoires, comme cela a été le cas dans le [Chapitre 15](#).

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le littoral des Alpes-Maritimes, tout comme l'ensemble des littoraux méditerranéens, présente la particularité d'être fortement urbanisé et densément peuplé. Ce développement le long de la côte est favorable à de nombreuses pratiques (échanges, économies, etc.) mais rend, par la concentration d'enjeux en un territoire restreint, le territoire vulnérable.

La Côte d'Azur est régulièrement affectée par des **séismes locaux** de magnitude faible à modérée. Les sources sont localisées aussi bien à terre qu'en mer. Les plus gros séismes historiques se sont justement produits en mer, le long de la faille Ligure. Ce fût le cas le 23 février 1887 lors de la survenue du séisme Ligure, dont la magnitude a été estimée à 6.7-6.9 (Larroque et coll., 2012 ; Ioualalen et coll., 2014).

La prévention du risque de tsunami à l'échelle nationale et locale est encore en construction. Il était donc primordial de réaliser une analyse d'aléa, de vulnérabilité et de risque afin d'avoir une vue d'ensemble des zones exposées, des zones sensibles du territoire et des zones à risque.

1. Bilan des travaux présentés

Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit ont permis la réalisation d'études de l'aléa tsunami et de la vulnérabilité du littoral azuréen afin d'aboutir à une analyse et une cartographie du risque.

1.1. Le tsunami, un aléa présent le long des côtes azuréennes

L'une des composantes de ces travaux était une étude de l'aléa tsunami sur la côte des Alpes-Maritimes. Pour se faire, des simulations numériques, réalisées au sein du laboratoire Géoazur et en collaboration avec Mansour Ioualalen, ont été exploitées. Ces dernières, contraintes par des données sismologiques, permettent de caractériser la faille Ligure et donc d'obtenir grâce à des simulations numériques des données portant sur l'aléa. A partir de trois scénarios déterministes et représentatifs de ruptures de la faille Ligure (S1887, SHyp et STot), des données de magnitudes ont été obtenues : les zones d'inondations, les hauteurs de vagues et les courants induits.

Ces travaux sur l'aléa nous ont amené à mobiliser les notions de magnitude et d'intensité. Pour mémoire, la magnitude s'intéresse uniquement aux caractéristiques physiques de l'évènement, alors que l'intensité inclut les dégâts et donc la vulnérabilité biophysique du territoire impacté. Les échelles d'intensité, à la différence des échelles de magnitude, peuvent permettre de faire le lien entre différentes données de magnitude et d'inclure l'évolution des impacts sur les territoires et les sociétés.

Une analyse bibliographique portant sur les échelles de tsunamis a été nécessaire. Devant l'absence d'échelle d'intensité répondant à nos questions de recherche, une nouvelle échelle a été développée et proposée. Les travaux de nos

prédécesseurs, et plus particulièrement ceux de [Papadopoulos et coll. \(2001\)](#), [Lynett et coll. \(2014\)](#) et les Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) ont servis de socle à la création de cette nouvelle échelle d'intensité.

Un tsunami étant une onde longue, les mouvements sont principalement horizontaux. Ainsi, le processus d'inondation par tsunamis peut être assimilé à une inondation de crue telle que décrite dans les PPRI. L'échelle d'intensité de tsunami ainsi proposée pourrait tout aussi bien être utilisée pour les inondations. Pour un tsunami, tout comme pour les inondations, les principaux éléments destructeurs sont l'impact de la hauteur de sa colonne d'eau (hauteur d'inondation) et des courants à l'intérieur de cette colonne d'eau. Sa dangerosité vient du fait qu'il peut mobiliser des biens et des personnes qui vont se faire directement emporter, ou générer des embâcles qui peuvent à leur tour causer des dégâts.

L'échelle d'intensité proposée est ainsi constituée de 7 niveaux, compris entre 0 et 6. Elle permet un croisement entre courant, hauteur d'inondation et difficulté de déplacement. Son application à un territoire et la cartographie associée ont permis de faire ressortir les particularités locales et ainsi les points sensibles et potentiellement plus exposés. S'appuyant sur des données quantitatives, des comparaisons peuvent être réalisées entre différents scénarios ou différentes zones d'études. Cette échelle d'intensité, que l'on peut donc considérer comme étant générique à toute inondation, a ensuite été appliquée au territoire azuréen. Une cartographie de l'intensité a été réalisée pour les trois hypothèses sismiques S1887, SHyp et STot.

Cette cartographie révèle d'importantes variabilités spatiales et fait ressortir des espaces davantage impactés que d'autres. Certaines zones sont impactées quel que soit le scénario. C'est le cas par exemple du Cap d'Antibes et plus particulièrement du quartier de la **Salis**, de la **rade de Villefranche-sur-Mer**, de l'est du **Cap Ferrat** (Saint-Jean-Cap-Ferrat, la Anse des Fossés, la Anse des Fossettes et la Baies des Fourmies), **Roquebrune-Cap-Martin** et **Menton**. Il s'agit principalement des espaces situés à proximité de la faille (les communes situées à l'est du département) et de ses caps, due au phénomène de focalisation qui accroît la magnitude et donc accentue les effets du tsunami.

D'autres zones sont faiblement impactées, comme le Golfe de La Napoule, le Golfe de Juan et la Baie des Anges. Il s'agit principalement d'espaces à l'ouest du département, donc plus éloignés de la source du tsunami. Ces zones sont également plus faiblement impactées dû au phénomène de défocalisation qui s'applique le long des baies ouvertes et qui permet à l'énergie du tsunami de se diffuser sur un plus grand espace, pouvant ainsi réduire son impact (divergence des vagues).

Il est à noter que l'ensemble de ces données simulées ont été générées avec une grille de calcul de résolution 40 mètres. Certaines particularités, d'échelle spatiale inférieure, ne peuvent être représentées ou lorsqu'elles le sont des imprécisions peuvent ressortir. Ceci peut causer de légers décalages pour des structures (digues, ports, etc.) et pour des ruptures de pentes (murs, falaises, etc.).

L'échelle d'intensité de tsunami proposée permet un premier lien entre aléa et vulnérabilité, lien qui peut parfois être compliqué à déterminer, à définir et à représenter. La vulnérabilité retenue est la vulnérabilité biophysique, puisqu'elle se

focalise sur les dégâts, mais cela ne suffit pas. Une analyse du risque de tsunami ne peut se limiter à une analyse de l'aléa et de son intensité. Il est nécessaire d'inclure le territoire dans son ensemble.

Afin d'associer les résultats d'aléa et de vulnérabilité, une cartographie de l'aléa sous forme indicielle a été proposée. L'analyse de l'aléa par l'intensité n'est pas suffisante pour caractériser à elle seule l'aléa car elle ne cible que les zones impactées. L'exposition (simplifiée) a été intégrée via l'éloignement à la menace, apportant une deuxième variable à l'aléa. Des cartes de niveaux d'aléa (faible, moyen ou fort) ont ainsi été obtenues. Certains espaces ressortent fortement exposés, comme les caps (Antibes et Ferrat) ainsi que les baies semi-fermées (baie de Villefranche-sur-Mer par exemple). Les baies ouvertes sont en revanche plus faiblement impactées comme la baie de Cannes ou la baie des Anges.

Cette première étude est complétée par une analyse de vulnérabilité territoriale.

1.2. Le littoral azuréen, un territoire vulnérable concentrant de nombreux enjeux majeurs

Un des objectifs majeurs de cette étude était l'obtention d'une cartographie du risque. Plusieurs étapes ont ainsi été nécessaires avant de pouvoir y parvenir, dont la réalisation d'une étude de vulnérabilité. Une mise au point conceptuelle a tout d'abord été réalisée afin de cerner le concept de vulnérabilité.

La vulnérabilité est traitée selon différentes approches : la vulnérabilité biophysique, la vulnérabilité sociale et la vulnérabilité territoriale. Les travaux présentés ici se sont focalisés sur la dernière, prenant en considération le territoire dans son ensemble. Une analyse de vulnérabilité territoriale passe par l'étude des enjeux majeurs. Il s'agit de les identifier, les localiser et de déterminer leur vulnérabilité. Ils sont des points sensibles du territoire susceptible, en cas d'impact, de propager leur vulnérabilité à l'ensemble du territoire.

L'analyse de la vulnérabilité territoriale d'un territoire exposé aux tsunamis a nécessité la détermination des enjeux majeurs. Dans cette étude, 18 d'entre eux ont été relevés, répertoriés en 5 grandes classes : la population, les Etablissements Recevant du Public (ERP) (hôpitaux, ERP pouvant servir de zone refuge, etc.), les réseaux « *softs* » (centres décisionnels, acteurs, pompiers, etc.), les réseaux « *durs* » (axes de transports et réseaux vitaux) et les espaces touristiques « *ouverts* » en bordure littorale (plages, promenades, etc.). Des facteurs d'analyse sont identifiés pour chaque enjeu, puis transformés sous forme d'indice à trois niveaux : faible, moyen fort.

La cartographie de ces enjeux a révélé des variations de niveaux de vulnérabilité sur la frange littoral (plages, ports, etc.) et à l'intérieur des communes (hôpitaux, casernes de pompiers, etc.). Les résultats proposés incluent de nombreux enjeux représentés spatialement par leur emprise au sol. Certains de ces éléments se retrouvent « gommés » par des enjeux à emprise spatiale plus importante, représentés par des zones (densités, zone d'habitation, etc.). De nouvelles réflexions sont nécessaires afin d'améliorer la cartographie.

1.3. Les Alpes-Maritimes, un territoire exposé au risque de tsunami

Pour aboutir à une analyse de risque, nous avons réalisé un croisement entre l'aléa et la vulnérabilité. Pour se faire deux méthodologies ont été proposées. La première, l'approche indicielle, aboutie à une cartographie du risque en trois niveaux d'indice : faible, moyen et fort. Cette approche semi-quantitative du risque ne permet donc pas de la quantifier et de comparer différents évènements entre eux. Elle présente l'avantage de faire ressortir les points sensibles du territoire et les espaces potentiellement plus exposés à la menace, ici un tsunami.

Une seconde approche, par normalisation, a été proposée. Elle présente l'avantage de ne plus être limitée à trois classes et donc de ne pas réduire l'information (par exemple l'intensité). Les valeurs obtenues sont ainsi comprises entre 0 et 1. Leurs interprétations sont difficiles puisque nous ne sommes pas encore en mesure de caractériser des valeurs. L'obtention de valeurs numériques permet toutefois de réaliser des comparaisons et des statistiques simples entre plusieurs évènements et plusieurs lieux.

La mesure du risque s'avère complexe car elle prend en considération plusieurs variables dont les liens et les poids ne sont pas connus. Des statistiques et des probabilités effectuées sur des données, de préférence réelles, devraient être effectuées afin de déterminer avec précisions ces différents liens. De plus, l'aspect dynamique (spatial et temporel) du risque apporte une difficulté supplémentaire qui peut être délicate à cartographier.

Les deux approches proposées apparaissent ainsi complémentaires. La première permet une cartographie du risque et une analyse relativement simple de l'information (celle-ci étant sous forme de trois niveaux d'indice). La seconde aboutie également à une cartographie, mais son interprétation s'avère plus complexe dans la mesure où en l'état actuel de ces travaux, aucune correspondance n'est donnée entre les valeurs obtenues et un niveau de risque. En revanche, cette dernière permet, grâce à la normalisation, l'obtention de valeurs numériques. Il est donc possible de comparer plusieurs évènements sur un même espace ou sur des territoires différents.

Globalement, quel que soit le scénario, l'ouest du département, plus éloigné de la source, est moins impacté que l'est. Plusieurs espaces ressortent systématiquement comme étant des espaces à risque fort. Il s'agit des promenades le long des baies ouvertes : La Croisette à Cannes, La Promenade des Anglais à Nice et la promenade du bord de mer à Menton. Les ports sont également des zones à risque : les deux ports principaux de Cannes (Vieux-Port et port Canto), le port de Nice, le port de Beaulieu-sur-Mer, le port de Cros-de Cagnes. Ces zones disposent d'un haut niveau de risque principalement du fait de la présence d'enjeux majeurs.

D'autres espaces encore sont considérés en risque fort en raison de la prédominance de l'aléa. C'est le cas par exemple de la plage de la Salis à Antibes et de la plage de Villefranche-sur-Mer. Monaco ressort de manière prédominante à l'échelle du littoral parce qu'elle combine à la fois une forte densité d'enjeux sur un territoire restreint et une proximité à la source de la menace.

Les cartographies du risque de tsunami proposées sont donc une représentation du risque qui s'appuie sur une approche conceptuelle (croisement via l'aléa et la vulnérabilité). Elles se basent à la fois sur des données quantitatives et qualitatives. Cette variété de données explique la difficulté de la tâche. Les données quantitatives sont principalement dérivées de l'intensité, qui est une fonction de la magnitude des tsunamis.

Concernant les limites, nous devons noter que d'importantes hypothèses simplificatrices ont été effectuées. La première d'entre elle est la linéarité : c'est-à-dire que les enjeux n'interagissent ni avec eux-mêmes, ni avec les autres. La deuxième hypothèse forte est la non-pondération : les enjeux ne sont pas différenciés ou hiérarchisés, ils sont considérés comme ayant tous le même poids dans l'expression de la fonction risque. Enfin, la troisième hypothèse est la non-temporalité : nous avons supposé que tous les enjeux étaient synchrones. Il conviendrait donc pour la suite de parvenir à travailler sur ces hypothèses afin d'approfondir la méthodologie proposée ici.

L'analyse du risque de tsunami est l'une des composantes de la prévention du risque. Revenons à présent sur les mesures et actions existantes pour la prévention du risque de tsunami.

2. L'information à la population, un point clé dans la réduction des vulnérabilités

Dans la première partie de ce manuscrit ont été présentés les différents outils réglementaires dédiés aux risques en général et aux risques tsunamis. Tout ce qui a été mis en place en amont et plus particulièrement tout ce qui touche à l'information et la formation de la population doit ressortir lors d'un événement. Si ces actions sont efficaces et efficientes, le territoire et la population doivent être en mesure d'absorber l'évènement sans que cela ne soit trop dommageable et doit leur permettre de s'en remettre rapidement.

L'objectif principal est que la population soit en mesure d'assurer sa sécurité, elle doit donc avoir accès à l'information nécessaire. Nous avons jugé intéressant de fournir un rappel des conduites à tenir en cas de tsunami. Dans certains pays fréquemment touchés par des tsunamis (Etats-Unis, Thaïlande, Japon, etc.) des panneaux d'information bordent les zones à risque. Des exemples qui peuvent servir de base pour une réflexion française sur la mise en place de ce moyen d'information sont ainsi présentés.

2.1. Rappel des conduites à tenir en cas de tsunami

Les tsunamis sont des événements exceptionnels, avec une faible occurrence sur les littoraux français, c'est pourquoi il est important d'informer les populations sur ce qu'est exactement un tsunami, sa formation, les zones exposées ou encore les comportements à tenir. Informer la population quant à l'ampleur que peut prendre un tsunami sur un territoire (préciser si le territoire est exposé à des vagues de quelques

centimètres, de quelques mètres ou dizaines de mètres) peut aider la population à imaginer cette menace mal connue ou inconnue et ainsi en avoir une vision réaliste.

Il est nécessaire de préciser les différents comportements à tenir afin de ne pas se mettre en danger et d'être en mesure d'assurer sa propre sécurité (Figure 124). Etant dans un contexte d'évènement brutal avec une arrivée rapide sur les littoraux (10 à 15 minutes), la population n'aura pas le temps d'être informé par les institutions ou les acteurs. Il est donc primordial qu'elle ait connaissance des conduites à tenir, ce qui peut aider à limiter le nombre de victimes potentielles.

Ces actions et comportements à tenir (Figure 124) sont exposés dans divers documents, notamment dans les DICRIM, lorsque ceux-ci intègrent les tsunamis. Des informations sont également données par les sites du gouvernement sur les risques majeurs ([site du Gouvernement](#)) ou encore par l'UNESCO et l'antenne méditerranéenne NEAMTIC. Ici est présentée une synthèse de ce qui doit être fait en cas de tsunami à partir des trois temporalités d'un évènement : avant, pendant et après.

En complément de la connaissance de ces comportements, d'autres pays utilisent des moyens d'information direct, avec par exemple des panneaux d'information localisés à proximité des espaces à risque afin de prévenir la population que ce phénomène peut se produire. Une population qui a connaissance qu'un tel évènement peut se produire sur son espace de vie sera d'avantage en mesure de réagir et d'avoir des comportements adaptés.

2.2. Outils d'information mis en place dans d'autres pays et qui semblent fonctionnels

La France métropolitaine, peu exposée aux tsunamis, réalise peu de campagnes d'information à ce sujet. Rares sont les personnes qui savent qu'un risque réel existe en Méditerranée, et lorsque cela est le cas leur vision est souvent erronée (Charpentier, 2014), faussée par les médias et les évènements de plus grande ampleur qui se produisent ailleurs dans le monde. Cela est dû à la fois à une méconnaissance globale, peu d'élus connaissent ce risque, et les dégâts qu'il peut générer à l'échelle nationale et locale.

Afin de les sensibiliser efficacement la population, il convient de mettre en place des mesures d'information pertinentes, percutantes, redondantes, l'objectif étant de favoriser les chances que les personnes soient en contact avec l'information et la retiennent. D'autres pays, bien plus exposés, ont avec le temps développé des outils d'information qui semblent fonctionnels.

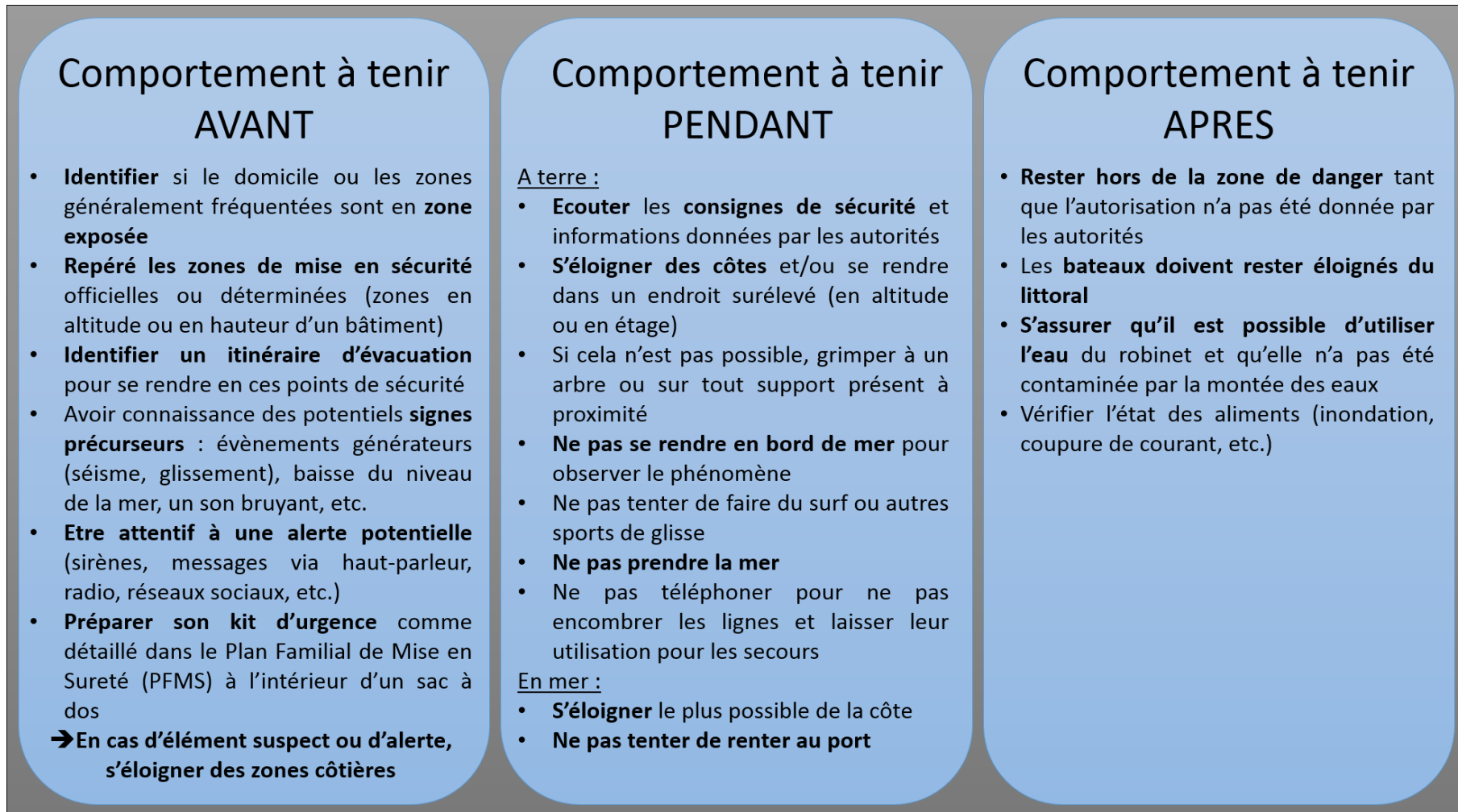


Figure 124 : Comportements à tenir en cas de tsunami
(Sources : DICRIM, site du gouvernement)

Les Etats-Unis, pays continent, sont exposés à de nombreux aléas naturels, dont les tsunamis. L'ensemble de sa côte ouest, le long du Pacifique, est exposée à cet aléa. L'océan Pacifique, une des zones les plus sismiques au monde, présente de nombreuses failles génératrices de tsunami qui peuvent venir frapper ces côtes. Les Etats-Unis sont le premier pays à avoir disposé d'un centre d'observation et d'alerte (PTWC¹⁹). Ils ont donc appris à vivre avec et à mettre en place des outils d'information à la population.

Tout le long du littoral différents panneaux sont présents. Les premiers signalent le fait que l'on entre dans une zone soumise au risque de tsunami (Figure 125 a) et une signalisation similaire marque la sortie de la zone. Nous ne savons pas comment est déterminé ce zonage, nous pouvons toutefois supposer qu'il s'agit de limite d'inondation historique ou de sorties de modèles, correspondant à un zonage officiel.

D'autres panneaux sont davantage explicatifs et donnent les consignes à suivre (Figure 125 b, c, d) : « *Vous êtes dans une zone exposée au tsunami. Si vous sentez la terre trembler, déplacez-vous rapidement vers des points hauts. N'attendez pas une alerte officielle.* ». Ces informations synthétiques donnent les informations principales. Elles responsabilisent la population puisqu'il est précisé de ne pas attendre une alerte officielle.

D'autres encore, permettent la signalisation des axes à emprunter pour évacuer (Figure 125 e). Il n'est pas précisé que ces axes mènent à des zones refuge. Nous pouvons supposer qu'elles ont pour objectif principal de s'éloigner de la zone exposée en rejoignant une altitude plus élevée.

Si nous changeons de pays et de continent pour regarder la signalisation mise en place en Thaïlande, nous observons de grandes similarités. Ce pays, situé dans l'océan Indien, connaît des tsunamis destructeurs, dont le principal est celui du 26 décembre 2004. Ce dernier a détruit de nombreux littoraux dont les côtes thaïlandaises.

Ces panneaux concernent, comme pour les Etats-Unis, la signalisation d'entrée dans une zone à risque avec la consigne principale « *En cas de séisme, dirigez-vous vers les hauteurs ou l'intérieur des terres* » (Figure 126 a), les axes d'évacuation (Figure 126 b), et les zones refuges (Figure 126 c). La Thaïlande étant un pays touristique, les panneaux sont à la fois écrits en Thaï et en anglais pour que les touristes étrangers puissent les comprendre.

Bien que n'étant que des panneaux d'informations simples, c'est-à-dire avec uniquement l'information principale, ils font leur effet : ils interpellent et renvoient directement à la catastrophe de 2004. Ce qui pousse par la suite à se questionner et à prendre conscience que ce risque est réel.

¹⁹ Pacific Tsunami Warning Center



Figure 125 : Photographie prise le long de la côte ouest américaine en 2015. Fortement sismique, cette zone est exposée au tsunami. Une signalétique particulière est mise en place afin d'indiquer qu'on entre dans une zone soumise au risque de tsunami (a), les consignes (b, c, d) et les axes à emprunter pour évacuer (e).

Évènement emblématique et révélateur à l'échelle mondiale du pouvoir destructeur des tsunamis, le tsunami de 2004 est encore ancré dans la mémoire collective. Cette signalisation permet cependant de ne pas oublier et de se souvenir que le risque de tsunami existe sur ces côtes et rappelle les chemins d'évacuation principaux.



Figure 126 : Photographie des panneaux de signalisation faisant référence aux tsunamis en Thaïlande.
(L. Boschetti, 2015)

La Figure 126 montrent des photographies prises en 2015. Certains de ces panneaux sont fortement attaqués par la rouille causée par le climat chaud et humide et la mer. Nous pouvons nous interroger sur leur entretien et sur leur persistance au cours du temps. S'agit-il de mesures prises directement après l'évènement de 2004 mais qui ne sont pas maintenues et sans réelles poursuites dans le temps ? Il serait intéressant d'ici quelques années de retourner voir si ces panneaux existent toujours et, si c'est le cas, dans quel état. Cela peut donner une idée de la ligne gouvernementale à ce sujet et permettre de réfléchir sur la résilience à long terme et non seulement dans l'après crise.

Les panneaux sont un outil d'information intéressant, puisqu'ils sont installés en amont mais ils jouent un rôle aussi bien dans l'**ante**, pour informer sur l'existence de cet aléa, que dans le **pendant**, afin d'orienter les gens vers des zones de sécurité. La redondance de la signalisation est efficace puisque leur apparition régulière sur le littoral répète les informations permettant à la longue de les assimiler.

Ce type d'outil pourrait donc être mis en place sur les littoraux français. Il permettrait dans un premier temps de signaler la présence de ce risque sur les littoraux. Des panneaux ont plus d'impact que des documents papiers officiels, car ils sont visuels et contiennent uniquement l'information principale. De plus, ils sont visibles par un plus grand nombre. Un second point est qu'à cause de son arrivée rapide, le tsunami généré en zone Ligure ne permettrait pas une alerte et une évacuation planifier. Si l'on mise sur une auto-évacuation, il est important de donner les informations nécessaires à la population.

Par ailleurs, des panneaux pourraient orienter les gens vers des points stratégiques en amont, afin d'éviter les comportements inappropriés et l'accès à des points sensibles. Le tsunami faisant suite à un séisme, les locaux pourraient avoir tendance à se rendre dans des zones dangereuses dû aux dégâts causés par le

séisme. Il est donc important de définir ces zones (potentiellement dangereuses et à rejoindre) en amont.

D'autres outils pourraient être développés ou installés. Les panneaux nous semblent toutefois les plus adaptés car ils permettent de toucher un grand nombre de personnes, ils n'ont pas un coût excessif et ils semblent efficaces. Un travail en amont est cependant nécessaire afin de déterminer les endroits stratégiques où les implanter (le long de la Promenade des anglais par exemple et idéalement tout au long du littoral). Afin d'orienter les axes d'évacuation piétons, les potentielles zones impactées par un séisme, et donc non accessibles, ainsi qu'à l'inverse les zones potentiellement épargnées, doivent être déterminées et analysées.

Ces mesures qui visent à rendre acteur le citoyen s'inscrivent dans une réflexion plus globale, celle de la résilience des populations et du territoire.

3. La résilience, un concept devenu inévitable dans l'étude des risques et des catastrophes

Ce thème de la résilience qui n'a pu être abordé dans cette thèse constitue un sujet à part entière. Depuis plus d'une décennie, la résilience rencontre un franc succès puisqu'elle apparaît comme positive, comme faisant ressortir les aspects fonctionnels (d'un territoire, d'un individu, etc.), là où la vulnérabilité met davantage l'accent sur les aspects négatifs, les dysfonctionnements et points faibles (d'un territoire, d'un individu, etc.). La résilience est donc devenu un objectif, là où la vulnérabilité est fuie. Il s'agit donc d'un but recherché, d'un état à atteindre.

Ce concept apporte une vision plus large du risque (et aux dommages) qui n'est plus « *lié à une relation entre deux facteurs, comme entre aléa et vulnérabilité, mais à un ensemble de facteurs en interaction, à un système, au moins.* » (Pigeon, 2010 ; Pigeon et Rebotier, 2017). Elle participe donc à « *un changement de paradigme de la gestion des risques naturels qui est passée d'une gestion essentiellement centrée sur la réduction des impacts de l'aléa à une gestion s'attardant sur les questions de vulnérabilité et de redémarrage du territoire.* » (Beraud et coll., 2011). Elle représente ainsi « *indéniablement un tournant dans l'appréhension des risques : rompant avec l'idée de risque zéro, elle marque de facto une sortie du paradigme techniciste.* » (Djament-Tran et Reghezza-Zitt, 2012).

Par ailleurs, la résilience dans les cindyniques présente la particularité de prendre en compte les différents moments de la catastrophe tout comme l'étude d'un aléa géophysique. C'est-à-dire qu'un évènement va être découpé selon trois temporalités : l'ante-catastrophe, le pendant, et le post-catastrophe, sans toutefois oublier qu'elles constituent un continuum temporel. L'une des approches de la résilience est ainsi de la considérer comme un ensemble de capacités qui varient selon la temporalité de l'évènement (Reghezza et coll., 2015 ; Provitolo et coll., 2017).

Cette similitude fait que la résilience peut être également appréhendée par les états d'équilibre ou l'évolution d'un système entre différents états d'équilibre qui peuvent être stables ou pseudo-stables ou instables. Un territoire « stable » est un

territoire fonctionnel qui répond aux besoins vitaux (approvisionnement en eau, en énergie, nourriture, etc.) et fondamentaux (santé, secours, logement, etc.) de la population.

A chaque moment correspond des pratiques, des actions, des politiques distinctes, qui vont avoir des répercussions sur la résilience du moment, ainsi que sur la résilience globale. La résilience va se construire dans le post et l'ante, pour n'être révélée qu'en cas de crise (Provitolo, 2013). Cette temporalité correspond au maillon faible de la chaîne, puisque de par la brutalité de l'évènement, comme ici un tsunami à arrivée rapide, une grande part d'autogestion est demandée à chacun. Les gestionnaires n'ont donc pas une grande prise sur cette période. C'est pourquoi il est important de s'intéresser aux comportements humains, qui sont un des points clés sur lesquels travailler. En les étudiant et en comprenant leurs différents mécanismes de mise en place et d'action, il est possible par la suite de réfléchir à différents outils ou aménagements territoriaux à mettre en place. Mais ces études sont encore trop peu nombreuses.

De premières réflexions sur la résilience (Annexe 8, Annexe 9, Annexe 10) ont été entreprises au cours de cette thèse. Elles marquent l'importance de l'intégration de ce concept aux analyses de risque et de territoire. Elle ne doit pas venir remplacer la vulnérabilité mais venir en complément, puisqu'elles apparaissent comme étant complémentaires. Le positionnement de l'une par rapport à l'autre fait d'ailleurs débat (Cutter, 2008). La résilience permet d'englober un plus grand nombre de caractéristiques du territoire et d'imbriquer des échelles (spatiales, temporelles et organisationnelles) différentes.

La richesse de ces composantes est également la raison de la complexité de sa mise en application. Des travaux préliminaires ont été entrepris et ont fait l'objet de publications (Annexe 9 et Annexe 10). Les réflexions doivent donc être approfondies afin d'aboutir à une analyse de la résilience d'un territoire soumis à un ou des risques avec comme objectif final la spatialisation de l'information avec l'obtention d'une cartographie. Une méthodologie facilement reproductible doit ainsi être proposée afin qu'elle puisse être utilisée et appropriée par les acteurs et gestionnaires du territoire. Quel que soit le concept mobilisé, l'approche proposée, l'étude des risques doit garder comme ligne directrice la sécurité de la population.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

A.

Abe, K., (1979), *Size of great earthquakes of 1837–1974 inferred from tsunami data*, J. Geophys. Res., 84(B4), 1561– 1568, doi : 10.1029/JB084iB04p01561.

Adger, W.N., 2006. *Vulnerability, Global Environmental Change*. Volume 16, Issue 3, Pages 268-281, ISSN 0959-3780, [https : 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006).

Aéroport de la Côte d'Azur, 2018. *Rapport annuel*. <https://societe.nice.aeroport.fr/Le-groupe/LA-SOCIETE/Rapports-annuels>

Airy, G.B., 1845. *On tides and waves*. Encyclopaedia metropolitana, Volume. 5 (mixed sciences), London p 241-396.

Ambraseys, N.N., 1962. *Data for the investigation of the seismic sea-waves in the eastern Mediterranean*. Bull. Eismmol. Soc. Am., 52, p. 895-913.

Aublet, B., 2014. *L'action en situation d'urgence : facteurs d'efficacité dans la gestion du réseau routier en cas de crues rapides. L'exemple du département du Gard*. Thèse de doctorat de l'Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 389 pages.

B.

Bantegnie M., 2015, *Le risque de tsunami sur le littoral azuréen : contribution méthodologique pour la détermination des sites refuges en cas de submersion marine par tsunami d'origine sismique*. Mémoire de Master 2 Systèmes Territoriaux, Aide à la décision, Environnement, UMR Géoazur (réalisé dans le cadre du programme européen Astarte), 101 pages.

Barroca, B., DiNardo, M., Mboumoua, I., 2013. *De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ?* EchoGéo, Pôle de Recherche pour l'Organisation et la diffusion de l'Information Géographique.

Barroca, B., Hubert, G., Diab, Y., 2006. *Vulnérabilité : une clé de lecture du risque inondation*. Journées Scientifiques de l'Environnement, Mai 2006, Créteil, France.

Becerra, S., Peltier, A., 2009. *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*. Sociologies et Environnement, L'Harmattan.

Beck, E., 2006. *Approche multi-risques en milieu urbain. Le cas des risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin)*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg. 283 pages.

Beraud, H., Barroca, B., Hubert, G., 2011. *Assessing the resilience of urban technical networks : from theory to application and to waste management*. Collque How the

concept of resilience is able to improve urban risk management? A temporal and spatial analysis, Paris, November 2011.

Bergen T., 2016, *Analyse des inondations azuréennes du 3 oct 2015 : de l'évènement climatique à ses impacts territoriaux*. Rapport Licence 3, Université de Nice-Sophia Antipolis. 42 pages.

Béthoux, N., Fréchet, J., Guyoton, F., Thouvenot, F., Cattaneo, M., Eva, C., Nicolas, M., Granet, M., 1992. *A closing Ligurian sea*. Pure and Applied Geophysics, 139, p. 179-194.

Béthoux, N., Tric, E., Chery, J., Beslier, M.O., 2008. *Why is the Ligurian basin (Mediterranean sea) seismogenic?* Thermomechanical modelling of a reactivated passive margin, Tectonics, 27, TC5011, doi:10.1029/2007TC002232.

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., Wisner, B., 1994. *At risk : Natural Hazards, People's Vulnerability and disasters*. Routledge, Londres.

Bolay, J.C., Schmid, A., Tejada, G., Hazboun, E., 2012. *Technologies and Innovations for Development : Scientific Cooperation for a Sustainable Future*. Springer Science & Business Media.

Boschetti, L., 2013, *Analyse des aléas et de la vulnérabilité des espaces littoraux azuréens au risque de submersion marine par tsunami*, Mémoire de Master 2 Systèmes Territoriaux, Aide à la décision, Environnement, UMR Géoazur. 115 pages.

Boschetti, L., Ioualalen, M., 2020. *Integrated tsunami intensity scale based on maxima of tsunami amplitude and induced current*. Natural Hazards, Springer Verlag. DOI : 10.1007/s11069-020-04338-5).

Boschetti, L., Ioualalen, M., Nemati, F., Grilli, S., Dessa, J.X., Larroque, C., 2020. *Tsunami intensity scale based on wave amplitude and current applied to the French Riviera: the case study of local seismicity*. Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, Springer; International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, vol. 0, pages 1-30. DOI: 10.1007/s11069-020-03921-0

Boschetti, L., Provitolo, D., Tric, E., 2017. *La modélisation conceptuelle comme aide à la construction de villes résilientes*. Risques urbains. 17. DOI : 10.21494/ISTE.OP.2018.0201.

Brooks, N., 2003. *Vulnerability, Risk and Adaptation : A Conceptual Framework*. Tyndall Center for Climate Change Research, working paper 38.

Brunet, R., Ferras, H., Théry, H., 1997. *Les mots de la géographie, dictionnaire critique*. 3ème édition. Montpellier-Paris : RECLUS – La Documentation Française, 520 pages.

Burton, I., White, G. F., Kates, R. W., 1993. *The Environment as Hazard*. Guildford Press, New York, 290 p.

C.

CapHaz-Net Consortium, Tapsell, S., McCarthy, S., Faulkner, H., Alexander, M., 2010. *Social vulnerability to natural hazards*. Flood Hazard Research Centre (FHRC), Middlesex University.

Charpentier, C., 2014, *Perception et représentation du risque de tsunami à Nice*. Mémoire de Master 1, Spécialité EDMR, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne (réalisé dans le cadre du programme européen ASTARTE).

Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Kennedy, A.B., Chawla, A., 2000. *Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and run-up. II: 2D*. J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng., 126(1), p. 48–56.

Chlieh, M., Avouac, J.P., Hjorleifsdottir, V., Song, T.R.A., Ji, C., Sieh, K., Sladen, A., Hebert, H., Prawirodirdjo, L., Bock, Y., Galetzka, J., 2007. *Coseismic slip and afterslip of the great Mw 9.15 SumatraeAndaman earthquake of 2004*. Bull. Seism. Soc. Amer. 97 (1A), p. 152-173.

Choi, B.H., Sung, J.H., Pelinovsky, E., 2006. *Distribution of runup heights of the December 26, 2004 tsunami in the Indian Ocean*, Geophys. Res. Lett., 33, L13601, doi:10.1029/2006GL025867.

Clam, J., 2004. *Qu'est-ce qu'un bien public ? Une enquête sur le sens et l'ampleur d'une socialisation de l'utilité*. Trajectoires de l'immatériel : Contribution à une théorie de la valeur et de sa dématérialisation [en ligne]. Paris : CNRS Éditions, 2004. DOI : 10.4000/books.editions-cnrs.1582.

Cutter, S., 2008. *A place-based model for understanding community resilience to natural disasters*, Global Environmental Changes, 18, p. 598-606.

D.

D'Ercole, R., Metzger, P., 2009. *La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain*. Cybergeog : European Journal of Geography, n° 447.

Dan, G., Sultan, N., Savoye, B., 2007. *The 1979 Nice harbour catastrophe revised : Trigger mechanism inferred from geotechnical measurements and numerical modelling*. Marine Geology 245, p. 40-64.

Dauphiné, A., Provitolo, D., 2001. *La théorie de l'auto-organisation critique et les risques*. Colloque International Risques et Territoires : La connaissance scientifique et technique des risques territorialisés, Mai 2001, Lyon, Vaulx en Velin, France, p.39-46.

Dauphiné, A., Provitolo, D., 2007. *La résilience : un concept pour la gestion des risques*. Annales de Géographie, n°654, p.115–125.

Dauphiné, A., Provitolo, D., 2013, *Risques et catastrophes – Observer, spatialiser, comprendre, gérer*. A. Colin (2^{ème} édition), Collection U, Paris.

Décamps, H., 2007. *La vulnérabilité des systèmes socioécologiques aux événements extrêmes : exposition, sensibilité, résilience*. Natures Sciences Sociétés, 15, p. 48-52.

Delumeau, J., 1978. *Peur en Occident*. Paris, Fayard.

De Maupassant, G., 1850-1893. *Tremblement de terre*. Les Chroniques Tome VII.

Demoraes, F., 2004. *Mobilité, enjeux et risques dans le District Métropolitain de Quito (Equateur)*. Thèse de doctorat de l'Université de Savoie.

Desai, B., Maskrey, A., Peduzzi, P., De Bono, A., Herold, C., 2015. *Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management*. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction.

Djament-Tran, G., Reghezza-Zitt, M., 2012. *Résilience urbaines, les villes face aux catastrophes*, Editions du manuscrit, 360 pages

Doglioni, C., Gueguen, E., S`abat, F., Fernandez, M., 1997. *The western Mediterranean extensional basin and the alpine orogen*. Terra Nova, 9, p.109–112.

Douvinet, J., Gisclard, B., Martin, G., Vinet, F., Bopp, E., Grancher, D., Coulon, M., Genre-Grandpierre, C., 2019. *Les sirènes sont-elles pertinentes pour alerter la population en cas de crues rapides en France ?* La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, EDP Sciences.

Douvinet, J., Janet, B., 2017. *Effectiveness of Institutional Alert Tools in Flood Forecasting in France*. Floods. Elsevier, p. 179-193.

E.

Edel, J.B., Dubois, D., Marchant, R., Hernandez, J., Cosca, M., 2001. *La rotation miocène inférieure du bloc corsosarde ; nouvelles contraintes paléomagnétiques sur la fin du mouvement*. Bulletin de la Société Géologique de France, 172, 3, p. 275-283.

Eva, C., Rabinovich, A.B., 1997. *The February 23, 1887 tsunami recorded on the Ligurian coast, western Mediterranean*. Geophys. Res. Letters, 24, p. 2211–2214.

Evans, M., 2016. *Etude pour la calibration d'un système multi-agents en vue d'une simulation d'évacuation des plages*. Mémoire de Master 2 Géographie spécialité EDMR, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne (réalisé dans le cadre du programme européen ASTARTE).

F.

Foussekis, P., 2019. *Analyse des données spatio-temporelles de la campagne Eye-tracking : Enquêtes relatives aux comportements humains*. Mémoire de Master 1, UMR Géoazur et UMR ESPACE.

G.

Gattacceca, J., Deino, A., Rizzo, R., Jones, D.S., Henry, B., Beaudoin, B., Valeboin, F., 2007. *Miocene rotation of Sardinia: new paleomagnetic and geochronological constraints and geodynamic implications*. Earth planet. Sci. Lett., 258, p. 359–377.

Gidon, M., Pairis, J. L., 1992. *Relations entre le charriage de la Nappe de Digne et la structure de son autochtone dans la vallée du Bès (Alpes de Haute-Provence, France)*. Eclogae Geologicae Helveticae 85, 2, p.327–359.

Gleyze, J. F., 2001. *Apport de l'information géographique dans l'analyse des risques. Application à l'étude des perturbations du réseau routier à la suite de catastrophes*. Bulletin d'Information Scientifique et Technique de l'IGN, n°72, p 69-84.

Gleyze, J. F., 2005. *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risque*. Thèse de doctorat, Université Paris 7 – Denis Diderot.

Grilli, S.T., O'Reilly, C., Harris, J.C., Bakhsh, T.T., Tehranirad, B., Banhashemi, S., Kirby, J.T., Baxter, C.D.P., Eggeling, T., Ma, G., Shi, F., 2015. *Modeling of SMF tsunami hazard along the upper US East Coast: Detailed impact around Ocean City*. MD. Natural Hazard, 76, 2, p. 705-746. DOI: 10.1007/s11069-014-1522-8.

Gomez, C., Lavigne, F., Paris, R., Tabarly, S., 2010. *Séisme et tsunami à Sumatra, 2004 – 2010 : de la catastrophe environnementale et humaine de décembre 2004 à la reconstruction*. Géoconfluences.

H.

Hanks, T., Kanamori, H., 1979. *A moment magnitude scale*. J. Geophys. Res., 84 (B5), p. 2348-2350.

Hassoun, V., 2014. *Analyse multi-échelles des déstabilisations sous-marines de la Marge Ligure : implications sur la répartition spatio-temporelle des facteurs déclenchant*. Thèse de doctorat de l'Université Nice Sophia Antipolis.

Hatori, T., 1986. *Classification des tsunamis d'après des échelles de magnitude*. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 61(3), p. 503-514.

I.

Iida, K., 1956. *Earthquakes accompanied by tsunamis occurring under the sea off the Islands of Japan*. The Journal of earth sciences, Nagoya University, 4(1), p. 1-43.

Iida, K., 1958. *Magnitude and energy of earthquakes accompanied by tsunami, and tsunami energy*. J Earth Sci., Nagoya Univ., 6, p. 101–112.

Iida, K., 1970. *The generation of tsunamis and the focal mechanism of earthquakes*. Tsunamis in the Pacific Ocean, edited by W.M. Adams, East-West Center Press, Honolulu, p. 3-18.

Iida, K., Cox, D., Pararas-Carayannis, G., 1972. *Preliminary Catalog of Tsunamis Occurring in the Pacific Ocean*. Data Report No. 5, Hawaii Institute of Geophysics. HIG-67-10. University of Hawaii, Honolulu.

Imamura, A., 1942. *History of Japanese tsunamis*. Kayo-No-Kagaku (Oceanography), 2,7 p.4–80 (in Japanese).

Imamura, A., 1949. *List of tsunamis in Japan*. J. Seismol. Soc. Japan, 2, p. 23–28.

Institut National de l'Information Géographique et forestière (IGN), 2019. Base de Données Topographiques, BD-Topo, Version 3.0.

Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE), 2015. *Alpes-Maritimes – Une population qui stagne malgré l'arrivée de jeunes diplômés*. INSEE Analyses Provence-Alpes-Côte d'Azur, n°27, paru le 17/12/2015.

Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE), 2020. *Dossier complet. Département des Alpes-Maritimes (06)*. Chiffres détaillés, paru le 29/06/2020.

Ioualalen, M., Asavanant, J., Kaewbanjak, N., Grilli, S.T., Kirby, J.T., Watts, P., 2007a. *Modeling the 26 December 2004 Indian Ocean tsunami: Case study of impact in Thailand*. J. Geophys. Res., Vol. 112, C07024, doi: 10.1029/2006JC003850.

Ioualalen, M., Larroque, C., Scotti, O., Daubord, C., 2014. *Tsunami mapping related to local earthquakes on the French-Italian Riviera (western Mediterranean)*. Pure Appl Geophys 171(7), p. 1423-1443.

Ioualalen, M., Migeon, S., Sardou, O., 2010. *Landslide tsunami vulnerability in the Ligurian Sea: case study of the 1979 October 16 Nice international airport submarine landslide and of identified geological mass failures*. Geophys. J. Int., 181, p. 724–740. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04572.x.

Ioualalen, M., Pelinovsky, E., Asavanant, J., Lipikorn, R., Deschamps, A., 2007b. *On the weak impact of 26 December Indian Ocean tsunami on the Bangladesh coast*. Natural Hazards and Earth System Science, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 7 (1), p.141-147.

K.

Kajiura, K., 1970. *Tsunami source energy and the directivity of wave radiation*. Bulletin of the earthquake research Institute. University of Tokyo, Vol. 48, p. 835-869.

Kelner, M., 2018. *Analyse des processus de glissement gravitaires sous-marins par approche géophysique, géotechnique et expérimentale : cas de la pente continentale de Nice*. Thèse de doctorat de l'Université Nice Sophia Antipolis.

Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., 2000. *Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and run-up*. I: 1D. *J. Wtrwy, Port, Coast, and c. Engrg.* ASCE, 126(1), p. 39–47.

Kervern, G.Y., 1995. *Éléments fondamentaux des cindyniques*. Économica, coll. Gestion Poche, Paris.

Kirby, J.T., Shi, F., Tehranirad, B., Harris, J.C., Grilli, S.T., 2013. *Model equations and sensitivity to dispersion and Coriolis effects*. *Oc Modell*, 62, p. 39–55.

Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H., Imamura, F., 2009. *Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia*. *Coastal Engineering Journal*, 51(3), p. 243-273.

L.

Lambert, J., 2008. *BD Tsunamis. Inventaire historique des tsunamis en France, année 2007*. Rapport final. BRGM/RP-55993-FR.

Lambert, J., 2009. *BD Tsunamis. Inventaire historique des tsunamis en France. Année 2009*. Rapport final. BRGM/RP-57781-FR.

Lambert, J., Pedreros, R., 2012. *BD Tsunamis. Inventaire historique des tsunamis en France. Bilan des travaux 2011*. Rapport final. BRGM/RP-61152-FR.

Lambert, J., Terrier, M., 2011. *Historical tsunami database for France and its overseas territories*. *Nat. Hazard Earth. Syst. Sci.*, 11, p. 1037–1046.

Larroque, C., Béthoux, N., Calais, E., Courboulex, F., Deschamps, A., Déverchère, J., Stéphan, J.F., Ritz, J.F., Gilli, E., 2001. *Active and recent deformation at the Southern Alps - Ligurian basin junction*. *Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw*, 80, p. 255-272.

Larroque, C., Delouis, B., Godel, B., Nocquet, J.M., 2009. *Active deformation at the southwestern Alps – Ligurian basin junction (France-Italy boundary): Evidence for recent change from compression to extension in the Argentera massif*. *Tectonophysics*, 467(1–4), p. 22–34, doi:10.1016/j.tecto.2008.12.013.

Larroque, C., Mercier de L'épinay, B., Migeon, S., 2011. *Morphotectonic and fault-earthquake relationships along the northern Ligurian margin (Western Mediterranean) based on high resolution multibeam bathymetry and multichannel seismic-reflection profiles*. *Mar. geophys. Res.*, 32, p. 163–179, doi:10.1007/s11001-010-9108-7.

Larroque, C., Scotti, O., Ioualalen, M., 2012. *Reappraisal of the 1887 Ligurian earthquake (western Mediterranean) from macroseismicity, active tectonics and tsunami modelling*. *Geophys. J. Int.*, doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05498.x.

Laurent, O., Stéphan, J.F., Popoff, M., 2000. *Modalités de la structuration miocène de la branche sud de l'arc de Castellane (chaînes subalpines méridionales)*. *Géologie de la France*, 3, p. 33-65.

Lavigne, F., Paris, R., Grancher, D., Wassmer, P., Brunstein, D., Vautier, F., Leone, F., Flohic, F., De Coster, B., Gunawan, T., Gomez, C., Setiawan, A., Cahyadi, R., Fachrizal, 2009. *Reconstruction of Tsunami Inland Propagation on December 26, 2004 in Banda Aceh, Indonesia, through Field Investigations*. Pure and Applied Geophysics, 165, p. 1-23.

Le Breton, D., 2017. *Sociologie du risque*. Que sais-je ? n° 3016. Que sais-je.

Le Petit Niçois, 24 février 1887.

Lekkas, E. L., Andreadakis, E., Kostaki, I., Kapourani, E., 2013. *A proposal for a new integrated tsunami intensity scale (ITIS-2012)*. Bulletin of the Seismological Society of America, 103(2B), p. 1493-1502.

Leone, F., Lavigne, F., Paris, R., Denain, J.C., Vinet, F., 2010. *A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability*. Applied Geography, 13 p., doi:10.1016/j.apgeog.2010.07.009.

Leone, F., Vinet, F., 2011. *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles*. Analyses géographiques. Université Paul Valéry.

Leone, F., Vinet, F., Denain, J.C., Bachri, S., 2007. *Développement d'une méthodologie d'analyse spatiale des destructions consécutives au tsunami du 26 décembre 2004 (Banda Aceh, Indonésie)*. Premiers résultats pour l'élaboration de futurs scénarios de risque – Géocarrefour, Vol. 82, n°1-2, (numéro spécial risques et territoires), p. 77-90.

Lhomme, S., Djament-Tran, G., Reghezza, M., Rufat, S., 2012. *Penser la résilience urbaine*. In Résiliences urbaines, les villes face aux catastrophes, Djament-Tran, G., Reghezza-Zitt, M. (eds.). Editions Le Manuscrit, EAN : 9782304039047, p. 13-46.

Lopes, J., 2014. *Gestion du risque de tsunami à Nice et modalités d'évacuation*. Mémoire de Master 1, Spécialité EDMR, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne (réalisé dans le cadre du programme européen ASTARTE).

Lynett, P.J., Borrero, J., Son, S., Wilson, R., Miller, K., 2014. *Assessment of the tsunami-induced current hazard*. Geophys. Res. Lett., 41, p. 2048–2055, doi:10.1002/2013GL058680.

Lynett, P., Borrero, J., Weiss, R., Son, S., Greer, D., Renteria, W., 2012. *Observations and modeling of tsunami-induced currents in ports and harbors*. Earth Planet. Sci. Lett., 327–328, p. 68–74.

Lynett, P., Weiss, R., Renteria, W., De La Torre Morales, G., Son, S., Arcos, M., Maclnnes, B., 2013. *Coastal impacts of the March 11th Tohoku,, Japan Tsunami in the Galapagos Islands*. Pure Appl. Geophys., 170, p. 1189–1206, doi:10.1007/s00024-012-0568-3.

M.

Manche, Y., 1997. *Proposition pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels prévisibles / A proposal for taking into consideration vulnerability in the mapping of natural risk forecasts*. Revue de Géographie Alpine. 1997, Tome 85 n°2.

Manche, Y., 1998. *Cartographie multirisques : une méthode semi-automatique*. Ingénieries-EAT, n° spécial Risques naturels, p. 115-119.

Mayaguezz, H., 2015. *Exposition humaine, analyse et renforcement des capacités d'évacuation face aux tsunamis à Padang (Indonésie)*. Thèse de doctorat de l'Université de La Rochelle.

Metzger, P., D'Ercole, R., 2008. *Enjeux territoriaux et vulnérabilité : une approche opérationnelle*. Colloque interdisciplinaire - Vulnérabilités sociétales, risques et environnement : comprendre et évaluer. Université de Toulouse Le Mirail ; Université Paul Sabatier ; CNRS ; OMP ; GEODE ; CERTOP ; LMT ; Ministère de l'écologie du développement et de l'aménagement durables ; Région Midi-Pyrénées, May 2008, Toulouse, France.

Metzger, P., D'Ercole, R., 2011. *Les risques en milieu urbain : éléments de réflexion*. EchoGéo, no 18. DOI : <https://doi.org/10.4000/echogeo.12640>

Migeon, S., Cattaneo, A., Hassoun, V., Larroque, C., Corradi, N., Fanucci, F., Dano, A., Mercier De Lepinay, B., 2011. *Morphology, distribution and origin of recent submarine landslides of the Ligurian Margin (North-western Mediterranean): some insights into geohazard assessment*. Marine Geophysical Researches. Doi : 10.1007/s11001-011-9123-3.

Minelli, L., Vecchio, A., Speranza, F., Nicolosi, I., D'Ajello Caracciolo, F., Chiappini, S., Carluccio, R., Chiappini, M., 2016. *Aeromagnetic investigation of southern Calabria and the Messina Straits (Italy): Tracking seismogenic sources of 1783 and 1908 earthquakes*. J. Geophys. Res. Solid Earth, 121, p.1297–1315, doi:10.1002/2015JB012305.

Monaco Matin, 2020. *La Principauté a déjà gagné 6 hectares, où en est le projet d'extension en mer de Monaco ?* Publié le 12/01/2020.

Mouroux, P., Le Brun, B., Depinois, S., Bertrand, E., Masure, P., 2004. *Projet européen RISKUE: application à la ville de Nice*. Rapport BRGM/RP-53202.

Murty, T.S., Loomis, H.G., 1980. *A new objective tsunami magnitude scale*, Mar. Geod., 4, p. 267–282.

N.

National Geophysical Data Center / World Data Service (NGDC/WDS): Global Historical Tsunami Database. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5PN93H7

Nemati, F., Grilli, S.T., Ioualalen, M., Boschetti, L., Larroque, L., Trevisan, J., 2019. *High-resolution coastal hazard assessment along the French Riviera from co-seismic tsunamis generated in the Ligurian fault system*. Natural Hazards, vol 96, n°2, p. 553-586.

Newhall, C.G., 1982. *A method for estimating intermediate and long-term risks from volcanic activity, with an example from Mount St. Helens, Washington*. US Geological Survey, No. 82-396.

Nice Matin, 1979. *Antibes : Tout un quartier dévasté*. Quotidien du 17 octobre 1979.

Nice Matin, 2009. *Il y a 30 ans, une vague meurtrière sur la ville*. Quotidien du 15 octobre 2009.

Nice Matin, 2019. *Sommes-nous à l'abri d'un tsunami ?* Quotidien du 1 mars 2019.

NOAA, 2017. *Tsunami Sources 1610 B. C. to A. D. 2017 from Earthquakes, Volcanic Eruptions, Landslides and Other Causes*. Tsunami Sources Poster.

NOAA, 2019. *National Geophysical Data Center / World Data Service (NGDC/WDS): Global Historical Tsunami Database*. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5PN93H7

O.

Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. seism. Soc. Am., 75, p. 1135–1154.

Ozer, P., De Longueville, F., 2005. *Tsunami en Asie du Sud-Est : retour sur la gestion d'un cataclysme naturel apocalyptique*. Cybergeog : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage, document 321, DOI : 10.4000/cybergeog.3081

P.

Papadopoulos, G.A., 2003. *Quantification of Tsunamis: A Review*, In: Yalçiner, A.C., Pelinovsky, E., Okal, E., Synolakis, C.E. (eds) *Submarine Landslides and Tsunamis*, NATO Science Series (Series IV: Earth and Environmental Sciences), vol 21. Springer, Dordrecht.

Papadopoulos, G.A., Gràcia, E., Urgeles, R., Sallares, V., De Martini, P.M., Pantosti, D., González, M., Yalçiner, A.C., Mascle, J., Sakellariou, D., Salamon, A., Tinti, S., Karastathis, V., Fokaefs, A., Camerlenghi, A., Novikova, T., Papageorgiou, A., 2014.

Historical and pre-historical tsunamis in the Mediterranean and its connected seas: Geological signatures, generation mechanisms and coastal impacts. Marine Geology, Volume 354, p. 81-109.

Papadopoulos, G.A., Imamura, F., 2001. *A proposal for a new tsunami intensity scale.* Internat. Tsunami symposium 2001 Proc., Seattle, Washington, Aug. 7-10, p. 569-577.

Paulet, J.P., 2000. *Géographie urbaine.* Paris, Armand Colin, Coll. « U Géographie », 288 p.

Péroche, M., 2016. *La gestion de crise tsunami dans la Caraïbe : contribution géographique aux dispositifs d'alerte et d'évacuation des populations.* Thèse de doctorat de l'Université Montpellier 3.

Pigeon, P., 2010. *Catastrophes dites naturelles, risques et développement durable : Utilisations géographiques de la courbe de Farmer.* VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, vol. 10, n°1.

Pigeon, P., 2012. *Apports de la résilience à la géographie des risques : l'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée, France).* VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, vol. 12, n°1.

Pigeon, P., Rebotier, J., 2017. *Les politiques de prévention des désastres : Penser et agir dans l'imperfection.* ISTE, Système Terre - Environnement, André Mariotti.

Préfecture des Alpes-Maritimes, 2007. *Dossier Départemental sur les RISQUES MAJEURS dans les Alpes-Maritimes.*

Pophet, N., Kaewbanjak, N., Asavanant, J., Ioualalen, M., 2011. *High grid resolution and parallelized tsunami simulation with fully nonlinear Boussinesq equations.* Computers and Fluids, 40, p. 258–268.

Projet Neamtic, 2013. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 2013. *Tsunami Information Centre for the North-Eastern Atlantic and Mediterranean (NEAMTIC), Summary of achievements 2010–2013.* (IOC Brochure 2013-2)

Provitolo, D., 2002. *Risque urbain, catastrophes et villes méditerranéennes,* Thèse de doctorat de l'Université de Nice-Sophia Antipolis.

Provitolo, D., 2005. *Un exemple d'effets de dominos : la panique dans les catastrophes urbaines.* Cybergeog : European Journal of Geography, n°328.

Provitolo, D., 2011. *L'évolution de la représentation des catastrophes naturelles en Méditerranée à travers la peinture. L'exemple des éruptions volcaniques en Italie aux XVIIIe et XIXe siècles.* Bernard Cousin. Les sociétés méditerranéennes face au risque - Représentations, IFAO, pp.123-130, 2011, Bibliothèque générale.

Provitolo, D., 2012. *The Contribution of Science and Technology to meeting the Challenge of Risk and Disaster Reduction in Developing Countries : From Concrete Examples to the Proposal of a Conceptual Model of « Resiliency Vulnerability ».* in :

Bolay, J.C., et al. (eds), Technologies and Innovations for Development, Springer-Verlag.

Provitolo, D., 2019. *Des modèles multiples pour l'étude des risques et catastrophes*. Habilitation à Diriger des Recherches. Université Côte d'Azur.

Provitolo, D., Castagnola, F., Boschetti, L., Huet, V., 2016. *Comment réagir face à une inondation ?* Conférence Grand Public dédiée à la Culture du Risque, Auribeau Sur Siagne, 23 novembre 2016.

Provitolo, D., Dubos-Paillard, E., 2012. *Quand un invité surprise arrive... quels sont les comportements adoptés pendant, avant et après la catastrophe ?* Assises Nationales des Risques Naturels, Jan 2012, Bordeaux, France.

Provitolo, D., Dubos-Paillard, E., Verdière, N., Lanza, V., Charrier, R., Bertelle, C., Aziz-Alaoui, M.A., 2015. *Les comportements humains en situation de catastrophe : de l'observation à la modélisation conceptuelle et mathématique.*, Cybergéo, n°735.

Provitolo, D., Lozi, R., Tric, E., 2020. *Topological analysis of a weighted human behaviour model coupled on a streets and places network in the context of urban terrorist attack*. Recent Advances in Mathematical Models - optimization, industrial problems with analytic and numerical solutions.

Provitolo, D., Tricot, A., 2018. *Understanding and Simulation of Human Behaviors in areas affected by disasters*. 4th World Congress on Resilience, June 2018, Marseille.

Provitolo D., Tricot A., 2019, Rapport intermédiaire, ANR Com2SiCa

Provitolo, D., Reghezza-Zitt, M., 2015. *Résilience et vulnérabilité : de l'opposition au continuum. Résiliences - sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes*. Eds Reghezza-Zitt, M., Rufat, S.,Iste Press.

Provitolo, D., Serre, D., Boschetti, L., 2017. *Toward a process of resilience implementation : capacities, models and strategies*. In : Floods - Vol 1- Risk knowledge, Eds F. Vinet, Elsevier.

PPRI, 1999. *Plans de prévention des risques naturels (PPR) – Risques d'inondation – Guide méthodologique*. La documentation Française.

PPRN-Thau, 2012. *Plan de prévention des risques naturels d'inondation – Bassin versant de l'Étang de Thau, Commune de Villeveyrac*. Direction Départementale des Territoires et de la Mer – Service Eau et Risques, Préfecture de l'Hérault.

Q.

Quenault, B., 2015. *De Hyōgo à Sendai, la résilience comme impératif d'adaptation aux risques de catastrophe : nouvelle valeur universelle ou gouvernement par la catastrophe ?* Développement durable et territoires, vol.6, n°3.

R.

Reghezza, M., 2006. *Réflexions sur la vulnérabilité métropolitaine. La métropole parisienne face au risque de crue centennale*. Thèse de l'Université de Nanterre – Paris X.

Reghezza-Zitt, M., Provitolo, D., Lhomme, S., 2015. *Définir la résilience : quand le concept résiste*. In Reghezza-Zitt, M., Rufat, S., Résiliences - sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes. Eds Iste Press.

Robert, J., 2012. *Pour une géographie de la gestion de crise : de l'accessibilité aux soins d'urgence à la vulnérabilité du territoire à Lima*. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, 555 pages.

Robert, S., 2006. *Résilience des réseaux routiers : l'exemple du Val-d'Oise*. Bulletin AGER, p. 8-14.

Robin Des Bois, 2010. Les déchets de la tempête Xynthia

Rollet, N., Déverchère, J., Beslier, M.O., Guennoc, P., Réhault, J.P., Sosson, M., Truffert, C., 2002. *Back arc extension, tectonic inheritance and volcanism in the Ligurian sea, Western Mediterranean*. Tectonics, 21.

Romeo, F., 2019. *Tsunami en zone méditerranéenne – Vulnérabilité et résilience de la Côte d'Azur et de ses infrastructures critiques*. Mémoire de recherche pour l'obtention du diplôme de spécialisation en Architecture et Risques majeurs, Ecole nationale supérieure d'architecture de Paris Belleville, Stage et mémoire au CRC Mines ParisTech et UMR Géoazur.

S.

Sage, F., Beslier, M.O., Thinon, I., Larroque, C., Dessa, J.X., Migeon, S., Angelier, J., Guennoc, P., Schreiber, D., Michaud, F., Stephan, J.F., Sonnette, L., 2011. *Structure and evolution of a passive margin in a compressive environment: example of the south-western Alps-Ligurian basin junction during the Cenozoic*. Mar. Petrol. Geol., 28, p. 1263–1282.

Sahal, A., 2011. *Le risque tsunami en France : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque*. Thèse de doctorat de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 314 pages.

Schambach, L., Grilli, S.T., Kirby, J.T., Shi, F., 2018. *Landslide tsunami hazard along the upper US East Coast: effects of slide rheology, bottom friction, and frequency dispersion*. Pure and Applied Geophys., 40 pps.

SDIS 06, 2009. *Schéma Départemental d'Analyse et de Couverture des Risques*.

SDIS 06, 2017. Brève d'INF06. L'actualité du SDIS06 en direct ! n°121, octobre 2017.

Sénat, 2019. *Rapport La prévention et l'alerte du risque de tsunami sur les côtes françaises*, 21 mars 2019, n° 399.

Serre, D., 2015. *Concevoir la résilience urbaine : un défi face à des complexités*. EDP Sciences. Complexité et désordre Éléments de réflexion.

Shi, F., Kirby, J.T., Harris, J.C., Grilli, S.T., 2012. *A high order adaptive time-stepping TVD for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation*. *Oc Modell* 43, p. 36–51.

Shuto, N., 1993. *Tsunami intensity and disasters*. In : *Tsunamis in the World*. Springer, Dordrecht, p. 197-216.

Sieberg, A., 1923. *Geologische, physicalische und angewandte Erdbebenkunde*. Jena, Verlag von G. Fischer.

Sieberg, A., 1927. *Geologische, physikalische und angewandte Erdbebenkunde*. Verlag von Gustav Fischer, Jena.

Soloviev, S.L., 1970. *Recurrence of tsunamis in the Pacific*. In *Tsunamis in the Pacific Ocean*. Edited by W.M. Adams, East-West Center Press, Honolulu, p. 149-163.

Soloviev, S.L., Solovieva, O.N., Go, C.N., Khen S.K., Shchetnikov, N. A., 2000. *Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C.-2000 A.D.* Advances in Natural and Technological Hazards Research, Volume 13, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 237 p.

T.

Terrier, M., Monfort, D., Lambert, J., Le Roy, S., Pedreros, R., Sedan, O., 2012. *Method for Evaluating Vulnerability to Tsunamis of low-to-medium intensity: Application to the French Côte d'Azur*. Fifth International Tsunami Symposium, Septembre 2012, Ispra, Italy.

Texier, P., 2009. *Vulnérabilité et réduction des risques liés à l'eau dans les quartiers informels de Jakarta, Indonésie. Réponses sociales, institutionnelles et non institutionnelles*. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Diderot - Paris VII.

Tsunami Risk and Strategies for the European region (TRANSFER) project (2009), Northeast Atlantic and Mediterranean Region Tsunami Catalogue (NEAMTWS), retrieved February 2009.

U.

UNESCO, 2009. *Tsunami risk assessment and mitigation for the Indian Ocean; knowing your tsunami risk - and what to do about it*. Paris, France, 82 p.

UNISDR, 2017. *How To Make Cities More Resilient A Handbook For Local Government Leaders*. A contribution to the Global Campaign 2010-2020. Geneva, 2017 version.

V.

Vecchio, A., Anzidei, M., Carbone, V., 2014. *New insights on the tsunami recording of the May, 21, 2003, Mw 6.9 Boumerdès earthquake from tidal data analysis*. Journal of Geodynamics, Volume 79, p. 39-49, ISSN 0264-3707.

Venzke, E., Wunderman, R.W., McClelland, L., Simkin, T., Luhr, J.F., Siebert, L., Mayberry, G. (eds.), 2002. *Global Volcanism, 1968 to the Present*. Smithsonian Institution, Global Volcanism Program Digital Information Series, GVP-4.

Veyret, Y., 2004. *Géographie des risques naturels en France : de l'aléa à la gestion*.

Veyret, Y., Meschinet De Richemond, N., 2003. *Le risque, les risques*. Veyret Y.(dir), p. 17-47.

Veyret, Y., Reghezza, M., 2005. *Aléas et risques dans l'analyse géographique*. In Annales des mines, Vol. 40, p. 61-69.

Veyret, Y., Reghezza, M., 2006. Vulnérabilité et risques. L'approche récente de la vulnérabilité. In Annales des mines, Vol. 43, p. 9-13.

W.

Wang, X., Liu, P.L.F., 2005. *A numerical Investigation of Boumerdes-Zemmouri (Algeria) Earthquake and Tsunami*. Tech Science Press. CMES, vol10, no.2, p. 171-183.

Wei, G., Kirby J.T., 1995. *A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations*. J. Wtrwy Port Coast Oc. Engrg, 121, p.251–261.

Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S. T., Subramanya, R., 1995. *A fully nonlinear Boussinesq model for free surface waves*. Part 1: Highly nonlinear unsteady waves. J. Fluid Mech., 294, p. 71–92.

Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994. *New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement*. Seismological Society of America Bulletin, 84, p. 974-1002.

Wilson, R.I., Admire, A.R., Borrero, J.C., Dengler, L.A., Legg, M.R., Lynett, P., McCrink, T.P., Miller, K.M., Ritchie, A., Sterling, K., Whitmore, P.M., 2013. *Observations and impacts from the 2010 Chilean and 2011 Japanese tsunamis in California (USA)*. Pure and Applied Geophysics, vol. 170, no 6-8, p. 1127-1147.

Sites consultés

<http://aiwest-dr.unsyiah.ac.id/2018/field-trips/>

Consulté 30 septembre 2018

[https://fr.unesco.org/70years/50 ans alerte tsunami pacifique](https://fr.unesco.org/70years/50_ans_alerte_tsunami_pacifique)

Consulté le 9 février 2018

<https://lespoetes.net/poeme.php?cat=tdm&id=8370>

Consulté le 22 juin 2020

[http://www.alpes-maritimes.gouv.fr/content/download/30214/241775/file/Presentation RCSCdes%20Alpes-Maritimes_SIDPC.pdf](http://www.alpes-maritimes.gouv.fr/content/download/30214/241775/file/Presentation_RCSCdes%20Alpes-Maritimes_SIDPC.pdf)

Consulté le 29 juillet 2019

<http://www.alpes-maritimes.gouv.fr/Politiques-publiques/Securite-et-protection-de-la-population/Securite-civile-et-gestion-de-crise/Alerte-et-information-des-populations/SAIP>

Consulté le 3 juin 2019

<https://www.azurseisme.com/>

Consulté le 23 avril 2017

<https://www.defense.gouv.fr/actualites/memoire-et-culture/semaphore-vue-sur-mer-exceptionnelle>

Consulté le 10 septembre 2019

<https://www.departement06.fr/documents/Import/decouvrir-les-am/rr144-siagne.pdf>

Consulté le 3 mai 2016

<http://www.doubs.gouv.fr/Politiques-publiques/Securite-et-protection-de-la-population/Securite-civile/Definition-et-organisation-de-la-securite-civile>

Consulté le 23 juin 2019

<https://www.eau.veolia.fr/qui-sommes-nous/leau-potable-une-conquete-historique>

Consulté le 7 septembre 2019

<https://www.europe1.fr/societe/tempete-miguel-90-des-foyers-prives-deelectricite-realimentes-3903586>

Consulté le 22 août 2019

<https://www.gouvernement.fr/risques>

Consulté le 21 juin 2018

<https://www.gouvernement.fr/risques/dispositif-orsec>

Consulté le 29 juin 2018

<https://www.gouvernement.fr/risques/les-collectivites>

Consulté le 6 mai 2018

<https://www.gouvernement.fr/risques/risques-naturels>

Consulté le 16 juillet 2019

<https://www.gouvernement.fr/risques/se-preparer-en-toutes-circonstances>

Consulté le 29 juin 2018

<https://www.gouvernement.fr/risques/tsunami>

Consulté le 21 juin 2018

<https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Publications/Vie-pratique/Fiches-pratiques/camping-regles-a-connaître>

Consulté le 17 octobre 2019

<https://www.insee.fr/fr/statistiques/1304124>

Consulté le 23 août 2019

<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2852693>

Consulté le 11 décembre 2019

<https://www.interieur.gouv.fr/Actualites/Information-de-la-population-en-cas-de-danger/Fin-de-l-application-SAIP>

Consulté le 3 juin 2019

<https://www.interieur.gouv.fr/Alerte/Alerte-ORSEC/Qu-est-ce-que-le-SAIP>

Consulté le 3 juin 2019

<https://www.interieur.gouv.fr/Le-ministere/Securite-civile/Documentation-technique/Planification-et-exercices-de-Securite-civile>

Consulté le 19 août 2019

<https://www.leparisien.fr/environnement/intemperies-les-trombes-d-eau-font-au-moins-13-morts-sur-la-cote-d-azur-04-10-2015-5152925.php>

Consulté le 5 octobre 2015

https://www.lexpress.fr/actualite/monde/asia/a-banda-aceh-les-touristes-viennent-faire-leur-tsunami-tour_1632936.html

Consulté le 16 août 2016

<http://www.mementodumaire.net/responsabilites-du-maire-2/r8-plan-communal-de-sauvegarde-pcs/>

Consulté le 29 juin 2018

<https://www.palaisdesfestivals.com/sites/palais/files/2019-04/DOSSIER-PRESSE-CANNES-TOURISME-2019-FR-s.pdf>

Consulté le 10 mars 2019

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	I
Abstract	III
Remerciements	V
Sommaire	XV
Introduction générale.....	1
Partie I - Le risque de tsunami : quelle réalité à l'échelle mondiale et européenne ? Quelle intégration dans les documents réglementaires français ?	13
Introduction de la Partie I.....	15
Chapitre 1 : Le risque de tsunami : de l'échelle mondiale a méditerranéenne	17
1. Une inégale répartition à l'échelle mondiale	17
2. Les tsunamis majeurs ayant impacté la Méditerranée, de l'Antiquité à nos jours.....	19
2.1. Inventaire des tsunamis majeurs s'étant produit en mer Méditerranée.....	20
2.2. Tsunami locaux, une arrivée rapide sur les littoraux, ne permettant pas une alerte et une évacuation organisée	22
2.3. Tsunami régionaux, une alerte et une évacuation possible.....	23
2.4. Les télé-tsunami, des évènements rares en Méditerranée mais aux effets destructeurs	26
3. Des territoires davantage exposés aux tsunamis.....	27
4. Conclusion	29
Chapitre 2 : Le littoral azuréen, un territoire exposé à des tsunamis locaux.....	31
1. Une géographie particulière génératrice de nombreux évènements soudains et brutaux.....	31
2. Des spécificités géologiques locales, une zone à forte sismicité propice à la génération de tsunamis	33
3. Un littoral exposé à l'aléa tsunami, deux évènements historiques majeurs	35
3.1. L'évènement majeur, le tsunami généré par le séisme Ligure du 23 février 1887	35
3.2. Le tsunami local du 16 octobre 1979, un évènement d'origine gravitaire	40
4. Conclusion	43

Chapitre 3 : De la surveillance à l’alerte des tsunamis en France	45
1. Des structures de surveillance et de veille des tsunamis à différentes échelles	45
1.1. La surveillance dans la zone Méditerranée - Nord Atlantique	46
1.2. La surveillance et la veille nationale	48
2. L’alerte nationale, une organisation adaptée aux tsunamis locaux ?	49
2.1. Le CENALT, une structure indispensable à la détection et l’alerte de tsunamis en France métropolitaine	50
2.2. L’alerte française, une organisation verticale avec une structure centrale	52
3. L’alerte de la population grâce à différents outils	57
3.1. Les sirènes, un ouïl historique	57
3.2. Le système de télé-alerte, un outil basé sur le volontariat	59
3.3. Les applications smartphone	60
3.4. Les réseaux sociaux, un nouvel outil d’alerte	61
4. Conclusion	63
Chapitre 4 : Les outils et les plans de prévention, d’urbanisme et d’information à la population dans le domaine des risques et des catastrophes – Quelle place pour le risque de tsunami ?	65
1. Le tsunami, absent des plans d’urbanisme et d’aménagement du territoire dans le domaine des risques	65
2. Outils d’aide à la gestion de crise, un début d’intégration du tsunami	66
3. Responsabiliser le citoyen pour qu’il devienne acteur de sa sécurité	68
3.1. Les outils d’information à la population	68
3.2. Des actions menées en parallèle pour informer la population aux risques grâce à l’implication des pompiers	72
3.3. Attention aux mauvais messages passés	75
4. Une faible intégration du risque de tsunami dans l’ensemble de ces outils	77
5. Conclusion	79
Conclusion de la partie I	81
Partie II - L’aléa tsunami – De la compréhension du phénomène à sa cartographie grâce à l’utilisation de modèles numériques	83
Introduction de la Partie II	85
Chapitre 5 : Le tsunami, un évènement extrême : De l’observation à sa caractérisation	87
1. Le tsunami, un aléa aux nombreuses particularités	87
1.1. La notion de tsunami : les principales caractéristiques	88

1.2.	Le tsunami, des généralités de fonctionnement aux particularités spatiales.....	92
2.	Des sources diverses de tsunamis à l'origine d'une inégale répartition.....	95
2.1.	Le tsunami, des origines variées.....	95
2.2.	Les tsunamis d'origine sismique, des impacts sur de vastes étendues.....	96
2.3.	Les tsunamis d'origine gravitaire, des impacts locaux.....	100
3.	Les outils d'observation et d'enregistrement des tsunamis.....	101
4.	Conclusion.....	103
Chapitre 6 : Proposition d'une nouvelle échelle d'intensité de tsunami.....		105
1.	Définition des notions nécessaires à la réalisation de classifications de tsunamis.....	105
2.	Des typologies de classification de tsunamis selon la magnitude, les dégâts occasionnés et l'intensité.....	109
2.1.	Les échelles de magnitude qui mesurent l'aléa.....	109
2.2.	Une focalisation sur les dégâts pouvant être couplée avec des échelles de magnitude afin d'obtenir des échelles d'intensité.....	110
2.3.	Echelles d'intensité qui mesurent les effets d'une catastrophe.....	112
2.4.	Zoom sur les échelles utilisées pour la construction d'une nouvelle échelle d'intensité.....	113
2.5.	Synthèse des échelles de magnitude et d'intensité de tsunami existantes.....	121
3.	Proposition d'une nouvelle échelle d'intensité combinant magnitude et impacts sur milieux terrestres et marins.....	123
3.1.	Réflexions permettant d'aboutir à une nouvelle échelle d'intensité de tsunami.....	124
3.2.	Les éléments de la magnitude pris en compte pour la réalisation de cette nouvelle échelle d'intensité de tsunami.....	125
3.3.	Les échelles existantes prises en compte pour la construction de cette nouvelle échelle d'intensité de tsunami.....	126
3.4.	L'obtention d'une nouvelle échelle d'intensité.....	129
4.	Conclusion.....	134
Chapitre 7 : De la modélisation à la cartographie de l'aléa tsunami.....		135
1.	La modélisation numérique de tsunamis, apports aux sciences de l'univers et aux cindyniques.....	135
1.1.	Intérêt de la modélisation numérique.....	135
1.2.	La modélisation numérique comme outils de simulation de la génération de tsunamis d'origine sismique.....	138
1.3.	Les modèles numériques permettant la simulation de la propagation des tsunamis....	138
2.	Travaux de nos prédécesseurs et choix des scénarios sismo-tectoniques.....	139
2.1.	Quelques rares travaux d'analyse du tsunami co-sismique de 1887.....	139
2.2.	Le choix des scénarios sismo-tectoniques.....	140

3.	La modélisation numérique, <i>Funwave</i>	143
3.1.	Construction de la grille de calcul et modèle numérique utilisé - <i>Funwave</i>	144
3.2.	Les sorties de modèles	145
4.	Traitement de l'aléa pour son intégration à une étude de risque : mise en indice	147
4.1.	L'intensité, spécificités locales liées aux courants et aux hauteurs d'eaux.....	147
4.2.	Exposition directe et indirecte du territoire en fonction de l'éloignement au danger ...	149
4.3.	Obtention d'une cartographie de l'aléa grâce à la combinaison de l'intensité et de l'exposition	150
5.	Conclusion	151
Chapitre 8 : Cartographie de l'aléa tsunami en Zone Ligure – Mise en application de l'échelle d'intensité.....		
		153
1.	Analyse des données issues de la modélisation numérique	153
1.1.	Caractérisation des vagues initiales issues des simulations.....	154
1.2.	Analyse des données brutes le long du littoral azuréen	156
2.	Cartographie de l'aléa tsunami à partir des hauteurs d'eau, des courants et de l'intensité.	160
2.1.	Cartographie de l'aléa tsunami – Focalisation sur la partie ouest du littoral	160
2.2.	Cartographie de l'aléa tsunami – Focalisation sur la partie centre du littoral	166
2.3.	Cartographie de l'aléa tsunami – Focalisation sur la partie est du littoral	171
3.	Conclusion	177
Chapitre 9 : Cartographie de l'aléa tsunami le long des Alpes-Maritimes via la méthodologie semi-quantitative du risque		
		179
1.	Cartographie de la mise en indice de l'intensité de tsunami.....	179
2.	Cartographie de l'éloignement à la menace	184
3.	Cartographie globale de l'aléa tsunami dans les Alpes-Maritimes	188
4.	Conclusion	193
Conclusion et Discussion de la Partie II		
		195
1.	Précision et résolution spatiale des calculs issus des simulations numériques.....	195
2.	Comparaison entre <i>Funwave-TVD/40 m</i> et <i>Funwave-TVD/10m</i>	196
3.	Comparaison entre <i>Funwave/40 m</i> et <i>Funwave-TVD/10m</i>	198
4.	Comparaison entre <i>Funwave/40 m</i> et <i>Funwave/100 m</i>	200
5.	Limites du modèle utilisé et de la résolution	200
6.	Conclusion	202

Partie III - De l'approche théorique de la vulnérabilité et des enjeux à l'obtention d'une cartographie de la vulnérabilité territoriale du littoral azuréen.....	203
Introduction de la Partie III.....	205
Chapitre 10 : Des enjeux à la vulnérabilité territoriale	207
1. Les enjeux, éléments structurant d'un territoire	207
1.1. Des enjeux de différentes natures	208
1.2. Les enjeux majeurs, éléments clés d'une analyse de vulnérabilité territoriale	209
2. Des vulnérabilités qui influent sur la sécurité des enjeux.....	210
2.1. La vulnérabilité territoriale, l'intégration du territoire dans son ensemble grâce aux enjeux majeurs	210
2.2. La vulnérabilité biophysique, exposition directe des enjeux	212
2.3. La vulnérabilité sociale, les capacités des enjeux.....	213
3. Premier pas vers le risque – Identification des enjeux majeurs d'un territoire exposé à un aléa	215
3.1. Identification d'enjeux majeurs génériques à tous territoires et tous aléas	215
3.2. Des enjeux spécifiques à un aléa – Présentation des enjeux caractéristiques d'un tsunami	220
3.3. Organisation des enjeux majeurs	221
4. Conclusion	223
Chapitre 11 : Une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité territoriale.....	225
1. Détermination de facteurs permettant d'analyser la vulnérabilité et le niveau de risque d'un territoire exposé au tsunami.....	225
2. L'étude des enjeux majeurs grâce à la détermination de facteurs d'analyses	227
2.1. La population, enjeu « primordial » dont il faut assurer la sécurité	227
2.2. Les établissements recevant du public, sensibles à la fois par leur rôle et par le public présent	230
2.3. Les réseaux « soft », points clés de la gestion de crise	234
2.4. Les réseaux « durs » statiques, analyse des réseaux vitaux.....	239
2.5. Les réseaux « durs » dynamique, éléments structurant du territoire	243
2.6. Les attraits touristiques côtiers, fortement exposés au risque de tsunami.....	248
2.7. Réalisation d'un tableau synthétique.....	255
3. Comment obtenir une cartographie de la vulnérabilité territoriale à partir des enjeux majeurs ?	256
4. Conclusion	257

Chapitre 12 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale des communes littorales des Alpes-Maritimes exposées au risque de tsunami.....	259
1. Présentation de la cartographie de quelques enjeux	259
1.1. Enjeu E_4 : Cartographie des établissements de santé	259
1.2. Enjeu E_6 : cartographie des services départementaux d'incendie et de secours.....	261
1.3. Enjeu E_{13} : cartographie du réseau portuaire	263
1.4. Enjeu E_{15} : Cartographie des plages.....	266
2. Cartographie de la vulnérabilité territoriale globale.....	268
2.1. Obtention de la cartographie de la vulnérabilité territoriale pour l'ensemble des communes littorales des Alpes-Maritimes.....	268
2.2. La vulnérabilité territoriale des communes de l'ouest du département	270
2.3. La vulnérabilité territoriale des communes centrales du département	272
2.4. La vulnérabilité territoriale des communes de l'est du département	274
3. Conclusion	275
Conclusion de la Partie III – Limites de la méthodologie proposée et perspectives.....	277
Partie IV - L'analyse du risque : proposition de deux méthodologies d'analyse et mise en application dans le cas de la survenue d'un tsunami sur le littoral azuréen	281
Introduction Partie IV	283
Chapitre 13 : Proposition de deux méthodologies d'analyse du risque de tsunami.....	285
1. Hypothèses fixées pour la réalisation de cette étude de risque.....	286
1.1. Première hypothèse : la fonction risque est une fonction linéaire.....	286
1.2. Deuxième hypothèse : les variables de la fonction ne sont pas pondérées	287
1.3. Troisième hypothèse : la temporalité n'est pas incluse dans la fonction risque	288
2. Une approche géographique du risque de tsunami via une analyse semi-quantitative	290
3. Vers une approche normalisée du risque	291
3.1. Normalisation de l'aléa tsunami qui permet une conservation de la donnée.....	292
3.2. La normalisation de la vulnérabilité territoriale.....	295
3.3. L'analyse normalisée du risque, une combinaison entre l'aléa et la vulnérabilité territoriale	296
4. Conclusion	297
Chapitre 14 : Application des deux méthodologies d'analyse territoriale du risque de tsunami sur la côte d'azur.....	299
1. Réflexions et réalisation d'un modèle conceptuel d'analyse du risque de tsunami.....	299

2.	Cartographie de l'approche semi-quantitative du risque – La qualification du risque via des indices.....	301
2.1.	Cartographie du risque de tsunami indexé pour les communes de l'ouest du département.....	302
2.2.	Cartographie du risque de tsunami indexé pour les communes centrales du département	302
2.3.	Cartographie du risque de tsunami indexé pour les communes de l'est du département	305
2.4.	Synthèse de la cartographie du risque semi-quantitatif du risque	307
3.	Cartographie du risque de submersion marine par tsunami le long du littoral des Alpes-Maritimes par une approche normalisée.....	307
3.1.	Cartographie du risque de tsunami normalisé le long de la partie ouest du littoral des Alpes-Maritimes	308
3.2.	Cartographie du risque de tsunami normalisé le long de la partie centrale du littoral des Alpes-Maritimes	311
3.3.	Cartographie du risque de tsunami normalisé le long de la partie est du littoral des Alpes-Maritimes	313
3.4.	Synthèse de la cartographie du risque de tsunami par l'approche normalisée.....	313
4.	Conclusion	315
	Chapitre 15 : Cartographie a grande échelle du risque de tsunami sur quatre communes du littoral azuréen.....	317
1.	Une sélection de quatre villes le long du littoral azuréen.....	317
2.	Analyse du risque semi-quantitatif à l'échelle communale	319
2.1.	A l'ouest, la ville de Cannes et sa baie.....	319
2.2.	Antibes et son Cap.....	326
2.3.	Nice, préfecture située le long d'une baie ouverte.....	333
2.4.	A l'est, la cité-état de Monaco	339
3.	Le risque normalisé pour ces quatre communes	346
4.	Conclusion	347
	Conclusion de la Partie IV – Analyse comparative des deux méthodologies proposées	349
1.	Deux approches – deux résultats distincts.....	349
2.	Des résultats distincts qui font ressortir des similitudes dans les espaces à risque	350
2.1.	Similitudes des zones à risque de tsunami à l'ouest du littoral	352
2.2.	Similitudes des zones à risque de tsunami au centre du littoral départemental.....	355
2.3.	Similitudes des zones à risque de tsunami à l'est du littoral départemental	358
3.	Conclusion	360

Conclusion générale et perspectives.....	361
1. Bilan des travaux présentés	363
1.1. Le tsunami, un aléa présent le long des côtes azuréennes	363
1.2. Le littoral azuréen, un territoire vulnérable concentrant de nombreux enjeux majeurs.....	365
1.3. Les Alpes-Maritimes, un territoire exposé au risque de tsunami	366
2. L'information à la population, un point clé dans la réduction des vulnérabilités.....	367
2.1. Rappel des conduites à tenir en cas de tsunami	367
2.2. Outils d'information mis en place dans d'autres pays et qui semblent fonctionnels.....	368
3. La résilience, un concept devenu inévitable dans l'étude des risques et des catastrophes..	373
Bibliographie.....	377
Table des matières	399
Table des figures.....	409
Table des tableaux.....	415
Table des équations.....	4199
Glossaire	4233
Table des annexes	42929
Annexes	433

TABLE DES FIGURES

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Cartographie des tsunamis s'étant produit de - 1600 avant J. C. à 2017, incluant les tsunamis d'origine sismiques, gravitaires, volcaniques et autres	18
Figure 2 : Répartition des évènements tsunamigéniques de - 1 600 avant J.C. à 2017 dans les différents bassins	19
Figure 3 : Graphique représentant le type de tsunami (locaux, régionaux et télé-tsunami) pour la sélection de 50 évènements retenus comme majeurs pour la région Méditerranée	22
Figure 4 : Cartographie de la propagation du tsunami du 21 mai 2003, avec enregistrement des marégraphes et heure d'enregistrement	25
Figure 5 : Représentation graphique de la répartition géographique des tsunamis majeurs en Méditerranée	27
Figure 6 : Cartographie des zones tsunamigènes méditerranéennes sources des tsunamis majeurs	28
Figure 7 : Cartographie du relief des Alpes-Maritimes	32
Figure 8 : Carte de la sismicité en zone Ligure durant la période 1980-2010	34
Figure 9 : Carte du zonage sismique français	35
Figure 10 : Eglise de Bajardo (Italie) après le séisme de 1887 et de nos jours	37
Figure 11 : Effets du séisme de 1887 sur la ville de Menton	37
Figure 12 : Photographie des travaux d'agrandissement de l'aéroport et	40
Figure 13 : Inondation du quartier de la Garoupe et de la Salis (Antibes)	42
Figure 14 : Pays membres de la North-Eastern Atlantic and Mediterranean Tsunami Warning Center	47
Figure 15 : Localisation des différentes antennes du NEAMTWC	48
Figure 16 : Cartographie des zones tsunamigènes menaçant les côtes françaises	49
Figure 17 : Schéma explicatif de l'alerte montante. De la génération d'un tsunami à l'émission de l'alerte	53
Figure 18 : Schéma explicatif de l'alerte descendante. Du COGIC à la population	54
Figure 19 : Schéma représentant l'alerte descendante à partir du COGIC comme pensé dans le projet du Plan ORSEC des Alpes-Maritimes portant sur les séismes et les tsunamis	55
Figure 20 : Plaquette d'information à la population sur l'alerte. Quel est le signal d'alerte et quels sont les comportements à avoir pour se mettre en sécurité et obtenir de l'information	59
Figure 21 : Exemple de communication pour des systèmes d'alerte	60
Figure 22 : Copie d'écran des applications smartphone de la ville de Nice et de My predict	61
Figure 23 : Copie d'écran d'un post facebook de la Préfecture des Alpes-Maritimes en date du 24 novembre 2019, contenant l'annonce de la vigilance rouge, le billet Météo France et la plaquette des comportements à tenir en cas d'inondation	62
Figure 24 : Première de couverture du Dossier Départemental sur les Risques Majeurs (DDRM) des Alpes-Maritimes	69
Figure 25 : Document d'information communal sur les risques majeurs émis par la ville de Nice. A gauche, le dernier DICRIM de 2017 et à droite le DICRIM jeune datant de 2014	70
Figure 26 : Partie sur les tsunamis du DICRIM de Nice 2017	71
Figure 27 : Contenu du DICRIM de la ville de Cannes sur l'aléa tsunami	72
Figure 28 : Schéma explicatif du Module IMPACT	74
Figure 29 : Une du quotidien Nice Matin du vendredi 1er mars 2019	75
Figure 30 : Entête du site du gouvernement sur la section du risque de tsunami	76
Figure 31 : Photographie du Tsunami du 11 mars 2011 sur la côte japonaise	77
Figure 32 : Tableau synthétique des différents outils règlementaires et d'information existant dans les Alpes-Maritimes	78
Figure 33 : Représentation schématique de l'effet de la profondeur de la colonne d'eau (h_1 , h_2) sur les amplitudes (a_1 , a_2) et longueurs d'onde (λ_1 , λ_2) des tsunamis	89
Figure 34 : Représentation schématique du comportement des ondes courtes et longues en milieu côtier : déferlement pour les ondes courtes avec trajectoires circulaires des particules d'eau et inondation pour les ondes longues avec trajectoires elliptiques des particules d'eau	90

Figure 35 : Carte des pays impactés par le tsunami du 26 décembre 2004, ainsi que le temps de propagation le nombre de mort par pays	91
Figure 36 : Représentation schématique du phénomène de réfraction/focalisation.	93
Figure 37 : Graphique explicatif de la différence entre les hauteurs Z_{max} et H_{max}	94
Figure 38 : Caractéristiques techniques du tsunami au moment de l'inondation	94
Figure 39 : Répartition des aléas sources générateurs de tsunamis	96
Figure 40 : Représentation schématique des différents types de failles, faille inverse, faille normale et faille décrochante	97
Figure 41 : Représentation schématique des paramètres physiques permettant la caractérisation d'un séisme	98
Figure 42 : image satellite de Banda Aceh avant le tsunami du 26 décembre 2004 (image Quickbird prise le 23 juin 2004) et image satellite de Banda Aceh prise à la suite du tsunami (image Quickbird prise le 28 décembre 2004)	99
Figure 43 : Photographie de bateaux échoués sur la digue du port de la Salis suite au tsunami du 16 octobre 1979	100
Figure 44 : Photographie d'une bouée DART©	102
Figure 45 : Schéma représentant les limites de déplacement en cas d'inondation inscrit dans les Plans de Prévention au Risque d'Inondation par les autorités françaises	120
Figure 46 : Mise en relation des dégâts observés lors d'évènements historiques et des courants (en nœuds)	128
Figure 47 : Echelle d'intensité proposée en fonction de la hauteur d'eau (m) et des courants (m/s)	130
Figure 48 : Localisation du réseau de failles Ligure (en blanc) dans le bassin, la bathymétrie de la zone ainsi que le positionnement du plan de faille et des épïcêtres des différents scénarios utilisés (S1887, SHyp et Stot)	141
Figure 49 : Grille de calcul de la propagation des tsunamis et cartographies des vagues initiales, supposées équivalentes à la déformation cosismique du fond marin, en faille Ligure.	155
Figure 50 : Cartographie de la distribution spatiale des runups calculés numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot).	158
Figure 51 : Courants maximaux CUR_{max} en fonction de la profondeur de la colonne d'eau h entre la côte et 100 m de profondeur. Les zones inondées correspondent à h négatif.	159
Figure 52 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale des hauteurs maximales de vagues calculées numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) pour les communes de l'ouest du département des Alpes-Maritimes.	161
Figure 53 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale des courants maximums calculés numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) pour les communes de l'ouest du département des Alpes-Maritimes	162
Figure 54 : Route côtière entre Mandelieu-la-Napoule et Cannes délimitée par la plage au sud et la voie ferrée au nord. Vue vers l'ouest-sud-ouest	163
Figure 55 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale de l'intensité de l'aléa tsunami, telle que nous l'avons définie pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) et pour les communes de l'ouest du département des Alpes-Maritimes	164
Figure 56 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale des hauteurs maximales de vagues calculées numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) pour les communes du centre du département des Alpes-Maritimes.	167
Figure 57 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale des courants maximums calculés numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) pour les communes du centre du département des Alpes-Maritimes.	168
Figure 58 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale de l'intensité de l'aléa tsunami, telle que nous l'avons définie, pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) et pour les communes du centre du département des Alpes-Maritimes.	170
Figure 59 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale des hauteurs maximales de vagues calculées numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) pour les communes de l'est du département des Alpes-Maritimes.	172
Figure 60 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale des courants maximums calculés numériquement pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) pour les communes de l'est du département des Alpes-Maritimes.	174

Figure 61 : Cartographie détaillée de la distribution spatiale de l'intensité de l'aléa tsunami, telle que nous l'avons définie, pour les trois scénarios (S1887, SHyp et STot) et pour les communes de l'est du département des Alpes-Maritimes	176
Figure 62 : Cartographie de la mise en indice de l'intensité d'un tsunami pour les communes littorales de l'ouest des Alpes-Maritimes	181
Figure 63 : Cartographie de la mise en indice de l'intensité d'un tsunami pour les communes littorales centrales des Alpes-Maritimes	182
Figure 64 : Cartographie de la mise en indice de l'intensité d'un tsunami pour les communes littorales de l'est des Alpes-Maritimes	183
Figure 65 : Cartographie de la mise en indice de l'éloignement pour les trois scénarios dans la partie ouest du département des Alpes-Maritimes	185
Figure 66 : Cartographie de la mise en indice l'éloignement pour les trois scénarios dans la partie centre du département des Alpes-Maritimes	186
Figure 67 : Cartographie de la mise en indice l'éloignement pour les trois scénarios dans la partie est du département des Alpes-Maritimes	187
Figure 68 : Cartographie globale de l'aléa tsunami pour les communes littorales de l'ouest des Alpes-Maritimes	189
Figure 69 : Cartographie globale de l'aléa tsunami pour les communes littorales centrales des Alpes-Maritimes	191
Figure 70 : Cartographie globale de l'aléa tsunami pour les communes littorales situées à l'est des Alpes-Maritimes	192
Figure 71 : Grilles de calcul imbriquées construites et utilisées avec la version Funwave-TVD	196
Figure 72 : Runup simulé le long de la Côte d'Azur	199
Figure 73 : Représentation graphique de la vulnérabilité territoriale (VT) intégrant à la fois ses particularités et ses caractéristiques spatio-temporelles (exemple d'une étude de risque de tsunami)	211
Figure 74 : Représentation graphique de la vulnérabilité biophysique (V_{BP}) intégrant à la fois ses particularités, et ses caractéristiques spatio-temporelles	213
Figure 75 : Représentation graphique de la vulnérabilité sociale (V_s) intégrant à la fois ses particularités, et ses caractéristiques spatio-temporelles	214
Figure 76 : Modèle conceptuel des enjeux majeurs retenu pour l'analyse de la vulnérabilité territoriale	222
Figure 77 : Cartographie de la répartition des densités du département des Alpes-Maritimes en 2016	228
Figure 78 : Photographie d'un bateau d'une trentaine de mètres mobilisé par les eaux lors du tsunami du 26 décembre 2004 à Banda Aceh	246
Figure 79 : Dégâts occasionnés dans l'un des campings suite aux inondations meurtrières du 3 octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes	253
Figure 80 : Cartographie de la vulnérabilité du territoire en fonction des ERP étant des établissements de santé.	260
Figure 81 : Cartographie de la vulnérabilité des casernes de pompier en fonction de leur importance	263
Figure 82 : Cartographie de la vulnérabilité des ports des communes littorales des Alpes-Maritimes	264
Figure 83 : Photographie du port de Nice	265
Figure 84 : Principauté de Monaco Au premier plan se trouve la ville, au deuxième le port Hercule, et au troisième la vieille ville située sur le rocher	266
Figure 85 : Cartographie de la mise en indice des plages des Alpes-Maritimes	267
Figure 86 : Photographie de la Promenade des Anglais et des plages situées en contre bas	268
Figure 87 : Cartographie globale de la vulnérabilité territoriale le long des communes littorales des Alpes-Maritimes	270
Figure 88 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale des communes de l'ouest du département des Alpes-Maritimes	271
Figure 89 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale des communes centrales des Alpes-Maritimes	272
Figure 90 : Vulnérabilité territoriale totale le long des communes situées à l'est du département des Alpes-Maritimes	274
Figure 91 : Agrandissement permettant de faire ressortir les zones caractérisées par une vulnérabilité forte	278
Figure 92 : Proposition d'un modèle conceptuel d'analyse du risque d'un territoire exposé aux tsunamis	300

Figure 93 : Cartographie du risque de tsunami pour la partie ouest du littoral des Alpes-Maritimes _____	303
Figure 94 : Cartographie du risque de tsunami pour la partie centrale du littoral des Alpes-Maritimes _____	304
Figure 95 : Cartographie du risque de tsunami pour la partie est du littoral des Alpes-Maritimes _____	306
Figure 96 : Cartographie du risque en pourcentage relatif de tsunami pour la partie ouest du littoral des Alpes-Maritimes _____	309
Figure 97 : Cartographie du risque en pourcentage relatif de tsunami pour la partie centrale du littoral des Alpes-Maritimes _____	312
Figure 98 : Cartographie du risque en pourcentage relatif de tsunami pour la partie est du littoral des Alpes-Maritimes _____	314
Figure 99 : Communes sélectionnées pour une analyse communale _____	318
Figure 100 : Cartographie de l'aléa pour la ville de Cannes _____	321
Figure 101 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale de la ville de Cannes _____	322
Figure 102 : Cartographie du risque semi-quantitatif à Cannes _____	323
Figure 103 : Cartographie du risque semi-quantitatif le long de la Croisette à Cannes _____	325
Figure 104 : Cartographie de l'aléa pour la ville d'Antibes _____	327
Figure 105 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale de la ville d'Antibes _____	329
Figure 106 : Cartographie du risque semi-quantitatif à Antibes _____	330
Figure 107 : Cartographie du risque semi-quantitatif au quartier de la Salis à Antibes _____	332
Figure 108 : Cartographie de l'aléa pour la ville de Nice _____	334
Figure 109 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale de la ville de Nice _____	335
Figure 110 : Cartographie du risque semi-quantitatif à Nice _____	337
Figure 111 : Cartographie du risque semi-quantitatif dans la vieille ville et au port de Nice _____	338
Figure 112 : Cartographie de l'aléa pour Monaco _____	340
Figure 113 : Cartographie de la vulnérabilité territoriale à Monaco _____	342
Figure 114 : Cartographie du risque semi-quantitatif à Monaco _____	343
Figure 115 : Cartographie du risque semi-quantitatif au port Hercule (Monaco) _____	345
Figure 116 : Comparaison de résultats cartographiques selon les deux approches pour l'ouest du département des Alpes-Maritimes exposé au scénario extrême _____	351
Figure 117 : Cartographies du risque de tsunami dans l'ouest des Alpes-Maritimes selon deux approches (semi-quantitative et quantitative) et pour les trois scénarios d'aléa _____	353
Figure 118 : Photographie du port de la Salis _____	354
Figure 119 : Photographie d'Antibes et de ses remparts _____	354
Figure 120 : Cartographies du risque de tsunami pour les communes centrales des Alpes-Maritimes selon deux approches (semi-quantitative et quantitative) et pour les trois scénarios d'aléa _____	356
Figure 121 : Photographie de la Promenade des Anglais à Nice _____	357
Figure 122 : Photographie de la rade de Villefranche _____	358
Figure 123 : Cartographies du risque de tsunami pour les communes de l'est des Alpes-Maritimes selon deux approches (semi-quantitative et quantitative) et pour les trois scénarios d'aléa _____	359
Figure 124 : Comportements à tenir en cas de tsunami _____	369
Figure 125 : Photographie prise le long de la côte ouest américaine en 2015. Fortement sismique, cette zone est exposée au tsunami. Une signalétique particulière est mise en place afin d'indiquer qu'on entre dans une zone soumise au risque de tsunami (a), les consignes (b, c, d) et les axes à emprunter pour évacuer (e). _____	371
Figure 126 : Photographie des panneaux de signalisation faisant référence aux tsunamis en Thaïlande _____	372

TABLE DES TABLEAUX

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tableau représentant la typologie de tsunami proposé par la NOAA accompagné de schémas explicatifs	21
Tableau 2 : Niveaux de risque en fonction de l'aléa et de la vulnérabilité. (Source : Manche, 1998)	107
Tableau 3 : Niveaux d'intensité en fonction des niveaux de magnitude et de vulnérabilité	107
Tableau 4 : Tableau représentant l'échelle d'intensité de tsunami proposée par Shuto (1993)	114
Tableau 5 : Tableau représentant l'échelle de douze niveaux d'intensité proposé par Papadopoulos et Imamura (2001)	116
Tableau 6 : Tableau représentant la corrélation possible entre l'échelle d'intensité I proposée par Papadopoulos et Imamura (2001) et la hauteur maximale de vague associée Hmax, et l'intensité i	117
Tableau 7 : Tableau synthétique représentant l'échelle d'intensité de tsunami	118
Tableau 8 : Tableau représentant les différentes échelles de magnitude et d'intensité existantes (d'après Papadopoulos et Imamura 2001)	123
Tableau 9 : Mise en relation des échelles de Lynett et coll. (2014), Papadopoulos et coll. (2001), Shuto (1993) et des PPRI	129
Tableau 10 : Echelle d'intensité proposée et potentiels dégâts occasionnés sur les humains et les structures marines	133
Tableau 11 : Détails des trois scénarios et les différents paramètres physiques pris en compte	142
Tableau 12 : Mise en indice de l'aléa tsunami selon l'intensité	148
Tableau 13 : Mise en indice de l'aléa tsunami selon l'intensité	149
Tableau 14 : Niveau d'aléa obtenu par croisement entre l'éloignement de la zone inondée et l'intensité	151
Tableau 15 : Moyenne (Mean en anglais) et Ecart Types (Standard deviation en anglais, STD) des runups pour différentes grilles de calcul avec les modèles FUNWAVE-TVD ou FUNWAVE pour les scénarios S1887, SHyp et STot	197
Tableau 16 : Détail des différents enjeux et facteurs pouvant être analysés dans l'étude de vulnérabilité	226
Tableau 17 : Mise en indice de la densité de population	229
Tableau 18 : Mise en indice des zones d'habitations	230
Tableau 19 : Mise en indice des établissements recevant du publics à public sensible	231
Tableau 20 : Mise en indice de établissements recevant du public à fonction de santé	232
Tableau 21 : Mise en indice des établissements recevant du public pouvant servir de zone refuge	234
Tableau 22 : Mise en indice de l'enjeu pompier	235
Tableau 23 : Mise en indice des structures décisionnelles locales et communales	237
Tableau 24 : Mise en indice des structures décisionnelles départementales et régionales	238
Tableau 25 : Mise en indice des réseaux d'eau	241
Tableau 26 : Mise en indice des réseaux électriques	242
Tableau 27 : Mise en indice des axes de communications routiers	244
Tableau 28 : Mise en indice des réseaux ferrés	245
Tableau 29 : Mise en indice des structures portuaires	247
Tableau 30 : Mise en indice des structures aéroportuaire	248
Tableau 31 : Mise en indice des superficies de plages	250
Tableau 32 : Mise en indice des promenades et balades	252
Tableau 33 : Mise en indice des centres-villes	252
Tableau 34 : Mise en indice des campings	254
Tableau 35 : Tableau synthétique de la mise en indice des différents enjeux E _i .	256
Tableau 36 : Mise en indice de vulnérabilité totale	257
Tableau 37 : Correspondance entre les valeurs de vulnérabilité totale et le niveau de vulnérabilité	269
Tableau 38 : Exemple de tableau de croisement entre la vulnérabilité et l'aléa avec pondération pour la détermination du niveau de risque	287
Tableau 39 : Mise en indice du risque en fonction de l'aléa et de la vulnérabilité	291
Tableau 40 : Intensité de l'aléa tsunami vs. sa magnitude.	293

Table des tableaux

<i>Tableau 41 : Mise en indice de l'aléa à partir de l'éloignement de la zone d'inondation</i>	<i>294</i>
<i>Tableau 42 : Synthèse des valeurs obtenues par l'approche normalisée du risque pour les communes sélectionnées et pour chaque scénario d'aléa</i>	<i>346</i>

TABLE DES EQUATIONS

TABLE DES EQUATIONS

Équation 1 : Représentation du risque intégrant l'aléa et la vulnérabilité _____	9
Équation 2 : Représentation du risque intégrant l'aléa, la vulnérabilité et les enjeux _____	9
Équation 3 : Représentation de l'effet de pente _____	89
Équation 4 : Lien entre la longueur d'onde et l'épaisseur de la colonne d'eau _____	89
Équation 5 : Représentation de la vitesse _____	90
Équation 6 : Représentation de l'intensité _____	106
Équation 7 : Représentation de l'intensité d'après Shuto (1996) _____	114
Équation 8 : Calcul pour l'obtention du pas de temps optimal _____	144
Équation 9 : Calcul de la vulnérabilité territoriale totale _____	256
Équation 10 : Définition de l'aléa tsunami _____	286
Équation 11 : Détermination de la fonction du risque _____	286
Équation 12 : Définition du risque _____	290
Équation 13 : Représentation du risque comme un produit _____	290
Équation 14 : Normalisation de l'intensité de l'aléa (I) _____	292
Équation 15 : Normalisation de l'éloignement (EI) _____	294
Équation 16 : Normalisation de l'aléa pour obtenir un valeur totale _____	295
Équation 17 : Normalisation de la vulnérabilité territoriale totale _____	296
Équation 18 : Normalisation du risque territoriale T _____	296
Équation 19 : Risque territorial relatif _____	297
Équation 20 : Différentes représentations du risque _____	299

GLOSSAIRE

GLOSSAIRE

ANR : Agence Nationale de la Recherche

ASSEC : ASistant SECurité

ASTARTE : *Assessment STrategy And Risk for Tsunamis in Europe*

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CADAM : Centre Administratif Départemental des Alpes-Maritimes

CAT : *Centro di Allerta Tsunami*

CEA : Commissariat à l'Energie Atomique

CENALT : CENtre d'Alerte aux Tsunamis

CHR : Centre Hospitalier Régional

CHU : Centre Hospitalier Universitaire

CMVOA : Cellule Ministérielle de Veille Opérationnelle et d'Alerte

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

COD : Centre Opérationnel Départemental

COFGC : Centre Opérationnel de la Fonction de Garde-Côtes

COGIC : Centre Opérationnel de Gestion Interministérielle des Crises

COI : Commission Océanographique Intergouvernementale
Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC)

COM2SICA : COMprendre Simuler les COMportements humains sur des territoires en situation de CAstrophe

COSSIM : Centre Opérationnel des Services de Secours et d'Incendie de Marseille

CPCO : Centre de Planification et de Conduite des Opérations

CPU : *Central Processing Unit*

DART (bouées) : *Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis*

DDRM : Dossier Départemental sur les Risques Majeurs

DGPR : Direction Générale de la Prévention des Risques

DGSCGC : Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion de Crise

DICRIM : Dossier d'Information Communal sur les Risques Majeurs

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

DOS : Directeur des Opérations de Secours

EPCI : Etablissement Public de Coopération Intercommunal

ERP : Etablissement Recevant du Public

GIC : Groupes Intergouvernementaux de Coordination

GMRT : *Global Multi-Resolution Topography*

IAL : Information Acquéreurs Locataires

ICG/CARIBE-EWS : *Tsunami and Other Coastal Hazards Warning System for the Caribbean and Adjacent Regions*

IDH : Indice de Développement Humain

IFREMER : Institut Française de Recherche et d'Exploration de la Mer

IGN : Intitut Géographique National

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

IOTWC : *Indian Ocean Tsunami Warning Center*

IMPACT (module) : *Immediat Management Planification ACTION*

IOC : *Intergovernmental Oceanographic Commission* (Commission Océanographique Intergouvernementale IOC)

IOC-IBCM : *Intergovernmental Oceanographic Commission – International Bathymetric Chart of the Mediterranean*

IPCS : Informations Préventives aux Comportements qui Sauvent

IPMA : *Instituto Portugês do Mar e d'Atmosfera*

KOERI : *Kandilli Observatory and Earthquake Research Institue*

LSF : *Ligurian Fault System* (Système de faille Ligure)

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NEAMTIC : *North-Eastern Atlantic, Mediterranean and connected seas Tsunami Information Center*

NEAMTWS : *North-Eastern Atlantic, Mediterranean and connected seas Tsunami Warning Center*

NGDC/NOAA : *National Geophysical Data Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration*

NOA : *National Observatory of Athens*

NOAA : *National Oceanic and Atmospheric Administration*

NTL/ICMMG : *Novosibirsk Tsunami Laboratory of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics*

NTWC : *National Tsunami Warning Center*

OCA : *Observatoire de la Côte d'Azur*

ONU : *Organisation des Nations Unies*

OPECST : *Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques*

ORSEC : *Organisation de la Réponse de la Sécurité Civile*

PACA : *Provence-Alpes-Côte-d'Azur (Région)*

PCA : *Plan de Continuité d'Activité*

PCS : *Plan Communal de Sauvegarde*

PFMS : *Plan Familiale de Mise en Sûreté*

PLU : *Plan Local d'Urbanisme*

PPMS : *Plan Particulier de Mise en Sûreté*

PPR : *Plan de Prévention des Risques*

PPRI : *Plan de Prévention des Risques Inondations*

PPRL : *Plan de Prévention des Risques Littoraux*

PPRN : *Plan de Prévention des Risques Naturels*

PPRS : *Plan de Prévention du Risque Sismique*

PTWC : *Pacifique Tsunami Warning Center*

RETEX : Retour d'Expérience

SAIP : Système d'Alerte et d'information des populations

SAMU : Service d'Aide Médicale d'Urgence

SCOT : Schéma de Cohérence Territorial

SDACR : Schéma Départemental d'Analyse et de Couverture du Risque

SDIS : Service Départemental d'Incendie et de Secours

SHOM : *Service Hydrographique et Océanographique de la Marine*

SRTM : *Shuttle Radar Topography Mission*

SVOPN : Service de Veille Opérationnelle de la Police Nationale

UNESCO : *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*
(Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture)

UNISDR : *United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction*
(Bureau des Nations Unies pour la Réduction des Risques et des Catastrophes)

URD : Urgence – Réhabilitation - Développement

TABLE DES ANNEXES

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 :

Liste des cinquantes tsunamis majeurs s'étant produits en mer Méditerranée

Annexe 2 :

Matrices de décisions créées par le CEA permettant de déterminer le type de bulletin (information, avertissement ou alerte) émis par le CENALT à destination du COGIC en cas de séisme se produisant en mer Ligure

Annexe 3 :

Article Nematì et coll., 2018.

“High-resolution coastal hazard assessment along the French Riviera from co-seismic tsunamis generated in the Ligurian fault system”

Annexe 4 :

Article Boschetti et coll., en revision.

“Integrated tsunami intensity and magnitude scales based on maxima of tsunami amplitude and induced currents”

Annexe 5 :

Article Boschetti et coll., 2020.

“Tsunami intensity scale based on wave amplitude and current applied to the French Riviera: The case study of local seismicity”

Annexe 6 :

Détail des différents enjeux et facteurs pouvant être analysés dans l'étude de vulnérabilité

Annexe 7 :

Cartographie de la vulnérabilité de chaque enjeu

Annexe 8 :

Liste des cinquantes tsunamis majeurs s'étant produits en mer Méditerranée

Annexe 9 :

Article Provitolo et coll., 2017.

« Vers un processus de mise en action des résiliences : capacités, modèles, stratégies »

Annexe 10 :

Article Boschetti et coll., 2017.

« La modélisation conceptuelle comme aide à la construction de villes résilientes »

ANNEXES

Annexe 1 :

*Liste des cinquante tsunamis majeurs s'étant produits en mer
Méditerranée*

Dates	Lieux	Pays impactés	Origine	Type de tsunami	Distance à la source	Hauteur d'eau maximale	Profondeur d'inondation	Références
- 426	Mer Egée - Grèce	Grèce	Sismique (7.1 M_w)	Régional	Entre 10 et 140 km	/	/	Soloviev et coll. (2000), Ambraseys (2009)
- 373	Golfe de Corinthe – Grèce	Grèce	Sismique (7.3 M_w)	Local	11 km	/	/	Soloviev et coll. (2000)
142	Ile de Symi - Grèce	Grèce	Sismique (7.0 M_w)	Régional	20 à 315 km	/	/	Soloviev et coll. (2000), Ambraseys (2009)
21/07/365	Crète	Grèce, Turquie, Italie, Egypte, Croatie, Espagne, Portugal	Sismique (8.0 M_w)	Télé-tsunami	200 à 2900 km	/	/	Ambraseys (2009), Ohsumi et coll. (2019)
08/11/447	Istanbul – Turquie (Mer de Marmara)	Turquie	Sismique (7.3 M_w)	Local	40 km	/	/	Papazachos et coll. (1997), Ambraseys (2009)
543	Mer Noire	Turquie, Bulgarie, Chypre	Sismique (6.8 M_w)	Régional	100 à 750 km	/	/	Soloviev et coll. (2000), Maramai et coll. (2014)
09/07/551	Turquie	Turquie, Liban	Sismique (7.8 M_w)	?	?	/	/	Ambraseys et coll. (1994), Sintubin (2010)
554	Ile de Kos - Grèce	Grèce, Turquie	Sismique (7.0 M_w)	Local	50 km	/	/	Soloviev et coll. (2000)
18/01/746	Bassin Levantin	Egypte, Liban	Sismique (7.0 M_w)	?	?	/	/	Soloviev et coll. (2000)
04/02/1169	Messine - Sicile	Italie	Sismique (7.0 M_w)	Local	100 km	/	/	Giorgetti et Iaccarino (1971), Soloviev et coll. (2000)
20/05/1202	Chypre	Chypre, Egypte	Sismique (7.6 M_w)	Régional	300 à 650 km	/	/	Ambraseys et Melville (1988), Barberian (1994), Soloviev et coll. (2000)
08/08/1303	Crète	Grèce, Egypte, Israël, Liban, Syrie	Sismique (8.0 M_w)	Régional	150 à plus de 850 km	/	/	Soloviev et coll. (2000), Ambraseys (2009)
12/02/1344	Mer de Marmara	Turquie	Sismique (7.5 M_w)	Local	60 km	/	/	Soloviev et coll. (2000), Ambraseys (2009)
02/01/1365	Algérie	Algérie	Sismique (Magnitude inconnue)	Local	6 km	5 m	/	Soloviev et coll. (2000)
20/03/1389	Ile de Chios - Grèce	Grèce	Sismique (6.8 M_w)	Local	15 km	/	/	National Geophysical Data Center (1985)
??/06/1402	Ile de Rhodes	Grèce	Sismique (7.0 M_w)	Local	30 km	/	/	Soloviev et coll. (2000)
03/05/1481	Ile de Rhodes	Grèce	Sismique	Local	20 km	3 m	/	Soloviev et coll. (2000),

			(7.1 M_w)					Ambraseys (2009)
1564	Côte d'Azur	France	Sismique	Local	10 à 20 km	/	/	Vogt et coll. (1979)
??/04/1609	Ile de Rhodes	Grèce	Origine inconnue	?	?	/	/	Soloviev et coll. (2000)
30/07/1627	Péninsule de Gargano - Italie	Italie	Sismique (6.7 M_w)	?	?	/	/	Giorgetti et Iaccarino (1971)
29/09/1650	Kolumbo - Grèce	Grèce	Volcanique	Régional	40 à plus de 170 km	16 m à los et 30 m à Patmos (Grèce)	/	Fytikas et coll., (1990) ; Simkin et coll. (1994)
11/01/1693	Sicile	Italie, Matle	Sismique (7.4 M_w)	Régional	100 à 150 km	/	/	Argnani et coll. (2012), Soloviev et coll. (2010)
31/01/1741	Iles de Rhodes	Grèce	Origine inconnue	Local	50 km	/	/	Soloviev et coll. (2000)
14/05/1748	Golfe de Corinthe	Grèce	Sismique (6.8 M_w)	Local	5 km	/	/	Soloviev et coll. (2000)
30/10/1759	Bassin Levantin	Israël	Sismique (6.4 M_w)	Local	40 km	8 m	/	Soloviev et coll. (2000)
22/05/1766	Mer de Marmara	Turquie	Sismique (6.5 M_w)	Local	25 km	/	/	National Geophysical Data Center (1985)
06/05/1773	Tanger - Maroc	Maroc, Algérie, Côte nord africaine	Sismique	Régional	Plus de 800 km	2 m en Algérie, jusqu'à 9 m au Maroc	/	Mallet et coll. (1858)
05/02/1783 ou 06/02/1783	Calabre - Italie	Italie	Sismique (6.9 M_w)	Local	20 à 90 km	/	/	Giorgetti et Iaccarino (1971) , Graziani et coll. (2006)
23/08/1817	Golfe de Corinthe - Grèce	Grèce	Sismique (6.8 M_w)	?	?	/	/	Soloviev et coll. (2000)
05/03/1823	Sicile	Italie	Probablement volcanique	?	?	/	/	Soloviev et coll. (2000)
22/08/1856	Algérie	Algérie	Sismique	Régional	35 à 190 km	Jusqu'à 5 m	/	Soloviev (2000)
13/11/1856	Ile de Chios – Grèce	Grèce	Sismique (6.6 M_w)	Local	20 km	/	/	Galanopoulos (1960)
02/01/1866	Albanie	Albanie	Sismique (6.5 M_w)	Local	90 km	/	/	TRANSFER project (2009)
06/02/1866	Péloponnèse	Grèce	Sismique (6.0 M_w)	Local	25 km	8.60 m	/	Soloviev et coll. (2000)
02/03/1866	Albanie	Albanie	Sismique (6.3 M_w)	Local	10 km	/	/	Karnik (1971)

20/09/1867	Péloponnèse	Grèce	Sismique (7.1 M_w)	Régional	40 km à 700 km	1 m à l'île de Zakinthos, jusqu'à 6 m à Cythio	/	Soloviev et coll. (2000), Ambraseys (2009)
23/02/1887	Bassin Ligure	Italie, France	Sismique (6.7 – 6.9 M_w)	Local	???			Larroque et coll. (2010), Ioualalen et coll. (2014)
28/12/1908	Messine – Sicile	Italie, Malte, Tunisie, Libye, Egypte	Sismique (7.0 M_w)	Télétsunami	2 à 1500 km	Jusqu'à 13 m	Jusqu'à 700 m	Billi et coll. (2008), Cannelli et coll. (2013),
20/08/1944	Stromboli - Sicile	Italie	Volcanique	Local	2 km	/	300 m	TRANSFER project (2009)
02/09/1948	Crète	Grèce	Sismique (7.1 M_w)	Régional	200 km	2.5 m	/	Karnik (1969)
09/07/1956	Cyclades	Turquie, Grèce, Egypte, Israël, Croatie, Italie, France	Sismique (7.8 M_w)	Télétsunami	2 km à 1700 km	Jusqu'à 20 m	Jusqu'à 1 500 m	Soloviev et coll. (2000), TRANSFER projet (2009)
07/02/1963	Golfe de Corinthe	Grèce	Probablement gravitaire	Local	3 à 13 km	6 m	/	Soloviev et coll. (2000), TRANSFER projet (2009)
15/04/1979	Montenegro	Montenegro, Croatie	Sismique (6.9 M_w)	Régional	50 à 110 km ????	0.6 m	/	Anici et coll. (1980), Petrovic et coll. (1996)
16/10/1979	Baie des Anges	France	Gravitaire	Local	3 à 22 km	0.1 à 3 m	/	Ioualalen et coll. (2010), Sahal et coll. (2011)
10/10/1980	El Asnam – Algérie	Espagne	Sismique (7.7 M_w)	Régional	250 à 600 km	Jusqu'à 0.70 m	/	Ambraseys (1982), Soloviev et coll. (2000)
17/08/1999	Mer de Marmara	Turquie	Sismique (7.6 M_w)	Local	3 à 50 km	Jusqu'à 2.5 m	Jusqu'à 300 m	Yagi et coll. (2000), TRANSFER project (2009)
30/12/2002	Stromboli - Sicile	Italie	Volcanique	Local	3 km	10.90 m	/	Venzke et coll. (2002)
21/05/2003	Boumerdes - Algérie	Algérie, Espagne, Italie, France	Sismique (6.8 M_w)	Régional	20 à 950 km	Jusqu'à 3 m en Espagne	/	Bouhadad et coll. (2004)
20/07/2017	Ile de Kos – Grèce	Grèce, Turquie	Sismique (6.7 M_w)	Régional	2 km à 230 km	Jusqu'à 2 m	Jusqu'à 250 m	Yalciner et coll. (2017), Papathanassiou et coll. (2018)
25/10/2018	Grèce	Grèce, Italie, Malte	Sismique (6.8 M_w)	Régional	70 à 570 km	Jusqu'à 0.5 m	/	
Sans information		Tsunami local		Tsunami régional			Télé-tsunami	

Annexe 2 :

Matrices de décisions créées par le CEA permettant de déterminer le type de bulletin (information, avertissement ou alerte) émis par me CENALT à destination du COGIC en cas de séisme se produisant en mer Méditerranée

Matrice de décision en Méditerranée occidentale					
Profondeur	Localisation	Magnitude M_w	Potentiel tsunamigène		Type de bulletin
< 100 km	Au large ou proche des côtes (≤ 40 km à l'intérieur des terres)	5.5 à 6.0	Faible potentiel de tsunami local		Bulletin d'information
		6.0 à 6.5	Potentiel de tsunami destructeur local	≤ 400 km	Avertissement de Tsunami
				> 400 km	Bulletin d'information
		6.5 à 7.0	Potentiel de tsunami régional destructeur	≤ 400 km	Alerte au tsunami
	> 400 km			Avertissement de tsunami	
	≥ 7.0	Potentiel de tsunami destructeur dans l'ensemble du bassin > 400 km		Alerte au Tsunami	
	Proche des côtes (> 40 km et ≤ 100 km à l'intérieur des terres)	5.5 à 6.5	Faible potentiel de tsunami local		Bulletin d'information
		6.5 à 7.0	Potentiel de tsunami régional destructeur	≤ 400 km	Alerte au Tsunami
> 400 km				Avertissement de Tsunami	
≥ 7.0	Potentiel de tsunami destructeur dans l'ensemble du bassin > 400 km		Alerte au Tsunami		
≥ 100 km	Au large ou à l'intérieur des terres (≤ 100 km)	≥ 5.5	Potentiel nul		Bulletin d'information

Matrice de décision en Méditerranée orientale					
Profondeur	Localisation	Magnitude M_w	Potentiel tsunamigène		Type de bulletin
< 100 km	Au large ou proche des côtes (< 100 km à l'intérieur des terres)	6.5 à 7.8	Aucun potentiel de tsunami sur les côtes françaises		Information
		≥ 7.8 et < 8.3	Potentiel de tsunami impactant les plages et ports français		Avertissement de Tsunami
		≥ 8.3	Potentiel de tsunami destructeur le long des côtes françaises		Alerte au Tsunami
≥ 100 km	Au large ou à l'intérieur des terres (< 100 km)	≥ 6.5	Potentiel nul		Message d'information

Annexe 3 :

Article :

High-resolution coastal hazard assessment along the French Riviera from co-seismic tsunamis generated in the Ligurian fault system

Nemati, F., Grilli, S.T., Ioualalen, M., Boschetti, L., Larroque, L., Trevisan, J., 2019. *High-resolution coastal hazard assessment along the French Riviera from co-seismic tsunamis generated in the Ligurian fault system*. Natural Hazards, vol 96, n°2, p. 553-586.

High-resolution coastal hazard assessment along the French Riviera from co-seismic tsunamis generated in the Ligurian fault system

**Fatemeh Nemati, Stephan T. Grilli,
Mansour Ioualalen, Laurie Boschetti,
Christophe Larroque & Jenny Trevisan**

Natural Hazards

Journal of the International Society
for the Prevention and Mitigation of
Natural Hazards

ISSN 0921-030X

Nat Hazards

DOI 10.1007/s11069-018-3555-x



Your article is protected by copyright and all rights are held exclusively by Springer Nature B.V.. This e-offprint is for personal use only and shall not be self-archived in electronic repositories. If you wish to self-archive your article, please use the accepted manuscript version for posting on your own website. You may further deposit the accepted manuscript version in any repository, provided it is only made publicly available 12 months after official publication or later and provided acknowledgement is given to the original source of publication and a link is inserted to the published article on Springer's website. The link must be accompanied by the following text: "The final publication is available at link.springer.com".



High-resolution coastal hazard assessment along the French Riviera from co-seismic tsunamis generated in the Ligurian fault system

Fatemeh Nemati¹ · Stephan T. Grilli¹ · Mansour Ioualalen² · Laurie Boschetti² · Christophe Larroque² · Jenny Trevisan²

Received: 23 August 2017 / Accepted: 7 December 2018
© Springer Nature B.V. 2018

Abstract

The French Riviera is a densely populated and touristic coast. It is also one of the most seismically active areas of the Western Mediterranean. This is evidenced by the M_w 6.7–6.9, 1887 earthquake and tsunami, that was triggered nearshore, rupturing the easternmost 40 km of the 80-km-long Ligurian fault system, which runs parallel to and offshore of the Riviera. Here, coastal hazard from co-seismic tsunamis is assessed along the French and part of the Italian Riviera by simulating three Ligurian earthquake scenarios: (1) the 1887 event offshore Genoa, Italy; (2) a similar event transposed to the westernmost 40-km segment of the fault, offshore Nice, France; and (3) the rupture of the entire 80-km fault, which constitutes an extreme case scenario for the region. Simulations of tsunami propagation and coastal impact are performed by one-way coupling with the Boussinesq model FUNWAVE-TVD, in a series of nested grids, using new high-resolution bathymetric and topographic data. Results obtained in 10-m coastal grids provide the highest resolution predictions to date for this section of the French Riviera of co-seismic tsunami coastal hazard, in terms of inundation, runup, and current velocity. In general, the most impacted areas are bays (near *Cap d'Antibes* and *Cap Ferrat*), due to wave buildup and shoaling within semi-enclosed shallow areas, enhanced by possible resonances. In contrast to earlier work, which was based on coarser resolution grids, the area of Nice harbor is found to be rather well sheltered. It should be noted that uniform fault slip was used in the ruptures and runup estimates could locally be enhanced in case of more complex ruptures, such as segmented and heterogeneous ruptures.

Keywords French Riviera · 1887 earthquake · Tsunami hazard mapping · FUNWAVE-TVD

✉ Stephan T. Grilli
grilli@uri.edu

¹ Department of Ocean Engineering, Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Sheets Building 215, Narragansett, RI 02882, USA

² Université Côte d'Azur, IRD, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, Géoazur, Campus CNRS Azur, 250 rue Albert Einstein, CS 10269, 06905 Sophia Antipolis Cedex, France

Fig. 1 **a** Western Mediterranean Sea (WMS), with approximate area of **(b)** in Ligurian Sea marked by a red box (red and yellow stars mark the epicenters of the Zemmouri 2003 and Ligure 1887 events); **b** area of northern Ligurian fault system [marked by red box in **(a)**]; several faults, oblique to the margin direction, can be seen (in red) at the foot of the northern Ligurian continental margin. They are 80 km long and extend from Nice (7°15'E) to Savona (8°30'E). The rupture areas corresponding to scenarios S7, S8 and S11 (Table 4) are marked by blue rectangles, with their centroids identified by stars. The black bullet marks the epicenter of the Ligure 1887 event, and yellow bullets mark those of other dated smaller historical earthquakes

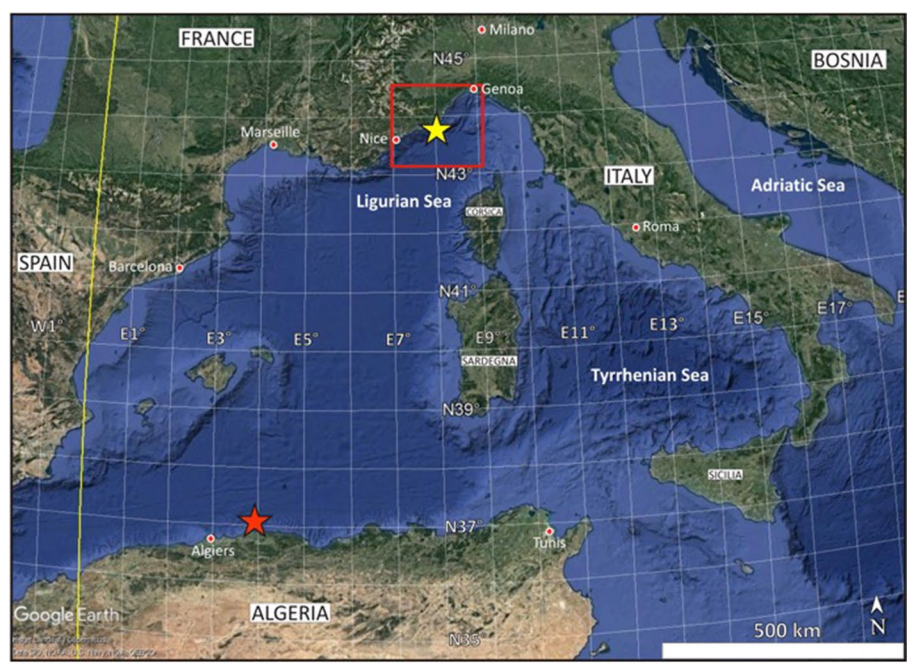
1 Introduction

Historically, the Western Mediterranean Sea (WMS; Fig. 1a) has been regularly affected by large earthquakes that have often triggered significant tsunamis (e.g., Ambraseys 1960; Tinti et al. 2004; Lambert and Terrier 2011; Papadopoulos 2015). In 2003, the $M_w=6.8$ – 6.9 Zemmouri earthquake (Alasset et al. 2006; Heidarzadeh and Satake 2013), sourced near the coast of Algeria (Fig. 1a), triggered the most significant tsunami in recent history in the region, which propagated approximately from south to north in the WMS, causing a 2-m inundation in the Balearic Islands and up to 0.4-m inundation along the French Riviera, from the Spanish to the Italian border. In July 2017, the M_w 6.6 Bodrum–Kos (Turkey–Greece) earthquake triggered the most significant tsunami since this event, causing an up to 1.9-m runup, although little damage occurred (Heidarzadeh et al. 2017).

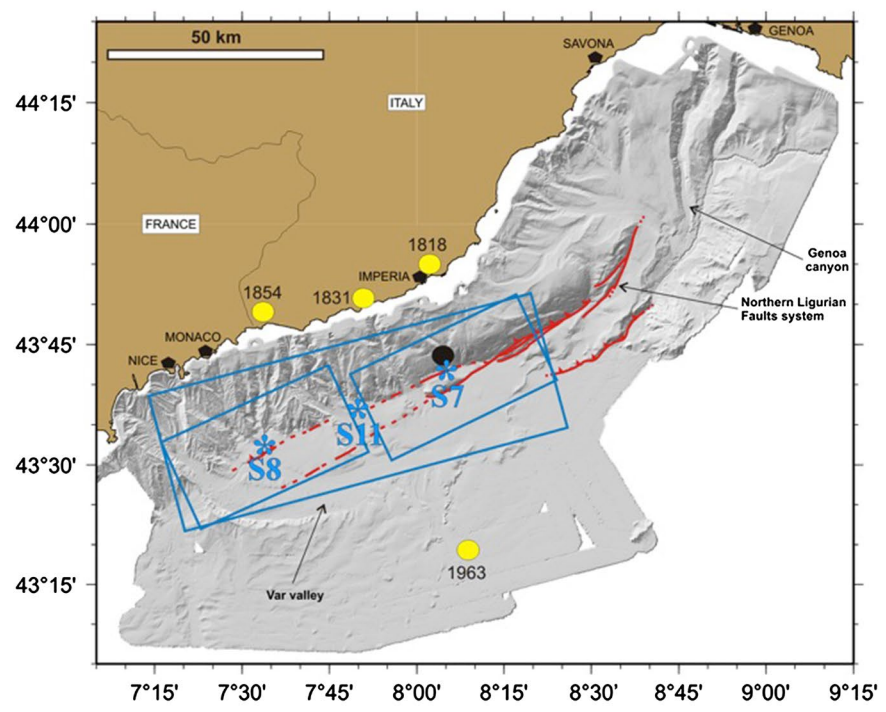
In this work, we perform numerical simulations to assess tsunami hazard along the Ligurian coast, which is located north of the WMS on either side of the French–Italian border (Fig. 1). This is a highly populated coastal area located within one of the most seismically active regions in the WMS, with recurrent earthquakes, onshore and offshore landslides, and frequent tsunamis (Béthoux et al. 1992; Eva et al. 2001; Larroque et al. 2001). During the past 500 years, a dozen tsunamis have been reported to have impacted this area (Tinti et al. 2004; Lambert and Terrier 2011), with most of these having been likely triggered by earthquakes. A notable exception is the October 16, 1979, event (Piper and Savoye 1993; Mulder et al. 1997; Assier-Rzadkiewicz et al. 2000; Ioualalen et al. 2010; Labbé et al. 2012), which was associated with a shallow submarine landslide located on the continental slope, off of Nice's international airport.

Most of the significant earthquakes that have affected this area have been of moderate magnitude (up to $M_w=5$ or so; Béthoux et al. 1992; Larroque et al. 2009). However, the large $M_w=6.7$ – 6.9 earthquake that occurred on February 23, 1887 (Ferrari 1991; Eva and Rabinovich 1997; Larroque et al. 2012), offshore of Imperia (Italian Riviera) is quite emblematic of future large events that could strike such a low deformation rate area. This earthquake caused 600 fatalities, widespread destruction (Denza 1887; Taramelli and Mercalli 1888), and triggered a tsunami that was observed along more than 200 km of the Ligurian coast; with maximum runups of up to 1–2 m measured from Antibes to Albenga (Fig. 2), this is the most severe co-seismic tsunami observed to date in the northern part of the Western Mediterranean. Simulating this historical event and others similar to it appears essential for assessing tsunami coastal hazard along the Ligurian coast.

Larroque et al. (2012) and Ioualalen et al. (2014) proposed as the likeliest source of the 1887 event (referred to as S7; Fig. 1, Table 4) a shallow rupture scenario (depth 15 km) involving a reverse faulting along a 35-km-long by 17-km-wide segment of the Ligurian faults system (dip 16°N, rake 90°, and strike 55° E). With a 1.3–1.5-m co-seismic slip, the estimated magnitude was $M_w=6.7$ – 6.9 . They performed tsunami generation and



(a)



(b)

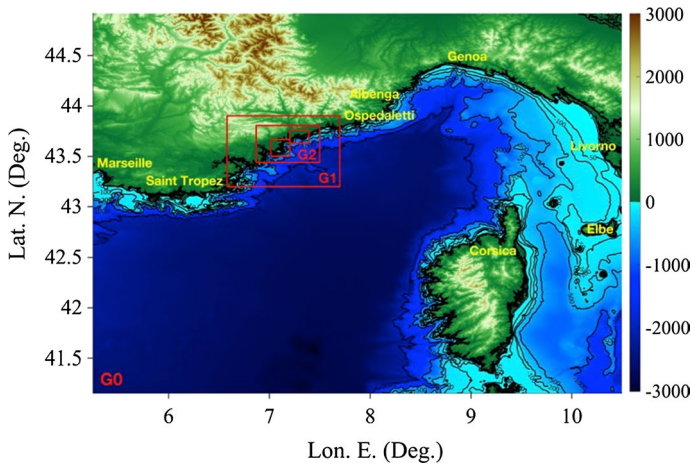


Fig. 2 Footprints of nested computational grids used in this work, referred to as G0–G3a, b (Table 1). Color scale is bathymetry (<0) and topography (>0) of grid G0 in meter. Sponge layers 30 km thick are specified along the offshore boundary of grid G0

propagation simulations on a fairly coarse 100-m resolution grid, which confirmed that for this historical event many localities along the French–Italian Riviera would have experienced significant inundation of up to 2.6 m (flow depth), particularly near Imperia (directly onshore of the co-seismic source). Using the long-wave Boussinesq model FUNWAVE, Ioualalen et al. (2014) studied and modeled other possible rupture scenarios of the Ligurian faults system, covering a wide range of parameters, and simulated the corresponding tsunami coastal impact. In particular, they considered an alternate scenario similar to S7, referred to as S8, with a centroid moved westward, that would occur along the 35-km-long westward segment of the fault. They also parameterized and modeled an extreme scenario of magnitude $M_w = 7.5$, referred to as S11, that would result in the joint activation of all the segments of the 80-km-long Ligurian faults system (with 27 km width and 3.3-m co-seismic slip; Fig. 1 and Table 4). For the latter scenario, simulations predicted a large coastal runup from Nice to Albenga, in the 2–10 m range at most locations, with a very large maximum runup (up to 28 m) within Nice’s harbor and in its immediate vicinity.

Ioualalen et al.’s (2014) results, however, should be put in perspective, first considering the coarse grid resolution (100 m) used in the simulations, which prevented many smaller scale features of the coast, harbors, and marinas from being properly discretized. (For instance, the entrance to Nice’s harbor was only modeled by two grid points.) Such an under-discretization may have caused insufficient damping of incoming tsunami waves, from bottom friction and depth-induced breaking effects, particularly in shallow water regions where depth was rapidly varying. Additionally, tsunami waves may have been trapped and abnormally amplified within harbors whose entrance was insufficiently discretized, causing non-physical enhanced flooding. Second, Ioualalen et al.’s (2014) simulations used a low-resolution shelf bathymetry (their Fig. 1) as well as a similarly rough coastal topography. Combined with the coarse model grid, these bathymetry/topography data did not allow for an adequate representation of coastal protection structures, such as seawalls and piers, that may have otherwise significantly attenuated incident tsunami waves. (This would have particularly affected results in Nice’s harbor.).

Because of the significant risk of a large future event occurring in this region, in this paper, new simulations are performed to better quantify the coastal tsunami hazard posed by the *most realistic scenarios* (S7, S8) and potential *most extreme event* (S11) studied by Ioualalen et al. (2014), using both higher-resolution coastal grids and bathymetry/topography data. Tsunami propagation and coastal impact are simulated using the most recent implementation of the fully nonlinear and dispersive Boussinesq model FUNWAVE-TVD (Shi et al. 2012; Kirby et al. 2013), by one-way coupling, in a series of nested grids of increasingly high resolution toward shore (up to 10 m or so along the coast and onshore). FUNWAVE-TVD's efficient parallel implementation (with more than a 90% scalability) makes it possible efficiently using large high-resolution grids. Besides this capability, FUNWAVE-TVD uses a more accurate moving shoreline algorithm than FUNWAVE, that better captures runup, and has both spherical and Cartesian coordinate grid implementations; the former is important for modeling tsunami propagation in large regional scale domains. Note that in its current implementation, the model's spherical coordinate version is only weakly nonlinear, whereas the Cartesian version is fully nonlinear. Hence, Cartesian grids are used nearshore, which are nested within large-scale spherical coordinate grids; this approach was successfully used in many of our similar earlier works, e.g., Grilli et al. 2013, 2015, 2016 and Tappin et al. 2014. Finally, in this work, besides computing coastal inundation and runup and comparing those to Ioualalen et al.'s (2014), more detailed analyses are performed in critical areas to assess whether resonance could occur in bays and flow velocities could cause navigation hazards.

In the following, we first detail the design of the computational grids, spherical (G0 at about 640-m resolution and G1 at about 160-m resolution) and Cartesian (G2 at 40-m and G3a, b at 10-m resolution), and the bathymetric and topographic data used in those. We then model tsunami generation, propagation, and coastal impact in each grid with FUNWAVE-TVD, for Ioualalen et al.'s (2014) scenarios S7, S8 and S11 and detail and discuss the relevant results.

2 Methodology

2.1 Numerical model

The propagation of co-seismic tsunamis and their coastal impact are modeled in a series of nested grids of increasingly fine resolution toward the coast. Simulations are performed using the fully nonlinear and dispersive Boussinesq model FUNWAVE-TVD. This model is based on the equations of Shi et al. (2012) and is a recent improvement of FUNWAVE (Wei and Kirby 1995; Wei et al. 1995), which was originally developed and used to model nearshore waves, but also applied to a variety of tsunami case studies, both landslide and co-seismic (e.g., Watts et al. 2003; Day et al. 2005; Grilli et al. 2007, 2010, 2013, 2015, 2016, 2017; Ioualalen et al. 2007, 2014; Tappin et al. 2008, 2014; Mård Karlsson et al. 2009; Tehranirad et al. 2015; Shelby et al. 2016; Schambach et al. 2018). FUNWAVE-TVD was fully validated against all of the US National Tsunami Mitigation Program (NTHMP) benchmarks (Tehranirad et al. 2011).

In the more recent of these studies, a one-way nesting methodology was used, which was shown to be sufficiently accurate to perform tsunami coastal hazard assessment case studies (e.g., Grilli et al. 2013; Tappin et al. 2014). This methodology works by running the full duration of simulations in each grid, and computing time series of free surface elevations

and currents in a coarser grid level, at a large number of numerical gages (stations) along the boundary of the next finer grid level. Computations in the finer next nested grid level are then performed using these time series as boundary conditions, re-interpolated over the smaller time step of the finer grid, based on FUNWAVE-TVD's CFL criterion [note, in finer grids, time series are truncated until the time the tsunami reaches this particular grid; see Shi et al. (2012) for detail of the time stepping in FUNWAVE-TVD]. With this approach, reflected waves propagating from inside the area covered by each finer grid are included in the time series computed in the coarser grids along the finer grid boundaries, thus satisfying an open boundary condition.

FUNWAVE-TVD has fully nonlinear Cartesian coordinate (Shi et al. 2012) and weakly nonlinear spherical coordinates (with Coriolis effects; Kirby et al. 2013) implementations. In simulations, spherical grids are typically coarser and used to model larger ocean areas in relatively deeper waters encompassing tsunami sources, whereas Cartesian grids are higher-resolution nested grids used to model tsunami coastal impact. This approach was used, for instance, to model the Tohoku 2011 tsunami, in both the near- and far-field, where the one-way nesting of a combination of spherical and Cartesian grids yielded results in good agreement with field measurements (Grilli et al. 2013; Kirby et al. 2013; Tappin et al. 2014). Both model implementations use a combined finite-volume and finite-difference MUSCL-TVD scheme. Similar to the earlier FUNWAVE version (Wei et al. 1995), improved linear dispersion properties are achieved, up to nearly the deep water limit, by expressing the model equations in terms of the horizontal velocity vector computed at 0.531 times the local depth.

While many landslide tsunamis are dispersive (e.g., Tappin et al. 2008, 2014; Grilli et al. 2015), the importance of dispersive effects in far-field tsunami propagation of co-seismic tsunamis was demonstrated by Ioualalen et al. (2007) for the 2004 Indian Ocean and Grilli et al. (2013) and Kirby et al. (2013) for the 2011 Tohoku, co-seismic tsunamis, by performing the same simulations with or without the dispersive terms in the model equations. Schambach et al. (2018) similarly studied dispersive effects for the near- and far-field propagation of landslide tsunamis. Results showed that, given high enough resolution grids (e.g., 10 m), when using a dispersive model, even long tsunamis that are not initially dispersive and are sourced nearshore, such as considered here, develop undular bores (a.k.a, dispersive shock waves) upon propagating onshore. Such bores, which appear near the crest of N-wave-shaped long waves, are made of shorter waves (hence requiring a fine enough grid to be resolved) that may change both the tsunami elevation and dynamics nearshore (see, e.g., Madsen et al. 2008), and hence tsunami coastal hazard. Without dispersion, these nearshore bores do not appear in model results. Therefore, a dispersive model is preferred in all cases, which automatically allows such phenomena to occur in simulation results when the physics of the considered problem requires it (see Glimsdal et al. 2013, for additional discussions).

Energy dissipation resulting from depth-induced wave breaking is modeled in FUNWAVE-TVD by turning off dispersive terms in the equations when the local elevation to depth ratio exceeds a specified value (typically 0.8). This leads to solving nonlinear shallow water equations (NSWE) for breaking waves, which has been shown to closely approximate their energy dissipation (Shi et al. 2012). In the present simulations, bottom friction dissipation is parameterized as a quadratic term with a friction coefficient C_d based on a Manning coefficient n ; in this case, $C_d = g n^2 / h^{1/3}$, where h denotes the local depth.

FUNWAVE-TVD has a parallel implementation using MPI, allowing to efficiently run it on small or large computer clusters. For the moderate-size grids considered in this paper (see next section; see Table 1 and Fig. 2), with less than 3 million nodes, all simulations

Table 1 Parameters of computational grids used in FUNWAVE-TVD simulations (M and N are grid sizes along XY or lon./lat. directions, respectively)

Grid name	Resolution (arc-s/m)	Geographic extent (lon. E; lat. N)	M	N	Cartesian/spherical	Bathymetry
G0	640 m (lon: 28.08"; lat: 20.88")	(5.23°, 10.5083°); (41.14°, 44.9330°)	676	660	Spherical	GMRT—57-m and 10-m nearshore data
G1	160 m (lon: 7.20"; lat: 5.04")	(6.57°, 7.7117°); (43.2°, 43.9022°)	585	488	Spherical	GMRT—57-m and 10-m nearshore data
G2	40 m	(6.87°, 7.4976°); (43.44°, 43.8065°)	1293	1008	Cartesian	10-m nearshore data
G3a	10 m	(7.015°, 7.2031°); (43.5°, 43.6682°)	1557	1856	Cartesian	10-m nearshore data
G3b	10 m	(7.2031°, 7.39°); (43.63°, 43.7619°)	1557	1456	Cartesian	10-m nearshore data

The GMRT data were obtained from <http://www.marine-geo.org/tools/GMRTMapTool>

were performed in a matter of hours for each grid, using 24 cores on a MacPro Desktop computer (with 64 Gb of RAM).

2.2 Computational grids

Simulations of co-seismic tsunamis in the Ligurian sea (Fig. 1) are performed by one-way coupling in 4 levels of overlapping nested grids: G0–G3a, b (Fig. 2; Table 1). To reduce reflection in the first, coarsest grid, level (here the 640-m Western Mediterranean basin grid G0), 30-km-thick (absorbing) layers are specified along all of the open boundaries (Shi et al. 2012).

Grid resolution is increased by a factor of 4 between each grid levels, from G0–G3a, b, which was shown in earlier work to be sufficient to ensure accurate results (e.g., Grilli et al. 2013; Kirby et al. 2013; Tappin et al. 2014). Specifically, the first two nested grid levels are spherical, with grid G0 having 0.469 by 0.345 arc-min regular meshes in the longitudinal and latitudinal directions, leading to a 640-by-640-m cell resolution, and G1 having 7.038 by 5.180 arc-s regular meshes in the longitudinal and latitudinal directions, leading to a 160-by-160-m resolution. The next two nested grid levels are Cartesian, with grid G2 having 40-by-40-m and G3a, b having 10-by-10-m regular meshes. Figure 2 shows the footprint of each nested computational grid and Table 1 gives their detailed parameters. The coarser grid G0 encompasses a long section of the French and Italian Riviera, from Marseille, France, on the west in the Gulf of Lion, to Piombino, Italy (south of Livorno), in the Gulf of Genoa, with the Corsica and Elbe Islands to the south (Figs. 1, 2). The other (nested) grids G1, G2 and G3a, b are centered on the French Riviera, although grid G1 covers part of the Italian Riviera, beyond Menton, France, where grid G2 ends, to Ospedaletti, Italy (Fig. 2). On the western side, grid G1 starts at the Bay of Saint Tropez–Sainte Maximes, while grid G2 starts at La Beaumette (Figs. 1, 2). The highest resolution grids G3a, b cover the region from Cannes to Saint-Laurent-du-Var, and from Saint-Laurent-du-Var to Cap d’Ail, respectively. Most of these locations and cities are listed in Table 3 and marked in Figs. 3 and 4, which show details of grids G2 and G3a, b.

Several sources of bathymetric–topographic data were used to develop the depth matrices of the various computational grids. When no other higher-resolution data were available, the default datasets were the 57-m resolution GMRT data from <http://www.marine-geo.org/tools/GMRTMapTool> and the nearshore bathymetric and topographic data at 10-m resolution for the French side of the Riviera. The latter dataset was built based on higher-resolution data: the 5-m DTM land topography “GO_06 juin 2009” for the district of the *Alpes Maritimes* (from Cannes to Menton), complemented by the IGN (*Institut National de l’Information Géographique et Forestière*) 50-m grid, over the district, and the 90-m SRTM dataset elsewhere in the computational domain. The nearshore bathymetry resolution was significantly improved using: (1) the Litto3D 5-m grid; and (2) a 2-m grid covering the narrow continental shelf over the *Alpes Maritimes*, obtained from CANCA (*Communauté d’Agglomération de Nice Côte d’Azur*). These data, along with the 5-m DTM land topography, allowed more accurately representing maritime structures (piers and seawalls) than in earlier work. These nearshore bathymetry data were complemented in deeper water by a 25-m grid dataset built from multi-beam surveys carried out during numerous cruises: CALMAR, DELTARHO1.LEG1, DELTARHO1.LEG2, DELTARHO2, PROFANS3, ESS300/1, MATOU1, MATOU2, MESEA I, MESIM.LEG1 (MESEA 2), MESIM.LEG2 (MESEA 2), SEADOME,

TRANSRHO, MALISAR1, GMO, MALISAR2, MALISAR3. The 20-to-200-m bathymetric contours of UNESCO IOC-IBCM (*Intergovernmental Oceanographic Commission—International Bathymetric Chart of the Mediterranean*) complemented the dataset, which is of particular interest along the Italian border, once merged with the GMRT dataset. The interpolated bathymetry/topography of grids G0, G1 and G2 are shown in Figs. 2, 3, and 4.

Bottom friction is specified in simulations through the Manning n coefficient value. Tehranirad et al. (2015) showed that, on a wide shelf (such as along the US East Coast), using even a moderate bottom friction with $n=0.025$ (the value for coarse sand) causes a significant gradual reduction in incident tsunami waves. Schambach et al. (2018) further showed that, using higher values of n in finer resolution nearshore grids (e.g., 0.0375) led to a significant reduction in maximum tsunami inundation. Hence, for tsunami hazard assessment and in the absence of more detailed information on land use, they recommended using the conservative $n=0.025$ value for coarse sand. In the present simulations, considering the French Riviera has a coastline mostly fronted by coarse sand/small pebble beaches, this value is used in each grid. Additionally, to prevent abnormally large friction coefficient values onshore, a minimum depth was specified, below which the friction coefficient was kept constant. In the coarser grids G0 and G1, this minimum depth is set to 2 m, which yields, $C_d=0.0013$ to 0.0049 when depth h varies from 100 to 2 m (note the standard value for coarse sand is $C_d=0.0025$); hence, bottom friction should only cause a moderate dissipation of incoming tsunami waves in deep water, and particularly more so considering the narrow continental shelf in this area (see Figs. 2, 3, and 4), which is conservative. In the finer resolution grids G2 and G3a, b, in which tsunami coastal impact is more accurately computed in terms of maximum inundation and runup, the minimum depth is set to 1 m and 0.5 m, respectively, which yields maximum values for the friction coefficient of $C_d=0.0061$ and 0.0077, respectively; these are still moderate friction coefficients in view of the significant development of the coastline and, hence, are also conservative values as far as predicting maximum flow depth at the coastline.

Stations/numerical gages are specified in all nested grids, to both verify that results of nested simulations are consistent with each other in the various grids and compute time series of tsunami elevation at locations of specific interest (e.g., inside harbors to assess resonance). Table 2 shows lat–lon coordinates, depth, and label of stations specified in grids G0–G3a, and Figs. 3, 4, and 5a show locations of these stations in the various grids.

Table 2 Geographic location, depth, and existence in various nested grids (0 or 1) of stations/numerical wave gages used to validate nested grid simulations

No.	Lon. (°E)	Lat. (°N)	Depth (m)	G0	G1	G2	G3a
1	7.651	43.72	725.53	1	1	0	0
2	7.537	43.70	591.18	1	1	0	0
3	7.435	43.29	2251.5	1	1	0	0
4	7.013	43.28	1398.3	1	1	0	0
5	7.474	43.55	1890.3	1	1	1	0
6	7.279	43.45	1685.3	1	1	1	0
7	7.013	43.449	965.27	1	1	1	0
8	7.129	43.5701	6.72	1	1	1	1
9	7.162	43.58	94.98	1	1	1	1

2.3 Co-seismic tsunami sources

Tsunami generation and propagation are modeled for three shallow seismic sources originating within the Ligurian fault system (Table 4; Ioualalen et al. 2014), referred to as: (1) S7, a M_w 6.9 rupture of the eastern segment of the fault, approximately corresponding to the 1887 rupture, such as estimated by Ioualalen et al. (2014); (2) S8, which has similar parameters, but with its centroid shifted westward on the fault offshore of Nice; and (3) S11, an extreme (for this area) M_w 7.5 rupture of the entire 80-km-long fault, for which some of the parameters were deduced from the seismic scaling laws proposed by Wells and Coppersmith (1994).

Ioualalen et al.'s (2014) best-fit solution for the 1887 event source (S7) was selected among an ensemble of numerical simulations as that which agreed best with the tide gauge time series recorded in Genoa harbor (Italy). This solution corresponds to a 35-km-long rupture located on the eastern side of the 80-km-long Ligurian faults system (Fig. 1). Regarding the extreme M_w 7.5 S11 source, although there is no historical record of such a magnitude event ever occurring, the geology and local faulting make it realistic considering such a scenario, which would be mobilizing the entire fault, even though its return period is unknown and could possibly be multi-centennial. In the absence of historical data on extreme seismic sources, however, it is customary in tsunami hazard assessment to assume an extreme scenario that mobilizes the full length of a fault (see, e.g., Grilli et al. 2010), using the maximum slip value that has been observed either at the same or at a nearby location or can be inferred from scaling laws (Wells and Coppersmith 1994). This is the approach pursued for tsunami hazard assessment and inundation mapping performed along the US East Coast for NTHMP.

The seafloor deformation caused by each co-seismic source is computed using the standard Okada (1985) method, based on the parameters listed in Table 4. This method assumes a dislocation of slip S within a rectangular fault area (L , W), in an homogeneous half space whose material has a Coulomb modulus μ (here selected at 3.3×10^{10} Pa); the fault plane has an azimuth θ and is dipping with angle δ ; the slip vector is in rake direction ρ . As is standard in co-seismic tsunami simulations, this deformation is specified at time $t=0$ on the free surface, as an initial condition in the propagation model (FUNWAVE-TVD), with a zero initial flow velocity.

Figure 5 shows the initial tsunami surface elevations computed for the S7, S8 and S11 ruptures, which are specified as initial condition in grid G0. Because these initial sources overlap with the nested grids, whose footprints are marked on the figure, the initial surface elevations of tsunami sources were re-interpolated onto those grids and used as initial conditions together with the time series computed in the coarser grid levels specified as boundary conditions. For sources S7 and S8, which have the same parameters and magnitude, Fig. 5a, b shows a minimum surface elevation of -0.12 m and a maximum surface elevation of 0.31 m, whereas for the larger and stronger S11 source, these are -0.41 m and 1.01 m, respectively, in Fig. 5c.

Table 3 Location of key coastal sites used in runup calculations, in nested grids simulations, belonging to G2 or G3a, b grids, with their resolution (marked in Figs. 3 and 4)

Site no.	Site name	Grid no.	Resolution (m)
1	Iles de Lérins (islands offshore Cannes)	G3a	10
2	Cape d'Antibes/plage de la Salis	G3a	10
3	Saint-Laurent-du-Var	G3a	10
4	Nice international airport	G3b	10
5	Nice Massena (Nice harbor area)	G3b	10
6	Villefranche-sur-Mer	G3b	10
7	Saint-Jean Cap Ferrat	G3b	10
8	Monaco	G2	40
9	Rocquebrune Cap Martin	G2	40
10	Menton	G2	40

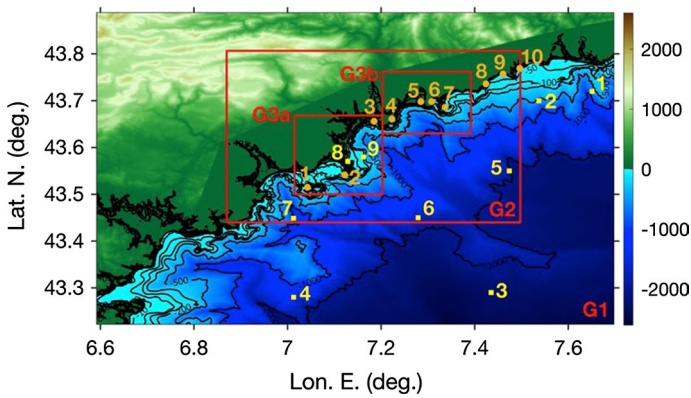


Fig. 3 Footprints of nested computational grids G1–G3a, b (Table 1). Color scale is bathymetry (<0) and topography (>0) of grid G1 in meter; black lines are bathymetric contours. Numbered symbols mark locations of wave gage stations (yellow squares; Tables 2) and key coastal sites (brown bullets; Table 3)

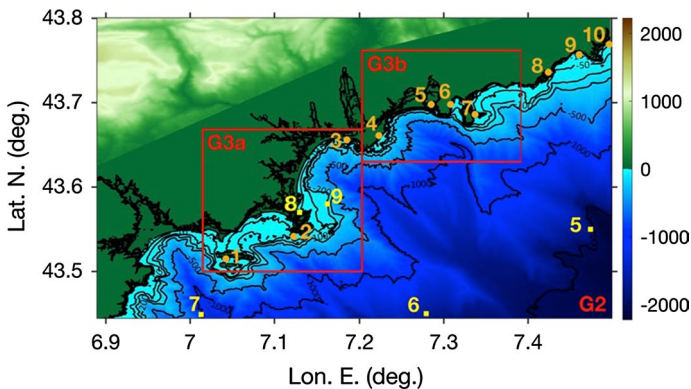


Fig. 4 Same as Fig. 3 for grids G2 and G3a, b (Table 1)

Fig. 5 Co-seismic tsunami source elevation (color scale in meter) computed using Okada's method in grid G0 for the: **a** S7, M_w 6.9; **b** S8, M_w 6.9; and **c** S11, M_w 7.5, Ligurian events (Table 4). Footprints of nested grids G1, G2, G3a, b are marked by red boxes (Figs. 3, 4). Note the different color scales used in each sub-figure

3 Simulation results

For each of the seismic sources S7, S8 and S11 (Table 4) shown in Fig. 5, simulations with FUNWAVE-TVD are performed by one-way coupling in the series of nested grids G0–G3a, b (Table 1; Figs. 2 and 3). Among many model results, the time series computed at stations specified in each grid (Tables 2; Figs. 2, 3, and 4) and the envelope of maximum surface elevations during computations are detailed in the following; additionally, some envelopes of maximum flow velocity are discussed. Simulations are performed for 1.5-h (5400-s) duration, to ensure that all waves resulting from multiple reflections in the Mediterranean basin have arrived.

3.1 Tsunami surface elevations and inundation

Figure 6 shows envelopes of maximum surface elevations computed in grids G1 and G2 for each source. Consistent with each source location and magnitude, the tsunami surface elevations simulated at the coast are larger for source S11 than for sources (S7, S8) and also larger for the source closest to the coast. These results also show, as could be expected, that coastal surface elevations are larger within small bays/enclosures and harbors/marinas due to the buildup and possible resonances of trapped waves. This is better seen in results of simulations in the finer grids G3a, b detailed later.

To both visualize the incident tsunami wave train and verify that the one-way coupling method has been properly applied to grids G0–G3, Fig. 7 shows time series of surface elevations computed for source S7 at control stations 1–9 (Figs. 3, 4; Table 4). For stations 1 to 4, time series of surface elevations obtained at the same location in nested grids G0 and G1 are compared with each other, and for stations 5 to 9, time series of surface elevations obtained at the same location in nested grids G0, G1 and G2 are compared. At stations 8 and 9, which are located near Antibes, times series of surface elevations obtained in nested grids G0, G1, G2 and G3a are compared.

Overall, these figures show a good agreement of time series computed in various grids, particularly for the incident part of each wave train (i.e., for $t < 0.25$ h or 15 min or so), except at the nearshore station 8. As waves are partially reflected from the shore and travel back to the stations, discrepancies become larger later in time between results obtained in grids of different resolution, and this is particularly so at station 8; this should be expected since grid resolution affects tsunami–shore interactions.

These results confirm the accuracy of the nested simulations in grids G0–G2 (G3a). Also note that, as should also be expected, the amplitude of the incident tsunami at stations 1, 2, 8 and 9 nearer the coast is larger than at the offshore stations. Similarly consistent results were obtained at stations belonging to different nested grids for sources S8 and S11; details are not shown here for the sake of brevity.

Figure 8 shows envelopes of maximum surface elevations computed in grids G3a, b for each source S7, S8, and S11, and Figs. 9, 10, 11, 12, 13, 14, and 15 show zoom-ins of these results around seven regions of particular impact or importance, located in grids G3a,

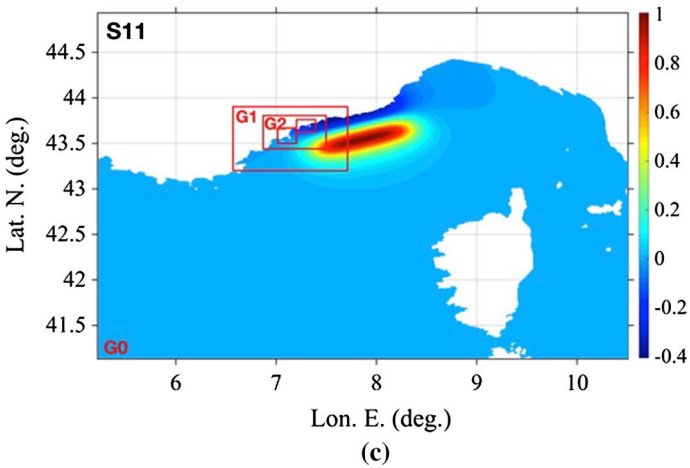
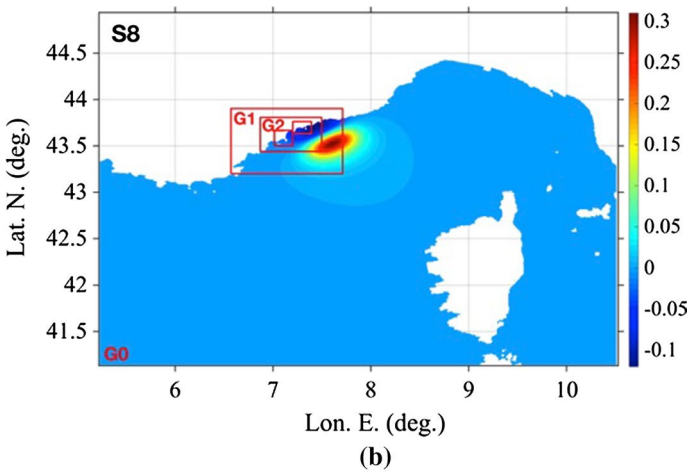
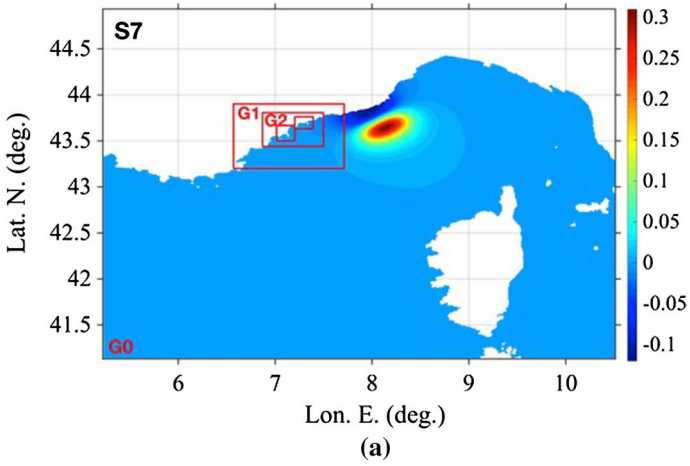


Table 4 Parameters of Okada's (1985) method for computing the three Ligurian fault co-seismic tsunami sources used in FUNWAVE-TVD simulations (Fig. 5): (i) centroid geographic coordinates (ϕ_0 , λ_0); (ii) rupture depth d ; (iii) azimuth θ (CW from N); (iv) dip δ ; (v) rake ρ ; (vi) length and width (L , W); (vii) slip S ; (viii) magnitude $M_w = (\log M_0 - 9.1)/1.5$ ($M_0 = \mu LWS$; $\mu = 3.3 \times 10^{10}$ Pa)

Source	ϕ_0 (°N)	λ_0 (°E)	d (km)	θ	δ	ρ	L (km)	W (km)	S (m)	M_w
S7	43.7	8.08	15	235	16	90	35	17	1.5	6.91
S8	43.58	7.55	15	235	16	90	35	17	1.5	6.91
S11	43.64	7.815	15	250	16	90	80	27	3.3	7.51

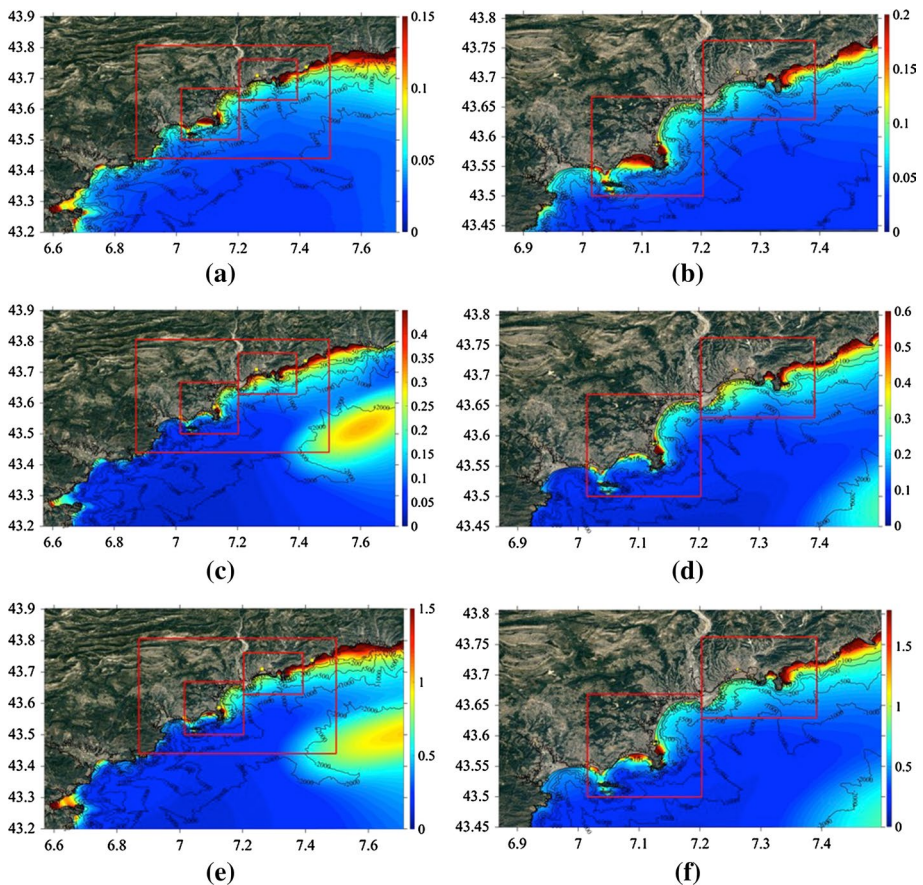


Fig. 6 Envelope of maximum surface elevation (color scale in meter) computed in grids: (left) G1, and (right) G2, during tsunami simulations of sources S7 (a, b), S8 (c, d), and S11 (e, f). Red lines mark footprints of finer nested grids defined before (Fig. 5). Yellow squares mark the sites of Cannes, Antibes, Nice, Monaco-Ville, and San Remo cities, sequentially from left to right (also see Fig. 3 and Table 3). Note the different color scales used in each subfigure

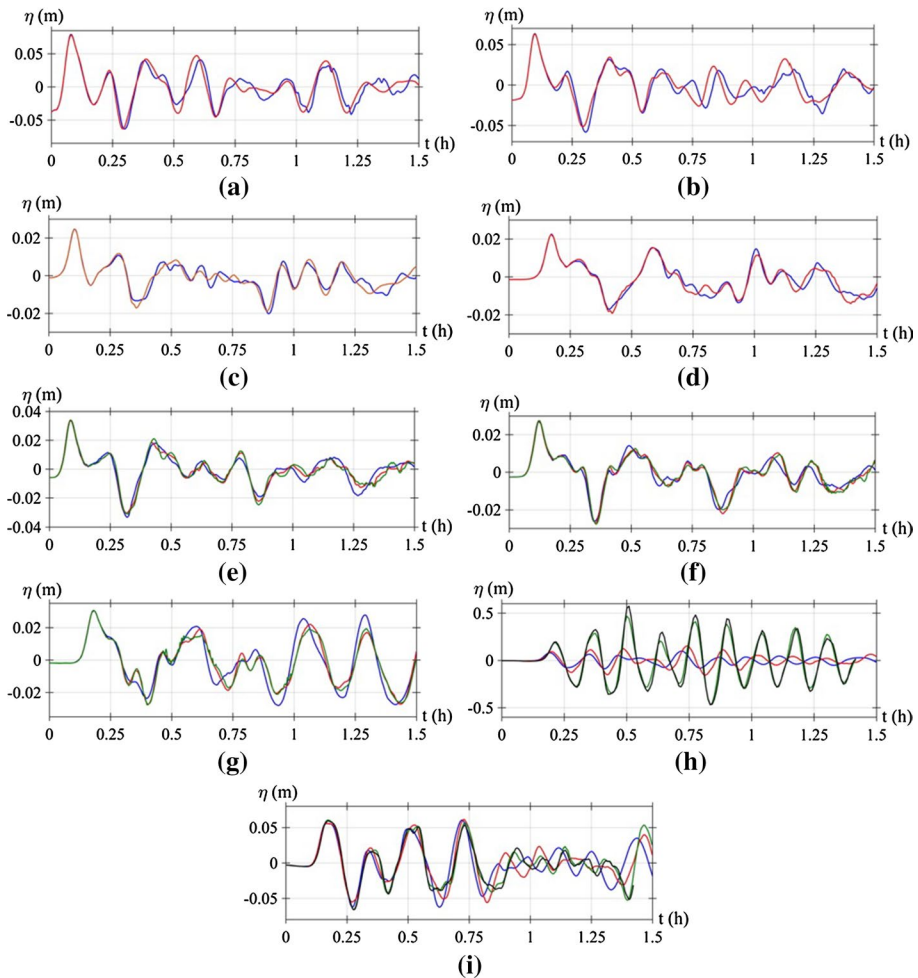


Fig. 7 Comparison of time series of surface elevations computed for source S7 in grids G0 (red), G1 (blue), G2 (green), and G3a (black) at stations No.: **a** 1; **b** 2, **c** 3; **d** 4; **e** 5; **f** 6; **g** 7; **h** 8; **i** 9 (Figs. 3, 4, Table 4). Note, surface elevations at station No. 8, which is nearshore, are ten times larger than at other stations

b, namely from west to east (see Fig. 4 and Table 3): (1) Ile Sainte-Marguerite; (2) Port Palm Beach; (3) Cap d'Antibes; (4) Port of Nice; (5) Rade de Villefranche-Sur-Mer; (6) St Jean Cap Ferrat; (7) Port of Beaulieu-sur-Mer. Overall, as would be expected, we find that the tsunami coastal inundation caused by source S11 is larger at every location than that caused by the two other smaller-size sources S7 and S8 and by more than a factor of 2 at most locations, with maximum runup reaching over 2.0, 2.0, 3.5, 1.5, 2.0, 3.0, and 5.0 m in each of the seven zoomed-in areas, respectively. It should be noted that many of these locations of maximum inundation are within small bays or marinas, where amplification and possibly resonance may have occurred. In such locations, it is expected that large current velocities would be associated with even moderate surface elevations, due to funneling effects, which could end up being more damaging for moored boats and harbor facilities

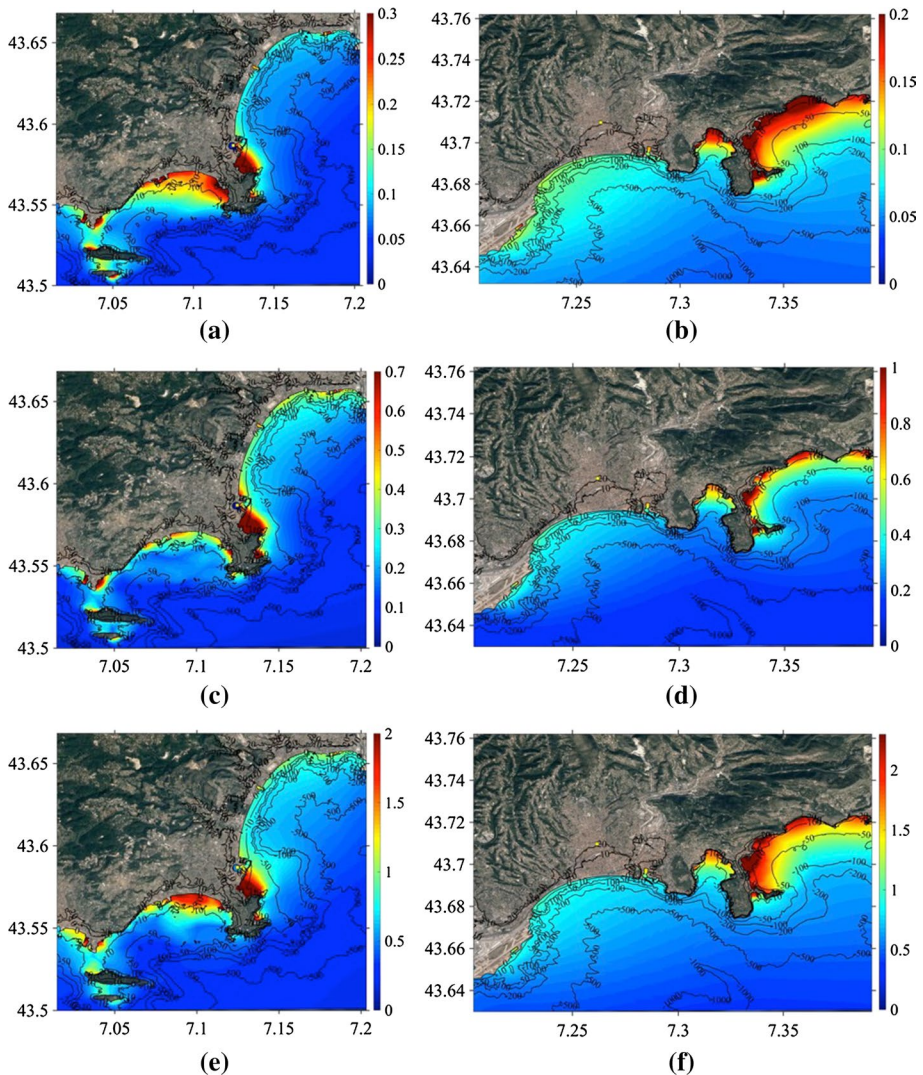


Fig. 8 Envelope of maximum surface elevation (color scale in meter) computed in grids: (left) G3a and (right) G3b during tsunami simulations of sources S7 (a, b), S8 (c, d), and S11 (e, f). Note the different color scales used in each subfigure

than the inundation itself. Both of these aspects are detailed later in the text (Sects. 3.3 and 3.4).

Other sites where the largest tsunami inundation occurs for all sources are capes, such as *Cap d'Antibes* (Fig. 11) and *Saint-Jean Cap Ferrat* (Fig. 14). Here, typically the isobaths are concave shaped (referred to land) causing tsunami wave and energy focusing due to refraction. *Cap de Nice* (known as *Baie des Anges*) is an exception with the isobaths being convexly oriented (see, for instance, the 500-m isobaths in Fig. 8b, d, f), allowing for a slight wave damping due to wave divergence.

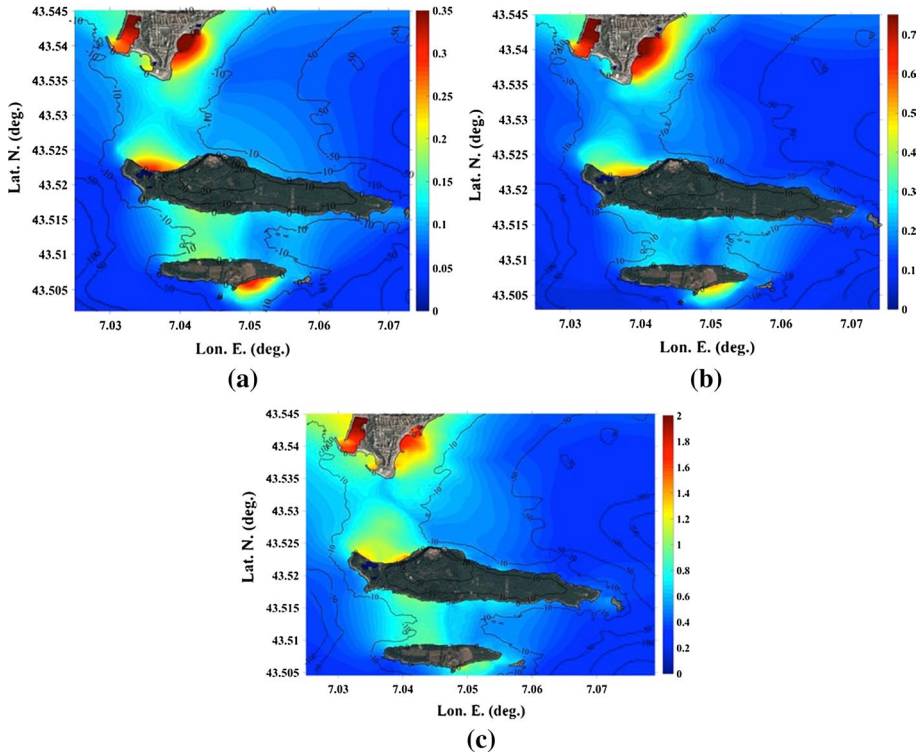


Fig. 9 Zoom-ins of Fig. 8a, c, e around Ile Sainte-Marguerite (Fig. 4 and Table 3) for sources: **a** S7, **b** S8, **c** S11. Note the different color scales used in each subfigure

Similarly, the two large open bays located between Antibes and Nice Airport and eastward of *Cap de Nice* also feature convex-type isobaths, which generate some wave damping that compensates for some of the wave amplification due to shoaling (Fig. 8). These two large bays are thus rather sheltered with respect to tsunami threat. These are densely populated areas during the summer season (including on beaches). Note that Ioualalen et al. (2010) found the same trends of wave focusing–defocusing for cases of landslides-generated tsunamis off of the Ligurian coast. This illustrates and confirms the strong bathymetric control on tsunami coastal impact.

Although the higher-resolution grids G3a, b do not reach that far, the maximum tsunami inundation caused by the extreme source S11 can be quantified east of grid G3b’s area based on simulation results in grids G1 and G2. This is detailed in Fig. 16, which zooms-in on results of Fig. 6e in grid G1 and Fig. 6f in grid G2. This yields the following maximum inundations at various sites of interest: (1) Cap d’Ail, 1.8 m; (2) Monaco, 2.3–2.5 m; (3) Roquebrune-Cap-Martin, 3.5 m; (4) Menton, 3 m; (5) Ponte San Ludovico, 2.5 m; (6) Latte, 3 m; (7) Ventimiglia, 2.5 m; (8) Vallecrosia, 1.8 m; and (9) Ospedaletti, 2 m.

Similarly, west of grid G2, Fig. 17 shows a zoom-in on the area of increased tsunami inundation, up to 2 m, in the bay of Saint Tropez and Sainte Maxime.

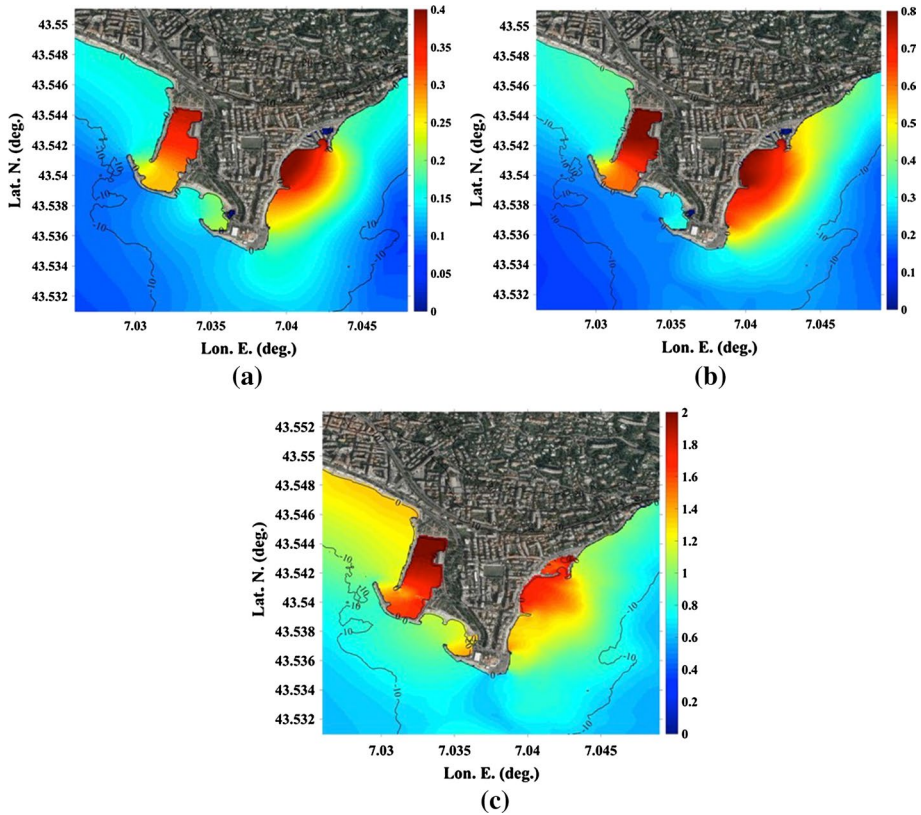


Fig. 10 Zoom-ins of Fig. 8a, c, e around Port Palm Beach and Pointe Croisette (Fig. 4 and Table 3) for sources: **a** S7, **b** S8, **c** S11. Note Cannes' beach is directly to the west of the figure area. Note the different color scales used in each subfigure

3.2 Runup

Figure 18 shows the maximum runup computed for each source along the French Riviera, from Lerin's Island to Saint-Jean Cap Ferrat (sites numbered 1–7; Table 3, Figs. 3, 4), in the 10-m grids G3a, b. Earlier tsunami hazard assessment work performed with FUNWAVE-TVD along the US East Coast (e.g., Grilli et al. 2015; Schambach et al. 2018) indicated that at least 30-m resolution coastal grids, or preferably 10 m, should be used for tsunami inundation/runup results to converge; this is also the recommendation of the US NTHMP. Accordingly, for the purpose of coastal tsunami hazard assessment, in the present study, recommendations should be drawn based on runups computed in the 10-m grids. However, for comparison, results obtained with FUNWAVE-TVD in the 40-m grid G2 are also shown in Fig. 18. Results obtained with FUNWAVE-TVD are also compared in the figure to those of Ioualalen et al. (2014) (hereafter referred to as ILSD14), obtained with FUNWAVE in a coarse 100-m resolution grid, using the coarser and less accurate bathymetry/topography data available at the time. Since the main motivation for the present work was to redo ILSD14's study using higher-resolution grids and bathymetry/topography data, it is important to perform this comparison. Finally, to assess convergence and

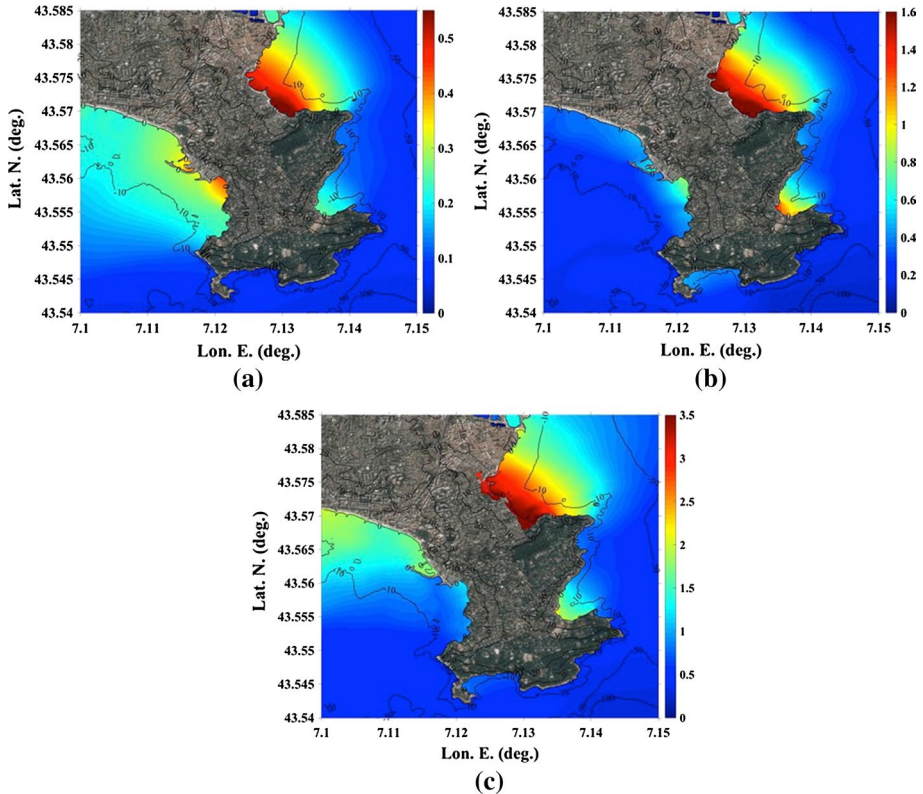


Fig. 11 Zoom-ins of Fig. 8a, c, e around Cap d'Antibes for sources: **a** S7, **b** S8, **c** S11. Note Juan les Pins is to the west and Antibes and its port to the east of the figure area (Fig. 4 and Table 3). Note the different color scales used in each subfigure

better compare model results with each other, a newer set of simulations was performed with FUNWAVE, in a single large 40-m resolution grid encompassing the three sources, using the same new bathymetric/topographic data as used in the FUNWAVE-TVD simulations; runups computed in the latter results are also marked in Fig. 18. Note that although runups were available eastward of Saint-Jean Cap Ferrat and along the Italian coast in the present simulations with FUNWAVE-TVD, this was only in grids G0–G2, which based on our experience and the NTHMP guidelines may have insufficient resolution to accurately capture the runup; hence, these results are not shown in Fig. 18, although overall inundations computed in grids G1 and G2 are shown in Fig. 6.

In summary, based on results displayed in Fig. 18, the following comparisons can be made, which are discussed in the following, for results of: (1) FUNWAVE-TVD 10 m versus 40 m (same model and bathymetry/topography data, but different resolutions); (2) FUNWAVE 100 m versus 40 m (same model but different resolution and bathymetry/topography data), in light of the 10 m FUNWAVE-TVD results; and, (3) FUNWAVE 40 m versus FUNWAVE-TVD 40 m (different models with same resolution and same bathymetry/topography data).

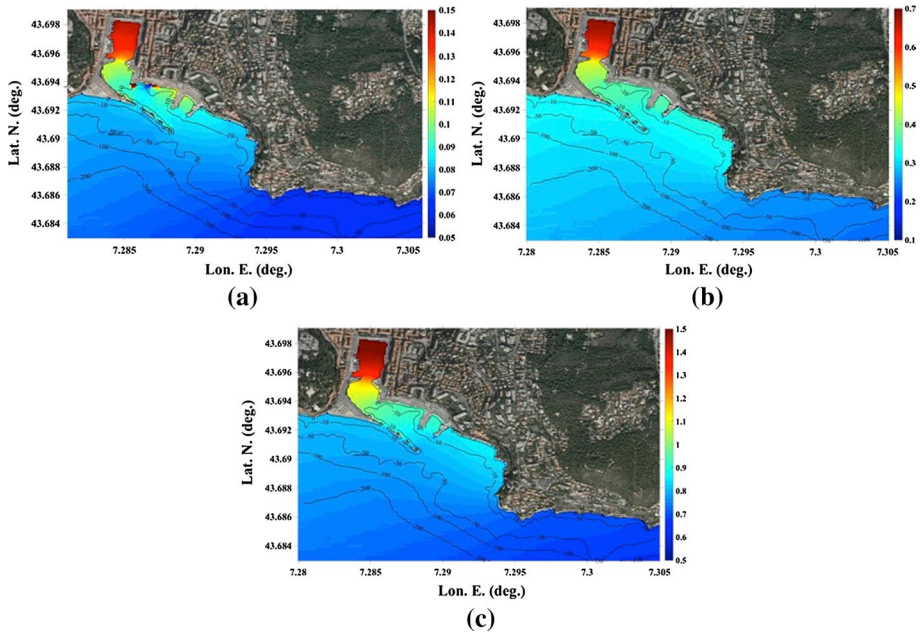


Fig. 12 Zoom-ins of Fig. 8b, d, f around Nice's harbor (Fig. 4 and Table 3) for sources: **a** S7, **b** S8, **c** S11. Note the different color scales used in each subfigure

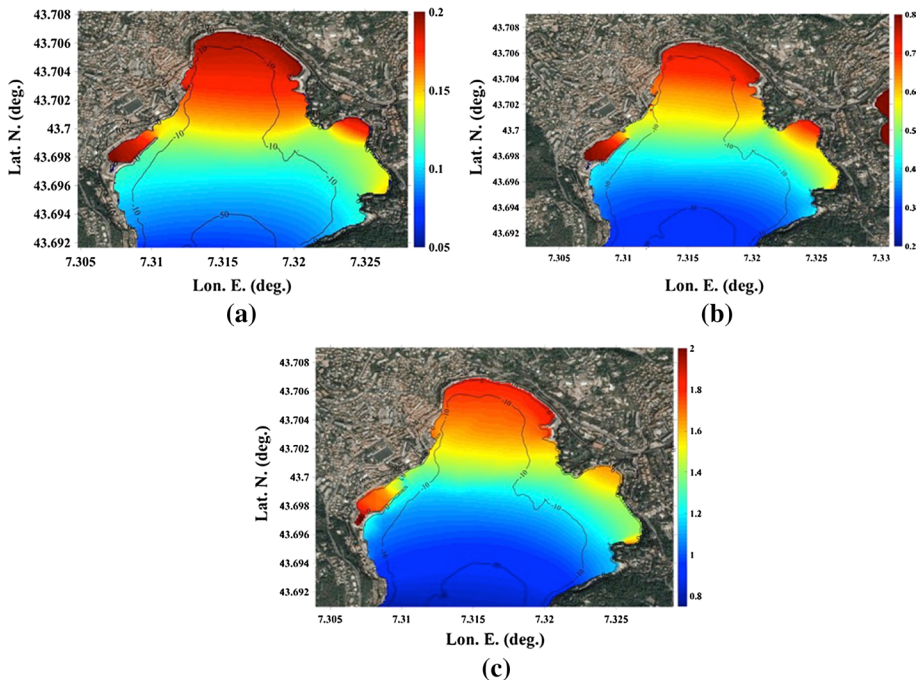


Fig. 13 Zoom-ins of Fig. 8b, d, f around Rade de Villefranche-Sur-Mer (Fig. 4 and Table 3) for sources: **a** S7, **b** S8, **c** S11. Note the different color scales used in each subfigure

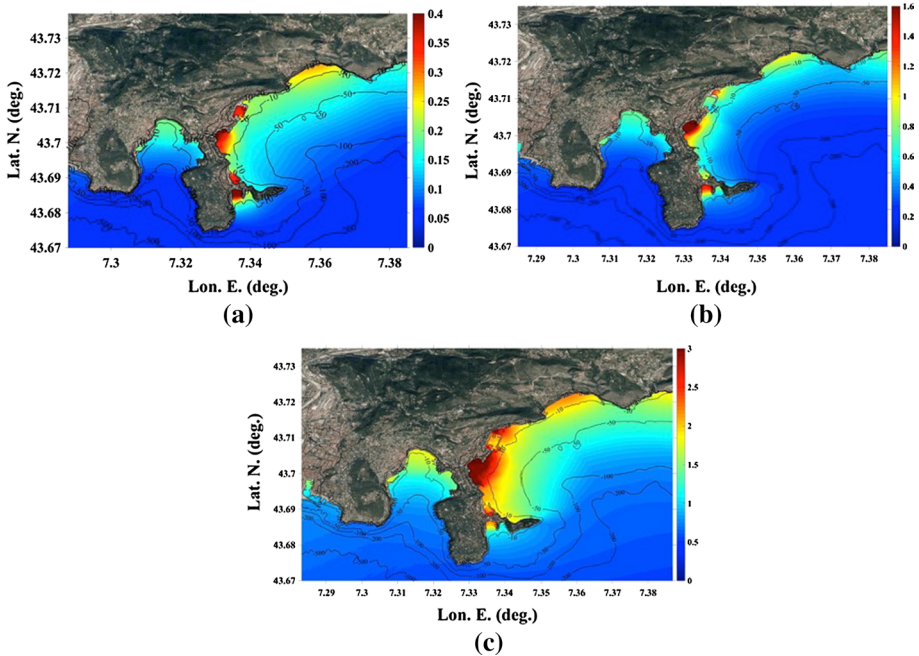


Fig. 14 Zoom-ins of Fig. 8b, d, f around St Jean Cap Ferrat and its harbor for sources: **a** S7, **b** S8, **c** S11. Note the harbor of Beaulieu-sur-Mer (detailed in the next figure) is north of the cape (Fig. 4 and Table 3). Note the different color scales used in each subfigure

1. Overall, for all sources, runups in Fig. 18 computed with FUNWAVE-TVD in the 40-m and 10-m resolution grids appear consistent with each other, indicating that convergence of these simulations may have been achieved. This is further supported by the mean and standard deviation of computed runups listed in Tables 5, 6, and 7, which for all sources are very similar in these two grids. The root-mean-square-difference (RMSD) of the 40-m simulation results with respect to the 10-m results is satisfactory, ranging from 4 to 25% for all sources. Likewise, the determination coefficient is relatively close to unity (0.81, 0.68 and 0.88 for S7, S8 and S11, respectively), and the L^2 norm is also satisfactory as it is relatively small (0.23, 0.33 and 0.18 for S7, S8 and S11, respectively). The cross-correlation coefficient between results in both grids is very good, always larger than 0.8. Therefore, in either grid, runups computed with FUNWAVE-TVD appear to be adequate although based on standard recommendations (e.g., NTHMP) 10-m results should be preferred to draw conclusions.
2. Comparing the present simulations to those of ILSD14 with FUNWAVE in a coarse 100-m grid, Fig. 18 shows significant differences, with the latter often significantly over-predicting or slightly under-predicting runups. This confirms that both the grid and likely also the bathymetry/topography data used in the earlier work were insufficiently discretized; nearshore and along the entire coast, bathymetric and topographic data used by ILSD14 were sparse. As discussed before, the under-resolving of coastal features likely led in some cases to insufficient nearshore dissipation or wave trapping that artificially increased runup; this explains the very large 28-m runup predicted by ILSD14 for source S11 in Nice's harbor (site 5 in Fig. 18c; this single large value was

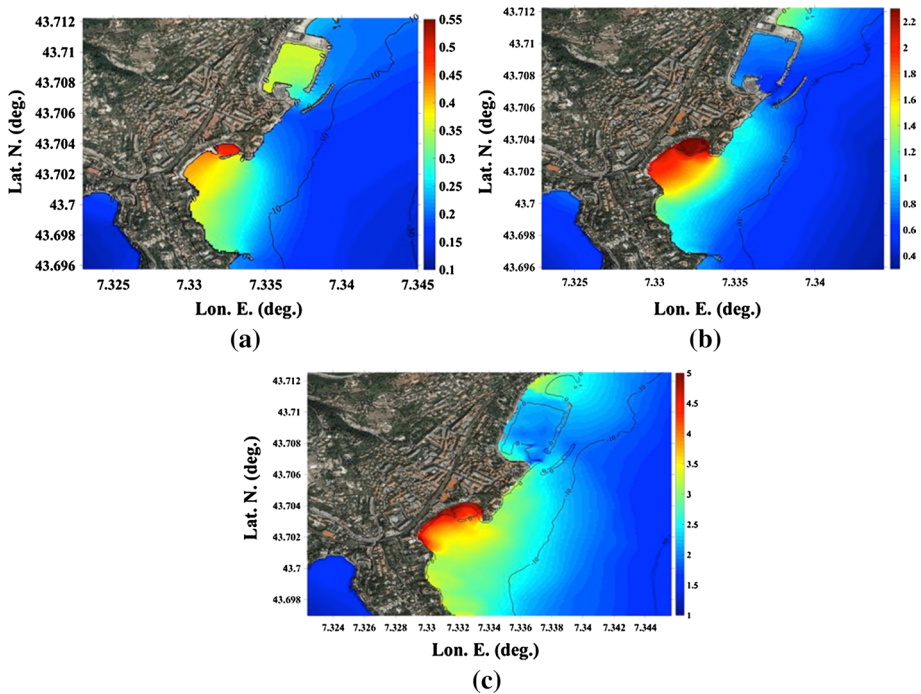


Fig. 15 Zoom-ins of Fig. 7b, d, f around Beaulieu-sur-Mer's harbor (Fig. 4 and Table 3) for sources: **a** S7, **b** S8, **c** S11. Note the different color scales used in each subfigure

omitted from the figure for clarity), which should be deemed spurious. The poor values of the detailed metrics in Tables 5, 6, and 7 (R^2 , L^2 , Corr) support this conclusion.

By contrast, the new 40-m resolution simulations with FUNWAVE, using the new more accurate bathymetry/topography data, provide significantly different runup values in Fig. 18, as compared to the 100-m results, that are in much better agreement with the present higher-resolution simulations with FUNWAVE-TVD; these also no longer predict the spurious large runup in Nice's harbor. This is also confirmed by the good values of the metrics in Tables 5, 6, and 7. The convergence of FUNWAVE's results with increasing resolution is reassuring.

3. The comparison of runups simulated with FUNWAVE-TVD and FUNWAVE in the 40-m resolution grid, based on the same bathymetry/topography data, shows a good overall agreement in Fig. 18. Larger differences occur mostly where runups are the largest, with FUNWAVE's results being slightly above those of FUNWAVE-TVD. This is consistent with the new moving shoreline algorithm that was implemented in FUNWAVE-TVD, to replace the simple slot method used in FUNWAVE, following a careful validation based on laboratory experiments (Shi et al. 2012).

3.3 Local bay resonance

Two sites are of particular interest in Fig. 18 results: Cap d'Antibes—Plage de la Salis (site 2) and Saint-Jean Cap Ferrat (site 7). Both of these are semi-enclosed bays where, for

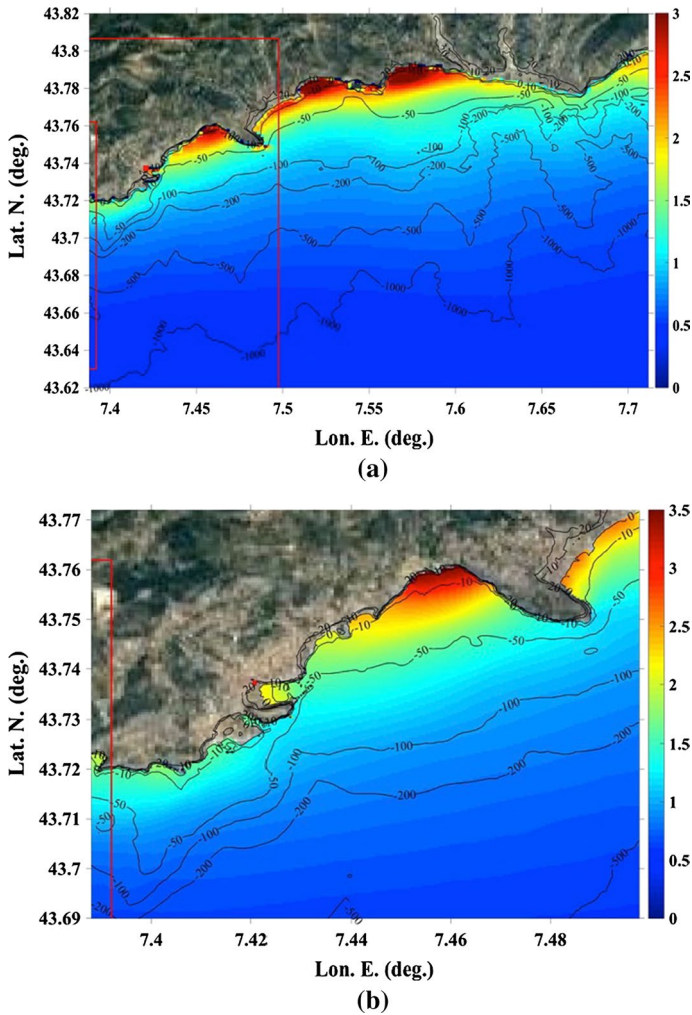


Fig. 16 Zoom-ins of maximum surface elevations (color scales in meter) computed for source S11 in grids: **a** G1 (Fig. 6c), and **b** G2 (Fig. 6f). For reference, the longitude of important areas is (maximum elevation is in parenthesis): (i) Cap d'Ail, 7.41 (1.8 m); (ii) Monaco, 7.425 (2.3–2.5 m); (iii) Roquebrune-Cap-Martin, 7.475 (3.5 m); (iv) Menton, 7.498 (3 m); (v) Ponte San Ludovico, 7.537 (2.5 m); (vi) Latte, 7.570 (3 m); (vii) Ventimiglia, 7.608 (2.5 m); (viii) Vallecrosia, 7.645 (1.8 m); and (ix) Ospedaletti, 7.712 (2 m) [locations (i–iv) are in France and the others in Italy]. Red lines mark the boundaries of nested grids. Also see Figs. 3, 4 and Table 3 for site locations. Note the different color scales used in each subfigure

the three sources, tsunami runup is enhanced as compared to neighboring sites. A more detailed analysis of this phenomenon was performed for site 2, where some of the largest runup values are predicted for all sources in the 10-m grids. Figure 19 shows time series of surface elevations computed at site 2, at two wave gage/stations, one located just within the bay (station 8, Fig. 4) and one outside of it (station 9, Fig. 4; see also results in Fig. 11).

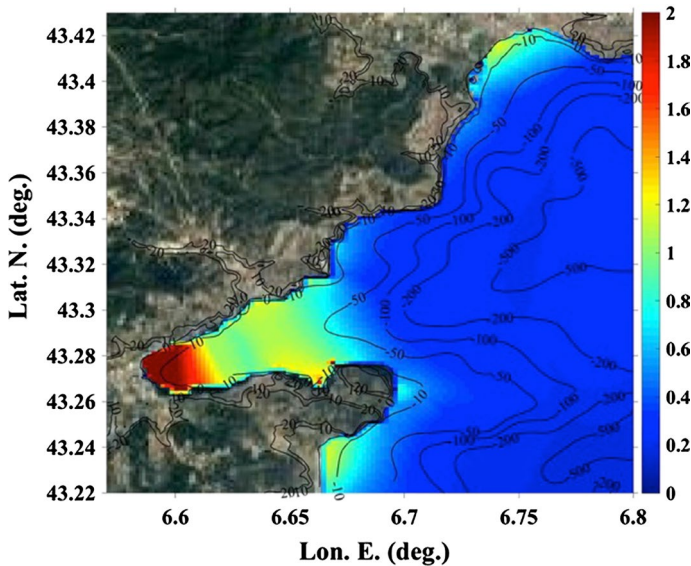


Fig. 17 Zoom-in of maximum surface elevations (color scales in meter) computed for source S11 in grid G1 (Fig. 6e), in the area of Saint Tropez and Sainte Maxime (enclosed bay to the SW; Fig. 4 and Table 3)

The figure shows that, for all sources, the incoming wave time series are amplified within the bay, by a factor larger than 2.5.

The depth amplification factor based on linear long-wave shoaling (Green's law) is only 1.6 for this site (for a water depth decreasing from 39 m just outside to 20 m just inside the bay); hence, resonance must be occurring within the bay, causing the additional amplification of incoming tsunami waves. In general, a marked resonance can only occur in a semi-enclosed bay when both the wave signal is long-lasting (i.e., persistent; Ioualalen et al. 2017) and the length of the bay from its mouth to its back is an integer multiple of the quarter wavelength of dominant waves. [Persistence is required to allow for the resonance mechanism to overcome damping due to bottom friction.] Looking at Fig. 19, it appears that the dominant tsunami period is about 500 s (or 8 min) at this site; using the linear long-wave celerity for a 20-m depth, this yields a quarter wavelength of 1750 m, which is about the cross-shore length of the shallow part of the Bay (see Fig. 12); this indicates that resonance is a likely mechanism.

Wave energy spectra are shown in Fig. 20 for the time series of Fig. 19, which confirm the dominant 8-min period for each source, with a secondary dominant period around 11 min (particularly for source S11). In addition to a strong amplification of tsunami wave energy from outside to inside the bay at the 8-min period, the energy spectra show that waves are also amplified at shorter periods of 4 and 5.5 min. Hence, some resonance (albeit smaller) also occurs in the bay at these periods, which is likely in the alongshore direction, in between the two sides of the bay. In this case, resonance occurs when the bay width is a multiple of the half wavelength which, for a 240-s (4-min) period, is 1680 m, i.e., almost exactly the width of the bay at its mouth.

The occurrence of such resonances implies that should more complex fault failure scenarios occur, e.g., involving several segments rupturing over a significant time,

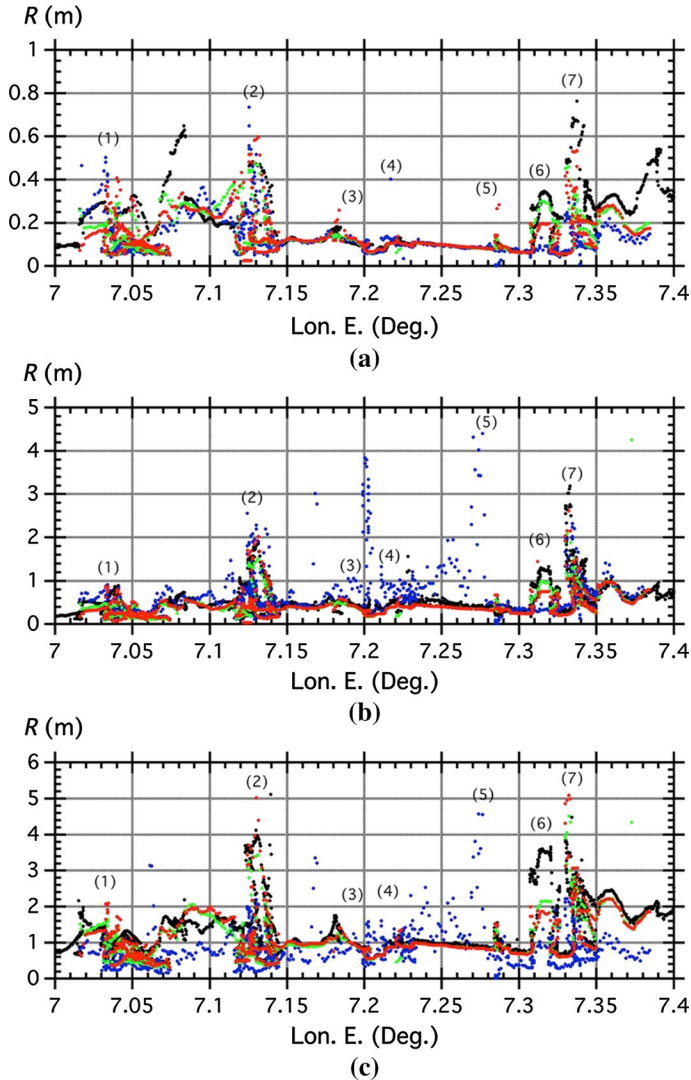


Fig. 18 Maximum runup computed along the French Riviera coast: with FUNWAVE by Ioualalen et al. (2014), in a (blue circle) 100, or (black circle) 40-m grid; and with FUNWAVE-TVD in the present study, in (green circle) 40- or (orange circle) 10-m nested grids (Table 3), for sources: **a** S7, **b** S8, **c** S11. Numbers in parenthesis mark key sites (see Figs. 3, 4): (1) Iles de Lérin (island offshore Cannes), (2) Cap d'Antibes/plage de la Salis, (3) Saint-Laurent-du-Var, (4) Nice International airport, (5) Nice-Massena (Nice harbor area), (6) Villefranche-sur-Mer, and (7) Saint-Jean Cap Ferrat

longer-lasting wave trains might be generated that could cause much larger resonances in semi-enclosed bays, such as at site 2 and at a few others sites along the French Riviera.

Table 5 Source S7. Mean and standard deviation (STD) of runups simulated in different resolution grids using FUNWAVE-TVD or FUNWAVE (Fig. 18; 850 runup points). Other basic statistics compare results in different grids, with those of FUNWAVE-TVD in the 10-m resolution grid: (RMSD) root mean square difference, (R^2) determination coefficient, L^2 norm, and (Corr) cross-correlation coefficient

S7	FUNWAVE-TVD 10 m	FUNWAVE-TVD 40 m	FUNWAVE 40 m	FUN- WAVE 100 m
Mean (m)	0.16	0.15	0.19	0.13
STD (m)	0.10	0.09	0.13	0.09
RMSD (%)		0.04	0.10	0.08
R^2		0.81	-0.03	0.27
L^2		0.23	0.53	0.45
Corr		0.90	0.70	0.65

Table 6 Same as Table 5 for source S8

S8	FUNWAVE-TVD 10 m	FUNWAVE-TVD 40 m	FUNWAVE 40 m	FUNWAVE 100 m
Mean (m)	0.46	0.43	0.51	0.71
STD (m)	0.32	0.32	0.35	0.62
RMSD (%)		0.18	0.19	0.64
R^2		0.68	0.65	-2.93
L^2		0.33	0.34	1.14
Corr		0.84	0.85	0.37

Table 7 Same as Table 5 for source S11

S11	FUNWAVE-TVD 10 m	FUNWAVE-TVD 40 m	FUNWAVE 40 m	FUNWAVE 100 m
Mean (m)	1.17	1.10	1.28	0.81
STD (m)	0.71	0.65	0.74	0.54
RMSD (%)		0.25	0.40	0.78
R^2		0.88	0.67	-0.02
L^2		0.18	0.30	0.58
Corr		0.94	0.86	0.39

3.4 Tsunami-induced currents

Another important aspect of tsunami coastal hazard, which could be more damaging to boats and facilities in small harbors and marinas than a moderate inundation, is the maximum current velocity during tsunami impact. Beyond 2–3 knots (1–1.5 m/s), such currents, which are nearly uniform over depth cause large drag forces, making navigation in and out of harbors hazardous, and starting to cause significant structural damage to harbor facilities. Additionally, large currents cause sediment scouring and deposition, which in the best-case scenario may require dredging and in the worst case can lead to

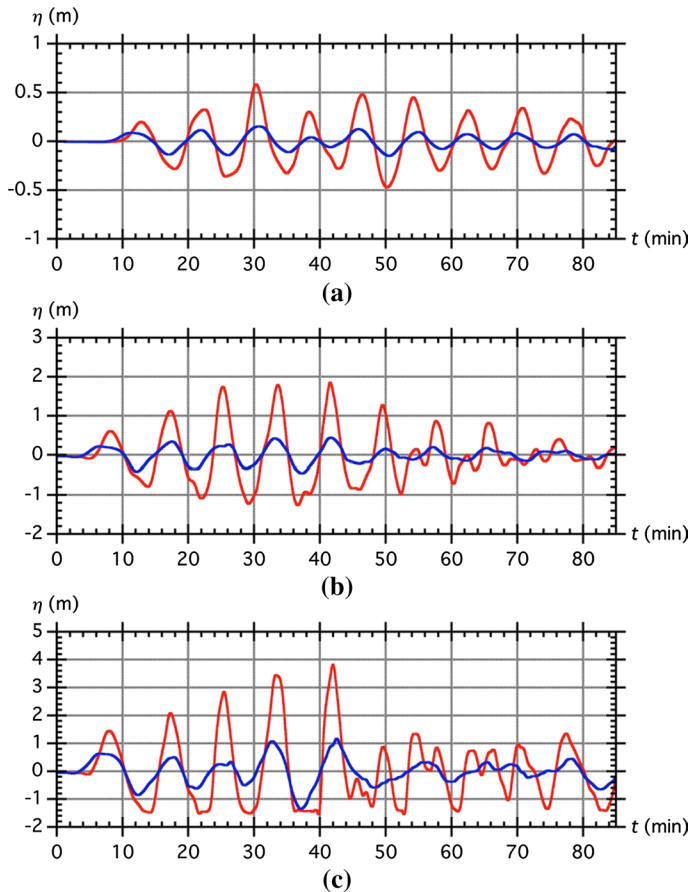


Fig. 19 Time series of surface elevations computed at Cap d'Antibes-Antibes-la Salis beach (site 2; Table 3, Fig. 4), for tsunami sources: **a** S7, **b** S8, **c** S11. In each case, wave gage stations were located within (red line) (station 8, Fig. 4) and just outside (blue line) the bay (station 9, Fig. 4)

the undermining of coastal structures such as breakwaters and seawalls (Wilson et al. 2012). Both of these effects of tsunami currents occurred during the far-field impact of the Tohoku 2011 tsunami in Crescent City harbor, CA, in which current velocity reached 7 m/s, causing over \$10 M damage to boats and harbor facilities, despite a fairly moderate tsunami inundation (Wilson et al. 2011, 2012). Observations made during the Tohoku 2011 tsunami impact in California also showed that damaging currents lasted for a much longer time than peak surface elevations (Wilson et al. 2013).

Maps of maximum simulated current velocity are plotted in Fig. 21 for tsunami source S11, for a number of channels, Bays, and small harbors/marinas along the Riviera, at and near some of the selected critical sites. The largest velocities, up to 2.5 m/s (5 knots) and larger, are predicted in Fig. 21f, h, in and around harbors/marinas located in Beaulieu-sur-Mer north of site 7 (St Jean Cap Ferrat; Table 3, Fig. 4). Large velocities (up to 3 knots) are shown in Fig. 21a, b, in the channel in between Iles de Lérin and Port Palm Beach, as well as within the harbor. As expected from the observed resonance, large velocities (up to 3 knots) also occur within the Bay of Antibes and west of it (Fig. 21c). Flow velocities are

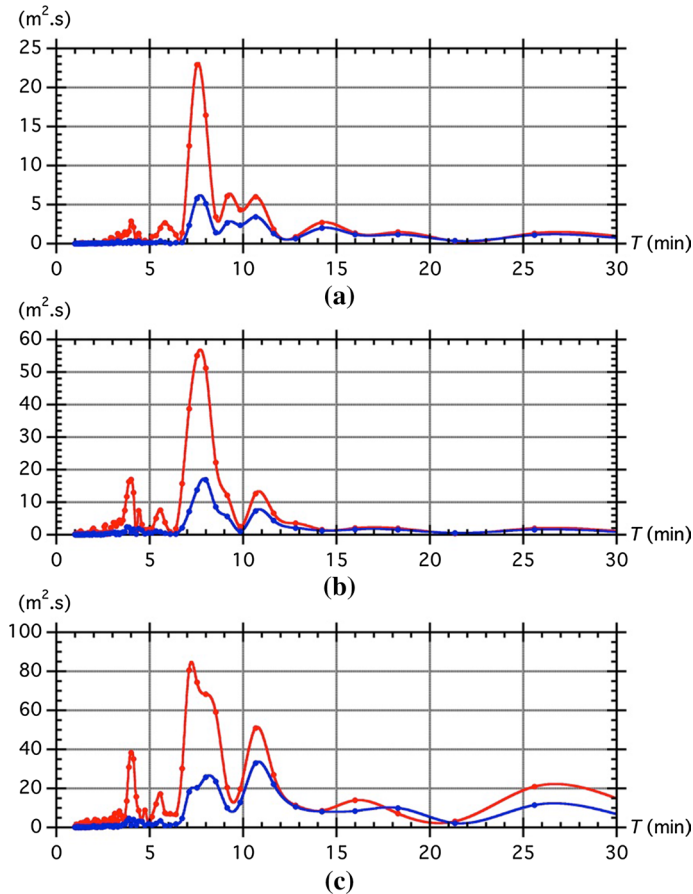


Fig. 20 Wave energy density spectra ($\text{m}^2 \text{s}$) computed as a function of wave period T for time series computed at the Cap d'Antibes-Antibes-la Salis beach gages (site 2; Table 3, Fig. 4), shown in Fig. 19, corresponding to tsunami sources: **a** S7, **b** S8, **c** S11

not large within Nice harbor (Fig. 21d), which is good as this is a fairly significant harbor in the area, but velocities are large (up to 3 knots) within the Bay of Villefranche and in the marina on its western side (Fig. 21e).

4 Discussion

The French Riviera is a seismically active area where tsunamis have frequently been triggered. The largest recorded earthquake occurred in this area on February 23, 1887, with a M_w 6.7–6.9. During this event, the eastern 30–40 km of the approximately 80-km-long Ligurian fault ruptured offshore Imperia, Italy (Larroque et al. 2012, Ioualalen et al. 2014). Events of this magnitude or possibly larger are likely to occur in the future in this area, possibly through the rupturing of the western residual 30–40-km segment of the Ligurian fault. Ioualalen et al. (2014) showed that the rupture of the entire fault system could generate a M_w 7.5 magnitude extreme event and modeled the potential tsunami coastal

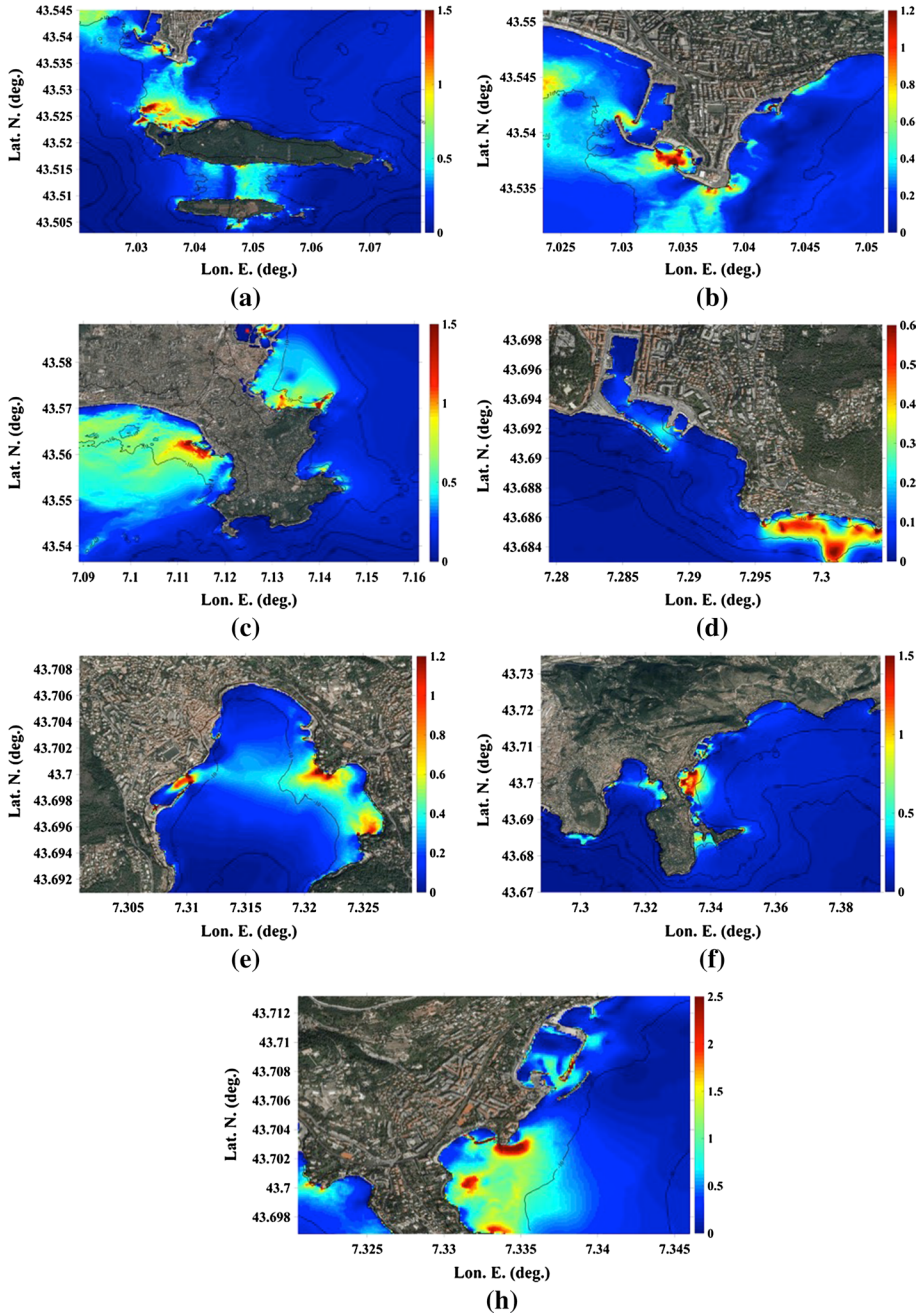


Fig. 21 Envelope of maximum current velocity (color scale in m/s), computed for source S11 in grids G3a, b, at: **a** site 1; **b** Port Palm Beach N of site 1; **c** site 2; **d** site 5; **e** site 6; **f** site 7; **h** Beaulieu-sur-Mer N of site 7 (see Table 3 and Fig. 4 for site locations)

hazard expected for this and several other earthquakes scenarios. Such modeling is typically strongly affected by uncertainties associated with the resolution of bathymetric and topographic data, particularly nearshore and onshore, as well as model grid resolution. Hence, using accurate bathymetry/topography data and high enough resolution grids is crucial, especially for complex shorelines, such as the French Riviera, where the geometry and bathymetry of small bays and harbors/marinas must be closely reproduced, to allow for tsunami-induced resonances to occur in results (as these are functions of geometry). In this respect, the US NTHMP recommends that, to perform tsunami inundation mapping, at least 10-m resolution digital elevation maps (DEMs) should be used in combination with at least 30-m, and preferably 10-m, resolution model grids. When using a dispersive wave model, such as FUNWAVE-TVD, it is also crucial to use high enough resolution model grids for the proper simulation of frequency dispersion effects in incident waves (when present). Again this requires using at least 10-m resolution coastal grids (Schambach et al. 2018). Otherwise, the model may not properly simulate constructive/destructive wave interferences, the occurrence of nearshore undular bores, and underpredict onshore inundation in some cases (Schambach et al. 2018; Glimsdal et al. 2013).

The availability of high-resolution DEMs depends on bathymetry/topography survey data that are available at the time simulations are performed. The grid resolution that is achievable in a model, while having to be commensurate with the DEM resolution, also depends in part on computational resources available. At the time of their study, unlike in the present study, Ioualalen et al. (2014) only had coarse bathymetry/topography data available for the region and they used the earlier FUNWAVE version that, although parallelized, did not allow for nested grids; hence, with the computer resources available at the time, they were limited to a relatively coarse 100-m grid resolution. While it was adequate in deeper water offshore, this resolution was too coarse along the coast to accurately simulate tsunami coastal inundation and runup, as evidenced by the present study (e.g., Fig. 18). Some harbors, such as Nice's, were clearly under-resolved: the width of the harbor entrance for instance was only represented by one or two grid points, leading to an unrealistic wave buildup, that artificially amplified wave height, causing a 28-m spurious runup value. In contrast, using a coarse grid could also cause blockage, preventing waves to enter a harbor and limiting the maximum wave height and inundation.

The newer version of the model used in this work, FUNWAVE-TVD, allows for nested grids and thus to efficiently perform simulations in high-resolution nearshore grids (here 10 m). It also allows using spherical coordinate grids, which is important at regional scales. Nevertheless, a new simulation performed here with FUNWAVE, for convergence verification and model comparison purposes, using a large single 40-m resolution grid, showed that, given a nearly adequate resolution, the predicted runups were in good agreement with those of FUNWAVE-TVD, at most locations (see Fig. 18 and Tables 5, 6, and 7). However, these simulations with FUNWAVE took several weeks to run on a large computer cluster, whereas the nested grid simulations performed with FUNWAVE-TVD only took a few hours CPUs to run each grid on a moderate-size 24-core desktop computer.

5 Conclusions

In this work, numerical simulations were performed to assess coastal tsunami hazard for three earthquake scenarios in the Ligurian Sea (M_w 6.9 or 7.5), in terms of maximum inundation, runup, and current velocity, along a large section of the French and Italian Riviera. One of the scenarios represented the M_w 6.9 1887 Ligurian event, while the M_w 7.5 scenario was a hypothetical extreme rupture mobilizing the entire Ligurian fault system. The work focused on the densely populated and highly developed coastline from Marseille, France, on the west in the Gulf of Lion, to Piombino, Italy (south of Livorno), in the Gulf of Genoa. Simulations were performed using the most recent version of FUNWAVE-TVD, a fully nonlinear and dispersive Boussinesq wave model, which features recent improvements such as: Cartesian or spherical (with Coriolis effects) coordinate grids, a better representation of friction and energy dissipation by breaking, and an improved moving shoreline algorithm. Additionally, and importantly, to alleviate problems identified in the earlier study of Ioualalen et al. (2014), as discussed above, nested grids were used (with one-way coupling), which allowed efficiently performing simulations in grids of increasing resolution toward shore: here from 640-m resolution offshore to 10-m resolution in coastal areas. Finally, a 10-m resolution DEM based on new high-resolution bathymetric data from multibeam surveys, and topographic data from coastal LIDAR surveys, was used to define grid data, including over the continental shelf (at least on the French side of the *Riviera*).

Based on this methodology, tsunami inundation maps were developed for the French side of the *Riviera*, which provide high levels of detail for assessing tsunami coastal hazard and performing future studies of coastal vulnerability and resilience. These maps can also be used to prepare for an emergency response to future local earthquakes and tsunamis. Maps reveal a large degree of spatial variability of coastal inundation and runup, depending on local effects. In general, the most impacted areas are bays, due to wave shoaling within semi-enclosed shallow areas enhanced by possible resonances. Such nearshore amplification effects are generic, i.e., they would occur for any tsunami, independent of earthquake magnitude, usually in relation to bathymetric control (i.e., causing wave convergence/divergence) and coastline geometry (i.e., causing potential resonance).

Inundation maps identified particularly vulnerable areas that should be considered as higher priority in prevention plans such as: (1) capes (*Cap d'Antibes* and *Cap Ferrat*) where wave amplification always occurs due to energy focusing; (2) semi-enclosed bays, such as *La Salis* beach at Antibes, where a wave amplification (and thus larger inundation) occurs due to resonances; (3) other small bays and marinas such as the harbor of Beaulieu-sur-Mer, which may experience strong wave-induced currents that could damage marine infrastructures and moored ships, and impede navigation, even if they are associated with only a small elevation inundation. In contrast, widely open bays, such as *Baie des Anges*, off of the major city of Nice and *Bay of Cannes* face a lesser tsunami threat due to energy defocusing. These two sites are the most densely populated urban areas of the region, especially during the summer season. It should be noted that uniform fault slip was used in the three rupture scenarios, and runup could locally be enhanced in case of more complex ruptures, such as segmented and heterogeneous ruptures.

Based on results, it appears that, even for the extreme source, a significant part of the French Riviera would not require specific emergency preparedness for co-seismic tsunamis originated in the Ligurian fault system. However, other areas identified above should be the object of further mitigation and preparedness studies. This important conclusion means

that future efforts in this respect can focus on the more exposed areas, which are of limited extent (i.e., small bays and marinas).

Acknowledgments Fatima Nemati and Stephan Grilli acknowledge support for this work from the US National Science Foundation Grant CMMI-15-35568. Mansour Ioualalen and colleagues from Géoazur acknowledge support from: (1) the European Commission under the project “Assessment, Strategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe,” ASTARTE (Grant No. 603839), and (2) the French government, through the UCA-JEDI Investments managed by the French National Research Agency (ANR-15-IDEX-01).

References

- Alasset PJ, Hébert H, Maoche S, Calbini V, Meghraoui M (2006) The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake ($M_w = 6.9$, Algeria): modelling and results. *Geophys J Int* 166(1):213–226
- Ambraseys NN (1960) The seismic sea wave of July 9, 1956 in the Greek archipelago. *J Geophys Res* 65:1257–1265
- Assier-Rzadkiewicz S, Heinrich P, Sabatier PC, Savoye B, Bourillet JF (2000) Numerical modeling of a landslide-generated tsunami: the 1979 Nice event. *Pure appl Geophys* 157:1707–1727
- Béthoux N, Fréchet J, Guyoton F, Thouvenot F, Cattaneo F, Nicolas M, Granet M (1992) A closing Ligurian sea. *Pure appl Geophys* 139:179–194
- Day SJ, Watts P, Grilli ST, Kirby JT (2005) Mechanical models of the 1975 Kalapana, Hawaii earthquake and tsunami. *Mar Geol* 215(1–2):59–92. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.11.008>
- Denza PF (1887) Osservazioni fatte all'Osservatorio di Moncalieri sul terremoto del 23 Febbraio 1887. *Bollettino Mensuale dell'Osservatorio Centrale Moncalieri* 2(7):68–70
- Eva C, Rabinovich AB (1997) The February 23, 1887 tsunami recorded on the Ligurian coast, western Mediterranean. *Geophys Res Lett* 24:2211–2214
- Eva E, Solarino S, Spallarossa D (2001) Seismicity and crustal structure beneath the western Ligurian Sea derived from local earthquake tomography. *Tectonophysics* 339:495–510. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00106-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00106-8)
- Ferrari G (1991) The 1887 Ligurian earthquake: a detailed study from contemporary scientific observations. *Tectonophysics* 193:131–139
- Glimsdal S, Pedersen GK, Harbitz CB, Løvholt F (2013) Dispersion of tsunamis: does it really matter? *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13:1507–1526. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1507-2013>
- Grilli S, Ioualalen M, Asavanant J, Shi F, Kirby JT, Watts P (2007) Source constraints and model simulation of the December 26, 2004 Indian Ocean tsunami. *J Waterway Port Coast Ocean Eng* 133(6):414–428. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2007\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2007))
- Grilli ST, Dubosq S, Pophet N, Pérignon Y, Kirby JT, Shi F (2010) Numerical simulation and first-order hazard analysis of large co-seismic tsunamis generated in the Puerto Rico trench: near-field impact on the North shore of Puerto Rico and far-field impact on the US East Coast. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 10:2109–2125. <https://doi.org/10.5194/nhess-2109-2010>
- Grilli ST, Harris JC, Tajalibakhsh T, Masterlark TL, Kyriakopoulos C, Kirby JT, Shi F (2013) Numerical simulation of the 2011 Tohoku tsunami based on a new transient FEM co-seismic source: comparison to far- and near-field observations. *Pure appl Geophys* 170:1333–1359. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0528-y>
- Grilli ST, O'Reilly C, Harris JC, Tajalibakhsh T, Tehranirad B, Banihashemi S, Kirby JT, Baxter CDP, Eggeling T, Ma G, Shi F (2015) Modeling of SMF tsunami hazard along the upper US East Coast: detailed impact around Ocean City, MD. *Nat Hazards* 76(2):705–746. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1522-8>
- Grilli ST, Grilli AR, David E, Coulet C (2016) Tsunami hazard assessment along the north shore of Hispaniola from far- and near-field Atlantic sources. *Nat Hazards* 82(2):777–810. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2218-z>
- Grilli ST, Shelby M, Kimmoun O, Dupont G, Nicolsky D, Ma G, Kirby J, Shi F (2017) Modeling coastal tsunami hazard from submarine mass failures: effect of slide rheology, experimental validation, and case studies off the US East coast. *Nat Hazards* 86(1):353–391. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2692-3>
- Heidarzadeh M, Satake K (2013) The 21 May 2003 tsunami in the Western Mediterranean Sea: statistical and wavelet analyses. *Pure appl Geophys* 170(9):1449–1462
- Heidarzadeh M, Necmioglu O, Ishibe T, Yalciner AC (2017) Bodrum-Kos (Turkey-Greece) M_w 6.6 earthquake and tsunami of 20 July 2017: a test for the Mediterranean tsunami warning system. *Geosci Lett* 4:31. <https://doi.org/10.1186/s40562-017-0097-0>

- Ioualalen M, Asavanant J, Kaewbanjak N, Grilli ST, Kirby JT, Watts P (2007) Modeling of the 26th December 2004 Indian Ocean tsunami: case study of impact in Thailand. *J Geophys Res, Oceans* 112:C07024. <https://doi.org/10.1029/2006JC003850>
- Ioualalen M, Migeon S, Sardou O (2010) Landslide tsunami vulnerability in the Ligurian Sea: case study of the 1979 October 16 Nice international airport submarine landslide and of identified geological mass failures. *Geophys J Int* 181:724–740. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04572.x>
- Ioualalen M, Larroque C, Scotti O, Daubord C (2014) Tsunami mapping related to local earthquakes on the French-Italian Riviera (western Mediterranean). *Pure appl Geophys* 171(7):1423–1443. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0699-1>
- Ioualalen M, Pelletier B, Solis Gordillo GX (2017) Investigating the March 28th 1875 and the September 20th 1920 earthquakes/tsunamis of the Southern Vanuatu arc, offshore Loyalty Islands, New Caledonia. *Tectonophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.05.006>
- Kirby JT, Shi F, Tehranirad B, Harris JC, Grilli ST (2013) Dispersive tsunami waves in the ocean: model equations and sensitivity to dispersion and Coriolis effects. *Ocean Model* 62:39–55. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.11.009>
- Labbé M, Donnadiou C, Daubord C, Hebert H (2012) Refined numerical modeling of the 1979 tsunami in Nice (French Riviera): comparison with coastal data. *J Geophys Res* 117:F01008. <https://doi.org/10.1029/2011JF001964>
- Lambert J, Terrier M (2011) Historical tsunami database for France and its overseas territories. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11:1037–1046
- Larroque C, Béthoux N, Calais E, Courboulex F, Deschamps A, Deverchère J, Stéphan JF, Ritz JF, Gilli E (2001) Active and recent deformation at the Southern Alps-Ligurian basin junction. *Neth J Geosci Geologie en Mijnbouw* 80:255–272
- Larroque C, Delouis B, Godel B, Nocquet J-M (2009) Active deformation at the southwestern Alps-Ligurian basin junction (France-Italy boundary): evidence for recent change from compression to extension in the Argentera massif. *Tectonophysics* 467:1–4. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.12.013>
- Larroque C, Scotti O, Ioualalen M (2012) Reappraisal of the 1887 Ligurian earthquake (western Mediterranean) from macroseismicity, active tectonics and tsunami modelling. *J. Int, Geophys*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05498.x>
- Madsen PA, Fuhrman DR, Schaffer HA (2008) On the solitary wave paradigm for tsunamis. *J Geophys Res* 113(C12012):22. <https://doi.org/10.1029/2008JC004932>
- Mård Karlsson J, Skelton A, Sanden M, Ioualalen M, Kaewbanjak N, Pophet N, von Matern A (2009) Reconstructions of the coastal impact of the 2004 Indian Ocean tsunami in the Khao Lak area, Thailand. *J Geophys Res: Oceans* 114(C10023):1–14
- Mulder T, Savoye B, Syvitsky JPM (1997) Numerical modeling of a mid-sized gravity flow: the 1979 Nice turbidity current (dynamics, processes, sediment budget and seafloor impact). *Sedimentology* 44:326–395
- Okada Y (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull Seismol Soc Am* 75(4):1135–1154
- Papadopoulos GA (2015) *Tsunamis in the European-Mediterranean region: from historical record to risk mitigation*. Elsevier, Amsterdam. ISBN 978-0-12-420224-5
- Piper DJ, Savoye B (1993) Processes of late quaternary turbidity current flow and deposition on the Var deep-sea fan, north-west Mediterranean Sea. *Sedimentology* 40(3):557–582
- Schambach L, Grilli ST, Kirby JT, Shi F (2018) Landslide tsunami hazard along the upper US East Coast: effects of slide rheology, bottom friction, and frequency dispersion. *Pure Appl Geophys*. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1978-7>. Published online 03 Sept 2018
- Shelby M, Grilli ST, Grilli AR (2016) Tsunami hazard assessment in the Hudson River Estuary based on dynamic tsunami tide simulations. *Pure Appl Geophys* 173(12):3999–4037. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1315-y>
- Shi F, Kirby JT, Harris JC, Grilli ST (2012) A high order adaptive time-stepping TVD for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation. *Ocean Model* 43:36–51. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.12.004>
- Tappin DR, Watts P, Grilli ST (2008) The Papua New Guinea tsunami of 17 July 1998: anatomy of catastrophic event. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 8(2):243–266. <https://doi.org/www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/8/243/2008/>
- Tappin DR, Grilli ST, Harris JC, Geller RJ, Masterlark T, Kirby JT, Shi F (2014) Did a submarine landslide contribute to the 2011 Tohoku tsunami? *Mar Geol* 357:344–361. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.09.0>
- Taramelli T, Mercalli G (1888) Il terremoto ligure del 23 febbraio 1887. *Annali dell'Ufficio Centrale Meteorologico e Geodinamico Italiano*, II 8(4):331–626

- Tehraniad B, Shi F, Kirby JT, Harris JC, Grilli ST (2011) Tsunami benchmark results for fully nonlinear Boussinesq wave model FUNWAVE-TVD. Version 1.0. Technical report, No. CACR-11-02, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware
- Tehraniad B, Harris JC, Grilli AR, Grilli ST, Abadie S, Kirby JT, Shi F (2015) Far-field tsunami impact in the north Atlantic basin from large scale flank collapses of the Cumbre Vieja volcano, La Palma. *Pure appl Geophys* 172(12):3589–3616. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1135-5>
- Tinti S, Maramai A, Graziani L (2004) The new catalogue of Italian tsunamis. *Nat Hazards* 33:439–465
- Watts P, Grilli ST, Kirby JT, Fryer GJ, Tappin DR (2003) Landslide tsunami case studies using Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 3:391–402
- Wei G, Kirby JT (1995) A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. *J Waterway Port Coast Ocean Eng* 121:251–261
- Wei G, Kirby JT, Grilli ST, Subramanya R (1995) A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves. *J Fluid Mech* 294:71–92
- Wells DL, Coppersmith KJ (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull Seismol Soc Am* 84(4):974–1002
- Wilson R, Dengler L, Borrero J, Synolakis C, Jaffe B, Barberopoulou A, Ewing L, Legg M, Ritchie A, Lynett P, Admire A, McCrink T, Falls J, Rosinski A, Treiman J, Manson M, Silva M, Davenport C, Lancaster J, Olson B, Pridmore C, Real C, Miller K, Goltz J (2011) The effects of the 2011 Tohoku tsunami on the California coastline. *Seismol Res Lett* 82(3):459–460
- Wilson R, Davenport C, Jaffe B (2012) Sediment scour and deposition within harbors in California (USA), caused by the March 11, 2011 Tohoku-oki Tsunami. *Sed Geol* 282:228–240
- Wilson RI, Admire AR, Borrero JC, Dengler LA, Legg MR, Lynett P, Mc Crink TP, Miller KM, Ritchie A, Sterling K, Whitmore PM (2013) Observations and Impacts from the 2010 Chilean and 2011 Japanese Tsunamis in California (USA). *Pure appl Geophys* 170(6–8):1127–1147. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0527-z>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Annexe 4 :

Article :

Integrated tsunami intensity and magnitude scales based on maxima of tsunami amplitude and induced currents

Boschetti, L., Ioualalen, M., 2020. *Integrated tsunami intensity scale based on maxima of tsunami amplitude and induced current*. Natural Hazards, Springer Verlag.
DOI : 10.1007/s11069-020-04338-5).

Integrated tsunami intensity scale based on maxima of tsunami amplitude and induced current

Laurie Boschetti & Mansour Ioualalen

Natural Hazards

ISSN 0921-030X

Nat Hazards

DOI 10.1007/s11069-020-04338-5



Your article is protected by copyright and all rights are held exclusively by Springer Nature B.V.. This e-offprint is for personal use only and shall not be self-archived in electronic repositories. If you wish to self-archive your article, please use the accepted manuscript version for posting on your own website. You may further deposit the accepted manuscript version in any repository, provided it is only made publicly available 12 months after official publication or later and provided acknowledgement is given to the original source of publication and a link is inserted to the published article on Springer's website. The link must be accompanied by the following text: "The final publication is available at link.springer.com".



Integrated tsunami intensity scale based on maxima of tsunami amplitude and induced current

Laurie Boschetti¹ · Mansour Ioualalen¹

Received: 4 November 2019 / Accepted: 21 September 2020
© Springer Nature B.V. 2020

Abstract

As with earthquakes, river floods, water waves, and wind intensities, a tsunami intensity has to be synthetic and comprehensive to be efficient. Tsunami impact is complex because the effects can be felt on the beach, on inundated areas and also at berths and anchors. Within the same local area, a tsunami may severely impact the population on the coast, while its effects may be negligible on marine bodies (boats). Most existing tsunami intensity scales are based either on water elevation or on induced currents. However, it is commonly admitted that both variables should be considered simultaneously. Several existing intensity scales were integrated and were made consistent with each other. An original intensity scale is then derived based on analysis of the interdependency between the maxima of tsunami amplitude and induced current: The dimension of the couple composed by two variables is analyzed, in particular through the derivation of a linear relationship using the long wave theory and the use of a fully nonlinear numerical experiment. Our intensity scale is particularly well adapted to numerical studies, for which the two variables are naturally derived within an entire computational grid. Once the tsunami intensity scale was set up, it was briefly applied to a particular case study: the impact of the Sumatra tsunami, dated December 26, 2004, on the coast of Sri Lanka. Indeed, the tsunami scales proposed herein represent an initial framework of study and can be further improved through new or revisited tsunami observations.

Keywords Tsunami intensity · Tsunami modeling · Tsunami currents · Tsunami amplitude

1 Introduction

To quantify, classify, and compare tsunamis, it is necessary to have specific scales at our disposal. As mentioned by Papadopoulos (2003), it is useful to make a distinction between magnitude and intensity scales. The magnitude of a tsunami is physically measurable through physical parameters such as wave or particle velocities, volumes, energies, and surface wave amplitudes. As an analogy, the Richter scale is an earthquake magnitude

✉ Mansour Ioualalen
Mansour.Ioualalen@geoazur.unice.fr

¹ Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, IRD, Université Côte d'Azur, Géoazur, Campus Azur, 250 rue Albert Einstein, CS 10269, 06905 Sophia Antipolis Cedex, France

scale. The magnitude of a specific event is time and space independent. Physical variables for tsunamis should be related to the water level and the water particle velocities, i.e., the wave-induced current. The intensity corresponds to the effects and impacts of the physical event on static or moving structures, human losses, and environmental changes (Papadopoulos 2003). Contrary to the magnitude, the intensity of a specific event depends on the location and time of occurrence, both dependences being related to the notions of vulnerability and preparedness. One can compare it to the Mercalli intensity scale for earthquakes or the Beaufort scale for winds.

Let us conjecture that the intensity of a tsunami I_T is a function of two independent variables: the magnitude M_T and the biophysical vulnerability VB_T of persons and infrastructures, i.e., their resistance and preparedness, and the geological setting (Eq. (1)). By “geological setting,” we mean the physical exposition to the event, including the distance from the source, and the site effects:

$$I_T = f(M_T, VB_T). \quad (1)$$

It is interesting to note that one can make an analogy between notions of intensity and risk (R), and between those of magnitude and hazard, as the risk is commonly defined as a function $R = g(\text{hazard}, \text{vulnerability})$ (Manche 1997).

The two lower limits of Eq. (1) are $M_T=0$ and $VB_T=0$. $M_T=0$ corresponds to a never-occurring tsunami, corresponding to an area where the tsunami hazard does not exist; in such an area, the intensity would not have any significance. A strictly vanishing vulnerability, $VB_T=0$, would be possible only in a permanently unoccupied area. Thus, the damage would be negligible and the intensity would also be meaningless. The two theoretical limits, M_T and VB_T being infinite, are also meaningless, because no physical variable is infinite due to wave dissipation and breaking threshold, and an infinite vulnerability is inconceivable. Various comments regarding Eq. (1) are as follows:

- a. For a tsunami triggered by a co-seismic deformation, the earthquake magnitude will not be considered as a further variable because it is strongly correlated to the magnitude; the magnitude of the tsunami, basically its initial free surface elevation and induced current, is prescribed by the focal mechanisms of the earthquake triggering the wave.
- b. Trivially, contrary to the magnitude, the intensity and the vulnerability vary in space and time.

Equation (1) of the intensity may be interpreted as the effect of the force exerted by an incoming wave on structures or persons, depending on their bio-vulnerability to this force. Such force can be approximated as the integral of the pressure field within the water column (Fenton 1985), and thus, it should depend on the submerging water depth and the tsunami-induced current. These two variables are representative of the physical component of the tsunami intensity, that is, its magnitude.

Several approaches connecting the tsunami magnitude (or part of it) to damages on structures and persons, in order to build intensity scales, were identified by Charvet et al. (2014) and others. They first mention what we may call “empirical” ones that are based on threshold beyond which damages are effective: Some studies take into account the submerging water depths only (Shuto 1993; Papadopoulos and Imamura 2001), while others consider tsunami-induced currents only (Lynett et al. 2014). Both of them estimate the intensity by gathering empirical observed damages. An alternative to empirical intensity scales is the so-called “Fragility curves” which relate quantitative stochastic functions to

damages (Suppasri et al. 2013a, b). The approach certainly provides much more detailed tsunami damages on structures and thus a possibly more accurate intensity scale than the empirical one. However, Charvet et al. (2014) also suggest that the local geology and geography, e.g., the geometry of the coast and the soil configurations, certainly alter the flow characteristic and thus the tsunami intensity. As a result, the more detailed and qualitative would be an intensity scale, the less it can be generalized. For that reason, building a “universal” tsunami intensity scale based on Fragility curves is a difficult (but necessary in the future) objective to attain. For now, it is more straightforward to derive a qualitative tsunami intensity scale based on the integration of empirical existing scales.

Based on Eq. (1), the above-mentioned (a)–(b) properties, and analysis of the interdependency of tsunami physical variables, the purpose of this study is to propose a new tsunami intensity scale that completes preexisting empirical qualitative ones which are largely discussed in the next section. It should take into account observed and/or simulated physical data and could be used for tsunami risk assessment.

2 Review of tsunami magnitude and intensity scales

2.1 Tsunami currents not considered

Papadopoulos and Imamura (2001) and Papadopoulos (2003) exhaustively reviewed existing tsunami scales; some of these are presented in Table 1.

The Imamura–Iida (Table 1) empirical magnitude is complemented by six intensity levels and relates the maxima of tsunami amplitudes to damage and human loss. Thus, it is a dual scale, pertaining to tsunami magnitude as well as intensity. It also relates offshore and coastal wave amplitudes. The relation presented in Eq. (1) is compatible with this intensity scale, which considers both the magnitude and the biophysical vulnerability. However, the scale is developed keeping the vulnerability constant and thus applies to a standard community of populations and structures. This classification has already proven its efficiency. It has been successfully used by Ioualalen et al. (2017) for the analysis of the March 18, 1875, and September 20, tsunamigenic earthquakes off the shore of the Vanuatu islands in the southwest Pacific Ocean. They performed an ensemble of numerical simulations of tsunamis and compared the simulated maximal tsunami amplitudes with observations that were limited only to the testimonials. The interpretation of the testimonials in the framework of the Imamura–Iida intensity, along with the identification of a sporadic wave resonance phenomenon, permitted us to estimate the magnitude of the two earthquakes, M_w 8.2–8.3 and M_w 7.5–7.8. The Imamura–Iida magnitude is also used by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) for their tsunami database.

Pure intensity scales hierarchize damage to structures and populations in levels, their vulnerability, and the knowledge of the tsunami magnitude being implicit. Interestingly, Shuto (1993) introduced a new tsunami intensity (i) scale based on the local tsunami variable H_{max} that is related to the water level; generally speaking, $i = \log_2 H_{max}$, which implicitly includes site effects (Table 1). The scale encompasses magnitude as well as damage (Papadopoulos and Imamura 2001). The scale considers the materials used for vertical structures (wood, stone, and reinforced concrete) and the size of the ships. As mentioned by Papadopoulos and Imamura (2001), the variable H_{max} is defined by Shuto (1993) as the effective water column that submerges the structure. Thus, (1) at sea, it represents the maximal wave crest altitude relative to a resting sea surface prior to the tsunami arrival, that is,

Table 1 Elements of the classification of the different tsunami scales developed in Papadopoulos and Imamura (2001) and in Papadopoulos (2003) that were used to elaborate the present intensity scale

Tsunami scale	Named as	Analogy with seismic scales (if applied)	Considered elements	Formulae or number of levels
<i>Magnitude scale</i>				
Imamura (1942, 1949) and Iida et al. (1967)	Imamura–Iida First proposed magnitude scale	Local Richter magnitude scale	Maximum amplitude H_{max}	$m = \log_2 H_{max}$ 6 levels
<i>Intensity scale</i>				
Shuto (1993)	Shuto		Relation between damage and maximum magnitude H_{max}	$i = \log_2 H_{max}$ (Iida et al. 1967) 5 levels
Papadopoulos and Imamura (2001)	Papadopoulos–Imamura	New macro-seismic scales (EMS 92 and 98)	Damage to populations, buildings, and items	12 levels

the maximal wave amplitude and not the wave height (which is the crest-to-trough height). (2) At inland, H_{max} is the tsunami inundation depth, that is, the effective water column. It is therefore the tsunami surface elevation (vs. the mean sea level) minus the local land elevation (Papadopoulos and Imamura 2001; Shuto 1993). This definition of H_{max} is coherent for defining an intensity scale because the effect of a tsunami on a structure depends on the water column depth (and evidently on the induced current). In the present study, we consider that definition of H_{max} and refer to it as the *maximal tsunami amplitude*.

Papadopoulos and Imamura (2001) proposed a very detailed intensity scale that considers the perception of the event and the damage to populations, on inland and floating structures as well as on aquaculture farms, on anthropic networks (electricity, water, and gas), and on protective structures (dikes and jetties) (Table 1). The notion of perception is crucial because it may inspire a correct decision when it is time to escape a threat. Their intention was to identify every possible feature one can find in any coastal area, and hierarchize the impact of a tsunami on it. It is a pure intensity scale because it does not deal with the tsunami itself (the magnitude). It was inspired by the Mercalli scale dedicated to earthquakes. Whereas the intensity scale of Shuto (1993) is relatively coarse (six levels), this one is more detailed with 12 levels with level 1 being “not felt” to level 12 being “totally destructive.” Its another purpose is to generalize former intensity scales to clearly distinguish between two events for which the damage is similar.

2.2 Tsunami currents considered

The magnitudes and intensities reviewed above only deal with the maximal tsunami amplitude H_{max} . Although it is an important feature for evaluating tsunami impact, it is not the only one. Trivially, a static high wave may be inoffensive, while a tsunami-induced current may be the destructive weapon arm of the wave. We present below two scales that consider water currents. The first, developed by Lynett et al. (2014), is dedicated to the effects of tsunami-induced currents on floating bodies. The second considers the effects of both the actual water level and the current during river floods. It was developed by the French authorities based on decades of observations of numerous flooding of French rivers. The derived intensity is the basis of the French Prevention Plan against Flooding Risk (PPFR) (PPFR 1999; PPFR-Thau 2012). The connection with tsunamis is straightforward: (a) A tsunami being a long wave, the induced current may be considered as nearly horizontal and homogeneous within the water column. Thus, the tsunami flow may be assimilated to a flooding. (b) PPFRs refer to the terminology “*water level*” corresponding to the water column depth, that is, our tsunami maximum amplitude H_{max} versus mean sea level at sea and versus the ground inland.

One of the main intention of PPFRs is to identify thresholds that can possibly be encountered by persons in the presence of flooding, depending on their shape and age and on the flooding magnitude (current and water level, Fig. 1). In that context, there is no reason that it differs with a tsunami, although their dynamics may differ; in particular, the tsunami is oscillating with incoming and withdrawing current with occurring wave breaking. In the following, in order to resolve that issue we will not make the distinction between the two wave phases and wave breaking: Only the maximum current will be considered, would that be during a positive or a negative wave, and the effects of wave breaking will be ignored. We consider that the latter issue is too complex to handle at this stage and deserves numerous independent studies. Reasonably, for both phenomena, the main characteristics (and thus first order processes) are common, i.e., (i) a weak horizontal current

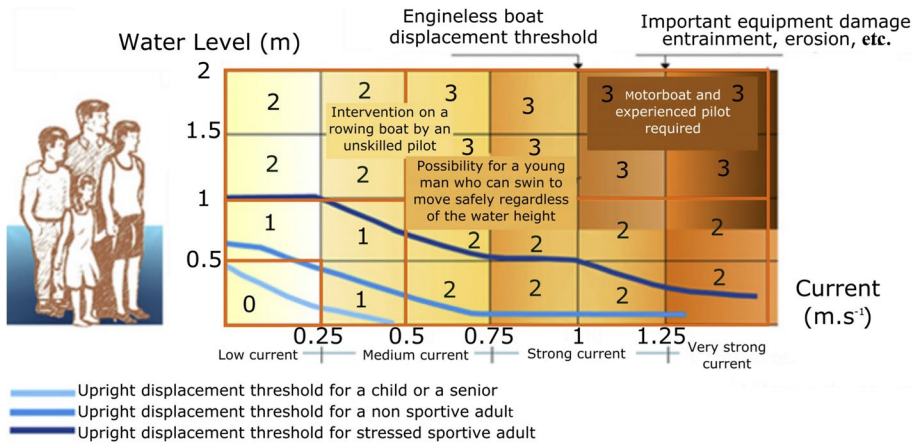


Fig. 1 Schematic representation of the intensity scale used by the French authorities in their Prevention Plan for Flooding Risk (PPFR) (PPFR 1999). The water level represents the actual submerging water depth, defined as H_{max} in this paper. Intensity levels are: 0: weak; 1: moderate; 2: strong; 3: very strong. Empirical curves represent the thresholds for upright displacement for a child, a non-sporty adult, and a sporty adult under stress, respectively

stratification, yielding objects transportation, and thus (ii) a strong floor friction, yielding strong and dangerous sediment removals.

Lynett et al. (2014) have considered several large trans-oceanic tsunamis such as the ones that have been triggered by the Kuril M_w 8.3 earthquake on November 15, 2006, by the M_w 8.8 Maule event on February 17, 2010, off the shore of Chile and by the M_w 9.0–9.1 Tohoku earthquake on March 11, 2011. The tsunami-induced currents were evaluated in different ways: experienced sailors’ testimonials and videos that recorded dragged objects at the sea surface. They also gathered available information on the impact of the tsunami on floating marine structures, such as buoys and boats, at different locations in California. They showed that the current threshold for damaging marine floating bodies is of the order of 1.5 m s^{-1} . Within the range $1.5\text{--}3 \text{ m s}^{-1}$, the damage is moderate, while between $3 \text{ and } 4.5 \text{ m s}^{-1}$, major damage is observed. Beyond 4.5 m s^{-1} , the damage is extreme. They proposed a tsunami intensity scale

Table 2 Tsunami intensity scale proposed by Lynett et al. (2014)

Intensity level	Associated tsunami-induced current	Description
Level 0	$< 1.5 \text{ m s}^{-1}$	No damage/impact
Level 1	$< 1.5 \text{ m s}^{-1}$	Small buoys moved
Level 2	Between $1.5 \text{ and } 3 \text{ m s}^{-1}$	1–2 docks/small boats damaged and/or large buoys moved
Level 3	Between $1.5 \text{ and } 3 \text{ m s}^{-1}$	Moderate dock/boat damage (<25% of docks/vessels damaged) and/or mid-sized vessels off moorings
Level 4	Between $3 \text{ and } 4.5 \text{ m s}^{-1}$	Major dock/boat damage (<50% of docks/vessels damaged) and/or large vessels off moorings
Level 5	$> 4.5 \text{ m s}^{-1}$	Extreme/complete damage (>50% of docks/vessels damaged)

based on six levels (Table 2). Note that some different levels, e.g., 0 and 1 or 2 and 3, are associated with the same current intervals, probably because the two levels can be associated with the same current interval but at different water levels, the latter not being included in their classification.

Every year, France is subject to numerous cases of river flooding, which can sometimes be disastrous. Over decades, the French authorities have gathered an immense amount of experience and feedback on damage that can occur during flooding. Using these data, they have developed PFRs (PPFR 1999; PPFR-Thau 2012). In particular, an intensity scale based on several thresholds has been elaborated (Fig. 1; Table 3). Beyond a 0.5 m water level, a non-sporty adult (and of course a child, an elderly person, or a person with reduced mobility) has trouble moving, particularly when there are no longer landmarks to locate or orientate oneself, or when in the presence of invisible obstacles such as sidewalks, ditches, or open sewers. The difficulty is enhanced with stress. The 0.5 m level is also the threshold for vehicle displacements; a vehicle starts floating at a water level of above 0.3 m and can be carried away by the current whatever its strength. The 0.5 m level is also the threshold beyond which classical rescue vehicles cannot operate (PPFR-Thau 2012). Beyond a 0.5 m s^{-1} current, there is a strong probability of a person of being dragged away or hurt by drifting objects.

3 Tsunami intensity scale for tsunami modeling: constraining the maxima of tsunami current and amplitude

Numerical modeling of tsunamis may provide various maps. Whatever the usual physics of the models, Boussinesq or shallow water approximation, and the computational storage constraints, the standard basic available maps on output are the maximal/minimal wave amplitude (H_{max} , H_{min}) discussed above at sea and inland, and the maximal tsunami currents (CUR_{max}) at each node of the computational grid, the currents being considered homogeneous vertically through the long wave theory approximation.

Our first intention is to determine a tsunami magnitude scale based on the basic physical variables H_{max} and CUR_{max} . The H_{min} variable, the water withdrawal extension, will be ignored in our study as it is difficult to control because, to our knowledge, there are no available data or observations to constrain it. Then, using the available intensity scales (tsunami impacts), the magnitude scale will be extended into an intensity scale.

The development of tsunami scales based on the maxima of amplitude and current requires a preliminary study on the interdependency between the two tsunami variables. It is crucial to discuss whether the entire domain (plan) is concerned or not. In other words, are there exclusion zones ($H_{max}(i)$, $CUR_{max}(j)$) where the points (i, j) do not exist or are meaningless? We believe this preliminary discussion is necessary. Is it two dimensional? In that case, the entire plan in Fig. 1 must be considered. Or is only a part of the domain concerned? Then, some points (i, j) do not have to be considered, and the domain of Fig. 1 should be reduced.

The preliminary analysis of the interdependency of the two variables will be based on (1) the long wave linear theory, bearing in mind that it is only reliable offshore and (2) a fully nonlinear empirical case study, the simulated 2004 Sumatra tsunami impact on the Sri Lanka coast.

Table 3 PPFR tsunami intensity scale (PPFR 1999, PPFR-Thau 2012)

Intensity levels	Population damage	Area damage; recommendations	Prevention
Level 0	People can walk and escape alone and/or helped by others. No victims	–	–
Level 1	Children and a few adults need to swim. Other adults (a minority) can help them. Very low probability of victims	Caution areas. Limit as much urban or agricultural development as possible	Setting up a monitoring system; public information meetings; hazard mapping
Level 2	Only sporty adults (very few) can walk upright and help other populations, and not all who are unable to swim. Some possible victims	Danger zones; prohibit urban and agricultural development	Setting up a monitoring system; public information meetings; hazard mapping; set up an evacuation plan
Level 3	Currents and water levels are too high to get out of danger, even less likely to help other populations. Many possible victims	Danger zones; prohibit urban or agricultural development. Remove as much existing development as possible	Setting up a monitoring system; public information meetings; hazard mapping; set up an evacuation plan; construction of defense works against hazard (dikes) or re-naturalizing the environment (mangroves, bank vegetation, etc.)

3.1 Relating CURmax and Hmax: the linear theory

According to the linear theory of Airy (1845), the water particle velocity *CUR* takes the following expression in its periodic form:

$$CUR = \frac{2\pi \cdot a}{T} \cdot \frac{\cosh\left[\frac{2\pi}{\lambda}(z+h)\right]}{\sinh\left[\frac{2\pi}{\lambda}(h)\right]} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{\lambda}t\right), \tag{2}$$

where *a* is the wave amplitude, which will be named *Hmax* at its maximum, *T* is the wave period, λ is the wavelength, *z* is the vertical coordinate pointing upward in the water column ($z=0$ at the mean sea level MSL, $z=-h$ at the sea bottom), and *h* is the local water depth. At $z=0$, the MSL or the ground in case of inundation, the maximal current occurs at the crest or trough phase $\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{\lambda}t = \pm\frac{\pi}{2}\right)$, and takes the form:

$$CURmax = \left| \frac{2\pi \cdot Hmax}{T \cdot \tan h\left[\frac{2\pi}{\lambda}h\right]} \right|. \tag{3}$$

At the same time, within the linear long wave approximation the wave is propagating at an approximate velocity $c = (g \cdot h)^{1/2}$. For long waves such as tsunamis, within the linear and conservative theory of Airy (1845), while approaching the coast, as *h* reduces from h_1 to h_2 , the wavelength decreases on the basis of the ratio $(h_2/h_1)^{1/2}$, the wave height amplifies by $(h_1/h_2)^{1/4}$ (Green's law), while the period *T* is conserved (inner period of the oscillator). Consequently, the water current is likely to be amplified and may possibly cause more damage to marine structures within the coastal area than offshore.

For long waves, $h \ll \lambda$, we obtain: $\lim_{h \rightarrow 0} \tan h\left[\frac{2\pi}{\lambda}h\right] = \frac{2\pi h}{\lambda}$. Taking the basic wave expressions $\omega = 2\pi/T$, $c = \omega/k$, $\lambda = 2\pi/k$, and $c = (g \cdot h)^{1/2}$, ω being the angular frequency of the tsunami and *k* its wave number, relation (3) becomes:

$$CURmax = (g/h)^{1/2} Hmax. \tag{4}$$

At this stage, it is fair to mention that the linear theory does not make the difference between climbing and rundown maximum currents. The reason is that the trivial solution (2) is monochromatic which means that there is no asymmetry between the current at crests (climbing) and those at troughs (receding): Like short surface waves, the crests should be sharper than troughs yielding larger horizontal currents during rundown.

Without loss of generality, we conjecture that expression (4) applied to real number *h* indicates that the abacuses cover (densely) the entire 2D domain (*Hmax*, *CURmax*) when *h* varies from zero (the coastline, vertical axis) to "infinity" (offshore, horizontal axis). Consequently, within the entire marine domain, we should not be able to reduce the domain of validity (of occurrence) of the couple. Any subdomain or any regression curve of dimension <2 would not make sense. However, if we take into consideration a particular area only, there are excluded domains. For example, within the coastal area $0 < h < 5$ m, the entire conic area (abacus $h=5$ m, 0, horizontal axis) can be excluded, while within the mooring and sailing area $h > 5$ m, the conic section area (vertical axis, 0, abacus $h=5$ m) may be excluded. Thus, the linear theory indicates that it is possible to locally constrain and reduce the domain of validity (*Hmax*, *CURmax*). However, how far is the domain of

validity of the linear theory? To answer this, we examine an example of fully nonlinear computations.

3.2 Relating CUR_{max} and H_{max} : a fully nonlinear example as a case study, December 26, 2004, Sumatra tsunami impact on Sri Lanka

As a case study, we have chosen the tsunami impact on the coast of Sri Lanka following the December 26, 2004, M_w 9.3 megathrust, along with the numerical results of the tsunami modeling of Ioualalen et al. (2010) who used the earthquake rupture parameters that were proposed by Grilli et al. (2007) and Ioualalen et al. (2007).

The simulations of Ioualalen et al. (2010) were carried out thanks to the *Funwave* fully nonlinear Boussinesq tsunami model (Wei and Kirby 1995; Wei et al. 1995), using a relatively coarse resolution of 0.25 arcminutes (approx. 450 m) because their version of *Funwave* imposes a uniform grid spacing. The authors discussed this matter. As with most tsunami numerical models, both CUR_{max} and H_{max} are available on output at each node of the computational domain. The numerical simulation covers the entire Gulf of Bengal, including the earthquake source area off the shore of Sumatra, Indonesia. We report in Fig. 2 the spatial distribution of H_{max} and CUR_{max} around Sri Lanka, which is located at the western border of the computational grid. The results will be discussed later.

In Fig. 3, we reported the couples (H_{max} , CUR_{max}) for two areas: The first is for water depths $h < 10$ m (including eventual inundated area for water depth where h is negative) and the second is for water depths $10 \text{ m} < h < 100$ m. Areas of $h < 10$ m and $h < 100$ m are arbitrarily chosen because they are typical occupied areas, i.e., beach occupation and ship at deck and mooring area, respectively. Note that, at each grid point, the computed nonlinear CUR_{max} corresponds to the maximum absolute value. Thus, it can be associated either

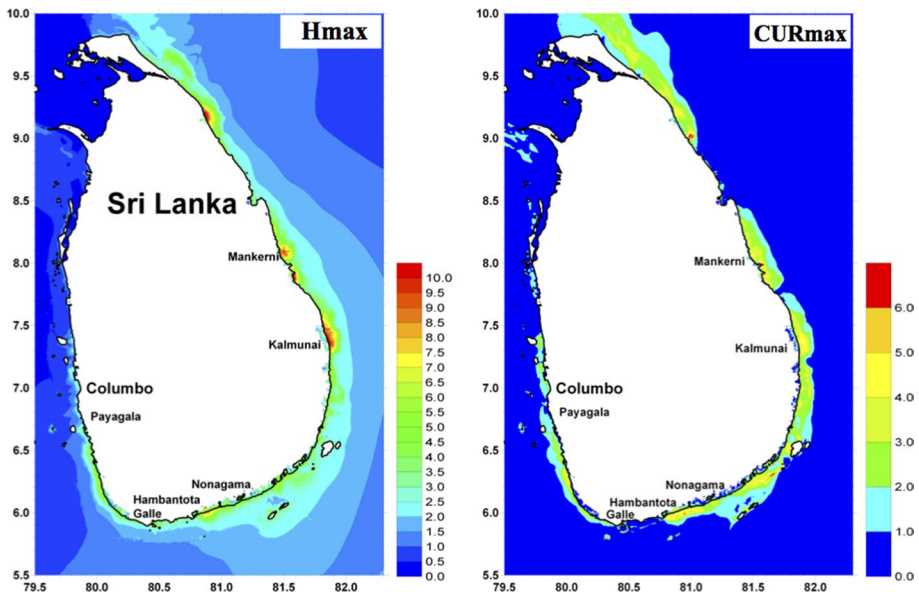


Fig. 2 Simulated maximum tsunami amplitude (H_{max} , m) and maximum currents (CUR_{max} , m s^{-1}) for Sri Lanka coastal area following the December 26, 2004, Sumatra megathrust

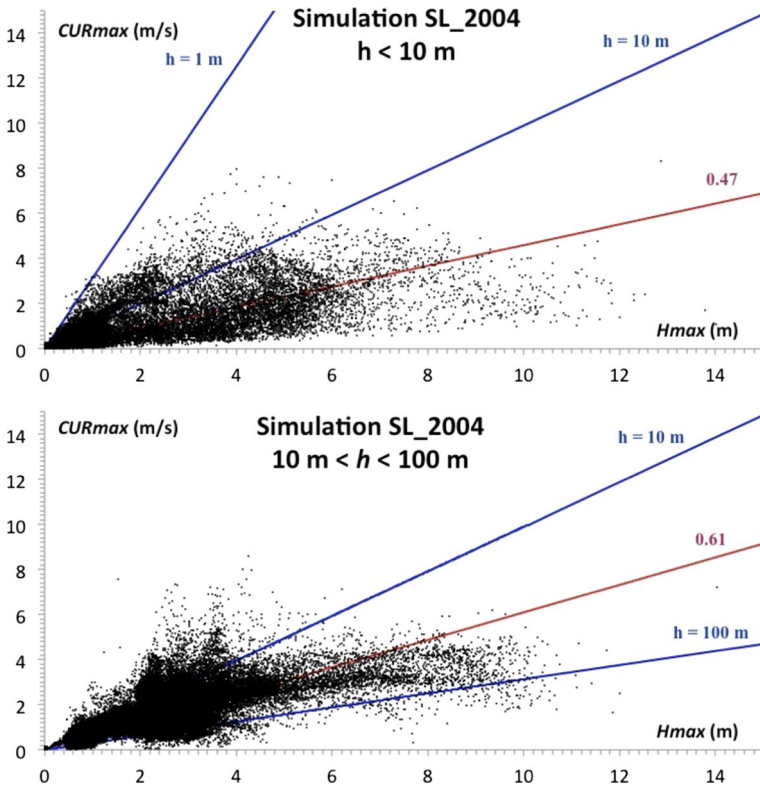


Fig. 3 Simulated tsunami maximum current (CUR_{max}) vs. maximum tsunami amplitude (H_{max}) for the area of Sri Lanka following the December 26, 2004, Indian Ocean megathrust. Only grid points of water depths (top) $h < 10$ m (including inundated points where the water depth is negative) and (bottom) $10\text{ m} < h < 100$ m are reported. Few abacuses based on linear theory (Eq. (4)) are reported ($h = 1, 10$ and 100 m). Estimates of the linear regression curves (if they exist) are also plotted for reference (in red)

with the climbing wave or with the receding one. No distinction was made although it more generally corresponds to rundown currents due to wave crest–trough asymmetry. Besides, since the linear theory does not resolve the issue, we took the same option for the nonlinear case. Such precision is beyond the scope of the study, and it can be a matter of extensive study itself.

Very near the coast, for $h < 10$ m, the linear regression curve of 0.47 slope is plotted for reference. Most points (H_{max}, CUR_{max}) are located outside the “linear” cone section, which is bracketed by the vertical axis (abacus $h = 0$), the origin *zero*, and abacus $h = 10$ m (Eq. (4)). There, the tsunami does not behave linearly for at least one trivial reason: While approaching the coast, the wave amplitude amplifies and the wavelength lowers, increasing the wave steepness (ratio wave amplitude vs. wavelength); the wave turns more nonlinear, and Eq. (4) is no more valid within this water depth range. In addition, in very shallow water and near the coastline, site effects may be crucial, and wave dissipation due to bottom friction and wave breaking increases drastically. While Eq. (4) is not relevant within this very shallow range of depth h , neither is the coarse simulation of 0.25 arcminutes likely to provide an accurate solution of (CUR_{max}, H_{max}), which should be very sensitive to the local site effects. It is not likely that the simulation

is able to reproduce small current vortices due to hypothetical small-scale coastal features or marine infrastructures. It is also fair to say that there can be areas where such a coarse grid could be sufficient: in cases of very low water depth and topography gradients and of large-scale features with smallest characteristic length of the order of half a kilometer. The coast of Sri Lanka includes such areas (discussed later).

At larger depths, $10 \text{ m} < h < 100 \text{ m}$, the tsunami wave is less steep and the dissipative processes do not act significantly. The wave is more likely to be described by the linear theory of Eq. (4): the linear regression curve of slope 0.61, and most of the points (H_{max} , CUR_{max}) are located inside the cone section bracketed by abacus $h = 10 \text{ m}$, origin zero, and abacus $h = 100 \text{ m}$. The left part of the domain (H_{max} , CUR_{max}) is nearly empty. In that case, we might be able to reduce the dimension of the (H_{max} , CUR_{max}) solution points from 2 to a lower value.

However, in both water depth configurations, the more the points “escape” from the linear theory to the left side of the surface, the closer they are to the coast and the more significant and prevalent they are in terms of tsunami hazard. Yet in these very shallow water configurations, the wave currents may be large even at low wave amplitude (Fig. 3). Therefore, the damage due to currents may be more important than that due to the wave amplitudes. It is worth to note that Boschetti et al. (2020) obtain the same conclusions with a better resolved tsunami case study, that is, a 40 m grid resolution for the Ligurian sea tsunami hazard. The only difference is their larger regression slopes (> 0.6 compared to our 0.47) which means that the present current might be under-estimated.

Consequently, we may conjecture the following: (a) within the overall marine domain, as in the linear theory, the domain (H_{max} , CUR_{max}) is two dimensional, and therefore, the full set of values must be considered. (b) Locally, within a certain h -range of water depth, unlike the linear theory, no couple (H_{max} , CUR_{max}) may be always excluded.

As a result, over a maritime domain it is not possible to obtain empty areas (and ignore them) within the surface (H_{max} , CUR_{max}). There is no a priori exclusion zone, and thus, there is no possibility to physically reduce or constrain the (H_{max} , CUR_{max}) section.

4 A new intensity scale based on H_{max} and CUR_{max}

First, we discuss the action of currents, degree of flood, and maximal tsunami amplitude:

A. The tsunami current

- a. The approximate expression (4) of the maximum current indicates that the higher the wave, the greater the importance of current and therefore the less resistance of people and structures to this hazard (increased intensity of hazard). It is likely that strong currents however low the flood level and could be more destructive than moderate or low induced current floods.
- b. Maritime navigation would also become more difficult: It would limit rescue at sea as well as the possibility of leaving a port or a harbor to shelter offshore.
- c. The thrusting potential of large objects would also be increased, amplifying the intensity of this downstream hazard because the waters would be more “loaded.”

B. The maximal tsunami amplitude

- a. The higher the tsunami amplitude, the more likely flooding is to occur. This is particularly true when the wave encounters obstacles such as dikes and vertical port walls; a wave higher than the obstacle favors its progression on the ground. In the opposite case, the wave is reflected, inhibiting flooding.
- b. Trivially, the higher the tsunami amplitude, the greater the volume of water impacting a person and structure will be and therefore the greater the impact (increasing intensity of the hazard) with increased difficulty or even impossibility of escaping from it. It is enhanced by the carrying capacity of a tsunami with almost uniform and horizontal speed (Airy 1845), i.e., the water is loaded.
- c. When the wave withdraws, the higher the tsunami amplitude, the more it will carry and bury of what it has captured.

Regarding flooding, its extension is primarily a result of tsunami amplitude and not current strength. The impacts due to currents and tsunami amplitude extend spatially with them as the flood increases. Thus, in our study, we will choose to consider flooding as a result of hazard, one of the determinants of intensity, and not as a parameter of it. The parameters will be the maximum wave currents and the maximum tsunami amplitude.

The tsunami intensity scale we wish to develop is intended to be used more specifically for tsunami hazard studies based on numerical simulations of tsunami propagation and impact. In that context, the data that are systematically available are the maxima of tsunami amplitudes and currents. The brief description in the previous chapter of existing scales based on the review of Papadopoulos and Imamura (2001), along with our analysis of the couple (H_{max} , CUR_{max}), will be the basis of our development. To achieve this objective, we matched the scales of Lynett et al. (2014), Papadopoulos and Imamura (2001) and Shuto (1993), and the PFRs (PPFR 1999; PPFR-Thau 2012).

The PFRs consider water levels and induced currents for fluvial floods, a major French hazard (PPFR 1999; PPFR-Thau 2012). Indeed, the tsunami hazard can also mobilize large volumes of water with high flow rates that may occur suddenly. At sea, the PFR maximum water level can be associated with the difference between the water level at the highest crest and the resting sea surface, before the tsunami arrives. It is thus represented by the maximum tsunami amplitude H_{max} . At inland, in case of tsunami inundation, the PFR water level at any location can be represented by the tsunami flow depth, which is the actual water column depth versus the ground. At this location, the tsunami water depth is represented by the incoming crest amplitude, which is also our H_{max} variable but relative to the ground: $H_{max}^* = H_{max} - \text{ground altitude}$. For simplicity, we will call our variable H_{max} throughout, and it will be related to the resting sea level at sea and to the ground elevation inland in case of inundation. At the coastline and at harbors, the most common cases in the absence of inundation, H_{max} is strictly the maximum tsunami amplitude as defined by Iida et al. (1967), Papadopoulos and Imamura (2001), and Shuto (1993). The PFR scale is dedicated to populations and their ability to escape, or not, from flooding or submersion (Fig. 1). These include the vulnerability of people depending on their age and physical shape; a child and an elderly person will quickly be limited in their movements beyond a few tens of cm of water and a current larger than 0.25 m s^{-1} , while a physically fit adult will be able to move in up to 0.75 m of water and in a current of up to 1 m s^{-1} . The limits of extraction of the danger are quickly reached; beyond an inundation depth of 1 m and a speed of 1.5 m s^{-1} ,

the populations are considered to be in a position of extreme risk. However, one must be careful; an inundation depth of 2 m will endanger a person in the same way as one of 6 m. On the other hand, an inundation depth of 6 m will endanger people who would have been safe at a water level of 2 m even at low current, for example a person on the first floor of a building. Thus, in the scale we want to build, beyond a water depth of 2 m, we will define other intensity levels (> 3) for very weak currents. This is because the number of victims is likely to grow with inundation depth.

In addition, this intensity should be extended to damages other than human, including the potential damage at sea to boats and other marine structures, but also the damage that these could cause if they broke off their lines, and thus became mobilized by the tsunami. Such threats are likely to occur beyond the PPF water level and current limits above.

To operate the extension, we first drew on the work of Lynett et al. (2014), which relates the observed damage to moving marine structures during historical events with currents (Table 2). These allow us to set new thresholds, including the first from which damage is observable: 3 knots, that is, 1.5 m s^{-1} . This minimum threshold of impact is particularly interesting, as it corresponds to the threshold of the PPF from which the damage to the population is extreme (Fig. 1). It is therefore the natural transition threshold between the onshore intensity of the PPF and the offshore intensity of Lynett et al. (2014), including potential inundated areas which should be considered as extensions of the sea.

A considerable number of studies have reported damages caused by waves of high amplitudes. We chose to focus on two scales: that of Papadopoulos and Imamura (2001) and that of Shuto (1993). The first, very detailed, offers a large number of levels. This will help us to detail the levels of the new intensity scale. The second, also discussed in Papadopoulos and Imamura (2001), makes it possible to link the two intensity scales and the wave amplitude. Our balance sheet establishes links between different intensity scales, maxima of wave height, and currents (Table 4). It allowed us to determine domains of wave amplitude and current for each intensity level. Once the domains and thresholds were determined, it was possible to propose a seven-level intensity scale (Fig. 4, Table 5). We have classified and reported most of the valuable information gathered from Lynett et al. (2014), Papadopoulos and Imamura (2001) and Shuto (1993), and the PPFs (PPF 1999; PPF-Thau 2012) in Table 5, as pertinent to our intensity scale. We synthesized different levels considering the following aspects: (1) the possible tsunami impacts (potential human casualties on land, building damage on land, and structure damage at sea) which could be useful for risk evaluation; (2) the tsunami perception which is crucial for minoring the vulnerability. At this stage, it is important to note that all the above intensity scales and ours are coherent with one another. Of course, their utility depends on the tsunami arrival time and on the population's education regarding risk; (3) the scale is complemented by suggestions related to territorial management and prevention, which were also found in the sources cited above.

5 Discussion

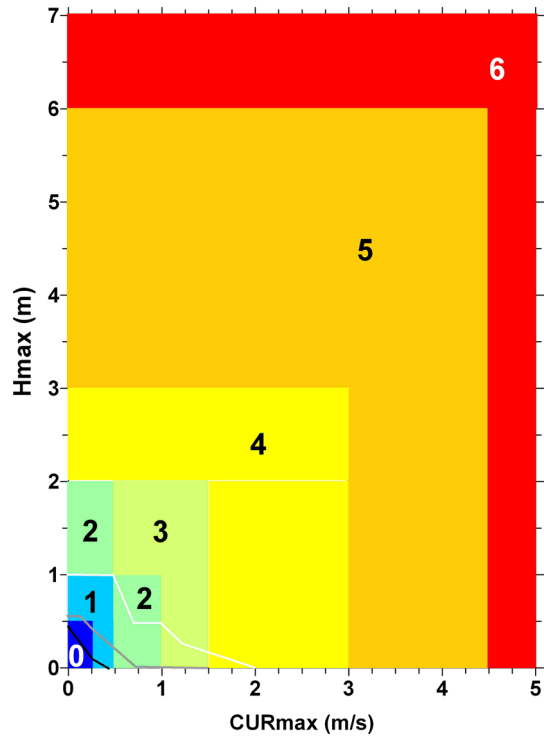
As a concrete case study, we have at our disposal the numerical impact results of the 2004 Indian Ocean tsunami on the coast of Sri Lanka. The simulations operated by Ioualalen et al. (2010) provide us with the Z_{max} field at sea and inland, that is, the water level versus the mean sea level, along with CUR_{max} . The H_{max} field may then be deduced by subtracting the land elevation of the computational domain from Z_{max} .

Table 4 Connection between intensity scales of Lynett et al. (2014), Papadopoulos and Imamura (2001) and Shuto (1993), and PFRs (PPFR 1999; PPFR-Thau 2012)

Proposed intensity	Lynett et al. (2014) (<i>CURmax</i>)	Papadopoulos and Imamura (2001)	<i>Hmax</i> (m)	Shuto (1993)	PPFR	Balance
0	0, 1 (<1.5 m s ⁻¹)	I	< 1 m	0	[0; 0.5] m [0; 0.25] m s ⁻¹	< 0.5 m < 0.25 m s ⁻¹
1	0, 1 (<1.5 m s ⁻¹)	II, III	< 1 m	0	[0; 5; 1] m [0; 0.25] m s ⁻¹	[0.5; 1] m [0; 0.25] m s ⁻¹
2	0, 1 (<1.5 m s ⁻¹)	IV	< 1 m	0	[0; 1] m [0.25; 0.5] m s ⁻¹	[0; 1] m [0.25; 0.5] m s ⁻¹
3	0, 1 (<1.5 m s ⁻¹)	V	< 2 m	1	[1; 2] m [0; 5; 1] m s ⁻¹	[1; 2] m [0; 5] m s ⁻¹
4	2, 3 ([1.5; 3] m s ⁻¹)	VI, VII	[2; 3] m	1/2	> 2 m > 1 m s ⁻¹	[0; 2] m [1; 1.5] m s ⁻¹
5	3, 4 ([3; 4.5] m s ⁻¹)	VIII, IX	[3; 6] m	2	[1; 2] m [0.5; 1] m s ⁻¹	[2; 3] m [0; 1.5] m s ⁻¹
6	4, 5 (>4.5 m s ⁻¹)	X, XI, XII	> 6 m	3/4/5	> 2 m > 1 m s ⁻¹	[0; 3] m [1.5; 3] m s ⁻¹
					[3; 6] m [0; 3] m s ⁻¹	[3; 6] m [0; 3] m s ⁻¹
					> 2 m > 1 m s ⁻¹	[0; 6] m [3; 4.5] m s ⁻¹
					[1; 2] m [0.5; 1] m s ⁻¹	> 6 m [0; 4.5] m s ⁻¹
					> 2 m > 1 m s ⁻¹	> 0 m > 4.5 m s ⁻¹

The result is our intensity scale, which combines impacts both on populations and on marine structures according to the maxima of tsunami amplitude *Hmax* and tsunami-induced currents *CURmax* (in bold)

Fig. 4 Proposed tsunami intensity scale as a function of magnitude, based on the maximum tsunami amplitude H_{max} (m) and currents CUR_{max} ($m\ s^{-1}$) (Table 5). The black, gray, and white curves represent the limits of upright movement of a child or elderly person, a non-sporty adult, and a sporty adult under stress, respectively



Evidently, our intention is not to provide an absolute tsunami mapping of the area, as their computational grid resolution of 0.25 arcminutes is relatively coarse. Rather, we simply wish to show how to apply our intensity scale and methodology. In the meantime, the accuracy of the results of Ioualalen et al. (2010) will be discussed. In Table 6 are presented the Z_{max} observations and $Hobs$, which have been sampled across numerous sites in Sri Lanka by Papadopoulos et al. (2006). The numerical results of Ioualalen et al. (2010) are also reported at the same locations, that is, the simulated Z_{max} and deduced H_{max} , along with CUR_{max} . Although the simulation is based on a coarse ~ 450 m grid resolution, the comparison between $Hobs$ and Z_{max} is promising (Table 6). The mean and standard deviation are very similar ($\sim 10\%$ difference), and the correlation coefficient of 0.51 with a root mean square error of 33% is acceptable. With the same coarse grid resolution of 0.25 arcminutes, Ioualalen et al. (2007) obtained even better results for the Andaman coast of Thailand during the same 2004 mega-tsunami.

Although a better grid resolution would have been more suitable for the tsunami mapping, the Z_{max} and H_{max} results of Ioualalen et al. (2010) are sufficient for our purpose. We may speculate two possible explanations for the relative robustness of the numerical results despite such coarse resolution: (1) Generally speaking, the 2004 mega-tsunami, of an estimated initial wavelength of more than 100 km (Ioualalen et al., 2017), might also have activated large spatial scales; thus, requiring lower grid resolution and (2) also generally speaking, at low latitudes such as in Sri Lanka and Thailand, the Rossby radius of deformation $Rd = (g \cdot h)^{1/2} / f$ is very large for weak Coriolis

Table 5 Proposed tsunami intensity scale and potential damage to populations and land and marine structures. See Fig. 4 and Table 4 (last column) for H_{max} and CUR_{max} levels

Tsunami intensity	Human damage on land (PPFR 1999; PPRF-Thau 2012; Papadopoulos and Imamura 2001)	Damage on land (Shuto 1993; Papadopoulos and Imamura 2001)	Damage at sea (Lynett et al. 2014, Table 2; Papadopoulos and Imamura 2001)	Tsunami perception (Lynett et al. 2014, Table 2; Papadopoulos and Imamura 2001)	Territorial management, prevention (Table 3) (PPFR 1999; PPRF-Thau 2012)
0	Possible upright displacement but children and older people may face difficulties	No damage	No damage to marine structures	None felt	–
1	Very difficult displacement for children and the elderly and difficult for a non-sporty adult Very low probability of victims	No damage	No damage to marine structures	At sea: small buoys moved Felt by few to most people on board small vessels Possibly observed on land	Caution areas: limit urban or agricultural development as much as possible Setting up a monitoring system; public information meetings; hazard mapping
2	No possible displacement for a child or a senior, very difficult for a non-sporty adult and difficult for a sporty adult Increased number of potential victims	No damage	No damage to marine structures Few small vessels move slightly onshore	At sea: small buoys moved Felt by all on board small vessels and by few people on board large vessels Observed by most people on land	Danger zones: prohibit urban and agricultural development Setting up a monitoring system; hazard mapping; set up an evacuation plan
3	No possible displacement for a child or senior, nearly impossible for a non-sporty adult and very difficult for a sporty adult Increased number of potential victims	Limited flooding of outdoor facilities (gardens) and near-shore facilities Limited flooding of cultivated land Traces of sand layer are left behind	Nearly no damage to marine structures (few boat shocks) Some small vessels move onshore	At sea: small buoys moved Felt by all on board large vessels Observed by all on the coast Few people are frightened and run to higher ground	Danger zones: prohibit urban or agricultural development. Remove as much existing development as possible Setting up a monitoring system; public information meetings; hazard mapping; set up an evacuation plan; construction of defense works against hazard (dikes) or re-naturalizing the environment (mangroves, bank vegetation, etc.)

Table 5 (continued)

<p>Tsunami intensity</p>	<p>Human damage on land (PPFR 1999; PPRF-Thau 2012; Papadopoulos and Imamura 2001)</p>	<p>Damage on land (Shuto 1993; Papadopoulos and Imamura 2001)</p>	<p>Damage at sea (Lynett et al. 2014, Table 2; Papadopoulos and Imamura 2001)</p>	<p>Tsunami perception (Lynett et al. 2014, Table 2; Papadopoulos and Imamura 2001)</p>	<p>Territorial management, prevention (Table 3) (PPFR 1999; PPRF-Thau 2012)</p>
<p>4</p>	<p>Standing almost impossible for all people; ability to move while swimming if the current is not too strong Possible impacts with small drifting objects Increased number of potential victims because of greater numbers in the raised area</p>	<p>Damage and flooding in a few to many wooden structures Most masonry buildings withstand grade 1 damage Objects of variable size and instability overturn and drift Few aquaculture rafts washed away Sand layers and pebble accumulation</p>	<p>1–2 docks/small boats to moderate dock boat damage (<25% of docks/vessels damaged) and/or mid-sized vessels off moorings damaged Most small vessels move violently onshore</p>	<p>At sea: large buoys moved Most people are frightened and run to higher ground</p>	
<p>5</p>	<p>Standing impossible for all people; ability to move while swimming if the current is not too strong Few to many people are washed away Possible impacts with big drifting objects Increased number of potential victims because of greater numbers in the raised area</p>	<p>Beach erosion, extensive flooding, slight damage in tsunami control forest, stop drifts. Many aquaculture rafts washed away, few partially damaged Most wooden structures are washed away or demolished Damage of grade 2–3 in a few masonry buildings. Most RC buildings sustain damage, a few sustain damage of grade 1–2, and flooding is observed</p>	<p>Moderate to major dock boat damage (<50% of docks/vessels damaged) and/or mid-sized to large vessels off moorings damaged Most large vessels move violently onshore</p>	<p>At sea: large buoys moved All people escape to higher ground</p>	

Table 5 (continued)

Tsunami intensity	Human damage on land (PPFR 1999; PPF- <i>Thau</i> 2012; Pappopoulos and Imamura 2001)	Damage on land (Shuto 1993; Pappopoulos and Imamura 2001)	Damage at sea (Lynett et al. 2014, Table 2; Pappopoulos and Imamura 2001)	Tsunami perception (Lynett et al. 2014, Table 2; Pappopoulos and Imamura 2001)	Territorial management, prevention (Table 3) (PPFR 1999; PPF- <i>Thau</i> 2012)
6	Standing impossible for all people; ability to move while swimming if the current is not too strong Most to all people are washed away Increased number of potential victims because of greater numbers in the raised area	Cars overturned and drifted, oil spills, fires start Damage of grade 4–5 in many masonry buildings. Few to many RC buildings suffer damage of grade 3–5	Major to extreme dock/off-mooring boat damage (> 50% of vessels damaged) Many collide with buildings	At sea: large buoys moved General panic	

Table 6 (*n*) Field observations *Hobs* at sampled sites over the coast of Sri Lanka following the 2004 Indian Ocean tsunami (Papadopoulos et al. 2006)

Location	Long. (°E)	Lat. (°N)	<i>Hobs</i> (m)	<i>Hmax</i> (m)	<i>Zmax</i> (m)
1. Moratuwa	79.8898	6.7479	5.5	1.9	1.9
2. Wadduwa resort	79.9208	6.6779	4.5	3.8	3.8
3. Kalutara north	79.9492	6.6060	4	3.9	3.9
4. Katukurunda (Kalutara S.)	79.9512	6.5656	4.5	2.2	3.6
5. Payagala	79.9775	6.5317	5.5–6.0	2.6	3.7
6. Berawala	79.9834	6.4863	6.0	1.9	4.5
7. Bentota north	79.9954	6.4241	5.5	0.47	3.9
8. Balapitiya beach	80.0358	6.2737	5.3	0.8	7
9. Ambalangoda	80.0470	6.2457	6.0	1.9	6.7
10. Seenigama	80.0642	6.2006	7.0	1.4	7.0
11. Rathgama/Dodanduwa	80.1461	6.0858	4.5	3.5	4.6
12. Galle north	80.1885	6.0476	4	2.2	5.9
13. Galle Center	80.2163	6.0252	6	2.8	6.6
14. Galle Fort	80.2214	6.0363	10	2.2	6.1
15. Punawatunna	80.2458	6.0260	3.5	3.7	6.5
16. Jayaduwa/Habaraduwa	80.3085	5.9938	3	0.3	1.9
17. Koggala	80.3324	5.9841	6	2.2	4.8
18. Ahangama	80.3607	5.9736	3.0	0.4	4.0
19. Weligama/Kamburugamu	80.4314	5.9724	4.0	4.2	4.2
20.	80.4942	5.9411	5.5	3.7	3.7
21. Matara/Gandara	80.5830	5.9315	7.5	6.2	6.2
24. Hambantota	81.0976	6.1180	10	1.8	5.7
25.	81.1263	6.1248	11	2.3	5.7
26. Pottuvil	81.8443	6.8754	9.0	6.1	6.1
27.	81.8439	6.8742	7	6.1	6.1
28. Komari	81.8636	6.9762	> 8.0	6.2	6.2
29. Akkaraipattu	81.8598	7.2095	> 4.5	1.21	5.0
30. Sinnamuhattuvaram	81.8599	7.1732	7.0	2.8	5.7
31. Addacachchena	81.8636	7.2500	> 5.0	5.5	5.5
32. Oluvil	81.8661	7.2889	6	6.7	6.7
33. Karativu	81.8476	7.3841	7.0	4.7	6.4
35. Kaluwanchikudi	81.8056	7.5209	7	1.9	9.9
36. Cheddipalayam	81.7900	7.5837	> 6.0	6.4	6.4
37. Kallady	81.7142	7.7238	> 6.0	4.6	4.6
38. Kalkudah	81.5661	7.9190	> 7.0	7.4	13.5
39. China Bay	81.1922	8.5717	3.2	3.0	3.0
40. China Bay Ferry	81.1912	8.5125	3.3	1.6	3.7
41. Trincomalee	81.2368	8.5761	3.4	0.8	3.0
42. Uppuveli	81.2189	8.6159	> 4.0	5.5	5.5
43. Irrakkakandi	81.1769	8.7253	4.0	3.1	3.1
44. Nilaveli	81.2032	8.6766	5.0	2.8	2.8

Hobs is a tsunami surface elevation; simulated tsunami maximal amplitude *Hmax* at the nearest locations and associated tsunami surface elevation, *Zmax* (Ioualalen et al. 2010)

Table 7 Basic statistics comparing (*n*) observed tsunami surface elevation *Hobs* (Papadopoulos et al. 2006) and simulated ones *Zmax* (Ioualalen et al. 2010) (Table 6)

	<i>Hobs</i>	<i>Hobs</i> versus <i>Zmax</i>
Mean (m)	5.7 m	5.1 m (− 10%)
STD (m)	1.9 m	1.7 m (− 11%)
RMSE		1.9 m (33%)
Corr		0.51

The mean tsunami maximal amplitude is denoted by Mean, the standard deviation by STD, the root mean square error by RMSE, and the cross-correlation coefficient by Corr. The usual RMSE representing

the model skill is defined as $\sqrt{\sum_{i=1,n} (Hobs_i - Hmax_i)^2/n}$

parameter *f*, making oceanic and atmospheric circulation nearly zonal, that is, unidirectional. As a result, the coastal areas encounter a more “linear and regular erosion” due to wind and waves, requiring a lower grid resolution than at high latitude.

The two most impacted sites in Sri Lanka were Kalmunai and Hambantota, located as illustrated in Fig. 2. There, the maxima of tsunami amplitudes were estimated to be approx. 6–7 m and 6 m, respectively (Liu et al. 2005). According to Ioualalen et al. (2010), the large amplitudes could be explained by local wave focusing. In Kalmunai, the tsunami flooded an area extending at least 1500 m inland and damaged structures. Kalmunai also encountered significant inundation, and the lagoon near the town was swept by debris. Over 1000 victims have been reported. Ioualalen et al. (2010) simulated a 5 m amplitude, and we obtain a 5 m s^{−1} current at Kalmunai and a 9 m wave height for a 5 m s^{−1} current at Hambantota (Fig. 2). At both sites, the conjunction of large amplitudes and strong current yields an extreme 6-intensity (Fig. 5, Table 5), which may explain the heavy damage.

In Payagala, on the western coast (location illustrated in Fig. 5), the amplitudes were weaker (approx. 5 m), but the area suffered 800 fatalities (Liu et al. 2005), due to an accident involving a coastal train full of passengers that happened to be passing at the time of the tsunami arrival. There, Ioualalen et al. (2010) simulated a 4 m maximum amplitude and we obtain a strong 3 m s^{−1} current (Fig. 2). The simulated intensity of 4–5 (Fig. 5) is very strong, although not extreme (Table 5). However, it may explain the train accident, which should be considered as an amplification factor of damage.

At these three sites, only observed amplitudes were available, no tsunami currents. However, the impact was so severe that the tsunami currents were certainly significant. Inundation alone cannot explain structure destruction, debris sweeping, and a train crash. The statement is reinforced by the fact that many other areas that encountered significant wave heights were less impacted: Around Nonagama, a very high 8 m amplitude was observed (Liu et al. 2005), 4 m waves are simulated by Ioualalen et al. (2010), and we obtain 1–2 m s^{−1} currents (Fig. 2). A non-extreme 5-intensity is obtained due to potentially weak currents as simulated. Obviously, our intensity scale was built independently of the grid resolution or the accuracy of the tsunami modeling. Trivially, the more accurate the tsunami simulation, the better the intensity scale would be accurate and useful. Boschetti et al. (2020) were the first to apply it, for the case of the Ligurian tsunami hazard with a satisfactory 40 m grid resolution.

Results and observations are very similar around Galle: 5 m wave heights observed, 7 m simulated, and 1–2 m s^{−1} obtained, yielding the same 5-intensity here. Around Mankerni, 5.5 m amplitudes were observed, while 9 m ones are simulated and a strong 5 m s^{−1} is obtained, yielding an extreme 6-intensity, yet no extreme damage was reported.

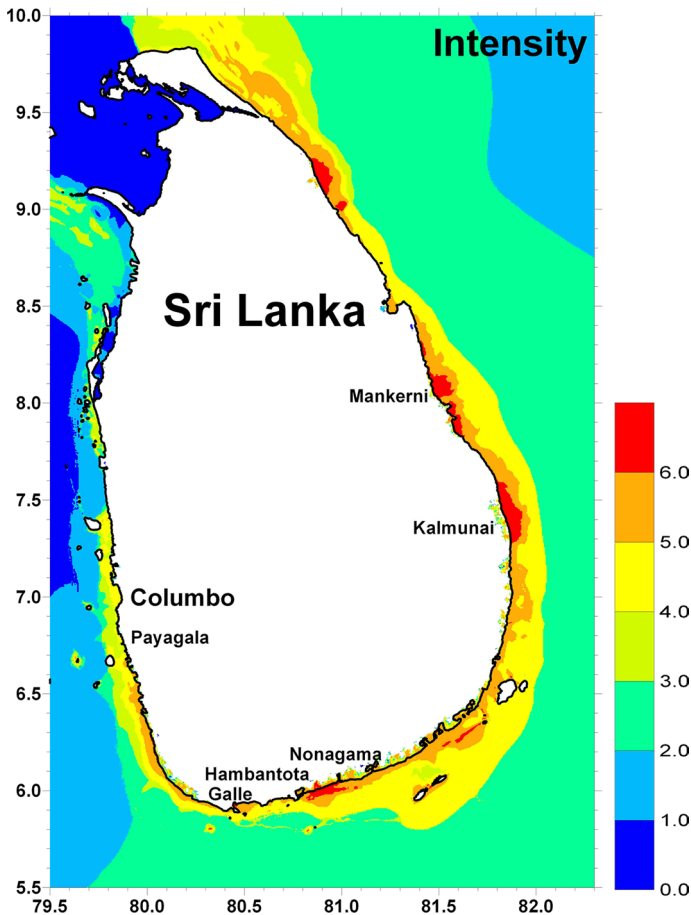


Fig. 5 Mapping of the tsunami intensity for Sri Lanka coastal area following the December 26, 2004, Sumatra megathrust. The scale is displayed in Fig. 4 and Table 7

6 Conclusions

Similar to other natural hazards such as wind, earthquakes, or swell, there is a need to build a tsunami intensity scale to hierarchize potential damage. It is even more useful if it is associated with a magnitude scale, in which case the potential damage could be related to the physical parameters of the tsunami and the vulnerability of populations and structures to the tsunami hazard. The physical parameters have first to be identified; besides vulnerability, the potential damage to populations and structures can be the result of the mechanical energy of the tsunami that is exerted on them. The energy flux of a surface wave across a vertical section depends on the integral of the water pressure and the water particle velocity over the section, that is, the combination of the hydrostatic and kinematic pressures. As a result, maximal damage could be related to the maxima of the tsunami depth H_{max} and induced current CUR_{max} . Tsunami depth H_{max} is not always possible to observe. The easiest “water height-like” property to observe is generally the run-up, which is clearly visible as the highest inundated point well after the event. On the contrary, numerical simulations

give direct access to the tsunami depth. The tsunami-induced current is also difficult to observe at a synoptic scale, that is, not only punctually where a video is available on a site for instance. In the same way, numerical simulations also provide the effective current at every point of the computational grid. As simulated CUR_{max} and H_{max} are systematically available, we intended to propose tsunami intensity scale specifically dedicated to numerical modeling, bearing in mind that numerical simulations are improving considerably, i.e., their physics, their gridding procedure, the computational facilities, and the bathymetric and topographic datasets.

To build a tsunami intensity scale based on CUR_{max} and H_{max} , it is necessary, or at least of interest, to identify the areas of occurrence in the section (CUR_{max} , H_{max}). At least offshore, we have first shown that the section can be densely occupied without a priori exclusion zones. For that purpose, we have applied the linear theory of Airy (1845) and nonlinear case study, that is, the impact of the 2004 Indian Ocean tsunami on the coasts of Sri Lanka.

The basis of the proposed intensity scale was inspired by the French PFRs. Public authorities have accumulated substantial experience based on annual river flooding during springtime. In particular, a scale based on the water depth and current has been used for decades, including identified thresholds. The highest intensity level starts beyond the threshold ($H_{max}=2$ m, $CUR_{max}=1.25$ m s⁻¹). The analogy between river flooding and tsunamis is straightforward, as tsunamis are considered as long waves with negligible vertical stratification. As is commonly accepted, they can be associated with a homogeneous horizontal current. Here, again, the analogy requires that the tsunami depth H_{max} is used instead of other quantities such as the run-up or the wave elevation.

The PFR intensity scale is more dedicated to flooded areas, that is, inland with relatively low-level thresholds beyond which the damage is identical. At the shoreline and at sea, former scales have been developed with extended thresholds, in particular the so-called Imamura–Iida unbounded scale for H_{max} , and the one of Lynett et al. (2014) for CUR_{max} that includes an extended threshold of 4.5 m s⁻¹. Using a coherency analysis, the two distinct scales in H_{max} and CUR_{max} have been integrated to the PFR one, obtaining an intensity scale that applies for flooded areas and also at sea. Ultimately, the integration of the new intensity scale and the existing intensity scales of Shuto (1993) and Papadopoulos and Imamura (2001) allowed us to derive a new intensity scale that describes *expected* damage depending on the degree of magnitude. Potential damage includes human and structural damage inland during tsunami flooding, and damage at sea to floating bodies. The notion of tsunami perception that was resumed in Papadopoulos and Imamura (2001) is also integrated, along with possible recommendations in the case of inland flooding based on PFRs. A brief demonstration on how to apply our new intensity integrated scale is presented for the case study of the impact of the 2004 Indian Ocean tsunami on the coast of Sri Lanka. The simulations we used were based on a relatively coarse gridding, but results were reasonable compared to observations. The intensity scale would have been even more useful for better resolved tsunami simulations like did Boschetti et al. (2020) who applied it for the case of the Ligurian tsunami hazard with a satisfactory 40 m grid resolution.

Finally, the integrated tsunami intensity scale proposed here is based on previous distinct empirical scales that we have attempted to unify. The former scales were built on extended observations and rich datasets (PFRs; Lynett et al. 2014; Shuto 1993; Papadopoulos and Imamura 2001). However, it is recommended to extend and further detail the present scales. Certainly, it is of interest to focus on the notion of vulnerability to consider the tsunami preparedness, the human and structural density, and the geophysical site

effects to fulfill our conceptual relation. Some components of the vulnerability are already included in our intensity scale: The intensity scale of Papadopoulos and Imamura (2001), which we have included in ours, already considers some aspects of the vulnerability such as the structure of the materials used for construction; Lynett et al. (2014) consider the size of floating bodies; and the PFRs consider the physical shape of people.

In the near future, a promising way to enlarge our empirical intensity scale and better quantify the biophysical vulnerability of structures and persons is to develop and integrate the so-called Fragility curves. Through stochastic analyses, the effect of the tsunami magnitude may be estimated. However, the main difficulty is that magnitude and structures are not one-to-one related. They also depend (at least) on the local coastal geometry and soil composition. Consequently, a feasibility study of a generalized intensity scale is also required in preliminary.

Acknowledgements The authors appreciated former comments of Prof. Gerassimos A. Papadopoulos and those of the anonymous referees who helped in improving the manuscript. We acknowledge support from the European Commission under the project “Assessment, Strategy and Risk Reduction for Tsunamis in Europe,” ASTARTE (Grant No. 603839).

References

- Airy GB (1845) On tides and waves. *Encyclopaedia metropolitana* 5 (mixed sciences), London, pp 241–396
- Boschetti L, Ioualalen M, Nemati F, Grilli ST, Dessa J-X, Larroque C (2020) Tsunami intensity scale based on wave amplitude and current applied to the French Riviera. *Nat Hazards* 102(1):219–246. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03921-0>
- Charvet I, Suppasri A, Imamura F (2014) Empirical fragility analysis of building damage caused by the 2011 Great East Japan tsunami in Ishinomaki city using ordinal regression, and influence of key geographical features. *Stoch Environ Res Risk Assess* 28:1853–1867. <https://doi.org/10.1007/s00477-014-0850-2>
- Fenton JD (1985) Wave forces on vertical walls. *J Wtrwy Port Coast Ocean Eng* 111(4):693–718
- Grilli ST, Ioualalen M, Asavanant J, Shi F, Kirby JT, Watts P (2007) Source constraints and model simulation of the December 26, 2004 Indian Ocean tsunami. *J Wtrwy Port Coast Ocean Eng* 133(6):414–428
- Iida K, Cox DC, Pararas-Caragannis G (1967) Preliminary catalog of tsunamis occurring in the Pacific Ocean. *Data Rep No 5, HIG 67-10*, Hawaii Institute of Geophysics, University of Hawaii
- Imamura A (1942) History of Japanese tsunamis. *Kayo-No-Kagaku (Oceanography)* 2:74–80 (in Japanese)
- Imamura A (1949) List of tsunamis in Japan. *J Seismol Soc Jpn* 2:23–28
- Ioualalen M, Asavanant J, Kaewbanjak N, Grilli ST, Kirby JT, Watts P (2007) Modeling of the 26th December 2004 Indian Ocean tsunami: case study of impact in Thailand. *J Geophys Res Oceans* 112:C07024. <https://doi.org/10.1029/2006JC003850>
- Ioualalen M, Rentería W, Ilayaraja K, Chlieh M, Arreaga-Vargas P (2010) Case study of impact of the 26th December 2004 Indian Ocean Tsunami on the coast of Sri Lanka. *Environ Model Softw* 25(12):1874–1880
- Ioualalen M, Pelletier B, Solis Gordillo G (2017) Investigating the March 28th 1875 and the September 20th 1920 earthquakes/tsunamis of the Southern Vanuatu arc, offshore Loyalty Islands, New Caledonia. *Tectonophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.05.006>
- Liu PL-F, Lynett P, Fernando H, Jaffe BE, Fritz H, Higman B, Morton R, Goff J, Synolakis C (2005) Observations by the international tsunami survey team in Sri Lanka. *Science* 308(5728):1595. <https://doi.org/10.1126/science.1110730>
- Lynett PJ, Borrero J, Son S, Wilson R, Miller K (2014) Assessment of the tsunami-induced current hazard. *Geophys Res Lett* 41:2048–2055. <https://doi.org/10.1002/2013GL058680>
- Manche Y (1997) Propositions pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels prévisibles. *Revue de Géographie Alpine* 85(2):49–62
- Papadopoulos GA (2003) Quantification of tsunamis: a review. In: Yalçiner AC, Pelinovsky E, Okal E, Synolakis CE (eds) *Submarine landslides and tsunamis*, NATO science series (series IV: earth and environmental sciences), vol 21. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0205-9_30

- Papadopoulos GA, Imamura F (2001) A proposal for a new tsunami intensity scale. Internat Tsunami symposium 2001 Proc, Seattle, Washington, 7–10 Aug 2001, pp 569–577
- Papadopoulos GA, Caputo R, McAdoo B, Pavlides S, Karastathis V, Fokaefs A, Orfanogiannaka K, Valkaniotis S (2006) The large tsunami of 26 December 2004: field observations and eyewitnesses accounts from Sri Lanka, Maldives Is. and Thailand. *Earth Planets Space* 58:233–241
- PPFR (1999) Plans de prévention des risques naturels (PPR): Risques d'inondation—Guide méthodologique. La documentation Française. ISBN: 2-11-004402-0
- PPFR-Thau (2012) Plan de prévention des risques naturels d'inondation: Bassin versant de l'Etang de Thau, Commune de Villeveyrac. Direction Départementale des Territoires et de la Mer—Service Eau et Risques, Préfecture de l'Hérault
- Shuto N (1993) Tsunami intensity and disasters. In: Tinti S (ed) *Tsunamis in the world*. Kluwer Academic Publishers, Dordrech, pp 197–216. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3620-6_15
- Suppasri A, Mas E, Charvet I, Gunasekera R, Imai K, Fukutani Y, Abe Y, Imamura F (2013a) Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami. *Nat Hazards* 66(2):319–341
- Suppasri A, Charvet I, Imai K, Imamura F (2013b) Fragility curves based on data from the 2011 Great East Japan tsunami in Ishinomaki city with discussion of parameters influencing building damage. *Earthq Spectra*. <https://doi.org/10.1193/053013EQS138>
- Wei G, Kirby JT (1995) A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. *J Wtrwy Port Coast Ocean Eng* 121:251–261
- Wei G, Kirby JT, Grilli ST, Subramanya R (1995) A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves, part I. Highly nonlinear unsteady waves. *J Fluid Mech* 294:71–92

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Annexe 5 :

Article :

Tsunami intensity scale based on wave amplitude and current applied to the French Riviera: the case study of local seismicity

Laurie Boschetti, Mansour Ioualalen, Fatemeh Nemati, Stephan Grilli, Jean-Xavier Dessa, et al.. Tsunami intensity scale based on wave amplitude and current applied to the French Riviera: the case study of local seismicity. *Natural Hazards*, Springer Verlag, 2020, 102 (1), pp.219-248. DOI : 10.1007/s11069-020-03921-0

Tsunami intensity scale based on wave amplitude and current applied to the French Riviera: the case study of local seismicity

Laurie Boschetti, Mansour Ioualalen, Fatemeh Nemati, Stephan Grilli, Jean-Xavier Dessa & Christophe Larroque

Natural Hazards

ISSN 0921-030X

Volume 102

Number 1

Nat Hazards (2020) 102:219-248

DOI 10.1007/s11069-020-03921-0

Your article is protected by copyright and all rights are held exclusively by Springer Nature B.V.. This e-offprint is for personal use only and shall not be self-archived in electronic repositories. If you wish to self-archive your article, please use the accepted manuscript version for posting on your own website. You may further deposit the accepted manuscript version in any repository, provided it is only made publicly available 12 months after official publication or later and provided acknowledgement is given to the original source of publication and a link is inserted to the published article on Springer's website. The link must be accompanied by the following text: "The final publication is available at link.springer.com".



Tsunami intensity scale based on wave amplitude and current applied to the French Riviera: the case study of local seismicity

Laurie Boschetti¹ · Mansour Ioualalen¹ · Fatemeh Nemati² · Stephan Grilli² · Jean-Xavier Dessa¹ · Christophe Larroque¹

Received: 4 November 2019 / Accepted: 4 April 2020 / Published online: 18 April 2020
© Springer Nature B.V. 2020

Abstract

The French–Italian Riviera faces several geophysical hazards, including recurrent earthquakes and underwater landslides that can be tsunamigenic. The stakes are high since this is a densely populated and touristic area. Several studies have already been carried out, in particular to map tsunami hazard resulting from the near-field seismicity of the North Ligurian Faults System, which is located a short distance off the coast. In our most recent study, runup maps were developed together with local analyses of tsunami-induced current fields. However, no conclusions were drawn, based on these results, as of the associated tsunami risk along the coast. Here, to this effect, we apply a recently proposed tsunami intensity scale to the simulation results obtained in our previous work (maximum values of tsunami depths and currents). This intensity scale (7 levels) is mapped over the entire coastal area, and its site-specific values are discussed. The scale allows quantifying the potential damage inland and at sea, based on a standard coastal vulnerability that has been assessed through different records. It thus represents a useful tool to help improving our preparedness to tsunami hazard.

Keywords French Riviera · 1887 Earthquake · Tsunami intensity · Funwave

1 Introduction

The Ligurian basin is one of the most seismically active zones in Western Europe (Béthoux et al. 1992; Eva et al. 2001; Larroque et al. 2001) and includes the North Ligurian Faults System (NLFS) (Larroque et al. 2011), which has an estimated 80 km length in a N 55 °E orientation (NE–SW). At shallow depth, this fault system does not appear as a single continuous fault, but instead as a network of active reverse fault branches (Figs. 1, 2). At larger

✉ Mansour Ioualalen
Mansour.Ioualalen@geoazur.unice.fr

¹ Observatoire de la Côte d’Azur, CNRS, IRD, Géoazur, Université Côte d’Azur, Campus Azur, 250 rue Albert Einstein, CS 10269, 06905 Sophia Antipolis Cedex, France

² Department of Ocean Engineering, Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Sheets Building 215, Narragansett, RI 02882, USA

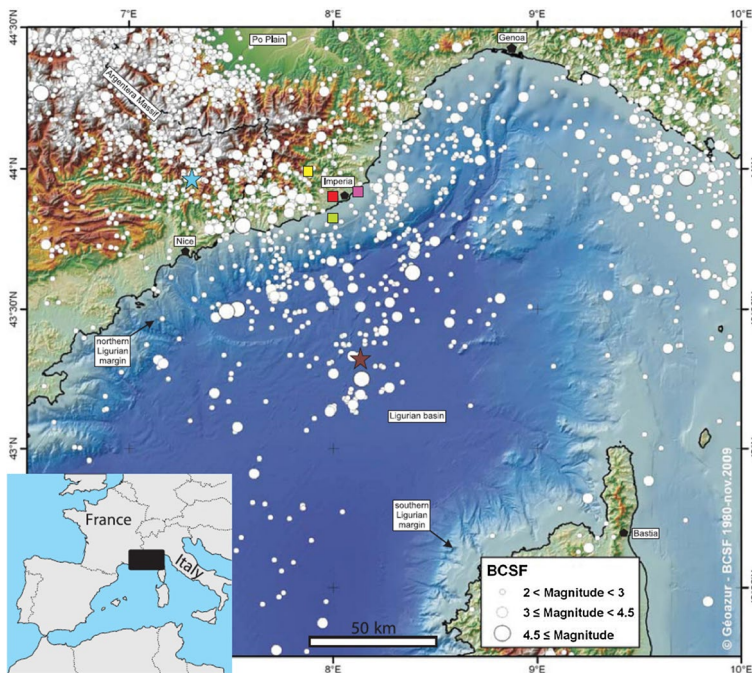


Fig. 1 Seismicity map of the Ligurian area during the period 1880–2010 (Catalog of the Bureau Central Sismologique Français, <https://www.franceseisme.fr/>). The compilation is obtained from various sources: the French Institut Géographique National (IGN), the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, NASA), and the French Institut Français de Recherche et d'Exploration de la Mer (IFREMER). Magnitudes range from Mw2 to Mw4.7. The coloured stars correspond to estimated epicentres of July 20, 1564 (blue star), and July 19, 1863 (brown star), earthquakes. Colored squares are the former estimated epicentres of the February 27, 1887 event (prior to analyses by Larroque et al. 2012; Ioualalen et al. 2014)

depth, however, it is not known whether these shallow strands merge. Figure 2 shows the location of the Ligurian faults system and associated bathymetry, which extends along the French–Italian Riviera, thus exposing these territories to potential seismic and tsunami hazards.

During the past half-millennium, a dozen local tsunamis have been reported in the area (Tinti et al. 2004; Lambert and Terrier 2011), most of these having most likely been triggered by earthquakes. Most of the historical local earthquakes have been of moderate magnitude (up to M_w 5 or so; Béthoux et al. 1992; Larroque et al. 2009), with the notable exception the large event that occurred on February 23, 1887 (Ferrari 1991; Eva and Rabinovich 1997; Larroque et al. 2012), offshore Imperia (Italian Riviera). Based on a careful analysis of a tide gauge record at Genoa, Italy, Larroque et al. (2012) and Ioualalen et al. (2014) estimated this event magnitude to be in the M_w 6.7–6.9 range. This estimate was also based on: (1) an analysis of the marine geophysical data, showing the existence of an active faults system at the foot of the Ligurian margin (Larroque et al. 2011), and (2) the analysis of macroseismic historical databases, using several models of intensity attenuation with distance and focal depth, as well as the modeling of the tsunami induced by the 1887 Ligurian earthquake (runups and their distribution documented in the historical archives). This joint seismotectonic–macroseismic–tsunami modeling study helped Larroque et al.

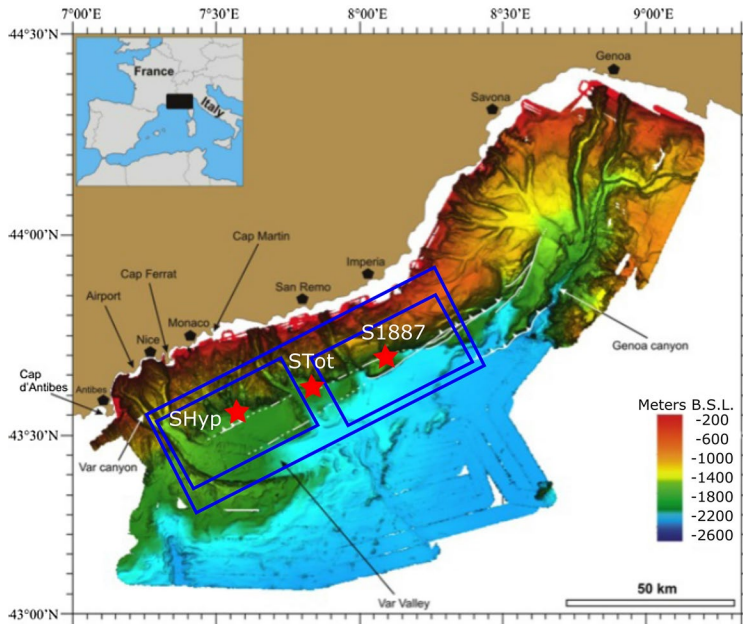


Fig. 2 The 80-km long North Ligurian Faults System, NLFS (in white at the toe of the continental slope) and the bathymetry of the region (MALISAR research cruises). Centroids (red stars) and ruptured areas (blue rectangles) are represented for scenarios S1887, SHyp and STot (Table 2)

(2012) and Ioualalen et al. (2014) specifying the location, kinematics, and magnitude of the earthquake (20–30 km offshore of the Imperia coast, focal depth 15 km, reverse faulting and M_w 6.7–6.9) and to discuss scenarios for future potential seismic/tsunami events in this area (Nemati et al. 2019). Using a different approach and intensity attenuation model, a recent study was conducted on historical seismicity based on intensity prediction equations (IPE), which confirmed a M_w 6.7–6.8 magnitude for the 1887 Ligurian earthquake (Manchuel et al. 2017).

The 1887 earthquake caused about 600 fatalities (Denza 1887; Taramelli and Mercalli 1888) and triggered a tsunami with up to 1–2 m runups measured from Antibes, France, to Albenga, Italy. Therefore, this historical event, and other similar or even larger events that may have occurred prior to it, can serve as reference extreme events to assess tsunami hazard along the Ligurian coast.

The tsunami hazard in the Ligurian region, and more particularly along the French Riviera, has already been addressed in several studies. Ioualalen et al. (2014) analyzed the tsunamigenic potential stemming from underwater mass wasting events, and Ioualalen et al. (2010) and Nemati et al. (2019), extended the earlier analysis to near-field coseismic tsunamis. Regarding far-field coseismic tsunamis, on the southern coast of the Mediterranean Sea, the seismotectonic context of the Algerian margin is similar to the Ligurian one (Déverchère et al. 2005). For instance, the Boumerdes earthquake (2003/05/21, M_w 6.8) nucleated on an offshore south dipping reverse fault and produced a tsunami that crossed the western Mediterranean. It reached the southern coast of France ~90 min after the earthquake occurrence time. The sea elevation measured at tide gages varied by location and was on the order of tens of centimeters (Alasset et al. 2006; Sahal et al. 2009). Although the seismic activity is greater on the Algerian margin (more frequent earthquakes, higher

magnitudes), the consequences for the Ligurian margin remain moderate due to tsunami attenuation with distance and travel time required for the waves to cross the Mediterranean.

While Ioualalen et al. (2014) used fairly coarse grids (100 m resolution), Nemati et al. (2019) carried out computations in increasingly finer nested grids (down to 40 m or even 10 m) and, besides tsunami elevation and runups, discussed the induced tsunami currents. Recent studies of tsunami hazard along the United States east coast have recommended the use of grids of at least 30 m resolution, in order to get converged currents and inundation maps in model simulations (Grilli et al. 2015; Schambach et al. 2018). Our simulations here, as well as those of Nemati et al. (2019), were conducted within this range of grid resolution.

The present study is based on more accurate and detailed runup maps, maximum tsunami depths, and currents than in the previous studies. But, more importantly, it extends the mere mapping of tsunami hazard done in earlier work by establishing, for the first time in the Ligurian area, tsunami intensity maps that allow assessing the associated tsunami risk. The latter maps are based on the tsunami intensity scale recently proposed by Boschetti and Ioualalen (2019, submitted) (hereafter BI-20), which allows assessing and thus anticipating possible damage that earthquake-induced tsunamis would cause. Thanks to this new step, the local tsunami maximum depth and current values can be placed in a more general context, to quantify the tsunami risk along this coastal area.

2 Methodology

We follow the standard procedure in coseismic tsunami modeling, consisting in: (1) building a computational grid over an accurate bathymetry/topography digital elevation model (DEM), (2) for selected hypothetical events (earthquake scenarios), computing the coseismic seafloor deformation using the Okada (1985) half-space dislocation model, (3) using this deformation as initial condition in a long wave model, computing the tsunami propagation to shore within the grid over a certain time duration, and (4) based on results, mapping runups, maximum tsunami depth (H_{\max}), and maximum currents (CUR_{\max}). Following BI-20, H_{\max} is defined as the maximum inland inundation depth, that is flow depth over grade (calculated as tsunami surface elevation over mean sea level minus the local land elevation). As mentioned by BI-20, this definition of H_{\max} is coherent for defining an intensity scale because the effect of a tsunami on a structure depends on the water column depth along the structure (and corresponding induced current). The tsunami intensity maps obtained this way will be discussed in a site-specific manner. Each of the steps in our methodology is detailed below.

2.1 The tsunami intensity scale

BI-20 proposed a tsunami intensity scale I_T that was specially designed for numerical simulations. The scale is function of the tsunami magnitude M_T and the biophysical vulnerability VB_T of the impacted areas: $I_T = f(M_T, VB_T)$ [their Eq. (1)]. The intensity corresponds to the effects and impacts of the considered physical event on (static or moving) structures, human losses, and on the environmental changes (Papadopoulos 2003). Tsunami magnitude is function of the physical parameters of the tsunami, such as maximum currents CUR_{\max} and tsunami amplitude H_{\max} , which are typically obtained as outputs of numerical simulations. Nowadays, currents are also systematically analyzed in tsunami studies because

they impede navigation and can be extremely damaging to floating or anchored marine structures in harbors. Tsunami induced currents, which are fairly uniform over depth, may cause large momentum and drag forces and even transform into dangerous eddies around sharp marine structures. The biophysical vulnerability is related to the preparedness of the community against the considered physical hazard. BI-20s intensity scale was derived following a careful analysis of (CUR_{max} , H_{max}) values, along with a comprehensive integration of pre-existing tsunami scales or analyses (Fig. 3, Table 1). It is inspired by the magnitude scale that was developed by the French authorities based on decades of observations of numerous yearly flooding in French rivers. It serves as the basis for the French Prevention Plan against Flooding Risk (PPFR) (PPFR 1999; PPFR-Thau 2012), and it is based on the effects of both the actual water level and the current during river floods. The application of this approach to tsunamis follows from the following observations: (a) being a long wave, the current induced by a tsunami may be considered to be nearly horizontal and uniform within the water column. Thus, the tsunami flow is similar to flooding; (b) PPRFs refer to the terminology “water level” corresponding to the water column depth, that is the tsunami maximum amplitude H_{max} defined above. Based on the PPRF magnitude, BI-20 built their tsunami intensity scale by integrating biophysical vulnerability data proposed in other studies: some of these taking into account the effect of H_{max} only (Papadopoulos and Imamura 2001; Shuto 1991); others like Lynett et al. (2014)’s analysis only considering tsunami currents CUR_{max} .

Note that, with BI-20s index, one cannot really assess the vulnerability of society because only a median vulnerability is included in the intensity scale. Obviously, community preparedness against tsunami hazard is a key aspect that is inhomogeneous along the coast and can modify the tsunami intensity. Being prepared also includes the mitigating

Fig. 3 Tsunami intensity scale proposed by Boschetti and Ioualalen (2019, submitted). Their intensity is defined as a function of the magnitude [H_{max} (m) and CUR_{max} ($m\ s^{-1}$)] (see Table 1). The black, gray, and white lines represent the limits of movement in an upright position of a child or elderly, a non-sporty adult, and a sporty adult under stress, respectively

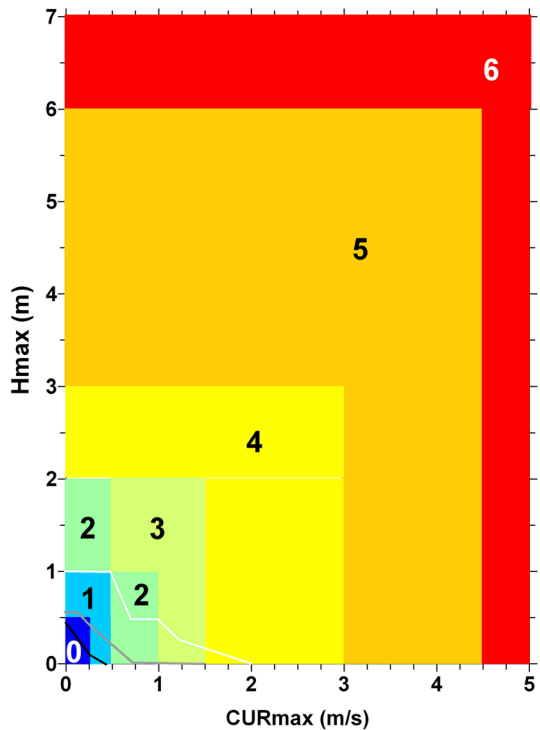


Table 1 Tsunami intensity scale proposed by Boschetti and Ioualalen (2019, submitted) (see Fig. 3 for H_{max} and CUR_{max} levels)

Tsunami intensity	Human damage on land (PPFR 1999; PPRF-Thau 2012; Papadopoulos and Imamura 2001)	Damage on land (Shuto 1991; Papadopoulos and Imamura 2001)	Damage at sea (Lynett et al. 2014; Table 2; Papadopoulos and Imamura 2001)	Tsunami perception (Lynett et al. 2014; Table 2; Papadopoulos and Imamura 2001)	Territorial management, prevention (Table 3) (PPFR 1999; PPRF-Thau 2012)
0	Possible upright displacement but children and older people may face difficulties	No damage	No damage to marine structures	None felt	–
1	Very difficult displacement for children and the elderly and difficult for a non-sporty adult Very low probability of victims	No damage	No damage to marine structures	At sea: small buoys moved Felt by few to most people on board small vessels Possibly observed on land	Caution areas: limit urban or agricultural development as much as possible Setting up a monitoring system; public information meetings; hazard mapping
2	No possible displacement for a child or a senior, very difficult for a non-sporty adult and difficult for a sporty adult Increased number of potential victims	No damage	No damage to marine structures Few small vessels move slightly onshore	At sea: small buoys moved Felt by all on board small vessels and by few people on board large vessels Observed by most people on land	Danger zones: prohibit urban and agricultural development Setting up a monitoring system; hazard mapping; set up an evacuation plan
3	No possible displacement for a child or senior, nearly impossible for a non-sporty adult and very difficult for a sporty adult Increased number of potential victims	Limited flooding of outdoor facilities (gardens) and near-shore facilities Limited flooding of cultivated land Traces of sand layer are left behind	Nearly no damage to marine structures (few boat shocks) Some small vessels move onshore	At sea: small buoys moved Felt by all on board large vessels Observed by all on the coast Few people are frightened and run to higher ground	Danger zones: prohibit urban or agricultural development. Remove as much existing development as possible Setting up a monitoring system; public information meetings; hazard mapping; set up an evacuation plan; construction of defense works against hazard (dikes) or re-naturalizing the environment (mangroves, bank vegetation, etc.)

Table 1 (continued)

Tsunami intensity	Human damage on land (PPFR 1999; PPRF-Thau 2012; Papadopoulos and Imamura 2001)	Damage on land (Shuto 1991; Papadopoulos and Imamura 2001)	Damage at sea (Lynett et al. 2014; Table 2; Papadopoulos and Imamura 2001)	Tsunami perception (Lynett et al. 2014; Table 2; Papadopoulos and Imamura 2001)	Territorial management, prevention (Table 3) (PPFR 1999; PPRF-Thau 2012)
4	Standing almost impossible for all people; ability to move while swimming if the current is not too strong Possible impacts with small drifting objects Increased number of potential victims because of greater numbers in the raised area	Damage and flooding in a few to many wooden structures Most masonry buildings withstand grade 1 damage Objects of variable size and instability overturn and drift Few aquaculture rafts washed away Sand layers and pebble accumulation	1–2 docks/small boats to moderate dock boat damage (<25% of docks/vessels damaged) and/or mid-sized vessels off moorings damaged Most small vessels move violently onshore	At sea: large buoys moved Most people are frightened and run to higher ground	
5	Standing impossible for all people; ability to move while swimming if the current is not too strong Few to many people are washed away Possible impacts with big drifting objects Increased number of potential victims because of greater numbers in the raised area	Beach erosion. Extensive flooding. Slight damage in tsunami control forest, stop drifts. Many aquaculture rafts washed away, few partially damaged Most wooden structures are washed away or demolished Damage of grade 2 to 3 in a few masonry buildings. Most RC buildings sustain damage, a few sustain flooding is observed	Moderate to major dock boat damage (<50% of docks/vessels damaged) and/or mid-sized to large vessels off moorings damaged Most large vessels move violently onshore	At sea: large buoys moved All people escape to higher ground	

Table 1 (continued)

Tsunami intensity	Human damage on land (PPFR 1999; PPRF-Thau 2012; Papadopoulos and Imamura 2001)	Damage on land (Shuto 1991; Papadopoulos and Imamura 2001)	Damage at sea (Lynett et al. 2014; Table 2; Papadopoulos and Imamura 2001)	Tsunami perception (Lynett et al. 2014; Table 2; Papadopoulos and Imamura 2001)	Territorial management, prevention (Table 3) (PPFR 1999; PPRF-Thau 2012)
6	Standing impossible for all people; ability to move while swimming if the current is not too strong Most to all people are washed away Increased number of potential victims because of greater numbers in the raised area	Cars overturned and drifted, oil spills, fires start Damage of grade 4 to 5 in many masonry buildings. Few to many RC buildings suffer damage of grade 3 to 5	Major to extreme dock/off-mooring boat damage (> 50% of vessels damaged) -Many collide with buildings	At sea: large buoys moved General panic	

influence of warning and evacuation plans. Each territory has its particularities, and that is why the scale intensity scale of BI-20 is only the first step towards tsunami hazard assessment, a first-order one or a mean state, which certainly could be improved by factoring in site-specific vulnerability or preparedness aspects.

2.2 Numerical model, computational grid and validation

Tsunami simulations are performed with *FUNWAVE*, a fully nonlinear and dispersive Boussinesq wave model (Wei and Kirby 1995; Wei et al. 1995), which was later parallelized by Pophet et al. (2011). A computational grid with a 40 m horizontal resolution was built in the coastal area ranging from Fréjus, France, to Imperia, Italy, and encompassing the Ligurian Faults System (Fig. 2). The domain is bounded by coordinates (6.80 °E to 8.57 °E; 43.19 °N to 43.95 °N) and has a 3565 × 2096 mesh size. An optimal time step of 0.075 s was chosen, to avoid numerical instabilities. Bathymetric and topographic data were obtained from various sources and interpolated to build a 10 m grid along the French Riviera; these data sets are thoroughly described in Nemati et al. (2019). In their tsunami simulations, Nemati et al. (2019) used *FUNWAVE-TVD*, a more recent version of *FUNWAVE* that has the ability of using nested grids and provide a model resolution commensurate with a finer bathymetry, where needed. The nested grid approach allows for an accurate modeling while keeping the computational effort manageable, as opposed to using a fine constant-mesh grid over the entire area. As a point of comparison, our simulations with *FUNWAVE* using a uniform 40 m resolution grid, for 1h30 of tsunami propagation, took 1 week of CPU time using a 8-core cluster, while it took only a few hours for Nemati et al. (2019) using *FUNWAVE-TVD* with much smaller nested grids, using a 24-core cluster. However, the effective times required to compile the simulations are quite comparable when one takes into account the preliminary grid processing required by *FUNWAVE-TVD* to nest their various successive computational domains of approximate resolutions 640 m, 160 m and 40 m. Nemati et al. (2019) performed further simulations in 10 m resolution grids and evaluated performance indices (*Norm*, *Determination coefficient*) and basic statistics (*mean*, *STD*, *cross-correlation*) for simulations at different resolutions. They concluded that their 10 m and 40 m results were in very good agreement with those obtained with *FUNWAVE* in a 40 m grid resolution (Nemati et al. 2019).

2.3 Coseismic tsunami sources

Similarly to Ioualalen et al. (2014) and Nemati et al. (2019), we assess tsunami hazard along the French Riviera resulting from local seismicity and the potential activation in future earthquakes of the NLFS (Fig. 2). We base our work on the earthquake scenarios first proposed by Larroque et al. (2012) and refined by Ioualalen et al. (2014) (Fig. 2, Table 2). These references provide discussions of the NLFS geological and seismotectonic contexts and of 3 proposed representative rupture scenarios: (1) S1887 (Larroque et al.'s 2012, S7 scenario), a M_w 6.91 rupture of the eastern NLFS segment, which is the likeliest scenario for the 1887 earthquake; (2) SHyp (Larroque et al.'s 2012, S8 scenario), a hypothetical event of similar parameters, but with its centroid shifted westward within the NLFS, offshore of the French–Italian border, which emulates the potential rupture of the NLFS western segment; (3) STot (Larroque et al.'s 2012, S11 scenario), an hypothetical extreme M_w 7.51 event, corresponding to the complete rupture of the 80 km–long NLFS. Some of the constitutive parameters for the latter event, i.e., the fault length and slip, were

Table 2 Rupture scenarios and parameters proposed and processed by Larroque et al. (2012) for the Northern Ligurian faults system (Fig. 2)

Scenario	X_0	Y_0	d (km)	ϕ	δ	λ	L (km)	W (km)	Δ (m)	M_w
S1887	43.7 °N	8.08 °E	15	235°	16°	90°	35	17	1.5	6.91
S_{Hyp}	43.58 °N	7.55 °E	15	235°	16°	90°	35	17	1.5	6.91
S_{Tot}	43.64 °N	7.815 °E	15	250°	16°	90°	80	27	3.3	7.51

Scenarios S1887, SHyp and STot correspond to their S7, S8 and S11 ones, respectively: centroid position (X_0 , Y_0) and depth d ; strike angle ϕ (counted CW from north); dip angle δ , rake angle λ , length and width of the ruptured area (L , W); amount of slip Δ , derived magnitude M_w .

derived from the seismic scaling laws of Wells and Coppersmith (1994) based on the fault length. It should be noted that tectonic motions and seismicity along the NLFS are closely monitored: along the Ligurian coast, dense networks of seismic stations are managed by French and Italian institutions, RESIF (*Réseau Sismologique et Géodésique Français*, <https://rlbp.resif.fr/spip.php?article30>), and RSNI (Regional Seismic Network of Northern Italy, <https://www.distav.unige.it/rsni/>). Despite the lack of permanent OBS (Ocean Bottom Seismometers), these networks allow for a real time detection of moderate ($M_w > 3$) and strong earthquakes both on- and off-shore. All these data are used by the institutions in charge of the tsunami warning procedures, i.e., the CENALT (*Centre d'Alerte aux Tsunamis*, <https://www.info-tsunami.fr/>), and the NEAMTWS (North Eastern Atlantic-Mediterranean Tsunami Warning System, <https://neamtic.ioc-unesco.org/>).

Based on our present knowledge of this fault system, the SHyp and STot scenarios appear quite plausible (Larroque et al. 2012), although no historical occurrence of such events has been documented, considering that the region has been populated very early in human history and that there are reliable historical archives dating back more than 10 centuries (Stucchi et al. 2012; Manchuel et al. 2017).

2.4 Initial surface elevations

The initial coseismic surface elevations computed for each scenario have a 0.34–1.12 m maximum elevation and a 0.13–0.45 m maximum depression (Fig. 4). This asymmetry in the maximum and minimum surface elevations results from a nonzero dip angle (Okada 1985). Based on the distributions of surface elevations shown in Fig. 4, we see that for scenario S1887, the Italian Riviera will first experience a sea withdrawal (leading depression wave). For the SHyp scenario, this will be the case for the area of the French Riviera near the Italian border (east of Nice) and for STot, both sides of the border will experience a sea withdrawal before the arrival of a tsunami crest. Elsewhere, these maps cannot tell how the tsunamis will first impact the coast because this will depend on wave spreading during propagation, which is depth dependent (e.g., there is a reduced spreading in the vicinity of the coast due to the shallow depth). In addition, the shallow initial wave troughs (between 0.13 and 0.45 m) indicate that there should be a limited sea withdrawal for these NLFS scenarios, which would probably be imperceptible, even though the leading depression waves will be amplified at the coast due to shoaling (approximately following Green's law, as a power $\frac{1}{4}$ of the water depths ratio), but in a very weak way as they are initiated in already fairly shallow waters.

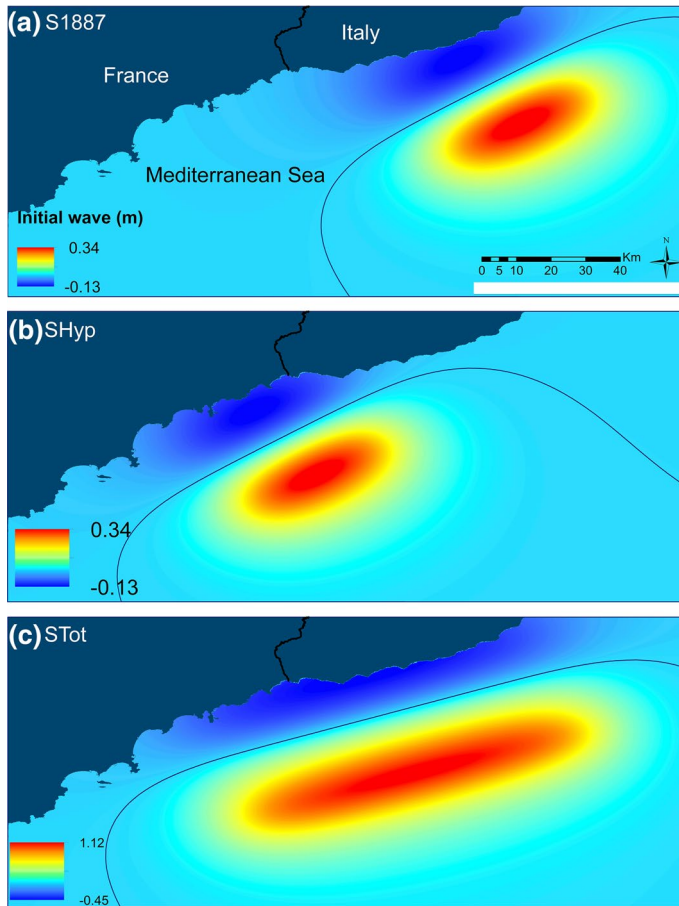


Fig. 4 Coseismic tsunami source elevation computed using Okada's (1985) method for rupture scenarios: S1887 (a); SHyp (b); and STot (c) (Fig. 2; Table 2). Positive elevation of the sea level corresponds to sea-floor uplift and negative elevation (i.e., depression) to subsidence. The black curves represent the nodal points (zero-elevation)

3 Simulation results

3.1 Overall tsunami runup variation along the French Riviera

Although scenarios (S1887, SHyp) and STot have very different moment magnitudes, with the extreme scenario having about 8 times the energy of the other 2 scenarios, their runup distributions exhibit very similar patterns along the coast (Fig. 5). This results from bathymetrically controlled long wave refraction over the continental slope and shelf, leading to identical patterns of wave focusing/defocusing for each tsunami (e.g., Tehranirad et al. 2015), and of similar bay resonances; however, as expected from the different source magnitude and location, maximum runup values significantly vary from one scenario to another (approximately from 1 to 7 m).

As shown in Fig. 5, in most bays, the isobaths are convex (relatively to a point at the coast). As a result of refraction, close to shore the tsunami crests and troughs align with

Fig. 5 Simulated runup for scenarios S1887, SHyp and STot (Table 2) along the French Riviera. Acronyms are: TsM for Théoule sur Mer, MLN for Mandelieu la Napoule, PC for Pointe Croisette (in the city of Cannes), IL for Lerins Islands (part of the city of Cannes), AS for the beach Antibes la Salis (city of Antibes), CA for the Cape of Antibes, SLV for the city of Saint-Laurent du Var, AINCA for Aeroport International Nice Côte d'Azur, PN for the Port of Nice, CN for Cap de Nice, VLFR for the city of Villefranche-sur-Mer, SJCF for Saint-Jean Cap Ferrat, CF for Cap-Ferrat, BsM for Beaulieu-sur-Mer, CdA for Cap d'Ail, and RCM for Roquebrune-Cap-Martin. Red arrows correspond to focusing (converging) waves, green arrows are for defocusing (diverging) waves and blue arrows correspond to “neutral” behavior. Isobaths 20 m, 200 m and 500 m are plotted in white

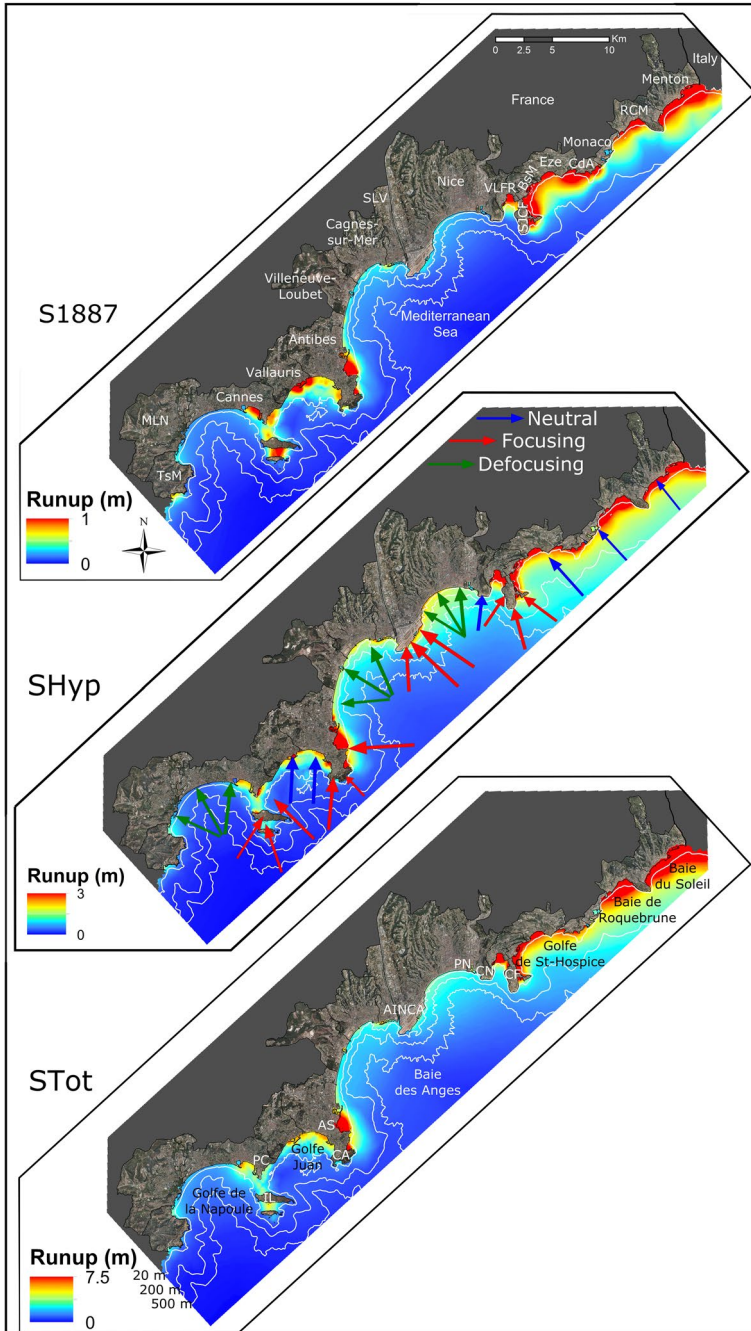
these isobaths, causing energy spreading in bays and energy focusing in between. This is illustrated in Fig. 5 for scenario Shyp, by green and red arrows. Where energy spreading (or defocusing) occurs, the tsunami is relatively attenuated, despite its amplification due to shoaling. This is the case for instance of: (1) the bay located between Théoule and Cannes, (2) that located between Antibes and Saint-Laurent-du-Var (western part of *Baie des Anges*), (3) the Bay of Nice (eastern part of *Baie des Anges*). Some bays, however, have a “neutral” behavior because the isobaths are straighter ahead of them (blue arrows on the same figure). We employ the word “neutral” to refer to straight isobaths (i.e., neither convex nor concave) whose shape does not affect the wave height through focusing or defocusing. This is the case of the bay located in between Cannes and Antibes and, approximately, of all those located in between Cap-Ferrat and Menton. In those “neutral” bays, wave amplification is due to other processes such as shoaling and wave directivity.

In contrast, on most headlands in between bays, the isobaths are concave and refraction causes the tsunami energy to focus on those, which combined with shoaling effects causes the largest predicted runups. Actual runup amplification, however, is function of the isobath curvature, and hence, the exact location of energy focusing area is difficult to anticipate, due to the complexity of the isobath geometry; it is not our scope here to cover these points in detail. Figure 5 shows that such amplification areas occur at *Cap d'Antibes*, off of Nice Côte d'Azur International Airport at the opposite side of the bay, *Cap Ferrat* and, to a certain extent, at Pointe-Croisette and Lérins Islands, which are shaped like a discontinuous headland. Finally, similar to bays, some headlands behave in a more neutral way because the isobaths surrounding them are fairly straight. This is the case for *Cap de Nice*.

Overall, in all the scenarios, the area in between *Cap de Nice* and Menton experiences the largest runups (Fig. 5), due to: (1) the north-northwestern tsunami directivity of the initial wave propagation east of *Cap de Nice*, since in all cases the longitudinal axis of the rupture area is much larger than the transverse one (Figs. 2, 4; Table 2); (2) using the Okada (1985) model, the largest deformations/surface elevations occur near the central line of the dislocation.

3.2 Overall maximum tsunami currents

Next we analyze tsunami current magnitudes in the coastal area where depth is less than 100 m deep (~55 fathoms). This would correspond to the mooring zone of boats (either at berth or using an anchor). Similar to Lynett et al. (2014) and BI-20, for each earthquake scenario, Fig. 6 shows the overall distribution of the maximum local tsunami current as a function of depth in this area. In the intensity scale introduced by Lynett et al. (2014), 1.50 m s^{-1} (3 knots) is the current threshold below which boats will not suffer tsunami damage. For the S1887, SHyp and STot scenarios, this threshold value approximately occurs at a 10 m (~6 fathoms), 20 m (~12 fathoms), and 35 m (~19 fathoms)



depth, respectively. Hence a safe distance/depth offshore that could be recommended in navigation guidelines in this area, for all 3 cases, is beyond the location of the 35 m isobath. Therefore, independently from the earthquake magnitude and likelihood for

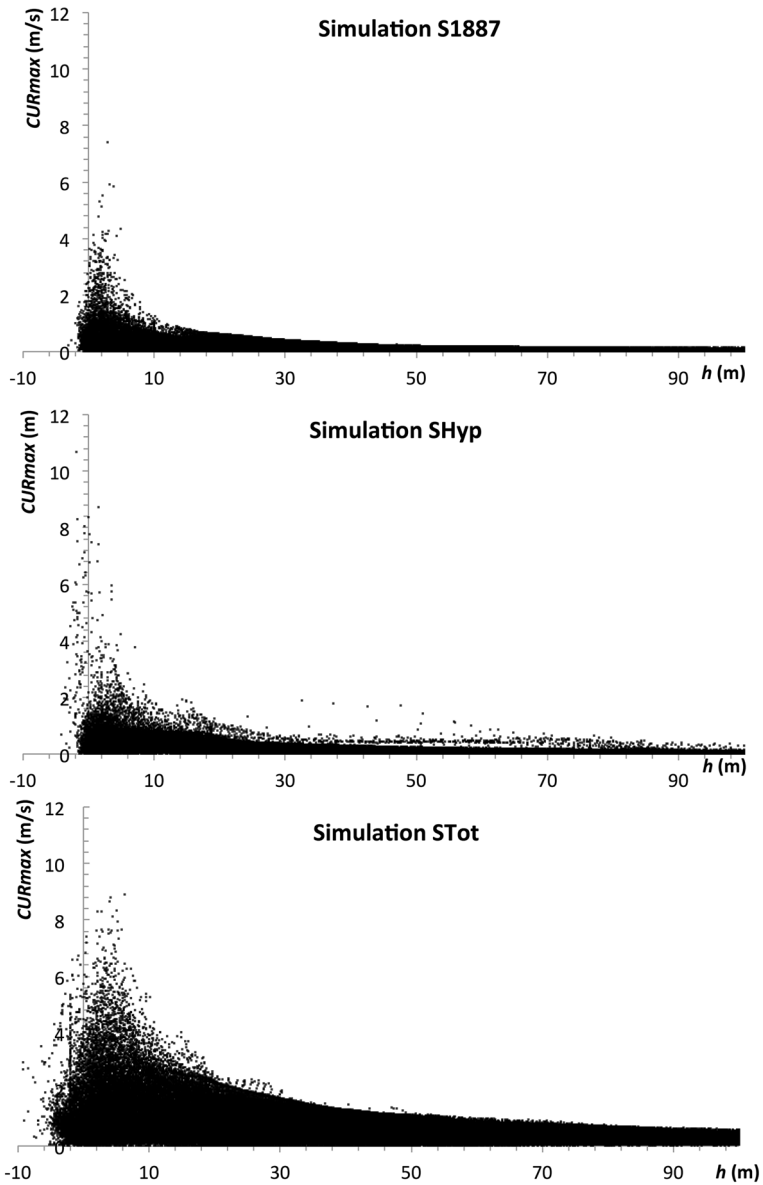


Fig. 6 Maximum tsunami induced current CUR_{max} for scenarios S1887, SHyp and STot (Table 2) along the French Riviera, as a function of water depth h from the coastline. Negative values of h correspond to inundated areas onland

tsunami generation, which may not be immediately determined or known, boats could sail away from shore to safe areas located beyond this water depth.

3.3 Relating maximum tsunami amplitudes and induced currents

Following BI-20, we analyzed the relationship between maximum tsunami amplitude H_{max} and induced currents CUR_{max} , in two areas: (1) from the coast to a 10 m depth (including inundated areas), and (2) from a 10 m to a 100 m depth (Fig. 7). These two areas correspond to distinct activities: the immediate vicinity of the coastline ($h < 10$ m) corresponds to occupied areas (populations, beaches, on land structures, marine/port structures, ships at berth), while farther away from shore, floating bodies (boats, buoys that could be anchored or not) are of greater concern. As seen above, this can also be the area where boats can escape since it is likely to be affected only by weaker currents.

The simple relationship (1) between the maximum currents CUR_{max} and amplitudes H_{max} based on linear long wave theory (g being the gravity acceleration and h the local water depth) (BI-20) is plotted in each of Fig. 7's panels, as two lines for $h = 10$ and 100 m.

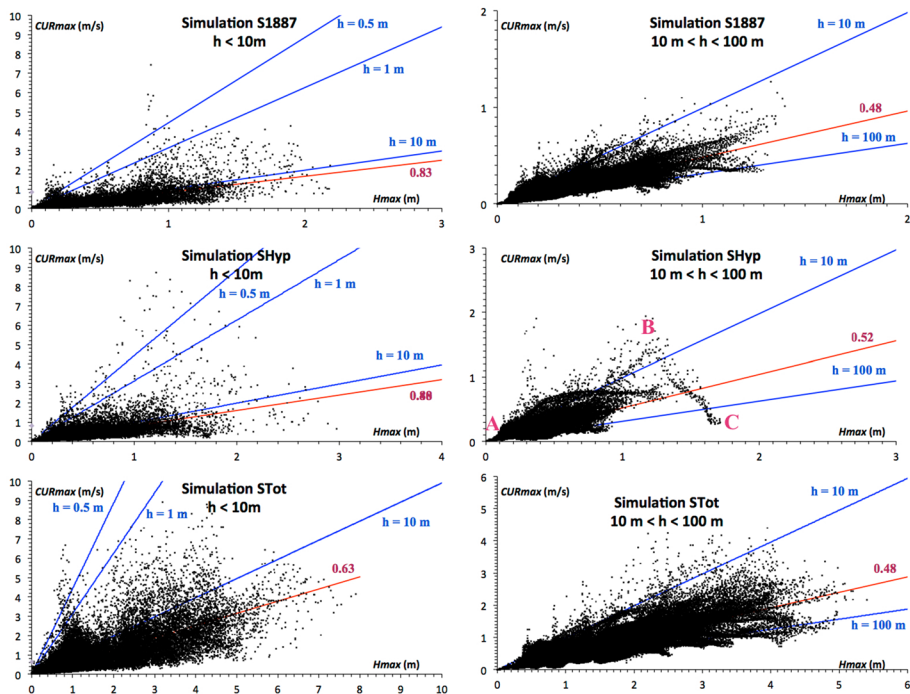


Fig. 7 Maximum simulated tsunami current (CUR_{max}) versus maximum tsunami amplitude (H_{max}) for scenarios S1887, SHyp and STot (Table 2). Left column: applied to grid points with water depths $h < 10$ m (including inundated points, for which water depth is negative); right column: for grid points with water depths $10\text{ m} < h < 100$ m. Estimates of the linear regression curves (if existing) are also plotted for information (in red). A few h -abacuses based on linear theory (Eq. (1) taken from Boschetti and Ioualalen 2019, submitted) are reported (in blue)

$$\text{CUR}_{\max} = (g/h)^{1/2} H_{\max}. \quad (1)$$

As noted by BI-20, for $10 \text{ m} < h < 100 \text{ m}$ and whatever the scenario considered, most of the simulated points (and their actual linear best fit) fall between the sector delineated by these two lines; in contrast, near the shore ($h < 10 \text{ m}$) both the simulated points and their best linear fit are outside this sector. The reason is as follows: as tsunami waves approach the coast and depth decreases, their height increases due to shoaling, while wavelength decreases; hence, wave steepness increases and wave propagation becomes more nonlinear. As a result, the relationship between H_{\max} and CUR_{\max} is no longer well predicted by linear wave theory. In some cases, the trend can even be opposite: for instance, for the simulation SHyp, a surprising negative slope is predicted in between points B and C in Fig. 7, for $10 \text{ m} < h < 100 \text{ m}$. These points are located in the Bay of Villefranche-sur-mer (Fig. 10e), where point A, also reported in Fig. 7, is positioned at the bay entrance. While waves are entering the bay from point A (at 100 m depth) to B (at an approximate 15 m depth), the slope is positive and follows more or less that predicted by linear theory. But from point B to C (10 m depth), the slope turns negative with CUR_{\max} decreasing with an increasing H_{\max} . We propose two possible explanations for this: (1) since waves become highly nonlinear, the negative slope can be due to the fact that CUR_{\max} and H_{\max} no longer occur simultaneously and thus the points in Fig. 7 are artifacts; (2) at the location of CUR_{\max} (see Fig. 10) the bay exhibits two special features: to the west, the entrance of the harbor named “La Darse” hosts a sharp pier, and to the east, the morphology of the coast reveals a tip at the beginning of the Cap-Ferrat. Both features are likely to generate locally strong currents through overland hydrodynamics that has been captured in our 40 m grid resolution simulation. Note that the same behavior of CUR_{\max} and H_{\max} is also predicted for S1887 and STot (Fig. 10) within the same bay. However, the negative slopes are not visible in Fig. 7 because they are hidden within the cloud of points near the origin.

Besides the already discussed site-specific refraction effects, other physical phenomena affect tsunami propagation, such as an increasing bottom friction as well as breaking, that all impact the maximum current magnitude near the shoreline. These nearshore effects confirm the need for performing nonlinear tsunami simulations to obtain accurate results nearshore, where the largest impact and potential damage can also be expected. In the present simulations, these and other processes cause the relationship between CUR_{\max} and H_{\max} to become quite complex nearshore and onshore, and difficult to anticipate a priori; hence, it is crucial to assess tsunami hazard separately through both variables. This point supports using an ad hoc tsunami intensity measure, such as proposed by BI-20, as detailed hereafter.

3.4 Detailed mapping of maximum tsunami amplitudes, induced currents, and corresponding tsunami intensity along the French Riviera

The denomination of “French Riviera” is only a literary reference, which is not geographical nor administrative. While it is bounded by the Italian border at its eastern side, its western border is not clear because it changes from one author to another. We take here the more restrictive definition for this area, that is, the French administrative district of the *Alpes-Maritimes*.

In the following, we more thoroughly assess overall tsunami hazard along the *Alpes-Maritimes* coast, by including other variables besides runup. As stated above, this will be achieved by simultaneously considering the maximum amplitude maps, currents, as well

as derived tsunami intensity maps. Like BI-20, we favor the tsunami amplitude maps over runup charts because, as previously mentioned, the latter do not explicitly provide the effective water column that is encountered by structures and persons, which is the basis for the proposed intensity scale. In addition, the flatter coastal areas (beaches) generally have an extent on the order of a few tens of meters, which happens to be close to our grid resolution of 40 m. For this reason, here we consider that the nearest sea point is a "beach" point whether there is flooding or not.

For clarity, the French Riviera is divided into three zones: the WEST zone extending from Théoule-sur-Mer to Antibes, the CENTER zone, from Villeneuve-Loubet to Beaulieu-sur-Mer, and the EAST area, from the city of Eze to the Italian border.

3.4.1 Tsunami hazard in the WEST part of the French Riviera

See Fig. 8.

3.4.1.1 Intermediate hazard scenarios S1887 and SHyp In general, for a magnitude lower than M_w 7, the Gulf of Napoule is not greatly exposed to tsunami hazard, with $H_{max} < 0.3\text{--}0.4$ m (Fig. 8a,b) and weak $CUR_{max} < 0.25$ m s^{-1} (Fig. 8d,e). As a result, the

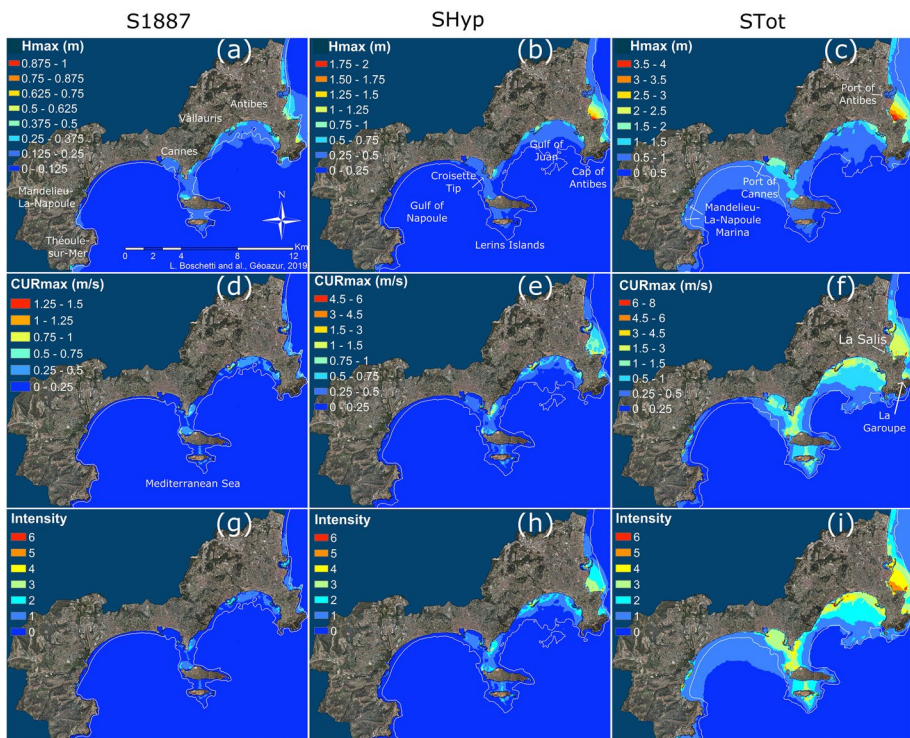


Fig. 8 Spatial distribution of the maximum wave amplitude H_{max} (a, b, c), maximum tsunami induced current CUR_{max} (d, e, f), and tsunami intensity as defined in Table 1 and Fig. 3 (g, h, i) for scenarios S1887, SHyp and STot, respectively, simulated for the western side of the district of the Alpes-Maritimes (the French Riviera). White curves represent isobaths 10 m for scenario S1887, 20 m for SHyp and 35 m for STot



Fig. 9 Coastal road between Mandelieu-la-Napoule and Cannes, bordered by the beach and the railway, view to the WSW (Courtesy of Google Map Inc.)

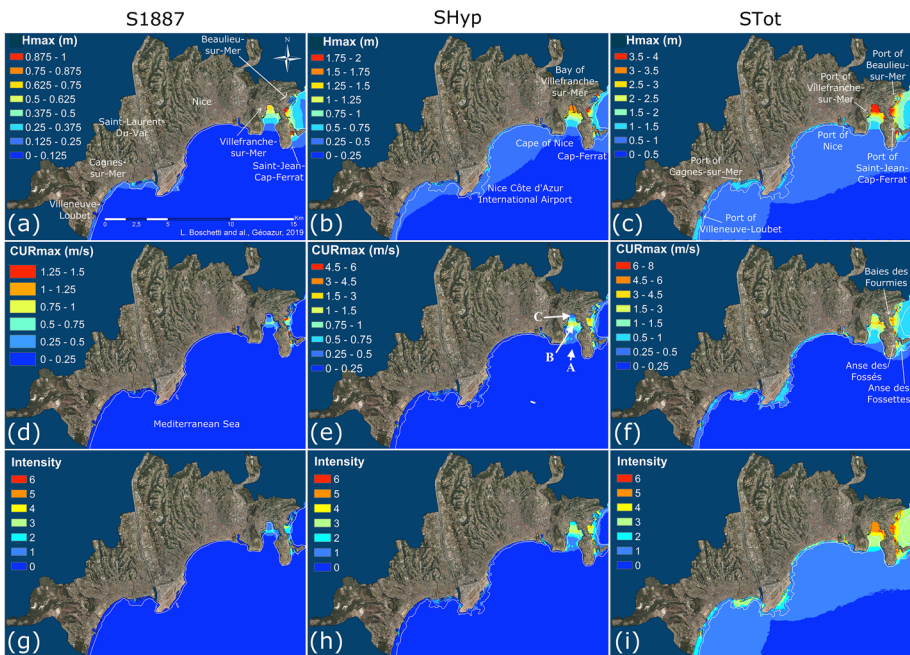


Fig. 10 Same as Fig. 8 for the central part of the District of the *Alpes-Maritimes* (the French Riviera)

tsunami intensity is negligible-to-weak (value of 0 for almost the whole sub-zone; Fig. 3 and 8g,h; Table 1). This is a sheltered subzone with little to no tsunami hazard. At the coast, no impact on people is expected. Immediately off the beach, there is no potentially dangerous movement to be expected from boats at berths or anchored.

To the east of port of Cannes, at Golfe Juan, including the Lerins Islands and as far as Antibes, H_{\max} values are disparate, ranging between 0.3 and 1.0 m, and locally reaching 1.5 to 2 m in the eastern area of *Cap d'Antibes* (beaches of *La Salis* and *La Garoupe*) for scenario SHyp (Fig. 8b). The beach of *La Salis* is flooded, as well as the street and storefronts on the opposite side. At the beach and shore, currents are generally less than 0.5 m s^{-1} , reaching up to 0.75 m s^{-1} at the *La Salis* and *La Garoupe* beaches. Corresponding tsunami hazard intensities are 3 or less (boats at berths are safe). At anchors, currents are generally lower than 1.50 m s^{-1} , with the exception of *La Salis* beach, where they can reach 3 m s^{-1} (Fig. 8e) and anchored boats could experience minor to moderate damage (intensity 3–4). Boats sailing away to the mouth of the small bay would be in sufficient depth to be sheltered (Fig. 8g,h, white line; Fig. 6).

3.4.1.2 Extreme hazard scenario STot In general, surface elevations less than 1 m and currents less than 0.5 m s^{-1} are simulated in the Gulf of *La Napoule* (Fig. 8c,f). The corresponding intensity is 1 (Figs. 3, 8i). This area consists of a large seaside zone frequented year-round by families of locals and tourists. The beach is at road level or below (accessed by stairs), depending on the portions. Most of the waterfront between Cannes and Mandelieu-la-Napoule consists in the parallel alignment of the beach, the littoral road and the rail track, standing about 2.5 m above the road (Fig. 9), thus blocking escape—only a few sparse pathways exist in the form of tunnels that could prove vulnerable to collapsing in case of an earthquake-generated tsunami or to flooding by the tsunami itself, should flooding reach beyond the seawall; the latter, however, is quite unlikely based on various scenarios considered here.

This geographic arrangement clearly affects coastal vulnerability and could yield a strong tsunami intensity, should a sufficiently large event occur. However, for our extreme event, the simulated tsunami impact is still small here ($H_{\max} < 1 \text{ m}$, $\text{CUR}_{\max} < 0.5 \text{ m s}^{-1}$) and intensity should not exceed 1. No flooding would result, and the road would remain a possible escape route. In contrast, The marina of Mandelieu la Napoule (wharf and anchorage) could experience flow depths up to 1.50 m at the coast (Fig. 8c) and currents up to 4.5 m s^{-1} (Fig. 8f). Intensity there could thus be much larger (3–4, Figs. 3, 8i), leading to potential loss of life and also to minor to moderate material damage to marine structures. The boats could possibly take shelter offshore to avoid harm; only a few hundred meters from shore would suffice (Fig. 8i, white line; Fig. 6).

Here, our results yield some possibly useful lessons. In practice, the evacuation of harbours would probably be a great challenge for such short notice events as those considered here, especially considering possible traffic jams to be expected in case of submersion. The identification of clear vulnerabilities and their communication to authorities should allow for a better preparedness of the communities. Moreover, during summer time, local harbours are packed with people and boats and, as a result, numerous ships and yachts are anchored nearby. Preparedness would also involve communicating with the crews of these boats.

The east of the city of Cannes, ranging from the old port to the entrance of the city of Vallauris, through the *Pointe Croisette* and the Lerins Islands, is subject to greater impact, mainly in the areas of anchorage. Here, tsunami amplitudes and currents could reach 2 m and 3 m s^{-1} , respectively, resulting in greater tsunami intensities: between 2 (causing little damage offshore) and 5 locally (significant damage to marine structures). *Golfe Juan* is impacted by amplitudes of up to 2 m. Although currents do not exceed 1 m s^{-1} at the beach, this still yields intensities up to 3, with significant human impact as a result. Farther

offshore, currents could reach 3 m s^{-1} at anchor, with corresponding intensities reaching 5–6, resulting in potentially major damage to boats. Boats would furthermore have to sail 3–4 km offshore to reach deep enough open sea areas and find shelter (Fig. 8i, white line; Fig. 7). In the event of a local co-seismic tsunami with immediate warning, our modelling predicts tsunami arrival times of 10–15 min after the earthquake. These distances and time are such that boat sheltering does not appear conceivable to us.

The tip of *Cap d'Antibes* is weakly impacted and does not experience significant flooding or currents. However, the eastern side of the cape is much more strongly impacted, with up to 4 m flow depth at the beach of *La Salis* and 2.50 m at that of *La Garoupe*. Currents are generally less than 3 m s^{-1} , but could locally reach $6\text{--}8 \text{ m s}^{-1}$ at anchor range, in both locations. Intensities therefore reach 5 for *La Salis* beach, both at anchor and at the beach. Moreover, this is the only area significantly flooded (up to 250 m inside the city), with high water levels and currents. This could cause catastrophic damage, first in terms of loss of life, due to large flow depths and, especially, currents, but also materially, with the destruction of waterfront businesses causing large moving debris loads that could in turn increase damage. The WEST part of this district therefore exhibits strong disparity in terms of flow depth, currents and therefore tsunami intensities, which results from the alternating focusing and neutral/defocusing areas of wave refraction along the coast (as discussed above).

3.4.2 Tsunami hazard in the CENTRAL part of the French Riviera

See Fig. 10.

3.4.2.1 Intermediate scenarios S1887 and SHyp From *Villeneuve-Loubet* to *Cape of Nice*, the calculated maximum amplitudes H_{\max} never exceed 0.75 m and, hence, no flooding is predicted (Fig. 10a,b). Maximum currents rarely reach 0.75 m s^{-1} (Fig. 10d,e). While H_{\max} may seem relatively insignificant, in areas where beaches are located below the littoral road at the toe of a several meter-high dike/seawall (e.g., *Castel Beach* in Nice, Fig. 11), escape paths may be up to several tens of meters away from many locations along the shore. Such



Fig. 11 Castel Beach, immediately east of the port of Nice, nearby the Old Town of Nice (Courtesy of Google Map Inc.). Red arrows represent beach exits

evacuation bottlenecks represent a factor of increased risk, keeping in mind that a 50 cm wave can prove fatal for children or elderly (Table 1). The widespread presence of pebbles increases this risk as it impedes running or quick walking on the beach. Farther East, *Cape of Nice*, which connects the port of Nice to that of Villefranche-sur-Mer, is a steep environment kept in its natural state. No beaches are found there but only small coves with periodic access paths to the sea, where one can quickly climb high enough above sea level. A pedestrian littoral path is also found there, which is sparsely frequented by hikers and fishermen. As a consequence, this zone poses little risk, owing both to the small expected tsunami flow depth and low vulnerability. Intensity ranges from 0 to 1 here (Fig. 10g,h), implying that this is a safe zone for boats to berth or anchor (Table 1). It is also worth noting that the Airport of Nice Côte d'Azur, a major international airport, is safe in terms of tsunami hazard as no flood is predicted there either.

From the bay of *Villefranche-sur-mer* to *Beaulieu-sur-mer*, including *Saint-Jean-Cap-Ferrat*, H_{max} can reach 1 m (scenario S1887) to 2 m (SHyp), without causing inundation albeit based on a 40 m resolution (Fig. 10a,b). At mooring, CUR_{max} is large, up to $0.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ for S1887 and $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ for SHyp (Fig. 10d,e). Significant intensities are therefore simulated for the harbor and port of *Villefranche-sur-Mer*, from 0 to 2 for S1887 and up to a level 4 for SHyp (Fig. 10g,h). The strongest intensities are at anchor. In the harbor, anchored yachts could potentially suffer significant damage if they were smashed onto berths. In this area, the road is located immediately next to the sea, along a dock. The beach of *Villefranche-sur-Mer*, for which an intensity of 1 for S1887 and 2 for SHyp are predicted, would be a shelter area for boats. Only a few spots with an intensity of 4 could potentially yield minor to moderate damage. The main beach is located at the bottom of the bay and laid out as a narrow strip, in between the sea and the rail tracks located just above it, atop a several meter-tall seawall against which waves would crash (Fig. 12). This geometry would likely cause people to be trapped as there are no evacuation routes here for several hundred meters, which would constitute a high vulnerability, especially in summer during daytime, when the area is typically very crowded.

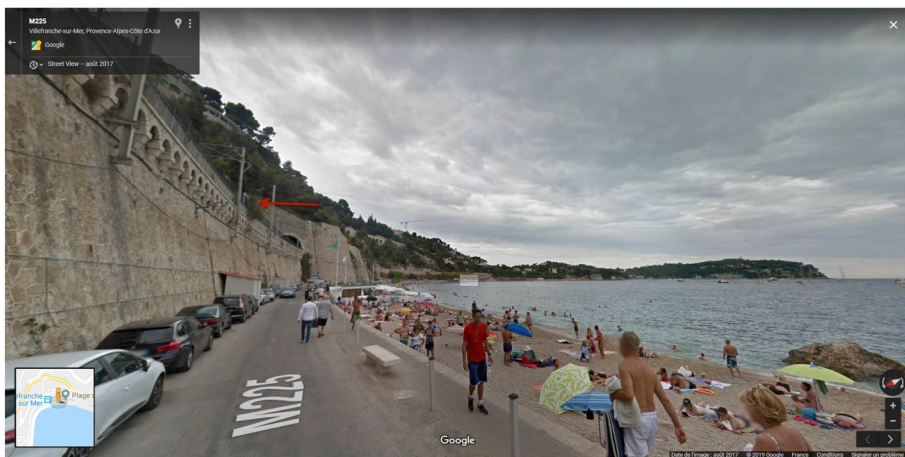


Fig. 12 The beach of Villefranche-sur-mer, at the foot of the railway station (Courtesy of Google Map Inc.). The red arrows locate the railway

The entire eastern part of *Cap-Ferrat*, including the *Anse des Fossés*, the *Anse des Fossettes*, the port of *Saint-Jean-Cap-Ferrat*, the *Baie des Fourmis* and the port of *Beaulieu-sur-Mer*, would be strongly impacted. Here H_{max} is always greater than 0.25 m for S1887 and in *Anse des Fossés* and the port of *Beaulieu-sur-Mer*, reaches the largest values found anywhere in the simulation of this scenario: 1 m. For the SHyp scenario, these values are 0.5–2 m (also in the port of *Beaulieu-sur-Mer*), but no flooding is predicted. Currents are generally greater than 0.25 m s^{-1} for S1887 and 0.5 m s^{-1} for SHyp, and can respectively reach 1.5 m s^{-1} and 3 m s^{-1} in bays and ports. This zone is thus classified from low (level 1) to high intensity (level 4) for these two scenarios. Once again, the mooring areas would experience larger currents and therefore higher intensities. The ports of *Saint-Jean-Cap-Ferrat* and *Beaulieu-sur-Mer* exhibit a very strong intensity, thus implying potentially significant damage.

3.4.2.2 Extreme scenario STot From *Villeneuve-Loubet* to the *Cape of Nice*, H_{max} almost always reaches values of 1.5–2 m without causing flooding (Fig. 10c). The simulated CUR_{max} are generally greater than 0.50 m s^{-1} and can occasionally reach 3 m s^{-1} at the mouth of the ports of *Villeneuve Loubet*, *Cagnes-sur-Mer* and *Nice* (Fig. 10f). Corresponding intensities are therefore generally intermediate on the littoral part (generally less than 3), thus implying a potentially significant impact on the population (Fig. 10i). In contrast, such intensities would have little impact on berthed and moored boats (Table 1). Nice International Airport is not flooded and is never threatened by such a tsunami.

The *Cape of Nice* and the southern and western parts of *Cap Ferrat* are subject to low to moderate intensities (levels 1 and 2) because CUR_{max} is less than 0.50 m s^{-1} and H_{max} is less than 1.5 m (Fig. 10c,f,i). On the other hand, in *Villefranche-sur-Mer*, at the port and at the beach, H_{max} is large, almost always higher than 2 m and up to 4 m at the beach or even at anchor. The same holds true for the coves located to the southeast (*anse des Fossés* and *anse des Fossettes*), the port of *Saint-Jean-Cap-Ferrat*, the *Baie des Fourmis* and the port of *Beaulieu-sur-Mer*. Currents are higher than 0.5 m s^{-1} over the entire zone, and can exceed 6 m s^{-1} at a few locations such as the mouth of the port of *Villefranche-sur-Mer*, the *Anse des Fossés*, the port of *Saint-Jean-Cap-Ferrat*, the port of *Beaulieu-sur-Mer* and the entry of the *Baie des Fourmis*. Intensities therefore range from moderate to strong (3–6) for the coastal part of these municipalities, with the largest values obtained at anchor. In the specific spots of *Villefranche Bay* (because of its particular shape), and east of *Cap Ferrat*, anchored boats should leave the entire area to be safe because the zone reaching an intensity of 4 (for which boats are damaged) extends offshore well beyond the usual bathymetry line of 35 m (Fig. 10i, white line).

3.4.3 Tsunami hazard in the EAST part of the French Riviera

The eastern side of the district, from Eze to Menton, is the closest to the earthquake epicenter, whatever the scenario, and is therefore potentially the most affected by the earthquake and tsunami waves. Wave directivity is responsible for the larger coastal flow depths found in this area, because the largest initial heights at the source occur just offshore of it (at least in the French Riviera, Fig. 4). This trend is increased as one approaches the Italian border.

3.4.3.1 Intermediate scenarios S1887 and SHyp Coastal tsunami amplitudes are less than 1 m for S1887 and less than 2 m for SHyp (Fig. 13a, b): *Eze* and *Cap-d'Ail* are impacted

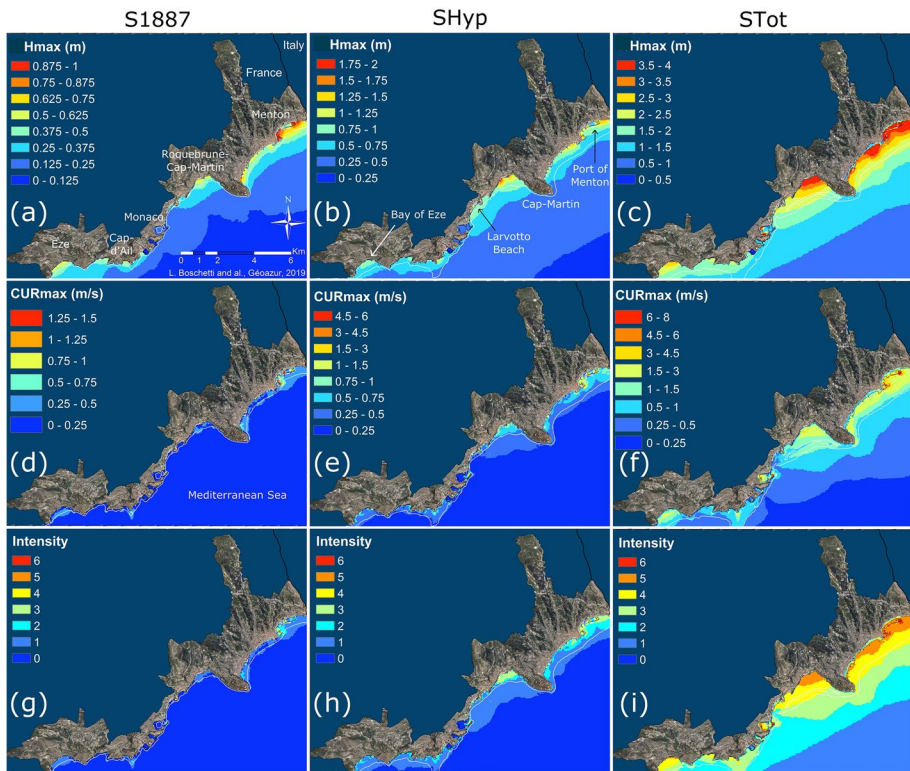


Fig. 13 Same as Fig. 8 for the eastern side of the District of the Alpes-Maritimes (the French Riviera)

by 0.25–0.6 m amplitudes for the first scenario, and 0.5–1 m for the second. Currents are generally less than 0.25 m s^{-1} , but can reach 0.5 m s^{-1} in some cases and are mainly on the order of 0.75 m s^{-1} in the first case, with values reaching 1 m s^{-1} locally in the second case (Fig. 13d, e). The respective intensities are therefore low (levels 0 and 1) and low to moderate (1–3) (Fig. 13g, h). Along the coast in this area, the shore is steep and roads do not run directly next to the sea, but higher up. Nevertheless, there are many beaches of varying width and distance to the road, which represent the sensitive part of this area, for the same reasons as those located further west, such as described above.

The *Principality of Monaco* is relatively protected and would suffer little impact in the first scenario, with wave amplitudes not exceeding 0.40 m and currents less than 0.25 m s^{-1} . The overall intensity for the city is therefore low (level 1). The second scenario would impact the city more, especially the beaches located at the eastern end of the city (Larvotto beach), with up to 1 m surface elevations and up to 1 m s^{-1} currents, thus conferring this area a moderate intensity (level 2). Overall, for both scenarios, the *Principality of Monaco* generally experiences low tsunami intensities. It is important though to keep in mind that the *Principality* is a vulnerable site, from a human standpoint (high population density) and because important economic assets are at stake in this wave focusing area.

The cities located further east, *Roquebrune-Cap-Martin* and *Menton*, are the most impacted in the entire district of *Les Alpes-Maritimes*, because of the tsunami directivity (see above). The *Bay of Roquebrune* would be potentially affected by flow depths reaching

0.75 m for S1887 and 2 m for SHyp at the coast. For these two scenarios, currents are respectively less than 0.5 m s^{-1} and 1.5 m s^{-1} , yielding intensities ranging from low in the first case (0 and 1) to moderate in the second case, due to stronger current effects. This coastal area consists mainly of beaches bordered by the railway. No road runs close to the sea. The littoral area is once again enclosed by a seawall with little escape routes available, making evacuation in the area very problematic. The southwestern part of *Cap Martin* is relatively sheltered in both scenarios. The entire *Bay of Roquebrune-Cap-Martin* up to the Italian border would be impacted by 0.5–1 m tsunami amplitudes for S1887, and 0.75–1.75 m for SHyp. In both cases, the largest values are observed on both sides of the port of *Menton*. In the S1887 scenario, currents are less than 0.5 m s^{-1} , but reach 1.5 m s^{-1} there. The SHyp scenario would generate currents ranging from 0.5 to 3 m s^{-1} , with a spatial distribution similar to the first one. In the S1887 scenario, the whole bay is therefore considered of low intensity (1–2), with again the exception of the port of *Menton*, where intensity is moderate to high (2–4). In the SHyp scenario, intensities are generally moderate (levels 2–4).

Although flow depth and currents are large, no flooding is predicted throughout this area. However, there are sensitive spots—beaches essentially—that can be heavily impacted and experience significant damage, mainly human. Some vulnerabilities need to be considered.

3.4.3.2 Extreme scenario STot This scenario appears to be severely impacting this coastal area. Unsurprisingly owing to the proximity of the source to the coast, the largest values in all our simulations are found here and for this scenario, for tsunami amplitudes, currents as well as flooding. *Eze* and *Cap d'Ail* could potentially be impacted by waves causing 1.50–3.5 m flow depth at the coast in the *Bay of Eze* (Fig. 13c). Currents would reach up to 3 m s^{-1} off the coast, being essentially less than 1 m s^{-1} on the coastal fringe (Fig. 13f). The corresponding intensities are thus strong to very strong (4 and 5), with similar values at beach and at anchor (Fig. 13i). The *Principality of Monaco* would also be impacted by significant waves, with amplitudes ranging between 1 and 4 m at the coast. The port of *Monaco* would experience the largest values, especially inside of it. This is also where the most important currents would be found, reaching up to 4.5 m s^{-1} , while these would be less than 1 m s^{-1} for the rest of the coast of *Monte Carlo*. *Larvotto beach* also appears to be heavily impacted in this scenario, with up to 3 m amplitudes and flooding of the beaches. Although currents are less than 1 m s^{-1} , this seaside area could experience disastrous consequences, particularly if this event occurred when it is crowded with families, as is the case in the summer season during daytime. The *Principality* is classified as medium to strong intensity (levels 2–6), mainly due to flow depths. Here again, intensities obtained at the beach and at anchor are similar.

The eastern end of the *Alpes-Maritimes* would be impacted by waves of great power, with maximum amplitudes generally exceeding 3 m, and currents greater than 1.5 m s^{-1} . Flooding would be important as well, resulting in very strong intensities, with flow depths reaching 2.5 m at the coast. This also holds for currents, whose expected extreme values could reach up to 6 m s^{-1} near port of *Menton* and decrease at the shore, down to 1.5 m s^{-1} . Corresponding intensities are thus high here, implying strong impact, between 4 and 5 over the whole coastal fringe, and decrease onland, following water level and current trends. Intensity remains large on the seaside, between 1 and 4, depending on location. A short distance offshore, the damage to anchored boats would be important, and the safe area for boats would stand at bathymetric depths exceeding 35 m (Fig. 13i, white line).

In summary, the eastern part of the French Riviera would be strongly impacted for the intermediate magnitude scenarios and very strongly impacted for the extreme one. Beaches once again would be the most sensitive areas, as many of these are enclosed between the sea and a steep shore (seawall or natural topography), which would pose problems for a timely evacuation and sheltering in case of a significant event occurring at a time of affluence (e.g., summer in daytime). The mooring areas also appear to be sensitive, as many of these are located at short distance offshore and would experience the highest wave amplitudes and strongest currents found in all our simulations. In the extreme scenario case, boats would have to move much further offshore to find shelter, which appears unlikely considering the short warning times. Note that boat damage would depend less on the season and time of the day the event would occur.

4 Discussion and conclusions

The French Riviera has been regularly affected by small to moderate seismicity, whose source is mostly located a few to a few tens of km offshore. In this context, the largest earthquakes would most likely be expected to occur and trigger tsunamis along the approximately 80 km long, active, North Ligurian Fault System (NLFS) (Eva et al. 2001; Bethoux et al. 1992; Larroque et al. 2011). At large recurrence time, although this remains poorly known and debated, the area could be affected by relatively large earthquakes such as the 1887 event, whose estimated magnitude was M_w 6.7–6.9, which caused an up to 2 m runup along the French Riviera (Larroque et al. 2012; Ioualalen et al. 2014). During this emblematic event, the 30–40 km-long eastern segment of the NLFS ruptured offshore of Imperia, Italy (similar to our scenario S1887; Larroque et al. 2012; Ioualalen et al. 2014). No other event of such a magnitude has been reported since antiquity, in spite of an arguably long documented time span here (Stucchi et al. 2012; Manchuel et al. 2017). However, the 1887 event proved that the occurrence of such large tsunamigenic events need to be considered along the NLFS, which has only recently been identified and documented and is still being studied. In particular, considering that the NLFS probably ruptures in segments and that its western segment has no evidence of a rupture equivalent to 1887 in historical times, our considered scenario SHyp is quite plausible for a future event. Likewise, fault systems are known for rupturing with varying patterns throughout seismic cycles, possibly alternating piecewise ruptures, such as S1887 and SHyp scenarios, and larger multiple-segment events, such as our STot scenario, which would rupture the whole NLFS with an estimated M_w 7.5 earthquake. Such a large event is thus also in the realm of possible future extreme events along the NLFS (Larroque et al. 2012; Ioualalen et al. 2014). Although most likely very rare (with possibly thousands of years in recurrence time), the possibility of such an event can thus not be ruled out, hence our analysis of this extreme scenario in the present study.

Following Ioualalen et al. (2014) and Nemati et al. (2019), we favored a deterministic approach to reassess the regional tsunami hazard based on three scenarios that were built from up-to-date knowledge of the seismotectonics and morphology of the area. Note that understanding the seismotectonics of the area is still work in progress and there is no unambiguous estimate for the return periods of large earthquakes such as those considered in this study; hence, there is no reliable estimate for local tsunami return periods either. It should be noted that, unlike the two others, the magnitude of STot extreme scenario is not supported by historical or paleo-seismological data and simply stems from the sheer size

of the rupture zone if it were to be activated as part of a single event. Note, however, once again, there is no conspicuous evidence to date that such a complete rupture of the NLFS should be ruled out; the absence of any structural discontinuity in the surface traces of the NLFS actually points to the opposite. We have therefore decided to consider this maximalist scenario, even if its occurrence is likely quite rare at best, in order to establish an upper bound of the expected tsunami hazard along the French Riviera. Finally, we consider that these 3 scenarios based on historical and tectonic data are sufficient to deterministically analyze coseismic tsunami hazard in this region.

In this respect, Ioualalen et al. (2014) performed an initial mapping of tsunami coastal hazard using the *FUNWAVE* tsunami propagation model to simulate a variety of scenarios in a coarse 100 m grid. Such a resolution, while adequate offshore was too coarse along the coast. More recently, Nemati et al. (2019) refined these computations using *FUNWAVE-TVD* in a series of nested grids of varying resolution. Their finer nested grids had 40 m and 10 m resolutions. They showed in particular how complex coastal areas such as Nice's harbors were clearly under-resolved in earlier modeling, leading to significantly over-estimated runup values. Moreover, they used a new set of high-resolution bathymetric data, obtained from multibeam surveys, which in particular improved accuracy over the poorly documented continental shelf on the French side of the *Riviera*. In the present study, which aims at assessing tsunami intensity, while we still used a single grid with *FUNWAVE* (as in Ioualalen et al. 2014), its 40 m grid resolution allowed for a sufficient description of most coastal features. Although not shown in Nemati et al. (2019), our present results were compared with theirs and their basic statistics are very similar.

In terms of tsunami hazard assessment and warning, the main criteria are the polarity and amplitude of the first incoming wave, as well as the arrival time, which here depend on the considered NLFS rupture scenarios. Our analysis of the first wave indicates a very short arrival time, only a few minutes being needed to reach the French Riviera coast, whatever the scenario. On such short notice, the warning conditions will be poor. Additionally the polarity of the wave (crest vs. trough arriving first) is not systematic so, this will also affect warning conditions. Moreover, as seen above, even if a trough led the wave train, it could be imperceptible, making for a poor warning indeed. Hence, feeling the earthquake and reacting accordingly based on pre-existing instructions (e.g., head for high ground) is arguably the most reliable warning and mitigation measure for the possible tsunamis in this area.

We always learn from benchmarks between different studies involving various numerical models or source scenarios. The main element of comparison is the spatial variability of the tsunami magnitude (surface elevation and current) at the coast. This parameter is crucial for improving the preparedness of a given coastal area to the expected hazard. On a first-order basis, for any given tsunami propagation, the shoaling effect (the slope effect) applies everywhere in the same way, so that alone it cannot explain the spatial variability of the coastal tsunami height, especially when applying the elementary $\frac{1}{4}$ -powered Green's law which has been established through many assumptions (very long linear, non-dispersive and conservative waves, energy flux conservation mainly). The question is thus: are the other amplification (or attenuation) processes able to generically describe such variability, such as, focusing/defocusing, resonance, wave directivity, etc.? Some of these depend on coastal morphology and bathymetry (e.g., focusing/defocusing), which are good candidates because they are independent of the tsunami itself. Others (wave directivity, resonances among them) are less generic; for example, resonance depends on the tsunami frequency content and wave directivity depends on the geometry and dynamics of the sea-floor deformation.

To visually illustrate this issue, we have always normalized the H_{\max} color scale for each scenario. As a result whatever the scenario, figures look similar to the first-order because the focusing/defocusing effect is usually the leading amplification/attenuation process of tsunami amplitude and current (e.g., Figs. 8, 10, 13). When looking more closely, there are differences when changing earthquake scenarios. Our deterministic approach, based on physical rupture scenarios, intends to directly provide magnitude maps. Other studies have tried to estimate empirically this spatial variability. Gailler et al. (2018) and Glimsdal et al. (2019), in an effort to provide fast estimates of the tsunami wave height for an operational warning system purpose, applied the empirical β -coefficient that was proposed by Reymond et al. (2012) and Jamelot and Reymond (2015) to the French Riviera. This coefficient is included in their extended Green's law. For each considered coastal area, a β -spatial distribution must be estimated empirically through an ensemble of numerical simulations, which makes it semi-generic. As a result, in their French Riviera case study, the more detailed the β -spatial distribution, the more accurate and quickly computed the tsunami coastal distribution. It is also fair to say that the distribution depends on the scenario, which is not surprising since the amplification/attenuation of the wave also depends on the wave characteristics as said above. For example, a spatial distribution of the β coefficient better estimates the spatial tsunami distribution compared to a uniform one within the bay of Villefranche-sur-mer. This is because their coefficient varies with the bay morphology. It is also noticeable that some differences appear when changing scenario, likely due to the differences between the entering wave characteristics as said above. For example, the wave height is larger at the breakwater protecting the harbor than at the beach, which is consistent with their derived β -amplifying coefficient values of 1.2 and 0.6, respectively, for their Djijelli 1856 scenario J7.1, which is excellent. However, their local scenario L, which is supposed to represent the 1887 event, using different rupture parameters than ours, provides similar wave heights at the same locations. However, in our simulation, the maximum wave height is greater at the beach (Fig. 10b) probably because our rupture parameters are different, which suggests that the characteristics of the incoming wave also play a significant role, in addition to that of coastal morphology.

Our deterministic approach for estimating extreme tsunami hazard complements others that can be considered semi-probabilistic. Our procedure proposes a global tsunami mapping that can be exploited for preparedness. The approach of Gailler et al. (2018), that is discussed above, may be considered as semi-probabilistic since both deterministic source scenarios are considered and stochastic regression laws are estimated in order to represent at best the local site effects. Once the local laws are prescribed (for wave heights in their case), they can be integrated in a warning system protocol such as operated by the French CENALT (*Centre National d'ALerte aux Tsunamis*) (Schindel el et al. 2015), which is a component of the regional NEAMTWS (North East Atlantic and Mediterranean Tsunami Warning System). The CENALT uses more than 2000 pre-computed source scenarios for the Western Mediterranean. Based on this database and the estimated local regression laws, a tsunami hazard mapping can be performed at very low CPU and memory costs. Hence, for an actual event, the tsunami mapping associated with the earthquake source parameters is extracted from the database and a more accurate mapping is issued based on the local regression laws in near real time (hopefully before the first wave arrival which is only a few minutes in the case of our local sources). Eventually, the regression laws may be post-processed or possibly included in the data base mapping. It is fair to say that our methodology consisting in the mapping of the intensity may possibly enrich CENALT's if the latter approach was extended to include tsunami-induced currents and, ultimately, an intensity scale such as proposed by BI-20.

Following Nemati et al. (2019)'s mapping of runup along the French Riviera, the present tsunami intensity study is the next necessary step to be able to assess coastal vulnerability and resilience in future studies. Results of simulations of coastal runups, maximum tsunami depths, and currents reported by Nemati et al. (2019) and in the present study, along with the proposed estimates of potential damage analyzed here, may be used to design mitigation plans that could help preparing local populations, improve the resiliency of littoral structures, as well as draw plans for relevant emergency responses to tsunami hazard.

Our mapping of tsunami intensity reveals a high spatial variability of potential damage that is mainly related to site-specific effects (e.g., wave energy focusing vs. neutral or defocusing processes), to tsunami directivity, and earthquake source location. Nemati et al.'s (2019) as well as our study allow assessing how areas of the French Riviera should be classified with respect to tsunami hazard, from "sheltered" to "highly exposed," through mapping of the inundation and tsunami current fields: capes (*Cap d'Antibes* and *Cap Ferrat*) along with semi-enclosed bays (e.g., *La Salis Beach* at Antibes) would be faced with amplified waves. In contrast, widely opened bays (e.g., *Baie des Anges* and *Baie de Cannes*) would be less exposed due to wave defocusing. The latter areas turn out to be the most densely developed, with the higher population concentrations, especially at summer time.

However, such statements are quite general and some more local insight was needed, which was the purpose of this study: once the tsunami magnitude is derived (by combining the maxima of amplitudes and currents), potential damage estimates can be derived from the tsunami intensity scale of BI-20.

Acknowledgements L. Boschetti, M. Ioualalen and J.-X. Dessa acknowledge support from: (1) the European Commission under the project "Assessment, STRategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe," ASTARTE (Grant No. 603839) and (2) the French government, through the UCA-JEDI Investments in the Future project managed by the National Research Agency (ANR) with the reference number ANR-15-IDEX-01. F. Nemati and S. Grilli acknowledge support for this work from the US National Science Foundation Grant CMMI-15-35568. Finally, the authors acknowledge with appreciation one anonymous reviewer who helped improve the first draft of the manuscript.

References

- Alasset PJ, Hébert H, Maouche S, Calbini V, Meghraoui M (2006) The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake (MW = 6.9, Algeria): modelling and results. *Geophys J Int* 166:213–226. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02912.x>
- Béthoux N, Fréchet J, Guyoton F, Thouvenot F, Cattaneo F, Nicolas M, Granet M (1992) A closing Ligurian sea. *Pure Appl Geophys* 139:179–194
- Boschetti L, Ioualalen M (2019) Integrated tsunami intensity scale based on maxima of tsunami amplitude and induced current. *Natural Hazards*, submitted as a companion paper
- Denza F (1887) *Alcune notizie sul terremoto del 23 febbraio 1887*. Torino
- Déverchère J, Yelles K, Domzig A, Mercier de Lépinay B, Bouillin J, Gaullier V, Bracène R, Calais E, Savoye B, Kherroubi A, Le Roy P, Pauc H, Dan G (2005) Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relations to the 2003 Mw 6.9 earthquake. *Geophys Res Lett* 32(4):L04311. <https://doi.org/10.1029/2004GL021646>
- Eva C, Rabinovich AB (1997) The February 23, 1887 tsunami recorded on the Ligurian coast, western Mediterranean. *Geophys Res Lett* 24:2211–2214
- Eva E, Sollarino S, Spallarossa D (2001) Seismicity and crustal structure beneath the western Ligurian Sea derived from local earthquake tomography. *Tectonophysics* 339:495–510. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00106-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00106-8)

- Ferrari G (1991) The 1887 Ligurian earthquake: a detailed study from contemporary scientific observations. *Tectonophysics* 193:131–139
- Glimsdal S, Lovholt F, Harbitz CB, Romand F, Lorito S, Orefice S, Brizuela B, Selva J, Hoechner A, Volpe M, Babeyko A, Tonini R, Wronna M, Omira R (2019) A new approximate method for quantifying tsunami maximum inundation height probability. *Pure Appl Geophys* 176:3227–3246. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02091-w>
- Grilli ST, O'Reilly C, Harris JC, TajalliBakhsh T, Tehranirad B, Banihashemi S, Kirby JT, Baxter CDP, Eggeling T, Ma G, Shi F (2015) Modeling of SMF tsunami hazard along the upper US East Coast: Detailed impact around Ocean City MD. *Nat Hazards* 76(2):705–746. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1522-8>
- Gailler A, Hébert H, Schindelé F, Reymond D (2018) Amplification laws for the French tsunami warning center: numerical modeling and fast estimate of tsunami wave along the French Riviera. *Pure Appl Geophys* 175:1429–1444
- Ioualalen M, Migeon S, Sardoux O (2010) Landslide tsunami vulnerability in the Ligurian Sea: case study of the 1979 October 16 Nice international airport submarine landslide and of identified geological mass failures. *Geophys J Int* 181(2):724–740
- Ioualalen M, Larroque C, Scotti O, Daubord C (2014) Tsunami mapping related to local earthquakes on the French–Italian Riviera (western Mediterranean). *Pure Appl Geophys* 171(7):1423–1443
- Jamelot A, Reymond D (2015) New tsunami forecast tools for the French Polynesia tsunami warning system. Part II: numerical modeling and tsunami height estimation. *Pure Appl Geophys* 172(3–47):805–819
- Lambert J, Terrier M (2011) Historical tsunami database for France and its overseas territories. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11:1037–1046
- Larroque C, Béthoux N, Calais E, Courboux F, Deschamps A, Deverchère J, Stéphan JF, Ritz JF, Gilli E (2001) Active and recent deformation at the Southern Alps-Ligurian basin junction. *Neth J Geosci Geologie en Mijnbouw* 80:255–272
- Larroque C, Delouis B, Godel B, Nocquet J-M (2009) Active deformation at the southwestern Alps-Ligurian basin junction (France-Italy boundary): evidence for recent change from compression to extension in the Argentera massif. *Tectonophysics* 467:1–4. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.12.013>
- Larroque C, Mercier de Lépinay B, Migeon S (2011) Morphotectonic and fault-earthquake relationships along the northern Ligurian margin (Western Mediterranean) based on high resolution multibeam bathymetry and multichannel seismic-reflection profiles. *Mar Geophys Res* 32:163–179. <https://doi.org/10.1007/s11001-010-9108-7>
- Larroque C, Scotti O, Ioualalen M (2012) Reappraisal of the 1887 Ligurian earthquake (western Mediterranean) from macroseismicity, active tectonics and tsunami modelling. *Geophys J Int*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05498.x>
- Lynett PJ, Borrero J, Son S, Wilson R, Miller K (2013GL) Assessment of the tsunami-induced current hazard. *Geophys Res Lett* 41:2048–2055. <https://doi.org/10.1002/2013GL058680>
- Manchuel K, Traversa P, Baumont D, Cara M, Nayman E, Durouchoux C (2017) The French seismic CAtalogue (FCAT-17). *Bull Earthq Eng*. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0236-1>
- Nemati F, Grilli ST, Ioualalen M, Boschetti L, Larroque C, Trevisan J (2019) High-resolution coastal hazards assessment along the French Riviera from coseismic tsunamis generated in the Ligurian fault system. *Nat Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3555-x>
- Okada Y (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull Seismol Soc Am* 75(4):1135–1154
- Papadopoulos GA (2003) Quantification of tsunamis: a review. In: Yalçiner AC, Pelinovsky E, Okal E, Synolakis CE (eds) *Submarine landslides and tsunamis, nato science series (Series IV: Earth and environmental sciences)*, vol 21. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0205-9_30
- Papadopoulos GA, Imamura F (2001) A proposal for a new tsunami intensity scale Internat. In: *Tsunami symposium 2001 proceedings* Seattle, Washington, pp 569–577
- Pophet N, Kaewbanjak N, Asavanant J, Ioualalen M (2011) High grid resolution and parallelized tsunami simulation with fully nonlinear Boussinesq equations. *Comput Fluids* 40:258–268
- PPFR (1999) *Plans de prévention des risques naturels (PPR)—Risques d'inondation—Guide méthodologique*. La documentation Française, p 126, ISBN: 2-11-004402-0
- PPFR-Thau (2012) *Plan de prévention des risques naturels d'inondation—Bassin versant de l'Etang de Thau, Commune de Villeveyrac*. Direction Départementale des Territoires et de la Mer – Service Eau et Risques, Préfecture de l'Hérault, p 54
- Reymond D, Okal E, Hébert H, Bourdet M (2012) Rapid forecast of tsunami wave height from a data base of pre-computed simulations, and application during the 2011 Tohoku tsunami in French Polynesia. *Geophys Res Lett* 30(11):L11603

- Sahal A, Roger J, Allgeyer S, Lemaire B, Hébert H, Schindelé F, Lavigne F (2009) The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdès-Zemmouri (Algeria) earthquake: field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modelling. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9:1823–1834. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1823-2009>
- Schambach L, Grilli ST, Kirby JT, Shi F (2018) Landslide tsunami hazard along the upper US East Coast: effects of slide rheology, bottom friction, and frequency dispersion. *Pure Appl Geophys*. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1978-7>
- Schindelé F, Gailler A, Hébert H, Loevenbruck A, Gutierrez E, Monnier A, Roudil O, Reymond D, Rivera L (2015) Implementation and challenges of the tsunami warning system in the western Mediterranean. *Pure Appl Geophys*. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0950-4>
- Shuto N (1991) Tsunami intensity and disasters. In: Tinti S (ed) *Tsunamis in the World*. Kluwer Academic Publishers, Dordrech, pp 197–216. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3620-6_15
- Stucchi M, Rovida A, Gomez-Capera AA et al (2012) The SHARE European earthquake catalogue (SHEEC) 1000–1899. *J Seismol*. <https://doi.org/10.1007/s10950-012-9335-2>
- Taramelli T, Mercalli G (1888) Il terremoto ligure del 23 febbraio 1887. *Annali dell'Ufficio Centrale Meteorologico e Geodinamico Italiano* II 8(4):331–626
- Tehranirad B, Harris JC, Grilli AR, Grilli ST, Abadie S, Kirby JT, Shi F (2015) Far-field tsunami impact in the north Atlantic basin from large scale flank collapses of the Cumbre Vieja volcano La Palma. *Pure Appl Geophys* 172(12):3589–3616. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1135-5>
- Tinti S, Maramai A, Graziani L (2004) The new catalogue of Italian tsunamis. *Nat Hazards* 33:439–465
- Wei G, Kirby JT (1995) A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 121:251–261
- Wei G, Kirby JT, Grilli ST, Subramanya R (1995) A Fully Nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part1. highly nonlinear unsteady waves. *J Fluid Mech* 294:71–92
- Wells DL, Coppersmith KJ (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull Seismol Soc Am* 84(4):974–1002

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Annexe 6 :

*Détail des différents enjeux et facteurs pouvant être analysés dans
l'étude de vulnérabilité*

	Enjeux majeurs	Facteurs	Unités de mesures	Sources
Population	Densité de population	Densité par commune	Hab/km ²	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Densité par quartier	Hab/km ²	Non disponible
		Connaissance du risque	Pourcentage de la population ayant connaissance du DICRIM	Non disponible
		Exposition des zones d'inondations	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
	Zones d'habitation	Zone d'habitation	Qualitatif	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Exposition des zones habitées	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
Etablissement recevant du public	ERP à public sensible	Type de structure	Qualitatif	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Résistance du bâtiment	Données structurelles	Non disponible
		Exposition de la structure	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
	ERP de santé	Capacité d'accueil	Nombre de lit	Non disponible
		Niveau de préparation à une crise	A déterminer selon les données disponibles	Non disponible
		Type d'établissement de santé	Qualitatif	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Résistance du bâtiment	Données structurelles	Non disponible
		Exposition	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
	ERP potentiellement utilisable comme zone refuge	Type d'ERP	Qualitatif	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Résistance du bâtiment	Données structurelles	Non disponible
		Connu par la population	Données non disponibles	Non disponible
		Exposition	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
Réseaux « soft » structurel	Pompier (SDIS)	Moyens humains	Nombre d'hommes	Non disponible
		Moyens techniques	Véhicules	Non disponible
		Densité : par commune, par zone inondée, zone non inondée, etc.	Casernes/km ²	Non disponible
		Délais d'intervention des secours	Temps	SDIS 06 (SDACR)
		Type de caserne	Qualitatif	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Personnes dépendantes	Nombre ou pourcentage	Non disponible
		Personnes impactées en cas de disfonctionnement	Nombre ou pourcentage	Non disponible
		Lien entre les différents niveaux		Non disponible
		Lien entre les différentes structures		Non disponible

		Exposition	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
	Structures décisionnelles locales et communales	Type de structure	Qualitatif	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Moyens humains	Nombre d'hommes	<i>Non disponible</i>
		Moyens techniques	Véhicules	<i>Non disponible</i>
		Personnes dépendantes	Nombre ou pourcentage	<i>Non disponible</i>
		Personnes impactées en cas de disfonctionnement	Nombre ou pourcentage	<i>Non disponible</i>
		Existence de centres secondaires	Accessibilité et localisation de ces centres secondaires	<i>Non disponible</i>
		Lien entre les différents niveaux		<i>Non disponible</i>
		Lien entre les différentes structures		<i>Non disponible</i>
			Exposition	Eloignement de la zone impactée
	Structures décisionnelles départementales et régionales	Type de structure	Qualitatif	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Moyens humains	Nombre d'hommes	<i>Non disponible</i>
		Moyens techniques	Véhicules	<i>Non disponible</i>
		Personnes dépendantes	Nombre ou pourcentage	<i>Non disponible</i>
		Personnes impactées en cas de disfonctionnement	Nombre ou pourcentage	<i>Non disponible</i>
		Existence de centres secondaires	Accessibilité et localisation de ces centres secondaires	<i>Non disponible</i>
		Lien entre les différents niveaux		<i>Non disponible</i>
		Lien entre les différentes structures		<i>Non disponible</i>
			Exposition	Eloignement de la zone impactée
Réseaux « durs » statiques	Réseaux et structures d'eau	Type de structure	Qualitatif	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Personnes dépendantes	Nombre ou pourcentage	<i>Non disponible</i>
		Personnes impactées en cas de disfonctionnement	Nombre ou pourcentage	<i>Non disponible</i>
		Forme du réseau	Qualitatif	<i>Non disponible</i>
		Existence de réseaux secondaire	Qualitatif	<i>Non disponible</i>
		Flux		<i>Non disponible</i>
		Exposition	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
	Réseaux et structures électriques	Type de structure	Qualitatif	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Personnes dépendantes	Nombre ou pourcentage	<i>Non disponible</i>
		Personnes impactées en cas de disfonctionnement	Nombre ou pourcentage	<i>Non disponible</i>
		Forme du réseau	Qualitatif	<i>Non disponible</i>

		Existence de réseaux secondaire	Qualitatif	<i>Non disponible</i>
		Flux journalier	Véhicules/jours	<i>Non disponible</i>
		Flux horaire	Véhicules/heures	<i>Non disponible</i>
		Exposition	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
	Réseaux et structures routiers	Flux journalier	Véhicules/jours	<i>Non disponible</i>
		Flux horaire	Véhicules/heures	<i>Non disponible</i>
		Importance du réseau	5 classes faites par BD topo	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Orientation du réseau	Point cardinaux	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Élévation des structures routières	Différence par rapport au niveau du sol	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Dépendance des réseaux		<i>Non disponible</i>
		Existence de réseaux secondaires		<i>Non disponible</i>
		Exposition	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
	Réseaux et structures ferrés	Flux journalier	Véhicules/jours	<i>Non disponible</i>
		Flux horaire	Véhicules/heures	<i>Non disponible</i>
		Importance du réseau	Classes	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Orientation du réseau	Point cardinaux	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Élévation des structures ferroviaires	Différence par rapport au niveau du sol	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Dépendance des réseaux		<i>Non disponible</i>
		Existence de réseaux secondaires		<i>Non disponible</i>
		Stockage/transport de matières dangereuses	<i>Données non disponibles</i>	<i>Non disponible</i>
		Exposition	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
	Réseaux et structures portuaires	Flux journalier	Sorties-arrivées bateaux/jours	<i>Non disponible</i>
		Flux horaire	Sorties-arrivées bateaux/horaires	<i>Non disponible</i>
		Type de port	Qualitatif	BD-Topo v3.0 IGN 2019
Stockage/transport de matières dangereuses		<i>Données non disponibles</i>	<i>Non disponible</i>	
Exposition		Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa	
Réseaux et structures aéroportuaires	Flux journalier	Nombre de voyageurs/jours	<i>Non disponible</i>	
	Flux horaire	Nombre de voyageurs/horaires	<i>Non disponible</i>	
	Type d'aéroport	Qualitatif	BD-Topo v3.0 IGN 2019	
	Stockage/transport de matières dangereuses	<i>Données non disponibles</i>	<i>Non disponible</i>	
	Exposition	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa	

Attraits touristiques côtiers	Plages	Fréquentation journalière	Personnes/jour	<i>Non disponible</i>
		Fréquentation horaire	Personnes/heure	<i>Non disponible</i>
		Type de fréquentation	Qualitatif	<i>Non disponible</i>
		Superficie des plages	m ²	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Possibilité d'évacuation	Nombre d'escalier	<i>Non disponible</i>
		Exposition	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
	Promenades et sentier de bords de mer	Fréquentation journalière	Personnes/jour	<i>Non disponible</i>
		Fréquentation horaire	Personnes/heure	<i>Non disponible</i>
		Type de fréquentation	Qualitatif	<i>Non disponible</i>
		Altitude	Mètre	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Type de promenades ou de sentiers	Qualitatif	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Exposition	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
	Centres-villes	Fréquentation journalière	Personnes/jour	<i>Non disponible</i>
		Fréquentation horaire	Personnes/heure	<i>Non disponible</i>
		Eloignement du bord de mer et ancienneté de construction	Qualitatif	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Type de fréquentation	Qualitatif	<i>Non disponible</i>
		Type d'usagers	Qualitatif	<i>Non disponible</i>
		Possibilité d'évacuation	Qualitatif	<i>Non disponible</i>
		Exposition	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
	Camping	Fréquentation journalière	Personnes/jour	<i>Non disponible</i>
		Type de fréquentation	Qualitatif	<i>Non disponible</i>
		Superficie	m ²	BD-Topo v3.0 IGN 2019
		Exposition	Eloignement de la zone impactée	BD-Topo v3.0 IGN 2019 + donnée d'aléa
			Echelle de couleur	Facteurs analysée

Détail des différents enjeux et facteurs pouvant être analysés dans l'étude de vulnérabilité

Annexe 7 :

Cartographie de la vulnérabilité de chaque enjeu

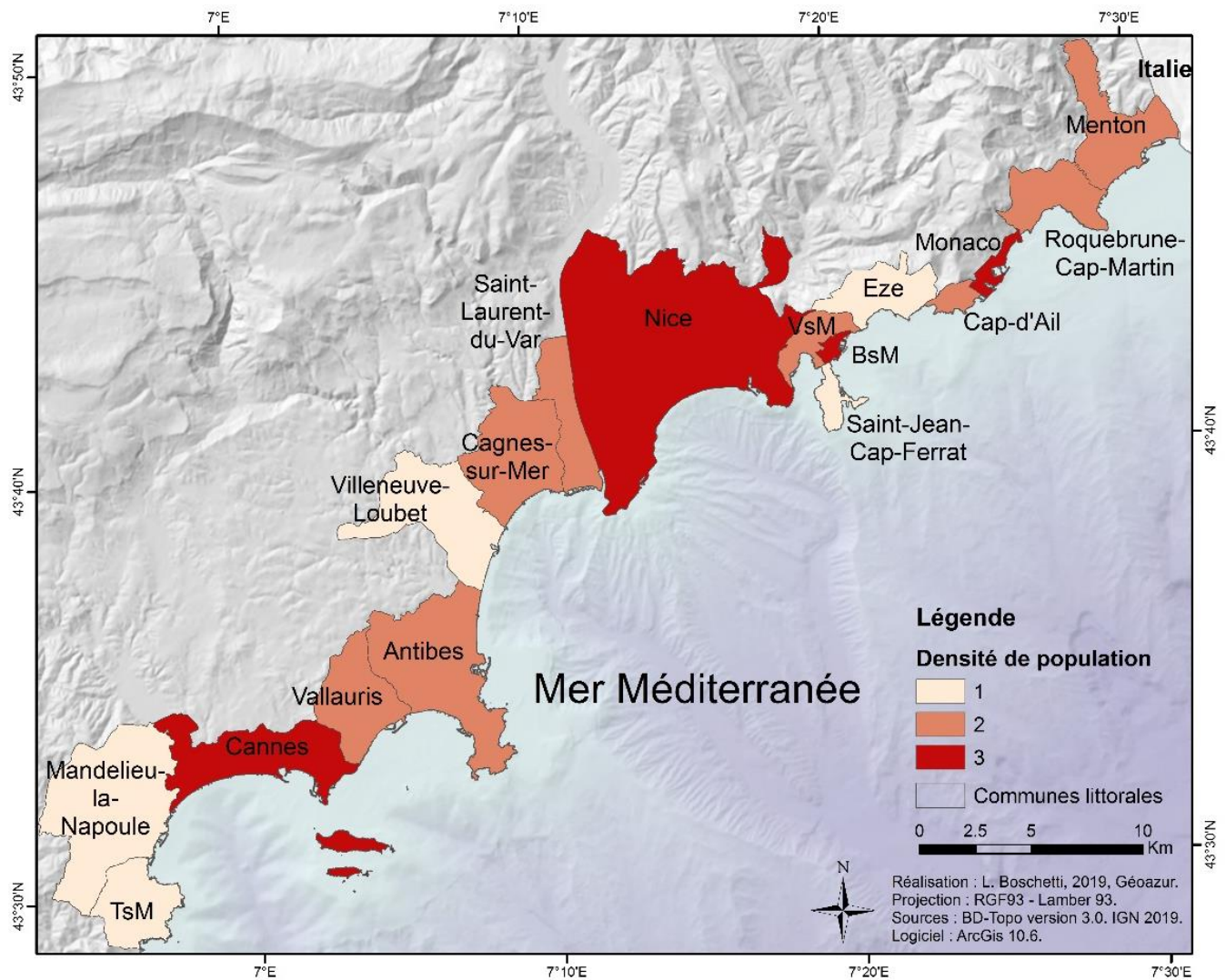


Figure 1 : Cartographie de la densité de population des communes littorales des Alpes-Maritimes (BD-Topo 2019)

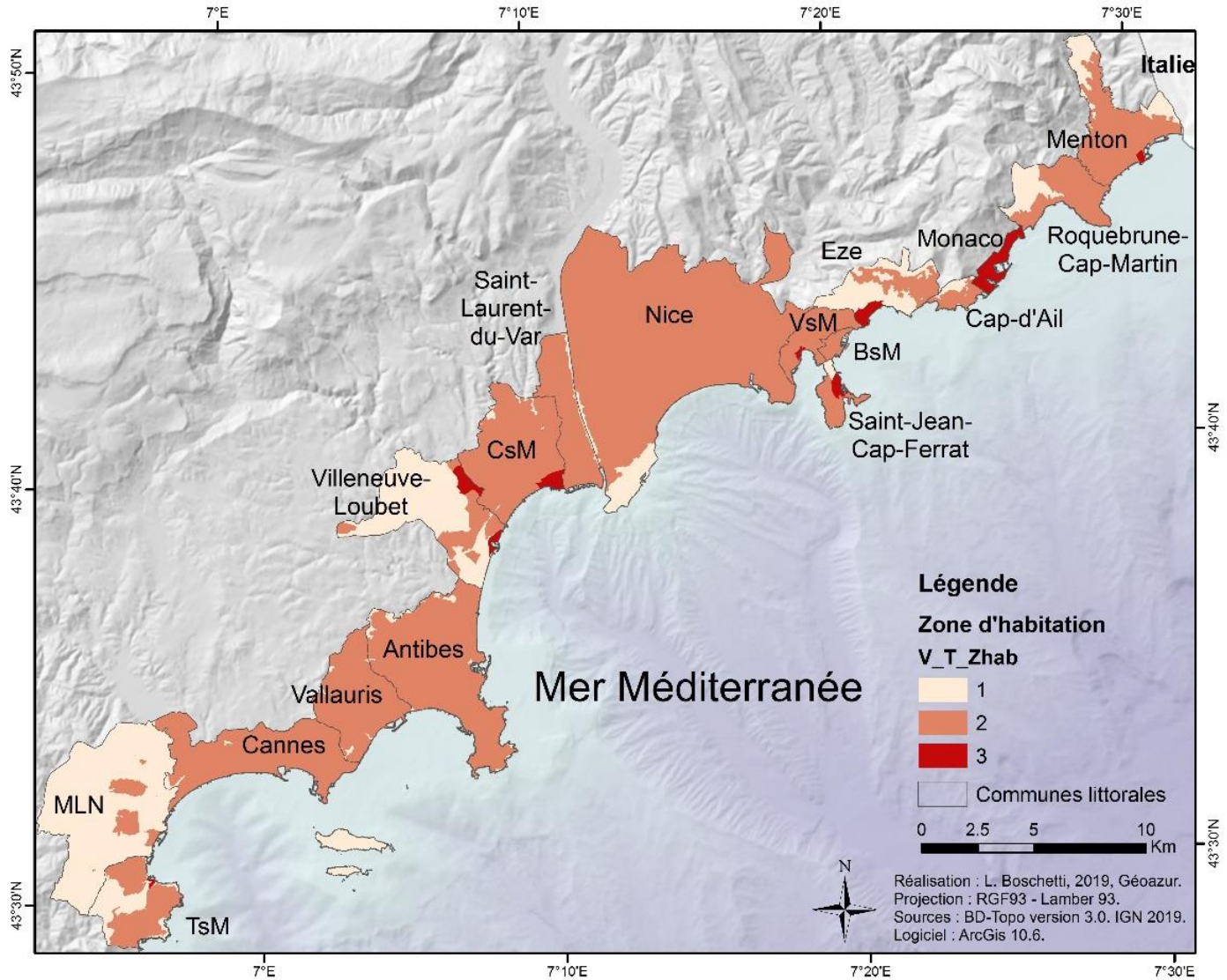


Figure 2 : Cartographie de la vulnérabilité du territoire en fonction de si l'espace est constitué de zones habitées ou non (BD-Topo 2019)

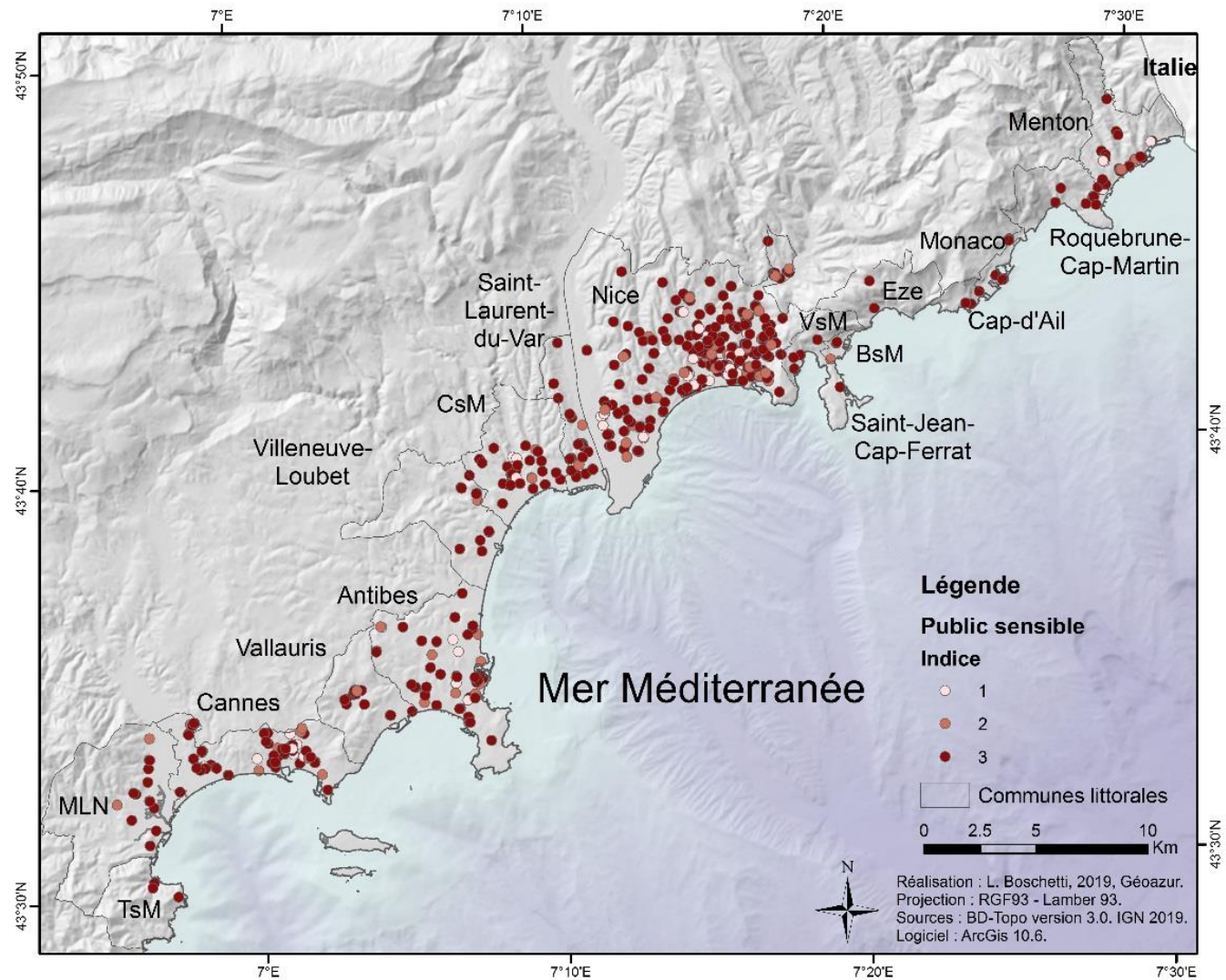


Figure 3 : Cartographie de la vulnérabilité du territoire en fonction des ERP considérés comme accueillant un public sensible

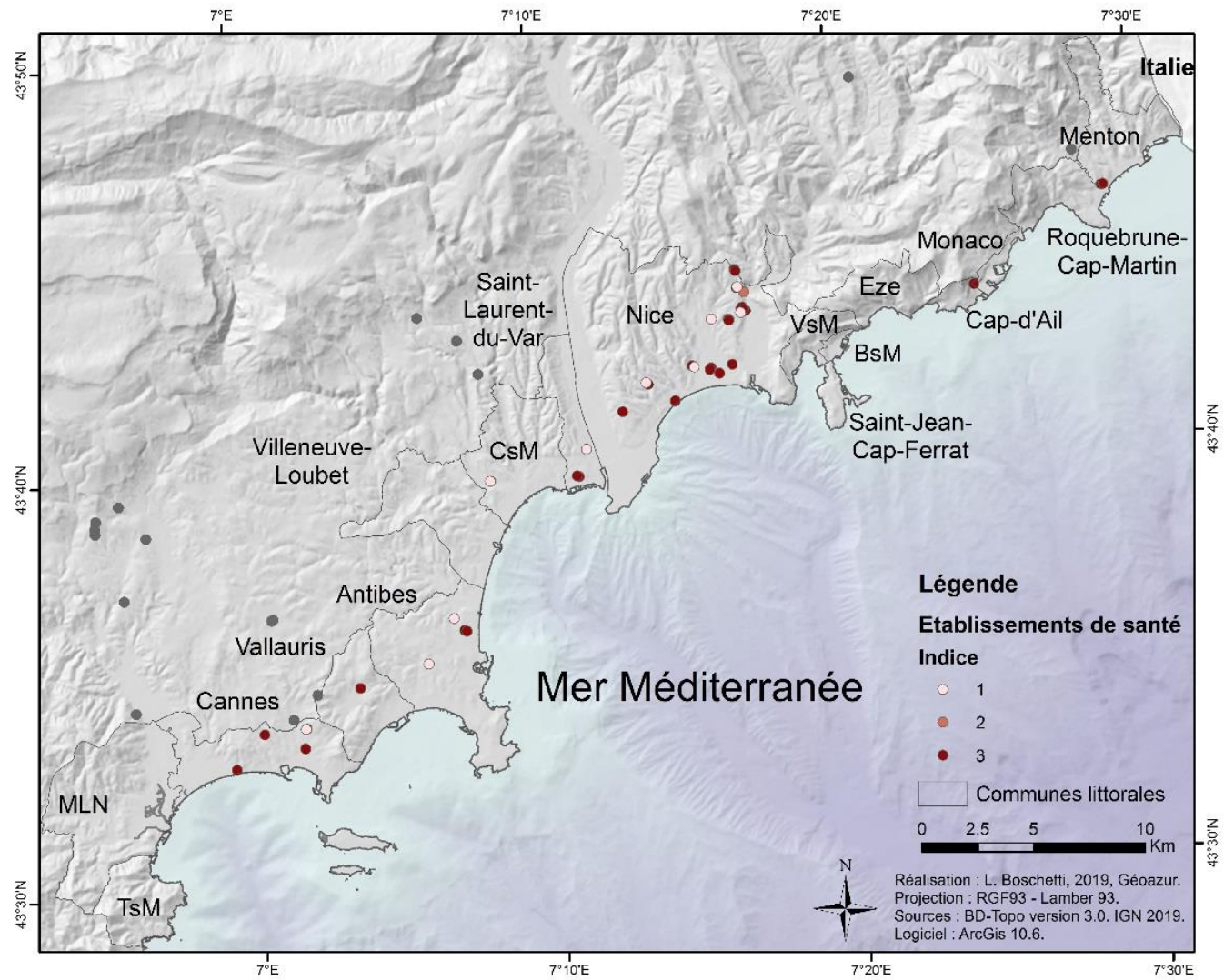


Figure 4 : Cartographie de la vulnérabilité du territoire en fonction des ERP étant des établissements de santé.

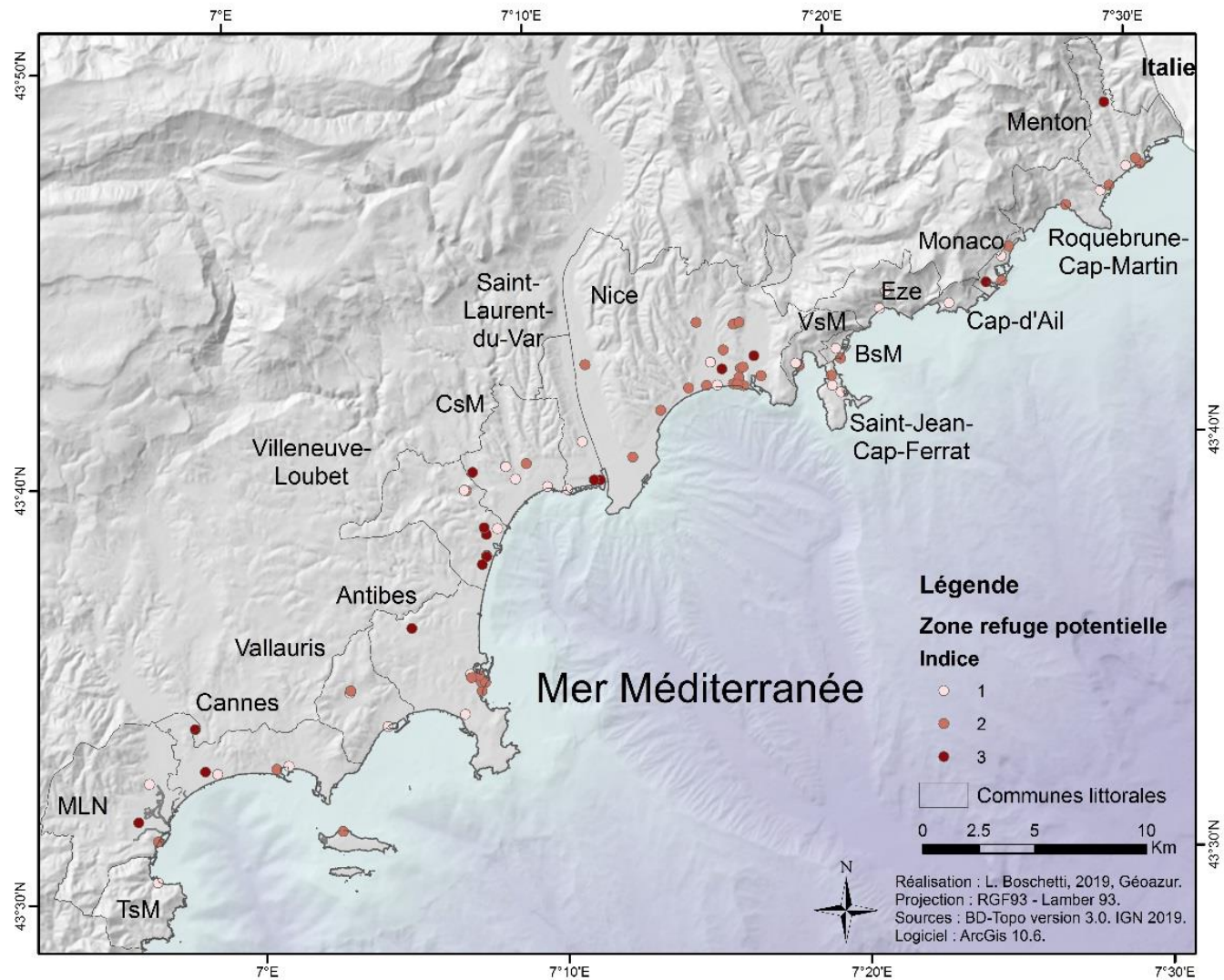


Figure 5 : Cartographie de la vulnérabilité du territoire en fonction des ERP considérés comme pouvant potentiellement servir de zones refuges

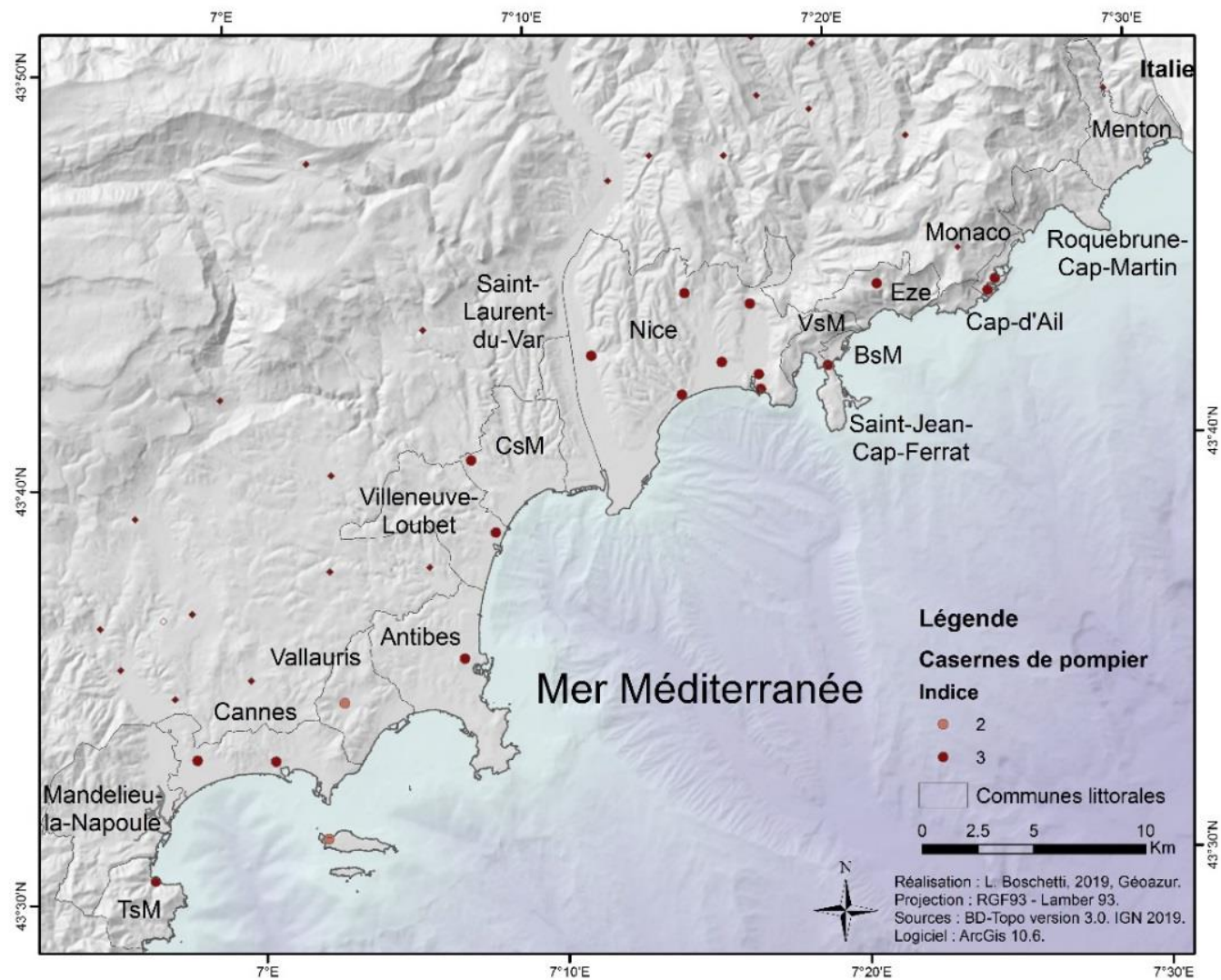


Figure 6 : Cartographie de la vulnérabilité des casernes de pompier en fonction de leur importance

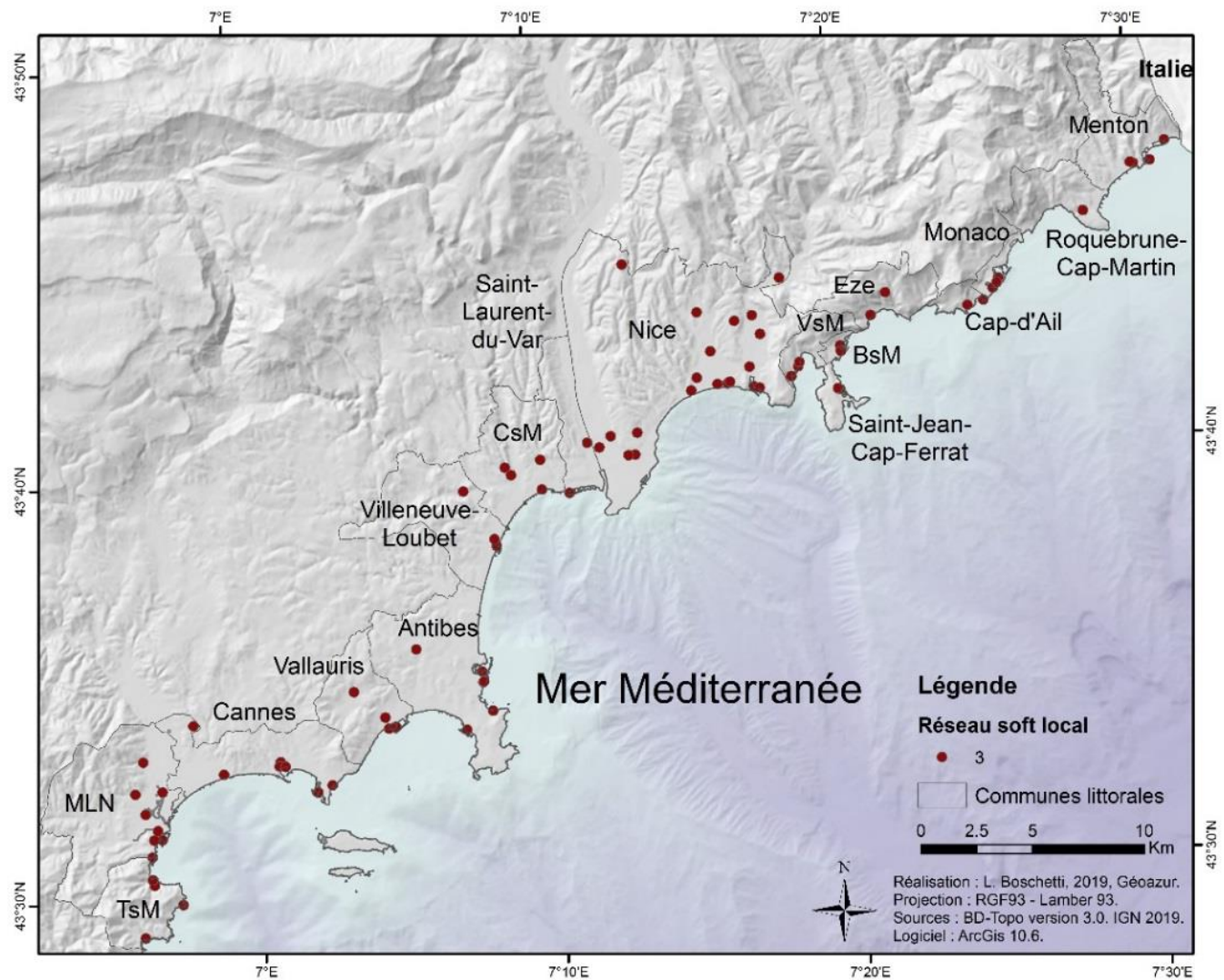


Figure 7 : Cartographie des structures décisionnelles et de défense communales et locales mise sous forme d'indice

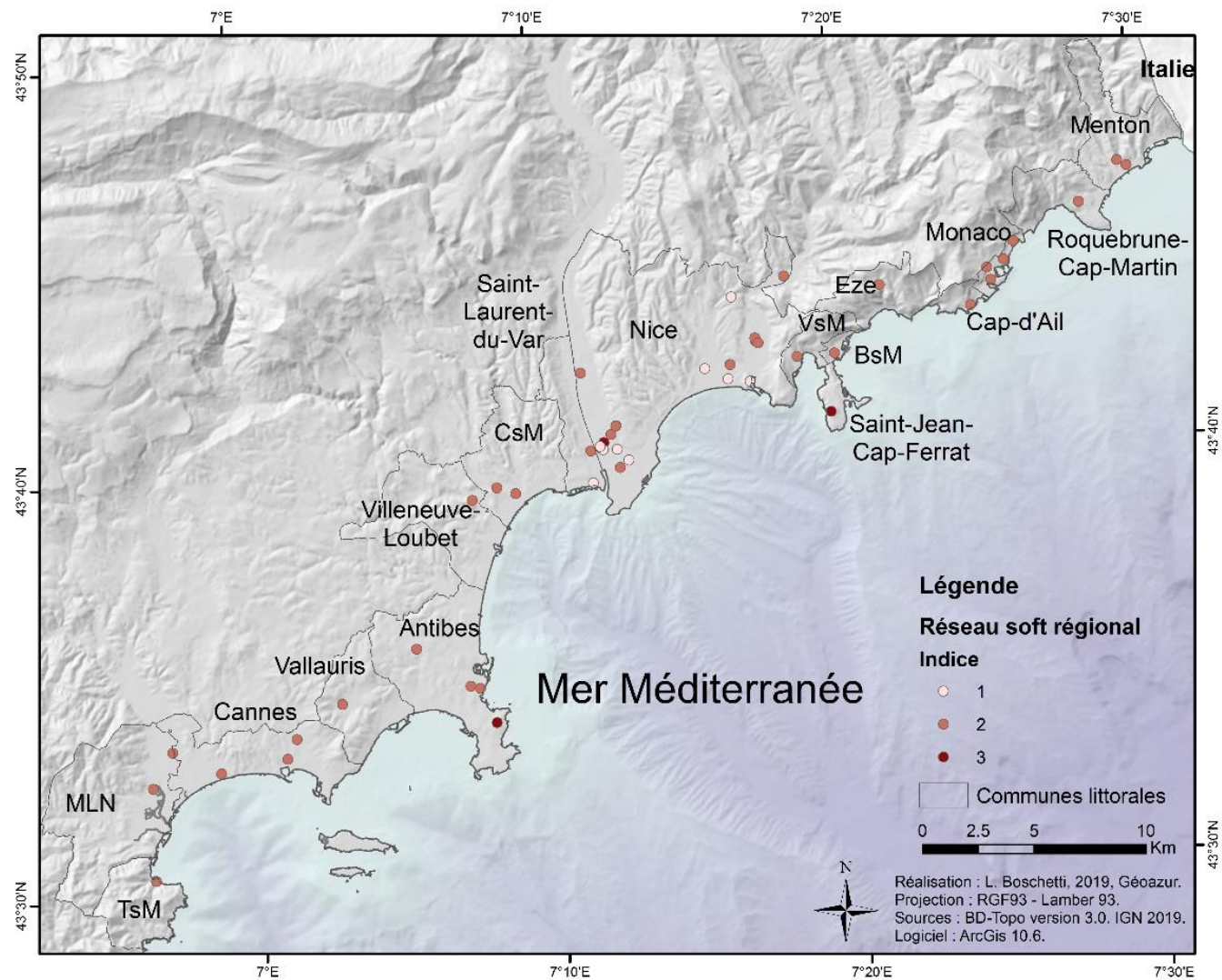


Figure 8 : Cartographié des structures décisionnelles et de défense départementales et régionales mise sous forme d'indices

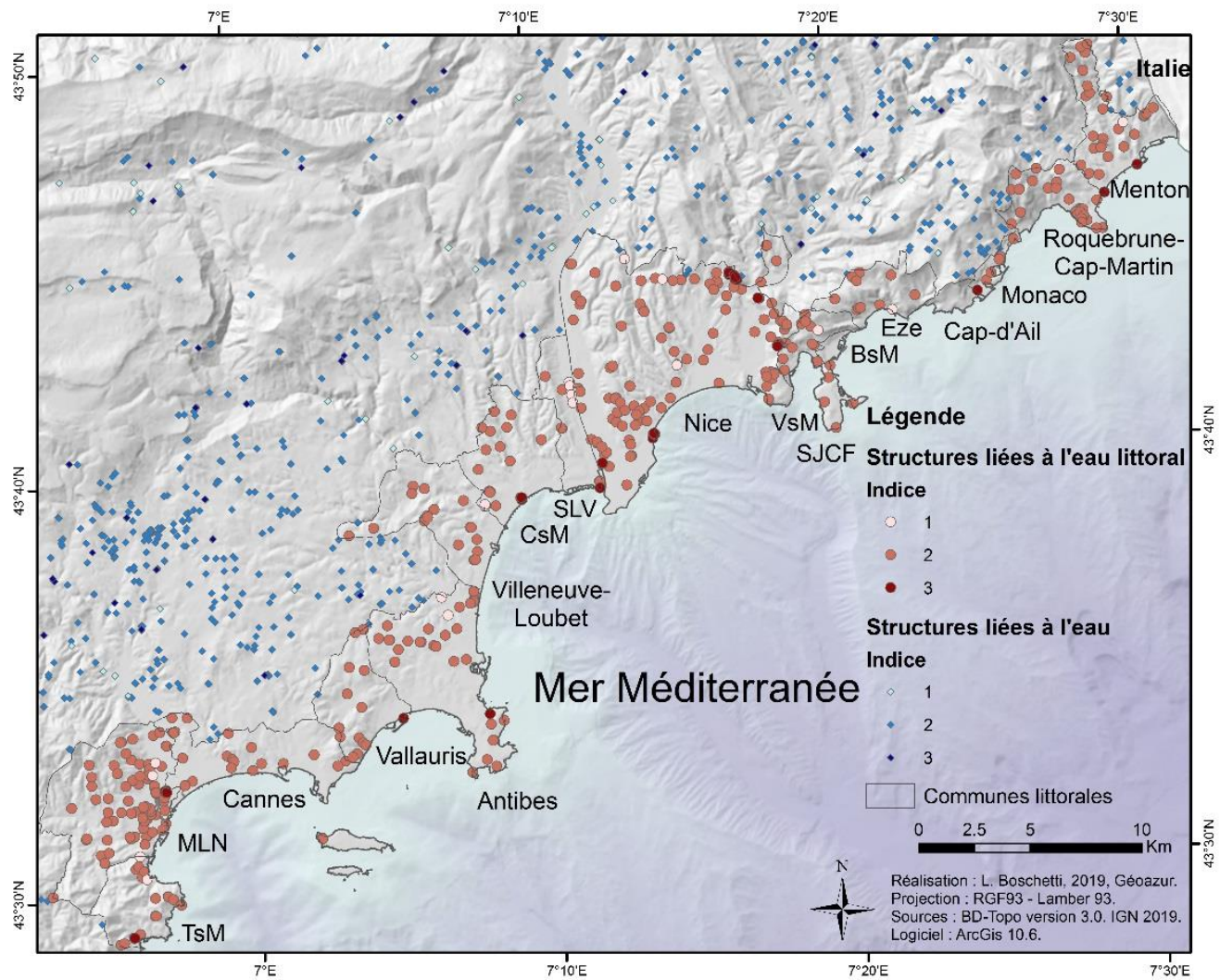


Figure 9 : Cartographie de structures liées au captage, au stockage et à la gestion de l'eau des Alpes-Maritimes (BD-Topo 2019)

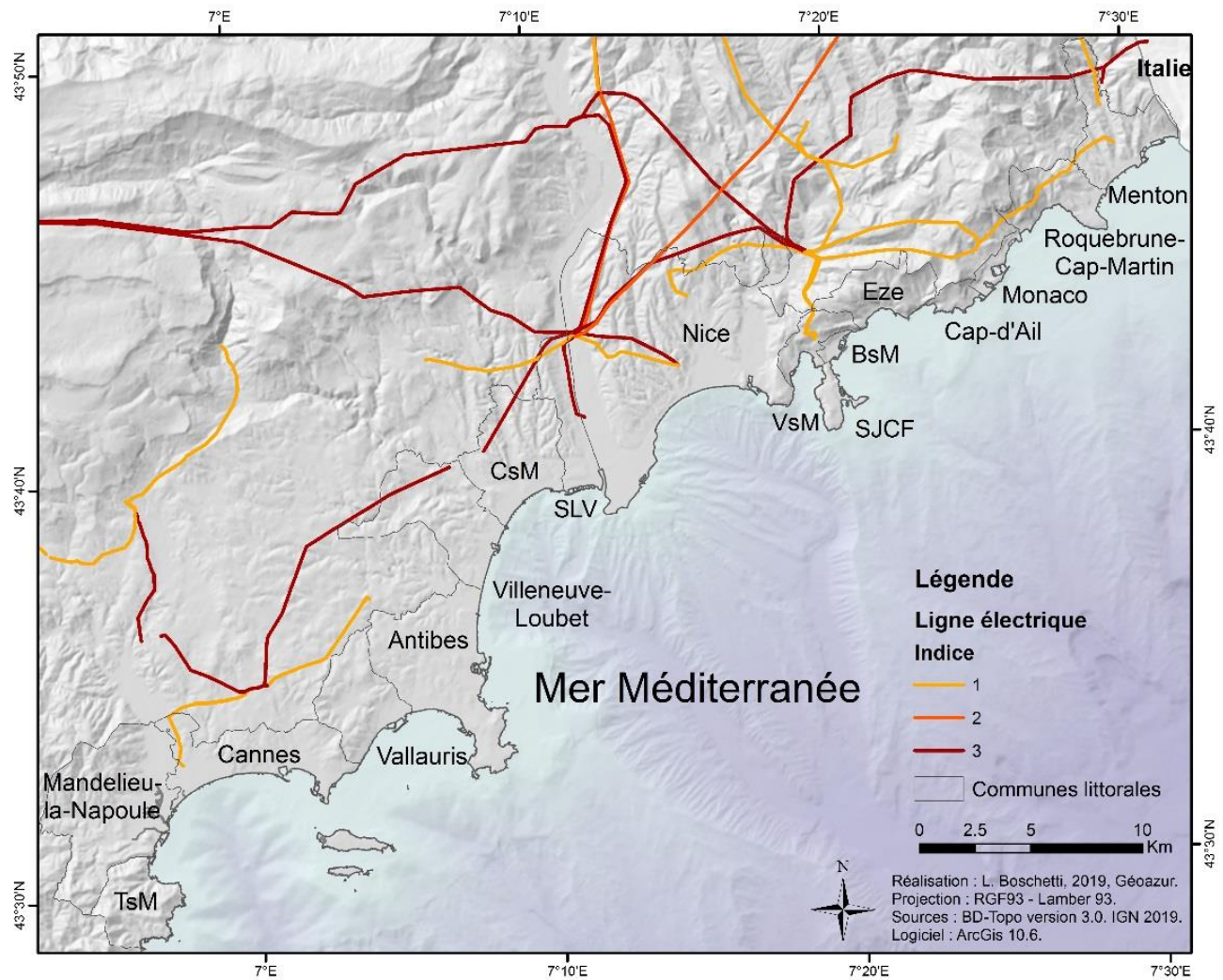


Figure 10 : Cartographie de la densité de population des communes littorales des Alpes-Maritimes (BD-Topo 2019)

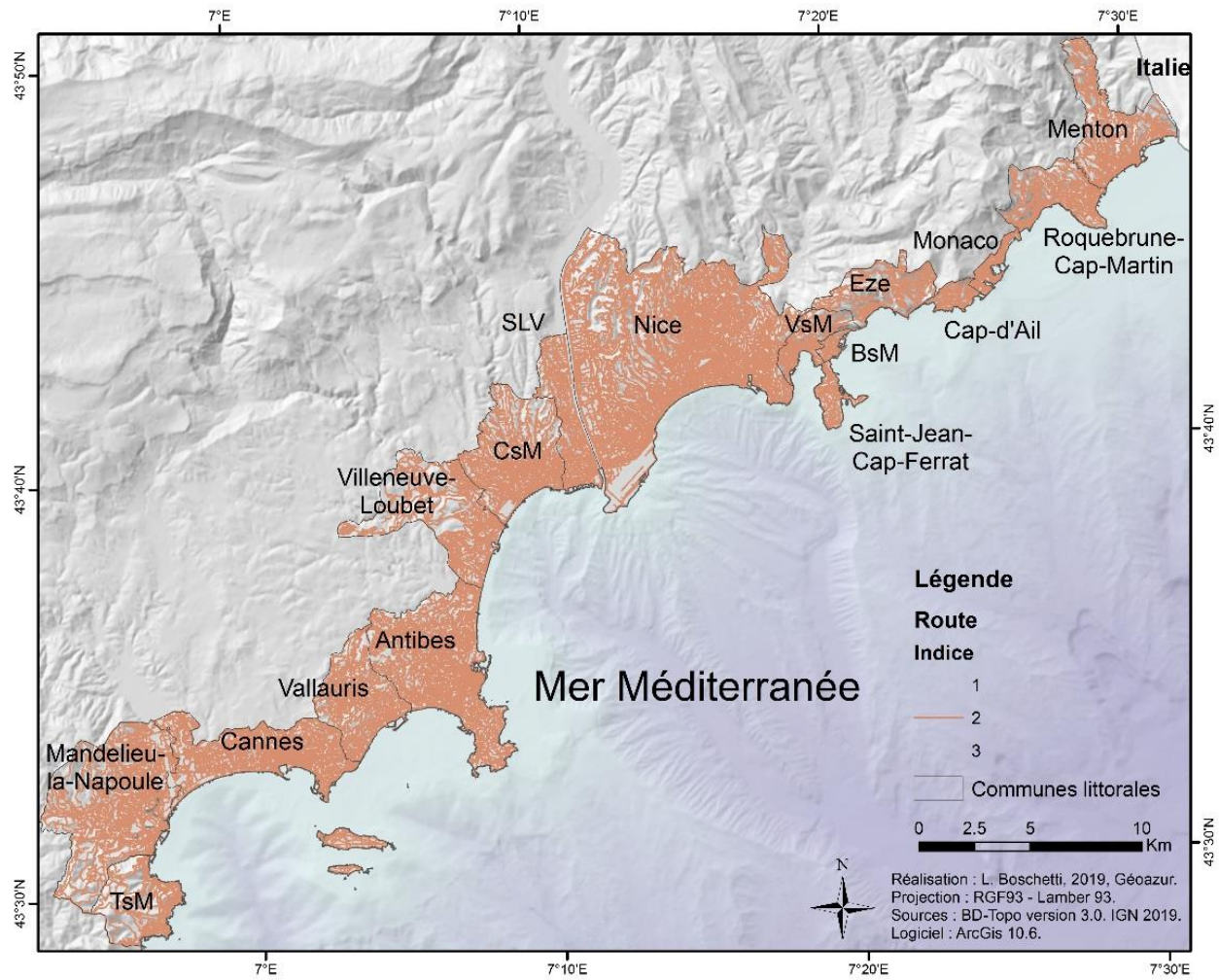


Figure 11 : Cartographie de la vulnérabilité du réseau routier des communes littorales des Alpes-Maritimes. Seules sont représentées les vulnérabilité faibles et fortes (BD-Topo 2019)

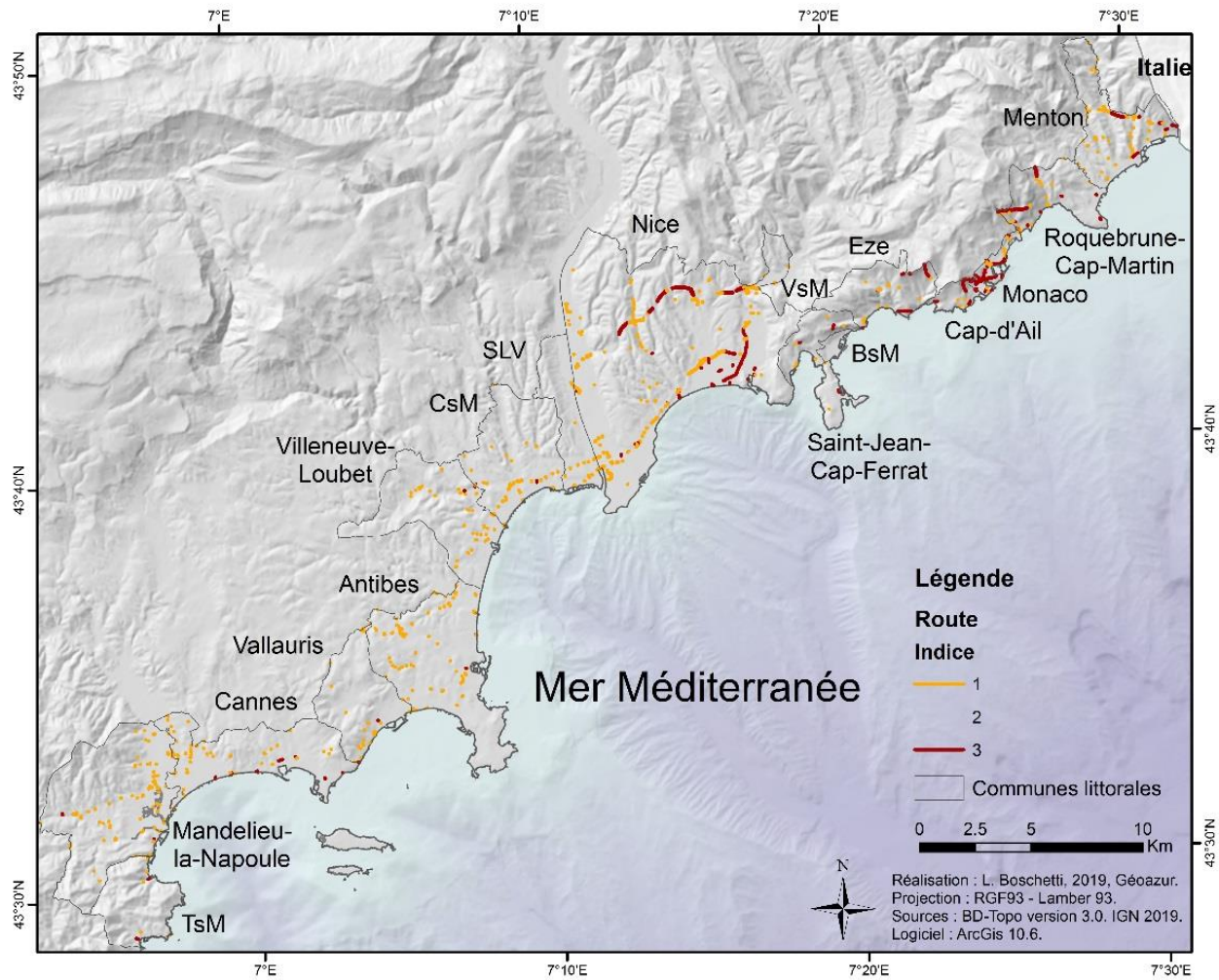


Figure 12 : Cartographie de la vulnérabilité du réseau routier des communes littorales des Alpes-Maritimes. Seules sont représentées les vulnérabilité faibles et fortes (BD-Topo 2019)

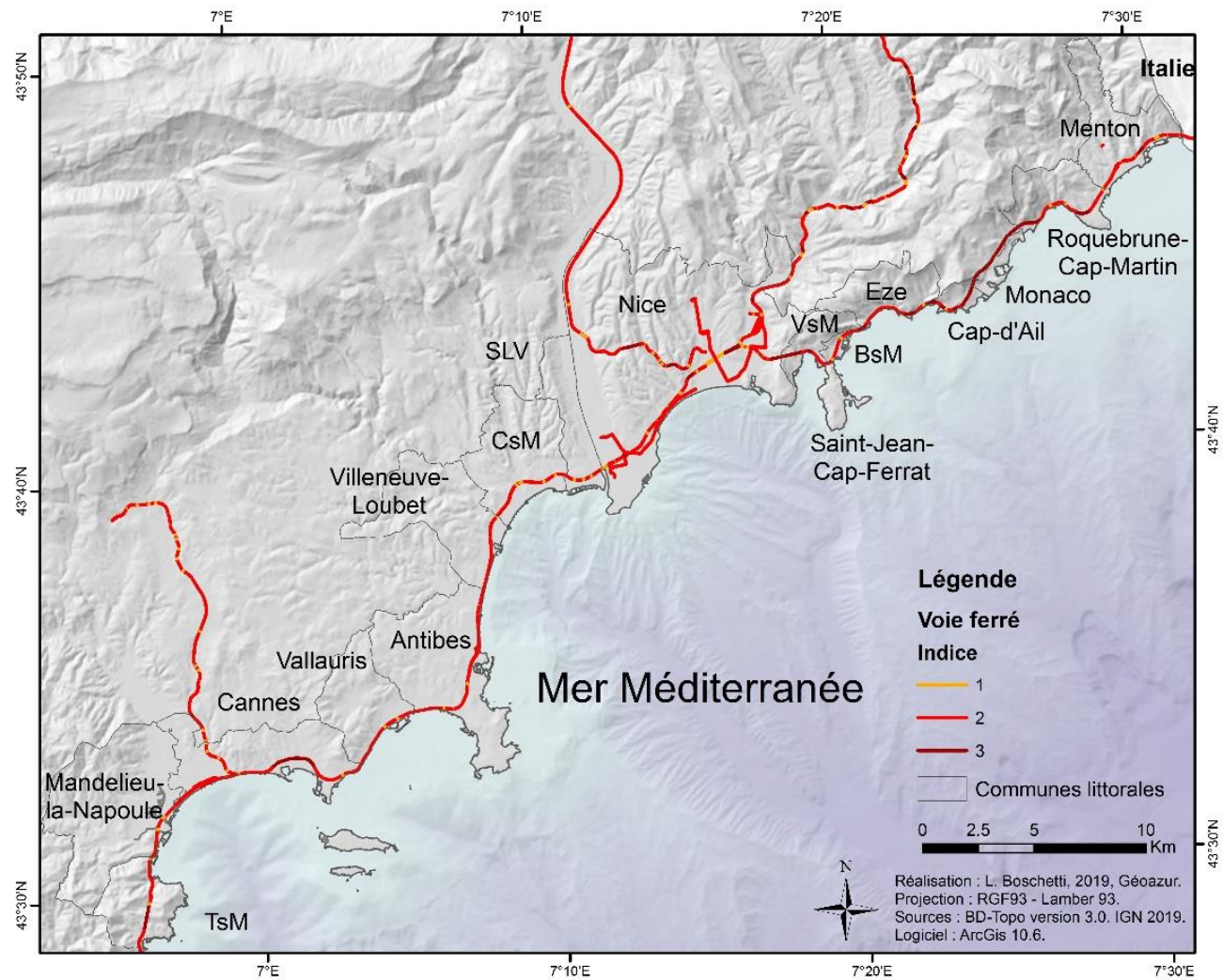


Figure 13 : Cartographie de la mise en indice de l'enjeu réseau ferré sur les communes littorales des Alpes-Maritimes (BD-Topo 2019)

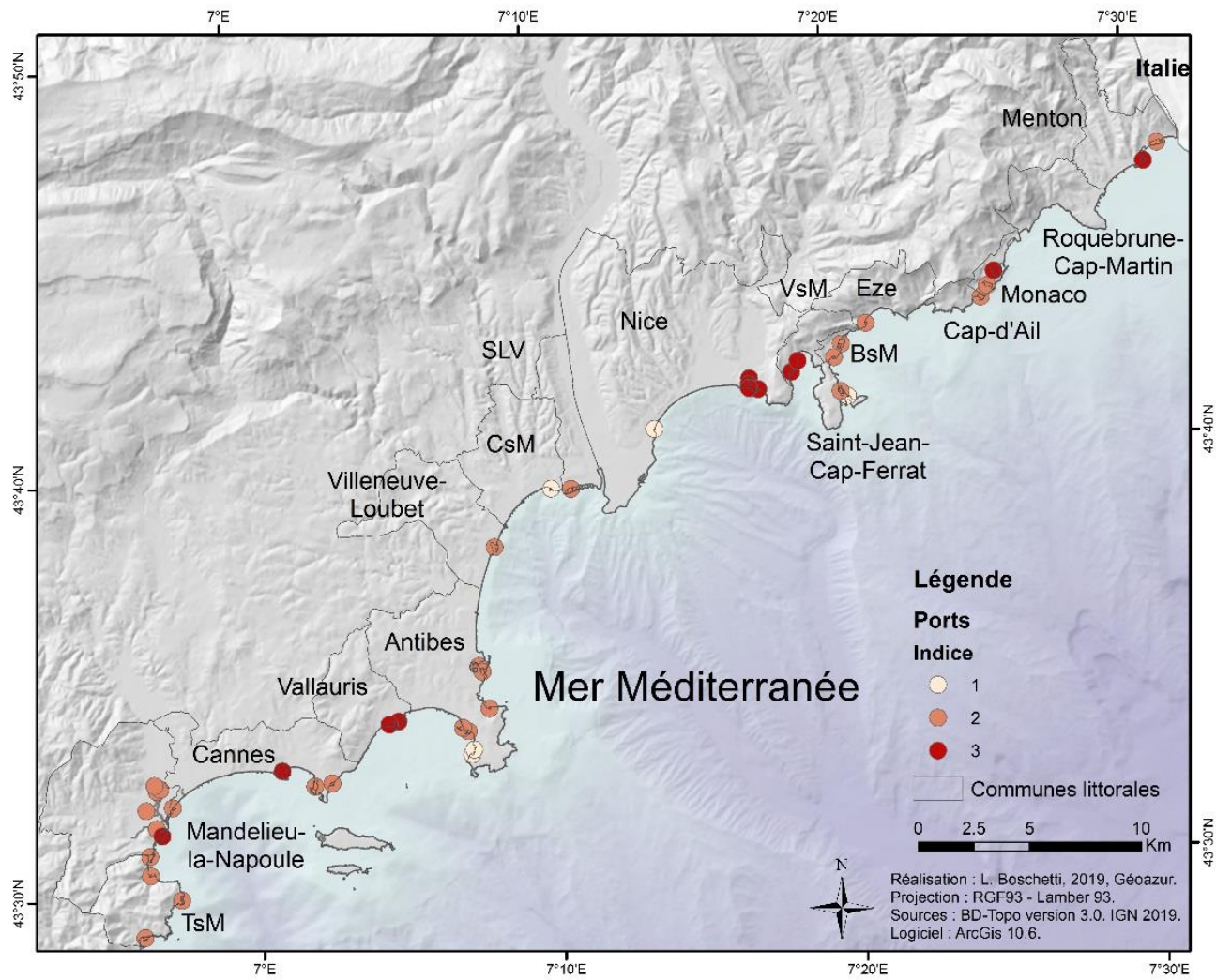


Figure 14 : Cartographie de la densité de population des communes littorales des Alpes-Maritimes (BD-Topo 2019)

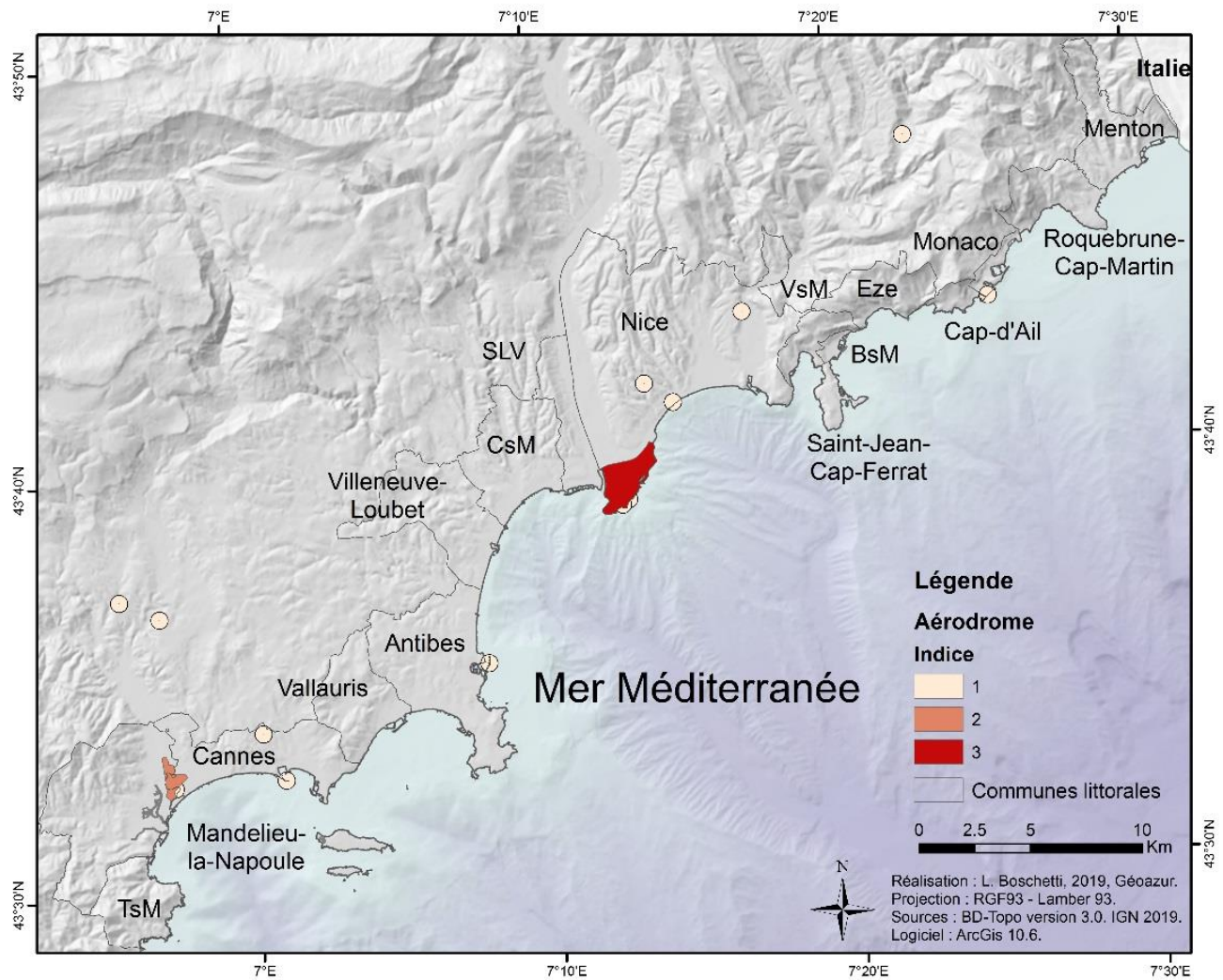


Figure 15 : Cartographie de la densité de population des communes littorales des Alpes-Maritimes (BD-Topo 2019)

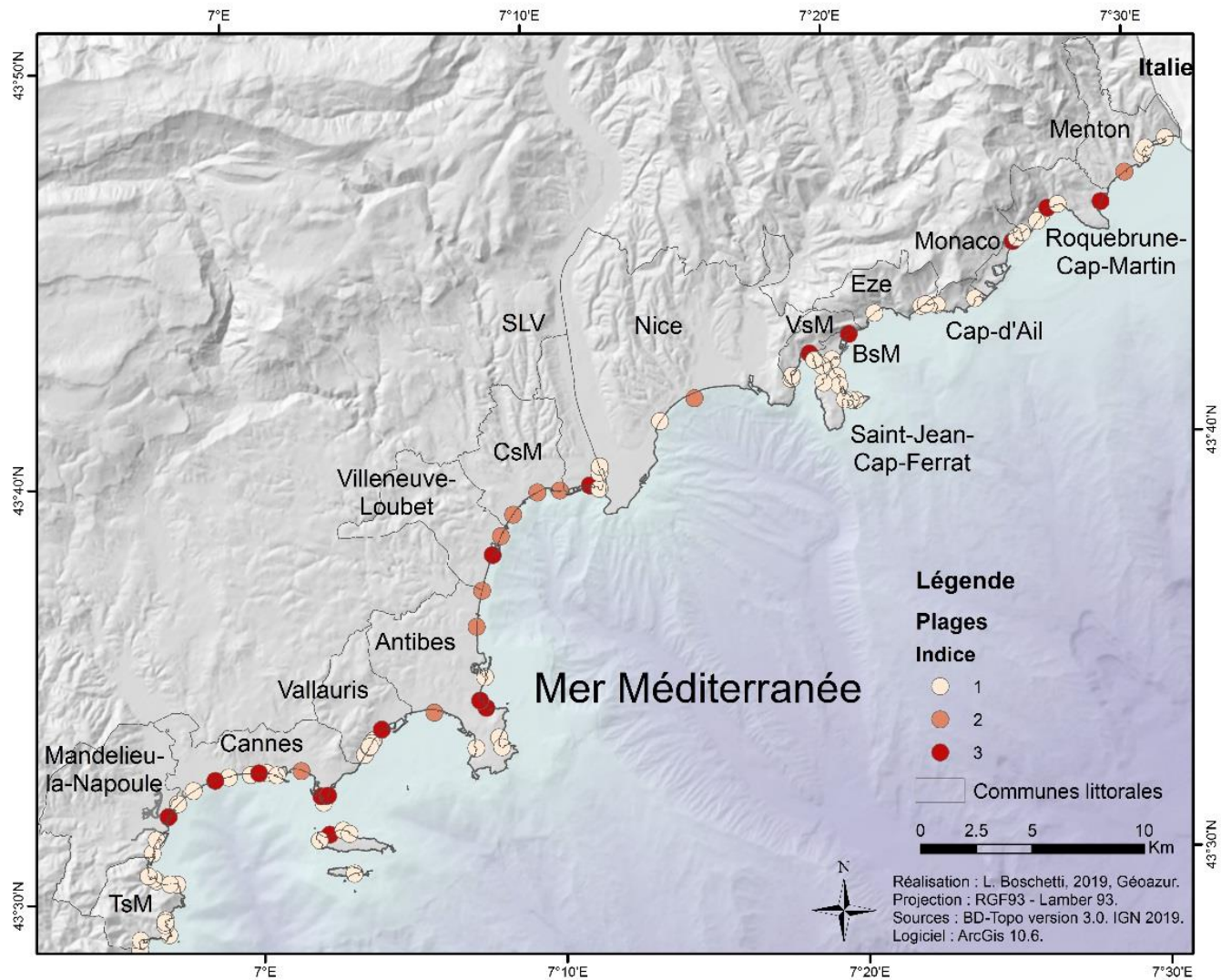


Figure 16 : Cartographie de la mise en indice des plages des Alpes-Maritimes

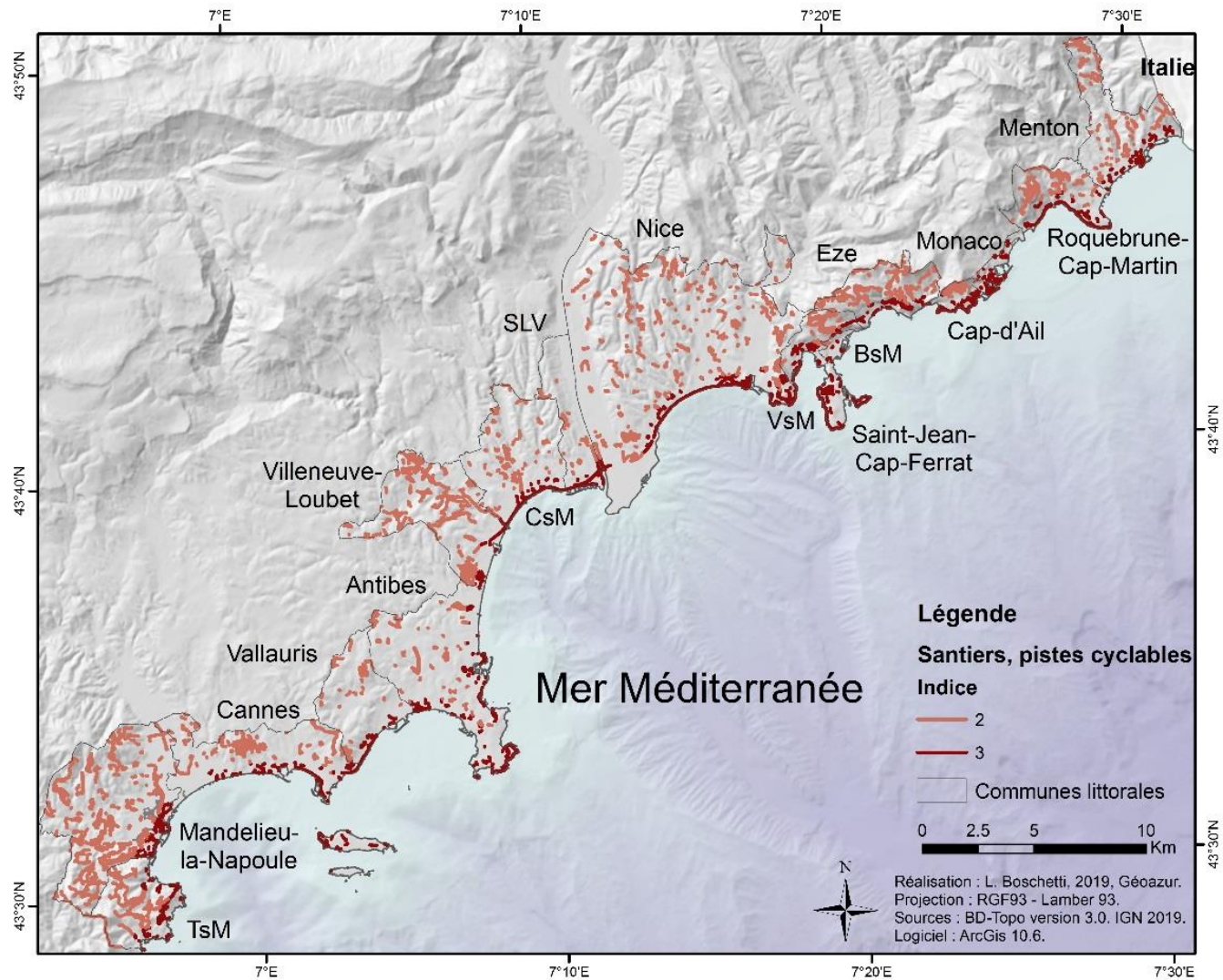


Figure 17 : Cartographie des sentiers et promenades

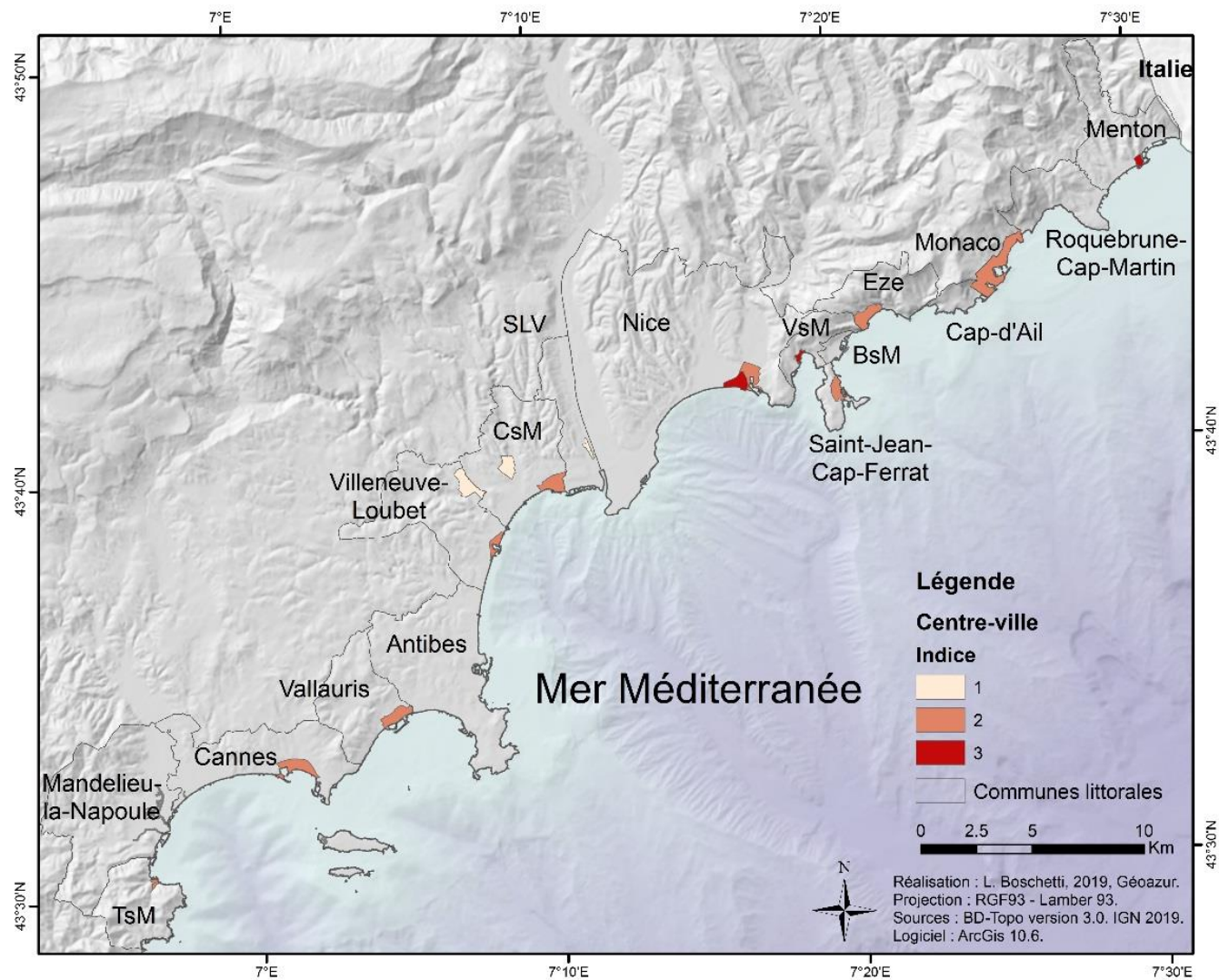


Figure 18 : cartographie de la vulnérabilité des centres-villes en fonction de leur localisation et de leur ancienneté

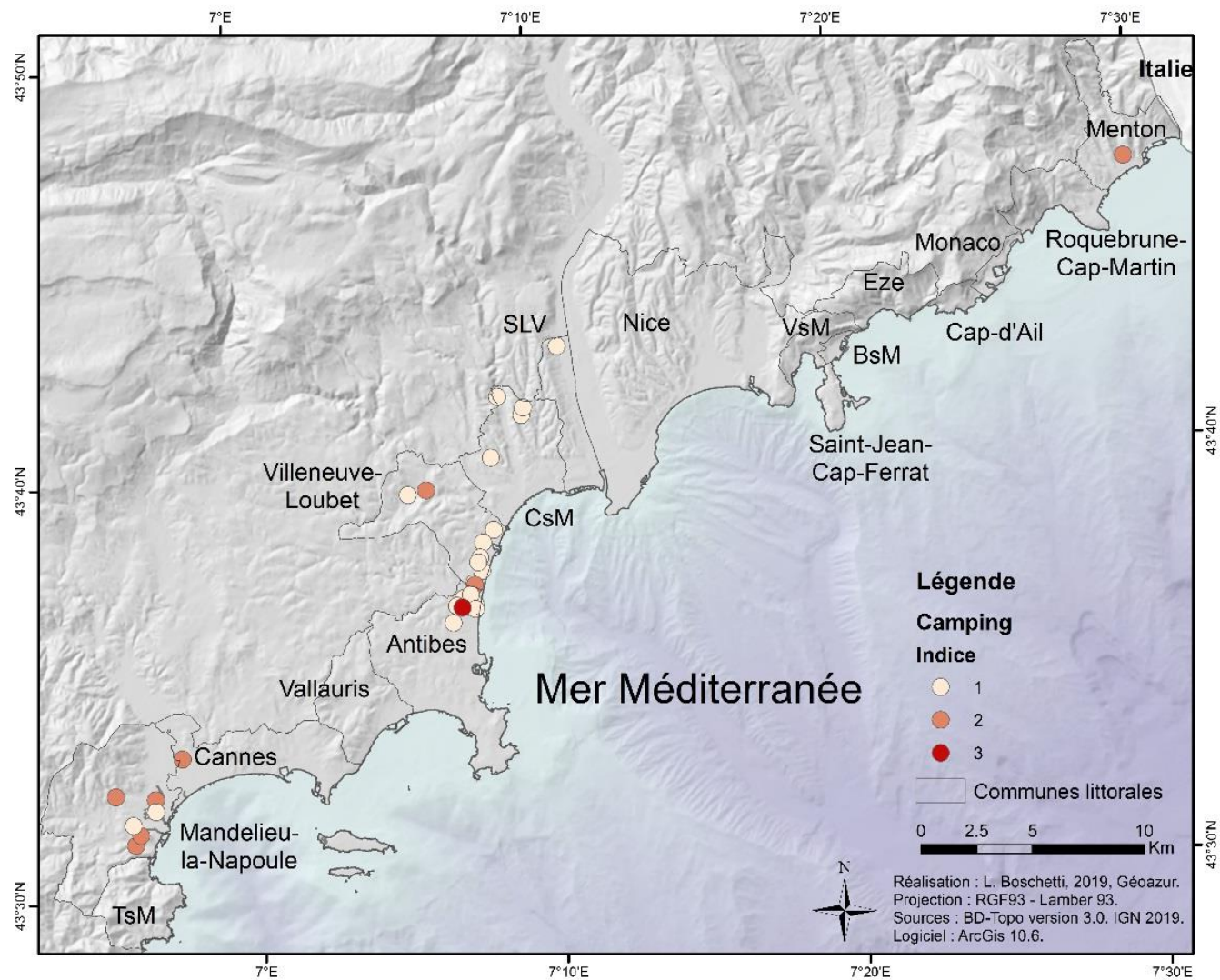


Figure 19 : Cartographie de la vulnérabilité des campings le long de la Côte d'Azur en fonction de leur superficie

Annexe 8 :

*Figure synthétique de la résilience
dans le domaine des risques et des catastrophes*

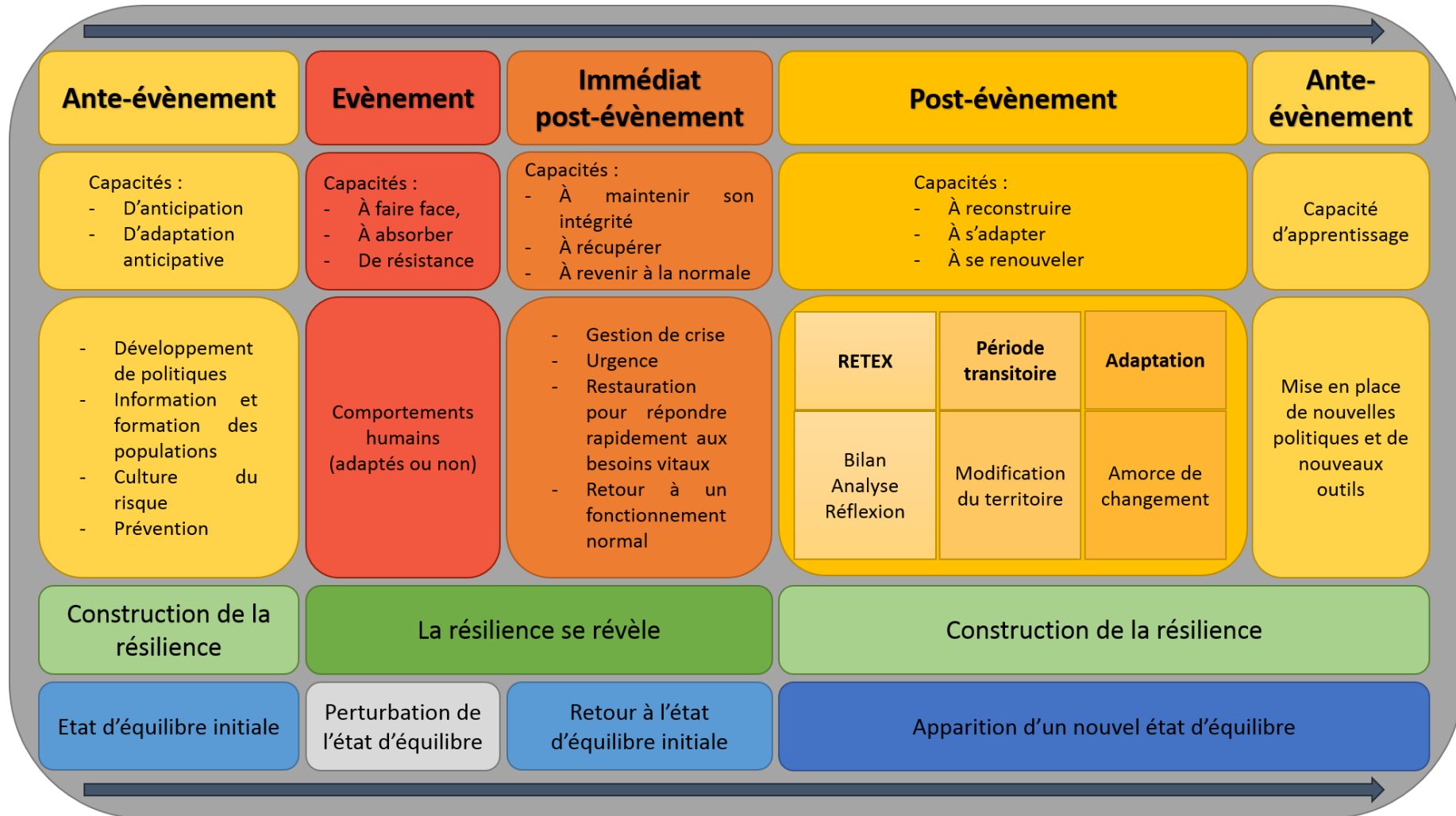


Figure 1 : Schéma de synthèse de l'approche de la résilience par les cindyniques, impliquant les différents moments de la résilience et les capacités, actions, pratiques et états d'équilibre associés

Annexe 9 :

Article :

Vers un processus de mise en action des résiliences : capacités, modèles, stratégies

Provitolo D., Serre D., et Boschetti L., 2017, « Toward a process of resilience implementation : capacities, models and strategies », in : Floods - Vol 1- Risk knowledge, Eds F. Vinet, Elsevier.

Chapter 16

Towards a process of resilience implementation: capacities, models, strategies

Damienne PROVITOLO, Université Côte d'Azur, CNRS, OCA, IRD, UMR Géoazur

Damien SERRE, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, UMR ESPACE 7300 CNRS

Laurie BOSCHETTI, Université Côte d'Azur, OCA, CNRS, IRD, UMR Géoazur

16.1. Introduction

The concept of resilience has been discussed in scientific literature on risks and disasters [WHI 75] since the 1970s, but was really invested in at the beginning of the 21st century, both politically and scientifically. Politically, with the Hyogo World Conference on Disaster Risk Reduction (January 2005), which highlighted the need to build disaster-resilient nations and communities. Scientifically, because eight months after this conference, the flood-related disaster caused by Hurricane Katrina revealed shortcomings in prediction and prevention, as well as the insufficient organization of those in charge of crisis management, particularly in New Orleans. This event, which is only one among many on a global scale, demonstrated the need to prepare for systemic disasters and crises. Katrina mobilized the world of research, which revisited the concept of resilience, notably to analyze the traditional models of response to an unexpected event and the post-crisis management mechanisms.

Widely used ever since and present in political and scientific discourse on the question of risks, resilience has become the new framework, the new benchmark for disaster management policy, and is gradually replacing the concept of vulnerability. It should be noted, however, that this concept remains barely operational. Having sketched a map of uses of the concept of resilience, we propose two models, DS3 and CREAA, for implementing resilience in the face of floods. Constructed around a systemic approach, these operational models call into question planning and resilience strategies, which differ in their relationship to unforeseen events.

16.2. A "map" of uses of the concept of resilience in the field of risks and disasters

The concept of resilience is increasingly used in various scientific and societal fields: ecology, psychology, geography (populations and territories faced with risks), risk analysis, politics and the banking and insurance sectors, etc. It is now acknowledged that the term hides a rainbow of meaning depending on the disciplines and context in which it is used [PRO 12].

In the field of risks and disasters, which includes flood risk, analysis of scientific literature reveals that there is not one but several types of resilience, although, paradoxically, the term "resilience" is mainly used in the singular, in both scientific and political discourse. In territorial, operational and institutional, but also biological and psychological terms, resilience describes capacities. We have distinguished various types [REG 15] that can be categorized in view of the timeframes of reactions and actions that occur before, during and after a shock. Thus:

During the event, resilience can correspond to:

- the capacity to resist and cope with a shock;
- the capacity to absorb a shock, which involves a degree of flexibility.

Before the shock, resilience refers to:

- the capacity to anticipate, especially unpredictable and inconceivable scenarios, in order to ensure the operational capacities of systems and organizations, even in "damaged mode";
- the capacity to manage or preserve the essential functions, structures and organizations in order to adapt them to a future situation (anticipative adaptation);
- the capacity to learn.

After the shock, resilience reveals:

- the capacity to recover and rebuild, here or elsewhere. These capacities mobilize a system's internal and/or external resources, whether it is an individual, a neighborhood, a town, a country, etc.;

- a system's capacity to maintain its integrity and return (or bounce back) to either the former state of equilibrium or a new state;

- an individual or community's capacity to adapt, to take advantage of a negative situation and to renew and transform the system [TWI 09].

These meanings are not always compatible and lead to passionate debates, notably on the ideas of "resistance to" or "absorption of" a shock. They are synonyms for some people, combining resistance and persistence, implying that persistence involves force and duration, and closely connected for those who believe that resistance gives the system time to adapt, whereas the two concepts are entirely opposite for those for whom the capacity to adapt assumes suppleness and flexibility, while resistance implies opposition and rigidity [ADG 00].

It is also possible to adopt a stance somewhere between the two. Indeed, although some forms of hazard attenuation can increase resilience, others can "sap" it in the long term [CON 10, BUR 06]. It all depends on the type of hazard (recurrent and anticipated *versus* exceptional and unanticipated). For example, during a flood, collective defense structures, such as levees and anti-tsunami walls, can contribute to the resilience of a territory for a type of risk and given intensity, confining the hazard by limiting damage, thereby helping the system to recover faster. But these structural defense mechanisms can also create and even reinforce population vulnerabilities [PIG 12, REV 09] during exceptional and unanticipated hazards. Cyclone Xynthia, which crossed Western Europe between 26 and 28 February 2010, showed that these defense structures, due to their intrinsic vulnerability, do not provide absolute protection and sometimes give the population a false sense of security.

All these definitions share one idea, however: the state of equilibrium of a system, its recovery or renewal require capacities of absorption and anticipative or reactive adaptation to shocks, particularly in a changing environment. Resilience is built up before a shock, expressed during the event or crisis [RIC 03] and continues to build after the event. Resilience does not therefore concern only the reconstruction phase, but unfolds over one timeframe in three periods: before, during and after the disaster, whether it is abrupt and unexpected (flash flooding, local tsunami), or continuous (drought).

16.3. Models for implementing flood resilience

A new benchmark for public risk and disaster anticipation and management policy, resilience is still a barely operational concept, whose methodology must be explained. Yet, it should be noted that only a few models and methods for analyzing the resilience of a territory have been developed. Resilience is interpreted in the stylized models of the Adaptive Cycle [WAL 04], Panarchy [GUN 02] and the method proposed by the research group Resilience Alliance [RES 10]. In reality, these models are rarely used by researchers in France and are mistrusted by institutional and operational parties. As well as the language barrier, which means that the Panarchy and Resilience Alliance models have not yet been used outside France, these methods are difficult to implement because they use a complex vocabulary (panarchy, bifurcation) and are organized in phases that are too global and too far removed from local discussions (e.g. analyzing the phases of growth and reorganization of territories in the Adaptive Cycle and Panarchy models). Most research therefore highlights the difficulty of implementing an operational resilience process. However, some attempts have been made in this field, notably the DS3 and CREAA models presented below.

These two models, constructed around a systemic approach, differ in how they are organized. The DS3 model focuses on the capacity of technical systems to face up to urban floods, while the CREAA model proposes actions to take on a set of components identified as the pillars of resilience.

16.3.1. The DS3 model: a method for analyzing resilience capacities in an urban flooding context

The scale of the urban neighborhood is interesting when it comes to putting the concept of resilience into action, for several reasons. First of all, this spatial scale generally corresponds to the scale of intervention of urban planners, who are project managers as well as contractors. Furthermore, in Europe, as in France, flood risk is incorporated into land use planning on the scale of neighborhoods, notably when brownfield sites are redeveloped. These are not necessarily called "resilient", however. In this context, we propose a model that makes it possible i) to define *a posteriori* the resilience factors mobilized when these neighborhoods are designed, ii) *a priori* to guide new planning operations that are resilient to flood risk, capitalizing on experiments that have been carried out. This model is based on a systemic approach [LEM 77] in order to take territorial connections into account.

An urban neighborhood can be defined as a section of the territory of a town, with its own appearance, characterized by distinctive traits that give it a degree of unity and individuality. According to their geographic location within the town, their unique spatial and social developments, and even the population profile, neighborhoods

present various urban functions with varying intensities. Modeling of urban systems, already fairly well covered for towns [DER 75, CAM 08], also seems possible for neighborhoods. Indeed, a neighborhood can be considered an open, complex system, characterized by processes of exchange with its environment, constantly evolving and developing. A neighborhood defined in this way has a physical, social and economic dimension (see figure 16.1).

Consequently, studying the resilience of a neighborhood involves considering it as a whole, taking these various urban dimensions into account. At this stage in the research, only the physical dimension of urban neighborhoods has been modeled. This dimension comprises the combination of physical structures (e.g. technical systems) and the environment in urban surroundings, which contribute to the workings of the system.

The approach chosen to study the resilience capacity of neighborhoods focuses in this context on how the urban system works in the face of floods. Analysis of lessons learned from towns that have undergone damage from this type of event shows that the town is highly dependent on technical systems. Under duress during a flood, these are both intrinsically vulnerable and likely to increase the territory's vulnerability if they do not fulfill their purpose [VIG 06, DÉG 02]. They spread malfunctions, due to both their geographical extent and their mutual dependence, while at the same time being essential to reconstruction [FEL 05]. They are key elements in ensuring the town's business continuity [LHO 13], absorbing disturbances and helping the urban system to recover. In this sense, they are a good example of Critical Infrastructure (CI) [JOH 10, SER 16]. Therefore, to improve the resilience of towns, technical systems have been identified as strategic. They can be defined by i) the service rendered, ii) the organization corresponding to the functional aspects, iii) the infrastructure that represents the physical aspects, the equipment and the means required to perform the service [BLA 98].

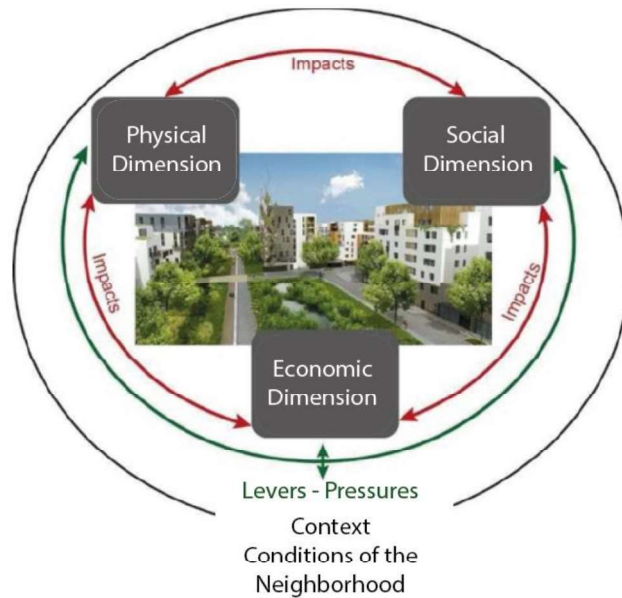


Figure 16.1. Representation of the neighborhood as a system.

Although there is no generic definition of CI, the idea that emerges from the definitions outlined in scientific literature is that CI is infrastructure that is essential to the workings of a society and whose failure would have a significant impact on many people [HEI 13]. Generally, CIs are the technical systems (e.g. electricity, water, gas and energy supply networks and communication infrastructures), and buildings (e.g. schools and hospitals, banks, financial institutions) that are essential to the workings of a society. In the event of malfunction or destruction (e.g. interruption of water or electricity supply), the population will be affected for a period of time of varying length. However, this concept is rarely used on local spatial scales, such as in neighborhoods. This is because the flows and processes of exchange characterizing the workings of the urban system are less significant on the scale of the neighborhood than of a larger area (town, region, etc.), and therefore the people and urban functions involved in its workings are considered minor. The term Major Infrastructure (MI) will therefore be used on the scale of the neighborhood to define the urban components essential to the workings of the neighborhood, whose failure could have negative consequences for its inhabitants.

A second element to take into account is that of the urban functions provided by the MIs. To integrate flood risk resilience into the workings of a neighborhood, the

urban functions provided by the MIs must be maintained during the event and/or recovered as quickly as possible after the event (see figure 16.2).

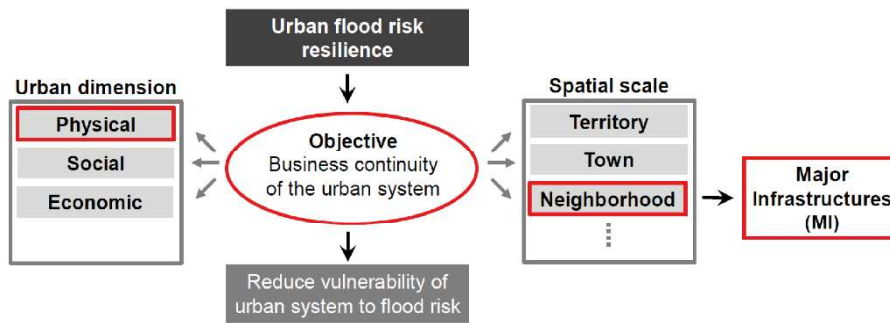


Figure 16.2. Elements taken into account in modeling the flood resilience of neighborhoods.

The lessons learned from a neighborhood in New Orleans that was flooded after Hurricane Katrina showed that these functions act on three levels of analysis (see figure 16.3) to study the resilience of a flooded neighborhood, and, more specifically, of its MIs. The first level concerns direct connections between a neighborhood and its environment. This analysis focuses on the neighborhood scale through the links that it establishes with the outside world, while also considering it a black box. The second level of analysis is the opening of the black box, which involves characterizing the relationships between the components of a neighborhood and therefore involves an intra-neighborhood study. Finally, the third level of analysis focuses on the components of the neighborhood (see figure 16.3).

Considering these results, the DS3 (Spatial Decision Support System) design model [SER 12] has been used as an analysis framework for neighborhood resilience (see figure 16.4). This model posits that resilience can be assessed through the lens of capacities for resistance, absorption and recovery, capacities acting on three distinct timeframes, as explained at the beginning of the chapter. Applied to urban networks, these three capacities target distinct objectives: i) the capacity for resistance in the face of flooding makes it possible to determine the damage to the system and reduce the damage to the neighborhood MIs, ii) the capacity for absorption takes the mutual dependences between the various neighborhood MIs into account and must propose alternatives if one or more of them fails, and finally iii) the capacity for recovery corresponds to the time required to bring damaged MIs back into operation in order for normal service to resume. These three capacities must be questioned during the design stage of a resilient urban neighborhood, in view not of dissociation between flooded/dry, surplus/shortage or vulnerable/resistant, but rather according to whether they are functional/disturbed.

Figure 16.3. The three analysis levels for neighborhood flood resilience.

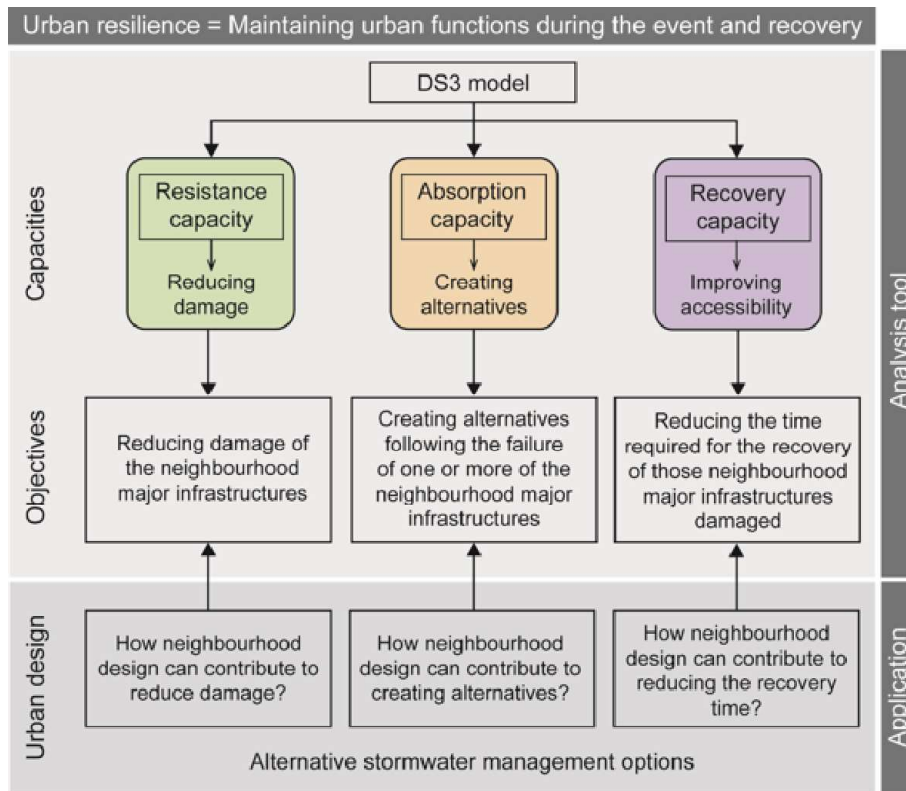


Figure 16.4. The DS3 model adapted to the study of neighborhood flood risk resilience, source [BAL 13].

It is important to highlight that this analysis tool does not aim to provide a quantitative assessment, but rather a qualitative analysis of the state of resilience of a flooded or floodable neighborhood. This conceptual model also provides a discussion framework enabling public and private parties to construct this resilience on the infra-urban scale together, paying particular attention to the physical dimension of the urban neighborhood.

In this same philosophy of the construction of the resilience of territories and societies, the CREA model focuses on the social, organizational, economic and physical dimensions of three major targets during the flood.

16.3.2. The CREAA model: a method for constructing resilient territories and societies

The CREAA model (see figure 16.5) proposes an operational framework to aid the construction of the resilience of three major targets in the event of flooding: population and companies, hard networks (e.g. communication, energy, sanitation, etc.) and soft networks (more specifically, the institutional and operational parties, formal and informal), and, finally, waste.

We propose a model based on the works of our predecessors and, notably, on the resilience assessment model produced by the research group Resilience Alliance [RES 10]. Since this was based on a systemic and dynamic approach, we have retained the spirit of it, but the objectives differ in the sense that the CREAA model aims more to construct than to assess resilience.

CREAA makes it possible to consider the temporal dynamic of resilience, since it is not "a stable and unchanging characteristic over time" [RIC 03]. Indeed, as specified in the first part of this chapter, resilience is not ordained, but built, and evolves over time. The distinctive characteristic of actions aiming to improve the resilience of people, territories and organizations is not acting instantly, in the sense that resilience is constructed before and after a disaster, through the implementation of actions whose results will be felt during the event. Since the CREAA model does not itself aim to assess the results of the actions implemented, it focuses on the actions to take before and after an event.

This model therefore comprises four interacting modules, which gravitate towards a central module, that of the major targets and objectives to be attained, namely: constructing resilience in order to ensure i) the security and safety of population and companies, ii) the functioning of hard and soft networks, and iii) the management and evacuation of waste in the event of flooding. The four modules are organized in stages, respectively called:

- Mapping of territories faced with floods (module C);
- Promoting the Resilience of populations, companies, buildings and networks (module R);
- Assessing the quality of territorial governance systems (module E);

- Learning about minor and major events in order to reinforce the Actions of resilience (module AA).

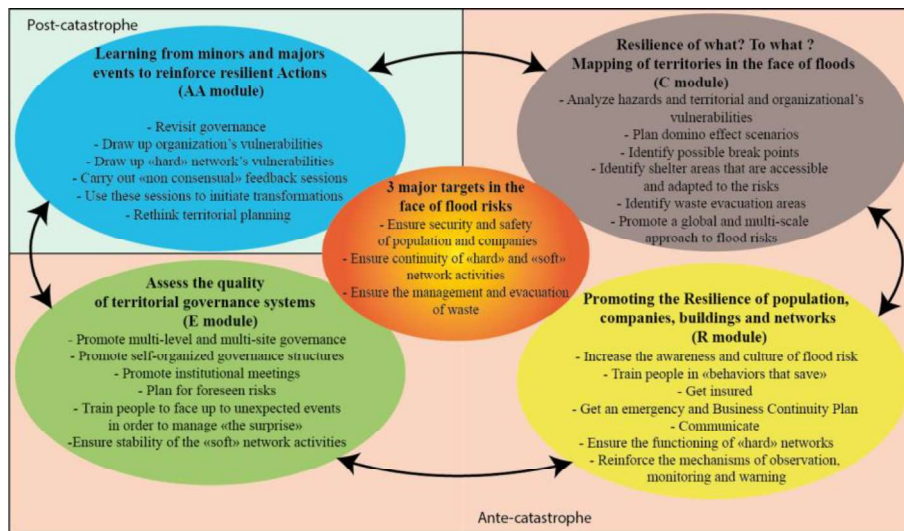


Figure 16.5. The CREA model: a methodological framework with an operational range for constructing resilient territories and societies.

The first step (module C) in constructing the resilience of systems obviously consists of answering the question: resilience of what to what? This step must make it possible to choose territorial scales for analyzing flood risk (e.g. flooding due to river overflow, coastal flooding, or runoff) and to establish a diagnosis of hazards, territorial and organizational vulnerabilities and potential ruptures. This step, which is fairly standard in the field of risks and disasters, requires particular attention, however: it involves drawing up scenarios of systemic crises, imagining the unpredictable and, notably, the domino effects that organizations do not expect. Once this expert assessment has been carried out, actions can then be taken to construct the resilience of territories and populations. We believe that two essential steps must be taken together: one consists of promoting the resilience of populations, companies, buildings and networks (module R), the other focuses on assessing territorial governance systems (module E). In module R, we recommend actions that are concrete and often well-known, but that involve reinforcing and even acting on different scales: the intercommunality, for example, to increase the awareness and culture of flood risk among institutional parties and citizens, and the company, to make entrepreneurs aware of the need to make and use an Emergency and Business Continuity Plan. It also involves encouraging institutional and academic parties to come together to observe, monitor and warn those in charge of the health and safety

of both populations and citizens. Module E involves promoting multi-level and multi-site governance and, therefore, institutional meetings, the objective being to avoid silo organizations, which have a significant impact on the structure of the state services and territorial communities in charge of the prevention and management of risks and disasters. Beyond the fact of working together, the parties must develop planning strategies that enable predicted risks to be managed and people to be trained to deal with unexpected events in order to "manage the surprise". Finally, the third and final step (module AA) must be implemented following an event, abrupt or otherwise, minor or major. This, of course, is the after-disaster phase. This involves assessing the vulnerabilities of networks and organizations, revisiting governance and carrying out formal and informal non-consensual feedback sessions, i.e. identifying not only actions that have worked but also failures, in order to overcome the vulnerabilities of the systems.

All these actions evidently bring into question the resilience factors that will be used to meet the health and safety objectives. Seven are frequently cited in the literature [ADG 003, KLE 03, FOL 06] (see figure 16.6). Resilience depends on adaptation. This factor is therefore treated as a response to vulnerability scenarios (module M), from which anticipatory (before flooding) or reactive (after flooding) adjustments will emerge. For these, feedback processes must make it possible to "learn from the past", to share its lessons (learning), and to draw organizational and behavioral adaptations from it. According to the authors, the adaptation strategy is contradictory to the structural resistance factor. The reality is certainly more "complex", in the sense that the construction of buildings and defense structures that protect against floods can have negative effects, depending on the hazard level taken into account [PIG 12]. Diversity is another resilience factor that should be mobilized in various sectors: the well-known field of economic activities and that of risk culture, proposing intervention panels (public conference, science bar, website, etc.), increasing risk awareness. Finally, opposition to all forms of innovation (technological, social and societal) would contribute to reducing social resilience [DAU 07, DAU 13]. However, the connections and abundance of networks contribute to their resilience because there are alternatives: the functions of the damaged parts are taken on by other elements and do not depend on a single centralizing hub. There are, therefore, forms that promote the resilience of soft networks (i.e. stakeholders), and hard networks. Methods from graph theory can be used to identify these various forms. Implementing this diverse range of factors is therefore a possible solution to flood prevention and management.

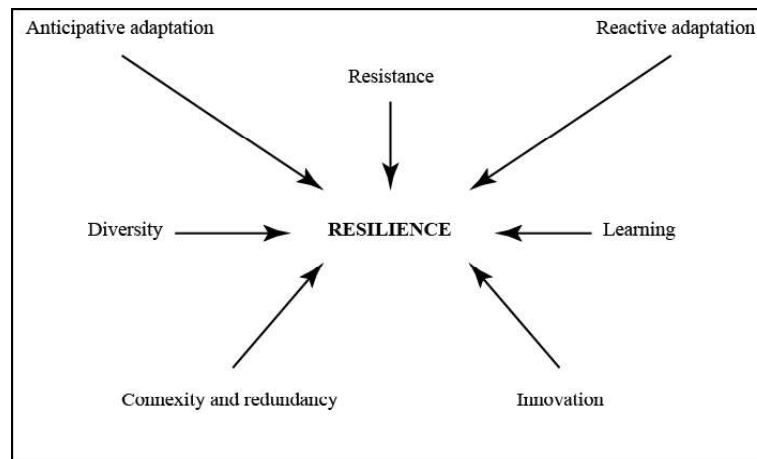


Figure 16.6. Factors that promote the construction of resilience, according to [DAU 07].

But these factors are still barely being used by institutional parties. However, watercourse overflows, drainage floods, urban runoff and coastal floods are risks that have become more frequent in the last few years and that cause loss of human life, functional disturbances and material damage that are less and less tolerable. Any new event today returns to the questions of the partial efficiency of the protection methods implemented and the insufficiency of the organization among parties. This observation leads us to question the strategies designed and used to protect against floods and, more generally, to recurrent or exceptional risks.

16.4. Developing spatial decision-support tools for applying resilience strategies

This does not involve painting a picture of the panels of practices implemented on various territorial scales to fight against or adapt to risks, but more questioning and debating the types of strategy used to manage the health and safety of people and territories, one based on planning, the other on resilience.

These strategies are usually presented in an opposite and contradictory way; our position is different, in the sense that we believe them to be complementary. Everything depends on the type of hazard (recurrent and anticipated *versus* exceptional and unanticipated) faced. The planning-based strategy provides a rapid and "error-free" response to known risks by implementing rules, procedures and pre-established plans. But, since everything is set out in the plan, this strategy makes it difficult to respond to unforeseen and unanticipated events. A second type of strategy, based on resilience, paves the way for dealing with unforeseen and uncertain events. It is no longer about implementing a pre-established plan, but training stakeholders to

act and react in the face of unforeseen events. Crisis management exercises (a good example is Sequana 2016, which took place in the Ile-de-France region), which train crisis management services (prefectures, decentralized services, communes, public establishments, including schools, etc.) to deal with flooding, are usually set up with a dual objective: to test pre-established plans and to inject "destabilizing" and even contradictory information, in order to "force" managers to improvise in a crisis situation. This resilience strategy is also found in post-mortem feedback sessions. But the measures taken after these sessions tend to support planning rather than improvisation.

Finally, this resilience strategy must be anchored in land use planning and participatory approaches. Developers, town planners, architects and civil engineers must work together and integrate practices that take into account the flood risk across the entirety of the territory into their urban planning activities, whether this involves rearranging what already exists, investing in new spaces or creating "trusted territories". To achieve this, land use planning professionals need spatial decision-support tools to guide their choices.

16.5. Conclusion

This chapter has proposed a resilience construction process, presenting a reflective analysis of resilience capacities and strategies. In the context of flooding, the concept of resilience means being prepared, anticipating risks that are becoming more frequent in a context of climate change, protecting oneself against disasters, facing up to crises and recovering from them. In terms of public action, it no longer involves putting together strategies that are identical to those implemented to reduce vulnerabilities, but avoiding the crisis by constructing pillars of resilience [LAG 06]. These pillars have been questioned in the two models proposed (DS3 and CREA). Based on a systemic approach, these models are still imperfect. However, they provide a basis for reflection and discussion among stakeholders and planners wishing to establish flood resilience activities.

16.6. Bibliography

[ADG 00] ADGER W.N., Social and ecological resilience: are they related, *Progress in Human Geography* 24 (3), 347–364, 2000.

[ADG 003] ADGER W. N., HUQ S., BROWN K., CONWAY D., HULME M., *Adaptation to climate change in the developing world*, *Progress in Development Studies*, 3(3), 179-195, 2003.

[BAL 13] BALSELLS M., BARROCA B., AMDAL J. R., DIAB Y., BECUE V., SERRE D., *Analysing urban resilience through alternative stormwater management options: application*

of the conceptual Spatial Decision Support System model at the neighbourhood scale, *Water Science & Technology*, IWA 68 (11): 2448-2457, doi: 10.2166/wst.2013.527, 2013.

[BLA 98] BLANCHER P., *Risques, ville et réseaux techniques urbains, Risques et réseaux techniques urbains*, Collection du Certu, volume 18, 168p., 1998.

[BUR 06] BURBY R. J., *Hurricane Katrina and the Paradoxes of Government Disaster Policy: Bringing About Wise Governmental Decisions for Hazardous Areas*, *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 604 : 171-91 (Special issue: Shelter from the Storm: Repairing the National Emergency Management System after Hurricane Katrina, W. L. WAUGH, ed.), 2006.

[CAM 08] CAMBIEN A., *Urban Modelling: emergence of a systemic approach of urban development. In 7th Systems Science European Union Congress Proceedings*, Lisboa, Portugal, December 17-19 2008.

[CON 10] CONFORT L.K., BOIN A., DEMCHAK C.C., *Designing Resilience, Preparing for Extrem Events*, University of Pittsburgh Press, Pittsburgh, 2010.

[DAU 07] DAUPHINÉ A., PROVITOLLO D., *La résilience : un concept pour la gestion des risques*, *Annales de Géographie*, 115-125, 2007.

[DAU 13] DAUPHINÉ A., PROVITOLLO D., *Risques et disasters – Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, A. Colin (2ème édition), Collection U, 412 p., 2013.

[DER 75] DE ROSNAY J., 1975, *Le microscope. Vers une vision globale*, Paris, Ed. Seuil.

[DÉG 02] DÉGARDIN F., *Urbanisation et inondations : de l'opposition à la réconciliation*, *Bulletin de l'Association de géographes français*, n°1, p. 91-103, 2002.

[FEL 05] FELTS L., *Vulnérabilité des réseaux urbains et gestion de crise*, Rapport d'étude, CERTU, 78 p., 2005.

[FOL 06] FOLKE C., *Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses*, *Global Environ Chang* 16:253–267, 2006.

[GUN 02] GUNDERSON L.H., HOLLING C.S. (eds), *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, Island Press, Washington, DC. Wilson EO, 2002.

[HEI 13] HEILEMANN K., BALMAND E., LHOMME S., DE BRUJIN K., LINMEI N., SERRE D., *Identification and Analysis of most Vulnerable Infrastructure in Respect to Floods*, FloodProBe Consortium, Report, 2013.

[JOH 10] JOHANSSON J., HASSEL H., *An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis*, *Reliability Engineering & System Safety*, 95(12), Elsevier, pp. 1335-1344. Lamarre D., 2008, *Climat et risques, changements d'approches*. Lavoisier, 2010.

[KLE 03] KLEIN R.J., NICHOLLS R.J., THOMALLA F., *Resilience to natural hazards: how useful is this concept?*, *Global Environmental Change*, Vol. 5, 35-45, 2003.

- [LAG 06] LAGADEC P., GUILHOU X., *Katrina, Quand les crises ne suivent plus le script*, Préventique Sécurité n°88, 31-33, juillet-août 2006.
- [LEM 77] LE MOIGNE J.L., *La théorie du système général, Théorie de la modélisation*, Paris, PUF, Coll. Systèmes - Décisions, 258 p., 1977.
- [LHO 13] LHOMME S., SERRE D., DIAB Y., LAGANIER R., *Analyzing resilience of urban networks: a preliminary step towards more flood resilient cities*, Natural Hazard and Earth System Sciences, (V) 12, 221-230, 2013.
- [PIG 12] PIGEON P., *Apports de la résilience à la géographie des risques : l'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée, France)*, VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 12 Numéro 1, 2012.
- [PRO 12] PROVITOLLO D., *The contribution of science and technology to meeting the challenge of risk and disaster reduction in developing countries: from concrete examples to the proposal of a conceptual model of resiliency vulnerability*, in Technologies and Innovations for Development, BOLAY J. C. et al (eds), Springer-Verlag, Berlin, 2012.
- [REG 15] REGHEZZA M., PROVITOLLO D., LHOMME S., Définir la résilience : quand le concept résiste, in Résiliences, sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux disasters, REGHEZZA-ZITT M., RUFAT S. (eds.), Editions ISTE, 2015.
- [RES 10] Resilience Alliance, *Assessing Resilience in Social-Ecological Systems: Workbook for Practitioners, Version 2.0*, consultable à partir du site internet, <http://www.resalliance.org>, 2010.
- [REV 09] REVET S., *De la vulnérabilité aux vulnérables. Approche critique d'une notion performative*, In : BECERRA S. et PELTIER A. (eds), Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés, Paris : L'Harmattan, 575 p., 89-99, 2009.
- [RIC 03] RICHEMOND A., *La Résilience économique, Une chance de recommencement...*, Edition d'Organisation, 231 p., 2003.
- [SER 12] SERRE D., LHOMME S., PEYRAS L., LAGANIER R., DIAB Y., *Analyzing the civil engineering infrastructures to prioritize urban flood resilient actions*, 7th International Conference on Water Sensitive Urban Design, 21-23 February 2012, Melbourne, Australia, 2012.
- [SER 16] SERRE D., *Advanced methodology for risk and vulnerability assessment of interdependency of critical infrastructure in respect to urban floods*, FLOODrisk 2016, 3rd European Conference on Flood Risk Management, Innovation, Implementation, Integration, 18 – 20 October 2016 - Lyon, France, 2016.
- [TWI 09] TWIGG J., *Characteristics of a Disaster-resilient Community*, Note d'orientation. University College London, 2009.
- [VIG 06] VIGNERON S., DÉGARDIN F., et al., *Réduire la vulnérabilité des réseaux urbains aux inondations*. Risques naturels majeurs. CERTU, C. d. l'Est and C. Sud-Ouest, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable: 112 p., 2006.
- [WAL 04] WALKER B.H., HOLLING C.S., CARPENTER St R., KINZIG A., *Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems*, Ecology and Society, 9 p., 2004.

[WHI 75] WHITE G. F., HASS J. E., *Assessment of Research on Natural Hazards*, Colorado University, MIT Press, 487 p., 1975.

Index

- A**
acteurs, 10, 11, 14, 16
- C**
capacités, 2, 3, 4
CREAA, 4, 10, 11, 13
- D**
DS3, 4, 5, 8, 10
- F**
facteurs de résilience, 5, 14
- I**
IC (Infrastructure Critique), 6, 7
IM (Infrastructure Majeure), 7, 8
inondation, 2, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 14
- M**
modèle, 4, 5
- O**
ouragan Katrina, 1, 8
- Q**
quartier, 5, 6, 7, 8, 9, 10
- R**
réseaux, 8, 11, 12, 14, 15
résilience, 1, 2, 3, 5, 7, 17
résiliences, 2, 4, 10, 11, 14, 16
- S**
stratégie, 14, 15, 16
systémique, 2, 4, 5, 11, 14

Annexe 10 :

Article :

La modélisation conceptuelle comme aide à la construction de villes résilientes

Boschetti, Laurie & Provitolo, Damienne & Tric, E.. (2017). La modélisation conceptuelle comme aide à la construction de villes résilientes. Risques urbains. 17. 10.21494/ISTE.OP.2018.0201.

La modélisation conceptuelle comme aide à la construction de villes résilientes

Laurie BOSCHETTI, Université Côte d'Azur, OCA, CNRS, IRD, UMR Géoazur **Damienne PROVITOLLO**, Université Côte d'Azur, CNRS, OCA, IRD, UMR Géoazur
Emmanuel TRIC, Université Côte d'Azur, CNRS, OCA, IRD, UMR Géoazur

1. Introduction

Ces quarante dernières années ont été marquées par un accroissement important du nombre de catastrophes, et ce particulièrement dans les villes qui hébergent plus de la moitié de la population mondiale. Ces tendances ne devraient pas s'inverser dans les années à venir, car les facteurs de risque restent nombreux : changements climatique, tensions géopolitiques, risques liés aux avancées de la technologie et aux besoins des sociétés, croissance démographique et pauvreté, dégradation de l'environnement et pression urbaine *etc.* [URD 2011].

Pour faire face à ces risques multiples, la résilience¹ est devenue lors du « Cadre d'Action de Hyogo pour 2005-2015 : pour des nations et des collectivités résilientes face aux catastrophes », le nouveau cadre, le nouveau référentiel de la politique de gestion des catastrophes. Il s'agit là du principal instrument que les États membres des Nations unies ont adopté pour réduire les risques de catastrophe.

Toutefois, force est de constater que ce concept reste, douze ans après la conférence mondiale de Hyogo, encore peu opérationnel pour construire les résiliences des territoires et des sociétés. Le plus souvent les études sont empiriques, réalisées à différentes échelles et portent sur des systèmes aussi distincts qu'un pays, une ville, un quartier, une communauté humaine ou une entreprise. En l'absence de cadre méthodologique commun, les comparaisons pour identifier les villes résilientes sont donc difficiles. De plus, dans la majorité des recherches, la difficulté de mettre en œuvre une démarche de résilience opérationnelle apparaît clairement [O'RO 2007]. Quelques rares tentatives ont été essayées avec les modèles stylisés du Cycle adaptatif [WAL 2004], de Panarchy [GUN 2002] et avec la méthode proposée par le groupe de recherche Resilience Alliance [RES 2010]. Comme nous le montrerons dans la 1^{ère} partie de cet article, dans la réalité, ces modèles sont rarement utilisés par la communauté scientifique et les acteurs institutionnels.

L'un des défis actuels dans le domaine de la sécurité et de la sûreté des territoires et des populations, défi que nous souhaitons aborder dans le cadre de cet article, consiste donc à proposer des cadres méthodologiques à portée opérationnelle pour soutenir les acteurs opérationnels et institutionnels dans leur démarche de construction de villes résilientes.

Deux événements sont le point de départ de notre réflexion sur la mise en action de la résilience des villes et des populations en prise avec des événements soudains, à dynamique rapide et se produisant "par surprise".

Le 3 octobre 2015, des précipitations soudaines et intenses (on relève par exemple 106mm en une heure à la station Météo France de Cannes/Mandelieu ou 74mm en une heure à Nice, ces deux valeurs constituent les records des stations pour les cumuls horaires depuis le début des relevés) ont engendré une catastrophe naturelle sur le littoral de la Côte d'Azur et plus spécifiquement entre les communes de Mandelieu et Nice. Ces pluies violentes ont provoqué le débordement de plusieurs cours d'eau et de nombreux ruissellements urbains. Cet événement met en difficulté un territoire s'étendant sur plus de 40 km, de Théoule-sur-Mer à Nice, et prend très rapidement une tournure catastrophique. Cette tournure se lit notamment dans la désorganisation du territoire, les ruptures de communication terrestre, la saturation de la centrale téléphonique du SDIS 06, la difficulté pour les pompiers et

¹ « Resilience is the ability to prepare and plan for, absorb, recover from, and more successfully adapt to adverse events. Enhanced resilience allows better anticipation of disasters and better planning to reduce disaster losses –rather than waiting for an event to occur and paying for it afterward » National Academy [NAT 2012].

les responsables locaux d'assurer leurs missions de façon habituelle, notamment celles de prise en charge des populations, la médiatisation de l'événement. 20 personnes ont perdu la vie, et ce du fait essentiellement de comportements inadaptés à la situation de montée des eaux (descente dans des points bas comme des sous-sol ou des tunnels). Au niveau du bilan économique, 17 000 véhicules ont été endommagés ou détruits, les dégâts s'élèvent à 690 millions d'euros (85 millions d'euros pour des collectivités locales sur les équipements publics et 605 millions d'euros de dégâts assurés d'après l'Association Française de l'Assurance), et trente-deux communes des départements des Alpes-Maritimes et du Var ont été placées en état de Catastrophes Naturelles dès le 7 octobre 2015.

Une partie de ce même territoire a été frappé quelques mois plus tard, lors de la fête nationale du 14 juillet 2016, par un aléa de tout autre nature, un attentat terroriste. L'effet de surprise est l'élément marquant d'un attentat, d'autant plus qu'il frappe la plupart du temps des civils dans des lieux de la vie courante à forte densité humaine, comme les stations de métro, les gares, les aéroports ou les lieux de festivités. Ce fut le cas à Nice, où la scène de l'attaque s'étend sur près de 2 km sur la Promenade des Anglais. Le bilan humain est très lourd avec 86 personnes ayant perdu la vie et des centaines de blessés.

Inondation et attentat, deux événements ayant *a priori* peu de points communs si l'on s'attarde uniquement sur l'origine de la catastrophe : l'une est déclenchée par une action naturelle, l'autre par une action humaine. Mais ces événements présentent également des caractéristiques similaires : événements difficilement prévisibles et localisables précisément, événements dont l'emprise spatiale est réduite comparativement à des catastrophes obéissant à un modèle zonal (ex. une pandémie), brutaux dans leur déclenchement, à cinétique rapide. Événements pour lesquels les victimes sont peu préparées à faire face, sont difficilement accessibles (isolées dans leurs habitations, immergées) et dispersées sur le territoire du fait de l'emprise spatiale de l'inondation, ou des mouvements de fuite qui peuvent être observés lors des attentats. Du fait du caractère inattendu de ces deux catastrophes, auquel s'ajoute le caractère inhabituel d'action terroriste sur la métropole azurienne, la gestion de crise s'est organisée dans l'urgence, voire la précipitation.

Ce constat d'ensemble impose de s'interroger sur les manières de préparer les réponses des villes aux défis de phénomènes difficilement prévisibles, brutaux dans leur déclenchement, à cinétique rapide et pour lesquels les populations mais aussi les acteurs en charge d'assurer la sécurité et la sûreté des populations et des territoires peuvent rapidement être pris au dépourvu. Les enjeux étant de penser le niveau opératoire de la résilience non plus uniquement au niveau technique mais aussi au niveau social et territorial, en prenant en compte les vulnérabilités et les capacités des sociétés à engager le cycle de la résilience : pour mieux se préparer et résister, faire face, reconstruire et se reconstruire.

Pour ce faire, nous présentons dans une première partie les rares modèles pouvant être aujourd'hui mobilisés pour mettre en action la résilience territoriale. Puis, dans une seconde partie, en nous appuyant sur les travaux de nos prédécesseurs, nous proposons le modèle CREEA, un cadre opérationnel d'aide à la construction de villes résilientes basé sur quatre modules visant à se préparer, résister, apprendre et rétablir des conditions normales de fonctionnement.

2. Quelques rares modèles de résilience

Depuis l'appropriation du concept de résilience dans les domaines du changement climatique, des risques et catastrophes, quelques rares modèles d'analyse de la résilience territoriale ont été proposés par la communauté scientifique. Nous avons sélectionné ici quatre modèles susceptibles de répondre à notre questionnement, c'est-à-dire d'identifier un modèle opérationnel, qui puisse aussi bien être utilisé par la communauté scientifique que par des acteurs institutionnels, et qui permette de lancer une réflexion sur la façon de construire un territoire résilient face à une menace, quelle que soit son origine (inondation, séisme, épidémie, accident technologique, ou encore attentat, *etc.*).

Dans la littérature scientifique, nous avons ainsi identifié des modèles génériques et stylisés, comme celui de Panarchy [GUN 2002] ou du Cycle Adaptatif [WAL 2004], et des modèles plus opérationnels, comme le Resilience Assessment Framework (RAF) [RES 2010] ou le Spatial Decision Support (DS3) [BAL 2013]. Il ne s'agit pas ici de présenter ces derniers en détail mais davantage d'identifier leurs intérêts et limites au regard de notre problématique de recherche, à savoir la mise en action de la résilience territoriale et sociétale.

2.1. Des modèles stylisés issus des sciences « dures »

La résilience a dans un premier temps été appréhendée au niveau conceptuel, afin de définir ce terme et de clarifier ce qu'il représente. Une fois posé, des représentations schématiques ont été proposées, dans un premier temps dans les domaines des sciences « dures ».

Le premier modèle à faire la transition entre concept et représentation schématique est le modèle de Panarchy, issu de l'écologie et présenté par Gunderson et Holling [GUN 2002]. Ce dernier représente la résilience comme un système composé de 4 étapes : la croissance (*exploitation*), la conservation (*conservation*), l'effondrement (*release* ou « *creative destruction* » [SHU 1950]) et la réorganisation (*reorganisation*). Ce modèle rend ainsi possible les changements d'échelles temporelles et spatiales.

Un second modèle, issu de la même discipline, apparaît quelques années plus tard, il s'agit du Cycle Adaptatif [WAL 2004]. Celui-ci reprend la structure du modèle de Panarchy, et permet d'appréhender le système selon trois dimensions : le potentiel, les connections et la résilience.

Ces modèles ont été pensés et conçus par des scientifiques pour des scientifiques, faisant d'ailleurs souvent parti de la même communauté. Le langage utilisé, faisant référence à la complexité des systèmes, est peu approprié pour des acteurs opérationnels ou institutionnels. De plus, ces modèles ont été conçus dans le but de quantifier le système et sa résilience, demandant donc une mise en équation mathématiques du système et de différents paramètres. Ces derniers apparaissent donc accessibles au premier abord mais se révèlent difficiles à mettre en application, que ce soit par les scientifiques, ou par les acteurs opérationnels.

Les modèles de Panarchy et du Cycle Adaptatif sont donc peu adaptés à une mise en application réelle, et à une opérationnalisation permettant de construire la résilience d'un territoire.

2.2. Des modèles à portée opérationnelle

D'autres modèles se sont peu à peu développés, principalement dans les Sciences Humaines et Sociales (la psychologie, l'économie, la géographie, *etc.*). Deux d'entre eux ont été conçus pour répondre à cette problématique de construction de villes résilientes : le modèle proposé par le groupe de chercheurs de Resilience Alliance, le modèle *Resilience Assessment Framework* (RAF), pensé pour les socio-écosystèmes, et le modèle *Spatial Decision Support System* (DS3), conçu pour étudier la résilience urbaine. Ces derniers proposent une approche plus littéraire, ne nécessitant pas de modélisation mathématique, et s'attachant davantage à une approche qualitative que quantitative.

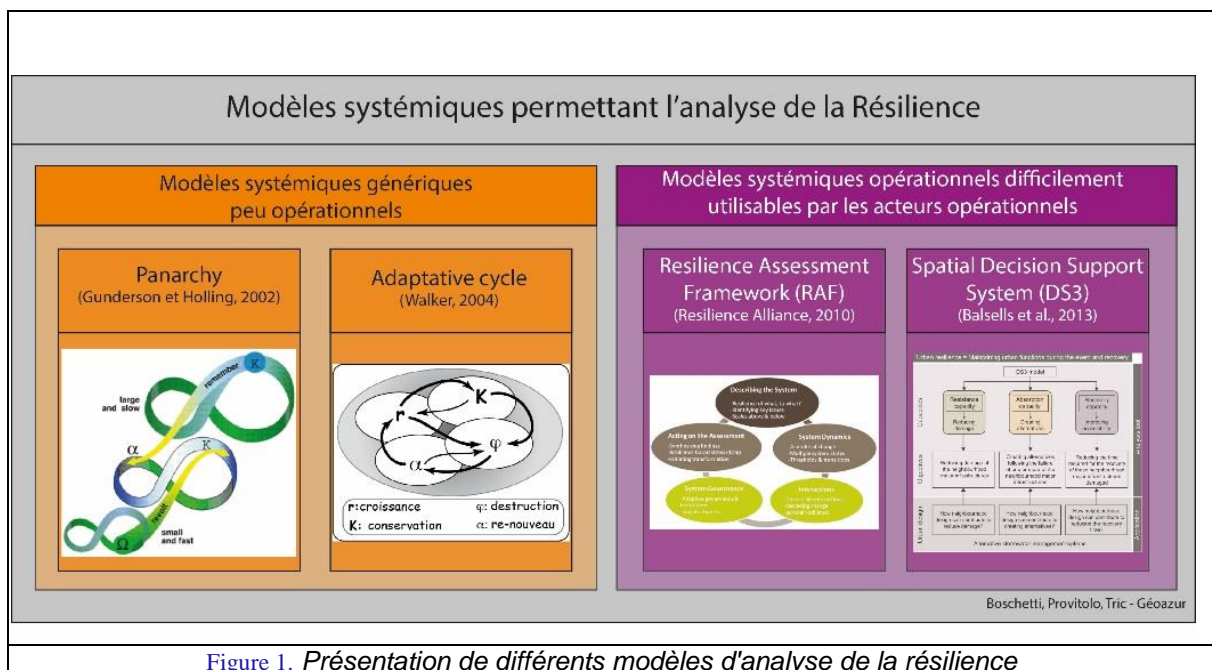


Figure 1. Présentation de différents modèles d'analyse de la résilience

Le méthodologie mise en place par Resilience Alliance est très complète et très dense. En effet, un *workbook* vient en complément de cette dernière et permet de guider le lecteur pas à pas dans l'analyse de la résilience des socio-écosystèmes. Elle présente l'intérêt d'inclure aussi bien Panarchy, que le Cycle Adaptatif, permettant ainsi les changements d'échelles. Elle est également décomposée en différentes parties thématiques distinctes prenant en compte aussi bien les dynamiques du système, que la gouvernance, ou encore les évolutions post-crise. Ceci est un atout, mais également un inconvénient, puisque sa mise en place est lourde et demande d'avoir à disposition de nombreuses données aussi bien qualitatives que quantitatives. De plus, une fois encore, le vocabulaire utilisé n'est pas forcément accessible à des non spécialistes.

Le second modèle retenu est le modèle DS3, conçu pour analyser la résilience d'un territoire urbain soumis au risque d'inondation, avec une application faite à l'échelle du quartier. Ce choix est expliqué par le fait que cette échelle d'analyse correspond à celle utilisée pour les réflexions d'aménagement urbains liées aux problématiques d'inondations [SER 2012]. Pour se faire, les auteurs se focalisent sur la dimension physique du système urbain, et plus précisément sur les réseaux, qualifiés d'Infrastructures Critiques (IC). Ces IC jouent un double rôle pour la vulnérabilité du territoire: elles sont à la fois des entités à la vulnérabilité intrinsèque, et à la fois des entités propagatrices de vulnérabilité [VIG 06 ; DÉG 02]. Ce modèle permet ainsi une analyse fine de la zone d'étude choisie, via des méthodes efficaces qui ont déjà fait leurs preuves (théorie des graphes et analyse spatiale via système d'information géographique). Bien que pertinent, il ne répond que partiellement à notre problématique, qui est d'avoir une vision plus élargie des territoires urbains en prenant en compte les dimensions physique, sociale, économique et fonctionnelle d'un territoire urbain.

Ces modèles (figure 1) ont tous été conçus selon une logique systémique, permettant une prise en compte aussi bien des échelles temporelles que des échelles spatiales. L'une de leur limite est d'être difficilement applicables car trop génériques et trop déconnectés du territoire (Panarchy et Cycle Adaptatif), ou opérationnels mais pensés pour une seule dimension du système (*Resilience Assessment Framework* et DS3). Ces différentes méthodologies bien que pertinentes, ne répondent que partiellement à notre problématique. C'est pourquoi, en nous basant sur ces dernières nous proposons un nouveau modèle, le modèle CREAA, afin de construire la résilience des territoires en prises avec des risques.

Spécifiquement construit pour faire face aux inondations, trois cibles majeures sont retenues pour promouvoir la résilience des villes : les populations et les entreprises, les réseaux durs (par ex. infrastructures de communication, énergie, assainissement *etc.*) et *soft* (plus particulièrement les acteurs institutionnels et opérationnels, formels et informels), et enfin les déchets.

3. Le modèle CREAA

Le modèle CREAA (figure 2) est un modèle systémique dont l'objectif est de construire, de mettre en place les résiliences des territoires et des sociétés. Il n'a donc pour but ni de quantifier cette dernière, ni de proposer une liste d'indicateurs. Pour mettre en action cette résilience, deux temporalités doivent être considérées comme des cycles interconnectés : l'avant et l'après événement. Ainsi, pour chacune de ces temporalités différentes capacités vont être mobilisées [REG 15] :

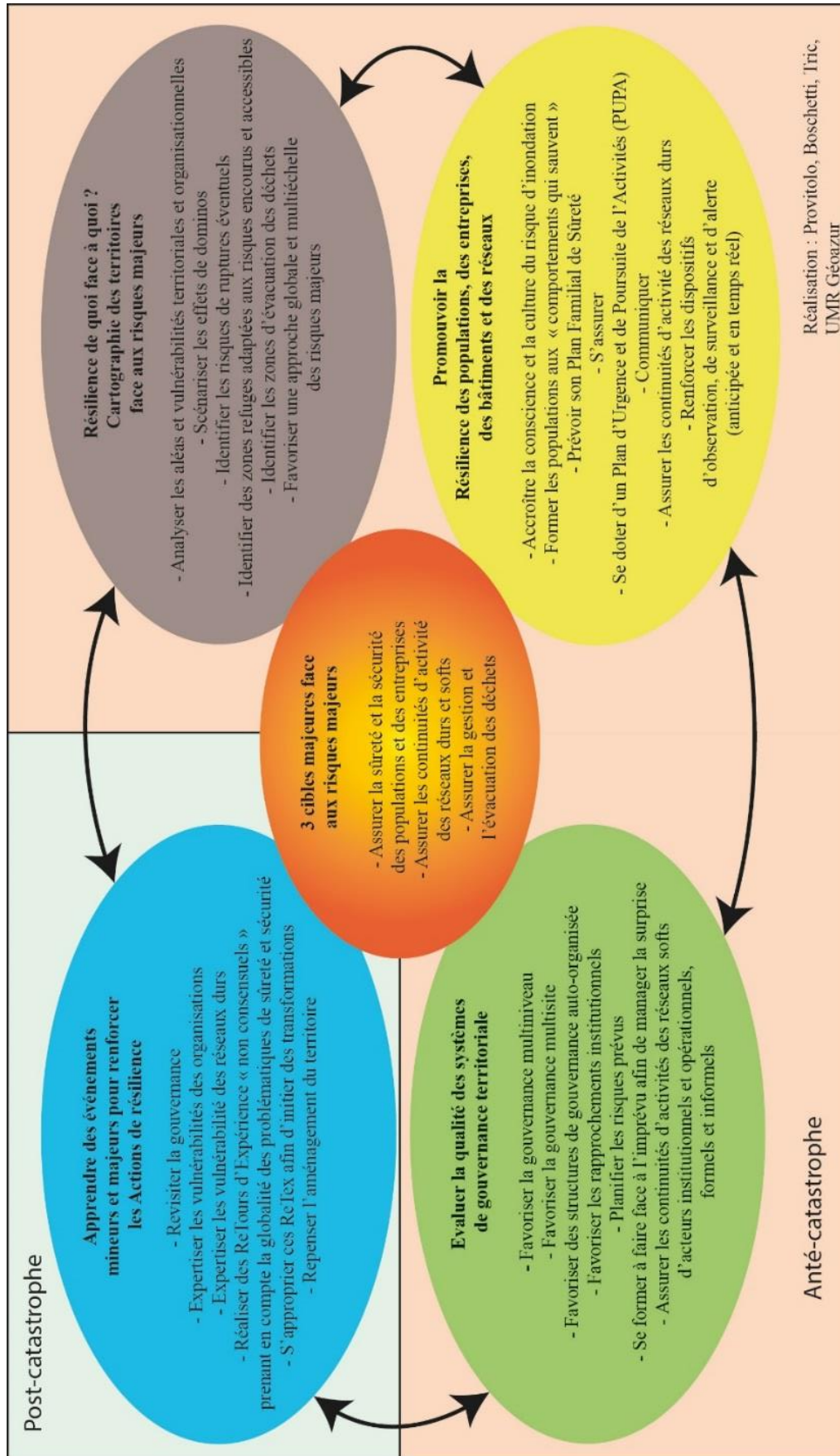


Figure 2. Le modèle CREA : un cadre méthodologique à portée opérationnelle pour construire des territoires et des sociétés résilients.

- L'avant événement : avec la capacité d'anticipation et la capacité d'apprentissage ;
- Après le choc : avec la capacité à récupérer et à se reconstruire, à revenir à un état d'équilibre, et la capacité à s'adapter.

En effet, le fait d'agir sur ces deux temporalités, permet de préparer le territoire, les populations, les acteurs institutionnels, *etc.*, en amont et en aval d'un événement. Il n'y a que durant l'événement que l'on peut vraiment évaluer la résilience [RIC 03] et voir si les actions préalablement déployées répondent à la complexité d'une menace ou d'une crise.

Ce modèle est composé de quatre parties distinctes, connectées les unes avec les autres, et qui s'articulent autour de cibles majeures. Ces cibles majeures permettent de mettre en avant les sujets de la réflexion, ainsi que les objectifs à atteindre. Dans le cadre de notre étude, le choix de ces cibles s'est porté sur : la sûreté et la sécurité des populations et des entreprises, la continuité d'activité des réseaux « durs » et « soft », et la gestion et l'évacuation des déchets. Ces cibles prenant un rôle clef en cas d'inondation, il est d'autant plus nécessaire de construire leur résilience.

Le modèle CREA est structuré en quatre parties, qui s'intéresse chacune à un élément particulier et que nous allons détailler plus en détail :

- Cartographier les territoires face aux inondations (C)
- Promouvoir la Résilience des populations, des entreprises, des bâtiments et des réseaux (R)
- Evaluer la qualité des systèmes de gouvernance territoriale (E)
- Apprendre des événements mineurs et majeurs pour renforcer les Actions de résilience (AA)

3.1. Cartographier les territoires face aux inondations (C)

Le premier module (figure 3), intitulé « Cartographie des territoires face aux inondations (C) », consiste en la réalisation d'un bilan des connaissances de la zone d'étude. Sont ainsi pris en compte les analyses d'aléas et de vulnérabilités, permettant une connaissance du risque et des enjeux majeurs sur le territoire étudié.

A partir des aléas et du territoire d'étude, il convient de scénariser les effets dominos, c'est-à-dire les différents aléas en chaîne susceptibles de se produire. Ces aléas peuvent appartenir au même domaine, le naturel par exemple pour un enchaînement de type séisme-tsunami-glisement de terrain, ou à des domaines distincts, on parle d'effets dominos de type Nat-Tech. La catastrophe de Fukushima rentre par exemple dans cette dernière catégorie.

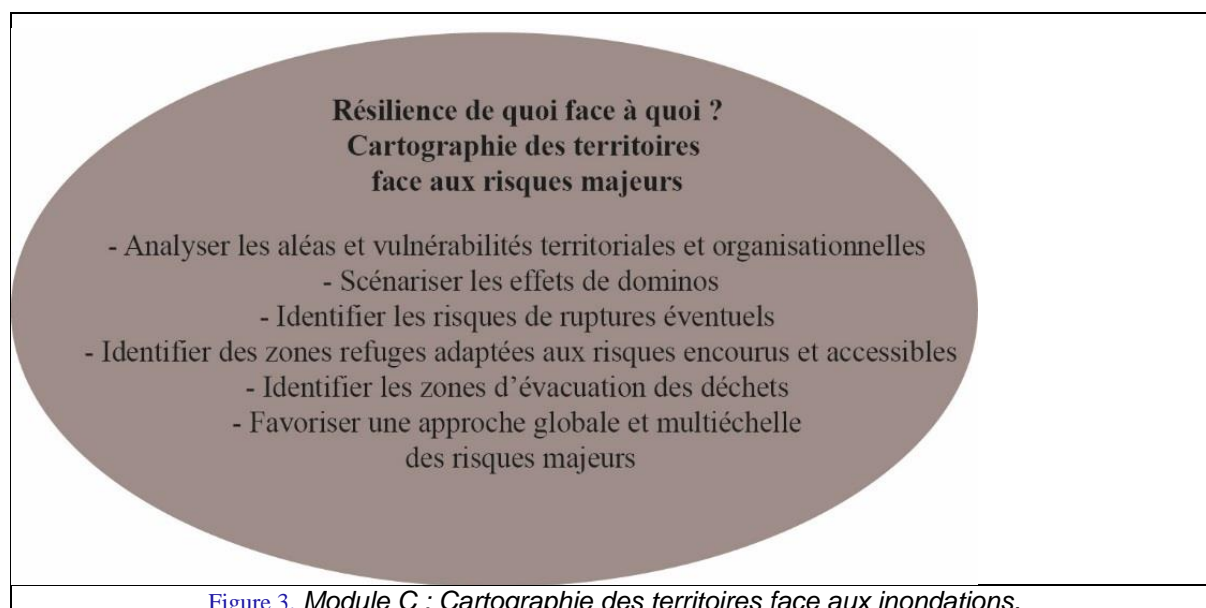


Figure 3. Module C : Cartographie des territoires face aux inondations.

Doivent également être pris en compte les points clés du territoire, qui peuvent ressortir des analyses de vulnérabilité qui auront été réalisées au préalable. Il s'agit principalement d'éléments définis comme des IC. Il peut s'agir de nœuds d'axe routier, qui en cas de rupture vont fragiliser l'ensemble du réseau, comme par exemple un échangeur routier ou autoroutier, qui va empêcher soit l'accès à cet axe, soit inversement, en empêcher la sortie, et rendre difficile la circulation, principalement des secours, mais aussi des populations.

En nous appuyant sur la connaissance du fonctionnement territorial et sur le type de menace auquel il faut faire face, il convient alors de déterminer et de localiser des zones refuges pour assurer la mise à l'abri, la sécurité et la sûreté des citoyens. Ces zones peuvent être i) prédéfinies et connues de la population [où indiquées par une signalisation particulière, comme c'est le cas sur le littoral Thaïlandais ou le long de la côte ouest des Etats-Unis pour faire face au risque de tsunami (figure 4)], ii) déterminées sur le moment en fonction de la connaissance du terrain, de son accessibilité et de la capacité de tout un chacun d'analyser rapidement une situation imprévue et de prendre une décision.



Figure 4. Photographie d'un panneau d'indication de la route d'évacuation en cas de tsunami sur le littoral thaïlandais.

Lors des attentats du 14 juillet 2016 à Nice, la Promenade des Anglais a été la principale zone impactée. Deux tentatives de mise à l'abri ont pu être observées : i) des dynamiques centripètes, consistant en la recherche de sécurité à proximité immédiate de la zone impactée, c'est-à-dire dans les bâtiments situés le long de la promenade des Anglais, qu'ils s'agissent de restaurants, d'hôtels, ou encore d'entrées d'immeuble, où ii) des dynamiques centrifuges, révélant la fuite de la zone touchée, en recherchant à s'éloigner au maximum. Dans ce cas précis, une grande partie des mouvements de fuite observés avaient pour destination la Place Massena et le Vieux-Nice. Il est intéressant de voir apparaître ces deux lieux clés de la vie niçoise comme étant des lieux où la population se sent à l'abri.

Lorsque ces zones refuges sont déterminées au préalable par les autorités, un ensemble de paramètres doit être pris en considération, allant de la capacité d'accueil, aux capacités matérielles, en passant par l'accessibilité en temps de crise. Une préparation en amont permet une meilleure gestion et une rapidité d'action en cas d'événement, car les autorités savent où orienter la population sinistrée. Lors des inondations qui ont frappées les Alpes Maritimes en octobre 2015, l'une des municipalités avait prévu des sites refuges afin de mettre à l'abri les sinistrés en cas d'événement de ce type. Une réflexion avait donc été lancée en amont. Or, il s'est avéré que lors de sa mise en application, certains lieux choisis ne pouvaient être utilisés, car non accessibles du fait de l'inondation. Le territoire est un système vivant, dynamique, il est donc primordial de prendre les éléments comme un ensemble et non pas seulement en tant qu'entité unique.

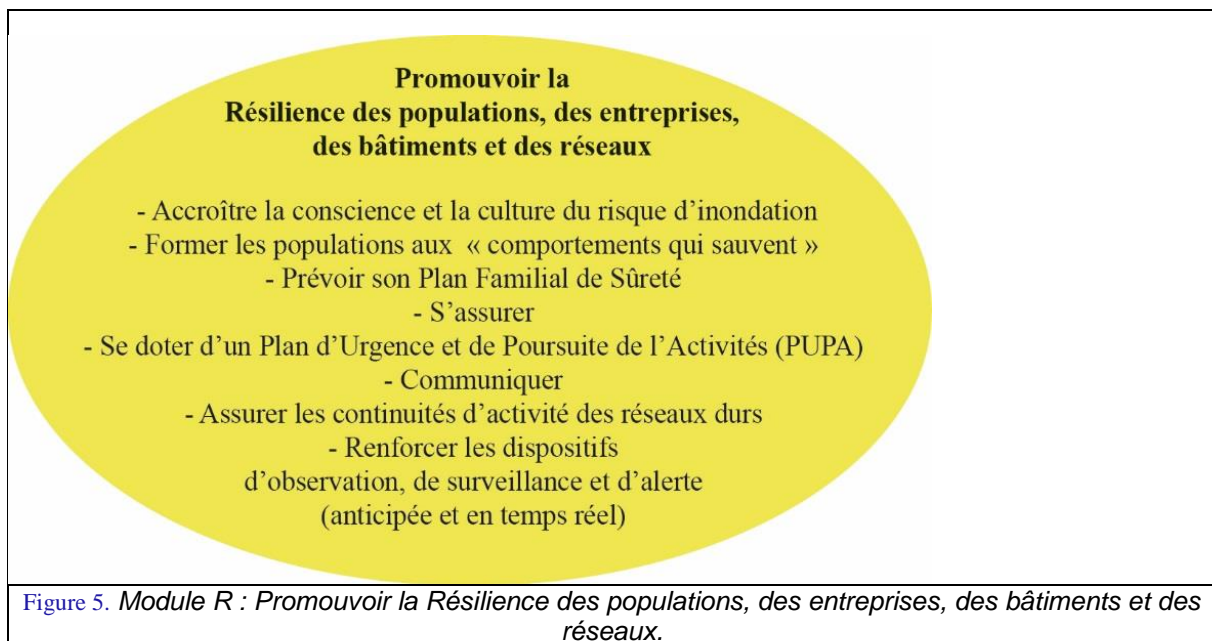
Les événements de grande ampleur sont généralement générateurs de nombreux dégâts matériels, demandant une évacuation de grandes quantités de gravas et de déchets. Une réflexion en amont de leur évacuation et de leur traitement est primordiale, afin de savoir comment les évacuer, où les stocker, comment les traiter, etc. Il s'agit dans un premier temps de « libérer » la ville afin d'effectuer les recherches de survivants plus facilement. Dans un deuxième temps, la reconstruction ne peut être lancée qu'une fois l'ensemble des gravats et des déchets évacués. Après le séisme de Christchurch de 2011 en Nouvelle-Zélande, une grande partie de la ville a été détruite, il a donc

fallu commencer par enlever les gravas pour ensuite pouvoir lancer la reconstruction. A cela s'ajoute les déchets produit par la vie quotidienne qu'il faut continuer à évacuer et à traiter.

Une approche globale et multi-échelle (spatiale et temporelle) est donc indispensable pour lancer les réflexions sur la construction de la résilience d'un territoire. D'autres actions portant sur les populations, les entreprises, les bâtiments et les réseaux sont à mettre en place.

3.2. Promouvoir la résilience des populations, des entreprises, des bâtiments et des réseaux (R)

Ce module, intitulé « Promouvoir la résilience des populations, des entreprises, des bâtiments et des réseaux (R) » (figure 5) se focalise principalement sur la partie « vivante » du territoire, c'est-à-dire sur les hommes qui l'occupent, les citoyens, les acteurs institutionnels et économiques, les éléments structurants comme les bâtiments ou les réseaux « durs ».



Promouvoir la résilience auprès des populations demande un travail en collaboration avec ces dernières afin de les sensibiliser aux problématiques des risques et de catastrophes (cela s'applique également à d'autres domaines d'études). Pour ce faire, des campagnes d'informations et de formation doivent être lancées avec pour objectif l'accroissement de leurs connaissances sur les différents risques susceptibles d'affecter leurs lieux de vie. Il est malheureusement souvent nécessaire qu'une catastrophe se produise pour qu'une prise de conscience ait lieu (aussi bien du côté des élus que du côté de la population) et pour que des actions soient mises en place. C'est le cas par exemple de certaines communes et communautés de communes des Alpes-Maritimes, qui suite aux inondations meurtrières d'octobre 2015, ont cherché à mettre en place des réunions d'informations pour la population locale.

Informé la population des gestes qui sauvent, ou inversement ceux qui peuvent les mettre en danger est indispensable à la construction d'une meilleure résilience [PRO 15]. Il peut s'agir d'actions simples, comme de fermer les bouteilles de gaz et les éloigner des habitations en cas de feux de forêt à proximité d'une habitation, ou des actions qui vont à l'encontre de l'instinct humain comme le fait de ne pas aller chercher ses enfants à l'école en cas d'orage violent. Ces comportements sont malheureusement souvent la cause de décès lors d'événements exceptionnels. Ce fut le cas lors des inondations d'octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes, puisque la plupart des décès sont dû à une mauvaise connaissance du risque et à une mise en danger non évaluée. Certains habitants d'immeubles dont les garages étaient souvent inondés, avaient pris pour habitudes de s'avertir les uns les autres quand le phénomène se produisait, pour aller ensemble sortir leur voiture respective. Ces personnes n'avaient pas conscience que par ces actions et la ritualisation de ces dernières, elles se mettaient involontairement en danger, et qu'en cas d'événement plus important que la normal, ces garages en sous-sol se transformaient en véritable pièges dont il était impossible de ressortir.

Un travail de sensibilisation de la population doit ainsi être mené par les municipalités. Les mairies sont d'ailleurs dans l'obligation de se doter d'un DICRIM (Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs). Toutefois ces outils restent encore peu appropriés par la population. Certaines communes voient via ce document un réel moyen de communication auprès de la population. La ville de Nice par exemple édite un DICRIM à destination de l'ensemble des citoyens, mais aussi un DICRIM jeune pensé pour un jeune public. Il est ainsi simplifié, utilisant des schémas et des mots simples, mais le message de fond est conservé. La création de ce double document permet de toucher un large public et de commencer la sensibilisation dès le plus jeune âge.

La transmission d'information à la population doit permettre de mettre en avant les différents outils existant, tel que le Plan Familial de Mise en Sureté. Celui-ci permet d'aborder la question des risques majeurs, de la commune de vie, au sein de la famille et de réfléchir à ce qu'il convient de faire en cas d'événement majeur. Il aide également à organiser son autonomie durant la phase critique de l'événement, grâce à la constitution d'un kit d'urgence, comprenant des éléments allant de la bouteille d'eau, à la radio, au nécessaire d'hygiène.

L'assurance de ses biens, immobiliers, moyens de transports (voitures, motos, *etc.*), ou encore d'une entreprise, permettent aux sinistrés d'avoir le moins de pertes économiques possibles. Cette indemnisation va cependant être en fonction du type d'assurance qui a été souscrite, mais va également dépendre du fait que l'arrêt de catastrophe naturelle (Arrêté CatNat) ait été ou non voté en conseil des Ministres. Si l'on reprend l'exemple des inondations des Alpes-Maritimes de 2015, deux jours après les inondations des camions appartenant à de grandes compagnies d'assurances sont venus s'installer sur des parkings de proximité, permettant aux sinistrés d'obtenir des renseignements, de remplir des dossiers de sinistres afin de lancer les démarches rapidement.

Les institutions et les entreprises doivent quant à elles se doter d'un PUPA (Plan d'Urgence et de Poursuite d'Activités) qui a pour but de réfléchir en amont à des solutions de replis leur permettant de continuer de fonctionner en cas de crise. Il peut s'agir par exemple de locaux où se réfugier et où poursuivre l'activité, comme une deuxième cellule de crise pour la commune dans le cas où la première venait à être défaillante.

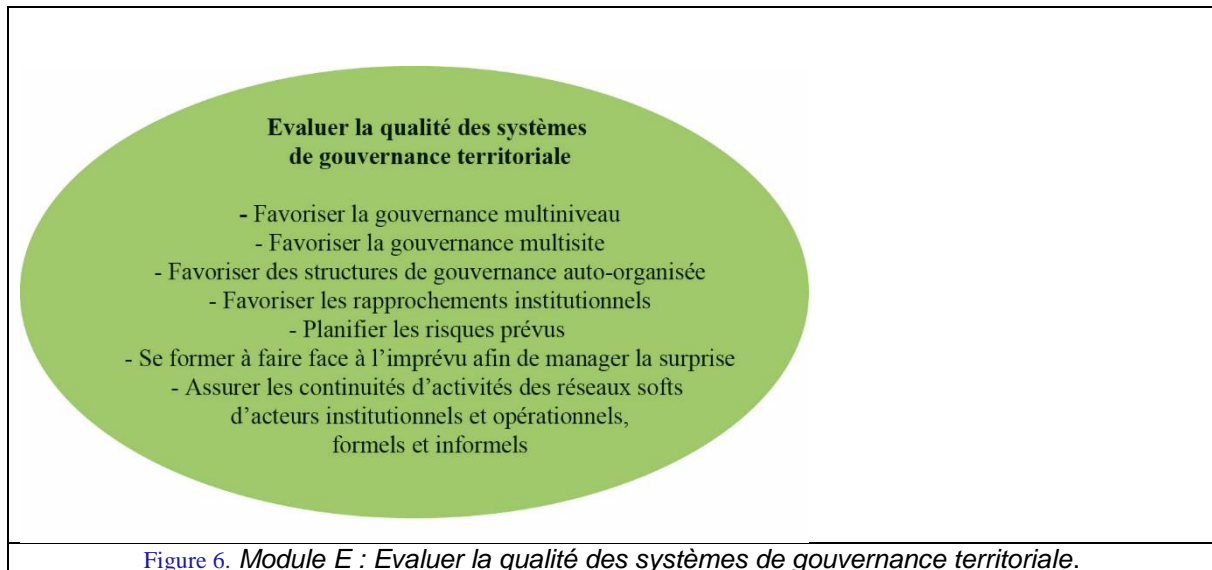
Comme nous l'avons vu précédemment, les réseaux « durs » font partie des infrastructures majeures d'un territoire, il faut donc assurer la continuité de ces réseaux. Il s'agit généralement des axes de communications, d'eau, d'électricité, *etc.*, ces derniers doivent donc être fonctionnels en permanence. En cas d'incident sur un point d'un des réseaux il faut s'assurer que ce dernier continue à fonctionner, même en mode dégradé, et que l'ensemble du réseau ne devienne pas défaillant.

Les aléas présentent un réel danger pour l'homme, c'est pourquoi de nombreux scientifiques travaillent sur la compréhension de leur mécanisme et sur différents dispositifs permettant de les observer et de les surveiller. Lorsque ceux-ci sont connus et compris, il est possible de mettre en place des systèmes d'alertes, permettant de passer de l'observation et de la surveillance scientifique à l'information de la population. C'est le cas par exemple avec les alertes météorologiques lancées régulièrement par Météo France. Ces dernières se basent sur des bulletins météorologiques en temps réel et sur des modèles informatiques qui permettent de prévoir (avec une marge d'erreur) l'évolution des différentes perturbations. Lorsqu'un certain seuil est franchi, les municipalités possiblement impactées sont prévenues et les alertes (jaune, orange ou rouge) sont lancées.

Il est donc impossible de construire la résilience sans inclure les éléments structurants d'un territoire, qu'il s'agisse de vivant, comme la population, de composantes dynamiques comme les entreprises ou les réseaux, ou encore d'éléments statiques comme les bâtiments. Il faut cependant ajouter à cela la gouvernance territoriale.

3.3. Evaluer la qualité des systèmes de gouvernance territoriale (E)

Ce troisième module (figure 6) s'articule autour de la gouvernance. Elle est définie par John Pitsey [PIT 10] comme recouvrant « à la fois l'éthique en politique, le contrôle des représentants politiques, la réforme des institutions internationales, les accords public-privé, la réforme du management des entreprises publiques, *etc.* ». Ce à quoi il ajoute qu'elle est définie par sa capacité à former une décision et non pas à partir du type de procédure qu'elle mobilise.



Le système institutionnel français est relativement complexe et présente de nombreux échelons d'actions. C'est pourquoi, il est nécessaire de développer une gouvernance multi-niveau et multi-site. L'auto-organisation doit également être favorisée, permettant aux structures d'avoir une liberté d'action en cas de crise. Ces institutions sont nombreuses, et ne sont pas nécessairement en lien les unes avec les autres. Il est donc primordial d'encourager ces rapprochements. Une gouvernance structurée, préparée et favorisant les liens entre les différentes institutions devrait améliorer la gestion de la crise.

Les différentes institutions françaises ont l'obligation d'intégrer les risques présents sur leur territoire dans les différents plans (d'aménagement, de gestion de crise, *etc.*) qu'elles doivent constituer. Les risques dit « prévus » correspondent à ceux qui frappent régulièrement le territoire, et qui sont donc connus, maîtrisés, et que l'on est en capacité de prévoir. Ils font également partie intégrante des plans mis en place. C'est le cas par exemple du risque d'inondation, et plus particulièrement les inondations « lentes », qui sont prévisibles de par leur dynamique temporelle, et contre lesquelles il est possible d'agir. Ce fut le cas par exemple lors de la crue de la Seine en 2016, qui a été relativement bien gérée au niveau de la capitale, limitant les inondations dans Paris, grâce à la mise en place et à l'utilisation de lac-réservoirs en amont [SEI 16], qui permettent de stocker une grande quantité d'eau et ainsi de réduire les débits de la Seine.

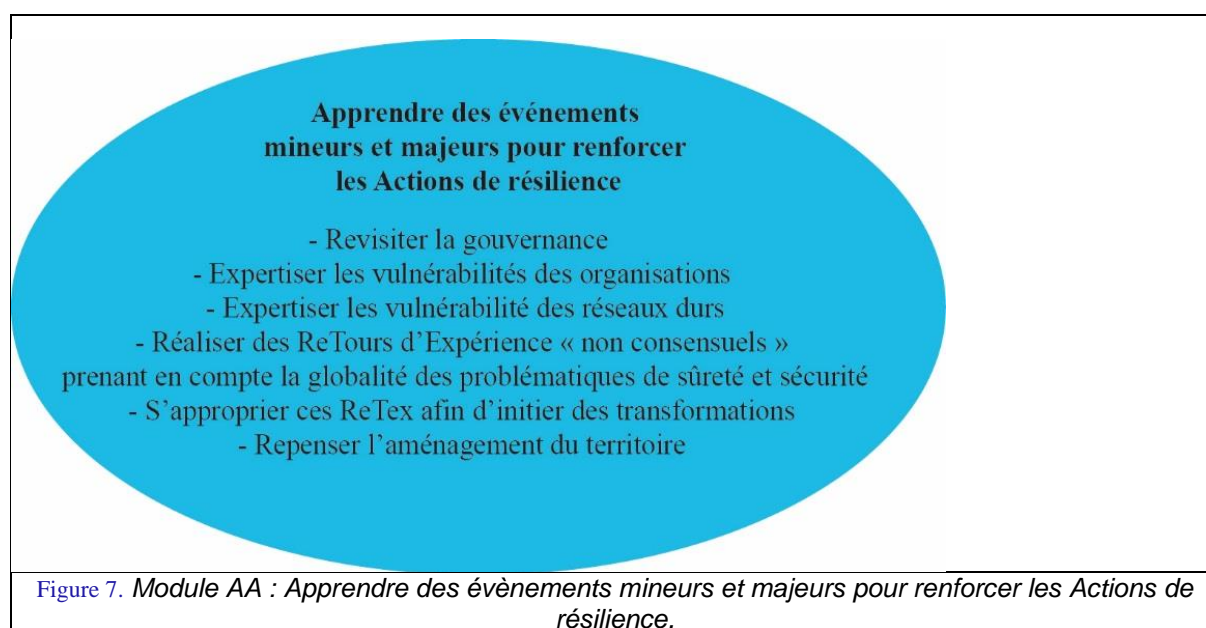
En opposition à ces risques « prévus », il est primordial d'arriver à former les institutions et les populations à l'imprévu. Connaître les actions et les réactions à avoir en cas d'événement inattendu aide à mieux les appréhender. Agir efficacement contre un événement attendu peut s'avérer difficile, et cela se complexifie encore d'avantage lorsqu'il n'y a pas ou peu de préparation. Reprenons l'exemple des inondations, mais des inondations de type cévenol, caractérisées par de grandes quantités d'eau qui s'abattent sur un territoire en quelques heures. Ces épisodes sont plus compliqués à prédire et de par la rapidité de l'événement, les acteurs institutionnels ont peu de temps pour réagir. Il en va de même pour les populations, qui doivent adopter leur comportement à ces types de menaces afin de ne pas se mettre inutilement en danger.

Les institutions ayant connaissance de l'importance de la préparation à l'imprévu, des actions sont mises en place pour former les acteurs, comme par exemple les exercices Richter. Ces derniers sont des exercices de gestion de crise, organisés par les préfetures en collaboration avec le BRGM (Bureau de Recherches géologiques et Minières) en charge de l'élaboration des scénarii. Ces exercices se basent principalement sur le risque sismique et les risques associés comme les glissements de terrain ou les tsunamis. L'objectif étant de simuler une crise, grâce à un scénario prévu en amont (non connu des acteurs institutionnels), et d'injecter petit à petit des actions sur le territoire afin d'observer la gestion qui en est faite en situation de stress. Après coup, il y a un retour d'expérience « à chaud », c'est-à-dire directement après la fin de l'exercice, permettant d'avoir des retours immédiats sur ce qui a fonctionné ou ce qui n'a pas fonctionné, ainsi que sur le ressenti de chacun. Puis un second retour d'expérience est organisé quelques mois plus tard, laissant le temps à chaque institution de faire un point plus en profondeur, et de préciser ce sur quoi cela l'a amené à réfléchir, voir sur les actions qui ont commencé à être mises en place.

L'intégration de la gouvernance à ce modèle de construction de la résilience, vient compléter les autres composantes du systèmes (population, entreprises, réseaux, *etc.*). Cette ensemble s'intègre dans l'*ante*-événement, et agit en amont d'une crise. Vient s'ajouter à cela un module centré sur le post-crise.

3.4. Apprendre des événements mineurs et majeurs pour renforcer les Actions de résilience (AA)

Cette dernière phase (figure 7), intitulée « Apprendre des événements mineurs et majeurs pour renforcer les Actions de résilience », sort de la temporalité des modules précédents, c'est à dire de l'*ante*-événement, pour entrer dans le post-crise. Il s'agit ici de faire un bilan de ce qui s'est produit afin de renforcer et améliorer les différentes actions existantes. Il convient de conserver ce qui a fonctionné et de travailler sur ce qui au contraire a présenté des faiblesses. Il est important de souligner que cette étape doit être réalisée pour tous les événements, qu'ils soient mineurs ou majeurs, qui ont marqué le territoire, car on apprend également des petits événements. Ces derniers permettant de se préparer à un événement de plus grande ampleur.



Cette étape passe par une série d'expertises et de bilans. Il peut s'agir d'un Retour d'Expérience (ReTex) général à l'ensemble de l'événement, ou alors à une série de ReTex plus spécialisés sur des points clés ou concernant des organisations particulières comme par exemple au sein même du SDIS, de la Croix-Rouge, ou encore de la SNCF. Les ReTex sont cruciaux pour bien comprendre le déroulement de l'événement dans sa globalité. Ces analyses ont un réel rôle à jouer dans le post-événement et dans la compréhension de ce dernier. C'est pourquoi elles doivent être réalisées par des personnels qui ont été impliqués dans la gestion de la crise. Les ReTex doivent être facilement appropriables par les différents organismes, afin que des actions puissent être mises en place pour rendre encore plus efficaces la prévention et la gestion des risques. Trop souvent, ces Retex sont réalisés à un échelon haut, et redescendent rarement vers les petites communes, qui ont souvent des difficultés à se remettre de la catastrophe et à mettre en place les actions nécessaires.

Le lien vulnérabilité-résilience est aujourd'hui encore flou [CUT 2008, PRO 13]. Il est difficile de savoir où se situe l'un par rapport à l'autre, et comment les articuler l'un l'autre. Ici le terme est utilisé selon son sens premier, c'est-à-dire que la vulnérabilité correspond à une caractéristique endogène d'un élément.

Dans le post événement, il apparaît pertinent de réaliser une expertise des vulnérabilités d'éléments clés du système, que sont les organisations et les réseaux « durs ». Celle-ci a pour but de faire un bilan sur le maintien de ces infrastructures critiques, qui en cas de rupture, vont avoir un impact sur l'ensemble du territoire. L'objectif final étant de repenser l'ensemble de l'aménagement face aux risques qui menacent le territoire, afin d'en réduire les vulnérabilités. Cela prend du temps, et demande parfois des changements en profondeur dans la manière de penser le territoire. Cela doit parfois passer par des travaux d'ampleur tel que des expropriations (financées grâce au fond Barnier), soit de maisons ciblées, comme cela va être le cas le long de la Brague à Biot suite aux

inondations d'octobre 2015, soit de quartier entier, comme par exemple l'expropriation du hameau de l'île Falcon situé à proximité immédiate du glissement de Séchilienne (en Isère).

Etant dans un modèle systémique, la temporalité est cyclique, on a donc un cycle avec trois temporalités de la catastrophe (*ante-*, pendant et *post-*), la dernière phase devenant la première d'une nouvelle mise en action et transformant le système.

Ce modèle ne prend donc pas en compte l'ensemble des temporalités de l'événement, il se concentre sur l'*ante-* et le *post-*crise. Il ne constitue donc pas une analyse de résilience à proprement parlé, mais a pour objectif de construire cette résilience afin que le territoire, la population et les acteurs aient la meilleure résilience possible lors d'une catastrophe.

4. Conclusion et perspective

Le nombre d'événements catastrophiques étant de plus en plus importants, et de plus en plus coûteux en termes de pertes humaines et économiques, il est aujourd'hui indispensable de trouver un moyen pour rendre les territoires plus résilients. Cet article avait donc pour objectif premier de dresser un rapide état de l'art sur les différentes méthodologies existantes et permettant de réaliser des analyses de résilience.

Nous avons ainsi mis en lumière le fait que pour répondre à notre questionnement, qui est de permettre aux acteurs (individuels et institutionnels) de construire leur résilience ainsi que celle de leur territoire, quatre modèles peuvent être mobilisés. Nous avons proposé de catégoriser ces derniers en deux groupes : les modèles « génériques » et stylisés de Panarchy et du Cycle Adaptatif, et les modèles plus opérationnels de Resilience Alliance et DS3.

Toutefois, face aux limites de ces derniers, à savoir : le fait d'être génériques et trop peu opérationnels, de prendre difficilement en considération l'ensemble des dimensions du système. Nous proposons le modèle CREAA pour Cartographier les territoires face aux risques majeurs ; promouvoir la Résilience des populations, des entreprises, des bâtiments et des réseaux ; Evaluer la qualité des systèmes de gouvernance territoriale ; Apprendre de événements mineurs et majeurs pour renforcer les Actions de résilience.

Construit dans une logique systémique, ce modèle ambitionne : de donner des pistes pour construire la résilience des villes en amont et en aval d'un événement, d'englober l'ensemble des échelles spatiales et des dimensions du système, de se concentrer sur des cibles majeures regroupant et expliquant clairement ce sur quoi va se concentrer l'étude. Ce modèle a la volonté d'être opérationnel et d'aider les institutions et les décideurs dans la construction de leur territoire.

Ce modèle présente également certaines limites qu'il faudra dépasser : la principale étant qu'il n'englobe pas l'ensemble du continuum temporel du système, mais seulement l'*ante-* et le *post-*événement ; étant dense et fourni, il demande une connaissance pointue du territoire et la disposition d'un grand nombre d'information et de données sur ce dernier ; et enfin il s'agit d'un modèle conceptuel, pensé de manière opérationnel, mais qui doit encore faire ses preuves lors de sa réelle mise en application sur une zone d'étude soumise à un ou des risques particuliers.

Bibliographie

[BAL 13] BALSELLS M., BARROCA B., AMDAL J. R., DIAB Y., BECUE V., SERRE D., *Analysing urban resilience through alternative stormwater management options: application of the conceptual Spatial Decision Support System model at the neighbourhood scale*, Water Science & Technology, IWA 68 (11): 2448-2457, doi: 10.2166/wst.2013.527, 2013.

[CUT 2008] CUTTER S., *A place-based model for understanding community resilience to natural disasters*, Global Environmental Changes, 18, 598-606, 2008.

[DÉG 02] DÉGARDIN F., *Urbanisation et inondations : de l'opposition à la réconciliation*, Bulletin de l'Association de géographes français, n°1, p. 91-103, 2002.

[GUN 02] GUNDERSON L.H., HOLLING C.S. (eds), *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, Island Press, Washington, DC. Wilson EO, 2002.

- [NAT 12] National Research Council, *Disaster Resilience: A national Imperative*, Washington, DC: The National Academies Press, 2012.
- [O'RO, 2007] O'ROURKE T. D., *Critical infrastructure, interdependencies and resilience.*, The Bridge – The Journal of the National Academy of Science, 37 (1), p 22-31, 2007.
- [PIT, 10] PITSEY J., *Le concept de gouvernance.*, Revue interdisciplinaire d'études juridiques (Volume 65), 2010.
- [PRO 13] PROVITOLO D., *Resiliency vulnerability notion - Looking in another direction in order to study risks and disasters*, Resilience and urban risk management, Serre D., Barocca B., Laganier R. (Eds.), CRC Press, Taylor and Francis Group, 2013.
- [PRO 15] PROVITOLO D., et al., *Les comportements humains en situation de catastrophe : de l'observation à la modélisation conceptuelle et mathématique.*, Cybergéo, URL : <http://cybergegeo.revues.org/27150>, 2015.
- [REG 15] REGHEZZA M., PROVITOLO D., LHOMME S., *Définir la résilience : quand le concept résiste*, in *Résilience, sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes*, REGHEZZA-ZITT M., RUFAT S. (eds.), Editions ISTE, 2015.
- [RES 10] RESILIENCE ALLIANCE, *Assessing Resilience in Social-Ecological Systems: Workbook for Practitioners*, Version 2.0, consultable à partir du site internet, <http://www.resalliance.org>, 2010.
- [RIC 03] RICHEMOND A., *La Résilience économique, Une chance de recommencement...*, Edition d'Organisation, 231 p., 2003.
- [SEI 16] SEINE GRANDS LACS, *Gestion de crue : nos ouvrages à la manœuvre*, <http://seinegrandslacs.fr/blog-hydro-solidaire/gestion-de-crue-nos-ouvrages-la-manoeuvre>, 2016.
- [SER 12] SERRE D., LHOMME S., PEYRAS L., LAGANIER R., DIAB Y., *Analyzing the civil engineering infrastructures to prioritize urban flood resilient actions*, 7th International Conference on Water Sensitive Urban Design, 21-23 February 2012, Melbourne, Australia, 2012.
- [SHU, 1950] SCHUMPETER J. A., *Capitalism, socialism, and democracy.*, 3d edition, New York : Harper and Row, 1950.
- [URD, 2011] URGENCE REHABILITATION DEVELOPPEMENT (URD), *Villes et crises.*, Sources documentaires de la conférence « La ville face aux crises » du 26 avril 2011, 2011.
- [VIG 06] VIGNERON S., DÉGARDIN F., et al., *Réduire la vulnérabilité des réseaux urbains aux inondations*. Risques naturels majeurs. CERTU, C. d. l'Est and C. Sud-Ouest, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable: 112 p., 2006.
- [WAL 04] WALKER B.H., HOLLING C.S., CARPENTER St R., KINZIG A., *Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems*, Ecology and Society, 9 p., 2004.

