



**HAL**  
open science

# Repenser l'évacuation d'une population littorale en milieu urbain dans un contexte multi-risques: le modèle STEP (Seisme Tsunami Evacuation Population)

Odile Plattard

► **To cite this version:**

Odile Plattard. Repenser l'évacuation d'une population littorale en milieu urbain dans un contexte multi-risques: le modèle STEP (Seisme Tsunami Evacuation Population). Géographie. Université Paris I - Panthéon-Sorbonne, 2019. Français. NNT: . tel-02370989

**HAL Id: tel-02370989**

**<https://hal.science/tel-02370989>**

Submitted on 19 Nov 2019

**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 POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR EN GÉOGRAPHIE

DE L'UNIVERSITÉ PARIS I PANTHÉON-SORBONNE

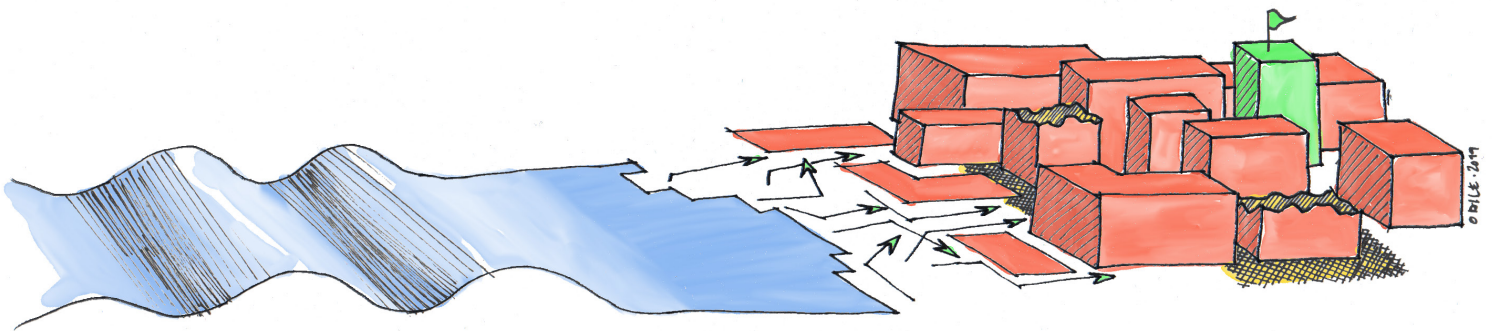
ECOLE DOCTORALE DE GÉOGRAPHIE DE PARIS - ED 434

LABEX DYNAMITE

UMR 8504 GÉOGRAPHIE-CITÉS & UMR 8591 LABORATOIRE DE GÉOGRAPHIE PHYSIQUE

# REPENSER L'ÉVACUATION D'UNE POPULATION LITTORALE EN MILIEU URBAIN DANS UN CONTEXTE MULTI-RISQUES: LE MODÈLE STEP

ODILE PLATTARD



Réalisée sous la direction d'Arnaud BANOS, Directeur de recherche CNRS,  
et de Franck LAVIGNE, Professeur à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne,

Présentée et soutenue publiquement à Paris, le 11 octobre 2019.

Membres du jury :

Dominique BADARIOTTI, Professeur à l'Université de Strasbourg, rapporteur

Bruno BARROCA, Maître de conférence HDR à l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée, rapporteur

Philippe GARNIER, Architecte-Chercheur à l'EA 7444 AE&CC, CRAterre-ENSAG, examinateur

Françoise GOURMELON, Directrice de recherche CNRS à l'UMR 6554 LETG, présidente

Magali REGHEZZA-ZITT, Maitresse de conférence HDR à l'ENS de Paris, examinatrice





---

## REMERCIEMENTS

---

Tel un projet de construction qui est pensé et construit au fil des jours, des mois et des années, la thèse est un chantier que je n'aurais pu mener au bout seule.

Avant toute chose, je souhaite remercier mes directeurs de thèse, Arnaud Banos et Franck Lavigne, qui ont été présents tout au long de ces années et ont été témoins de l'évolution de ce projet de recherche, des esquisses, des plans irréalisables et de ceux qui sont finalement sortis de terre. Je remercie Franck pour ses conseils et son éternel sourire qui redonne de l'énergie. Merci à Arnaud pour les métaphores architecturales ou non, qui ont su me guider (lorsque je voulais bien les entendre), et de m'avoir rappelé sans cesse d'aller vers la simplicité. Comme disait Léonard<sup>1</sup>, *"la simplicité est la sophistication suprême"*.

Comme tout projet de construction qui doit être réceptionné et contrôlé, mes remerciements vont ensuite aux membres du jury, Dominique Badariotti, Bruno Barroca, Philippe Garnier, Françoise Gourmelon et Magali Reghezza-Zitt, qui me font l'honneur d'accepter d'examiner et de discuter mon travail.

Il va sans dire que dans tout chantier un investisseur finance, et ce fut pour moi une chance d'obtenir un contrat doctoral du Labex Dynamite. J'y ai découvert une équipe hors pair grâce à Sophie Bantos, Pauline Renouf, Farouk Temime et Pierre Gandilhon. Toujours prêts à aider les doctorants même lorsqu'il s'agit d'une broutille. Le Labex fut aussi pour moi l'opportunité de rencontrer d'autres chercheurs, notamment grâce au groupe de travail "Dynamiques environnementales et sociales des risques" porté par les trois inséparables Edwige Dubos-Paillard, Malika Madelin et Magali Reghezza-Zitt.

Cette thèse a bénéficié des environnements chaleureux des laboratoires de Géographie Physique de Meudon et Géographie-cités. Je tiens donc respectivement à remercier Daniel

---

1. de Vinci.

Brunstein, Delphine Grancher, Frederic Gob et Marie Cheney pour leur accueil lors de mes passages trop peu nombreux au LGP. Mes remerciements vont également à Véronique Degout, Martine Laborde, Saber Marunouchi, Ludovic Chalonge, Sebastien Haule pour leur soutien logistique indispensable et inestimable.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont apporté par leur présence et nos échanges, leur pierre à l'édifice, je pense plus particulièrement à Ludovic Chalonge qui a su répondre à bon nombre de mes questions et grâce à qui maintenant je connais les outils SIG!, Delphine Grancher pour son énergie et ses conseils qui m'ont fait avancer tout au long de cette thèse. Edwige Dubos-Paillard, Magali Reghezza-Zitt, Samuel Rufat pour leur présence et leurs précieux conseils durant mes présentations. J'ai toujours eu du plaisir à croiser et discuter avec Antoine Fleury, Lena Sanders, Nadine Cattan, Sophie Baudet-Michel, Denise Pumain, Renaud Le Goix dans les couloirs du labo. Les semaines avec les Mapsiens furent également très enrichissantes, merci à eux.

Je n'oublie pas ma maison d'adoption que fut l'UMR Pacte et l'équipe Environnements à la Cité des Territoires à Grenoble. Je me suis sentie soutenue par Elise Beck, Myriam Houssay, Olivier Labussière, Cristina Del Biaggio, Laura Péaud, Sarah Duché. Sonia Charbonnel et Isabelle André-Poyaud m'ont aidée à construire ce projet en mettant tout en œuvre pour que mon modèle STEP tourne au mieux. Merci.

Comme dans tout projet qui sort de terre, il y a des imprévus jusqu'à la dernière levée des réserves de chantier. Cette thèse n'aurait pas vu le jour sans l'amitié et le soutien avec les doctorants et les docteurs, en commençant par les grands : Dimitra, Jean-Baptiste, Marion, Julie FC, Paul, Seb, Brenda, Olivier ; puis les compagnons de doctorat : Julie G, Lucie, Robin, Brenda, Thibault, Dorian, Matthieu, Constance, Annaïg, Ulysse, Anne-Cécile, Paul, Juste, Ryma, Natalia, Eugénia, Chloé, David, Sandy, Flora, Florence, Milan, Romain, Marie ; et les grenoblois : Sebastien, Laetitia, Vanessa, Romain, Lucas, Pierre-Louis, Audrey, Marjolaine, Baptiste, Alice, Edith, Antoine, Florent, Quentin, Lou, Alexia, Julien. Je tiens à remercier plus particulièrement Hélène et Sylvestre pour leur aide dans le nettoyage de mes données ; un grand merci également à ceux qui ont pris le risque de me relire : Julie G., Lucie, Olivier, Brenda, Marion, Julie FC, Seb, Sylvestre.

Ce projet a également été suivi, des plans à la réalisation, par mes amis : Marie et Olivier, Emilie et Pierre, Amandine, Elodie, Anne-Charlotte et Camille, Arnaud et Elodie. Même si ce n'est pas toujours simple de comprendre ce que représente un travail de thèse, je remercie mes parents d'être de solides fondations de m'avoir toujours fait confiance. Et plus largement, je pense à ma famille qui m'a soutenue et plus particulièrement Hélène et les garçons, ainsi que Benoit et les filles, Frédéric, Yves et Laura et les enfants, Jean-Pierre et les filles, Bénédicte et Thierry. Et enfin, je remercie Sylvestre avec qui je construis les fondations pour le plus beau des foyers.

---

## SOMMAIRE

---

<b>Introduction générale</b>	<b>5</b>
<b>Partie 1. Un territoire face aux risques</b>	<b>15</b>
1 Séisme et tsunami : un système d'aléas	21
2 Les sites d'étude	57
3 Le temps de l'évènement	91
Conclusion de la première partie	125
<b>Partie 2. Un système réactif face aux catastrophes</b>	<b>129</b>
4 Un dessin de ville déterminant	133
5 La ville comme espace praticable	161
6 La construction du modèle STEP	189
Conclusion de la seconde partie	222
<b>Partie 3. Influence de l'environnement urbain et du contexte multi- risques dans les résultats issus des scénarios STEP</b>	<b>225</b>
7 La lisibilité du milieu urbain dans le modèle STEP	229
8 La praticabilité des itinéraires d'évacuation en contexte multi- risques dans le modèle STEP	271

## INTRODUCTION GENERALE

Conclusion de la troisième partie	302
Conclusion générale	305
Annexes	313
Références bibliographiques	375
Table des figures	388
Liste des tableaux	401
Table des matières	409

---

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Ce travail de recherche s'est construit au fil des années et au fil des flots qui m'ont emmenée sur des mers parfois agitées, parfois calmes. Depuis l'école d'architecture jusqu'à une thèse en géographie en passant par des agences d'architecture françaises et japonaises, mon parcours a suivi un cap solide mais autorisant les explorations. Cette thèse arrive à point nommé dans un parcours sinueux depuis ma sortie de l'école d'architecture en 2009. Après 4 ans de travail en agence d'architecture à Paris à réaliser principalement des bâtiments tertiaires, je décide, début 2011, de partir au Japon pour découvrir une architecture différente. J'ai un permis vacances-travail, j'ai un contrat chez un architecte tokyoite pour un an, je suis prête.

11 mars 2011.

Le grand tremblement de terre et tsunami du Tohoku survient et le pays est sous le choc. Les chantiers sont à l'arrêt, mon contrat est annulé, tout est recentré autour de la région sinistrée. Je décide cependant de partir durant l'été 2011 et de débiter par un stage dans une agence au nord d'Hokkaido. Durant cette expérience japonaise, je réalise que l'architecte a son rôle à jouer dans le domaine des risques majeurs à travers la garantie d'un toit pour chacun et l'intégration des risques dans la construction. C'est le début de mon cheminement dans le domaine des risques et, à mon retour en France, j'entreprends de me spécialiser en architecture et risques majeurs. Cette formation me permet d'aborder la prévention, la reconstruction, les différents risques avec leurs modes de construction adaptés. A l'issue de cette spécialisation, je réalise une mise en situation professionnelle de 6 mois au Ministère du développement durable, au sein du Bureau de l'information préventive à la Direction générale de la Prévention des risques, afin de connaître la pratique institutionnelle de la prévention des risques en France<sup>2</sup>. C'est à ce moment là, en mars 2014, que cette thèse s'annonce à travers l'appel à candidature pour un contrat doctoral du Labex Dynamite, alors que je suis sur le point de repartir au Japon pour réaliser des vidéos sur la

---

2. L'architecte devant souvent appliquer la réglementation dans ses projets, ma curiosité m'a amenée à vouloir connaître la construction de cette réglementation et la façon de travailler de l'administration centrale.

prévention des risques<sup>3</sup>. C'est donc la veille de mon départ pour le Japon que je rencontre Arnaud Banos et que je décide de construire un projet de recherche qui me permettra d'intégrer des éléments liés à mon expérience d'architecte, à mon attachement au Japon et à la prise en compte des risques majeurs dans la prévention, la construction et la reconstruction dans ce pays, tout en plongeant pleinement dans la géographie et le monde de la simulation.

### **Un territoire urbanisé exposé au risque de tsunami**

Au départ, la question de recherche est posée autour de la définition de stratégies d'évacuation d'une population littorale en cas de tsunami par une approche de modélisation. Le sujet est orienté sur l'aide à la mise en place de stratégies d'évacuation sur un territoire littoral, à travers une approche par modélisation multi-agents. Cette question évolue au fur et à mesure de l'appropriation du sujet de recherche.

Tout d'abord, la considération d'une population littorale permet d'aborder les questions de la vulnérabilité face à un événement majeur ainsi que des enjeux que représentent les littoraux urbanisés. L'exposition des territoires est une question centrale de la prévention et gestion des risques (Dauphiné et Provitolo, 2013; Djament-Tran et Reghezza-Zitt, 2012). La vulnérabilité d'un territoire va se traduire par l'exposition des enjeux économiques, matériels et de population à un aléa. Les littoraux regroupent plusieurs enjeux liés à l'urbanisation et au tourisme. De plus, la population présente sur ces littoraux n'est pas toujours au courant de l'exposition au risque de tsunami ou de tremblement de terre du territoire où elle se trouve. Néanmoins, des dispositifs d'alerte, de prévention ou de protection existent sur certains littoraux mais les aléas sont souvent pris en compte séparément.

Ce sujet de recherche s'articule autour d'un aléa tsunami qui est souvent méconnu et qui impacte un territoire littoral. Les derniers tsunamis survenus dans le monde, comme celui en Indonésie en 2004 et celui au Japon en 2011, ont permis de connaître davantage l'impact du tsunami sur un territoire du point de vue matériel, économique et sociologique (Lavigne et Paris, 2011). Un tsunami est un événement majeur impactant un large territoire par son inondation. Il est engendré par un événement source qui provoque un changement brutal du plancher sous-marin. Le séisme est le principal événement source de tsunami (dans 90% des cas)((NGDC/WDS)/NOAA, 2016a). Cette particularité du tsunami questionne sur la considération des aléas précurseurs, et notamment les séismes. Ces derniers ont un impact important sur les constructions et une évacuation en milieu urbain est donc confrontée à des problématiques d'endommagement du bâti.

Ensuite, la méthode proposée est la modélisation multi-agents. L'approche agents permet de "recréer des systèmes réels composés d'éléments interconnectés ayant chacun sa

---

3. Vidéos réalisées en partenariat avec le Ministère du développement durable et Sciences Frontières. Diffusion sur Aléas.tv : *Vivre en zone à risque : L'exemple du Japon et A la découverte du modèle de Hamamatsu pour la prévention des risques !*



propre dynamique" (Haggett, 1965). C'est le cas d'un modèle d'évacuation qui intègre différents niveaux et dynamiques. De plus, l'approche par modélisation multi-agents est adaptable en fonction du contexte, des connaissances du système réel et de la question posée (Banos *et al.*, 2015). L'intérêt de l'approche par agents a déjà été prouvé dans le domaine des risques majeurs avec plusieurs travaux réalisés sur les problématiques d'évacuation de population face à un tsunami (Imamura *et al.*, 2012; Mas *et al.*, 2012c, 2015; Nguyen *et al.*, 2012; Sahal, 2011). Sur le même sujet de l'évacuation en cas de tsunami, la modélisation agents permet l'implémentation de modèles aussi divers que les sites concernés et problématiques étudiées.

Enfin, les sites d'étude de cette recherche sont localisés sur le littoral méditerranéen. Le bassin méditerranéen est le second bassin océanique exposé au tsunami dans le monde ((NGDC/WDS)/NOAA, 2016a). C'est dans ce contexte que s'inscrit le programme de recherche Astarte (Assessment, STrategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe)<sup>4</sup> qui étudie le risque de tsunami en Europe et Méditerranée à travers neuf sites d'étude. Plusieurs aspects sont abordés de l'aléa, de l'exposition, de la préparation et la connaissance de la population qui serviront de base de données pour cette thèse (Tinti, 2015; Dogulu *et al.*, 2014; Lavigne, 2016, 2014; Gailler *et al.*, 2016). Les deux sites d'étude choisis font partie des neuf sites d'étude d'Astarte. Le premier site est celui de la région niçoise qui fut recentré sur le bord de mer de Saint-Laurent-du-Var (France). Ce choix permet d'avoir un accès aux données déjà disponibles de terrain, d'enquêtes et de modélisation du tsunami par le CEA. Afin de s'inscrire dans une approche comparative de sites d'étude, Syracuse (Italie) est le second site choisi. Une volonté de se confronter à des configurations de territoires et de comportements différents a guidé le choix de ce second site.

Les deux sites ont une morphologie de l'espace urbain et une exposition aux risques de séisme et de tsunami différentes. Le site de Saint-Laurent-du-Var dispose d'une bande de front de mer exposée à l'inondation. Cependant, l'inondation n'est pas d'une très grande hauteur dans la zone urbanisée et la mise à l'abri des personnes semble pouvoir suivre un itinéraire rapide. La commune de Syracuse pose des problématiques axées davantage sur le milieu urbain. En effet, la ville est divisée entre l'île d'Ortigia et l'île sicilienne et la zone de jonction est submergée en cas de tsunami. De plus, la hauteur d'inondation envisagée est plus importante que sur le site français. Il ne s'agit pas pour ce site d'une problématique d'évacuation de plage vers l'intérieur des terres urbanisées, mais d'une inondation sur un territoire d'urbanisation dense.

## **L'environnement urbain, élément constitutif des problématiques et du modèle STEP**

L'objectif de cette thèse est d'amener des éléments pour repenser les stratégies d'évacuations piétonnes en cas de tsunami selon une approche par la modélisation et en prenant

---

4. Projet européen Astarte. 2013-2016, <http://www.astarte-project.eu/>

## INTRODUCTION GENERALE

en compte le contexte urbain et le risque sismique à travers ses conséquences sur l'environnement construit. L'environnement urbain devient donc ici l'élément central de l'évacuation et de cette recherche, en sortant de l'approche de mise en place de stratégie d'évacuation par chemin le plus court en distance/temps entre le point de départ de la personne à évacuer et la zone refuge. La question qui est posée est celle de l'influence du milieu urbain lors de la mise à l'abri des personnes à travers la visibilité des zones refuge et la praticabilité de l'espace urbain tout au long de l'itinéraire jusqu'aux zones refuge.

Deux problématiques découlent de cette question.

L'espace urbain est notamment constitué de constructions. Ces dernières peuvent avoir un effet d'obstacles pour la vue d'une personne en empêchant de voir ce qu'il y a derrière, un relief en pente, une zone refuge... Cet effet est visible depuis la plage de Saint-Laurent-du-Var qui a un front de mer très urbanisé. Ce constat mène à la question de l'influence de la perspective de vue dans le déplacement piéton en s'appuyant sur les travaux de syntaxe spatiale (*Space Syntax*) (Hillier *et al.*, 1976; Hillier et Hanson, 1984; Hillier *et al.*, 1993; Hillier et Iida, 2005; Hillier et Vaughan, 2007; Hillier, 2007; Stonor, 2011). La syntaxe spatiale aborde le déplacement urbain à travers des notions de perspectives et de *simplicité* du chemin pour un piéton. Il s'agit donc ici de remettre en question des itinéraires par le plus court chemin distance/temps qui est souvent utilisé pour les plans d'évacuation liés à un risque majeur. Ceci rejoint les problématiques abordées dans les travaux de Lynch (1960) qui place des éléments marqueurs dans le paysage urbain qui vont influencer les déplacements piétons. Les cartes mentales réalisées sur les terrains d'étude<sup>5</sup> et montrant le souhait d'itinéraire d'évacuation des personnes interrogées viennent en appui pour déterminer l'influence qu'aura l'environnement urbain sur les choix de cheminement piéton ? Quelle lisibilité est offerte en milieu urbain à un piéton en train d'évacuer ? Cela influencera-t-il la mise en sécurité et l'arrivée jusqu'à une zone refuge ?

La seconde problématique est apparue après un constat fait sur le terrain à Syracuse : Les plans d'évacuations prennent en compte un seul risque, soit le séisme, soit le tsunami ; c'est le cas à Syracuse où des plans d'évacuation mis en place par la Protection Civile ne prennent en compte que le risque sismique, tandis que des plans mis en place dans le cadre d'Astarte ne prennent en compte que le risque de tsunami (Lavigne, 2016). Or, le tsunami n'est pas un aléa qui survient seul et, dans le cas de Syracuse (Tinti, 2015; Locati *et al.*, 2016), les événements de références ont un séisme précurseur au tsunami. L'environnement urbain apporte ici une nouvelle problématique via les constructions. Celles-ci deviennent un danger pour les piétons lors d'un tremblement de terre par les dommages qu'il peut engendrer (Zacek, 1996) ; le séisme peut endommager les constructions jusqu'à leur effondrement partiel ou total, amenant des débris sur l'espace de voiries. Outre le danger que représente la chute des débris, ils peuvent s'amonceler en obstruer les rues ce qui pourra empêcher le cheminement des personnes. Il est donc important de diagnostiquer la vulnérabilité sismique des constructions sur un territoire afin de définir une probabilité de d'effondrement

---

5. issues des enquêtes de terrains réalisées auprès des populations dans le cadre d'Astarte par le Laboratoire de Géographie Physique de Meudon.

partiel ou total en fonction de l'intensité sismique. On interroge donc l'accessibilité aux zones refuge dans un tel contexte ; cet accès est-il garanti en cas de séisme précurseur à un tsunami ? Quelle praticabilité des itinéraires pour une évacuation en milieu urbain dans ce contexte multi-risques (séisme et tsunami) ?

Grâce à l'outil adaptatif qu'est la modélisation, il est possible d'intégrer au mieux ces questionnements et les particularités liées aux sites d'étude. Le modèle STEP (Séisme Tsunami Evacuation Population), est réalisé sur le site de Saint-Laurent-du-Var. STEP est un modèle hybride alliant l'utilisation de systèmes d'informations géographiques (SIG), d'automates cellulaires et de multi-agents. Cette modélisation a comme objectif d'intégrer différentes échelles entre le territoire, les aléas et la population.

L'environnement du modèle est implémenté par les données SIG du terrain et du bâti. Les données du tsunami sont basées sur les scénarios de simulation réalisés par le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) (Gailler *et al.*, 2013, 2016) ; cela permet d'intégrer au modèle l'intensité du tsunami correspondant à un scénario de référence. La population est implémentée en se basant sur les travaux de simulation d'évacuation et sur les données issues des enquêtes de terrain. Les zones refuge sont situées en fonction du terrain et des résultats des cartes mentales issues des enquêtes de terrain.

Enfin, la notion de visibilité de l'espace urbain est implémentée via la construction de zones de non-visibilité des zones refuge et de paramètres liés à la vision des agents. De plus, l'idée de la praticabilité du réseau de voirie pendant l'itinéraire est intégrée au modèle STEP via un séisme précurseur générant un effondrement de certaines constructions. Cet effondrement apportera des débris au sol pouvant empêcher le passage des agents.

L'étude de Saint-laurent-du-Var et de Syracuse permet d'aborder des territoires aux configurations différentes d'évacuation de population en cas de tsunami. L'approche comparative voulue au départ s'est transformée davantage en dialogue entre les deux sites. Dans cette thèse, l'implémentation du modèle STEP concerne le site de Saint-laurent-du-Var mais intègre également le travail de terrain effectué à Syracuse. En effet, le modèle STEP est implémenté en premier sur le site de Saint-Laurent-du-Var grâce à l'accès aux données géographiques, d'enquêtes et de modélisation de tsunami disponibles dès le début de la thèse. Le risque sismique est plus faible qu'à Syracuse et a des conséquences minimales sur les constructions. Un travail de terrain est donc effectué à Syracuse concernant majoritairement le déplacement piéton et la vulnérabilité sismique des constructions. La probabilité d'effondrement du bâti construite à partir des données issues du diagnostic de terrain de Syracuse, est implémentée dans le modèle STEP de Saint-Laurent-du-Var. Bien que fictive sur ce site, l'implémentation de cette variable permet sa prise en compte dans les scénarios et d'observer les effets de sa prise en compte sur les résultats de l'évacuation des personnes.

De plus, la prise en compte de cette variable sur un autre site que celui à partir duquel elle a été construite aborde la question de l'adaptabilité du modèle STEP sur différents

sites d'étude. Bien qu'issu de terrain différent, le modèle STEP permet la mise en dialogue des différentes problématiques en les adaptant à un autre contexte.

### **Amener le lecteur à se confronter au risque**

Pour finir, j'ai voulu, dans cette thèse, offrir au lecteur – qu'il soit architecte, géographe, modélisateur ou simplement curieux de ce sujet – une base de compréhension des différents aspects entrant en jeu. Tout comme le modèle STEP, cette thèse vise à être transversale aux disciplines sollicitées et pédagogique. Cette thèse est construite en trois parties permettant de donner des bases de compréhension des différents enjeux développés durant ce travail de recherche.

La première partie permet d'identifier et de comprendre les différents éléments constitutifs d'un territoire littoral dans la situation d'une évacuation piétonne face à un tsunami avec séisme précurseur.

Le premier de ces éléments est l'aléa survenant sur ce territoire. Le chapitre 1 permet donc de définir ce qu'est un tsunami et ses sources, avec une focalisation sur le séisme puisqu'il s'agit de l'aléa pris en compte pour la suite de cette thèse. Il détaille les impacts respectifs de ces deux risques sur un territoire exposé, ainsi que leurs impacts combinés.

Le second élément à définir est le territoire exposé aux séisme et tsunami. Il s'agit donc, dans le chapitre 2, de présenter les deux sites d'étude : Saint-Laurent-du-Var (France) et Syracuse (Italie). Ce chapitre permet de détailler les enjeux matériels, ainsi que les résultats des enquêtes de terrain présentant des informations sur la population présente sur ces deux sites. Enfin, leur exposition aux risques et les événements passés sont détaillés afin de déterminer les scénarios d'événements de références qui seront pris en compte pour les scénarios du modèle.

Le troisième élément est celui de l'évacuation de la population du territoire exposé. Le chapitre 3 expose les différents moyens de prévention et de protection face au tsunami. Les différentes stratégies d'évacuation possibles en fonction des territoires sont détaillées ; et pour finir, cela est mis en relation avec les mesures déjà présentes sur les sites d'étude, et plus spécifiquement sur les plans d'évacuation de Syracuse qui ne prennent en compte qu'un seul aléa et qui présentent des consignes d'évacuation contradictoires.

La seconde partie permet d'exposer la construction des deux problématiques liées à l'environnement urbain – la lisibilité – et au contexte multi-risques – la praticabilité – jusqu'à la mise en place du modèle STEP.

Le chapitre 4 place la notion de la lisibilité de l'espace urbain au regard des travaux existants, au travers de la remise en cause d'une évacuation par un plus court chemin distance/temps et en posant la question de l'influence de l'environnement urbain sur le choix de l'itinéraire piéton durant une évacuation. Ce chapitre pose les jalons de la construction d'une variable de lisibilité dans le modèle STEP.

La seconde problématique liée à la praticabilité de l'espace urbain est abordée dans le chapitre 5. Une probabilité d'effondrement partiel ou total remettant en cause la circulation des personnes vers les zones refuge a été construite à travers un travail de diagnostic de vulnérabilité sismique des bâtiments réalisés à Syracuse. Ce constat d'inaccessibilité en cas de séisme des zones refuge identifiées pour l'évacuation en cas de tsunami, confirme l'importance de la prise en compte du contexte multi-risques dans le modèle. Ce chapitre pose les jalons de la construction d'une variable de praticabilité de l'espace urbain en cas de séisme dans le modèle STEP.

Enfin, la mise en place du modèle STEP est détaillée dans le chapitre 6. La définition du modèle STEP à travers l'état des lieux de la modélisation dans le domaine des risques majeurs est proposée. Il s'agit d'un modèle hybride alliant automates cellulaires et systèmes multi-agents et permettant de jouer entre les échelles de modélisation. Ce chapitre permet de revenir sur les différents éléments implémentés dans le modèle.

Enfin, s'appuyant sur cet appareillage théorique et méthodologique, la troisième partie s'attache à la simulation des différents scénarios STEP et à la discussion des résultats de sortie du modèle. Ces résultats sont discutés séparément pour chaque problématique – visibilité et praticabilité – afin de mettre en avant l'influence de la prise en compte de ces deux questions dans l'évacuation d'une population face à un tsunami et un séisme en milieu urbain.

Le chapitre 7 traite des résultats issus des scénarios permettant de comparer l'influence du milieu urbain sur la visibilité durant l'évacuation. Pour cela, les paramètres liés à la visibilité des agents varient ; tous ces scénarios sont sans prise en compte du contexte sismique afin d'isoler les effets de la variable concernée. Les résultats sont analysés sous différentes formes graphiques et permettent de discuter les effets liés au paramétrage ou bien au site d'étude.

Le chapitre 8 propose une analyse des résultats issus des scénarios permettant de mettre en avant l'influence de la prise en compte d'un contexte multi-risques sur les résultats. Dans un souci d'isoler chaque variable pour voir son effet sur les résultats, la variable de visibilité est ne varie pas. Les résultats discutés permettent de rendre compte de l'influence de la prise en compte du séisme précurseur au tsunami sur l'évacuation.

## INTRODUCTION GENERALE



FIGURE 1 – Strip Calvin et Hobbes. Traduction : – Voici une belle ville, pleine d'heureux habitants prospères. – Ils s'occupent de leurs affaires, **inconscients** que la Lune se soit mystérieusement rapprochée de quelques miles de la Terre. – Inconscients de ça, jusqu'à ce que la marée arrive.

Sources : Watterson, B., 1er août 1987.





---

## PARTIE 1. UN TERRITOIRE FACE AUX RISQUES

---

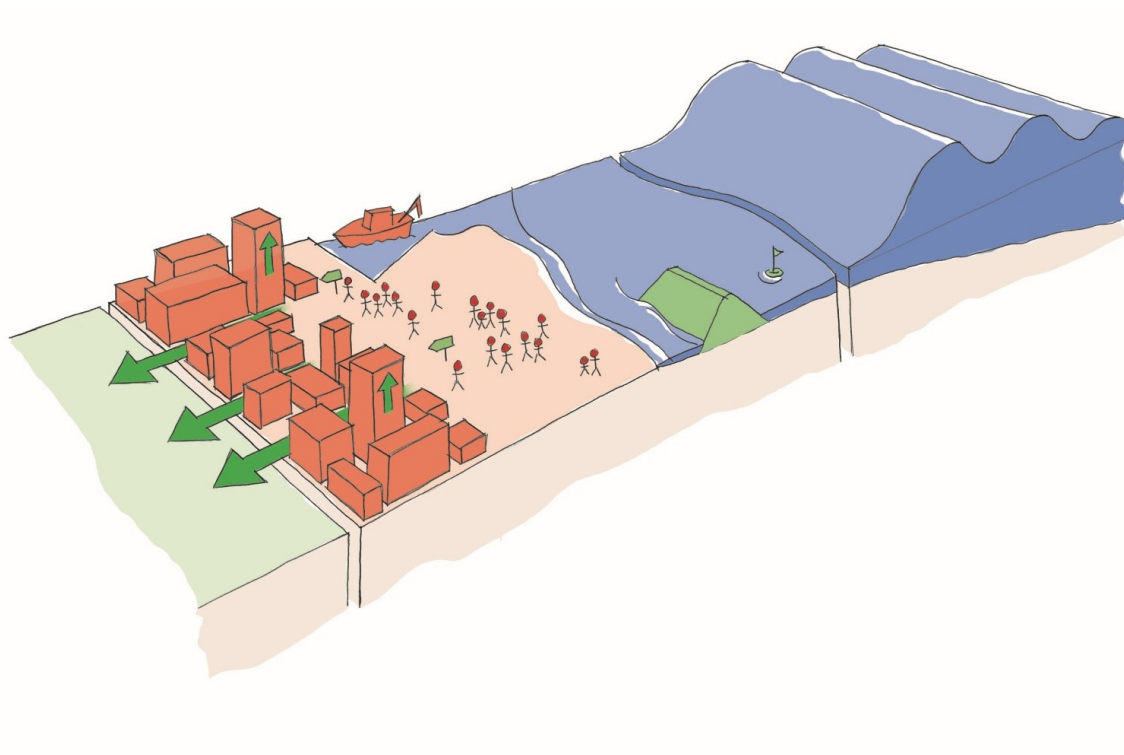


FIGURE 2 – Un territoire urbanisé face au risque tsunami.  
Réalisation : Plattard, O., 2015.

Qui n'a jamais apprécié se retrouver face à l'océan ?

Plonger ses yeux dans le fracassement des vagues contre les rochers et les falaises, se demandant qu'elle vague passera par dessus ce rocher faisant des jeux d'embruns, entendre le bruit des vagues qui viennent s'échouer sur la plage entraînant le crépitement du sable....

Cette admiration et ce jeu de l'homme face à l'océan fait très souvent oublier que de l'océan un danger peut survenir. Chaque territoire côtier offre un rapport à l'océan différent de par sa morphologie et son urbanisation. Dans cette thèse, la région littorale exposée au risque de tsunami subit potentiellement un tremblement de terre précurseur. Tout le territoire peut être touché par le séisme. En revanche, le tsunami étant composé d'une série de vagues, il a une vitesse, un délai d'arrivée et une hauteur d'inondation qui permettent de déterminer la zone de danger et la zone à évacuer (en rouge sur la figure 2). Des enjeux sont présents dans cette zone, qui peuvent être construits, économiques... Cependant, des dispositifs de prévention et d'information peuvent exister comme des dispositifs d'alerte, des plans d'évacuation, des indications d'itinéraires ou des ouvrages de prévention. Enfin, une population est présente sur ce territoire littoral et va devoir évacuer face au tsunami (Figure 2). Pour cela, plusieurs stratégies sont envisageables pour se mettre en sécurité.

Il s'agit ici de vulnérabilité d'une population et d'un territoire littoral, de son exposition au risque, de sa capacité de réponse – à travers son comportement, mais également avec toutes les mesures de protection du territoire littoral – et de son adaptation face à la menace d'un événement majeur. Il semble important de placer un cadre terminologique puisque, dans cette thèse, je ne souhaite pas aborder la notion de résilience. En effet, ce terme par sa préconisation de retour à la normale après un choc nécessite un état "normal", mais surtout nécessite une référence à une crise. Or, comme le précise Rufat S. (dans Djament-Tran et Reghezza-Zitt (2012), p203), *"la vulnérabilité est une propriété indépendante des aléas et des crises et qu'elle peut être étudiée dans une logique de prévention des catastrophes."* Cette idée de la vulnérabilité comme moteur dans la prévention des risques par la capacité qu'elle amène à analyser les dysfonctionnements et faiblesses d'un territoire, semble correspondre totalement à l'intention de ce sujet de recherche, ancré dans la réduction de la vulnérabilité par l'approche de l'évacuation d'une population littorale. De plus, si le risque est avant tout le produit d'une rencontre entre un aléa et une société, *"il n'existe pas de société, de ville ou de territoire invulnérable."* (Djament-Tran et Reghezza-Zitt (2012), p206).

Connaitre le fonctionnement des aléas, dans cette recherche, le tsunami avec potentiellement un séisme précurseur ressenti sur la zone concernée, permet de mieux cerner les problématiques liées à une évacuation des populations littorales en cas de catastrophe.

Les vagues de tsunami sont engendrées par un aléa source qui peut être un glissement de terrain, une éruption volcanique ou encore, dans la très grande majorité des cas (environ 90%), un tremblement de terre (IOC-UNESCO, 2013). Les secousses sismiques peuvent venir impacter la zone qui est ensuite inondée par le tsunami. Sur un territoire urbanisé, les dommages et la fragilisation des constructions par le séisme peuvent être non négligeables (Zacek, 1996; Balandier, 2004), pouvant aller de quelques débris à la destruction totale de l'édifice. Ces dommages peuvent être d'autant plus forts lorsque l'on s'intéresse plus en détail aux effets combinés des deux aléas. En effet, les constructions sont la première cause de danger pour les populations en cas de séisme (Zacek, 2004). Leur effondrement partiel ou total peut impacter la sécurité des personnes; ainsi que la fragilisation de leurs fondations par les secousses sismiques entraînent une amplification des effets du tsunami lorsque celui-ci arrive sur la côte (Supparsi *et al.*, 2012a).

Comprendre les mécanismes et impacts combinés des séismes et tsunamis, permet de mettre en avant l'importance de la prise en compte de ces deux aléas dans la mise en place de stratégies d'évacuation. Un aléa ne devenant un risque que parce qu'il est face à une entité vulnérable (Veyret, 2003), dans cette recherche, le contexte urbain et la population sont sources de vulnérabilité. De plus, la mise en contexte dans les sites d'étude apporte des éléments quant aux impacts probables et à la définition des zones de danger et des scénarios envisagés.

Deux sites d'étude ont été choisis pour cette thèse parmi les neuf sites d'étude du programme européen Astarte<sup>6</sup> Ce programme vise la réduction du risque de tsunami en Europe et Méditerranée. Cette mer n'est en effet pas épargnée par les vagues meurtrières, puisqu'elle constitue le deuxième bassin océanique générateur de tsunami<sup>7</sup>. Les sites d'étude choisis sont Saint-Laurent-du-Var en France et Syracuse en Sicile, Italie. Il s'agit de deux communes littorales touristiques aux caractéristiques morphologiques d'exposition à l'évènement bien différentes.

Saint-Laurent-du-Var, séparé de Nice par l'embouchure du Var et l'aéroport, dispose d'un front de mer très urbanisé et privatisé, bordé à l'Ouest par le port et à l'Est par le centre commercial Cap3000, situé en zone inondable. La plage et cette frange littorale sont les zones à évacuer en cas de tsunami.

Syracuse se divise en deux parties. La première est l'île d'Ortigia, piton rocheux originel de la cité d'Archimède; la seconde est la partie "continentale" sur l'île de la Sicile qui correspond à l'extension de la ville suite à la réunification italienne du milieu du XIXème siècle. Le point névralgique en cas de tsunami est constitué par la zone de jonction entre l'île d'Ortigia et la rive sicilienne constituée de deux ponts entourés du port.

Afin de dresser un état des lieux complet du contexte de ces deux communes, les résultats des questionnaires réalisés sur place dans le cadre du programme Astarte sont pris

6. Astarte : Assessment, Strategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe. <http://www.astarte-project.eu/>

7. (Sahal, 2011) d'après les données NOAA, cartographies et données évènements sources de tsunamis avérés de -2000 à 2011 et recentrées sur la période de 1840 à 2011.

en compte (Lavigne, 2014). Ces enquêtes (400 pour la région niçoise et 148 pour Syracuse) traitent de la connaissance du risque de tsunami en général et sur les sites d'étude, de l'information des risques présents sur le territoire, ainsi que du comportement vis-à-vis de l'alerte et de l'évacuation des personnes interrogées.

Ces deux sites sont exposés au risque de tsunami issu de glissements de terrain proches et de tremblements de terre proches ou lointains. Cette distinction a son importance dans la détermination de l'intensité des vagues, leurs impacts sur le littoral générant divers scénarios d'évacuation. Pour définir ces scénarios envisagés, les événements passés qui ont marqué ces littoraux sont pris en compte et modélisés. La connaissance de toutes ces caractéristiques spécifiques à chaque site d'étude concernant le terrain, la population et les événements permettent l'émergence de problématiques propres à leur environnement urbain, ainsi que la mise en place des scénarios de modélisation.

Une fois que l'on a connaissance des aléas et de leurs impacts potentiels, il est possible de veiller à les réduire ou les absorber (Veyret, 2003). Il s'agit, sur les sites d'étude, de se protéger, c'est à dire, veiller, alerter, informer et mettre en place des mesures de protection.

Il existe aujourd'hui un système de veille des tsunamis à l'échelle mondiale dépendant de l'Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC). Il s'agit d'un réseau régional de veille des bassins océaniques qui permet d'alerter les Etats concernés par l'arrivée d'un tsunami (IOC-UNESCO, 2013). De plus, il existe également des mesures d'alerte, de protection et d'information adaptées à chaque territoire. Ces mesures veillent à réduire la vulnérabilité du territoire urbanisé et de la population face à l'aléa.

Il est important de définir ce qu'est une évacuation et quelle stratégie est adaptée à chaque territoire, ainsi que d'avoir conscience des possibilités de réduction de l'impact des tsunamis par la mise en place de mesures. En effet, en terme d'évacuation, le choix des zones refuge est déterminant et doit s'inscrire dans une démarche globale de mise à l'abri en fonction de la topographie du site et du mode de transport utilisé. Une évacuation piétonne est ici privilégiée. La mise en place de ces stratégies à l'échelle urbaine pose la question de la prise en compte de l'aléa dans l'aménagement urbain, ainsi que de la stratégie de gestion des risques qui peut être de "lutter contre" ou bien d'accepter et d'intégrer le risque.

Certaines mesures sont déjà visibles sur les sites d'étude, cependant, peu ou aucune ne concernent les tsunamis. Un seul document d'information préventive à destination des citoyens est présent à Saint-Laurent-du-Var, mais ne prend pas en compte le risque de tsunami. Néanmoins, en France, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) se charge d'alerter les régions littorales de l'imminence d'un tsunami. En ce qui concerne Syracuse, la Protection Civile Italienne est responsable de la prévention et de la gestion de la catastrophe. Il existe des plans d'évacuation dans la ville mais ils ne concernent que le risque de séisme.

Les dommages combinés des tremblements de terre et tsunami interviennent dans des contextes à enjeux d'urbanisation et de population identifiés que sont Saint-Laurent-du-

Var et Syracuse et nécessitent une stratégie d'évacuation adaptée (Figure 2). Cette volonté de traiter l'évacuation dans un contexte multi-risques apporte de nouvelles problématiques quant à l'influence de l'urbanisation et des structures bâties dans le déroulement d'une évacuation de la population face au tsunami.

SOMMAIRE



# CHAPITRE 1

---

## SÉISME ET TSUNAMI : UN SYSTÈME D'ALÉAS

---

Le risque de tsunami est très connu au Japon et est même représenté dans les films d'animations (Figure 1.1). Cette connaissance des aléas et de leur impact sur un territoire permet au japonais d'adopter un comportement adapté au maximum à la situation. Le 11 mars 2011, un séisme suivi d'un tsunami frappe la côte Est du Japon. La majorité des dommages sont liés au tsunami exceptionnellement important qui est venu toucher un territoire ayant déjà été impacté et fragilisé par un tremblement de terre. Quels dommages auraient été à déplorer au Japon, le 11 mars 2011, si la côte du Tohoku n'avait été touchée que par un tsunami sans le tremblement de terre, et inversement ?

L'impact sur le territoire aurait été sûrement différent sans la fragilisation des infrastructures et constructions par le séisme dans un premier temps, qui furent ensuite touchées par les vagues, augmentant considérablement les dommages. De plus, la population ayant ressenti la forte secousse est plus à même de recevoir l'alerte de l'arrivée du tsunami et de se mettre à l'abri, contrairement à ce qui s'est déroulé lors du tsunami du 26 décembre 2004 en Indonésie. La connaissance de ces aléas est un point important pour la perception du danger qui arrive. A l'image de la population japonaise qui est consciente des risques présents sur son territoire et qui tente de les garder en mémoire, ainsi que des dessins animés intégrant les aléas comme faisant partie du quotidien (Figure 1.1).

Le tsunami ne peut être dissocié de ses aléas sources comme les tremblements de terre ou les glissements de terrain. Ce chapitre pose les jalons théoriques de cette recherche en décortiquant le fonctionnement des aléas séisme et tsunami. Le tremblement de terre peut, en fonction de certaines caractéristiques de situation et de magnitude, se révéler tsunamigène. Il est d'ailleurs le principal évènement générant un tsunami devant les éruptions volcaniques et les glissements de terrain ((NGDC/WDS)/NOAA, 2016a).

De plus, un lien étroit existe entre les séismes et les tsunamis, car leurs effets sur

# CHAPITRE 1. SÉISME ET TSUNAMI : UN SYSTÈME D'ALÉAS

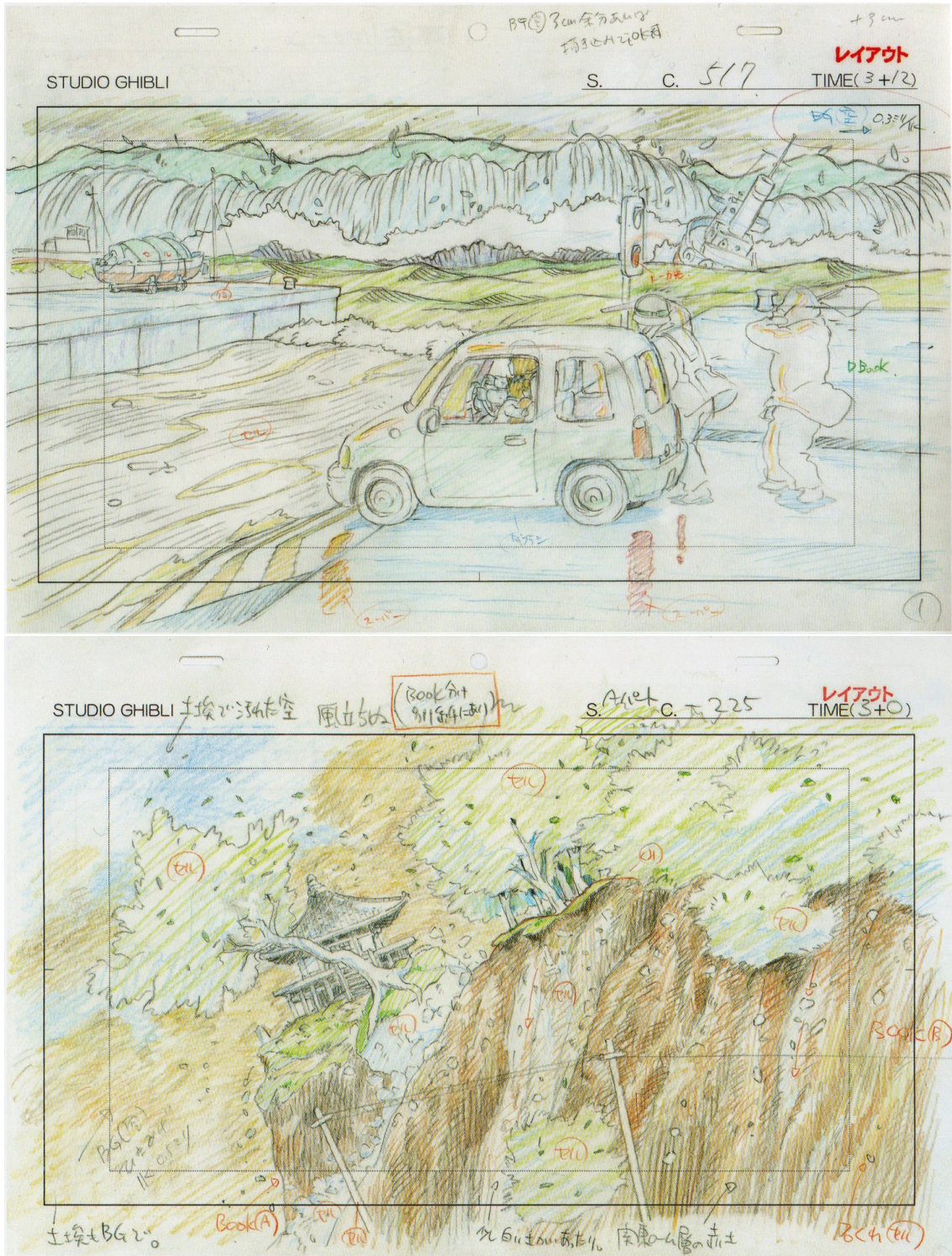


FIGURE 1.1 – *Layouts* du studio Ghibli -Hayao Miyazaki- mettant en scène un tsunami et un tremblement de terre.

Sources : Hayao Miyazaki (de haut en bas) : Ponyo sur la falaise, 2008 et Le vent se lève, 2013.

un territoire urbanisé peuvent être interdépendants. Le tremblement de terre affaibli les structures et modifie les sols et sous-sols, l'arrivée de l'eau avec le tsunami a un effet

combiné, créant des dommages d'autant plus importants. Il est donc primordial d'avoir connaissance des effets des aléas séisme et tsunami; et de les comprendre de manière combinée pour évaluer la vulnérabilité territoriale des littoraux urbanisés. Les impacts des tremblements de terre sur un territoire sont importants puisqu'ils peuvent endommager des constructions. Cela peut avoir un effet déterminant sur l'évacuation des piétons, car les débris des constructions peuvent remettre en cause la sécurité et le déplacement en espace urbanisé.

Ce chapitre vise à dresser l'état des lieux du fonctionnement des aléas séisme et tsunami et de leurs impacts sur un territoire littoral urbanisé. Il est donc question, dans un premier temps, du fonctionnement d'un tsunami et des causes de la survenance d'un tel évènement. Puis, nous nous attarderons plus spécifiquement sur les séismes<sup>1</sup>, principaux générateurs de tsunamis, avant de préciser les dommages de ces deux aléas sur un territoire littoral urbanisé.

---

1. Un ouvrage de référence en conception parasismique à l'usage des architectes est utilisé comme citation principale pour les éléments concernant le séisme et les constructions face au séisme. L'ouvrage de Zacek (1996) a été réalisé par un architecte et ingénieur en parasismique et permet d'appréhender les différents aspects de la construction parasismique.

## 1.1 Le tsunami

Le terme tsunami vient du japonais *tsu* (le port) et *nami* (la vague), et signifie littéralement la « vague portuaire ». Ce nom fut donné par les pêcheurs japonais qui, revenant au port après une sortie en pleine mer, retrouvaient ce dernier dévasté bien que n'ayant vu aucun signe de houle au large. Ils pensent donc à un phénomène de vagues se créant dans les ports. Les ondes de tsunami se créent pourtant bien au large, mais y sont imperceptibles au milieu des vagues de houle. Le terme tsunami, est devenu l'appellation officielle de ce phénomène en 1963, et remplace, notamment en France, le terme raz-de-marée. En effet, ce dernier semble faire faussement référence à un phénomène de marée, alors qu'il s'agit bien d'un phénomène de propagation d'onde suite à une modification brutale du plancher sous-marin.

Le tsunami est un aléa encore assez méconnu par la population, et notamment en France. Cependant, le tsunami du 26 décembre 2004 dans l'océan Indien a permis la connaissance de cet aléa et une prise de conscience autour de ce danger survenant de l'océan, renforcées par l'évènement du 11 mars 2011, au Japon. Beaucoup d'imaginaire et de fausses idées tournent autour de ce phénomène aux caractéristiques très spécifique.

### 1.1.1 L'aléa et ses caractéristiques

Le tsunami est souvent confondu avec la houle qui est d'origine météorologique. Or, une définition proposée par IOC-UNESCO (2013) est qu'un tsunami est un phénomène non-climatique qui correspond à un ensemble de vagues de grandes longueurs d'ondes et de périodes, engendrées par un évènement source résultant d'un déplacement ou d'une modification brutale et verticale du plancher sous-marin ou littoral.

D'un côté, la houle résulte d'un phénomène éolien et reste surfacique avec une longueur d'onde en pleine mer de quelques dizaines à quelques centaines de mètres (Roger, 2012) ; d'un autre côté, le tsunami est indépendant des phénomènes météorologiques, sa période est grande et peut aller de quelques minutes à une heure, son onde gravitaire concerne la totalité de la profondeur d'eau et il a une longueur d'onde de plusieurs centaines de kilomètres en pleine mer (IOC-UNESCO, 2014). L'énergie dégagée par un tsunami est beaucoup plus conséquente que pour les vagues de houle, de ce fait, un tsunami entraîne des submersions marines importantes des terres.

De plus, un évènement source permettant le déplacement d'une grande masse d'eau est la condition pour engendrer un tsunami. En effet, un déplacement ou modification verticale brutale de la matière solide du plancher sous-marin ou bien la chute d'une masse importante dans une étendue d'eau seront à même d'engendrer un phénomène de tsunami sous certaines conditions (Peroche, 2016). Il existe différentes sources possibles de déclenchement de tsunami suite à des mouvements de matière solides (Table 1.1) : les séismes sous-marins, les glissements de terrains sous-marins ou à proximité d'un plan d'eau, les

éruptions volcaniques et aussi une part d'évènements déclencheurs indéterminés ou non-prouvés pour le moment comme les chutes de météorites. Ces quatre sources peuvent également se combiner.

EVENEMENT SOURCE	PART (en pourcentage)		
Séisme	83	6	1
Glissement de terrain	4		
Eruption volcanique	4		
Indéterminé	2		

TABLE 1.1 – Part en pourcentage des trois évènements sources principaux à l'origine d'un tsunami (de manière isolée ou combinée).

Sources : Evènements sources avérés de -2000 à 2011, dans le monde ((NGDC/WDS)/NOAA, 2016a).

Du fait de cette diversité de types d'évènements sources, toutes les étendues d'eau (océans, mers, lacs..) peuvent être concernées. De plus, le tsunami peut être différent en fonction notamment de la bathymétrie du site (Peroche, 2016). En effet, il peut résulter de l'évènement source un tsunami local (avec un impact littoral localisé) ou un évènement de plus grande importance, ou télé-tsunami, qui affectera un grand linéaire de côtes, ainsi que les littoraux éloignés de plusieurs centaines de kilomètres, avec une disparité des impacts côtiers en termes de hauteur d'inondation et de vitesse des vagues.

### 1.1.2 Modes de déclenchement et de propagation

Si dans plus de 90% des cas un tremblement de terre est l'évènement déclencheur de tsunami (Table 1.1), tous les séismes sous-marins ne sont cependant pas tsunamigènes. Certaines caractéristiques sont plus à même de déclencher un tsunami (Peroche, 2016). La première d'entre elles est la génération d'un séisme au niveau d'une faille en subduction. Au niveau de ce type de faille, la plaque tectonique océanique plonge sous la plaque continentale (Figure 1.2). Lors d'un tremblement de terre, la plaque continentale se relâche verticalement, libérant ainsi l'énergie du séisme (Roger, 2012). Lors de se relâchement, le plancher sous-marin s'élève ou s'abaisse brutalement, entraînant avec lui le mouvement d'une masse d'eau importante. Ce déplacement du plancher sous-marin, en raison de la différence de densité des molécules d'eau par rapport à celle du fond rocheux est équivalent à un déplacement quasi instantané, mettant en mouvement la totalité de la profondeur d'eau. La seconde caractéristique concerne la profondeur du séisme. Dans le cas de séismes tsunamigènes, la profondeur est faible, on dit qu'il s'agit de séismes superficiels, avec une moyenne de 34,9 km de profondeur ((NGDC/WDS)/NOAA, 2016a).

Dans le cas des glissements de terrain, le mouvement soudain d'une masse solide importante peut créer un tsunami. Un tremblement de terre ou une éruption volcanique peuvent parfois être à l'origine de ce glissement de terrain. Les tsunamis issus d'un glissement de terrain sous-marin ou au bord d'une étendue d'eau surviennent dans toutes les étendues d'eau, y compris des lacs ou des fjords; ce fut le cas d'un tsunami en 563 généré par l'effondrement d'un pan de montagne dans le lac Léman suite à un tremblement de terre

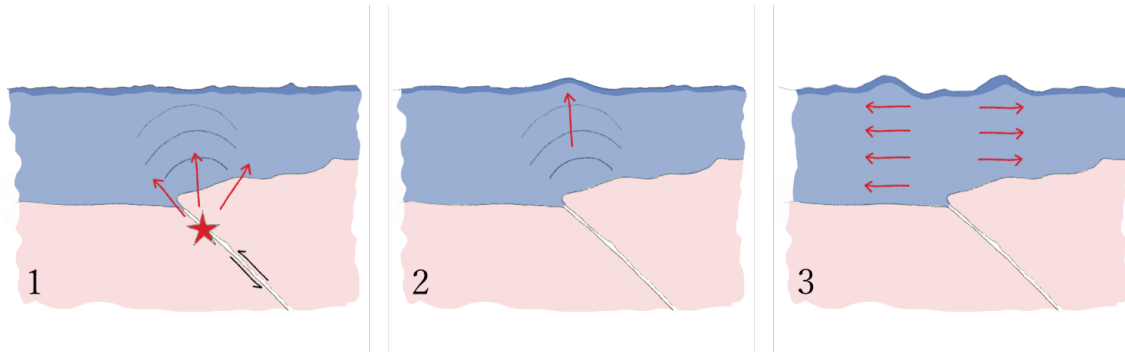


FIGURE 1.2 – Processus de génération d’un tsunami suite à une modification brutale du plancher sous-marin (séisme sous-marin en zone de subduction.) 1. Séisme sous-marin en zone de subduction, modification verticale brutale du plancher sous-marin et libération de l’énergie sismique. 2. Mouvement vertical de la masse d’eau. 3. Diffusion horizontale de l’onde de tsunami sur la totalité de la profondeur de l’eau.

Réalisation : Plattard, O., 2017, d’après IOC-UNESCO (2013).

(Kremer *et al.*, 2012). Ces tsunamis peuvent être très destructeurs localement, car la topographie d’un lac ou d’un fjord entraîne un phénomène de résonance et d’amplification des mouvements de l’eau. Dans la baie de Lituya (Alaska) en 1958, l’eau atteignit la hauteur de 525 mètres (Miller, 1960) ; cela se produisit suite à un tremblement de terre d’une magnitude  $M_w$  8,6 qui déclencha un glissement de terrain dans un fjord (Fritz *et al.*, 2009).

Suite à l’évènement source et à la transmission de l’énergie potentielle dans la masse d’eau, l’onde de tsunami se met en place et se déplace (IOC-UNESCO, 2013). Au large, la hauteur des vagues pouvant être d’un ou deux mètres avec une longueur d’onde de plusieurs centaines de kilomètres, l’onde est peu visible au milieu de la houle. En revanche, au fil de son arrivée sur le littoral (Figure 1.3), les caractéristiques du tsunami – vitesse, longueur d’onde et hauteur des vagues – évoluent au fur et à mesure de son rapprochement des côtes (Mofjeld *et al.*, 2004).

Profondeur de l’eau (en m)	Longueur d’onde (en km)	Vitesse (en km/h)
4000	210	710
2000	150	500
200	50	160
50	25	80
10	10	35

TABLE 1.2 – Evolution des propriétés d’un tsunami en fonction de la profondeur d’eau. D’après Lavigne et Paris (2011).

L’onde de propagation des vagues de tsunami concerne la totalité de la hauteur d’eau. En effet, ceci est dû à la très grande longueur d’onde des vagues, sur plusieurs centaines de kilomètres, par rapport à la faible profondeur de l’eau sur quelques kilomètres seulement.



La propagation de l'onde tsunami peut être assimilée à une propagation d'onde en milieu peu profond (Sahal, 2011). Tout comme pour l'énergie, le rapport entre longueur d'onde et profondeur est supérieur à celui de la houle.

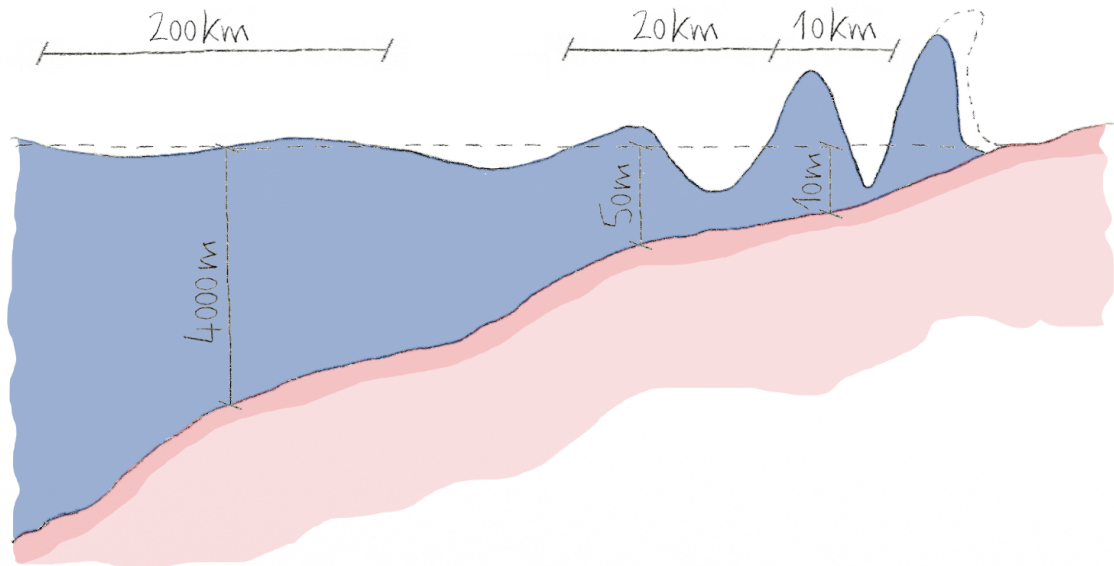


FIGURE 1.3 – Propagation de l'onde de tsunami. Décroissance de l'amplitude de l'onde et de la profondeur de l'eau et augmentation de la hauteur des vagues.

Réalisation : Plattard, O., 2017. Sources : IOC-UNESCO (2013).

De plus, la vitesse de propagation des vagues varie en fonction de la bathymétrie. Elle subit des accélérations et décélérations en fonction des variations du plancher sous-marin (Gonzalez, 1999). Au fur et à mesure que l'onde se rapproche de la côte, de même que la profondeur de l'eau décroît, la vitesse diminue (Table 1.2). En pleine mer, la vitesse peut atteindre 900 km/h, comme lors du tsunami du 11 mars 2011 au large du Tohoku (Japon)(JMA, 2013). Les vagues atteignent la côte à une vitesse de quelques dizaines de kilomètres par heure (IOC-UNESCO, 2013). Les vitesses d'écoulement sur le territoire littoral sont généralement supérieures à 10 m/s (Shuto, 1993). Elles peuvent concerner aussi bien le flux que le reflux du tsunami (Fritz *et al.*, 2012).

Cependant, à mesure que le tsunami se rapproche de la côte, il conserve son énergie jusqu'à son déferlement. Avant le déferlement, l'énergie du tsunami se reporte et c'est ce phénomène qui lui fait prendre de la hauteur (Peroche, 2016). Comme le montre la figure 1.4, un transfert d'énergie s'effectue entre la période et l'amplitude des vagues, ainsi qu'entre la vitesse et la hauteur des vagues. De ce fait, la longueur d'onde soit l'énergie cinétique  $E_c$  décroît tandis que l'énergie potentielle  $E_p$  c'est à dire l'amplitude augmente afin de conserver l'énergie totale de l'onde jusqu'au déferlement de la vague, point de départ



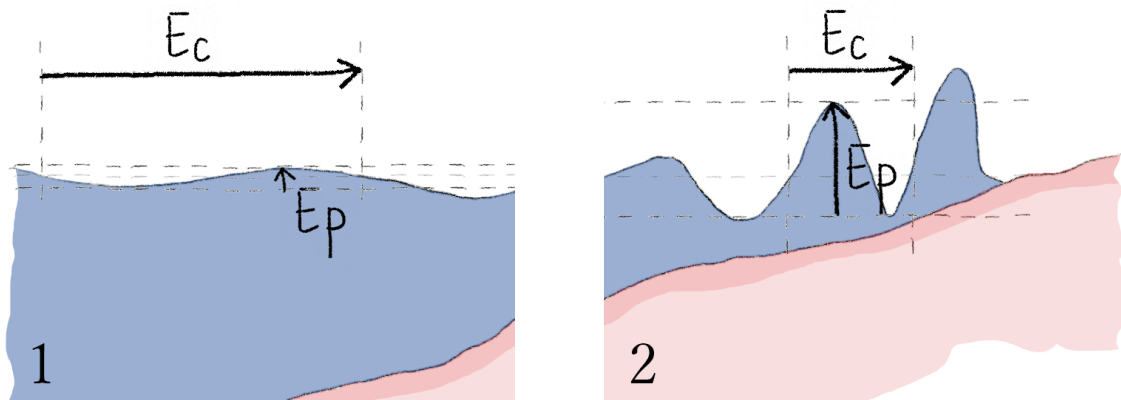


FIGURE 1.4 – Transfert de l'énergie totale de l'onde avant le déferlement. 1. En haute mer : Energie cinétique  $E_c$  importante, Energie potentielle  $E_p$  faible. 2. A l'approche du littoral : Energie cinétique  $E_c$  diminue et Energie potentielle  $E_p$  augmente.

Réalisation : Plattard, O., 2017.

de la perte d'énergie du tsunami.  $E_c + E_p = \text{Energie totale de l'onde}$  L'onde de tsunami passe ainsi d'une vitesse de 700km/h ou plus à quelques dizaines de kilomètres par heure tout en augmentant sa hauteur de quelques dizaines de centimètres au large à quelques mètres sur la côte.

Un même évènement peut avoir des impacts très contrastés le long d'un littoral. En fonction de la bathymétrie, les vagues ont des hauteurs variables, avec des phénomènes d'amplifications localement. Le déferlement du tsunami peut se faire lors de son arrivée sur la côte comme ce fut le cas en Indonésie en 2004 (Lavigne et Paris, 2011), ou en amont de son arrivée sur la côte comme ce fut le cas au Japon (JMA, 2013). Dans le premier cas, un phénomène de courants tourbillonnants et d'affouillement du sol important est observé. Dans le deuxième cas, l'eau arrive sous forme de vagues de faible hauteur qui a un flux continu et augmente ainsi le niveau de l'inondation au fur et à mesure qu'elle rentre dans les terres.

Des échelles de mesures ont été mises en place pour mesurer les magnitude et intensité d'un tsunami (IOC-UNESCO, 2013). Cependant, aucune n'est pour le moment réellement utilisée universellement. Il existe l'échelle de magnitude d'Imamura et Iida (1952) qui est l'une des plus employées : Il s'agit d'une échelle logarithmique de la hauteur de la vague principale le long de la côte. Avant le déferlement, soit le point de rupture de la vague, la hauteur de la vague étant proportionnelle à son énergie potentielle, cela permet d'indiquer la magnitude de l'évènement. Cependant, elle ne tient pas compte de l'extension spatiale ou de l'évènement source.

L'échelle d'intensité développée par Sieberg (1927) et complétée par Ambraseys (1962)

est celle utilisée par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) en France. Elle comporte 6 degrés se basant sur la perception du tsunami et les dégâts observés suite à l'évènement. De plus, Papadopoulos et Imamura (2001) propose une échelle d'intensité sur 12 degrés (sur le modèle de l'intensité sismique Mercalli) basée sur la prise en compte des dommages aux personnes, objets et bateaux ainsi que les constructions. Il y a une corrélation entre ces dommages et la hauteur des vagues, mais aucune donnée physique n'est prise en compte.

### 1.1.3 Les tsunamis dans le monde

A partir des données du *National Oceanographic and Atmospheric Administration* (NOAA) et de leur cartographie des sources avérées de tsunami depuis -1610 à aujourd'hui (Figure 1.5), les zones de convergence de plaques et notamment les arcs insulaires se dessinent ((NGDC/WDS)/NOAA, 2016a). Les côtes proches de ces zones sismiques sont exposées aux tsunamis. Cependant, les régions où la sismicité est faible peuvent aussi être affectées par l'aléa, car la propagation des ondes de tsunamis peut se faire sur de longues distances dans le cas de télé-tsunamis. C'est le cas notamment des îles du Pacifique (Hawaï, Polynésie) qui peuvent être impactées par un tsunami dont la source se situe proche du Japon, ou des côtes Ouest des Amériques du Nord et du Sud. Un exemple de ces répercussions à des distances éloignées fut celui du tsunami du 11 mars 2011 au Japon qui toucha les côtes japonaises moins d'une heure après l'évènement source et qui arriva sur les côtes de Nouvelle-Calédonie 10 heures après ou sur le littoral chilien plus de 20 heures après (JMA, 2013).

Le bassin océanique qui recense le plus de sources tsunamigènes est l'océan Pacifique – la Ceinture de feu – avec environ 73% d'entre elles (Sahal, 2011)<sup>2</sup>. En effet, les littoraux du Pacifique sont parmi les régions les plus exposées aux tsunamis, puisque sous cet océan se situent entre autres des failles de subduction très actives et générant des évènements sismiques majeurs (Bryant, 2008). Le bassin méditerranéen vient en seconde place avec près de 10,5% des sources avérées de tsunamis depuis 1840. Le littoral méditerranéen n'est certes pas le plus menacé en termes d'occurrences, il est cependant situé à proximité des principales failles marquant la limite entre les plaques africaine et eurasiatique. De plus, comme le précise la Figure 1.7, plusieurs évènements sont déjà survenus avec pour source une éruption volcanique ou un glissement de terrain sous-marins. Les côtes méditerranéennes ne sont donc pas épargnées par les tsunamis, comme le montre les principaux évènements survenus dans le bassin depuis un siècle (Figure 1.7).

Les séismes superficiels et situés en zone de subduction sont ceux déclenchant le plus de tsunamis (Bryant, 2008). En effet, pour la période 1840-2011, les séismes tsunamigènes ont en moyenne une profondeur de 34,9 km et une magnitude de 7,19. Ces statistiques sont

---

2. d'après les données (NGDC/WDS)/NOAA (2016a), cartographies et données évènements sources de tsunamis avérés de -2000 à 2011. Et recentrées sur la période de 1840 à 2011

# CHAPITRE 1. SÉISME ET TSUNAMI : UN SYSTÈME D'ALÉAS

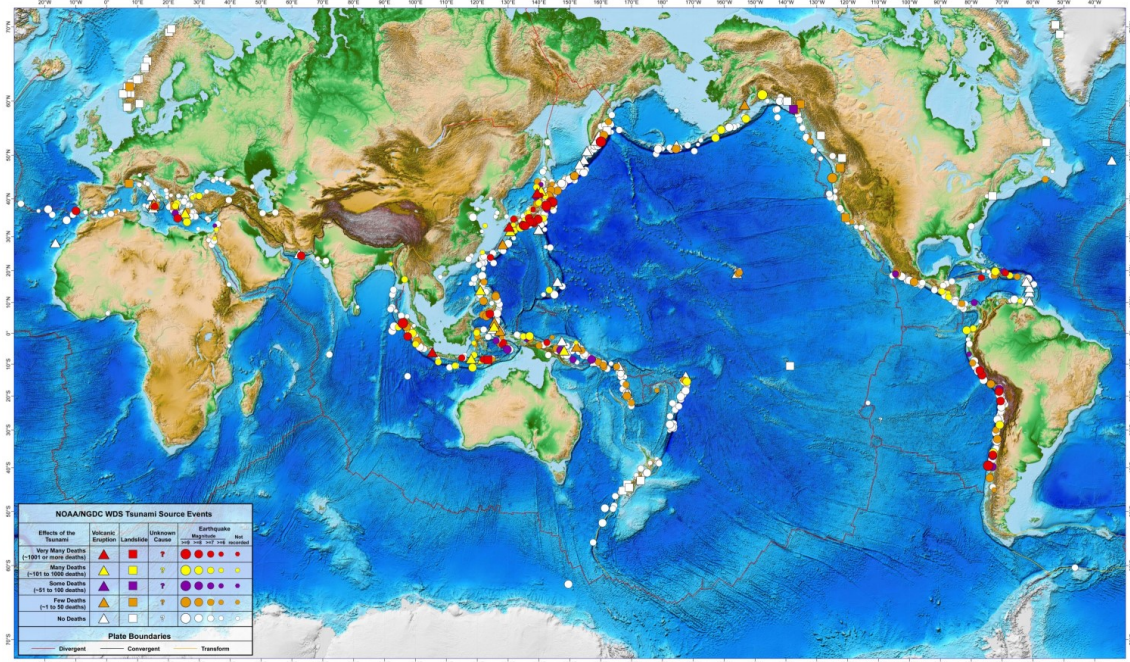


FIGURE 1.5 – Sources de tsunamis dans le monde, séisme, éruption volcanique, glissement de terrain et autres causes, de -1610 à 2014.

Sources : (NGDC/WDS)/NOAA (2016a).

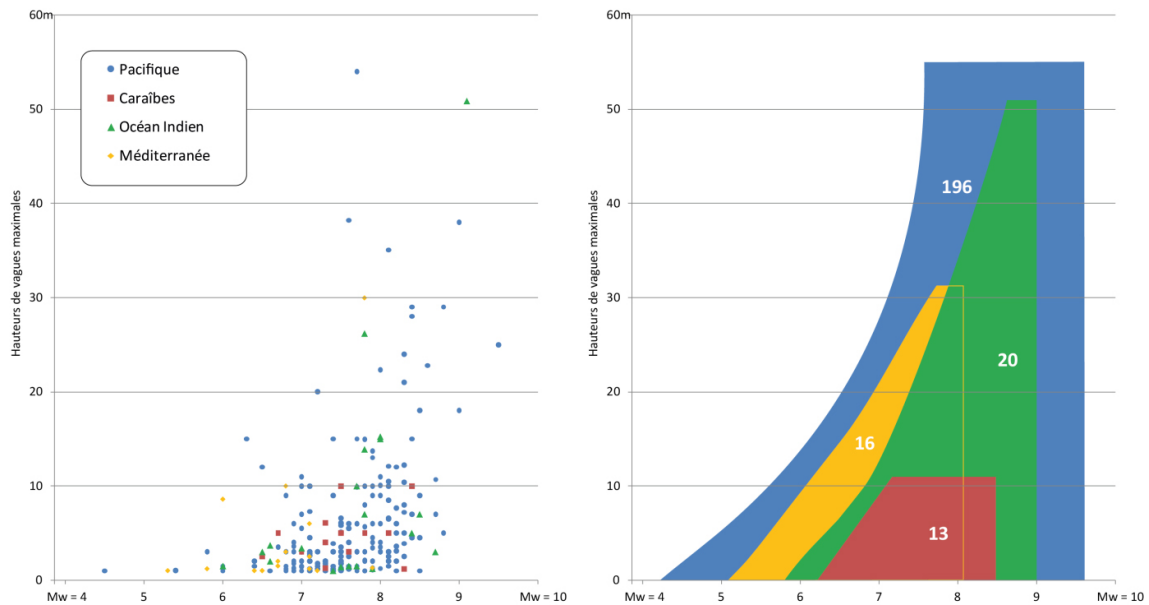


FIGURE 1.6 – Rapport entre magnitude du séisme tsunamigène (en abscisse) et hauteurs d'eau mesurées à la côte (en ordonnée).

Sources : Sahal (2011) ;

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



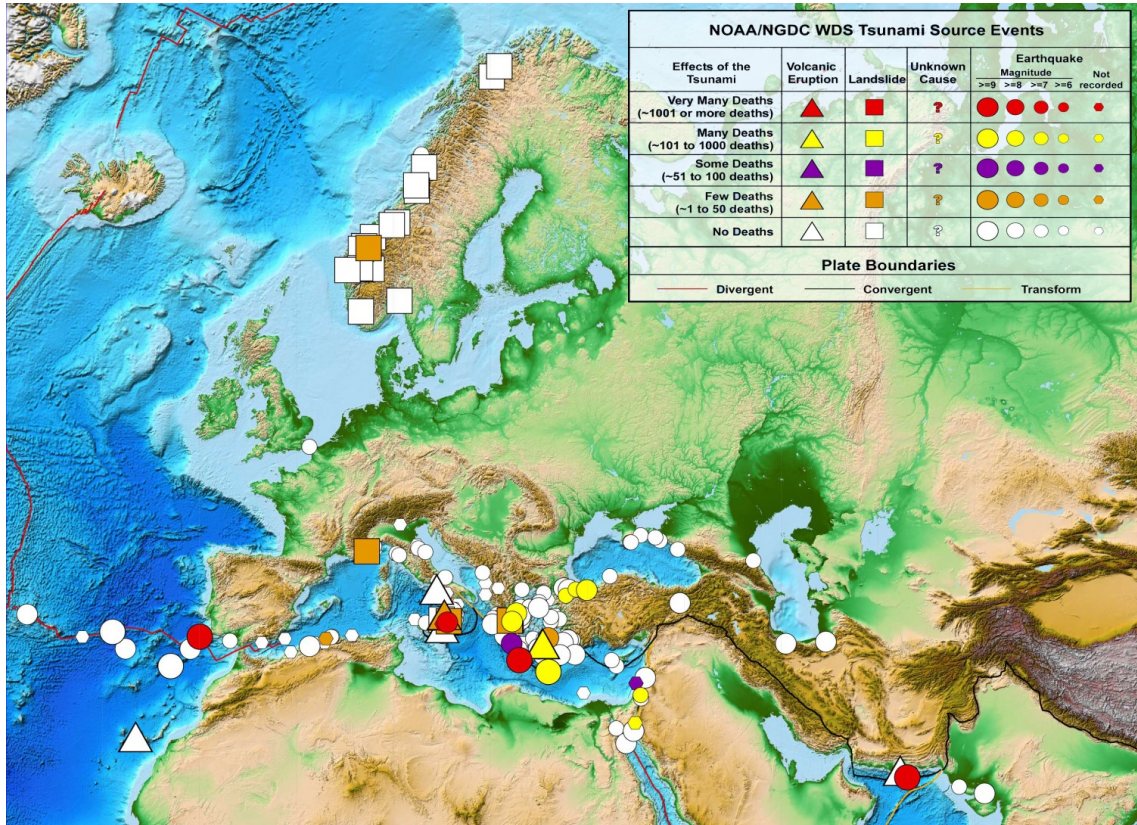


FIGURE 1.7 – Sources de tsunamis en Europe et bassin méditerranéen, de séisme, éruption volcanique, glissement de terrain et autres causes, de -1610 à 2014.  
Sources : (NGDC/WDS)/NOAA (2016a).

issues des 532 événements pour lesquels la NOAA/NGDC fournit des données, et pour lesquels les tsunamis sont avérés (Sahal, 2011). A des profondeurs supérieures à 40 km et des magnitudes inférieures à 6,5, le risque de tsunamigénèse est considéré comme faible. Cependant, comme le montre la Figure 1.6 (Sahal, 2011), cette relation entre la magnitude du séisme source et l'intensité du tsunami n'est pas totalement prouvée aujourd'hui.

Les tsunamis survenus dans le monde sont aussi divers dans leurs sources que dans leurs impacts sur les territoires littoraux. Les tsunamis ayant la magnitude la plus importante ne sont pas toujours les plus destructeurs, en fonction de la vulnérabilité littorale.

Plusieurs tsunamis dévastateurs déclenchés par des séismes ont marqué les esprits depuis une dizaine d'années comme celui du 26 décembre 2004 en Indonésie (Mw = 9.1, profondeur 30 km) atteignant des hauteurs d'eau de 50,9 m et entraînant la mort de 230 000 personnes (Lavigne *et al.*, 2009), ou encore l'évènement du 11 mars 2011 au Japon (Mw = 9, profondeur 32 km) atteignant des hauteurs d'eau de 37,8 m et entraînant la mort de 23 000 personnes selon IOC/UNESCO<sup>3</sup>. Il s'agit ici de tsunamis ayant eu également des

3. Le nombre de victimes peut comprendre des victimes du tremblement de terre

impacts sur des côtes éloignées de la source.

Plus proche de la France (Figure 1.7), dans le bassin méditerranéen et avec un impact davantage localisé, le tsunami du 17 août 1999 dans la baie d'Izmit en Turquie ( $M_w = 7.4$ , profondeur 17 km) atteignant des hauteurs d'eau de 2,5 m et entraînant la mort de 160 personnes selon NOAA/NGDC<sup>4</sup>. En février 2003, suite au tremblement de terre de Boumerdes en Algérie, ( $M_w = 6,8$ , profondeur 12 km) une onde se propagea en Méditerranée, touchant les îles Baléares, y atteignant des hauteurs d'eau de 3 m, et la côte française sans faire de victime (Sahal *et al.*, 2009).

De nombreux événements ayant combiné des glissements de terrain suite à un séisme ont également été recensés, comme en Alaska, en 1958 dans la baie de Lituya où un séisme d'une magnitude de 8,3 entraîna un glissement de terrain, un pan de montagne glissa dans la baie, engendrant un tsunami (Miller, 1960). L'altitude atteinte par l'eau fut de 525 m, et 5 personnes périrent (sur 7 présentes dans la baie). La région étant peu habitée, cela crée peu d'enjeux territoriaux, la vulnérabilité et donc le risque est réduit contrairement au littoraux très peuplés. C'est le cas du détroit de Messine où le séisme du 28 décembre 1908 ( $M_w = 7.0$ , profondeur 40 km) entraîna un glissement de terrain et un tsunami entraînant la disparition de 80 000 personnes<sup>5</sup>. Les vagues ont eu un impact local et atteignirent une hauteur de 13 m au maximum (Tinti et Maramai, 1996).

Concernant les glissements de terrain sans causes sismiques (ou volcaniques), la Norvège est régulièrement concernée par ces phénomènes dans ses fjords. Les vagues générées ont un impact localisé, mais qui peut être amplifié par la topographie des fjords (Goeldner-Gianella *et al.*, 2017). En France, le littoral azuréen connu le 16 octobre 1979 un tsunami engendré par l'effondrement du terre-plein de l'aéroport de Nice, alors en travaux. Une hauteur d'eau de 3 m fut enregistrée sur la côte et cet événement entraîna la mort de 9 personnes (Sahal et Lemahieu, 2011).

---

4. Plus de 17 000 victimes selon le bilan officiel, séisme et tsunami cumulés.

5. Données NOAA, séisme et tsunami cumulés.

## 1.2 Le séisme comme évènement générateur du tsunami

Lorsque l'on évoque un tsunami, les tremblements de terre apparaissent bien souvent comme un évènement lié, et pour cause, comme évoqué dans la partie précédente, ils sont dans près de 90% des cas l'élément source engendrant l'onde de tsunami. Cependant, tous les séismes sous-marins ne sont pas tsunamigènes. Comme ce fut précisé dans la sous-partie précédente, ils répondent à des caractéristiques précises de situation en zone de subduction, de superficialité et de magnitude, qui permettent de localiser les zones sismiques sources potentielles de tsunamis. Ces informations sont importantes pour la veille des évènements puisque le tremblement de terre est un évènement encore imprédictible. En revanche, lorsqu'un séisme survient, le tsunami peut être envisagé et une intensité sera définie en fonction de sa profondeur et de sa magnitude afin que l'alerte soit donnée. Cette sous-partie vise à préciser le fonctionnement, les caractéristiques des séismes, ainsi que les échelles de mesures sismiques.

### 1.2.1 Les séismes et leur occurrence

La surface terrestre est constituée de plaques continentales et océaniques qui se déplacent sous la pression du mouvement du magma visqueux situé en profondeur. Les tremblements de terre sont l'une des manifestations de la tectonique des plaques qui a modelé la surface terrestre. Ils se situent principalement à proximité des failles, zones d'interactions entre les plaques (Figure 1.8).

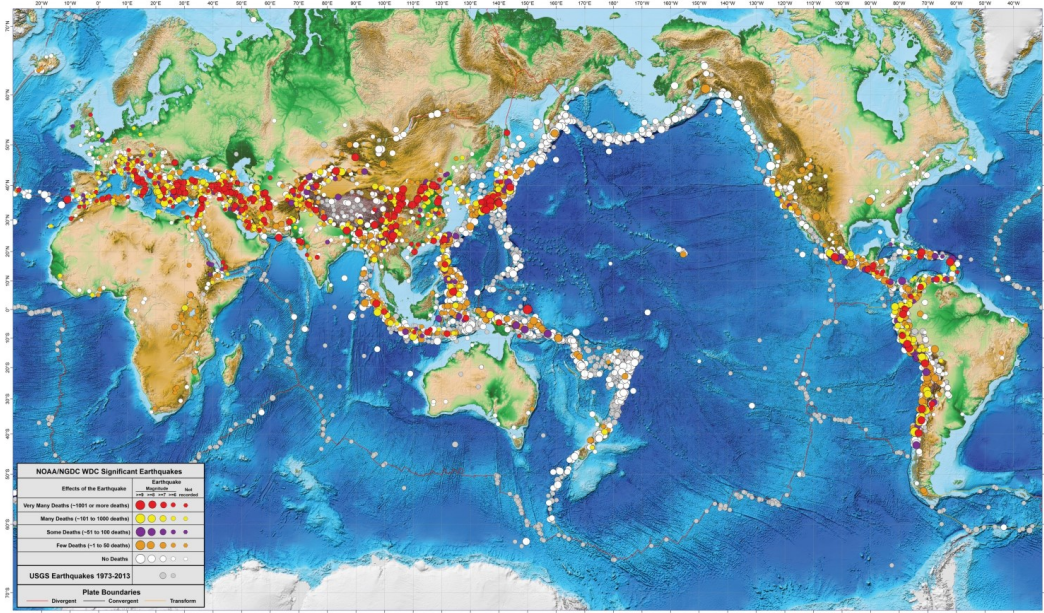


FIGURE 1.8 – Epicentres des séismes dans le monde, de -2150 à 2013.  
Sources : (NGDC/WDS)/NOAA (2016b).

Il existe plusieurs types de failles au fonctionnement qui diffère en fonction du mouvement de compression, extension ou cisaillement entre deux plaques (Balandier, 2004). Trois typologies principales sont classiquement distinguées (Figure 1.9) :

- les failles normales : caractérisées par une extension et la descente d'une plaque par rapport à l'autre.
- les failles inverses : caractérisées par une compression et le chevauchement d'une plaque sur l'autre. Ce type de faille est celui des zones de subduction.
- les failles en décrochement : caractérisées par le cisaillement et un mouvement de coulissement d'une plaque par rapport à l'autre dans un mouvement principalement horizontal.

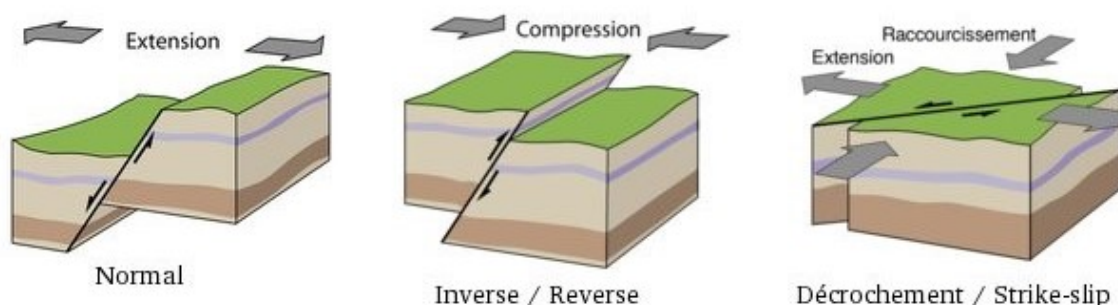


FIGURE 1.9 – Les trois différents types de fonctionnement de faille sismique.

Sources : Lacassin, R., 2005.

Les failles inverses, travaillant en compression, sont le type de failles se situant en zone de subduction et pouvant générer des séismes tsunamigènes. Il s'agit d'un phénomène concernant une plaque océanique (plus dense) glissant sous une plaque continentale. La majeure partie de ces séismes se concentre au niveau de la ceinture du Pacifique (ou ceinture de feu, qui libère environ 80% de l'énergie sismique mondiale par an (Balandier, 2004)), de la ceinture transasiatique (de l'Indonésie à la Méditerranée, qui libère 15% de l'activité sismique annuelle (Zacek, 2004)) ainsi que des arcs insulaires (Figure 1.8). La grande majorité des séismes dans le monde a un foyer situé entre 0 et 70 km de profondeur et est appelée "séisme superficiel". Dans le cas de tremblement de terre source d'un tsunami, la moyenne une profondeur est de 34,9 km ((NGDC/WDS)/NOAA, 2016a,b).

Malgré la connaissance grandissante du fonctionnement des mouvements des plaques tectoniques, les tremblements de terre restent des phénomènes non-prévisibles. Des périodes de retour de séismes, basées sur les événements passés et le déplacement des plaques, permettent de mettre en place une probabilité de survenance d'un événement sur une zone géographique. Cependant, une fois le tremblement de terre survenu, ses caractéristiques permettront de déterminer s'il est tsunamigène, afin d'alerter la population de la survenance d'une onde tsunami.



### 1.2.2 Le phénomène sismique

Le tremblement de terre survient lors d'un relâchement de l'énergie potentielle accumulée durant le glissement entre deux plaques tectoniques. Le dépassement localisé de la capacité des roches à stocker l'énergie provoque une rupture qui libère principalement de la chaleur et progresse ensuite rapidement sous forme d'ondes longitudinales (P) et transversales (S) (environ 4 km/s) suivant le chemin de moindre résistance à travers le sol jusqu'à sa surface (Zacek, 1996) (Figure 1.10).

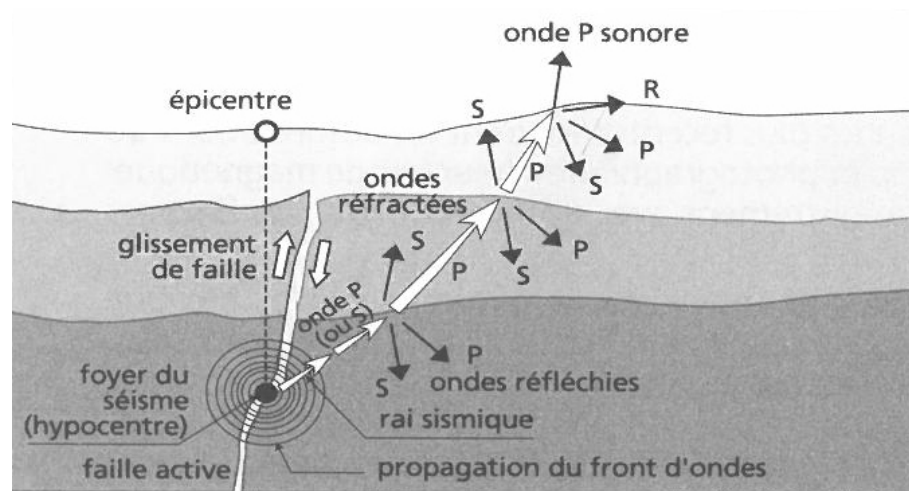


FIGURE 1.10 – Hypocentre et propagation des ondes longitudinales (P) et transversales (S) jusqu'à la surface du sol.

Sources : Zacek (1996).

Les propriétés élastiques des roches permettent à l'énergie libérée de se propager à partir du foyer dans toutes les directions sous forme d'ondes. Plusieurs types d'ondes sont libérées lors de cet événement. Elles ont des caractéristiques propres et peuvent être réparties en deux catégories : les ondes de volume (P et S) (Figure 1.11) et les ondes de surface (L et R) (Figure 1.12).

L'énergie libérée sous forme d'une surface sphérique ou rai sismique correspond aux ondes de volume composées des ondes de compression ou longitudinales (P) qui compriment et dilatent successivement les milieux parcourus, et de distorsion ou transversales (S) qui font osciller perpendiculairement les particules du sol (Zacek, 1996). Les ondes longitudinales (P) sont toujours les plus rapides - d'où leur nom, ondes P pour Primaires - que les ondes transversales ou S pour Secondaires (Figure 1.11).

La propagation et la vitesse des ondes sismiques sont dépendantes de la nature et de la densité des milieux rencontrés qui peuvent en partie les réfracter ou réfléchir. De cette manière, le type d'onde peut changer, une P pouvant se dédoubler en S et P. De plus, à



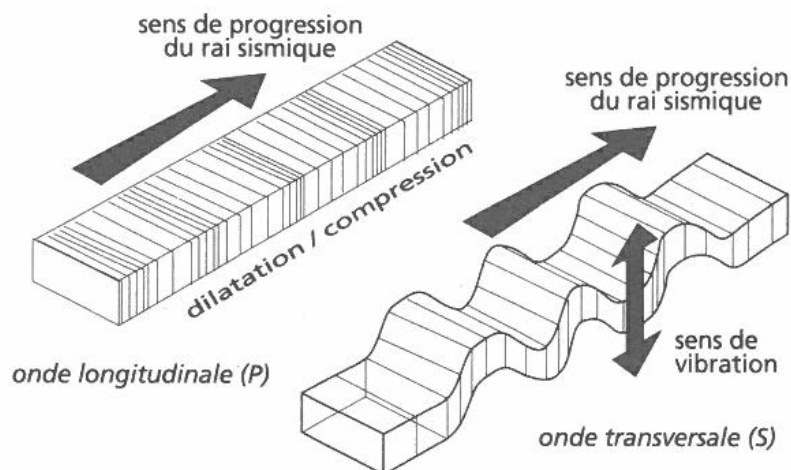


FIGURE 1.11 – Ondes de volume : longitudinale (P) et transversale (S).  
Sources : Zacek (1996).

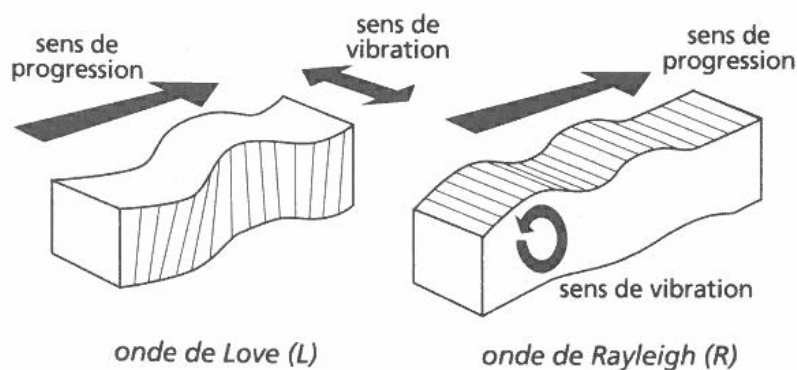


FIGURE 1.12 – Ondes de surface : Love (L) et Rayleigh (R).  
Sources : Zacek (1996).

la surface du sol, les ondes réfléchies vers la terre se retrouvent combinées avec les ondes arrivant du foyer ce qui peut amplifier considérablement les secousses<sup>6</sup> (Zacek, 1996).

Au delà d'une certaine distance de l'épicentre, les ondes de volume génèrent des ondes dites de surface (Figure 1.13). Ces dernières se propagent parallèlement à la surface terrestre sur une faible profondeur. Les ondes Rayleigh (R) mettent en mouvement les particules du sol sous forme d'ellipse, similaire à l'effet de la houle (Figure 1.12). L'accélération verticale des sols peut atteindre des valeurs importantes. Les ondes de Love (L) produisent des cisaillements du sol (Figure 1.12). Les ondes S et L ne peuvent traverser les milieux liquides ou gazeux (Balandier, 2004).

Lors de la propagation des ondes, l'énergie transportée est progressivement amortie ou atténuée (Figure 1.13). Les ondes à longue période s'atténuent moins vite que les ondes

6. les ondes P réfractées vers l'atmosphère sont à l'origine du bruit intense qui accompagne parfois les séismes.

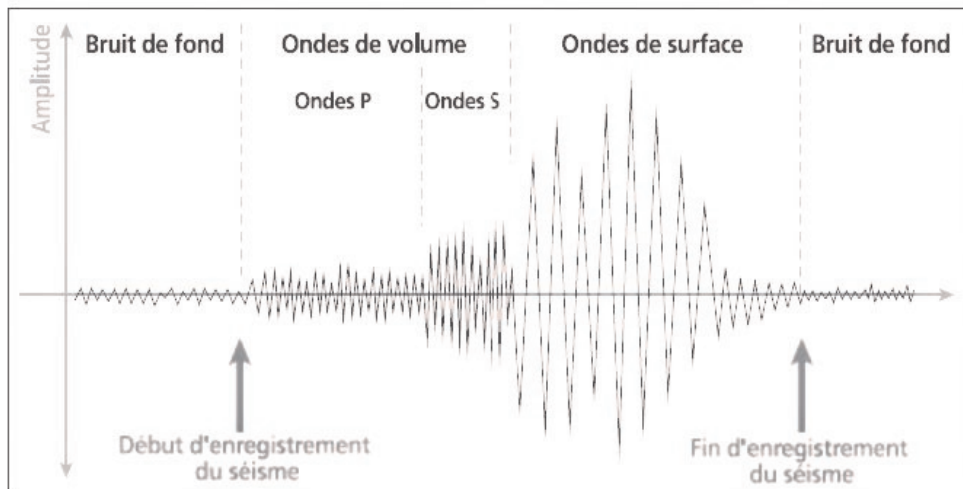


FIGURE 1.13 – Identification des ondes sismiques sur un sismogramme.  
Sources : Terrier (2006).

à période plus petite. Néanmoins, en fonction de la nature du sol, certaines ondes sont amplifiées, les sols meubles pour les longues périodes et les sols rigides pour les courtes périodes (Voir 1.3) (Zacek, 1996). Enfin, les effets sur les structures bâties sont différents en fonction du types d'ondes ; les ondes de Love sollicitent les constructions horizontalement, tandis que les ondes de Rayleigh les sollicitent verticalement.

### 1.2.3 Quelles échelles de mesure ?

Les séismes sont classés selon des échelles de magnitude et d'intensité qui s'appuient sur la mesure de plusieurs critères comme l'énergie libérée à l'épicentre, les mouvements du sols ainsi que les dommages sur la zone impactée. Ces deux échelles ne tiennent pas compte de la durée ni de la fréquence dans le temps des tremblements de terre. Chacune se calcule selon des critères différents et ne mesurent pas les mêmes caractéristiques d'un séisme.

#### La magnitude sismique

La Magnitude d'un séisme ( $M$ ) est une fonction logarithmique – c'est à dire une grandeur calculée et non une échelle de degrés – représentative de la quantité d'énergie libérée par la source à partir de l'amplitude des ondes sismique (Balandier (2004) et Zacek (1996)). Il n'y a donc qu'une seule valeur de magnitude pour un séisme donné. La magnitude n'a pas de maximum préétabli, cependant les sismologues estiment que la valeur maximale se situe autour de 10. Le séisme le plus fort enregistré à ce jour fut celui du 22 mai 1960 à Valdivia au Chili pour une magnitude de 9,5 ((NGDC/WDS)/NOAA, 2016b). Théoriquement, la quantité d'énergie libérée est multipliée par 33 par unité de magnitude (Table 1.3) ; un

## CHAPITRE 1. SÉISME ET TSUNAMI : UN SYSTÈME D'ALÉAS

séisme de magnitude 9 comme celui du 11 mars 2011 au Japon est donc 1000 fois plus puissant que le séisme de magnitude 7 qui toucha Haiti le 12 janvier 2010.

Magnitude	Nombre moyen de séismes annuels	Longueur caractéristique de la rupture	Déplacement sur le plan de rupture	Durée de la rupture	Energie libérée
9	.	800 km	8 m	250 s	$E \times 36\,000\,000$
8	1	250 km	5 m	85 s	$E \times 1\,100\,000$
7	18	50 km	1 m	15 s	$E \times 33\,000$
6	125	10 km	20 cm	3 s	$E \times 1000$
5	1500	3 km	5 cm	1 s	$E \times 33$
4	5000	1 km	2 cm	0.3 s	$E$

TABLE 1.3 – Corrélation théorique entre les ordres de grandeur de la rupture sismogène et la magnitude du séisme.

Sources : Balandier (2004).

Plusieurs d'échelles de magnitude coexistent, la plus connue est celle introduite en 1935 par Charles Richter qui permet de définir la magnitude locale (Ml) d'un séisme. La méthode de calcul se base sur l'amplitude maximale de l'onde sismique S. Cette méthode est privilégiée pour les séisme locaux et montre ses limites de calcul pour les séismes d'une magnitude supérieure à 7 (Zacek, 1996).

D'autres types de magnitudes sont également calculées comme celle des ondes de surface, des ondes de volume, de durée ou encore de moment. Cette dernière, la magnitude de moment (Mw) ou magnitude de Kanamori, est actuellement la plus précise pour les calculs de magnitude des séismes de magnitude élevée. Elle se base sur le moment sismique du séisme qui dépend des caractéristiques de la faille (Table 1.3) – la rigidité de milieu, l'aire de la surface de rupture et le déplacement moyen de la faille – (Zacek, 1996).

### L'intensité sismique

L'échelle d'intensité caractérise les effets macrosismiques des tremblements de terre sur un site, sans rapport direct avec la quantité d'énergie effectivement libérée par le séisme au foyer. Cet indicateur repose donc sur les effets observables comme les dégâts aux constructions, les effets sur les humains, la nature ou les objets (Grünthal, 2001). Un séisme de magnitude élevée peut avoir une intensité quasi nulle dans une zone non peuplée ou urbanisée. Les degrés d'intensité sont fixés après un diagnostic sur le terrain.

Il existe environ une quarantaine d'échelles d'intensité en fonction des pays qui classent les effets des séismes de 7 (comme l'échelle Shindo au Japon) à 12 degrés (comme l'échelle MSK en Europe). L'échelle Medvedev, Sponheuer et Karnik (MSK) a été établie en 1964 et sert de référence pour la réglementation française et européenne. Chaque échelle est adaptée au pays concerné en prenant en compte les types de constructions, les types de sol ou la topographie, etc... De l'échelle MSK, ainsi que de celle de Mercalli (Italie), découle l'échelle d'intensité européenne EMS-98 (European Macroseismic Scale 1998) aujourd'hui utilisée en France et qui sera la base de l'évaluation de vulnérabilité sismique des bâti-

ments réalisée dans le cadre de cette recherche (voir chapitre 5). La différence principale entre l'échelle EMS-98 et d'autres échelles d'intensité est le degré de détail dans la prise en compte des types de bâtiments, de leur nature de construction ainsi que des degrés de dégâts (Grünthal, 2001) (Table 1.4).

I	Imperceptible	
II	A peine ressenti	Ressenti seulement par quelques rares personnes au repos dans leurs habitations
III	Faible	Ressenti par quelques personnes à l'intérieur des bâtiments. Les personnes au repos ressentent une oscillation ou un léger tremblement.
IV	Largement ressenti	Ressenti par de nombreuses personnes à l'intérieur des bâtiments, par quelques rares personnes à l'extérieur. Quelques personnes endormies sont réveillées. Les fenêtres, les portes et la vaisselle font un bruit de tremblement.
V	Fort	Ressenti par la plupart des personnes à l'intérieur des bâtiments, par quelques personnes à l'extérieur. De nombreux dormeurs sont réveillés. Quelques personnes sont effrayées. Les bâtiments tremblent dans toute leur structure. Les objets suspendus oscillent nettement. Les petits objets sont déplacés. Les portes et les fenêtres s'ouvrent et se ferment.
VI	Dégâts légers	De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent à l'extérieur des bâtiments. Quelques objets tombent. Quelques maisons subissent de légers dégâts non-structuraux (légères fissures, chute de petits morceaux de plâtre).
VII	Dégâts	La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent à l'extérieur des bâtiments. Le mobilier est déplacé et les objets tombent des étagères en grand nombre. De nombreux bâtiments bien construits subissent des dégâts modérés (petites fissures dans les murs, chutes de plâtre, chutes partielles de cheminées). Des bâtiments plus anciens présentent des fissures dans les murs et des désordres au niveau des cloisons.
VIII	Dégâts importants	De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout. De nombreuses maisons présentent des crevasses dans les murs. Quelques bâtiments bien construits présentent des désordres au niveau des murs, tandis que d'autres bâtiments plus anciens s'effondrent partiellement.
IX	Destructeur	Panique générale. De nombreuses constructions s'effondrent. Même les bâtiments bien construits présentent des dégâts très importants (désordres au niveau des murs et effondrement partiel des structures).
X	Très destructeur	De nombreux bâtiments pourtant bien construits s'effondrent.
XI	Catastrophe	La plupart des bâtiments bien construits s'effondrent. Quelques bâtiments construits selon les règles parasismiques sont détruits.
XII	Catastrophe complète	Presque tous les bâtiments sont détruits.

TABLE 1.4 – Version abrégée de l'échelle macrosismique européenne EMS-98. Version longue en Annexe 8.4

Sources : Terrier (2006).

Dans ces échelles, il est à noter que le nombre de victimes n'est pas pris en compte, en revanche le ressenti humain est l'une des caractéristiques importante pour chaque degré.

Il n'y a pas de lien précis entre l'intensité et la magnitude (Zacek, 1996). Les dégâts peuvent être très variables en fonction de la profondeur du foyer, de la durée et vitesse des secousses, de la qualité et densité du bâti, de la topographie, de la nature du sol et des matériaux de construction. De plus, les effets des tremblements de terre sont cumulatifs. En cas de répliques de séismes, les dommages sur un bâtiment peuvent ne pas survenir lors d'un premier séisme mais apparaître lors des suivants. Enfin, l'échelle d'intensité macrosismique permet donc la traduction du niveau de vulnérabilité d'un territoire face à un événement sismique.

L'échelle d'intensité macrosismique permet donc la définition de l'impact d'un tremblement de terre sur une région donnée. Cela sera abordé plus en détail pour les dommages

sur le bâti qui fait la spécificité de l'EMS-98, par le biais de l'évaluation de la vulnérabilité sismique des constructions dans le chapitre 5 de cette thèse. Cependant, la dissociation de l'énergie libérée et des effets observables sur le territoire est importante pour la compréhension des dommages pouvant affecter un territoire littoral lors d'un séisme mais plus particulièrement à l'approche du tsunami à sa suite.

Aucune échelle ne permet de mesurer la propension tsunamigène d'un séisme ou ne fait le lien entre les échelles d'intensité et magnitude des séismes et des tsunamis. Malgré la progression récente de la connaissance des tsunamis grâce à l'étude des événements de 2004 et 2011, il demeure difficile de trouver une identité commune aux séismes tsunamigènes. Pour autant, ces deux aléas doivent être pensés conjointement pour les littoraux qui y sont exposés.

### 1.3 La conjonction des deux aléas et leurs conséquences sur le territoire littoral

Dans le cas où cela arrive, un territoire littoral touché par un séisme puis un tsunami doit faire face à la combinaison de plusieurs temporalités d'évènements. Dans un premier temps survient le tremblement de terre avec l'énergie se diffusant sous forme d'ondes qui vont impacter les structures et infrastructures. Puis, le tsunami survient générant d'autres conséquences sur la zone inondée qui viennent se superposer à celles du tremblement de terre. Cette superposition d'effets impacte d'autant plus le territoire littoral, cumulant et aggravant les dommages respectifs du séisme et du tsunami.

Ce chapitre aborde les impacts géomorphologiques, puis ceux applicables aux infrastructures et au bâti et enfin les impacts sur la populations du territoire littoral exposé. L'ordre d'arrivée des dommages sur le territoire est respecté avec en premier lieu les dommages liés au séisme, puis ceux liés au tsunami, en s'attachant aux effets combinés des deux aléas.

#### 1.3.1 Les effets géomorphologiques

##### Les impacts du séisme

Un tremblement de terre génère des effets qui peuvent être classés sous deux types : les effets directs et les effets induits. Les premiers sont directement liés aux vibrations du sol ; des déformations du terrain peuvent avoir lieu, certaines amplifiées à travers ce que l'on appelle l'effet de site. Deuxièmement, les effets induits sont ceux pour lesquels le séisme joue le rôle de déclencheur, comme les changements hydrauliques qui peuvent survenir et dont font par exemple partie les tsunamis.

##### *Les effets directs : effets de sites*

Les effets de sites sont les principaux effets directs du tremblement de terre et sont liés à la nature du sol et la topographie. En fonction de ces caractéristiques, les ondes sismiques sont réfléchies vers l'intérieur des reliefs ou entre les sols durs à travers les sols mous et peuvent se retrouver atténuées ou amplifiées (Balandier, 2004). Tout d'abord, dans le cas de pitons rocheux, les amplitudes des secousses sont plus grandes qu'en terrains plats, puisque le mécanisme de réflexion crée une concentration de l'énergie (Figure 1.14). Inversement, en fond de vallée (hors vallée encaissée et plaine alluvionnaire), le mécanisme de propagation des ondes amène à une désamplification des oscillations.

Dans le cas de vallées aux sols non homogènes, plus particulièrement un sol rocheux sous un sol meuble, ou de vallées alluvionnaires, des amplifications importantes de secousses sismiques sont observées (Bard, 2002). Dans les sols meubles, les amplifications sont dues à la résonance verticale des différentes couches et à la facilité de propagation des ondes de surface dans les sols meubles. Les amplitudes d'oscillation des sols meubles peuvent atteindre plus du triple de celles qui sont observées sur les sols fermes à proximité (Zacek,

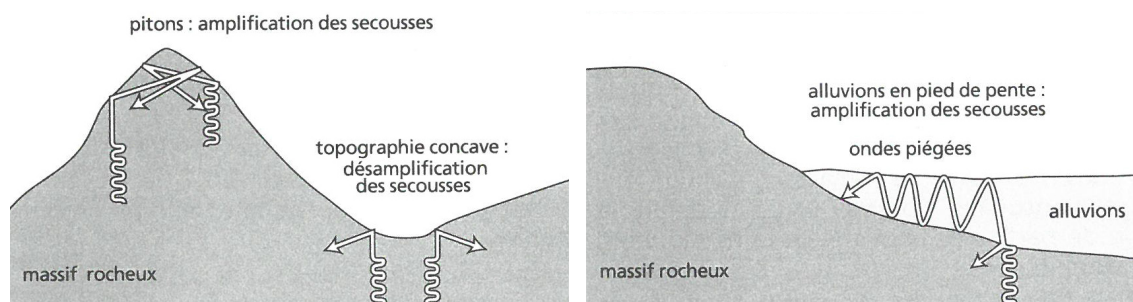


FIGURE 1.14 – Schéma de l'influence de la topographie sur l'intensité des secousses.  
Sources : Zacek (1996).

1996). C'est le cas par exemple de la vallée de Grenoble (Figure 1.15) ; *"la cuvette en Y, remplie d'alluvions postglaciaires très épais, y est confinée entre les massifs de Belledonne, Chartreuse et Vercors. Même si les sols qui constituent ce remplissage sont loin d'être aussi "mous" que ceux de Mexico<sup>7</sup>, la très forte rigidité du massif encaissant conduit à des effets similaires : les ondes sismiques y subissent de multiples réverbérations entre les bords et le fond de la cuvette, ainsi transformée en gigantesque "caisse de résonance". Il en résulte de fortes amplifications en surface, ainsi qu'une prolongation importante (Figure 1.15) .(...)* Tous les enregistrements ainsi acquis (en tout une cinquantaine d'événements, dont celui de Laffrey du 11/01/1999) ont ainsi révélé que les vibrations dans la cuvette sont systématiquement, quelle que soit l'origine du séisme, 10 à 20 fois plus intenses que sur les massifs avoisinants (Musée Dauphinois, Bastille), et ce sur une gamme de fréquences très large correspondant aux immeubles de plus de 4-5 étages (jusqu'à plus de 30 étages)." (Bard, 2002) Les conséquences de ces amplifications se font ressentir sur les sollicitations appliquées aux constructions. De plus, comme cela est développé dans la sous-partie suivante, lorsque la période propre d'oscillation du bâtiment concorde avec celle du sol, il y a alors entrée en résonance ce qui provoque la destruction des structures, comme dans le cas de Grenoble cité ci-dessus.

#### *Les effets induits*

Les effets induits d'un tremblement de terre sont liés aux grands mouvements de sol ou d'eau. Le séisme a soit le rôle de déclenchement, comme pour les glissements ou effondrements de terrain, des affaissements ou avalanches, soit un effet déterminant dans la genèse, comme pour les phénomènes de liquéfaction des sols ou encore de tsunamis (voir sous-parties précédentes).

#### *Liquéfaction des sols*

La liquéfaction du sol résulte de la modification de la texture des sols par les secousses sismiques. Ce phénomène survient en sols meubles et saturés en eau en provoquant un tas-

7. Séismes de Mexico de 1985 et de 2018 très caractéristiques du phénomène d'effet de site.

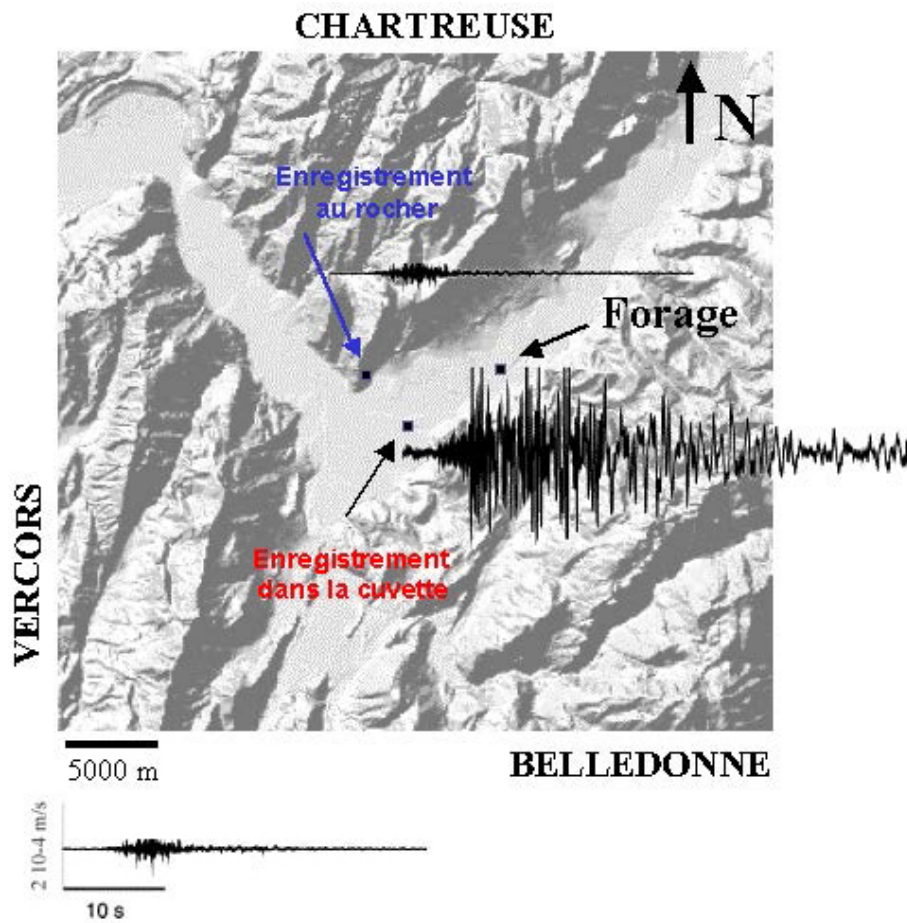


FIGURE 1.15 – Enregistrements sismiques obtenus lors du séisme de Laffrey du 11/01/1999 : on constate un contraste majeur entre l’amplitude et la durée des mouvements à l’intérieur de la cuvette, et des mouvements sur le rocher.

Sources : Bard (2002).



A. Christchurch, Nouvelle Zélande, 2011.



B. Niigata, Japon, 1964.

FIGURE 1.16 – Photographies des effets de la liquéfaction due à un séisme.

Sources : Wikicommons, 2017.



sement des sols et une montée en pression de l'eau qu'ils contiennent jusqu'à son expulsion (Balandier, 2004). Il peut être comparé au jeu du tapotement du sable mouillé sur la plage qui amène à la remontée en surface de l'eau contenue dans le sol. Ce phénomène peut rendre impraticable des voiries, comme ce fut le cas lors des tremblements de terre de Christchurch (Nouvelle-Zélande) en 2011 (Figure 1.3.1 .A). La liquéfaction des sols peut également endommager la stabilité d'une construction. En modifiant le sol, les fondations d'un immeuble se retrouvent fragilisées ; l'exemple du séisme de Niigata au Japon en 1964, illustre bien ce phénomène d'endommagement des fondations (Figure 1.3.1 .B) ; les immeubles se sont affaissés et ne sont plus utilisables, alors que le reste de la structure est peu endommagée.

### *Mouvements de terrain*

Le séisme provoque une augmentation des contraintes dans le sol, en fonction des caractéristiques du sol et de la topographie, des mouvements de terrain peuvent survenir. Dans un premier temps, l'action de l'eau dans les couches du sol (désolidarisation d'un sol homogène ou liquéfaction) peut amener à des glissements de terrain. De plus, une dégradation des propriétés mécaniques du sol localement ou dans l'ensemble, peut entraîner une rupture et un glissement de terrain (Zacek, 1996). Dans les zones de terrains meubles (argile, marne...), des détachements de couches superficielles peuvent avoir lieu. Les cavités souterraines sont également des points sensibles en cas de séisme et peuvent provoquer un affaissement. Enfin, en fonction de la topographie, des ruptures de surplombs rocheux, ou de stratification peuvent survenir, notamment en milieu montagneux.

### **Les impacts du tsunami**

Lors de l'arrivée d'un tsunami sur un littoral, l'impact est différent en fonction de la séquence du tsunami. Sa dynamique se traduit à travers des processus d'écoulements différents ; au niveau du front de l'eau et du déferlement, les écoulements sont turbulents et de très forte énergie, tandis que la zone d'inondation donne lieu à des écoulements plus laminaires beaucoup moins rapides (Leone et al. dans Lavigne et Paris (2011)). Suite au tsunami de décembre 2004 en Indonésie, les relevés et témoignages ont permis d'affiner la connaissance des tsunamis. Cela a notamment permis de mettre en avant plusieurs temporalités d'impacts du tsunami. Dans l'approche de Leone *et al.* (2007), il est divisé en trois temporalités en fonction des processus d'écoulements de l'eau : la zone de transit qui concerne le déplacement de l'onde en haute mer jusqu'à l'approche du déferlement, la zone de déferlement où le tsunami se casse, et la zone d'inondation du territoire (Figure 1.17). A chacune des trois temporalités des effets sont associés qui sont présentés ci-après.

### *Erosion*

Le premier effet correspond à l'érosion des sols. Ce phénomène survient plus particulièrement dans la zone de déferlement du tsunami. Les flots sont très turbulents et l'effet de

creusement de l'eau est très violent sur le sol ; comme ce fut le cas à Banda Aceh en 2004, pour lequel la figure 1.18 illustre l'érosion importante de l'île avant et après le tsunami.

De plus, dans le cas d'un séisme précurseur, le sol peut être fragilisé, amplifiant le phénomène d'érosion à l'approche du tsunami.

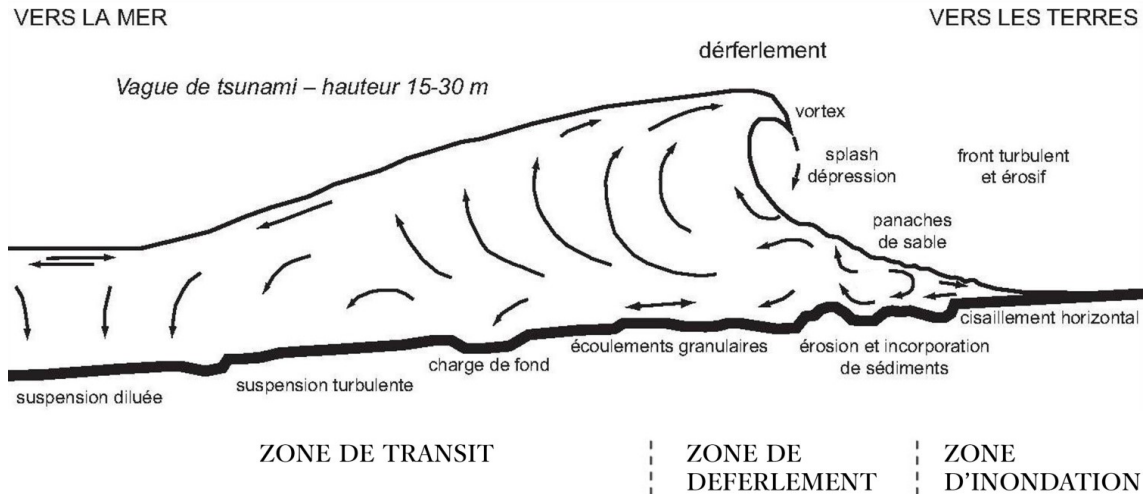


FIGURE 1.17 – Modèle de transport et sédimentation au cours d'un grand tsunami (amplitude de 15-30 m à la côte) avec identification des trois zones du tsunami.

Réalisation : Plattard, O., 2017, d'après Paris, R. et Leone et al. dans (Lavigne et Paris, 2011, p.124).

#### *Affaissement, tassement du sol*

Le second effet correspond à l'affaissement ou tassement des sols. Ces phénomènes surviennent également dans la zone de déferlement du tsunami, mais également sur le reste du territoire inondé. La violence des flots lors du déferlement est à même d'entraîner d'important mouvements de subsidence du terrain. A plus long terme, c'est l'ensemble du territoire inondé de manière longue qui peut subir le même effet avec la saturation en eau des sols et leur alourdissement jusqu'à leur tassement(Figure 1.19).

Le séisme précurseur peut déjà entraîner des mouvements de terrain ou de liquéfaction, facilitant l'impact du tsunami dans l'affaissement ou tassement du sol.

#### *Destruction de la végétation*

Le troisième effet correspond au fait que la végétation du littoral a du mal à résister au flot du tsunami. A l'arrivée sur la côte, la turbulence des courants entraîne la destruction de la végétation côtière. Cependant, cette végétation est souvent utilisée pour casser et réduire la vitesse du tsunami, comme c'est le cas sur le littoral japonais. Le revers de cette mesure est l'augmentation du nombre de débris charriés par l'eau sur le territoire inondé qui deviennent destructeurs pour les constructions (Figure 1.20).



FIGURE 1.18 – Phénomène d'érosion : Avant/Après le tsunami du 26 décembre 2004 à Banda Aceh, Indonésie.

Sources : wikicommons, 2014.



FIGURE 1.19 – Affaissement – ou subsidence – et tassement des sols : Kensenuma, Japon, tsunami du 11 mars 2011.

Sources : Scoccimaro, R., 2011.



FIGURE 1.20 – Destruction de la végétation littorale : Aéroport de Sendai, Japon, tsunami du 11 mars 2011.

Sources : AFP, 2012.



FIGURE 1.21 – Inondation et pollution du territoire littoral : (à gauche) Kensennuma, Japon, avril 2011. (à droite) Indonésie, 2006.

Sources : Scoccimaro R., 2011 (droite) et AFP, 2006 (gauche).



Un séisme précurseur n'a que peu d'effet sur la végétation, les effets combinés sont donc ici réduits.

*Inondation longue, pollution et salinisation des sols*

Ce quatrième effet concerne la zone d'inondation où l'eau salée peut rester durant plusieurs semaines ou mois. Outre que cela entraîne une forte dégradation des bâtiments, le sel ayant une action d'endommagement des matériaux élevée, une pollution des sols par les hydrocarbures transportés par l'eau et par le dépôt de sel sur la terre survient (Figure 1.3.1). L'effet à long terme est important pour les cultures, ainsi que pour les structures et infrastructures qui continuent à se fragiliser.

Les structures bâties endommagées par un tremblement de terre précurseur subissent un effet combiné d'endommagement sur le long terme.

**1.3.2 Les endommagements des infrastructures et du bâti**

En plus de leurs effets géomorphologiques, les deux aléas ont des impacts sur les structures bâties. En effet, ils créent des endommagements non négligeables sur les constructions et infrastructures amenant parfois jusqu'à leur effondrement. De plus, comme le résume la Figure 1.22, il est primordial de tenir compte de la nature du sol et de l'implantation d'une structure bâtie, afin de réduire les dommages liés aux impacts géomorphologiques des séismes et tsunamis. Cela permet également de dimensionner les structures pour résister en fonction de leur environnement. L'effet combiné des deux aléas amène d'autant plus de dommages puisque les constructions affaiblies par les ondes sismiques sont à la merci de la violence des flots du tsunami.

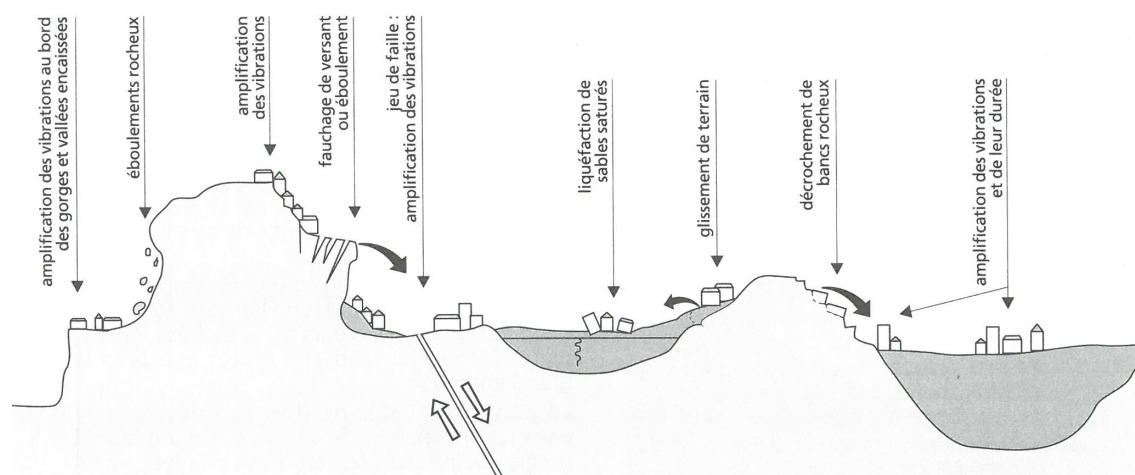


FIGURE 1.22 – Sites à effets directs amplifiés et sites menacés par les effets induits par les séismes.

Sources : Zacek (1996).

**Les effets du séisme**

Les ondes sismiques provoquent des mouvements horizontaux et verticaux du sol qu'elles traversent. Les constructions subissent alors des oscillations verticales, horizontales et de torsion (Figure 1.23).

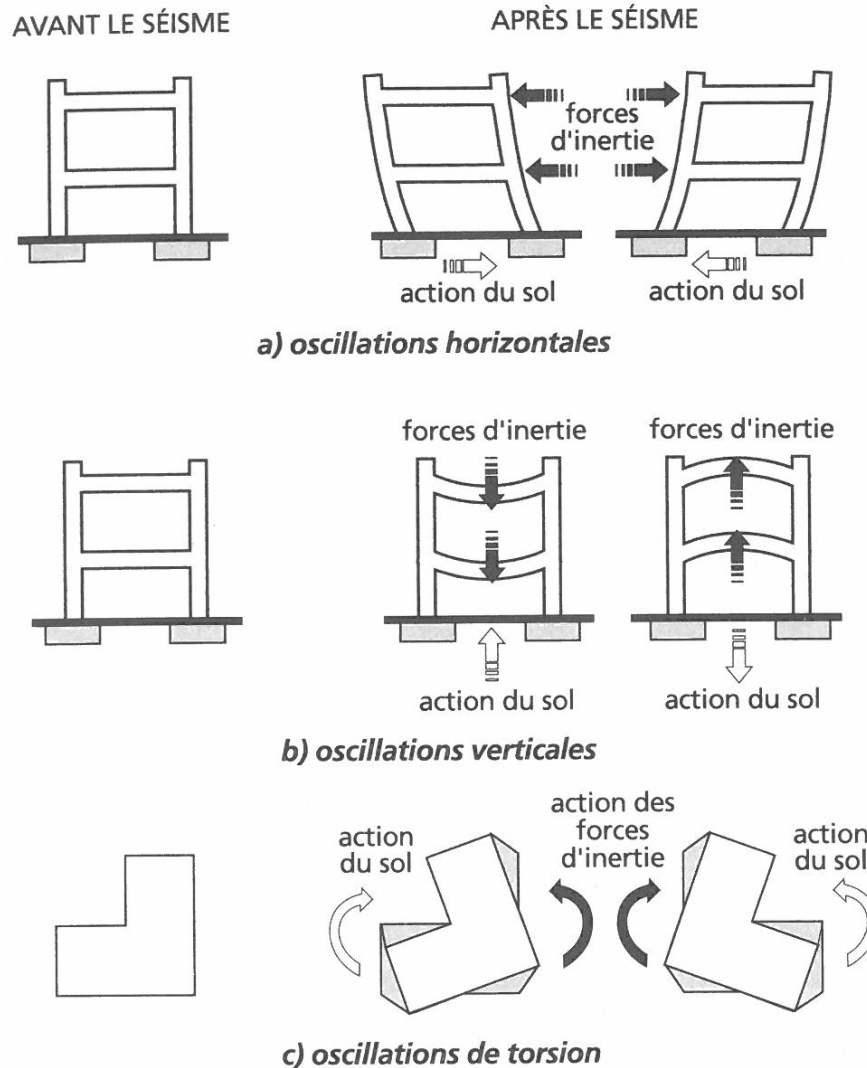


FIGURE 1.23 – Oscillations des constructions induites par les vibrations du sol.  
Sources : Zacek (1996).

Chaque structure bâtie dispose d'une inertie propre qui tend à résister à la mise en mouvement. Les déplacements du sol entraînent des forces d'inertie de la construction de sens opposé. Plus la construction est lourde plus son inertie est grande. La force d'inertie sollicite énormément la structure (Zacek, 2004).

Les oscillations horizontales entraînent un balancement de la structure. La base de la construction atteint le maximum des efforts en flexion et cisaillement. Les fondations s'en

retrouvent très affaiblies et peuvent se désolidariser du reste de la structure (notamment en cas de cisaillement). Les éléments porteurs (poteaux, murs...) de la structure peuvent être endommagés par la flexion d'ensemble (Zacek, 1996).

Les oscillations verticales sollicitent les éléments structuraux horizontaux comme les poutres, planchers ou les porte-à-faux. Les secousses verticales du sol ne sont pas uniformes et des déplacements différentiels peuvent être observés (Balandier, 2004). Néanmoins, les secousses verticales diminuent avec l'éloignement de l'épicentre.

Les déplacements horizontaux du sol produisent des effets de torsion qui sont d'autant plus importants lors de constructions de formes irrégulières. Le rapport de torsion se calcule à travers le décalage entre le centre de gravité et le centre de rigidité (des charges latérales) de la construction. Lorsque ces deux centres ne se superposent pas, un bras de levier apparaît, la structure est soumise à un couple de torsion horizontale (Zacek, 1996). Plus le bras de levier est important plus la construction est sujette à des dommages considérables. Un bâtiment à géométrie simple et symétrique peut également subir des oscillations de torsion dues au déplacement différentiel du sol ou de variation des charges.

Or, tous les matériaux ne sont pas égaux face à cette sollicitation. La maçonnerie traditionnelle, en terre, brique ou pierre résiste mal à ce type d'action. Contrairement aux constructions en béton armé ou acier qui ont un bien meilleur comportement face à ces sollicitations.

De plus, certaines ondes sont amplifiées en fonction de la nature du sol : les sols meubles pour les longues périodes et les sols rigides pour les courtes périodes (Zacek, 1996). Cela peut amener, à la mise en résonance de certaines constructions en fonction de la nature du sol sur lequel elles sont bâties. Chaque construction, en fonction de sa masse et de sa flexibilité, a une période propre. C'est-à-dire qu'elle réagit selon une période propre aux oscillations du sol. La mise en résonance d'une construction survient lorsque son mode d'oscillation est identique au mode d'oscillation du sol. Les constructions souples et sols mous ont une longue période propre, tandis que les sols durs et les constructions rigides ont une période propre plus courte. C'est pourquoi, sur un sol meuble des constructions souples ou de grandes hauteurs ont plus de probabilité d'entrer en résonance et de se retrouver endommagées, tandis que des structures plus rigides le seront moins sur le même type de sol. Ce fut le cas lors du séisme de Mexico en 1985 où seuls les immeubles de moyenne hauteur furent détruits. Leur période d'oscillation étant similaire à celle du sol meuble, ils sont entrés en résonance ce qui a amplifié considérablement leur oscillation amenant à leur effondrement. De même, cette problématique se pose dans le bassin grenoblois avec les constructions de 4 à 5 étages jusqu'à 30 qui sont concernées par ce risque de résonance (Bard, 2002). Il s'agit ici de la combinaison de l'effet de site avec l'entrée en résonance de constructions ayant une période d'oscillation précise (Gueguen et Colombi, 2016).

La conception parasismique vise à réduire l'impact des ondes sismiques en améliorant la résistance des constructions. Une structure parasismique doit garantir la sécurité des

personnes se trouvant dans le bâtiment. Néanmoins, ce type de conception ne garanti pas l'usage du bâtiment après le séisme.

**Les effets dominos de l'arrivée du tsunami**

L'arrivée du tsunami sur un territoire littoral sollicite les infrastructures et le bâti latéralement et verticalement, avec, en fonction de sa morphologie d'arrivée, des flots turbulents sur le front de mer. Une pression est exercée par l'eau sur tous les obstacles qu'elle rencontre. Cette pression est due à la vitesse des flots et à la profondeur de l'inondation.

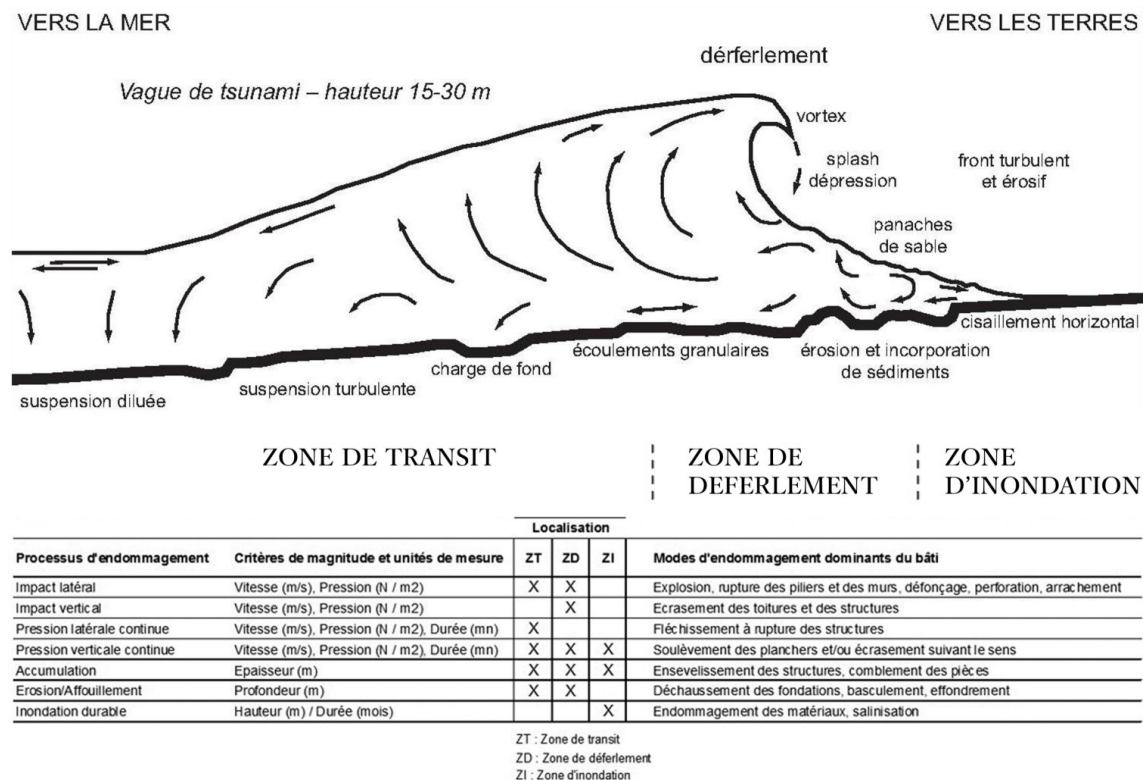


FIGURE 1.24 – Processus et modes d'endommagement dominants à terre associés aux zones de dynamique de la vague de tsunami.

Réalisation : Plattard, O., 2017 d'après Leone *et al.* (2007)

S'appuyant sur les retours d'expérience du tsunami de 2004 à Banda Aceh, Leone *et al.* (2007) ont mis en place une classe d'endommagement des constructions face au tsunami sur l'exemple de l'EMS-98. Cette démarche vise à isoler les dommages sur le bâti propres aux tsunamis. Sept processus majeurs d'endommagements sont mis en avant (Figure 1.24). Ils sont directement liés aux actions hydrodynamiques du tsunami, impliquant des forces de pression et d'impact qui sont fonction de la vitesse d'écoulement, de la hauteur de l'eau et de sa charge solide (Leone *et al.*, 2007). Cette classification permet d'appréhender les différentes sollicitations de structures.



Les constructions subissent une pression latérale dans un sens lors du flux et dans le sens opposé lors du reflux du tsunami. La sollicitation se fait latéralement lors de la montée des eaux – qui peut durer une heure ou plus – puis, vient ensuite le retrait qui se fait avec tout autant de vitesse de flots dans le sens opposé. A chaque obstacle rencontré s'ajoutent une hydrodynamique et des forces turbulentes qui créent des tourbillons et des pressions verticales (Figure 1.24). Il faut préciser que la zone de déferlement du tsunami se présente comme la plus destructrice avec sa grande vitesse et ses flots turbulents (Leone *et al.*, 2007). Le front de mer est donc directement exposé.

De plus, la hauteur d'inondation et la vitesse de l'eau sont les caractéristiques principales d'apparition des dommages (Koshimura *et al.*, 2009). En effet, les études publiées suite au tsunami de 2011 au Japon et au diagnostic de plus de 250 000 constructions (par Supparsi *et al.* (2012a) et Supparsi *et al.* (2012b)) montrent qu'il existe un palier au niveau de 2 m 50 de hauteur d'eau à partir duquel les dommages aux constructions augmentent considérablement. Cependant, une décomposition par matériau met en avant l'importance de la mise en oeuvre de la construction (Supparsi *et al.*, 2012a) (Figure 1.25), tout comme le montrent les travaux d'Arikawa (2009). Les structures en bois sont par exemple, moins résistantes que celles en béton armé.

La combinaison des effets du séisme et du tsunami sur une construction peut amener à sa destruction, même dans le cas de mise en oeuvre résistante en béton armé. Comme par exemple lors du tsunami de 2011, où un étrange phénomène d'arrachement et de déplacement de certains bâtiments de 4 étages ou plus en béton armé a été constaté (Supparsi *et al.*, 2012b) (Figure 1.26). Ce cas de figure illustre parfaitement le fait que le séisme précurseur au tsunami a des effets non négligeables. Selon les chercheurs, les 5 principales causes d'arrachement d'une construction dans le contexte japonais sont :

- la liquéfaction du sol par le séisme avant le tsunami qui fragilise les fondations et permet à l'eau d'affouiller au pied du bâtiment,
- la hauteur de la vague – ici plus de 15 m – et la longue période du tsunami qui correspond à une longue période de sollicitation de la construction,
- le peu d'ouverture d'une façade qui entraîne une plus grande surface de résistance, sous pression,
- la flottabilité de la construction avec une force verticale d'arrachement qui se crée au niveau de l'affouillement de la fondation,
- la prise en compte de l'ancienneté de la structure dans la résistance latérale de la structure.

La combinaison des effets des deux aléas est donc ici la cause de la destruction pour un bâtiment parasismique (Figure 1.26) ayant résisté mais ayant été affaibli par le tremblement de terre et n'ayant pas résisté aux sollicitations du tsunami.

Des dommages non négligeables aux constructions sont également dus aux débris charriés par l'eau qui peuvent résulter de démolitions suite au séisme ou au déplacement suite à l'arrachement par les flots (arrachement de la végétation, bateau, véhicules...). Le tsu-

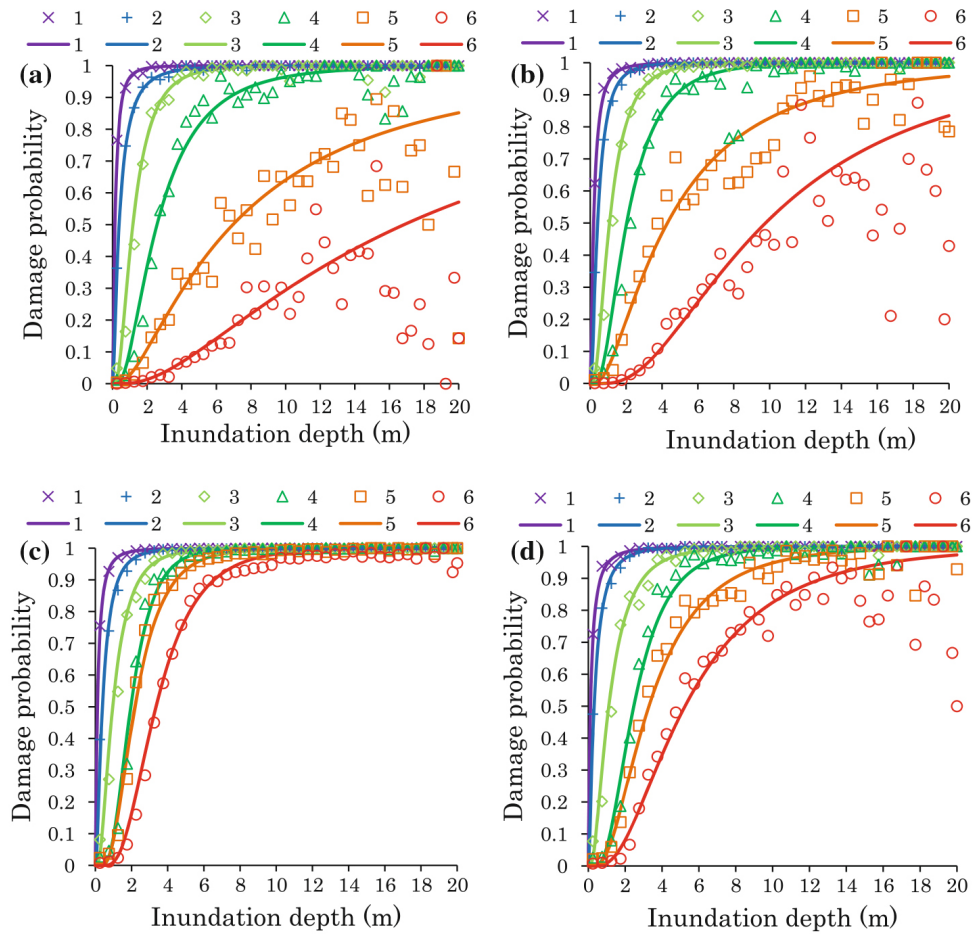


FIGURE 1.25 – Courbes de fragilité pour le tsunami pour la région de Chiba à Aomori par matériau. (a) Béton armé, (b) Acier, (c) Bois, (d) Maçonnerie. 1. Dommages mineurs, 2. Dommages modérés, 3. Dommages majeurs, 4. Dommages complets, 5. Effondrement, 6. Balayé.

Sources : Supparsi *et al.* (2012a).

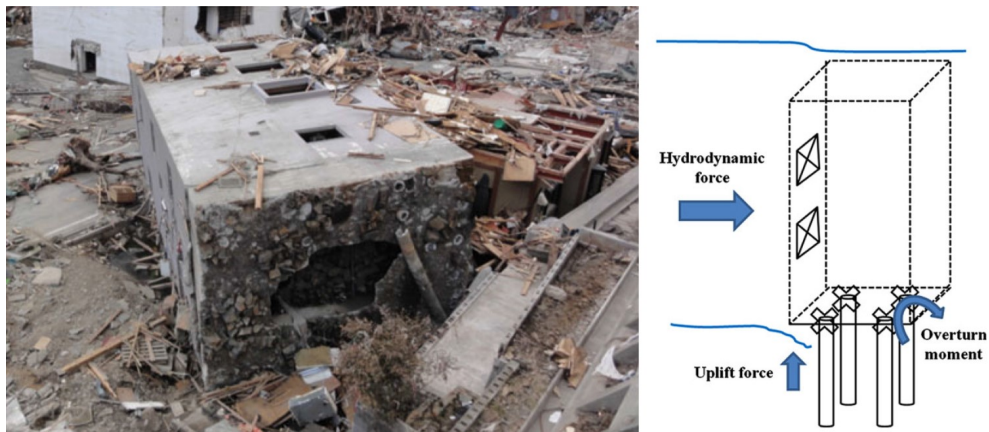


FIGURE 1.26 – Immeuble en béton armé de 4 étages arraché dans la ville d’Onagawa (photo du 29/03/2011) et schéma du mécanisme d’arrachement.

Sources : Supparsi *et al.* (2012b).

nami a un rôle de "voiture-balai" en emportant les débris avec lui. Leur impact et la pression supplémentaire qu'ils exercent sur les structures entraînent des dommages comme les arrachements ou perforations des matériaux de façade, fléchissement de structures.

Enfin, l'inondation du tsunami a un impact sur le long terme pour les constructions. En effet, de l'eau salée et polluée peut inonder sur le long terme des parties du territoire. Cela entraîne une dégradation rapide des structures et matériaux souvent mis à nu par les flots, comme l'oxydation des ferrailles du béton armé qui abaisse son niveau de résistance.

Pour conclure, la dynamique de l'eau et son action sur les structures n'est pas encore toujours identifiée et permet déjà, au fur et à mesure des retours de terrains suite aux événements majeurs de l'Indonésie et du Japon, de comprendre les mécanismes de sollicitations des constructions. Les tremblements de terre et tsunamis envisagés en Méditerranée sont d'une ampleur plus réduite, mais les mécanismes de sollicitations et d'endommagements des constructions restent les mêmes. Il est important de comprendre les effets des deux aléas individuellement mais également combinés. Une structure, après les 3 modes de sollicitations sismiques doit ensuite être en mesure de résister à ceux de l'hydrodynamisme du tsunami. La meilleure connaissance et prise en compte de la combinaison des dommages dans la conception d'un bâtiment permettent de mieux appréhender la vulnérabilité des territoires littoraux exposés.

### 1.3.3 Une population exposée

*"Il n'y a pas de risque sans une population ou un individu qui perçoit et pourrait subir ses effets."*(Veyret, 2003). La population des territoires urbains littoraux est directement impactée par la survenance d'un tremblement de terre et d'un tsunami. Ces aléas ne deviennent des risques que par rapport à un individu, une société qui les appréhende et les traite. Ce contexte urbain et côtier fait de la population et de sa mise à l'abri des enjeux majeurs.

Dans le contexte sismique, un individu situé dans un endroit non urbanisé subi peu d'effets sur lui-même. En effet, les secousses du séisme peuvent être importantes et longues et une difficulté pour se maintenir debout ou se déplacer peut survenir, tout comme une montée de stress qui peut entraîner des accidents cardiaques. Cependant, c'est à travers les constructions que le séisme devient un vrai danger pour l'homme. Les oscillations sollicitent les structures bâties jusqu'à parfois leur effondrement (Zacek, 1996). Cela peut avoir des répercussions sur les vies humaines, mais également sur la sécurité et la mise à l'abri de la population à travers la ville lorsque rester dans la rue n'est plus un endroit sûr. La construction parasismique vise à réduire les effets de ces oscillations en essayant de garantir la tenue du bâtiment et donc la sauvegarde des vies humaines se trouvant à l'intérieur. La construction parasismique ne sous-entend pas une utilisation post-catastrophe d'un bâtiment mais à ce qu'il ne devienne pas meurtrier par son effondrement. L'exemple du

séisme de 2010 d'Haiti illustre bien le côté meurtrier des constructions. Le béton semblait être un matériau plus solide que le bois aux yeux des haitiens. Cependant, sa mise en œuvre non renforcée selon les normes parasismique lui procurait peu de résistance au secousse sismique et en a fait un matériau meurtrier. L'effondrement des constructions à été très rapide, rendant difficile aux habitants de s'extraire à temps de leur logement. Le béton étant un matériau lourd, contrairement au bois par exemple, cela le rend d'autant plus meurtrier en cas d'effondrement des constructions.

En revanche, au Japon en 2011, les constructions sont restées debout lors du tremblement de terre (1000 fois plus puissant que celui d'Haiti) grâce à la mise en oeuvre des constructions aux normes parasismiques. Par contre, la quasi totalité des constructions détruites l'ont été par l'action du tsunami (Supparsi *et al.*, 2012a). Cette destruction par l'action de l'eau apporte également des dangers supplémentaires par le transport de débris et même de véhicules ou bateaux et de constructions entières déplacées par les flots qui sont autant de dangers pour les personnes.

Le risque de tsunami a un impact fort sur une population puisqu'elle peut être emportée par l'eau. L'eau a un fort courant et lorsqu'elle atteint la hauteur du genou d'une personne, il devient difficile pour cette personne de se déplacer et elle peut être emportée par les flots (Sugimoto *et al.*, 2003). Les risques face à l'eau sont la noyade, l'eau ressemblant davantage à de la boue, et également les crises cardiaques ; le tsunami charriant également beaucoup de débris, ces derniers représentent un danger si ils percutent un individu, de même qu'un individu peut être projeté contre une construction ou un autre obstacle et devoir subir le choc et la pression de l'eau. Les plus forts dangers surviennent lorsqu'un individu est rattrapé par l'eau. L'évacuation préalable et la mise ne sécurité rapide de l'individu peut les éviter et trouve donc ici toute son importance.

Il est donc primordial de pouvoir assurer l'évacuation de la population face à ces deux aléas. Toute la population littorale est concernée, à partir du moment où elle peut se situer à un moment dans la zone inondable. Cependant, la population est composée d'individus dont les caractéristiques sont hétérogènes en terme d'âge, de mobilité, de connaissance de son environnement, des itinéraires et des zones refuges possibles, ou encore de la connaissance de l'aléa. Des enquêtes sur le terrains permettent de cerner un peu plus précisément la population présente sur les sites d'étude (chapitre 2).

### Conclusion

Ce premier chapitre a pour ambition de poser les jalons de compréhension des aléas tsunami et séisme. Il s'agit de les appréhender indépendamment tout en pointant du doigt le fait qu'ils sont intrinsèquement liés dans leur génération et dans leurs impacts sur un littoral urbanisé. Le contexte de cette interconnexion doit être posé, afin de pouvoir mieux cerner dans la suite de la recherche l'importance et la complexité de la prise en compte combinée de ces deux phénomènes.

Premièrement, le phénomène de tsunami se distingue d'autres événements de houle ou de submersion par son origine, sa longueur d'onde et sa vitesse. Toutes les étendues d'eau peuvent être concernées. Cependant, un événement source modifiant le plancher sous marin doit en être à l'origine. Le séisme est l'évènement précurseur à une onde de tsunami dans la très grande majorité des cas.

Deuxièmement, les séismes tsunamigènes se situent en zone de subduction, la ceinture de feu du Pacifique étant très active, elle génère la majorité des tsunamis mondiaux. Bien que restant non prédictible, le mécanisme des tremblements de terre est connu. Il se décompose en plusieurs types d'ondes sismiques se propageant dans le sol. Ces ondes ont un effet sur les sols, les infrastructures et les constructions en fonction de la nature du sol et de la topographie du territoire impacté.

Troisièmement, les effets des deux aléas sur un territoire urbanisé sont à distinguer par leur situation dans la temporalité des événements avec d'abord le séisme puis l'arrivée du tsunami. A travers le passage des ondes sismiques des mouvements de terrains et de fragilisation des sols peuvent survenir. De plus, les infrastructures et constructions se retrouvent très sollicitées. Les oscillations verticales, horizontales et en flexion peuvent les mener jusqu'à la destruction. L'arrivée sur la côte du tsunami a un rôle de "voiture balai" suite à la fragilisation des sols et structures par le séisme. La population littorale doit faire face à ces deux aléas meurtriers, le séisme par la présence des constructions pouvant s'effondrer et dès l'arrivée des flots du tsunami. La construction parasismique permet de réduire la vulnérabilité des constructions.

Ce chapitre met donc en perspective les deux aléas et leur impacts associés respectivement et ensemble. Le tremblement de terre fragilise le territoire littoral et le tsunami verra à son arrivée ses impacts amplifiés par la combinaison des aléas. Le tsunami nécessite une mise à l'abri de la population littorale et donc une prise en compte et une connaissance des impacts qui peuvent survenir sur le territoire. Le séisme ne peut pas être mis de côté lors de la mise en place de stratégie d'évacuation d'une population littorale puisque son impact est non négligeable et peut amener à repenser la mise en sécurité de la population. Les problématiques mises en oeuvre dans cette thèse prennent en compte le contexte multi-risques de l'évacuation de la population littorale en milieu urbain.

## CHAPITRE 2

---

### LES SITES D'ÉTUDE

---

L'Europe et le bassin Méditerranéen sont des régions exposées aux séismes et tsunamis. Cette exposition n'est cependant pas aussi importante que dans d'autres régions du monde comme les littoraux du Pacifique où les événements sont plus fréquents. De plus, les tsunamis engendrés dans le bassin Méditerranéen sont d'ampleur moindre que ceux d'Indonésie en 2004 ou du Japon en 2011. Une certaine méconnaissance de cette exposition à ces risques perdure sur ces territoires. C'est dans ce contexte qu'est né le programme européen de recherche Astarte (Assessment, Strategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe, 2013-2016). L'objectif principal de ce programme est d'améliorer la connaissance et la préparation des populations de neuf sites en Europe et Méditerranée tout en réduisant les impacts des tsunamis sur le territoire littoral.

Cette thèse prend appui sur le travail et les données du programme Astarte, notamment pour le choix des sites d'étude. Dans le cadre du programme, neuf sites (Figure 2.1) sont sélectionnés dans la zone Nord-Est de l'Atlantique et le bassin méditerranéen (Gailler *et al.*, 2016). Ces régions exposées au risque de tsunami ont des caractéristiques variables de sources tsunamigènes (volcan, séisme proche ou lointain, glissement de terrain), de topographie, d'enjeux vulnérables (urbanisation, tourisme, industrie, etc.) ainsi que de systèmes de prévention et d'alerte déjà en place.

Dans un premier temps, le choix de mes sites d'étude s'est fait en fonction des données disponibles pour commencer un premier prototype de modèle STEP. La région niçoise fut donc toute désignée puisque les scénarios de vagues étaient déjà en cours de modélisation par le Commissariat à l'Énergie atomique et aux Énergies alternatives (CEA), les données géographiques étaient disponibles et des questionnaires avaient déjà été réalisés sur place. Le site d'Astarte comprend Nice et Saint-Laurent-du-Var. La nécessité d'un front de mer bâti et potentiellement inondable a fait ressortir la plage de Saint Laurent du Var comme

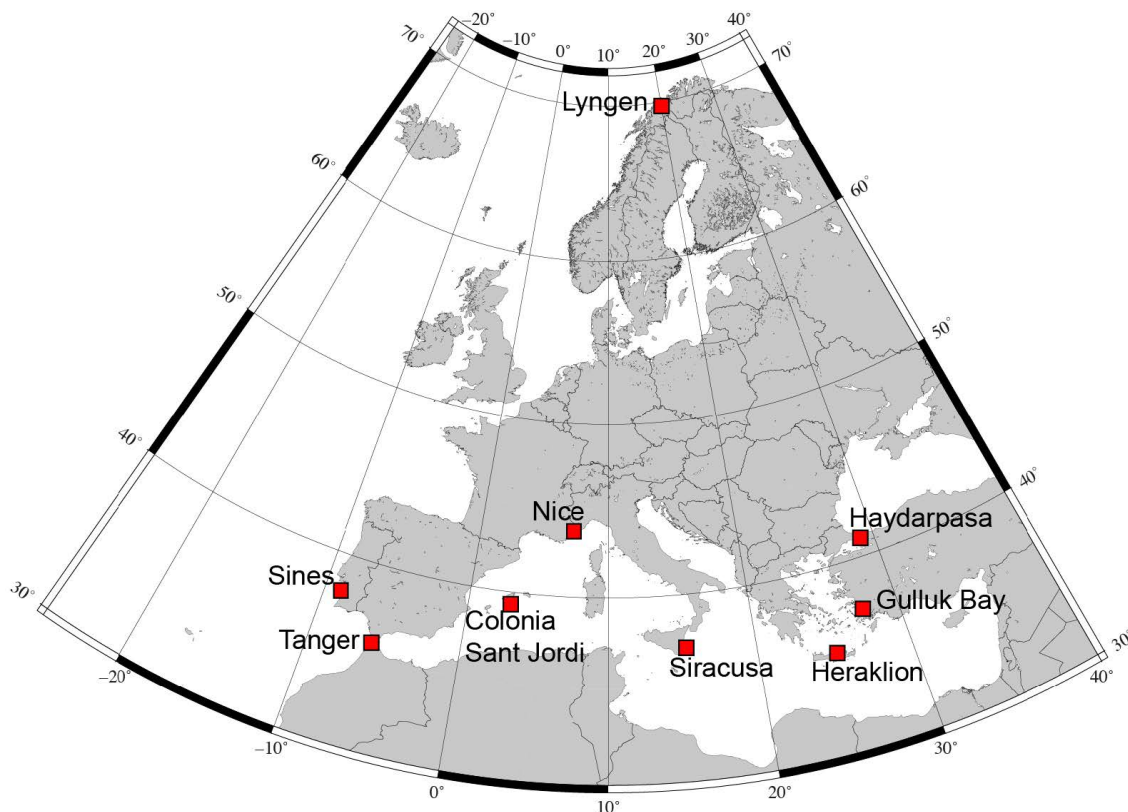


FIGURE 2.1 – Les neuf sites d'étude du programme européen Astarte.  
Sources : Tinti (2015).

propice au travail de la thèse et à la mise en place d'un modèle de simulation. En effet, par la présence de la Promenade des Anglais, surélevée de 3 m au dessus de la plage, la ville de Nice a moins de chance de voir l'arrivée de l'eau dans ses rues, l'enjeu étant alors l'évacuation de la population de la plage. Saint-Laurent-du-Var réunit quant à lui les caractéristiques d'une plage touristique, d'un front de mer urbanisé facilement inondable, le tout avec des données SIG et issues d'Astarte disponibles pour le démarrage d'un premier modèle de simulation.

En ce qui concerne le second site d'étude, ma volonté était d'avoir une topographie différente de celle de Saint-Laurent-du-Var avec si possible la présence de l'aléa sismique et potentiellement une plus grande inondation questionnant davantage l'évacuation en milieu urbain. La ville de Syracuse rassemble ces caractéristiques. Ville touristique avec la présence d'une île rocheuse reliée au reste de la ville par deux ponts passant par la zone du port et inondables, elle se situe en zone sismique et présente un scénario de submersion plus important que Saint-Laurent-du-Var. Elle permet de questionner le cheminement des piétons en milieu bâti et la mise à l'abri d'une population en contexte multi-risques.

Ce deuxième chapitre permet de présenter les sites d'étude. Saint-Laurent-du-Var et

Syracuse présentent tous deux de forts enjeux de population, notamment via le tourisme. Ce sont également des littoraux urbanisés avec des fronts de mer très construits. Ensuite, des questionnaires auprès des personnes présentes sur les deux sites d'étude dans le cadre d'Astarte (Lavigne, 2014, 2016) portent sur leur connaissance du risque de tsunami et leur évacuation éventuelle sur ces territoires. Ils permettent de cerner la structure de la population présente sur ces lieux ainsi que les itinéraires d'évacuations envisagés a priori par ces personnes en cas d'évènement majeur. Enfin, les deux sites d'étude ne sont pas exposés aux risques de la même manière. Ce chapitre détaille cette exposition, à travers la connaissance des évènements passés. Ces derniers permettent la définition de scénarios de référence qui sont ensuite utilisés pour les simulations.



## 2.1 Des territoires urbains à enjeux

Saint-Laurent-du-Var et Syracuse sont deux territoires littoraux très touristiques avec un front de mer très urbanisé. Les particularités topographiques et urbanistiques qui caractérisent chacun de ces sites sont présentées dans cette première sous-partie.

### 2.1.1 Présentation des sites d'étude

#### Saint-Laurent-du-Var

*"Situé en bord de mer, à l'embouchure du Var, Saint-Laurent-du-Var est surtout connu pour ses plages de galets, son port, sa marina et son centre commercial Cap 3000. On oublie trop souvent qu'un peu en retrait se cache un minuscule, mais charmant centre historique."*

Lonely planet, Côte d'Azur et arrière-pays, 2<sup>nd</sup>e édition, 2011.

La commune de Saint-Laurent-du-Var se situe en France, dans le département des Alpes-Maritimes (Figure 2.2). Elle fait partie de la métropole Nice-Côte d'Azur et est limitrophe de la commune de Nice et de son aéroport à l'est et de celle de Cagnes-sur-Mer à l'ouest. Lorsque l'on arrive depuis Nice, seul le franchissement du cours d'eau le Var indique l'entrée sur la commune de 29 067 habitants (données de 2014), le bâti étant quasi-continu sur le front de mer.

Le Var est d'ailleurs un élément déterminant dans la forme de la commune de 10,11 km<sup>2</sup> puisqu'elle est toute en longueur et longue sur 7 km la rivière à l'est jusqu'à son embouchure sur la Méditerranée, tandis que son front de mer s'étend sur moins de 2 km. L'altitude de la commune est comprise entre 0 m, au niveau du front de mer, et 214 m dans les terres. La population se concentre majoritairement sur le front de mer avec des constructions en immeubles d'habitations principalement. Le centre du village se situe à l'est, proche du bord du Var alors qu'au nord-ouest, le bâti s'étend de façon plus éparse en maisons individuelles. La zone de la gare ainsi que quelques commerces se trouvent au sud du bourg ancien ; les voies ferrées marquent la frontière entre la partie haute et pavillonnaire de la commune et la partie basse, du front de mer, avec des constructions en immeubles.

Fondée au XI<sup>ème</sup> siècle autour d'un hospice, Saint-Laurent-du-Var est aujourd'hui une commune touristique qui dispose d'une forte activité économique sur le front de mer, autour de la plage et de son port de plaisance ainsi qu'avec le centre commercial Cap 3000.

En ce qui concerne la géomorphologie de ce territoire, la baie des Anges se caractérise par une plateforme continentale étroite. La pente peut être très importante (jusqu'à 11 degrés) (Tinti, 2015) ; elle est peu perceptible au niveau de la plage car dissimulée par les constructions, mais néanmoins plus visible à travers le tissu pavillonnaire de la partie nord de la commune.

La bathymétrie reflète des mouvements gravitationnels (Tinti, 2015) et est coupée par les

canyons du Var et du Paillon (Figure 2.17). Ils sont très profonds et atteignent par endroit 1500 m à moins de 10 km de la côte. La plage de Saint-Laurent-du-Var se trouve à l'embouchure du Var. Le canyon sous-marin formé par le cours d'eau favorise l'amplification du tsunami lors de son approche de la côte.

## Syracuse

*"Par certains aspects, Syracuse incarne la beauté intemporelle de la Sicile. D'antique ruines grecques s'élèvent au milieu de vergers d'agrumes, les tables des cafés débordent sur de belles places baroques, et des rues médiévales dégringolent vers une mer d'un bleu étincelant. Malgré sa beauté, la ville n'a rien d'un musée et conserve sa vitalité depuis 3000 ans, comme vous le constaterez devant les embouteillages en milieu de matinée et les marchés bruyants."*

Lonely planet, Sicile, 4<sup>ème</sup> édition, 2014.

La commune de Syracuse est la ville principale de la province de Syracuse sur l'île de la Sicile, en Italie (Figure 2.3). Elle se situe sur la partie sud de la côte Est de l'île et est bordée par la mer Ionienne (Méditerranée). La province de Syracuse comprend deux zones côtières : la commune de Syracuse au sud et la commune d'Augusta au nord qui sont toutes les deux prises en compte dans le programme Astarte (Tinti, 2015). Cependant, dans le cadre de ce travail, seule la commune de Syracuse au sud est considérée.

La commune de 127 224 habitants<sup>1</sup> se divise entre sa partie historique sur l'île d'Ortigia et celle sur le "continent" (selon l'appellation locale) c'est à dire sur l'île de la Sicile. La commune, qui s'étend sur plus de 200 km<sup>2</sup>, ne dispose pas de plage sur son littoral qui est plutôt rocheux et escarpé ; l'île d'Ortigia est sur un rocher et le reste de la commune est bordé de falaises. Une partie de la population se concentre sur l'île dans un bâti ancien, dense mais peu élevé, puis sur la partie "continentale" dans des immeubles de plus grande hauteur qui deviennent de plus en plus éparses au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'île d'Ortigia. Lors de l'unification italienne au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, la ville a commencé à s'étendre sur la partie continentale ce qui explique un bâti plus récent et aéré.

La cité fut fondée en 734 av. JC sur l'île d'Ortigia par les Grecs. La ville d'Archimède fut influencée au fil des siècles par plusieurs civilisations (Byzantins, Arabes, Normands, Espagnols...) ce qui rend son patrimoine culturel très riche bien qu'il fut à maintes reprises endommagé par des tremblements de terre. Son patrimoine<sup>2</sup> et son île d'Ortigia en font une des villes les plus touristiques de Sicile.

Du point de vue morphologique, une grande baie, la Baie de Syracuse ou Baie d'Ortigia, est présente au sud-ouest d'Ortigia, délimitée au sud par la Péninsule Maddalena (Tinti, 2015). Cette baie ouvre sur des plages mais reste peu urbanisée.

1. <http://www.provincia.siracusa.it/territorio.php> Page consultée le 12 octobre 2017.

2. La nécropole de Pantalica est classée Patrimoine Mondial à l'UNESCO depuis 2005.

## CHAPITRE 2. LES SITES D'ÉTUDE

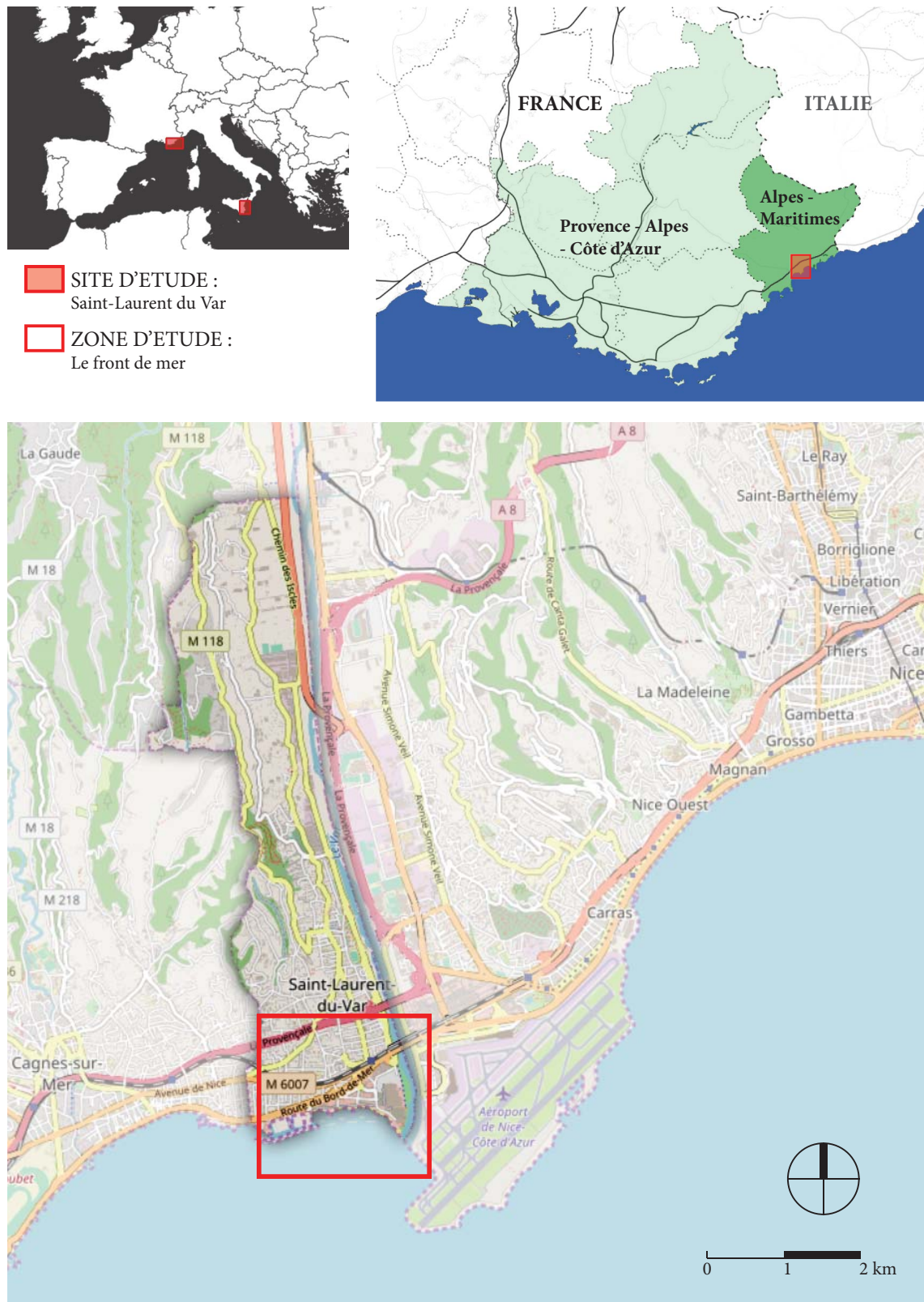


FIGURE 2.2 – Situation de la commune de Saint-Laurent-du-Var.  
Réalisation : Plattard, O., 2017.



L'île d'Ortigia est un promontoire rocheux, partie originelle de la cité de Syracuse. Cette partie sur l'île de la Sicile dispose d'un front de mer fait de falaises. Dans sa partie "continentale", la ville s'est étalée sur le plateau surmontant les falaises. La bathymétrie de la côte Est sicilienne révèle un escarpement propice au glissement de terrain ainsi que le dessin de la zone de rencontre des plaques africaine et eurasienne (Figure 2.16).

### 2.1.2 Quels enjeux urbains sur ces sites d'étude ?

Les communes de Saint-Laurent-du-Var et Syracuse se trouvent toutes les deux dans des régions très touristiques.

Saint-Laurent-du-Var se situe sur la côte d'Azur qui attire l'hiver les touristes venus chercher la douceur des températures ou encore pour le carnaval de Nice, et en été les amateurs de la plage avec des températures de l'eau agréables. La Riviera française attire chaque année plus de 11 millions de touristes, avec un pic le weekend du 15 août estimé à plus de 650 000 personnes (Comité Régional du Tourisme Côte d'Azur, 2014). De plus, la haute saison touristique s'étale de mi-mai à fin octobre avec en moyenne 400 000 personnes par jour et plus précisément l'estimation est de 20 000 personnes par jour en été sur la seule plage de Nice (Robert *et al.*, 2008).

Quant à Syracuse, environ 700 000 touristes viennent visiter son patrimoine<sup>3</sup> tout au long de l'année. La cité, classée Patrimoine mondial par l'UNESCO, fait partie des lieux culturels incontournables de la Sicile. Cependant, elle n'attire que modérément pour le tourisme balnéaire, ses plages étant excentrées. Une grande partie des touristes ne viennent que pour passer la journée dans la cité lorsqu'ils résident dans les complexes balnéaires bordant les plages au sud de la ville.

La commune de Saint-Laurent-du-Var est séparée de celle de Nice par le Var mais également par l'aéroport. Cet unique enjeu requiert un travail de thèse en soi et donc ne sera pas traité ici, bien qu'il serait intéressant de connaître l'impact d'un tsunami et les mesures d'urgence mises en place dans l'enceinte du troisième aéroport de France.

Le bord de plage de Saint-Laurent-du-Var est très construit avec majoritairement des bâtiments hôteliers et résidentiels de 4 à 6 étages. Cela représente un front de mer construit sur 15 à 20 mètres de hauteur. Ces propriétés privées réduisent le nombre de voies de circulation ouvertes à tous, tout autant qu'elles bouchent la visibilité du relief en retrait, paramètre important lorsqu'il s'agit de savoir dans quelle direction évacuer (voir chapitre 4).

De plus, le centre commercial Cap 3000 construit à l'embouchure du Var est un enjeu important. En effet, ce centre de plus de 150 boutiques accueille chaque jour en moyenne 35 000 visiteurs<sup>4</sup> et pourvoit plus de 2000 emplois dans la région. Plusieurs extensions de ce centre situé en zone inondable ont eu lieu, cependant depuis qu'il a subi une crue considérée

---

3. Article SiracusaNews du 19 novembre 2016

4. Carte d'identité du centre commercial Cap 3000, consultée à la page : [http://www.cap3000.com/capfr/default\\_zone/fr/html/page70351.html](http://www.cap3000.com/capfr/default_zone/fr/html/page70351.html), le 20 octobre 2017.

comme centennale du Var en 1994, aucune nouvelle extension n'est autorisée. Néanmoins, depuis 2014, un projet de rénovation est en cours, visant à doubler le nombre de boutiques et augmenter la capacité du parking jusqu'à 4800 places contre 3000 aujourd'hui<sup>5</sup> ; cela fait suite à l'approbation Plan Local d'Urbanisme (PLU) (Commune de Saint-Laurent-du-Var, 2013) et du Plan de Prévention des Risques Inondations (PPRI) en 2013, dans lequel le centre commercial est passé de zone rouge (inconstructible) à zone bleue (urbanisée)<sup>6</sup>.

La partie de la cité de Syracuse bâtie côté Sicile se trouve sur un plateau qui est à l'abri d'une submersion. Cependant, plusieurs enjeux majeurs sont présents sur ce territoire littoral. Le premier enjeu majeur de la province de Syracuse qu'il est important d'évoquer est le site pétrochimique situé entre Syracuse et Augusta, à côté du village de Priolo Gargallo. Ce site se caractérise par la présence d'une des plus importantes raffineries d'Europe. Il constitue une ressource importante localement et emploie environ 20 000 personnes (Lavigne, 2014). Ce site se situe en dehors de la zone densément urbanisée de Syracuse et Ortigia et n'est donc pas traité dans cette thèse.

Dans le cadre de cette thèse est traité l'enjeu majeur que constitue la jonction entre Ortigia et le "continent". Cette dernière est réalisée par deux ponts bas avec de part et d'autre deux ports, le Porto Piccolo au Nord et le Porto Grande au Sud. Le premier est un port de pêche et de quelques bateaux de tourisme. Son bassin est peu profond (40 cm à 3 m). Un canal connecte Porto Piccolo à Porto Grande surplombé par les deux ponts Umberto et Santa Lucia. Les bords du canal sont une grande esplanade et des parkings. Le Porto Grande était un port commercial important mais aujourd'hui, son activité s'est recentrée autour des navires de plaisance et yachts. Il accueille des navires de plus grande taille que Porto Piccolo et est aujourd'hui en extension (Tinti, 2015). Les ponts au-dessus du canal constituent l'unique zone d'accès à l'île d'Ortigia. Ils sont donc très passants et considérés comme un point de repère central dans la ville par beaucoup de touristes. Cette zone de jonction est un enjeu majeur dans le cas d'un tsunami car, d'une altitude basse, son inondation sera d'une hauteur de plusieurs mètres (Tinti, 2015).

---

5. Site Altarea cogedim : <http://www.altareacogedim.com/Altarea-Cogedim-presente-son,44988.html> du 6 novembre 2014.

6. PLU Saint-Laurent-du-Var, Plan de zonage PPRI 6.A.4.b, Partie sud de Saint-Laurent-du-Var de la basse vallée du Var : <http://www.nicecotedazur.org/habitat-urbanisme/les-documents-d-urbanisme-en-vigueur/saint-laurent-du-var>, consulté le 08 juin 2018

## 2.2 Quelle population concernée sur les sites d'étude ?

Saint-Laurent-du-Var comme Syracuse évoquent des destinations de vacances pour bon nombre de gens. Cependant, alors que la première commune évoque un tourisme balnéaire, Syracuse, quand à elle, attire pour son patrimoine souvent des touristes réalisant un tour de la Sicile et faisant étape pour quelques jours dans cette cité antique.

Des enquêtes ont été réalisées sur les deux sites, respectivement 400 pour la région niçoise (incluant 172 questionnaires à Nice, 146 à Saint-Laurent-du-Var et 82 à Villefranche-sur-Mer) et 148 à Syracuse (dont 107 sur l'île d'Ortigia) dans le cadre du programme Astarte. Ces enquêtes permettent de cerner un peu mieux la population exposée au risque tsunami, ainsi que sa connaissance et perception de la catastrophe qui peut la toucher.

Des enquêtes ont été réalisées dans les neuf sites d'étude du programme Astarte<sup>7</sup>. Un seul formulaire d'enquête a été réalisé qui a été utilisé pour l'ensemble des sites. Il comprend une centaine de questions au total. L'enquête s'organise sous différents thèmes avec des questions concernant le profil des personnes enquêtées, puis leur connaissance du site et leur usage, leur connaissance et perception des risques en général ainsi que du tsunami plus particulièrement ; on y retrouve ensuite des questions concernant l'attitude envisagée en cas d'alerte puis d'évacuation, avec notamment une carte mentale sur laquelle les personnes indiquent leur intention d'itinéraire et/ou de zone de refuge.

Les enquêtes ont été réalisées sur papier pour Saint-Laurent-du-Var et directement sur tablette numérique à Syracuse. La réalisation du questionnaire et le traitement des réponses ont été réalisés avec le logiciel Sphinx. Les données sur la totalité des sites peuvent ainsi être analysées et comparées.

### 2.2.1 La population et sa connaissance des risques

Sur les sites concernés, la population peut être divisée entre les locaux et les touristes. Dans le premier cas, il peut s'agir de gens qui travaillent mais également de personnes en repos. Dans le deuxième cas, il peut s'agir de touristes locaux, régionaux, nationaux ou étrangers (Figure 2.4). Pour les deux sites, une grande part de la population interrogée n'est pas résidente de la commune, les locaux représentant donc entre 45 et 50% des personnes enquêtées. Cette donnée permet de traiter les résultats des questionnaires soit de manière séquencée par ce facteur d'origine des personnes, soit en prenant en compte la population interrogée totale. Cela peut avoir une incidence sur les résultats, notamment pour ce qui concerne la connaissance des risques présents sur le territoire, mais également sur la volonté de fuite, dont les choix d'itinéraires ne sont pas guidés par les mêmes critères.

---

7. Assessment, Strategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe.



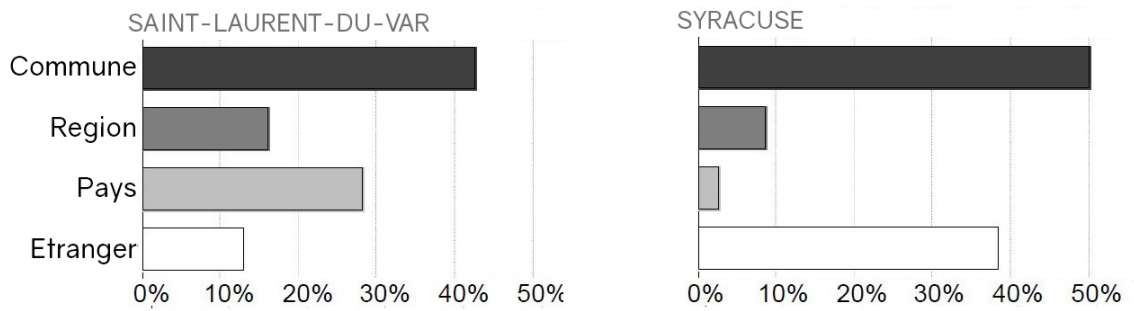


FIGURE 2.4 – Résultats à la question "D'où venez vous?".  
Réalisation : Plattard, O., 2017 d'après les données Lavigne (2014).

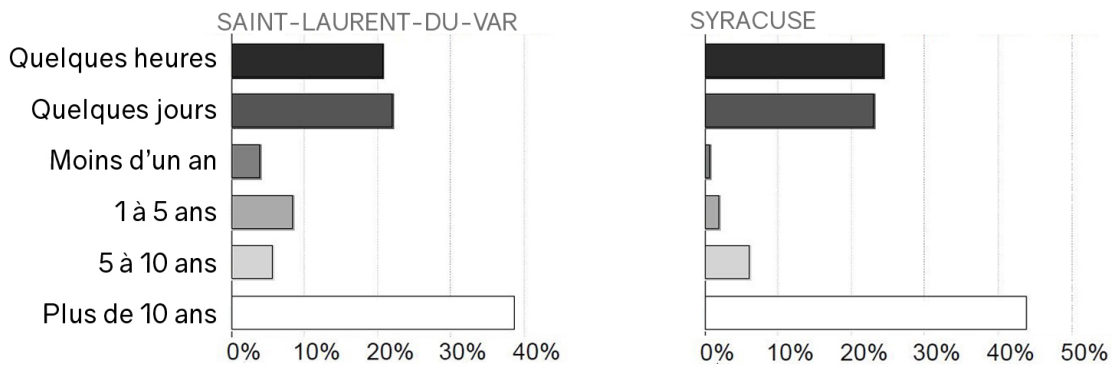


FIGURE 2.5 – Résultats à la question "Depuis combien de temps êtes-vous ici?".  
Réalisation : Plattard, O., 2017 d'après les données Lavigne (2014).

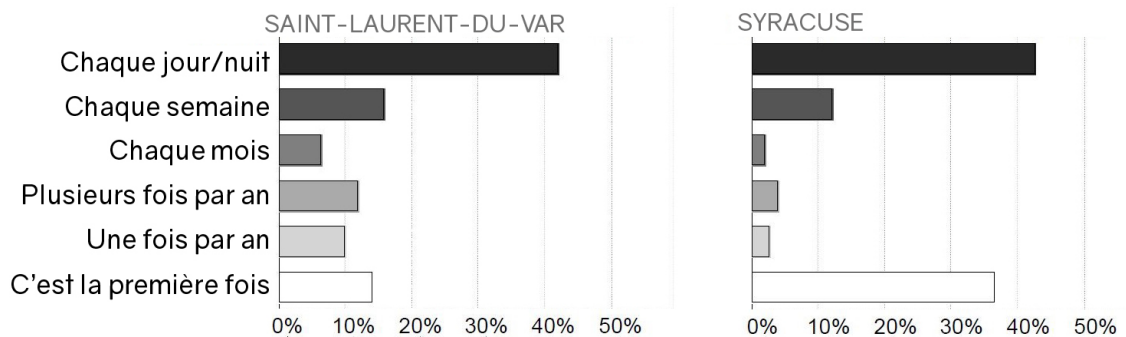


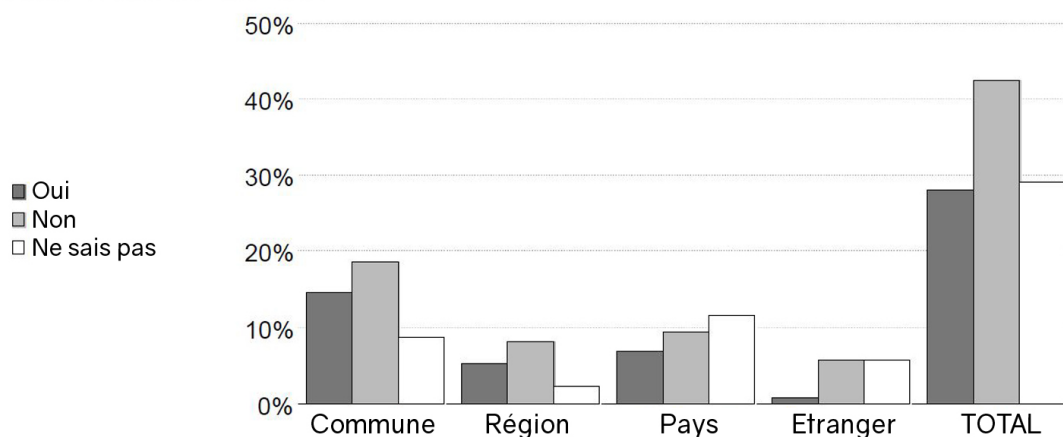
FIGURE 2.6 – Résultats à la question "Venez vous souvent ici?".  
Réalisation : Plattard, O., 2017 d'après les données Lavigne (2014).



## CHAPITRE 2. LES SITES D'ÉTUDE

D'autres résultats permettent d'en savoir un peu plus sur la population présente à Saint-Laurent-du-Var et Syracuse (Figures 2.5, 2.6). Il ressort que la population qui habite ces territoires a une implantation plutôt durable. De plus, la population touristique se répartit équitablement dans les deux cas entre des séjours de quelques heures et de quelques jours. Là où les réponses diffèrent entre les deux communes est sur le nombre de fois où la personne interrogée y est venue. Syracuse a beaucoup plus de personnes présentes pour la première fois, qui auront donc une connaissance plus restreinte de la commune ; tandis qu'à Saint-Laurent-du-Var, on retrouve un tourisme plus régulier, ce qui confirme l'aspect touristique balnéaire familial de la commune. Cette information rejoint aussi le fait qu'il y a plus de personnes venant de la région ou de la France sur cette commune qu'à Syracuse, une population touristique plus à même de revenir d'une année sur l'autre dans la commune.

### SAINT-LAURENT-DU-VAR



### SYRACUSE

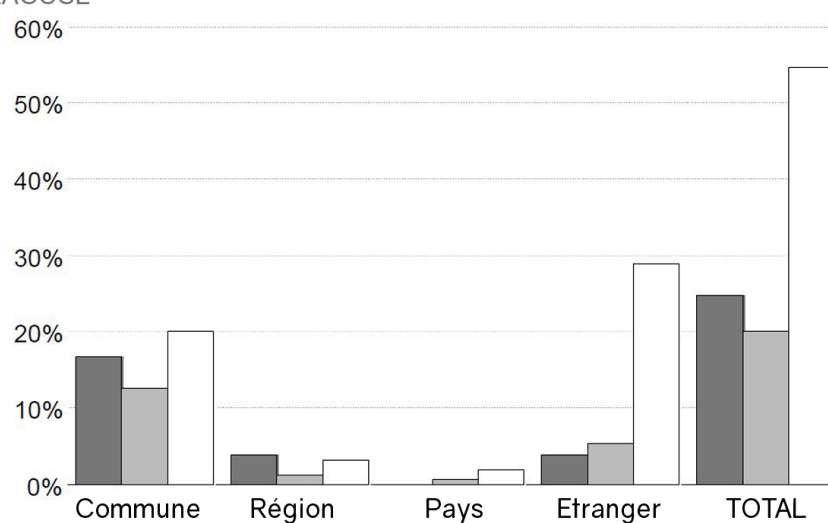


FIGURE 2.7 – Résultats à la question "Pensez-vous qu'il y a déjà eu un tsunami ici?"

Réalisation : Plattard, O., 2017 d'après les données Lavigne (2014).

A travers ces enquêtes, il est possible d'analyser le niveau de connaissance de l'aléa et de l'exposition au tsunami de la population. En effet, il est peu connu des personnes interrogées sur ces deux sites qu'un tsunami peut y survenir. Comme le montre les graphiques, pour les deux sites d'étude, 3/4 des personnes enquêtées ne savent pas ou ne pensent pas qu'un tsunami est déjà survenu sur ces territoires (Figure 2.7). Dans les deux cas, 15 à 20% de la population locale semble savoir qu'un tsunami a déjà impacté le territoire. Dans le cas de Saint-Laurent-du-Var, les gens se souviennent du glissement de terrain lié à la construction de l'aéroport de Nice qui a engendré un tsunami en 1979. En ce qui concerne Syracuse, les dates sont plus confuses entre les derniers tsunamis de 1990 et 1908. La réponse de l'éventualité d'un tsunami futur est influencée par la récurrence des questions sur les tsunamis qui ont amené les personnes enquêtées à penser qu'il y en aurait un dans l'avenir. En effet, cette question étant la dernière de la série concernant la connaissance du risque, les personnes interrogées en ont déduit que la récurrence du discours sur le risque de tsunami signifiait que ce territoire est exposé et qu'un événement peut survenir (voir annexes 8.4).

Cette méconnaissance de la possibilité d'un tsunami est d'autant plus illustrée par la réponse à la question "Selon vous, quelles catastrophes peuvent survenir ici?" (voir en annexes 8.4). Cette question ne soumet pas d'exemples de réponses et les personnes ont, en premier lieu évoqué le tremblement de terre pour les deux sites, tout comme la pollution et le risque industriel qui arrivent sur le podium. Le risque tsunami reste très en retrait, surtout à Syracuse où il représente moins de 3% du total des réponses; la région niçoise ayant encore en mémoire le tsunami de 1979, lié à la création de l'aéroport de Nice qui engendra un glissement de terrain sous-marin, la population évoque davantage ce risque, notamment au niveau local, ce qui amène ce risque en 4ème position avec près de 9% du total des réponses. Le risque de séismes est plus souvent évoqué dans les deux sites. A Syracuse, cette connaissance du risque sismique peut s'expliquer par la présence de plans d'évacuation en cas de tremblement de terre en ville et la mise en avant de la sismicité de la Sicile de manière plus générale; en ce qui concerne la région niçoise, le risque sismique est aussi mis en avant par les autorités, notamment à travers les DICRIM<sup>8</sup>. Le risque de pollution est aussi très présent sur le littoral français tout comme à Syracuse avec la présence du site pétrochimique du Priolo, au Nord de la commune.

Nous avons vu que la population interrogée n'imagine pas qu'un tsunami puisse impacter le territoire où elle se trouve. Les images des tsunamis qui ont été véhiculées par les médias montrent des vagues de très grande ampleur au Japon ou en Indonésie et qu'il est difficile de transposer en Méditerranée. Cependant, lorsqu'il a été demandé, selon eux, la hauteur de vague de l'évènement à venir, la réponse fut à plus de 30% pour la région niçoise et plus de 40% pour Syracuse, une hauteur de plus de 10 mètres (Figure 2.8). Cette réponse montre bien l'influence de la médiatisation de ce type d'évènement avec un effet négatif qui est la sous-estimation de la dangerosité d'un tsunami de plus petite hauteur.

---

8. Document d'Information Communal sur les RISques Majeurs

## CHAPITRE 2. LES SITES D'ÉTUDE

En effet, lorsque l'on évoque une hauteur d'eau de 2 mètres, cela semble dérisoire, alors que l'impact peut être mortel sur une plage notamment en période estivale.

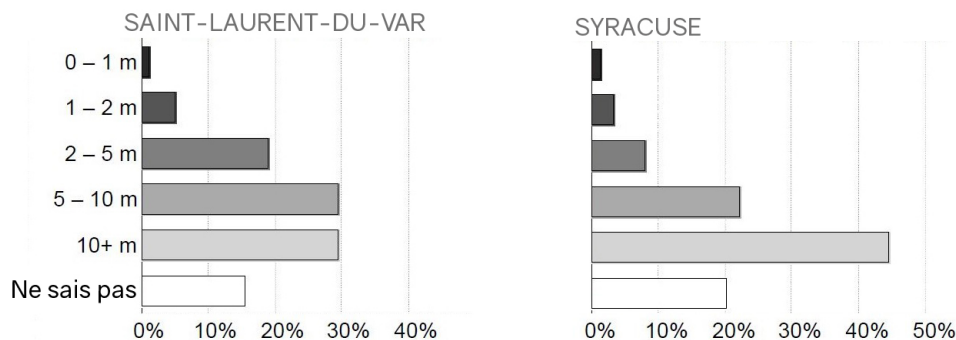


FIGURE 2.8 – Résultats à la question "Selon vous, quelle sera la hauteur maximum d'un tsunami ici ?".

Réalisation : Plattard, O., 2017 d'après les données Lavigne (2014).

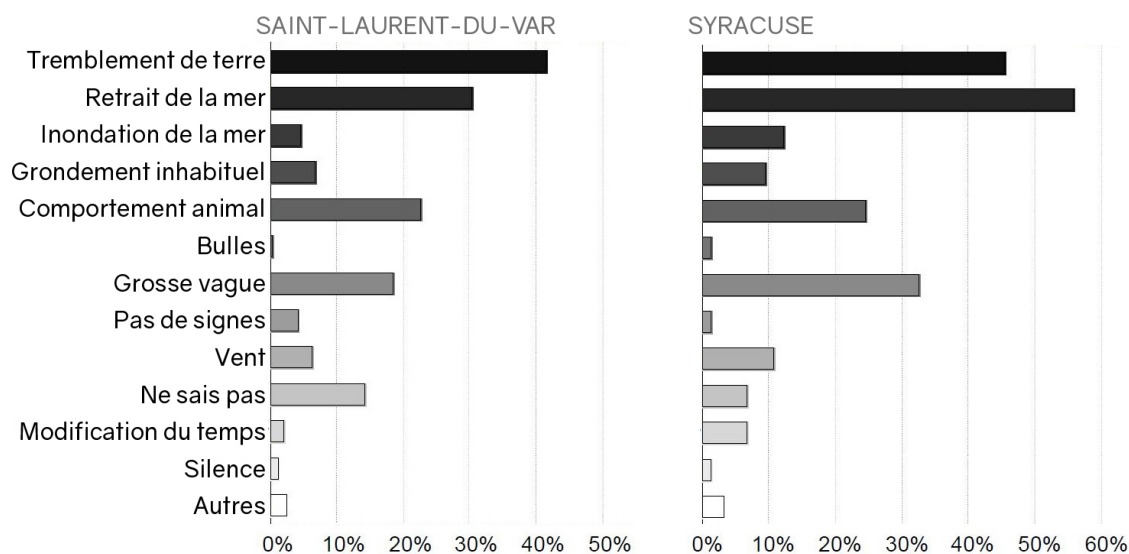


FIGURE 2.9 – Résultats à la question "Quels sont les indicateurs qu'un tsunami va survenir bientôt (signes précurseurs) ?".

Réalisation : Plattard, O., 2017 d'après les données Lavigne (2014).

Néanmoins, la médiatisation du phénomène de tsunami, notamment depuis celui de 2004 en Indonésie, a permis une meilleure connaissance des signes précurseurs à l'arrivée du tsunami. Aussi bien à Saint-Laurent-du-Var qu'à Syracuse, environ 40 à 50% des personnes interrogées pensent être sensibles à un séisme ou un retrait de l'eau comme signe

alertant de l'arrivée d'un tsunami (Figure 2.9). Il est également possible que cette médiatisation ait augmenté la capacité de réaction de la population et plus spécifiquement en cas de secousse sismique ou de retrait de l'eau, réduisant le comportement meurtrier de la curiosité tel qu'il avait pu être observé en 2004 en Indonésie. Il ne faut toutefois pas oublier que cette exposition médiatique de ces méga-tsunamis indonésien et japonais peut aussi avoir un effet controversé de faire sur-réagir les personnes en leur donnant un comportement exagéré.

### 2.2.2 Réaction et comportement d'évacuation

Concernant la réaction face à ces signes précurseurs visibles ou ressentis à l'arrivée d'un tsunami, même si la médiatisation des événements récents permet de mieux les connaître, la réaction des personnes n'est pas automatique. En effet, même si les signes précurseurs reconnaissables les plus cités sont les secousses sismiques et le retrait de l'eau, environ 30% des personnes interrogées n'envisagent pas de bouger de la plage où elles se situent suite à un tremblement de terre ressenti sur la côte niçoise. A Syracuse, dans le même contexte, plus de 80% des personnes envisagent de s'éloigner du front de mer (Figure 2.10). Le séisme seul constitue donc un événement suffisant pour alerter la grande majorité des personnes même si, a contrario, une très grande part de la population n'envisage pas de réaction.

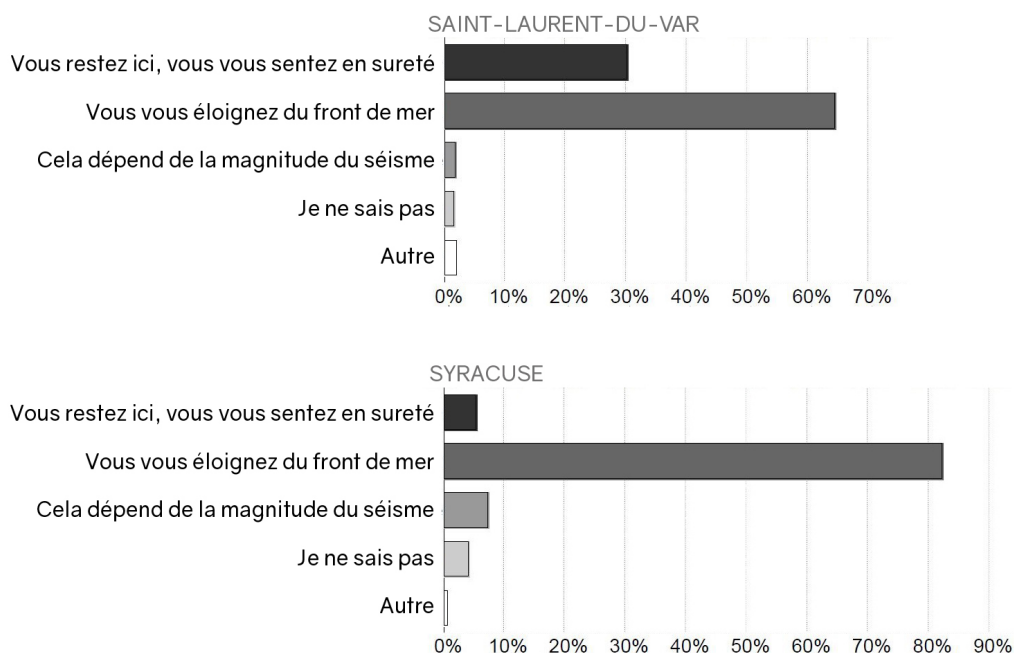


FIGURE 2.10 – Résultats à la question "Vous ressentez un tremblement de terre tandis que vous êtes sur le bord de mer/la plage...".

Réalisation : Plattard, O., 2017 d'après les données Lavigne (2014).

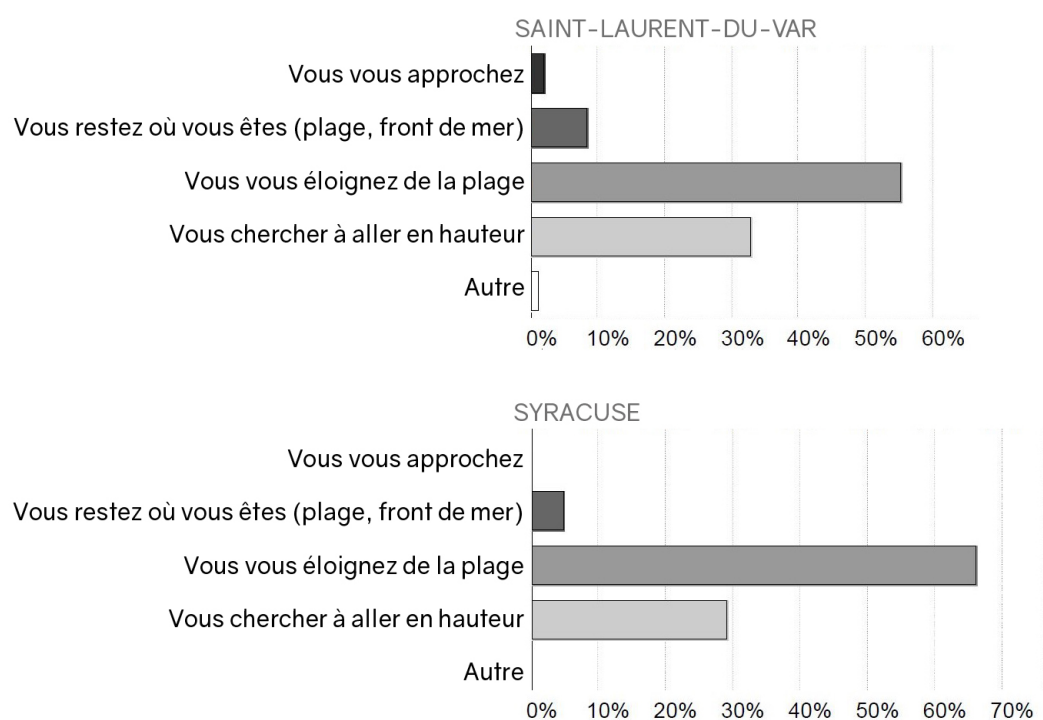


FIGURE 2.11 – Résultats à la question "Le niveau de la mer est descendu rapidement, ce qui est surprenant en Méditerranée, puis vous voyez une vague blanche (photo), que faites-vous?".

Réalisation : Plattard, O., 2017 d'après les données Lavigne (2014).

Dans le cas d'un retrait visible de l'eau, sur les deux sites, moins de 10% des personnes interrogées n'envisagent pas de fuir, la part la plus importante de ces personnes est à nouveau issue des questionnaires niçois. Une grande part de la population ne bouge donc pas du bord de mer en cas de tremblement de terre, en revanche, si l'eau se retire et qu'une vague semble venir, une majorité de personnes se mettent à fuir (Figure 2.11). Cela équivaut donc à une fuite à la vue de l'eau qui arrive et non une fuite anticipée. Le délai entre l'aléa précurseur et l'arrivée du tsunami pouvant être très court, cette configuration d'évacuation sera à prendre en compte dans le modèle. La vague arrivant plus vite que ne fuient les personnes, cela permet de mettre en avant des problématiques d'évacuation intéressantes.

Lorsque l'on s'intéresse de plus près à l'alerte et à l'évènement en tant que tel, il est visible que la population n'est pas vraiment au courant des dispositifs de préparation et de prévention existants. En effet, à la question sur l'existence d'un système d'alerte, seuls 20% à Saint-Laurent-du-Var et 3% à Syracuse des personnes interrogées pensent qu'il existe un système d'alerte (Voir Annexes 8.4). Or en France, le CEA est responsable de la veille et de l'alerte en cas de tsunami ainsi qu'un TWS (Tsunami Warning System. Voir chapitre 3)

veille pour la zone Méditerranéenne et Atlantique Nord.

De plus, lorsqu'il est question du temps d'évacuation après l'alerte, environ 90% des personnes interrogées émettent la volonté de fuir immédiatement. Cependant, ce résultat montre là une volonté théorique de fuite car lorsque des questions plus précises sur la volonté d'évacuation sont posées, cela met en avant des résultats plus mitigés. A la question sur le délai entre l'alerte et l'arrivée de l'eau, environ 35% des personnes interrogées a Syracuse pensent avoir moins de 10 minutes de délai, cette proportion tombe à 25% pour Saint-Laurent-du-Var (Figure 2.12). Respectivement 23% et 14% des interrogés pour Syracuse et Saint-Laurent-du-Var n'ont aucune idée du délai et un pourcentage non négligeable pense avoir plus d'une heure pour réagir (respectivement 9 et 18% pour les deux sites). Ces résultats montrent bien la méconnaissance des délais et de la vitesse d'arrivée d'un tsunami sur le littoral des deux sites d'étude.

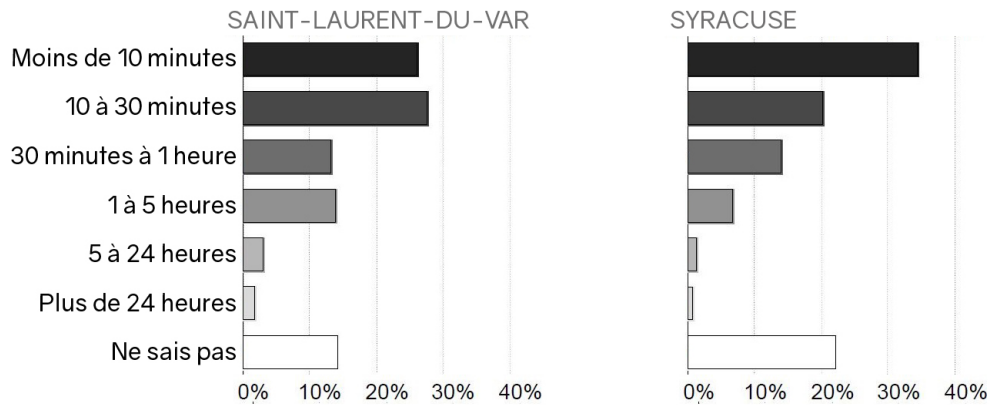


FIGURE 2.12 – Résultats à la question "Selon vous, combien de temps y a-t-il entre l'alerte de tsunami et l'arrivée de la première vague ?".

Réalisation : Plattard, O., 2017 d'après les données Lavigne (2014).

Cette volonté de réagir très rapidement est cependant moins lisible dans les résultats d'une autre question de l'enquête. Elle concerne la réaction en cas de réception d'un SMS d'alerte comportant des indications d'évacuation (Figure 2.13). Environ 60% des personnes interrogées ont répondu fuir immédiatement – avec moins de 10% qui suivent les instructions – tandis que plus de 30% essaient de confirmer cette alerte par une autre source (réseaux sociaux ou médias). Cette deuxième réponse ne permet pas une fuite immédiate même si elle est souhaitée puisqu'elle nécessite un délai de vérification de l'information pouvant être estimé jusqu'à plus de 30 minutes. Les résultats de cette question, mettent en avant la remise en cause de l'autorité et de l'alerte ainsi que la contradiction, la méconnaissance et le manque de réflexes de bons comportement en cas d'urgence de l'évacuation.

## CHAPITRE 2. LES SITES D'ÉTUDE

Il est important de souligner que la grande majorité des personnes, presque 75%, envisagent une fuite à pied et non motorisée (voir Annexes 8.4). Cependant, l'accès au front de mer de Saint-Laurent-du-Var se fait principalement à pied et l'île touristique d'Ortigia à Syracuse est pour sa grande majorité piétonne. Les scénarios d'évacuation qui seront modélisés intégreront cette donnée en ne considérant qu'une évacuation piétonne.

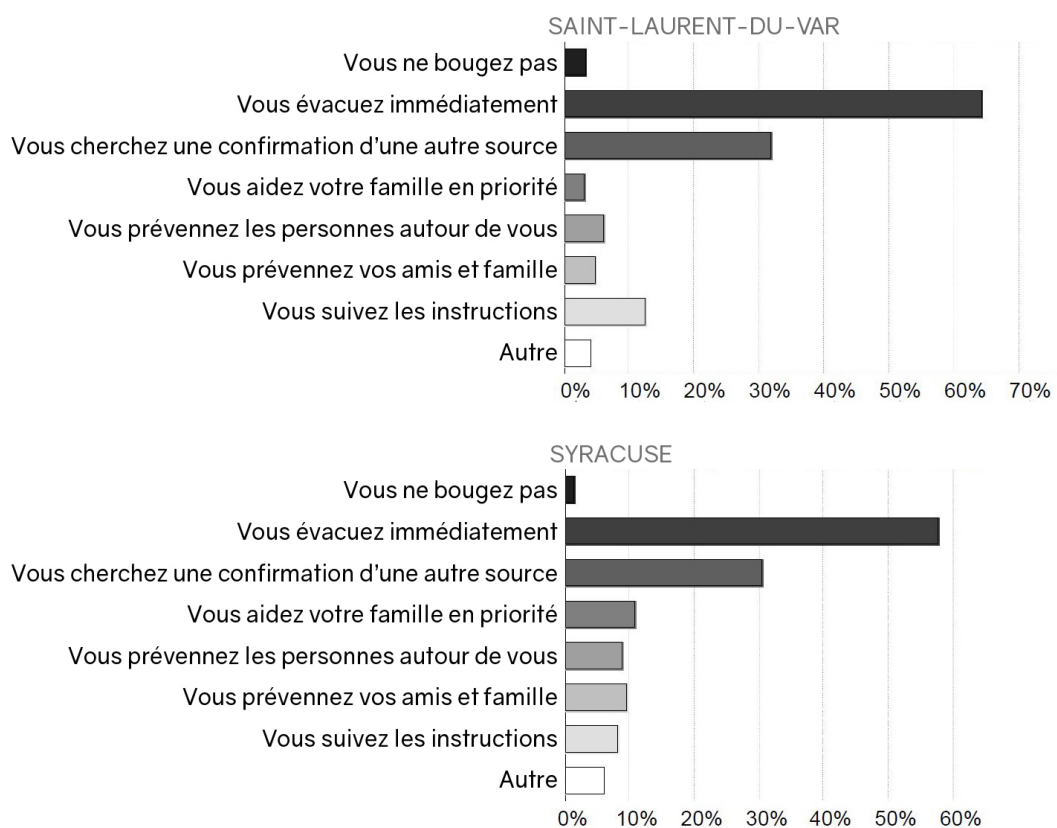


FIGURE 2.13 – Résultats à la question "Vous recevez un SMS qui indique "Attention : Tsunami! Eloignez-vous du bord de mer!", que faites-vous?".

Réalisation : Plattard, O., 2017 d'après les données Lavigne (2014).

Des itinéraires envisagés pour l'évacuation ont été demandés lors de ces questionnaires. Il s'agissait pour les personnes interrogées, dans le cas de Saint-Laurent-du-Var, de pointer sur une carte la direction vers où ils iraient trouver refuge. Il est ressorti que la plupart des personnes remonteraient vers la route et la gare qui marquent le début de la zone en hauteur de la commune. Pour Syracuse en revanche, il a été demandé des itinéraires de manière plus précise (les personnes pouvant renseigner leur intention directement sur tablette numérique). L'analyse de ces résultats montre que la grande majorité des personnes présentes sur Ortigia ne souhaitent pas rester sur l'île et vont donc retraverser la zone de jonction des deux ponts au niveau du port pour retourner du côté du "continent". Deux informations importantes se dégagent ici. La première est que les personnes vont se mettre en danger pour se mettre à l'abri. En effet, le fait de passer par la zone de jonction entre

Ortigia et le "continent" leur fait traverser la zone inondable en les rendant vulnérables lors de l'arrivée de l'eau. La seconde est le fait que les itinéraires ne sont pas les plus directs en terme de distance. Il semble ressortir que les personnes retournent sur des endroits déjà visités ou bien rebroussent leur chemin par l'itinéraire emprunté en arrivant (voir chapitre 3).



### 2.3 Des territoires à l'histoire ponctuée d'évènements

Le bassin Méditerranéen est loin d'être épargné par les tsunamis puisqu'il est le théâtre de bons nombres de séismes, éruptions volcaniques et glissements de terrain tsunamigènes. Les côtes italiennes et françaises sont exposées à ces aléas. Connaître ce à quoi sont exposés les deux territoires d'étude, permet de comprendre les évènements passés et d'anticiper les scénarios de catastrophes à venir.

#### 2.3.1 Quelle exposition aux aléas pour ces sites ?

Les sites de Saint-Laurent-du-Var et de Syracuse, tous deux exposés au risque de tsunami ne sont cependant pas exposés aux mêmes aléas sources, aux mêmes intensités et temporalités.

*"A Syracuse, nous ne sommes pas comme les italiens, nous sommes africains."* Cette phrase est une des premières que j'ai entendu prononcée par des locaux dans la cité sicilienne. Elle m'a interpellée pour montrer toute l'importance de la formation géologique dans l'histoire de Syracuse. En effet, les plaques tectoniques Africaine et Eurasienne se "rencontrent" au beau milieu de la Sicile, la ville étant sur la plaque Africaine, tandis que Catane, quelques dizaines de kilomètres au nord de Syracuse se situe sur la plaque Eurasiatique.

Cette confrontation entre ces deux plaques majeures font du bassin Méditerranéen une zone active en séismes et volcans, la plaque africaine remontant vers la plaque eurasiatique de 4 à 7 mm par an (CENALT).

Pour la partie Ouest de la Méditerranée, deux principales régions sismiques sont intéressantes puisqu'elles sont à même d'engendrer des tsunamis impactant la côte française et donc Saint-Laurent-du-Var.

La première se situe le long du littoral Algérien (Figure 2.14). Les séismes de cette zone sont généralement profonds et de magnitudes modérées (autour de 4). Cependant, des séismes plus importants ont déjà été enregistrés comme celui d'El Asnam en 1980 (Mw 7.3) et celui de Boumerdès le 21 mai 2003 (Mw 6.7) (Tinti, 2015). Ce dernier tremblement de terre engendra un tsunami qui traversa la Méditerranée, atteignant les rivages des Baléares et de la France.

La seconde est la zone de la mer Ligure située entre Gênes et Nice (Figure 2.15). Il s'agit d'un système de failles parallèles à la côte. Selon Bethoux *et al.* (1992), la mer Ligure serait en train de se fermer ce qui entraîne une compression du système de failles. Cette zone a engendré plusieurs tremblements de terre récemment comme celui du 26 décembre 1989 d'une magnitude de 4.5 et celui du 15 avril 1990 d'une magnitude de 4.3. Ce fut aussi l'origine du séisme de la faille Ligure de 1887 (Larroque *et al.*, 2012). Sa magnitude est

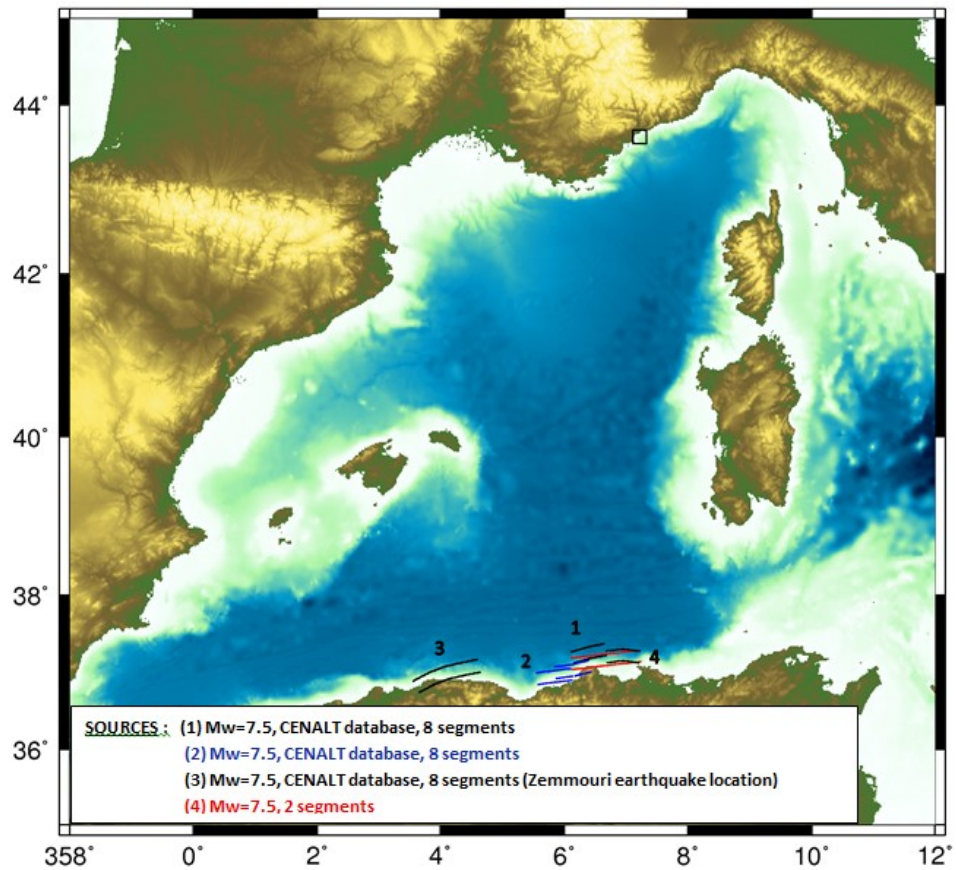


FIGURE 2.14 – Localisation des failles sismiques au Nord de l'Algérie pouvant engendrer des tsunamis impactant la côte niçoise.

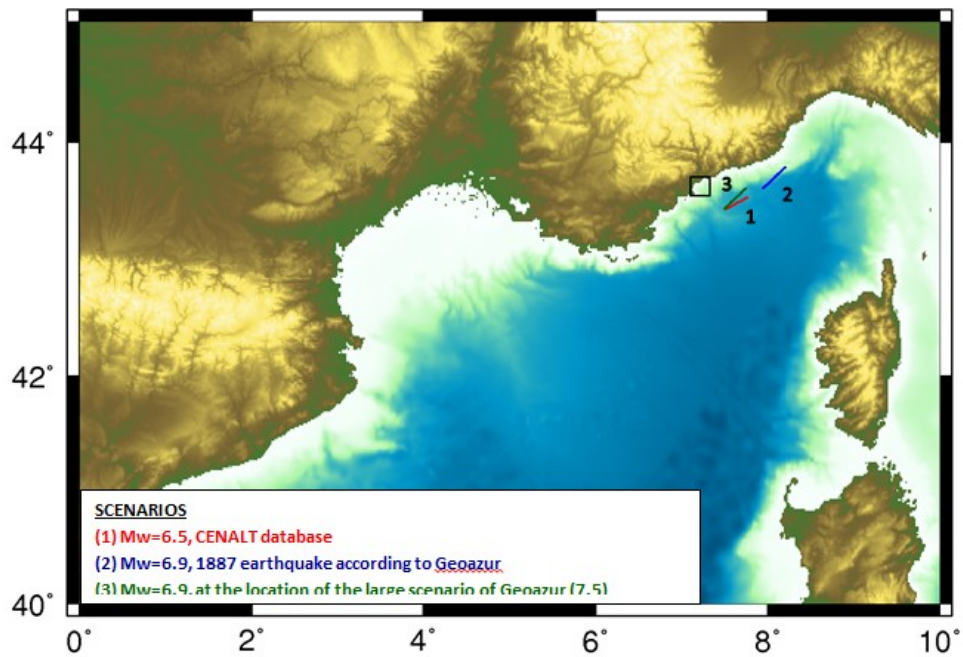


FIGURE 2.15 – Localisation des failles sismiques Ligures pouvant engendrer des tsunamis impactant la côte niçoise.

Sources : CEA, Gailler *et al.* (2016).

## CHAPITRE 2. LES SITES D'ÉTUDE

estimée à 6.5 et il engendra un tsunami qui a impacté le littoral de la région niçoise (Ioualalen *et al.*, 2014). La majorité de l'activité sismique Ligure ne dépasse pas la magnitude de 6, cependant d'importants glissements de terrains surviennent suite aux secousses. Les sources étant situées proches du littoral azuréen, le délai entre la secousse et l'arrivée du tsunami est court.

En ce qui concerne Syracuse, la source sismique du tsunami peut aussi être proche ou plus éloignée (Figure 2.16) (Lorito *et al.*, 2008). Cette deuxième option est la conséquence d'un tremblement de terre hellénique. En effet, la zone de subduction de la plaque africaine sous la plaque de la mer Egée, au large de la Crête, est propice aux séismes tsunamigènes, comme le montrent les paléoséismes tel que celui de l'an 365 (Shaw *et al.*, 2008; Stiros, 2010; De Martini *et al.*, 2010).

Plus proche de Syracuse, deux zones sont des candidates de séismes tsunamigènes. Il s'agit du détroit de Messine au nord de la Sicile et de l'escarpement Hyblaeon-Malta à l'est c'est-à-dire au large de Syracuse (Argnani *et al.*, 2012). Cet escarpement longe la côte sud-est Sicilienne et se trouve en bordure de la zone de subduction de la mer Ionienne. Il constitue également une des sources possibles pour le tsunami de référence de 1693. En effet, plusieurs zones sont en débat pour déterminer la source du séisme et tsunami de 1693 (Argnani *et al.*, 2012; Gallais *et al.*, 2013, 2014). Néanmoins, à plus grande échelle, cette zone plus large de subduction de la plaque africaine sous la plaque eurasiatique est bien la source de ces séismes tsunamigènes de référence (Shaw *et al.*, 2008; Stiros, 2010).

Zone Source	Nombre de failles	Magnitude (Mw)
HM	10	7,2 - 7.4
MS	4	7.2
IS	8	7.1 - 8.3
CO	38	7.1
WH	21	7.1 (iles Ioniennes) 8.3 - 8.5 (Sud Céphalonie)

TABLE 2.1 – Failles sismiques prises en compte, par zone, pour Syracuse, correspondance avec la Figure 2.16

Les fonds sous-marins peuvent aussi être sujets à des glissements de terrain pouvant engendrer des tsunamis sur les sites d'étude.

Au large du littoral niçois, les fonds sous-marins sont sédimentaires et peu stables (Ruellan *et al.*, 2006) (Figure 2.17). Entre 70 et 80% des glissements de terrain ont lieu aux embouchures du Var et du Paillon mais sont considérés de petites tailles (inférieurs à la classe 2 - medium). Cependant entre le Var et le Paillon et au large de l'aéroport de Nice, 34% des glissements de terrain sont importants (classe 3 - large) selon Ruellan *et al.* (2006). Ces derniers sont cependant moins fréquents mais les auteurs estiment qu'une



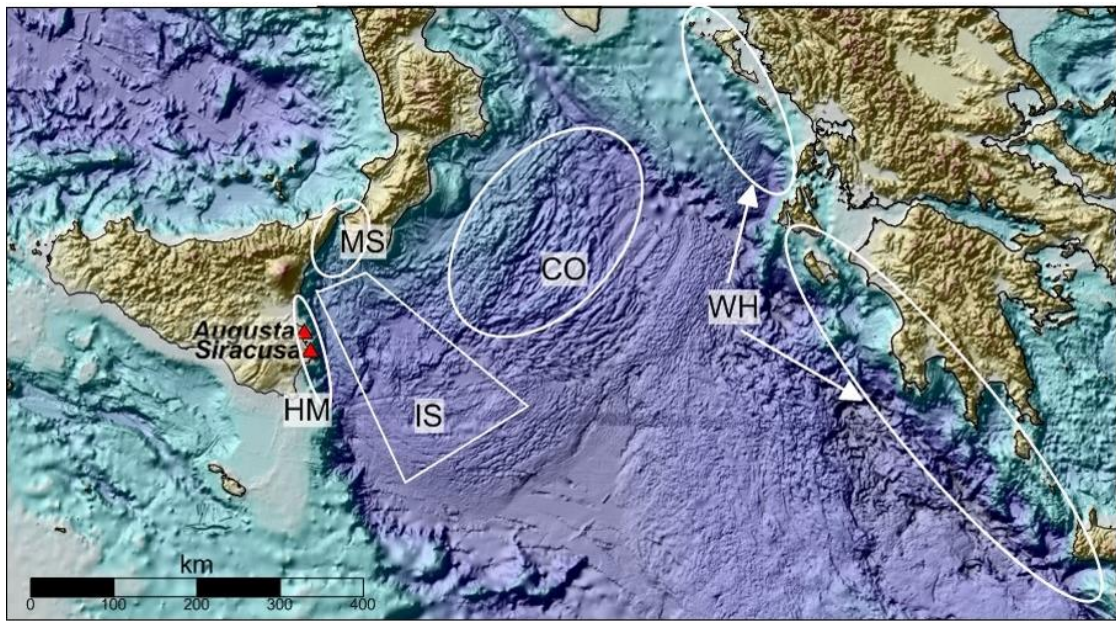


FIGURE 2.16 – Bathymétrie et sources d'exposition au risque sismique de Syracuse. Les différentes zones : HM – Hyblaean-Malta escarpment ; MS – Messina Straits ; IS – Ionian Subduction zone ; CO – Calabria Offshore ; WH – Western Hellenic Trench.  
Sources : Tinti (2015).

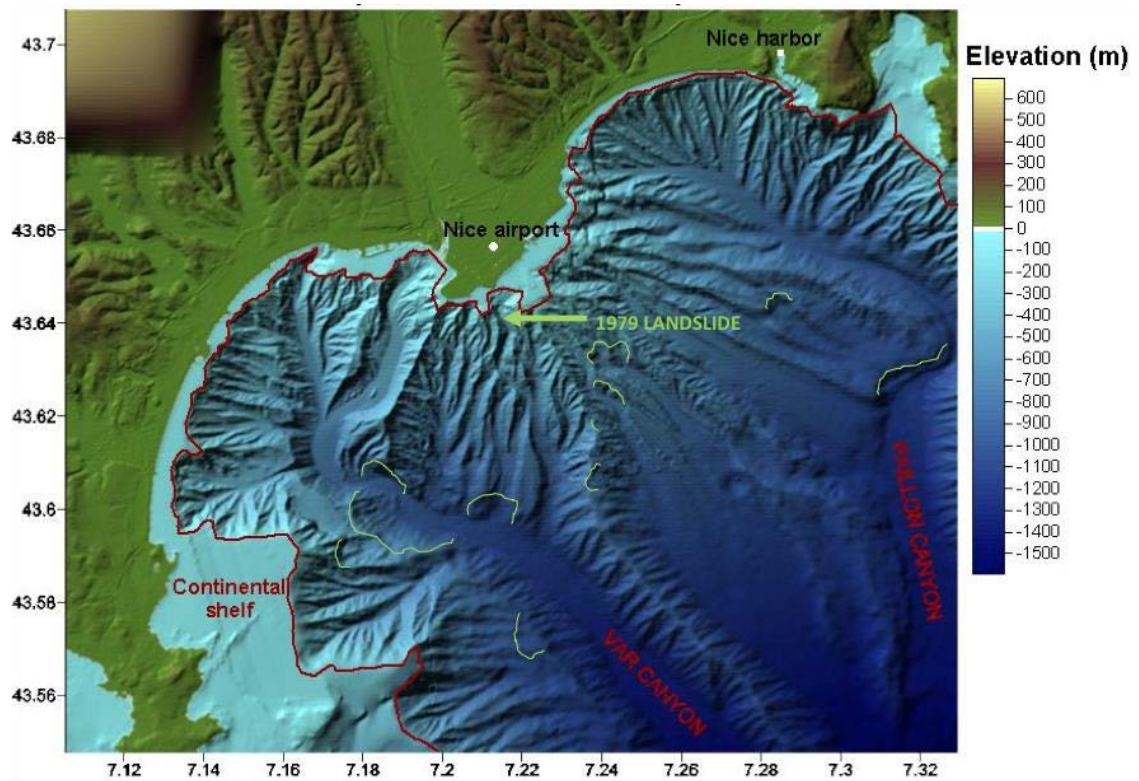


FIGURE 2.17 – Bathymétrie du littoral azuréen avec indication des zones de glissement de terrain.

Sources : Ruellan *et al.* (2006).

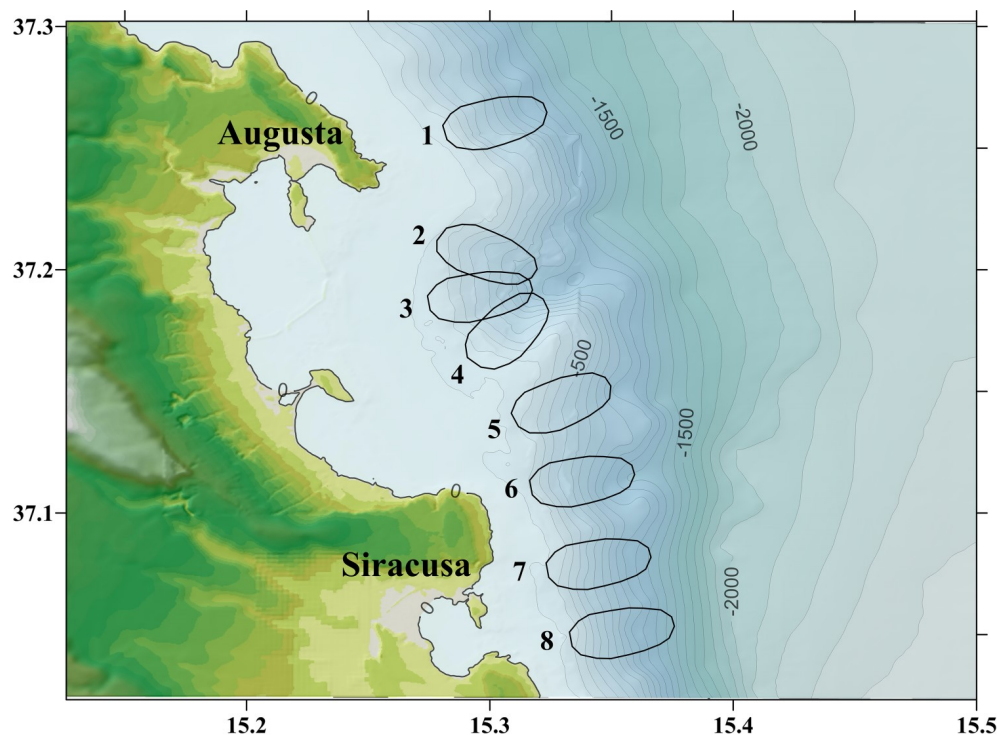


FIGURE 2.18 – Sources d'exposition aux glissements de terrain sous-marins de Syracuse  
Sources : Paparo *et al.* (2017).

secousse sismique suffirait à déclencher un important glissement de terrain dans cette zone (récurrence tous les 70-250 ans).

La côte de Syracuse n'est pas à l'abri non plus d'un tsunami engendré par un glissement de terrain. Comme le démontre Paparo *et al.* (2017), l'escarpement Hyblaeen-Malta constitue la zone privilégiée pour des glissements de terrain tsunamigènes (Figure 2.18). Cet escarpement est d'autant plus une source privilégiée qu'il peut combiner un tremblement de terre et un glissement de terrain.

### 2.3.2 Les évènements passés

*"Là où la terre a tremblé, elle tremblera encore. . .  
Il se produira bientôt une catastrophe sur la Côte d'Azur."  
Haroun Tazieff, 1982.*

Cette phrase alarmiste d'Haroun Tazieff lors d'une conférence à Nice en 1982, n'est pas, sur le moment, apparue comme raisonnable. Cependant, on connaît la récurrence des évènements sismiques et des tsunamis qu'ils génèrent, et aussi bien la côte française que sicilienne ont connu des évènements majeurs par le passé. Ces catastrophes servent de références et permettent d'envisager les probables scénarios à venir.

### Les évènements de référence pour Saint-Laurent-du-Var

*Les séisme et tsunami de la faille Ligure le 23 février 1887.*

L'épicentre du séisme de la faille Ligure de 1887 se situe environ 20 km au large de la côte. La magnitude estimée de ce tremblement de terre qui fit plus de 600 victimes en France et en Italie est de 6.5 Mw. Ce tremblement de terre engendra un tsunami avec un run-up estimé entre 1 et 2 mètres (Eva et Rabinovich, 1997; Larroque *et al.*, 2012; Terrier, 2009; Ioualalen *et al.*, 2013).

Cependant il semble que la région niçoise n'ait pas eu à subir des vagues supérieures à 1 mètre. Suite au séisme, le tsunami a impacté le littoral niçois moins de 20 minutes après (Sahal *et al.*, 2013).

*Les glissement de terrain et tsunami de l'aéroport de Nice le 16 octobre 1979.*

Le terre-plein était en cours de confection lorsque l'effondrement d'une digue se produisit. Le poids du nouveau terre-plein a entraîné un mouvement de terrain sous-marin dans une zone, entre le Paillon et le Var, très propice à ces phénomènes. Dix millions de m<sup>3</sup> de sédiments ont engendré une série de 3 vagues qui ont déferlées entre Antibes et Beaulieu entraînant la mort de 9 personnes (Lambert *et al.*, 2013).

Huit minutes ont suffi pour que les vagues arrivent sur la côte, avec une hauteur d'inondation jusqu'à 3.5 mètres localement et allant jusqu'à 150 mètres dans les terres (Sahal et Lemahieu, 2011; Ruellan *et al.*, 2006). La vitesse des vagues a été estimée après modélisation, avec des pointes jusqu'à 3 m/s (Le Roy *et al.*, 2012).

*Les séisme et tsunami de Boumerdès-Zemmouri le 21 mai 2003.*

Ce tremblement de terre secoua le Nord de l'Algérie avec un épicentre à 50 kilomètres à l'est d'Alger. Le séisme d'une profondeur de 8 km fut d'une magnitude de 6.9 Mw (Alasset *et al.*, 2006).

Cet évènement engendra un tsunami qui traversa la Méditerranée jusqu'aux Baléares où une hauteur de 3 mètres de run-up fut relevée ((NGDC/WDS)/NOAA, 2016a) ainsi que jusqu'aux côtes françaises avec une hauteur de moins d'un mètre. Le temps d'arrivée du tsunami après l'évènement sismique fut d'environ 1 heure 30 (Sahal *et al.*, 2013).

### Les évènements de référence pour Syracuse

*Les séisme et tsunami du 11 janvier 1693.*

Le tremblement de terre de 1693 fut le plus puissant de l'histoire italienne avec une magnitude de 7.4 Mw (Argnani *et al.*, 2012). La localisation de l'épicentre de ce séisme fait encore débat aujourd'hui et plusieurs zones possibles ont été explorées (Tinti *et al.*, 2001). Celle qui semble la plus cohérente est la faille qui se situe dans le Val di Noto, sûrement au large d'Augusta et non loin de l'escarpement ce qui a pu provoquer un glissement de terrain suite à la secousse sismique (Argnani *et al.*, 2012; Tinti et Maramai, 1996; Tinti

## CHAPITRE 2. LES SITES D'ÉTUDE

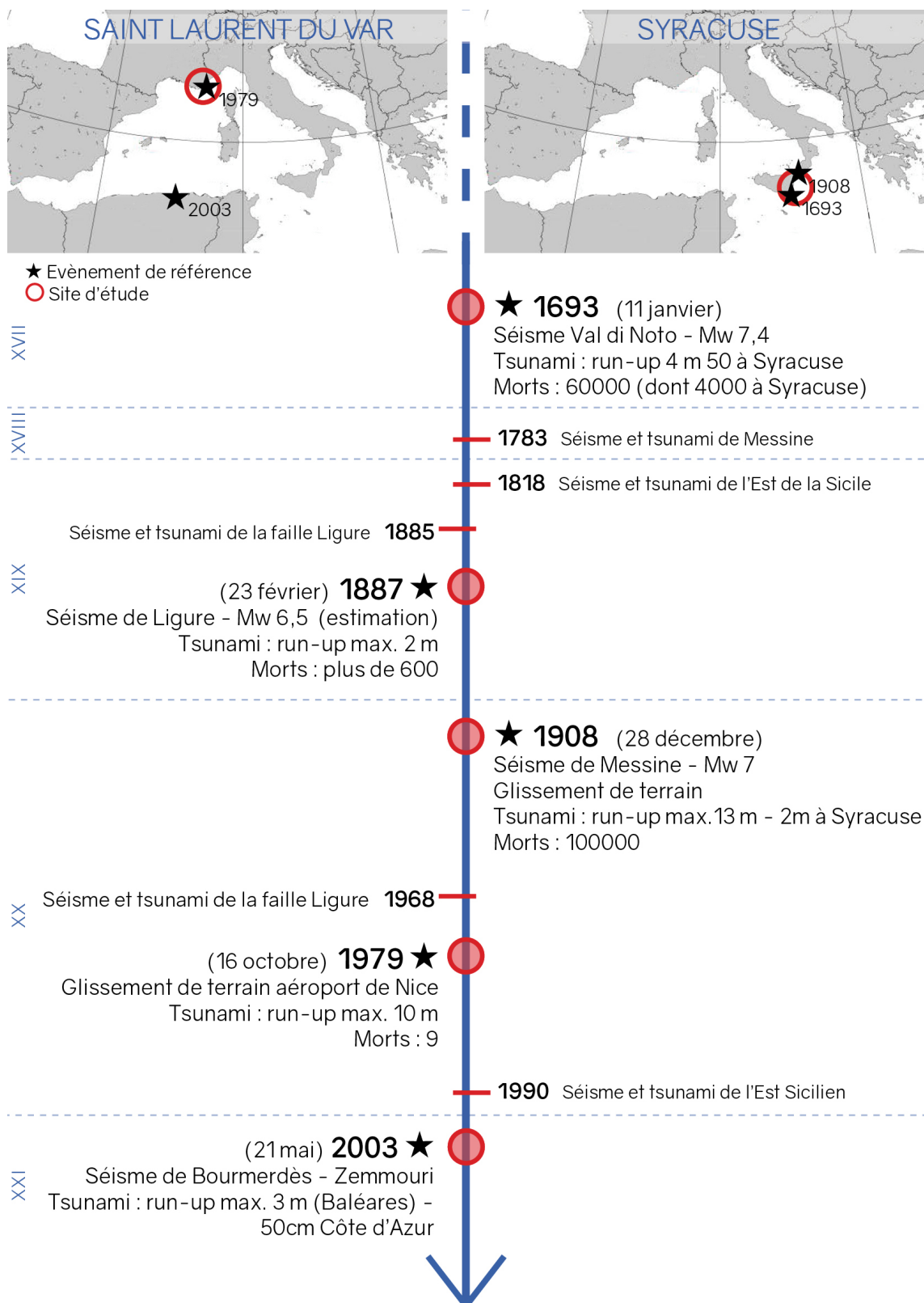


FIGURE 2.19 – Frise chronologique des évènements majeurs de tsunami à Saint-Laurent-du-Var et Syracuse de 1693 à nos jours.

Réalisation : Plattard, O., 2017, d'après les données NOAA (consultées en novembre 2017).



*et al.*, 2007). La ville de Syracuse et les autres communes environnantes furent totalement détruites. Cet événement entraîna la mort de plus de 70 000 personnes dans le Val di Noto soit environ 70% de la population. Le tsunami atteignit des hauteurs de 4 à 5 mètres à Syracuse et de 8 à 15 mètres notamment à Augusta (Tinti *et al.*, 2007).

*Les séisme et tsunami du Déroit de Messine du 28 décembre 1908.*

Ce tremblement de terre de magnitude 7.2 Mw qui engendra un tsunami d'une hauteur oscillant de 3 m pour Messina jusqu'à 12 m par endroit comme à Sant'Alessio, fit plus de 100 000 victimes (Tinti et Maramai, 1996; Tinti *et al.*, 2007). Sur la côte de Syracuse, la hauteur fut d'environ 1 à 2 mètres.

Même si ils n'ont pas impacté directement la commune de Syracuse, ces séisme et tsunami correspondent au type d'évènement pouvant survenir sur le site d'étude. Ils sont donc pris comme évènement de référence pour les tsunamis à Syracuse.

### 2.3.3 Scénarios et "worst case"

Basés sur ces évènements de références, des scénarios de tsunamis à venir sont réalisés. Ils permettent, en fonction de la magnitude et de la localisation du tremblement de terre source de définir les délais d'arrivée du tsunami ainsi que sa hauteur d'inondation ou sa vitesse. Le scénario de référence envisagé dans sa configuration la plus impactante pour un territoire est considéré comme un "*worst-case*", soit littéralement "le pire cas".

Pour chacun des sites, deux scénarios *worst-case* avec séisme (avec et sans secousse sismique ressentie) et un scénario de glissement de terrain sont mis en avant. Des scénarios de tsunami liés à un tremblement de terre ont été modélisés dans le cadre du programme Astarte. La majorité des données sont tirées de ces scénarios (Tinti, 2015; Gailler *et al.*, 2016) (Tableau récapitulatif des scénarios en figure 2.23).

Dans le cas de Saint-Laurent-du-Var, un premier scénario prend en considération un tremblement de terre situé au Nord de l'Algérie (Figure 2.14), un second retient la configuration d'un tremblement de terre de la faille Ligure du même type que celui de 1887 (Figure 2.15), enfin, le dernier scénario est celui d'un glissement de terrain dans la baie des Anges similaire à celui de l'aéroport en 1979. Pour la mise en place des simulations, le CEA s'est basé sur la base de données des failles réalisée par le CENALT (Gailler *et al.*, 2013). Les magnitudes des ruptures de failles modélisées sont estimées sur la base des séismes historiques. Les sources sont les séismes des failles de la zones Ligure et du Nord de l'Algérie (Figures 2.14, 2.15). Les sources Algériennes sont à même d'engendrer un tsunami ayant un plus fort impact sur le littoral niçois. En effet, la magnitude envisagée est plus grande que pour un séisme de la faille Ligure et l'orientation permet à l'onde de conserver toute son énergie jusqu'aux côtes françaises (Gailler *et al.*, 2016).



— **Scénario 1 : un tsunami engendré par un séisme au Nord de l'Algérie.**

Ce scénario se base sur le tremblement de terre du 10 octobre 1980 d'El Asnam dont la magnitude (7,3 Mw) est la plus importante enregistrée pour la région. Cette magnitude a été relevée à 7,5 Mw (Gailler *et al.*, 2016).

La modélisation de tsunami réalisée par le CEA dans le cadre du programme Astarte, révèle une arrivée de première vague sur le littoral niçois 1 heure 15 après le séisme (Figure 2.20). La hauteur maximum d'inondation est atteinte après 2 heures 45. Avec ce scénario, la secousse sismique n'est pas ressentie sur le littoral français, en revanche, le délai est suffisant pour une alerte préalable.

La hauteur d'inondation maximum est envisagée à 2,3 mètres pour la zone de Saint-Laurent-du-Var et de l'aéroport de Nice. Pour cette même zone, la vitesse de l'eau issue de la modélisation est de 6 à 8 m/s, soit 22 à 29 km/h (Figure 2.21).

— **Scénario 2 : un tsunami engendré par un séisme de la faille Ligure.**

Pour ce scénario, moins de paramètres ont été diffusés par le CEA qui n'a pas relevé de hauteur d'eau supérieure à quelques dizaines de centimètres sur le littoral niçois et n'a donc pas retenu ce scénario comme un *worst-case* (Tinti, 2015). Cependant, dans les simulations d'évènements tsunamis issus d'un séisme de la faille Ligure, une hauteur d'inondation de 3 à 4 mètres est souvent citée (Ioualalen *et al.*, 2013; Sahal *et al.*, 2013).

Un scénario peut donc être envisagé avec un séisme d'une magnitude de 6,9 environ, engendrant un tsunami de 3,5 mètres avec un délai d'arrivée de la première vague sur la côte situé à 15 minutes après la secousse sismique (Figure 2.20). La vitesse de l'eau pouvant être envisagée dans la même valeur que pour le scénario 1. Dans ce scénario, une secousse sismique peut être ressentie sur le littoral français. De plus, le délai court entre la secousse et l'arrivée de l'eau ne laisse que peu de temps pour une alerte avant l'arrivée de l'eau.

— **Scénario 3 : un tsunami engendré par un glissement de terrain dans la baie des Anges.**

Le scénario lié à un tsunami engendré par un glissement de terrain fait référence à un scénario du type de celui de l'aéroport de Nice de 1979, la zone entre le Var et le Paillon étant propice aux glissements de terrain.

Un glissement de terrain de 10 millions de m<sup>3</sup> est envisagé (Ruellan *et al.*, 2006). Le délai d'arrivée de l'eau sur le littoral est très court, environ 8 minutes. Ce scénario n'inclut pas de secousse sismique pouvant indiquer un potentiel tsunami à venir puisqu'il s'agit d'un glissement de terrain comme évènement source du tsunami. De plus, le délai très court d'arrivée de l'eau sur le littoral laisse présager une situation d'évacuation à la vue de l'arrivée du tsunami et non avec une alerte préalable.

La hauteur d'inondation envisagée est de 3,5 mètres (Ruellan *et al.*, 2006). Cependant, aucune vitesse d'eau n'est annoncée pour ce scénario. L'échelle de vitesse

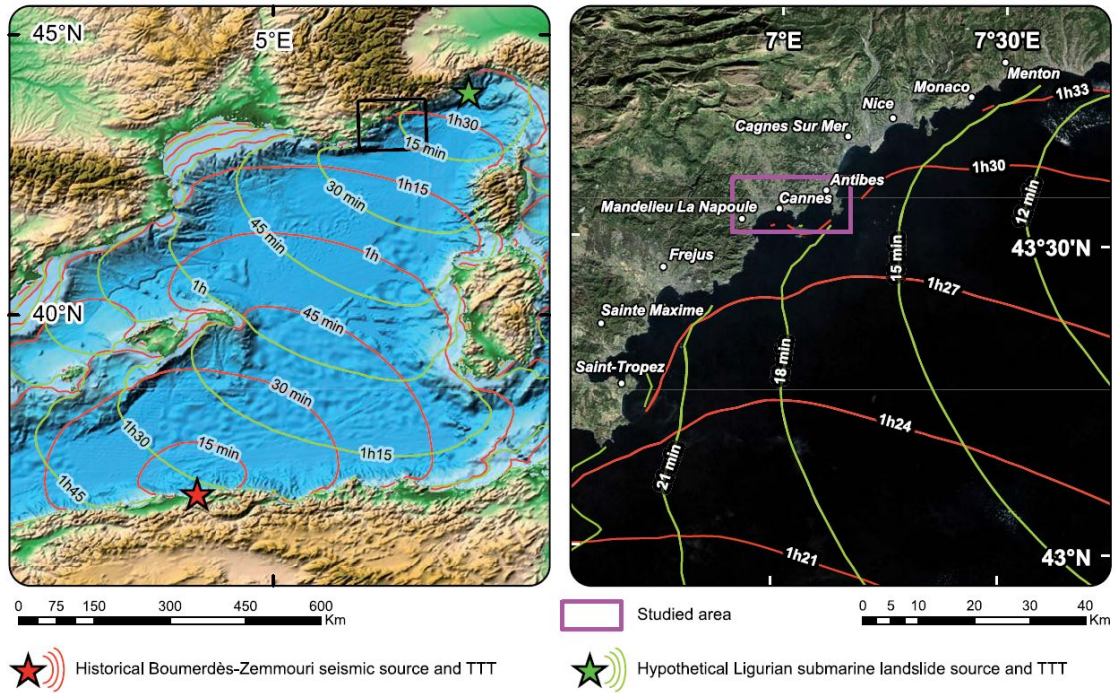


FIGURE 2.20 – Propagation de l’onde tsunami dans le cas des scénarios de type séisme de Boumerdès-Zemmouri (en rouge) et de la faille Ligure (en vert)  
Sources : Sahal *et al.* (2013).

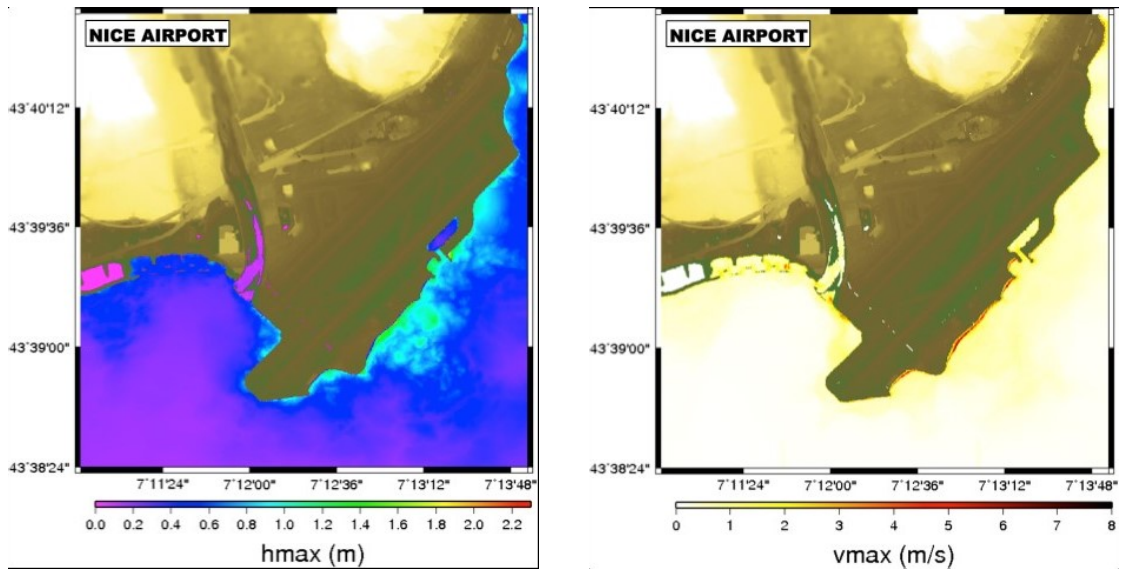


FIGURE 2.21 – Hauteur (à droite) et vitesse (à gauche) issues de la simulation du tsunami du scénario 1 pour Saint Laurent du Var.  
Sources : CEA, dans Gailler *et al.* (2016).

énoncée par le CEA pour le *worst-case* du scénario 1 peut être prise en compte dans ce scénario, à savoir 6-8 m/s.

La définition des scénarios *worst-case* pour Syracuse est un peu moins claire que pour Saint Laurent du Var. En effet, un débat anime la localisation de la source sismique du séisme de 1693 (Argnani *et al.*, 2012); de plus, la présence de traces de paléoséismes et tsunamis originaires de l'arc Hellénique (Shaw *et al.*, 2008) laisse présager des scénarios similaires dans le futur mais la zone n'a pas engendré de tsunamis impactant la côte sicilienne récemment et rend la mise en place de scénarios tsunamigènes précis plus difficile. Dans le cadre du programme Astarte, 5 sources ont été étudiées pour la mise en place de scénarios de tsunami (Tinti, 2015). Cependant, trois scénarios vont être sélectionnés et seront pris en compte dans le modèle d'évacuation. Le premier concerne le séisme de référence de 1693 avec un tremblement de terre au large de la côte sicilienne. Le second prend en compte un scénario avec un tremblement de terre plus lointain, avec une source dans l'arc Hellénique. Le dernier scénario concerne la génération d'un tsunami suite à un glissement de terrain au large de la côte sicilienne.

— **Scénario 1 : un tsunami engendré par un séisme au large de Syracuse.**

Ce scénario se base sur le tremblement de terre du 11 janvier 1693 de Val di Noto, d'une magnitude de 7,4 Mw. La zone de l'épicentre de ce séisme est encore aujourd'hui discutée mais elle est située dans la zone Hyblaean-Malta (Figures 2.16), c'est-à-dire au large de la côte Sud-Est de la Sicile (Tinti, 2015). Cette proximité avec le littoral induit une arrivée de l'eau très rapidement après la secousse sismique qui sera ressentie. L'arrivée du tsunami est envisagée 5 minutes seulement après le tremblement de terre (Argnani *et al.*, 2012). Ce délai équivaut à une arrivée quasi instantanée du tsunami et rend difficile une alerte préalable à l'évacuation.

La hauteur d'inondation qui ressort des simulations réalisées est de 5 mètres avec un maximum atteint 1 heure après le séisme (Figure 2.22) (Tinti, 2015). La vitesse de l'eau est estimée à 8 à 10 m/s, soit entre 29 et 36 km/h.

— **Scénario 2 : un tsunami engendré par un séisme à l'ouest de la Grèce.**

Ce scénario prend en compte un tremblement de terre tsunamigène de l'arc hellénique (Figures 2.16). Il s'agit ici d'une secousse envisagée d'une magnitude 8,5 Mw (Tinti, 2015) basée sur des estimations de paléoséisme dans la région daté entre -650 et -930, (De Martini *et al.*, 2010). Cependant, la source étant plus éloignée de la Sicile, les secousses ne seront pas ressenties à Syracuse. Le délai d'arrivée du tsunami sur le littoral sicilien n'est pas donné précisément dans les résultats auxquels j'ai pu avoir accès; cependant, on peut envisager une arrivée environ 1 heure à 1 heure 30 après le tremblement de terre, en se basant sur les autres scénarios et la distance entre la Sicile et la région de l'épicentre. Ce délai laisse le temps d'une alerte et d'une évacuation préalable à l'arrivée de l'eau.

La hauteur maximum d'inondation issue des simulations de cet évènement est de 6 mètres, maximum atteint 4 heures après la secousse sismique. De plus, la vitesse d'arrivée de l'eau sur le front de mer est comprise entre 6 et 10 m/s soit 29 à 36 km/h (Tinti, 2015).

— **Scénario 3 : un tsunami engendré par un glissement de terrain au large de Syracuse.**

Ce scénario prend en compte un tsunami engendré par un glissement de terrain au niveau de l'escarpement Hyblaean-Malta. Il s'agit d'un glissement d'un volume estimé à 4,8 km<sup>3</sup> (Argnani *et al.*, 2012). Le délai d'arrivée du tsunami sur la côte est de 8 minutes. N'ayant pas de secousse sismique préalable et le tsunami arrivant très vite, l'évacuation se fera sans doute à la vue de l'eau depuis le littoral.

La hauteur d'eau envisagée n'est pas définie clairement par les scénarios de simulation et oscille entre 1 et 3 mètres (Argnani *et al.*, 2012; Tinti, 2015). Cependant, les scénarios semblent profiler une hauteur d'inondation de 1 mètre pour un run-up de 3 mètres. La vitesse de l'eau n'étant pas définie, il sera utilisé la même vitesse que pour les scénarios 1 et 2 à savoir 8 à 10 m/s, soit 29 à 36 km/h.

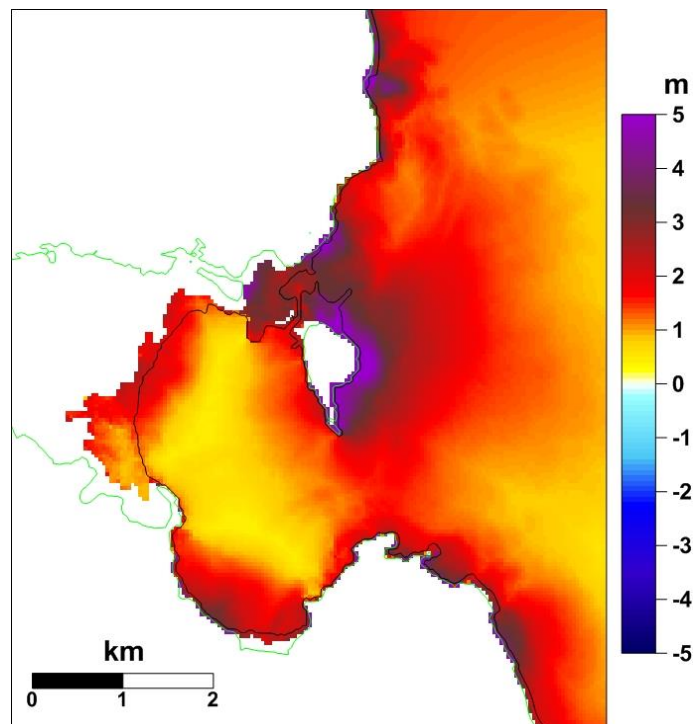


FIGURE 2.22 – Hauteur d'inondation de Syracuse dans le cas d'une simulation du scénario 1.

Sources : Tinti (2015).

Site	Localisation source	Aléa source	Magnitude (Mw)	Volume millions de m <sup>3</sup>	Délai arrivée tsunami	Hauteur d'inondation	Délai hauteur d'eau maximum	Vitesse eau	Référence
Saint Laurent du Var	Algérie Nord	Séisme	7,5	-	1h15	2,3 m	2h45	6-8 m/s 22-29 km/h	CEA, dans Gailler et al., 2016 et Tinti et al., 2015
		Séisme	7,5	-	1h30				Sahal et al., 2013
	Ligure - type 1887	Séisme	6,4 - 6,9	-	15 min				CEA, dans Gailler et al., 2016 et Tinti et al., 2015
		Séisme	6,3 - 7,5	-	18 min	4 m			Ioualalen et al., 2013
		Séisme		-		3,5 m			Sahal et al., 2013
	Baie des Anges	Glissement de terrain	-	10 millions de m <sup>3</sup>	8 min	3,5 m			Ruellan et al., 2006
Syracuse	Hyblaean-Malta - type 1693	Séisme	7,4	-	5 min	5 m	1h	8-10 m/s 29-36 km/h	Tinti et al., 2015
		Séisme	7,2	-	5 min	4 m			Argnani et al., 2012
	Détroit de Messine - type 1908	Séisme	7,2	-		1 m	2h		Tinti et al., 2015
	Arc Hellenique	Séisme	8,5	-		6 m	4h	8-10 m/s 29-36 km/h	Tinti et al., 2015
	Escarpement Hyblaean-Malta	Glissement de terrain	-	4,8 km <sup>3</sup>	8 min	1 m (run-up : 3m)			Argnani et al., 2012 et Tinti et al., 2015

FIGURE 2.23 – Récapitulatif des scénarios de *worst-case* pour les sites de Saint Laurent du Var et de Syracuse.

Réalisation : Plattard, O., 2017.

## Conclusion

Saint-Laurent-du-Var et Syracuse présentent donc des morphologies, urbaines et de terrains, bien différentes. La spécificité de Saint-Laurent-du-Var est son expansion sur le front de mer avec le tourisme balnéaire ; la conséquence étant de forts enjeux présents sur le littoral, comme le centre commercial, et une "barrière" d'immeubles privés séparant la plage de l'arrière de la commune. En ce qui concerne Syracuse, la commune étant très étalée, cette thèse recentre l'étude sur la partie d'Ortigia et le côté sicilien adjacent. La cité touristique est très ancienne et ses constructions vulnérables au risque sismique ; Ortigia, principale attraction touristique est une île rocheuse qui sera détruite en grande partie par un séisme et isolée de la partie sicilienne en cas de tsunami, puisque sa jonction avec le reste de la commune sera inondée en cas d'évènement de référence comme en 1693.

La population, touristique et locale, semble révéler, à travers les questionnaires réalisés sur le terrain, une méconnaissance de l'exposition des sites aux aléas tsunami et sismique. Cependant, une majorité des réponses montrent que le phénomène de tsunami, ses signes précurseurs et les dangers liés à son arrivée, sont aujourd'hui, c'est-à-dire depuis 2004 (Indonésie) et 2011 (Japon), mieux connus de la population. Néanmoins, la confiance dans l'alerte et le délai de réaction que cela implique rendent difficile une évacuation rapide.

Or les deux sites d'étude sont exposés à des tsunamis résultants de sources lointaines, permettant une alerte de la population, mais aussi à de sources très proches, rendant l'alerte et l'évacuation instantanées. De plus, les tsunamis peuvent résulter de séismes ou de glissements de terrains sous-marins. Trois scénarios par site d'étude sont mis en avant dans cette recherche, en fonction de simulations d'évènements réalisées dans le cadre du programme Astarte ; ils intègrent des problématiques différentes pour l'évacuation, à savoir les ressentis et dommages d'une secousse sismique préalable au tsunami, une arrivée rapide (moins de 15 minutes) ou plus longue (plus d'une heure) sur la côte changeant l'alerte et l'évacuation, mais aussi des intensités de tsunami variables notamment en terme de hauteur d'inondation. Ces différents scénarios seront implémenté dans le modèle d'évacuation STEP qui prend en compte le délai d'alerte, la présence d'une secousse ressenti sur le site, les hauteur et vitesse d'inondation.

Pour les deux sites, avec des configurations de départ différentes, l'enjeu principal est la mise en sécurité de la population en cas d'évènement majeur. Pour cela, plusieurs stratégies sont envisageables en fonction des sites, de leur topographie mais également de l'intensité de l'évènement envisagé.

## CHAPITRE 2. LES SITES D'ÉTUDE

## CHAPITRE 3

---

### LE TEMPS DE L'ÉVÈNEMENT

---



FIGURE 3.1 – Panneau d'indication de zone refuge en cas de tsunami, Cap Haïtien (Haïti).

Traduction : *Campe là en cas de tsunami. Reste jusqu'à ce que les autorités soient là.*

Sources : Plattard, O., 2013.



Cap Haïtien, ville côtière pleine de charme aux bâtiments de style colonial du nord d'Haïti, fut totalement épargnée par le séisme qui ravagea Port-au-Prince en janvier 2010. Cependant, en 1842, elle fut victime d'un tremblement de terre important qui engendra un tsunami. Consciente de ces événements passés, mais aussi de son urbanisation qui s'est accrue et de la vulnérabilité de ses territoires littoraux et de sa population, le nord d'Haïti a mis en place, depuis 2011, une stratégie d'information et d'évacuation de la population (Figure 3.1).

Face à un aléa, les enjeux structurels (infrastructures, réseaux, bâti) et non-structurels (population, patrimoine immatériel) subissent des dommages qui mènent à interroger leur vulnérabilité (Veyret, 2003). Cette dernière notion exprime le niveau de conséquence prévisible d'une catastrophe sur les différents enjeux, mais également la capacité de réponse de la société face à la perturbation (Dauphiné et Provitolo, 2013).

Les stratégies mises en œuvre face aux risques de tremblement de terre et de tsunami peuvent prendre de multiples formes, et ce chapitre permet d'en réaliser un inventaire non-exhaustif. Il existe d'ores et déjà des mesures de veille, d'alerte ou encore de protection des territoires exposés et de sa population. Ce chapitre vise à avoir un aperçu des dispositifs existants aujourd'hui et des différentes stratégies d'évacuation et de protection d'un littoral et de sa population en fonction du contexte spatial et temporel.

Avec la connaissance des aléas et de leurs impacts potentiels, il est possible de mieux s'en protéger et des mesures de prévention, de veille et d'alerte peuvent être mises en place sur un territoire exposé. Comme le suggère Imamura (2009), une évacuation efficace repose sur trois étapes :

- la veille et l'alerte officielle,
- la décision d'évacuer de la part des résidents à partir de leur représentation du risque et de leur expérience passée,
- le choix d'un itinéraire et d'une zone refuge sécurisée pour les personnes évacuées.

Dans ce chapitre est fait un état des lieux des différentes stratégies mises en place aujourd'hui en protection du littoral, prévention, alerte et évacuation en cas de tsunami. Il est réalisé à partir de références et de préconisations en prévention des risques mais également à partir de données collectées et des observations de terrain réalisées. Ces diverses stratégies diffèrent avant tout dans leur temporalité.

La mise en œuvre d'une stratégie de veille, d'aménagement de protection et d'éducation des populations se place dans une temporalité relativement longue. Elle vise avant tout à réduire les impacts de l'évènement. La présentation de ces dispositifs s'appuie notamment sur des exemples japonais suite aux terrains réalisés en 2012 et 2014.

A l'inverse, l'évacuation en tant que telle se place dans une situation d'immédiateté dont il convient également de questionner les dispositifs et stratégies. Le tsunami, une fois formé, ne peut pas être évité et tout ou partie du territoire urbain est inondé. C'est pourquoi,

plus spécifiquement au cœur de cette recherche se pose la question de l'évacuation de la population littorale, à travers son information et également la mise en place des itinéraires d'évacuation et la sélection de zones refuge en fonction des territoires concernés. Afin de garantir la mise à l'abri de la population, les mesures et stratégies déjà mises en place sur les sites d'étude de Saint-Laurent-du-Var et Syracuse sont abordées plus spécifiquement.

### 3.1 Se protéger : Veille, alerte, protection et information

Dès qu'un tremblement de terre tsunamigène se produit, les systèmes de veille internationaux se mettent en alerte. Lors de la confirmation par les appareils de relevé de la création d'un tsunami, le territoire concerné est alerté de l'arrivée prochaine de l'évènement sur la côte. Ce dispositif d'alerte peut être divisé en deux périodes, l'alerte montante – de la détection du phénomène par les centres de veille mondiaux à la transmission de l'alerte aux États concernés – et l'alerte descendante – à partir de la réception de l'alerte par les États jusqu'à la mise en sécurité de la population –.

En plus de la veille tsunami et sur une temporalité plus longue, des éléments de protection du territoire littoral peuvent être mis en place sur la côte afin de se protéger et de réduire les impacts de l'arrivée de l'aléa sur le littoral. Les ouvrages de protection sont adaptés à l'une des phases d'évolution du tsunami lors de son arrivée sur le littoral et sont donc complémentaires.

Enfin, l'information de la population au préalable de la survenue de la catastrophe est un élément jouant un rôle important dans sa protection, lui permettant à la fois de connaître l'aléa et le bon comportement à adopter en cas d'évacuation.

#### 3.1.1 Systèmes de veille et d'alerte

La veille des évènements tsunamis s'effectue à l'échelle mondiale en coordination entre les pays membres par le biais de la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI), entité dépendante de l'UNESCO. Un tsunami peut être local ou bien, à plus grande échelle (télé-tsunami), concerner davantage de littoraux et pays. La COI permet le partage de connaissances, d'informations et de technologies entre les 141 gouvernements en faisant partie (en 2016), à la fois en amont que durant l'évènement (Figure 3.2). Dans sa profession de foi figure que *"le Programme de la COI relatif aux tsunamis vise à réduire les pertes en vies humaines et en moyens de subsistance que pourraient causer à l'échelle mondiale les tsunamis. À cet effet, l'Unité de coordination de la COI pour les tsunamis aide les États membres de la COI à évaluer le risque de tsunami, à mettre en œuvre les systèmes d'alerte rapide aux tsunamis (TEW) et à éduquer les populations exposées pour qu'elles se préparent à affronter ce risque."*<sup>1</sup>

Même s'ils peuvent impacter plusieurs littoraux distincts, les tsunamis concernent en général un seul bassin océanique. C'est pourquoi la veille est regroupée par bassin à travers les Groupes intergouvernementaux de coordination (GIC) des systèmes d'alerte aux tsunamis et de mitigation : dans le Pacifique (GIC/PTWS), dans l'océan Indien (GIC/IOTWS), dans les Caraïbes (GIC/CARIBE-EWS) ainsi que pour l'Atlantique du Nord-Est, la Méditerranée et les mers adjacentes (GIC/NEAMTWS) (Figure 3.2). Le PTWS (Pacifique) fut le premier centre de coordination en 1968, les autres ayant été mis en place suite au tsunami de décembre 2004 en Indonésie.

1. Source : <http://www.ioc-tsunami.org/>

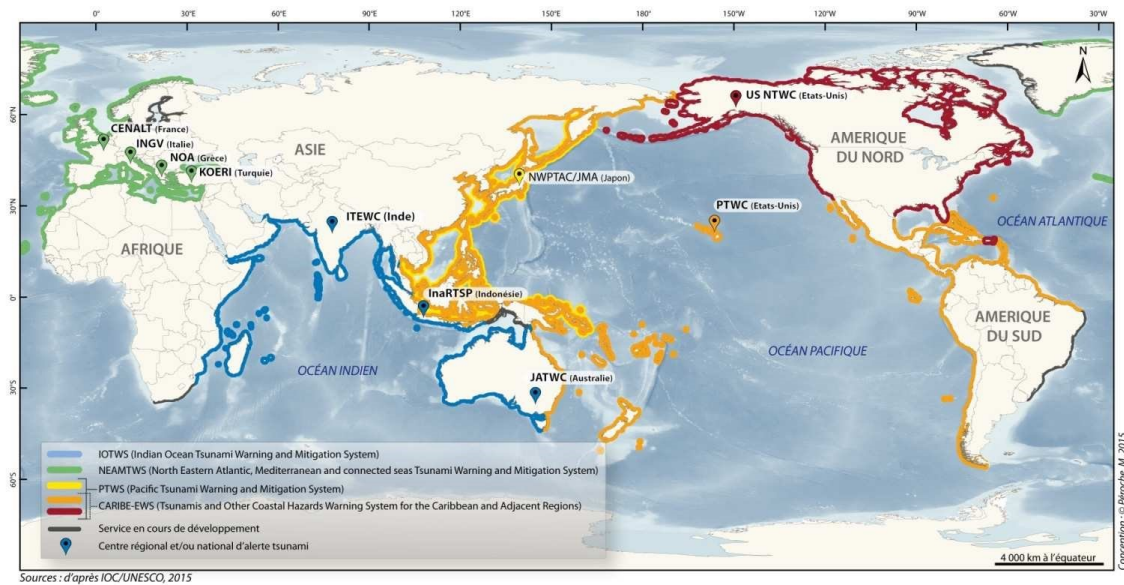


FIGURE 3.2 – Groupes intergouvernementaux de coordination de veille tsunami par bassin océanique.

Sources : Peroche, 2016 d'après données IOC/UNESCO.

PTWS : Pacific Tsunami Warning and Mitigation System (1968)– NEAMTWS : Tsunami Early Warning and Mitigation System in the North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas (2005)– CARIBE-EWS : Tsunami and other Coastal Hazards Warning System for the Caribbean Sea and Adjacent Regions (2005) – IOTWS : Indian Ocean Tsunami Warning and Mitigation System (2005)

Les systèmes d'alerte rapide aux tsunamis s'appuient sur des réseaux d'observation de sismographes et de stations de mesure du niveau de la mer, lesquels transmettent en temps réel des données aux centres régionaux et nationaux d'alerte (TWC).

Il existe deux temporalités dans l'alerte avec, lors de la survenance d'un évènement potentiellement tsunamigène, la surveillance des ondes marines en pleine mer avec des bouées tsunamimètres permettant une évaluation et un enregistrement en mer profonde (1000 à 6000 m de fond), pouvant détecter très tôt la mise en place d'un tsunami ; dans un deuxième temps, à quelques dizaines de kilomètres de la côte, les stations marégraphiques permettent une surveillance des fluctuations du niveau de l'eau. Ces stations affinent la mise en alerte générée dans un premier temps avec une évaluation plus précise de la hauteur d'inondation envisagée, cette dernière pouvant varier localement en fonction de la bathymétrie.

La première temporalité permet notamment la mise en alerte de la population, tandis que la seconde va pouvoir, en affinant les caractéristiques de l'évènement localement, amener à une mise en sécurité plus certaine (IOC-UNESCO, 2013). Ce fut le cas au Japon en 2011, puisqu'une première alerte au tsunami d'une hauteur de quelques mètres a été émise, la population ayant commencé à fuir, puis, la hauteur d'inondation a été revue à la hausse – d'une dizaine à plusieurs dizaines de mètres par endroits<sup>2</sup>–, permettant un déplacement

2. Suite à de fortes répliques, plusieurs vagues furent générées, deux ayant fusionnées lors de l'arrivée sur la côte, augmentant leur hauteur d'inondation (JMA, 2013).

et une mise à l'abri plus certaine d'une partie de la population (JMA, 2013).

Ce système international de veille et d'alerte à l'échelle des bassins océaniques via l'ONU, permet une égalité de tous les pays face à la mise en alerte. De plus, face à un même évènement, plusieurs pays littoraux peuvent être concernés et cela facilite la propagation de l'information concernant le tsunami envisagé.

Cette alerte n'est cependant possible qu'une fois l'évènement précurseur connu et dans certains cas le délai d'alerte jusqu'à l'arrivée sur la côte est très court. Il est donc primordial de ne pas construire toute sa stratégie sur le dispositif d'alerte mais aussi de mettre en place des stratégies de protection du littoral, via des aménagements physiques.

### 3.1.2 La protection du littoral

Une fois l'alerte lancée, le tsunami s'approche du littoral qui est impacté à différents niveaux : environnemental, infrastructures et bâtis ou encore population. Face à cette menace, des ouvrages ont été conçus afin de réduire l'impact de l'inondation sur le littoral.

L'idée qu'il est possible de lutter contre l'eau et d'éviter qu'elle n'impacte un territoire urbanisé et sa population avec des ouvrages n'existe pas quand il est question de tsunami. En effet, le "lutter contre ou laisser passer" semble peu existant dans les mesures actuelles de protection contre les tsunamis. Des ouvrages de protection sont construits, mais ils ne visent pas uniquement à contenir l'eau côté océan comme cela est possible avec des digues dans le cas de tsunamis de faible amplitude ; éviter l'inondation du territoire devient un défi illusoire dans le cas de tsunamis plus importants, pour lesquels le challenge est plutôt de gagner du temps pour l'évacuation en réduisant la hauteur et la vitesse de l'inondation.

Afin de protéger le littoral et ses enjeux de l'arrivée du tsunami et de permettre à la population de fuir, plusieurs mesures et ouvrages de protection peuvent être mis en place. Un exemple de littoraux protégés par toutes ces infrastructures est celui du Japon. Ce pays a fait le choix de bétonner et endiguer sur la plupart de ses fronts de mer, ce qui permet, par endroits, de réduire l'impact du tsunami sans pour autant empêcher totalement sa propagation dans les terres. Ce fut le cas lors du tsunami du 11 mars 2011, où le niveau de l'eau fut abaissé de quelques mètres ou ralenti de quelques minutes grâce à ces aménagements comme à l'aéroport de Sendai ou dans la commune de Kamaishi (Figure 3.3, Supparsi *et al.* (2012b)).

Avoir ces réductions d'impact du tsunami permet, en gagnant de précieuses minutes sur son arrivée, de laisser plus de temps pour l'alerte et la mise en sécurité de la population. En effet, en gagnant du temps, c'est une plus grande part de la population qui peut se mettre à l'abri ; et en réduisant la hauteur d'inondation, cela permet également aux personnes de se mettre à l'abri à proximité, au lieu d'avoir à parcourir des distances très importantes. Cette mesure est notamment primordiale pour les personnes se déplaçant plus lentement telles

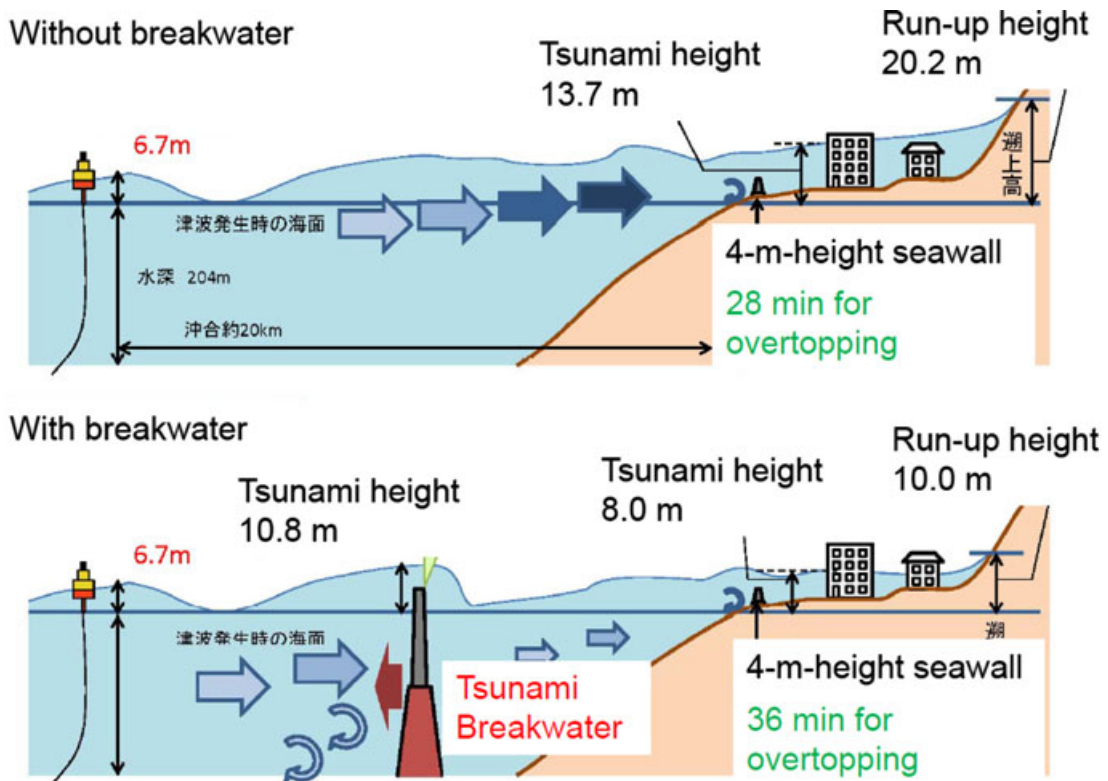


FIGURE 3.3 – Réduction de l'impact du tsunami du 11 mars 2011 sur la commune de Kamaishi (Japon) par la présence de brise-lames.

Sources : Port and Airport Research Institute (PARI), 2011 ; Supparsi *et al.*, 2012b.

que les familles, les enfants et les personnes âgées. De plus, sur le plan des infrastructures, tout en réduisant la part du territoire touché, cela amène à une réduction des dégâts et donc des coûts de destruction.

Les différents types de protections ont un rôle spécifique lors de l'arrivée du tsunami. Ils sont chacun disposés de manière spécifique sur le littoral, en respectant la temporalité de l'hydrodynamique du tsunami (voir chapitre 1).

- Les brise-lames : présents au large mais proches du front de mer, ils permettent de provoquer le déferlement en cassant le flot afin de réduire l'énergie du tsunami (Figure 3.4).
- Les tétrapodes : gros blocs de béton présents directement sur le front de mer et non immergés, qui réduisent la vitesse du tsunami et préviennent de l'affouillement qui peut survenir dans la zone de déferlement (notamment quand il n'y a pas de brise-lames) (voir chapitre 1). Ils sont souvent couplés à une digue (Figure 3.5).
- Les digues : présentes sur terre contrairement aux brise-lames, elles permettent de retenir le tsunami et/ou d'empêcher la submersion d'une zone. En cas de hauteur d'inondation plus importante que la hauteur de la digue, elles permettent de réduire considérablement la vitesse et la hauteur de l'inondation (Figure 3.6).
- Les portes anti-tsunami : situés à l'entrée des cours d'eau, ce sont de grandes portes qui s'abaissent dès que l'alerte est lancée pour éviter la remontée très rapide de la



FIGURE 3.4 – Brise-lames au large du front de mer à Nobeaka, Japon. Situés aux embouchures des ports ou des zones à enjeux, afin de provoquer le déferlement et donc la perte d'énergie du tsunami.

Sources : jpcoast.com, 2017.



FIGURE 3.5 – Tétrapodes (blocs de béton) sur le littoral et en contrefort d'une digue à Kurobe, Japon.

Sources : jpcoast.com, 2017.





FIGURE 3.6 – Digue après le passage du tsunami du 11 mars 2011 à Miyako, Japon. Le tsunami a franchi la digue dévastant les bâtiments protégés, à l'arrière de la digue.  
Sources : Aoyagi, K., 2011.



FIGURE 3.7 – Porte anti-tsunami à l'embouchure d'une rivière à Fudai, Japon, permet de faire la jonction des digues et évite la remontée rapide du tsunami par les cours d'eau.  
Sources : A.P., 2011.



submersion par les cours d'eau. Elles permettent la continuité des digues, là où elles sont interrompues par des cours d'eau (Figure 3.7).

- Les forêts : barrières naturelles à la submersion, les arbres ou mangroves permettent de réduire la vitesse et la hauteur d'inondation du tsunami. Cependant, lors de gros tsunami, les arbres peuvent devenir des embâcles créant davantage de dégâts sur les constructions et infrastructures.

Suite au tsunami du 11 mars 2011, le Japon a entrepris d'établir un diagnostic des ouvrages de protection présents sur son littoral. Il a permis de rendre compte et de prendre conscience des points de vulnérabilité de certaines infrastructures afin de les rendre plus résistantes pour un prochain évènement (Supparsi *et al.*, 2012b). De plus, un état des lieux a été réalisé afin de rendre compte concrètement de leur efficacité dans le ralentissement du tsunami sur le territoire. Dans certaines villes, un délai supplémentaire de 8 minutes fut gagné, ce qui est essentiel pour la mise en sécurité des populations ; l'aéroport de Sendai, enjeu majeur du territoire, fut également largement préservé avec une inondation inférieure de plusieurs mètres par rapport à celle alentours.

Cependant, ces ouvrages ne sauraient garantir la sécurité totale des populations du territoire littoral impacté par le tsunami. Une évacuation et des zones refuge sont indispensables pour garantir la mise en sûreté du plus grand nombre.

### 3.1.3 Information de la population

Parmi les enjeux à protéger face à un tsunami, la population occupe une place particulière. Son évacuation dépend de son information et l'éducation de la population est majoritairement considérée comme la clef du développement des capacités de réaction des sociétés face aux catastrophes naturelles (Lavigne et Sahal, 2012). Pour que l'évacuation puisse se dérouler le plus efficacement possible, il est important que les personnes aient accès aux informations concernant le risque et les zones de mise en sécurité. Cette démarche s'inscrit dans la durée, aussi bien en amont de l'évènement que durant l'évacuation elle-même.

Comme lors du tsunami du 26 décembre 2004 en Indonésie, les populations peuvent se trouver impuissantes face à l'arrivée des vagues par "*un manque de connaissance et de conscience du risque, d'une absence totale de préparation et de situations socio-économiques et politiques défavorables*" (Morin et al. dans Lavigne et Paris (2011), p.271). La prévention et l'information auprès des populations ne peuvent pas supprimer le risque de victimes en cas de catastrophe, mais savoir reconnaître les signes avant-coureurs d'un tsunami et connaître le comportement à adopter peuvent en réduire considérablement le nombre. L'effet de réduction de vulnérabilité face à un risque de l'information préventive est donc non-négligeable.

C'est une posture présente dans les politiques publiques de prévention des risques en

France. En effet, l'information sur les risques auxquels les habitants sont exposés est de plus en plus diffusée via les IAL<sup>3</sup> ou encore les DICRIM<sup>4</sup>. A cela s'ajoutent quelques exercices visant à développer les bons réflexes, plus particulièrement dans les écoles situées en zones sismiques. La volonté des politiques publiques, à travers cette information préalable, est notamment d'avoir une population éduquée qui est en mesure de s'auto-évacuer ou en tout cas d'avoir une connaissance du risque pour auto-évaluer une situation de catastrophe ainsi qu'une connaissance du territoire et de ses sites refuge (Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises, 2013).

L'information préalable, et surtout la connaissance de l'aléa, est importante puisqu'elle permet une réduction de la vulnérabilité des populations (d'Ercole, 1994). Dans le cas du tsunami, la connaissance de l'aléa et de ses phénomènes précurseurs peut sauver des vies. Depuis 2004 – et le tsunami indonésien –, la connaissance de ce type d'évènements est plus importante. Elle est renforcée par la médiatisation et les images du Japon en 2011 et malgré les mauvais réflexes et informations véhiculés dans les médias ou films. Cependant, la population ne s'attend pas toujours à voir son littoral impacté et ne sait pas toujours comment réagir et surtout quels sont les endroits où se mettre à l'abri.

Au-delà de l'information préalable concernant le risque, intervient la connaissance du territoire et plus particulièrement des zones de mise en sécurité et des itinéraires privilégiés pour y évacuer. L'élément primordial est l'information et l'indication des lieux de refuge pour la mise à l'abri, afin que l'évacuation puisse se faire de la manière la plus efficace possible ; pour cela, des itinéraires sont à privilégier, dont la connaissance peut s'avérer tout aussi essentielle.

De plus, le temps de départ est primordial dans le cas du tsunami face auquel il est nécessaire d'évacuer le plus tôt possible (Yun et Hamada, 2012). Des travaux concernant le temps de diffusion de l'alerte une fois l'évènement précurseur survenu ont été réalisés (Strunz *et al.*, 2011; Hanka *et al.*, 2010). Ils mettent en avant que le temps de départ minimum des personnes est contraint à 5 minutes après l'aléa déclencheur. Ce délai est nécessaire à la diffusion de l'alerte à travers les différents organismes de surveillance. Alors que Sugimoto *et al.* (2003) montrent, à partir d'enquêtes réalisées aux États-Unis et au Japon, qu'il est primordial de réduire le temps de départ à 5 minutes après l'alerte, cette étude montre que la population commençant son évacuation après un délai d'un quart d'heure compte 90% de victimes en plus.

Pour aller plus loin que l'information préventive et la connaissance du territoire, une mise en place de dispositifs d'indications pour l'évacuation peut être réalisée tout le long des itinéraires et dans les lieux inondables (Saadatseresht *et al.*, 2009). Ces informations permettent d'abord aux personnes de se situer. C'est le cas au Japon, où des panneaux sont disposés très régulièrement dans les zones de faible altitude et indiquent l'altitude à leur situation (Figure 3.8). Lors d'une alerte tsunami, un message est diffusé dans la ville

---

3. Information Acquéreurs Locataires.

4. Document d'Information Communal sur les RISques Majeurs.



FIGURE 3.8 – Panneau d'indication d'altitude en prévision d'une alerte tsunami, à Hamamatsu, Japon.

Sources : Plattard, O., 2014.



FIGURE 3.9 – Panneau d'indication de route d'évacuation vers une zone refuge, à Lima, Pérou.

Sources : Plattard, O., 2014.

annonçant une estimation de hauteur d'inondation. Cette mesure d'indication d'altitude permet aux personnes de se rendre compte si elles sont en sécurité ou si elles doivent fuir vers un point plus haut. De plus, une autre forme d'information est présente sous forme d'indication d'itinéraire ou de direction pour atteindre une zone refuge (Figure 3.9). Dans ce cas, l'information intervient directement lors de l'évacuation et permet d'aiguiller la population vers une mise à l'abri à travers un itinéraire privilégié.

Afin de garantir la bonne réactivité et l'évacuation la plus efficace possible, l'information de la population est un élément déterminant. Cependant, tout ne peut pas être basé sur la population, car sa mise en sécurité dépend également des infrastructures de protection et d'alerte mises en place sur le territoire. La sensibilisation est donc un maillon de la chaîne de la prévention des risques.

En France, la prévention des risques est mise en place niveau national avec des directives de plans de prévention, ainsi que d'autres documents comme les DICRIM<sup>5</sup> ou PCS<sup>6</sup>. Cependant, l'application se fait au niveau local et sous la responsabilité des élus locaux en coordination avec le SDIS, les services de secours.

A Saint-Laurent-du-Var, un DICRIM a été rédigé en 2011. Ce document est à la disposition des habitants de la commune et est normalement distribué à ces derniers, au moins l'année de son édition, voire redistribué régulièrement dans certaines communes. Celui de Saint-Laurent-du-Var prend en compte les risques naturels – inondation, feux de forêts, sismique, climatique et mouvements de terrain –, les risques technologiques liés aux industries et au transport de matières dangereuses, ainsi que les risques sanitaires comme la pollution et les moustiques tigres. Les risques de tsunami ou de submersion marine ne sont pas abordés dans le document.

Il est cependant intéressant de souligner que le zonage du risque d'inondation (PPRI) montre le front de mer et le bord du Var, zones à forts enjeux, comme étant des zones inondables (Figure 3.10). De plus, la présence d'une cartographie du zonage sismique français (2010) permet de localiser Saint-Laurent-du-Var en zone de sismicité moyenne (rang 4 sur une échelle de 1 à 5). La zone de sismicité moyenne induit l'application des règles de construction parasismique aux bâtiments et ponts "à risque normal", comme les établissements scolaires ou hôpitaux (Décret No 2010-1254, 2010; Ministère de l'Environnement, 2011; Eurocode 8, 2003).

En cas de catastrophe, le maire est informé par la préfecture ou les services de secours de la situation et doit déclencher son Plan Communal de Sauvegarde (PCS). La commune gère la situation jusqu'à ce qu'elle ne soit plus en mesure de le faire et, dans ce cas là, la préfecture ou l'État peuvent prendre le relais.

En complément des sirènes, la commune de Saint-Laurent-du-Var dispose de sirène faisant partie du réseau national d'alerte. La commune dispose également d'un système

---

5. Document d'Information Communal sur les RISques Majeurs

6. Plan Communal de Sauvegarde

### CHAPITRE 3. LE TEMPS DE L'ÉVÈNEMENT

de "Téléalerte" qui permet de prévenir par message sur téléphone fixe ou portable en cas d'évènement majeur. L'inscription sur la liste de diffusion est à l'initiative du citoyen.

De plus, la commune prévoit, par des véhicules équipés de hauts-parleurs, et selon des circuits prédéfinis dans le PCS, la diffusion de messages d'alerte (Commune de Saint-Laurent-du-Var, 2011).

Enfin, aucune mention de l'existence de zones refuge n'apparaît dans le DICRIM, que ce soit dans le cas d'un séisme, d'une inondation ou d'un autre risque.

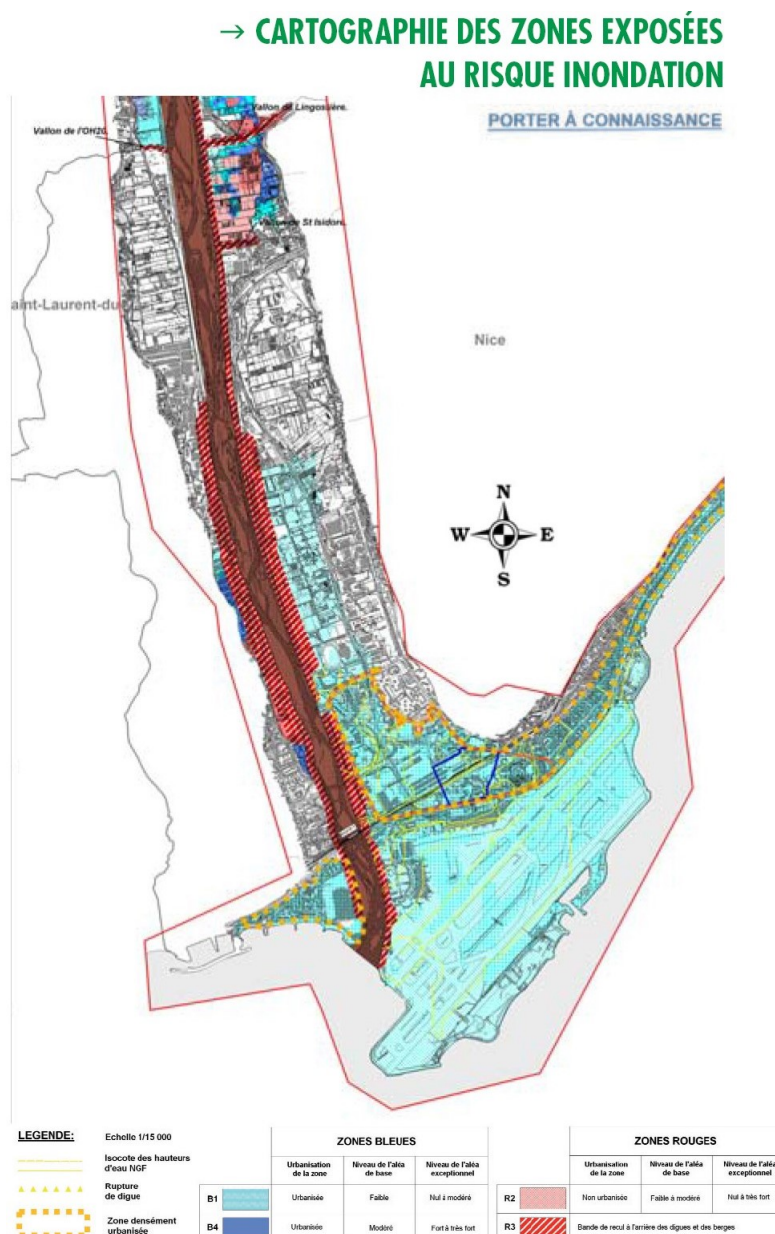


FIGURE 3.10 – Zones exposées au risque inondation, extrait du DICRIM de Saint-Laurent-du-Var.

Sources : Commune de Saint-Laurent-du-Var, 2011

En ce qui concerne Syracuse, l'organisation de l'alerte et de la prévention des risques diffèrent de celles de la commune varoise. La prévention des risques et la gestion de crise sont des missions confiées à la *Protezione civile*<sup>7</sup>, qui siège depuis 1982 au Conseil des Ministres et gère la prévention des risques et la période post-catastrophe, en partenariat avec les collectivités locales et régionales. Ces dernières ont la responsabilité d'adapter les procédures d'alerte, d'information et de prévention à leur territoire.

De manière générale en Italie, l'alerte et les consignes de comportements sont diffusées à travers les médias (télévision, radio...). Le Département de Protection Civile est chargé de donner l'alerte sur les territoires concernés. Théoriquement, des exercices sont mis en place dans les écoles et des documents d'information sur l'exposition aux risques sont distribués à la population (Ministry of the Interior Finland, 2002).

En ce qui concerne plus particulièrement Syracuse, lors de mon séjour j'ai pu constater l'absence de conscience du risque de tsunami de la part de la population (ce qui ressort également dans les questionnaires Astarte - voir chapitre 2). Les habitants avec qui j'ai été en contact n'étaient visiblement pas ou trop peu informés sur cette exposition au tsunami. En revanche, le risque sismique est davantage connu des Italiens. Des plans d'évacuations en cas de séisme ont d'ailleurs été installés en 2004 dans des zones touristiques de la commune (Figure 3.22). Ces plans mettent en avant des zones refuge pour le regroupement des personnes (en vert) avec des itinéraires d'évacuation privilégiés pour s'y rendre (en bleu). Néanmoins, à ma connaissance, les touristes ne sont pas informés des risques présents à Syracuse, aussi bien sismique que tsunami. De plus, la population, même consciente de se trouver dans une région sismique, ne semble pas préparée et ne connaît pas les comportements à adopter en cas de secousse sismique.

Les trois éléments de veille, de protection du territoire littoral et de l'information de la population sont donc chacun importants, indépendamment de la stratégie d'absorption ou de lutte contre l'aléa choisie. En effet, dans le cas d'un tsunami, il est pertinent d'intégrer que dans tous les cas l'eau impacte le territoire et ses habitants. Une démarche regroupant les différents aspects évoqués semble la plus complète. L'idéal est un territoire exposé qui ne mise pas sur un seul de ces aspects que ce soit pour des raisons budgétaires, environnementales ou politiques ce qui peut remettre en cause l'efficacité de la prévention lors de l'évènement.

Enfin, l'étude de Sugimoto *et al.* (2003) explique aussi que lors du dernier tremblement de terre suivi d'un tsunami en 1946 à Nankaido au Japon, une grande partie de la population trouva la mort en évacuant. En effet, l'itinéraire d'évacuation privilégié suivait la rivière, élément qui favorise la remontée rapide du tsunami dans les terres. Le choix de la stratégie d'évacuation, c'est-à-dire des itinéraires privilégiés et des zones refuge est tout autant que les autres aspects de la prévention, un élément fondateur de la bonne marche de l'évacuation.

---

7. Protection civile Italienne. <http://www.protezionecivile.gov.it>

## 3.2 Évacuer : Où ? Quand ? Comment ? Qui ?

Suite à la mise en alerte, ou lors de l'arrivée des signes annonciateurs d'un tsunami, une évacuation de la population se met en place. Le délai d'évacuation peut être très variable en fonction de l'évènement source, allant de quelques minutes lors d'un évènement proche de la côte, à plusieurs heures lors d'un télé-tsunami.

Tenant compte des différentes données liées à la population, son éducation aux risques, au territoire concerné, des stratégies d'évacuation sont mises en place. Tout d'abord, la définition des lieux vers lesquels la mise en sécurité est garantie est un des éléments fondateurs d'une stratégie d'évacuation sur un territoire. De plus, la prise en compte du contexte, et plus particulièrement de la population concernée par une évacuation, permet d'affiner la mise en place d'une stratégie d'évacuation.

### 3.2.1 Quelle évacuation pour quelles zones refuge ?

Afin de garantir une mise en sécurité des personnes des zones refuge vont être définies. Il s'agit ici d'un terme générique regroupant des espaces garantissant la sûreté des personnes lorsqu'elles l'ont atteinte. La zone refuge peut être de nature différente en fonction du territoire concerné et de sa topographie (Figure 3.11). Il peut s'agir : soit d'un terrain propice au regroupement – un terrain de sport ou un parc – situé hors zone de danger, soit d'un édifice construit et diagnostiqué pour résister à la catastrophe envisagée, et permettant à la population de se trouver hors de danger.

L'identification des zones refuge repose avant tout sur le recensement des évènements passés et sur des scénarios de simulation de tsunami qui permettent de déterminer les *worst-case*<sup>8</sup>. Ces évènements maximaux permettent d'identifier la zone dite de danger, à laquelle est généralement adjointe une marge de sécurité afin de déterminer la zone à évacuer (Figure 3.11). Toute zone refuge doit se trouver en dehors de cette zone à évacuer, hormis le cas de construction d'une hauteur suffisante et résistante au risque envisagé.

Bien que dans la plupart des travaux la détermination de la marge de sécurité reste floue, plusieurs méthodes peuvent être appliquées pour la définir, comme le préconise Scheer *et al.* (2011) :

- appliquer une marge d'une hauteur de 5m en plus de la hauteur de l'évènement.
- appliquer une formule empirique pour déterminer  
la hauteur de sécurité = (Hauteur maximale de la Vague x 1.3) + 1m.

Cette méthode est proposée dans la détermination des hauteurs minimales pour les zones refuge telles que les bâtiments. Cependant, on la retrouve de manière plus ou moins explicite dans plusieurs travaux de définition de plans d'évacuations symbolisant les zones à évacuer (Carrasco et Cireau, 2014; Mayaguezz, 2015; Leone *et al.*, 2014, 2013; Peroche, 2016). Lors de l'élaboration de telles cartes d'évacuation, se pose la question de la limite

8. Cas du "pire scénario", c'est à dire, en général, du tsunami le plus important.

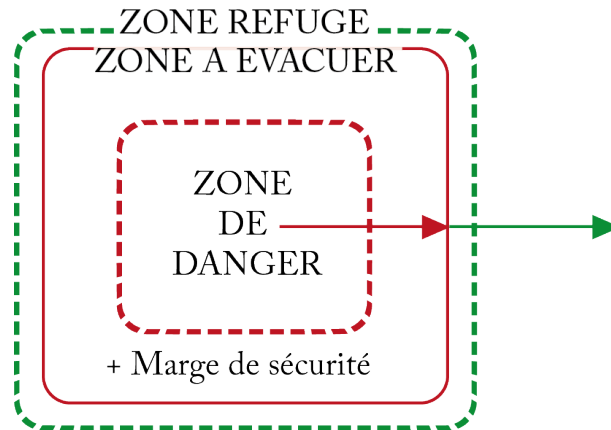


FIGURE 3.11 – Définition de la zone refuge et de la zone à évacuer en fonction de la zone de danger avec une marge de sécurité.

Sources : Plattard, O., 2017.

d'altitude pour la zone refuge. Certains scénarios ont tendance à placer une zone refuge à une altitude importante, or la localisation est aussi déterminée par la topographie et le type d'évacuation envisagé.

Quel que soit leur type – terrain hors de la zone à évacuer ou bâtiments diagnostiqués –, les zones refuge peuvent surtout être classées en fonction de leur objectif et de la temporalité de leur usage allant d'une mise en sécurité de quelques heures à plusieurs jours. Il est possible de les répartir en trois catégories principales qui se distinguent par leur temporalité dans l'évacuation et l'urgence, leur nature et leur capacité d'accueil (IOC-UNESCO, 2008) :

- Les sites d'évacuation temporaire ou zones de refuge immédiat : ils servent de points de rassemblement durant l'évènement avant l'éventuel déplacement des personnes vers un vaste site d'évacuation. Ils doivent garantir la sécurité de la population dans un laps de temps très court. Ces espaces sont de natures différentes, soit des bâtiments diagnostiqués au préalable comme sûrs pour y trouver refuge, soit des espaces extérieurs comme un terrain de sport ou simplement un espace dégagé. Dans le cas d'un tsunami, ces zones ne doivent pas être immergées. Les personnes évacuées restent dans ces sites quelques heures, en fonction de l'évènement et de l'organisation de l'urgence dans la zone concernée. Des soins premiers secours ou encore une radio peuvent être disponibles dans ces lieux (Figure 3.12).
- Les vastes sites d'évacuation : Ces espaces sont généralement des parcs ou des terrains suffisamment grands pour protéger les évacués des zones environnantes lors d'un tremblement de terre, d'un incendie ou d'un tsunami de grande ampleur. Au Japon, chaque école de quartier dispose d'un parc accolé qui sert de zone refuge en cas de catastrophe. Dans le cas d'un tsunami, il s'agit d'un espace en-dehors de la zone à évacuer. Ce lieu de regroupement sert pour une mise en sécurité de plus longue durée de la population évacuée, ainsi que pour un comptage de la population avec la distribution de premiers soins et de produits de première nécessité



(Figure 3.13).

- Les sites d'évacuation ou zones de sauvegarde : A moyen-terme, ces sites sont destinés à héberger et à protéger temporairement les personnes évacuées dont les habitations ont été détruites ou sont menacées par un tremblement de terre ou un incendie. Il s'agit généralement d'écoles, de salles municipales ou de salles de sport. Les personnes évacuées restent dans ces lieux plusieurs semaines avant d'être relogées en habitats temporaires pour plusieurs mois ou années avant de retrouver un logement pérenne.

Dans le cadre de cette thèse, les zones refuge qui sont retenues dans les scénarios de l'évacuation face à un tsunami sont celles du temps de l'urgence et de l'évacuation qui garantissent une mise en sécurité immédiate au moment de l'évènement.

De plus, en fonction du territoire et de sa topographie, il est possible de distinguer deux types d'évacuation : horizontale et verticale (Mas *et al.* (2012a)).

- La première, horizontale, signifie que la population cherche à évacuer vers un point plus haut du relief afin de sortir de la zone de danger. Cette évacuation est souvent privilégiée dans les territoires présentant des reliefs marqués, afin de garantir une montée rapide en hauteur. Cependant, dans le cas d'un littoral en plaine, elle sous-entend de fuir très loin dans les terres. Dans ce cas, l'évacuation horizontale demande un plus grand délai d'évacuation puisqu'elle sous-entend de devoir parcourir une grande distance pour sortir de la zone d'inondation et/ou d'évacuer de façon motorisée. Néanmoins, elle peut être privilégiée dans les territoires à fort relief, comme dans l'agglomération de Wellington (Nouvelle-Zélande). Cette dernière a mis en place le projet *blue line*<sup>9</sup> qui consiste à indiquer par un marquage bleu au sol la zone de danger, comment en sortir ainsi que la sortie de la zone à évacuer. Il n'y a pas de lieu spécifique, seulement une mise en hauteur, hors zone inondable (Figure 3.14). Cette stratégie d'évacuation est celle privilégiée en France par les acteurs institutionnels (Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises, 2013), indépendamment des contraintes topographiques d'un territoire puisqu'elles supposent moins de frais pour la mise en place d'infrastructures adaptées, un terrain étant suffisant pour un regroupement, du moment qu'il est hors de la zone de danger.
- L'évacuation verticale est la seconde stratégie de mise à l'abri de la population. Dans ce cas, il s'agit de ne pas systématiquement sortir de la zone de danger, mais de monter vers un point plus haut que la hauteur de l'inondation. Pour cela, des infrastructures dédiées sont mises en place (tour d'évacuation, colline d'évacuation...) (Figure 3.15), ainsi que des bâtiments diagnostiqués au préalable qui sont rendus accessibles en cas d'évacuation. C'est, par exemple, le cas dans la ville d'Hamamatsu (Japon) où les abords de la plage se situent à plusieurs kilomètres du premier relief.

---

9. Projet mis en place depuis 2010 par Wellington Region Emergency Management (WREMO)

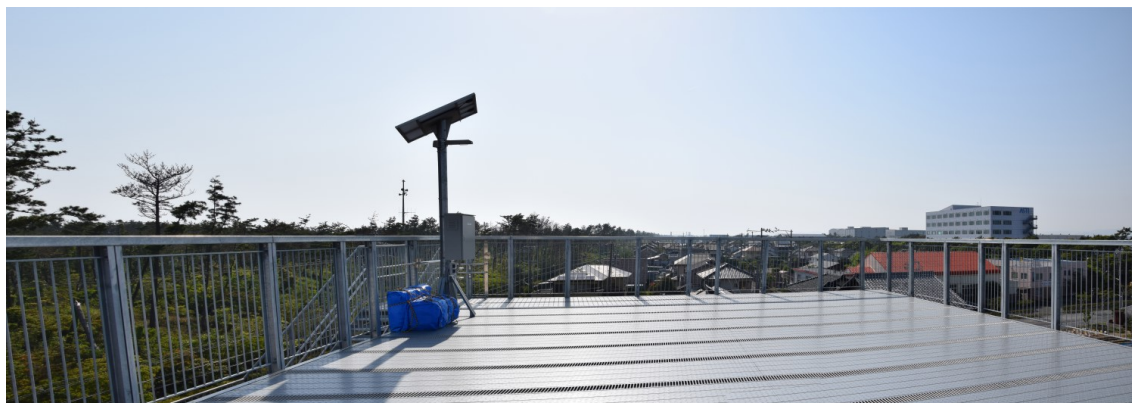


FIGURE 3.12 – Plateforme d'une tour d'évacuation pour tsunami avec une cantine contenant des objets de première nécessité et premiers soins ainsi qu'un téléphone avec panneau solaire, à Hamamatsu, Japon.

Sources : Plattard, O., 2014.



FIGURE 3.13 – Zone refuge de regroupement post-catastrophe / large site d'évacuation, Château d'Hamamatsu, Japon.

Sources : Plattard, O., 2014.



FIGURE 3.14 – Signalétique du projet Blue Line, à Wellington, Nouvelle-Zélande.  
Sources : Wellington Region Emergency Management, consulté en 2017.

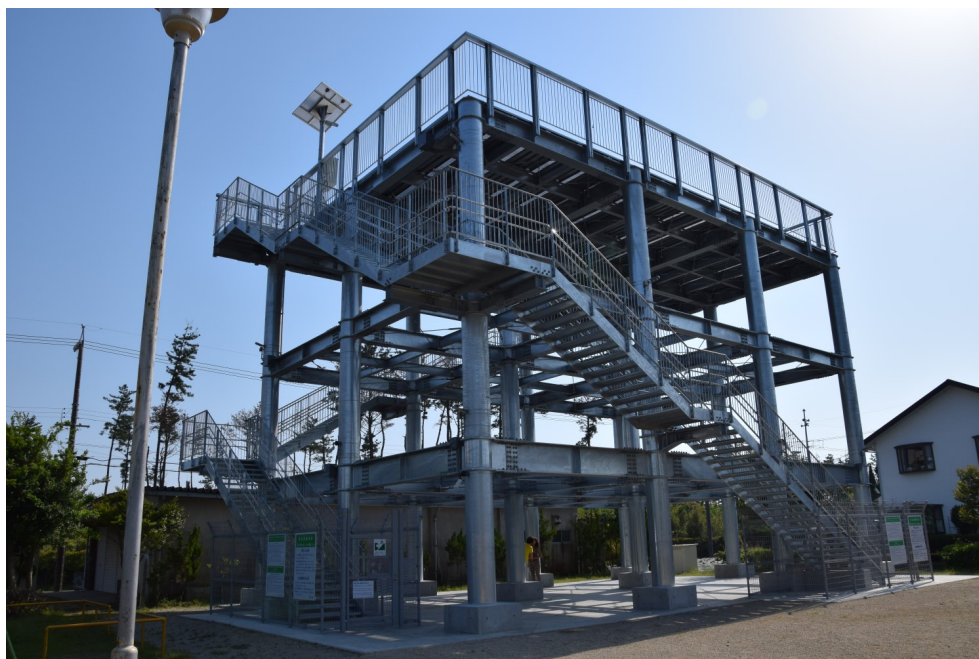


FIGURE 3.15 – Tour d'évacuation pour tsunami, à Hamamatsu, Japon.  
Sources : Plattard, O., 2014.

L'inondation envisagée en cas de tsunami faisant plus de 15 mètres de haut, un réseau de zones refuge pour l'évacuation verticale a été mis en place assurant au piéton, quelle que soit sa situation, une distance de parcours de moins de 500 mètres (Figure 3.16). Dans le cas d'un tsunami en zone sismique, les constructions sont diagnostiquées comme étant parasismiques et résistantes au tsunami, puis aménagées pour faciliter l'évacuation (Figure 3.17). Cependant, lors du tsunami du 11 mars 2011 qui était plus puissant que celui envisagé dans le pire scénario (*worst-case*), quelques bâtiments refuges ont néanmoins cédé à la contrainte de l'eau. Cette stratégie d'évacuation verticale est privilégiée au Japon puisque son littoral est constitué d'une bande de plaine, rendant l'évacuation horizontale difficile et peu rapide dans la plupart des cas.

La combinaison des deux types d'évacuation est possible, en fonction de la topographie du territoire concerné (Table 3.1). De plus, leur combinaison avec des ouvrages de protection peut amener à réduire la hauteur de l'inondation ou laisser plus de temps aux personnes pour évacuer. En partant des contraintes du territoire, il s'agit de créer une stratégie pertinente à la mise à l'abri de la population.

	EVACUATION HORIZONTALE	EVACUATION VERTICALE
STRATEGIE	- Aller hors zone inondable	- Se réfugier en hauteur (bâtiment)
CONSTRAINTES	- Relief pour une sortie rapide de la zone inondée - Plus grande distance à parcourir en plaine - Voiture privilégiée en cas de relief peu marqué	- Diagnostic de résistance du bâtiment refuge - Nécessité d'une accessibilité constante du refuge
AVANTAGES	- Zones refuge accessibles et plus étendues - Adaptée en cas de fort relief	- Faible distance à parcourir - Adaptée en plaine - Evacuation piétonne
EXEMPLES	- Blue Line à Wellington, Nouvelle-Zélande	- Tsunami Evacuation Tower et Tsunami Evacuation Building, Japon.

TABLE 3.1 – Récapitulatif des deux types d'évacuations horizontale et verticale avec leurs contraintes et avantages.

Sources : Plattard, O., 2018.

Dans les cas des sites d'étude, il convient de regarder de plus près les scénarios envisagés et la topographie de ces territoires pour parvenir à définir la meilleure stratégie d'évacuation. Le travail d'identification et de communication autour des zones refuge ou des zones de danger, impactant nécessairement l'évacuation, y sont très diversement aboutis.

La zone à évacuer, dans le cas de Saint-Laurent-du-Var, concerne principalement, en fonction des scénarios, le front de mer et la première frange de bâti, jusqu'à la route des





FIGURE 3.16 – Panneau d'évacuation montrant les différentes zones refuge hiérarchisées selon leur diagnostic : Tours et bâtiments diagnostiqués pour l'évacuation de tsunami et bâtiments permettant d'évacuer mais non aménagés. Plage d'Hamamatsu, Japon.  
Sources : Plattard, O., 2014.



FIGURE 3.17 – Bâtiment de logement diagnostiqué et aménagé pour l'évacuation face à un tsunami, plage d'Hamamatsu, Japon.  
Sources : Plattard, O., 2014.

Vespins. Néanmoins, il est important de souligner qu'il n'existe pas à ce jour de zones refuge désignées comme telles sur la commune de Saint-Laurent-du-Var. Plusieurs travaux de recherche ont développé des méthodes afin de sélectionner des zones refuge potentielles (Bantegnie, 2015; Lavigne, 2016; Sahal, 2011). De plus, dans ce contexte géographique, les cas de scénarios de type séisme de la faille Ligure ou d'un glissement de terrain dans la Baie des Anges (voir chapitre 2) laisse un délai court pour évacuer ; dans ces cas, il peut être intéressant d'opter pour une stratégie d'évacuation verticale, vers des bâtiments étant diagnostiqués comme pouvant résister à un séisme et un tsunami. Cependant, le front de mer azuréen, constitué principalement de propriétés privées, rend cette démarche compliquée. Le modèle STEP permet de considérer différentes stratégies d'évacuation (voir chapitre 6), afin de mettre en avant des solutions garantissant le maximum de personnes sauvées lors d'une évacuation.

Dans le cas de Syracuse, des zones refuge ont été sélectionnées pour une évacuation dans le cas d'un tremblement de terre. Ces plans ont été mis en place en 2004 par la Protection Civile, dans quelques endroits de la commune (Figures 3.21, 3.22). La stratégie adoptée est d'évacuer les zones bâties pour aller vers des espaces dégagés. Cependant, ces plans ne concernent pas une évacuation pour un tsunami.

Une grande partie du front de mer de la commune de Syracuse est constituée d'une falaise surmontée d'un plateau et n'est donc pas concernée par l'inondation d'un tsunami. Les zones de l'île d'Ortigia et de la partie basse du côté continental, jusqu'à la gare et l'église Madonna delle Lacrime sont celles concernées par l'inondation et donc par l'évacuation. Plusieurs travaux de recherche ont mis en place des méthodes d'identification de zones refuge pour Syracuse (Carrasco et Cireau, 2014; Lavigne, 2016; Mayaguezz, 2015) (Figure 3.23). Il semble qu'une stratégie d'évacuation uniquement horizontale est envisageable compte-tenu du fait que l'île d'Ortigia dispose un fort dénivelé rendant toute sa partie centrale hors de la zone inondable (Lavigne, 2016) (Table 3.1). Cependant de nombreux critères sont à prendre en compte afin de garantir au maximum la mise en sécurité des personnes.

### 3.2.2 Évacuer qui ? Quelle population ?

Sur un territoire littoral exposé un évènement majeur, garantir la sureté et la vie de personnes se retrouvant face à une catastrophe majeure est l'objectif principal dans la mise en place de stratégies d'évacuation.

Cette recherche privilégie la prise en compte d'une population littorale évoluant dans un territoire urbain. Le choix a été fait dans cette thèse de considérer principalement les individus se trouvant sur le front de mer au moment de l'évènement, et qui doivent fuir la zone où ils se situent. Différentes caractéristiques de la population influencent son évacuation comme son moyen de déplacement, sa connaissance du territoire ou encore son information vis-à-vis de l'aléa.

Le moyen de transport adopté durant l'évacuation est une première dimension déter-

minante. L'évacuation pédestre est à privilégier, puisqu'elle se trouve être la plus efficace, en particulier dans les situations où le délai de mise à l'abri est court (Bolton, 2007; Scheer *et al.*, 2011). Elle est également préconisée par IOC-UNESCO (2014). C'est pourquoi, dans cette thèse, l'évacuation pédestre est celle prise en compte au vu de ces préconisations, de la littérature ainsi que des résultats des enquêtes réalisées sur les sites d'étude (voir chapitre 2).

La structure de la population, qui est hétérogène, est un autre élément déterminant de l'évacuation. En effet, la population peut être constituée d'individus de tous âges et de condition physique diverse (Mas *et al.*, 2012a). Ceci est d'autant plus important, dans le cadre d'une évacuation pédestre pour laquelle la vitesse de déplacement et l'endurance entrent nécessairement en compte. De plus, l'organisation de cette population sous forme de groupe peut avoir une influence sur le déroulement de l'évacuation (Sugimoto *et al.*, 2003). Le mode de fonctionnement d'un groupe (familial par exemple) implique des comportements différents par rapport à une personne seule. L'attente des autres membres du groupe peut ralentir l'évacuation, tout comme la concertation sur le choix de l'itinéraire.

Au-delà de ces caractéristiques, une autre distinction peut être faite sur la composition de la population ; il s'agit de la répartition des touristes et des personnes locales. En effet, ces deux sous-populations n'ont pas forcément les mêmes connaissances de l'aléa et du territoire local ; il est sous-entendu ici que les touristes n'ont pas les mêmes réflexes ou la même connaissance du territoire que les locaux. Cependant, cette répartition de connaissance n'est pas aussi tranchée, surtout face à un événement générant du stress. Des solutions sont donc envisageables, comme un rappel bref des règles d'évacuation à l'ensemble d'une population présente sur un territoire exposé, comme le montre la figure 3.18, lors d'un festival populaire au Japon. Cela permet une information sur le risque présent sur ce littoral et le comportement à adopter.

Cependant, la connaissance du territoire peut amener une personne à emprunter un itinéraire qui n'est pas celui à privilégier pour l'évacuation. La réaction face à l'arrivée du tsunami peut bouleverser le comportement d'une population pourtant informée. En effet, lors de l'arrivée des vagues de tsunami, les personnes peuvent présenter des attitudes diverses allant de la curiosité à l'égard du phénomène à la panique ou à la sidération. Le premier cas peut résulter d'une sous-estimation par la population du risque qui survient, parfois couplée à un oubli des événements antérieurs (Murakami *et al.*, 2012). Plutôt que d'évacuer des habitants se rapprochent du risque, car ils veulent voir le phénomène se produire pensant qu'ils sont à l'abri, ou sauver des biens pensant qu'ils en ont le temps. Ceci se retrouve dans de nombreux événements, comme lors des inondations dans le Var en octobre 2015 durant lesquelles sept personnes ont trouvé la mort dans les parkings souterrains de Mandelieu-la-Napoule en voulant mettre leur voiture à l'abri. Cette attitude peut aussi être le reflet d'un manque de confiance envers les autorités et les alertes, comme le souligne (Sahal, 2011), dans un exemple à la Réunion en 2004, où l'alerte de tsunami

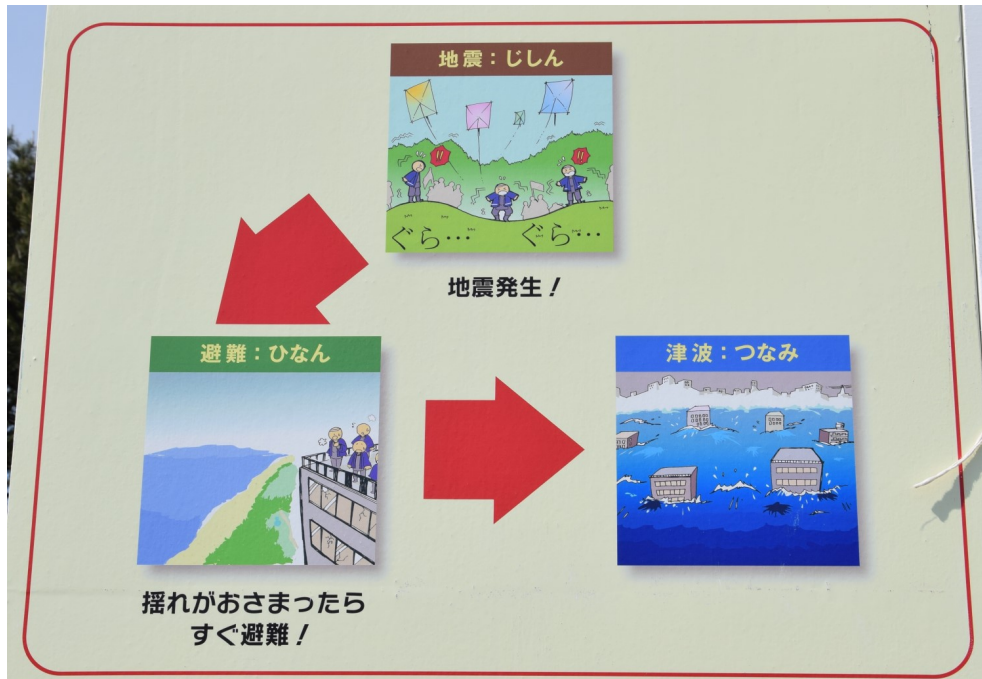


FIGURE 3.18 – Panneau d'information du comportement à adopter en cas de tremblement de terre lors du festival des cerfs-volants, à Hamamatsu, Japon.

Traduction : Tremblement de terre! > Allez vers un refuge! > Tsunami.

Sources : Plattard, O., 2014.

a amené les badauds sur le front de mer et les ports pour voir la vague arriver, ou bien encore les surfeurs qui vont à l'eau dans l'espoir de surfer "la" vague.

Un autre comportement est lié à la panique et au stress causé par la situation qui peuvent amener la population à sur-réagir. Des personnes veulent rejoindre un lieu plus élevé alors qu'elles sont déjà hors zone inondable. Elles se mettent alors en danger ou encombrant inutilement les routes afin d'atteindre un point plus haut ; ou encore, certains fuient et restent en un point élevé pendant plusieurs jours sans réelle nécessité, comme le souligne (Sahal, 2011). Ces sur-réactions peuvent augmenter la mise en danger des populations en entraînant un mouvement de la population ou en faisant adopter à d'autres de mauvais comportements d'évacuation.

Afin de favoriser les réactions adaptées permettant une mise en sécurité efficace des personnes, l'information de la population reste le moyen privilégié. La connaissance de l'aléa et des comportements de mise à l'abri permet de rétablir la perception du risque sur un territoire. En effet, l'image véhiculée dans les médias peut installer une image erronée d'un aléa entraînant sa sous- ou sur-estimation (Peroche, 2016). Les images sur-médiatisées des tsunamis d'Indonésie et du Japon, avec des vagues très hautes ne sont pas le reflet de ce qui pourrait advenir à Saint-Laurent-du-Var ou à Syracuse. Sur ces sites, les *worst-cases* prévoient des vagues de moindre hauteur, ce qui peut entraîner une sous-estimation du danger par la population. En effet, un tsunami de 3 mètres, comme il est prévu sur le littoral niçois, pourra ne pas sembler aussi dangereux que les événements asiatiques et



### CHAPITRE 3. LE TEMPS DE L'ÉVÈNEMENT

donc un manque de réaction à l'alerte peut être envisagé.

De plus, les images des catastrophes véhiculées par les fictions, comme les films, ne reflètent, bien souvent, que peu ou mal la réalité. C'est le cas, par exemple, avec le film *San Andrea* (2015) qui montre une famille prise dans un mega-tsunami à San Francisco et qui arrive à remonter une des vagues du tsunami dans un petit canot pneumatique, là où des porte-conteneurs sont emportés ; ce film montre par ailleurs un des héros plonger dans l'eau claire et sans courant de ladite vague alors que la réalité d'un tsunami serait plutôt boueux et avec un fort courant (30 km/h sur le front de mer). Cette vision donc peu réaliste de ce que peut être un tel évènement se retrouve dans bien d'autres super-productions. Une personne avec ces visions fausses de l'évènement se trouvant face à un tsunami pourrait alors imaginer pouvoir faire de même, ou du moins sous-estimer l'impact de l'évènement, alors qu'elle se met en réalité en danger. L'éducation aux risques permet donc, comme vu précédemment, de réduire ce phénomène, même si, l'information ne peut totalement éviter les comportements de sidération ou de tétanie face à l'arrivée du tsunami.

La population concernée par une évacuation face à un tsunami est hétérogène de par sa composition, sa réaction mais également par sa connaissance de l'évènement et du territoire. L'éducation aux risques présents sur le territoire concerné reste pour le moment la démarche privilégiée pour préparer à une bonne réaction d'une population en état de stress en cas d'évènement majeur.

Les enquêtes réalisées sur les terrains d'étude dans le cadre du programme Astarte (Lavigne, 2014) (voir chapitre 2) ont permis de mettre en avant la connaissance des risques sur ces sites. Il s'avère que les personnes ont beaucoup plus en mémoire des images relatives aux tsunamis depuis 2004 et 2011. Cependant, la vision de ces vagues est souvent surestimée puisqu'elles ne devraient pas excéder quelques mètres à Saint-Laurent-du-Var et Syracuse, alors que les images de l'Indonésie en 2004 et du Japon en 2011 montrent des vagues de plusieurs dizaines de mètres. A contrario de la sous-estimation de l'évènement, cela peut entraîner des réactions exagérées par rapport à l'inondation prévue.

Des cartes mentales représentant les lieux refuge pour Saint-Laurent-du-Var et les itinéraires d'évacuation dans le cas de Syracuse envisagés par les personnes enquêtées ont été réalisées à la fin des enquêtes de terrain (Lavigne, 2014). Les personnes interrogées devaient indiquer vers quel endroit elles envisageraient de fuir en cas d'alerte tsunami. Les réponses diffèrent entre Saint-Laurent-du-Var et Syracuse puisque, dans le premier cas, des lieux de mise en sécurité ont été indiqués alors que dans le second cas, des lieux refuge et des itinéraires y conduisant ont été indiqués. Dans le cas de Saint-Laurent-du-Var, la volonté qui ressort de ces cartes mentales est d'aller vers un point en altitude. Les deux zones principales qui ont été indiquées sont celles de l'hôpital et au-dessus de la gare (Figure 3.19). Ces deux lieux peuvent être considérés comme des points de repère dans la commune, des endroits où la forte pente donne une prise d'altitude rapide (voir chapitre 4). Néanmoins, les routes pour accéder à ces lieux n'ont pas été indiquées ; la présence de la voie rapide et de la voie de chemin de fer, ne facilite pas l'évacuation vers ces zones. On peut néanmoins

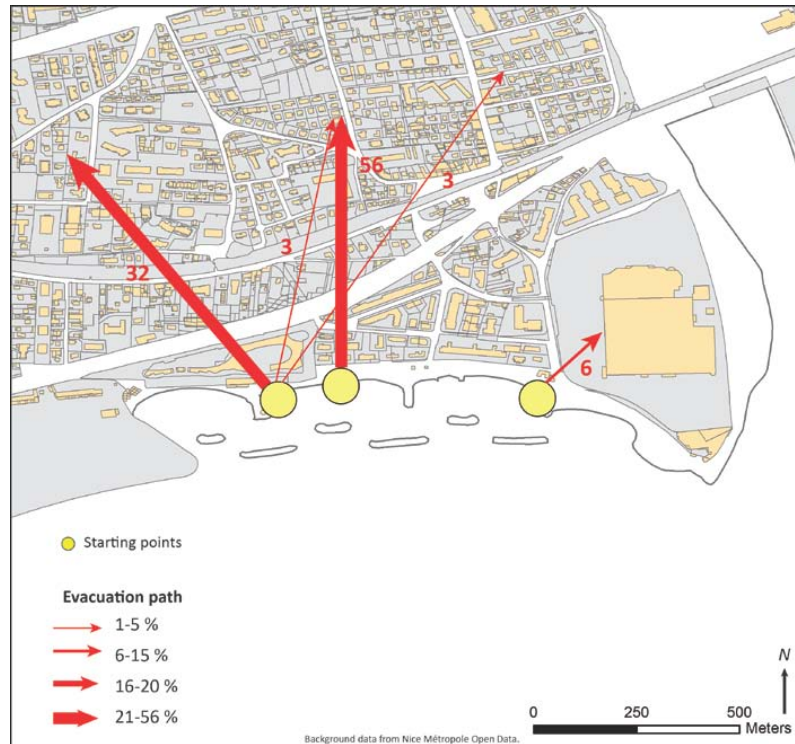


FIGURE 3.19 – Carte mentale d'indication des souhaits d'évacuation des personnes enquêtées à Saint-Laurent-du-Var.

Source : (Lavigne, 2016)

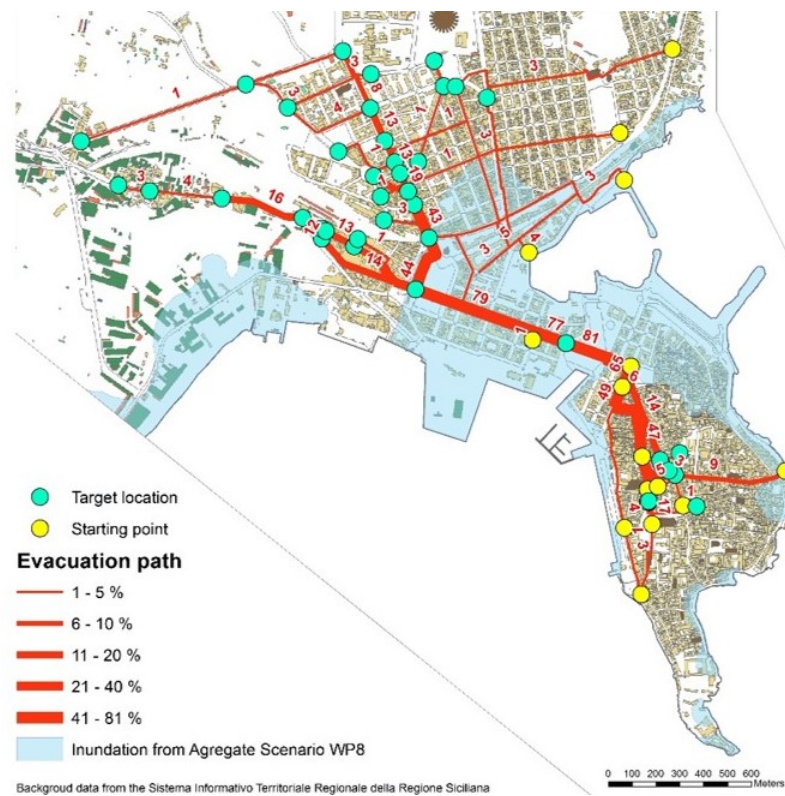


FIGURE 3.20 – Carte mentale d'indication des souhaits d'évacuation des personnes enquêtées à Syracuse.

Sources : Lavigne, 2016.

conclure que la population interrogée évoque une évacuation horizontale avec une prise de hauteur pour sortir de la zone de danger.

Dans le cas de Syracuse, la carte apporte des données plus précises sur les itinéraires envisagés par les personnes interrogées. Ces dernières se situaient majoritairement sur l'île d'Ortigia. Ce qui ressort de cette carte est la volonté de la très grande majorité des personnes de ne pas rester sur l'île d'Ortigia mais de rejoindre le "continent" (Figure 3.20). Le flux principal qui ressort des indications passe par la zone de jonction entre l'île et l'autre rive de Syracuse, amenant les personnes à s'exposer au danger dans cette zone inondable. De plus, la plupart des personnes interrogées souhaitent, comme dans le cas de Saint-Laurent-du-Var, rejoindre des sites spécifiques tels que la gare, l'église Madonna delle Lacrime ; ces derniers sont connus et sûrement font référence à des endroits déjà visités dans la ville (Lynch, 1960) (voir chapitre 4). Rares sont les personnes qui décident de rester sur Ortigia, sans doute par peur que la totalité de l'île ne soit inondée. Les résultats semblent plus confus sur ce site pour faire ressortir une stratégie d'évacuation. Néanmoins, l'évacuation horizontale vers un lieu connu est mise en avant. Mais, contrairement à Saint-Laurent-du-Var où la population cherche à se mettre en hauteur directement, les personnes interrogées sont prêtes à se mettre en danger en redescendant vers la zone de jonction d'Ortigia et du "continent", plutôt que d'aller directement vers le point haut le plus proche.

### 3.2.3 Vers une mise en sécurité

Le choix de la stratégie d'évacuation pour la mise en sécurité des personnes se construit en fonction de la topographie du territoire, mais également des moyens déployés pour l'aménagement des zones refuge et d'ouvrages de protection, de l'information et alerte de la population. Le temps que la population a devant elle pour évacuer un lieu est également déterminant. Lors de la mise en place d'une stratégie d'évacuation, le choix des itinéraires privilégiés joue un rôle important. Il est le reflet de la stratégie jugée la plus pertinente pour le territoire et la mise en sécurité des personnes.

La mise en place d'un itinéraire identifié vers une zone d'évacuation fait partie d'un des trois piliers d'une évacuation sûre selon Imamura (2009). En fonction du territoire, une évacuation motorisée et/ou piétonne est privilégiée. Comme évoqué précédemment, seule l'évacuation piétonne est considérée dans cette thèse. L'évacuation motorisée amène à penser une fuite sur une plus grande distance avec des encombrements et des problématiques de déplacements qui ne correspondent pas aux territoires étudiés dans le cadre de cette recherche (Murakami *et al.*, 2014).

Les itinéraires privilégiés sont définis en fonction de la stratégie adoptée, suivant ce qui a été évoqué précédemment dans ce chapitre (Scheer *et al.*, 2011). Le temps de l'évacuation qui peut être très limité, comme c'est le cas pour la côte française, représente la principale contrainte (voir chapitre 2). Une stratégie basée sur les événements passés (Imamura *et al.*, 2012) ainsi qu'intégrant des ouvrages de protection et une évacuation verticale et

horizontale serait éventuellement la meilleure réponse pour les territoires méditerranéens.

Néanmoins, certaines études et retours d'expériences révèlent que l'évacuation de la population, préparée et informée au préalable, peut ne pas se dérouler comme prévu. En effet, le tsunami du 11 mars 2011 au Japon a permis des retours d'expériences sur les évacuations prévues dans des scénarios et ce qui s'est réellement passé. Dans le retour d'expérience par rapport aux scénarios envisagés sur le territoire du Tohoku, Mas *et al.* (2012b,c) mettent en évidence la différence entre l'évacuation souhaitée et l'évacuation réelle par les personnes. Certaines personnes avaient notamment émis l'hypothèse de fuir immédiatement après l'alerte, mais ont finalement paniqué ou ne sont parties que plus tard.

Au-delà de l'information de la population, des ouvrages mis en place, ou de la détermination des zones refuge et des itinéraires privilégiés, la mise en place d'une stratégie d'évacuation doit donc prendre en compte qui évacue, à quelle vitesse et comment (Sugimoto *et al.*, 2003) afin de garantir la mise en sécurité de la population.

Dans le cas de Syracuse, des itinéraires privilégiés et des zones refuge ont déjà été mis en place à travers deux plans d'évacuation :

- Le premier est celui réalisé par la Protection Civile et présent depuis 2004 sur des panneaux placés au niveau de sites touristiques de la commune. Il prend seulement en compte le risque sismique. Ce plan concerne l'île d'Ortigia (Figure 3.21) ainsi que la partie "continentale" touristique de la commune, allant de la jonction des ponts jusqu'à l'église Madonna delle Lacrime et la gare (Figure 3.22). Il met en avant (en bleu) des itinéraires privilégiés d'évacuation ainsi que des zones refuge (en vert et rouge) afin que les gens se regroupent en sûreté, éloignés de tout effondrement potentiel de construction. Une distinction est faite entre les zones refuge vertes correspondant à des espaces de regroupement et d'attente et les zones rouges qui sont des zones refuge à plus long terme.

La préconisation principale pour cette évacuation est de s'éloigner des zones de bâtis vulnérables et des ruelles pour aller vers un endroit dégagé. Pour la partie "continentale", les zones refuge se situent au niveau du parc de l'église Madonna delle Lacrima, ainsi que dans les parcs publics et dans la zone de jonction avec Ortigia. Le parc archéologique est quand à lui une zone refuge à plus long terme. Concernant l'île d'Ortigia, les itinéraires mis en avant entraînent les personnes évacuant vers des zones refuge que sont la marina et la zone de jonction entre Ortigia et le "continent" ; l'extrémité de l'île, au niveau du château, est également une zone d'attente.

La majeure partie de ces zones refuge est donc positionnée sur le bord de mer, espace libre de toute construction.

- Le second plan d'évacuation prend, quant à lui, en compte le risque de tsunami et a été réalisé par le laboratoire du GRED dans le cadre du programme Astarte (Lavigne, 2016). Il couvre l'île d'Ortigia et une très large partie de la commune de

# CHAPITRE 3. LE TEMPS DE L'ÉVÈNEMENT



FIGURE 3.21 – Plan d'évacuation en cas de séisme par la Protection Civile, au dessus de la marina à Ortigia.

Sources : Plattard, O., 2016.



FIGURE 3.22 – Plan d'évacuation en cas de séisme par la Protection Civile, au Parc Archéologique, Syracuse.

Sources : Lavigne, F., 2016.



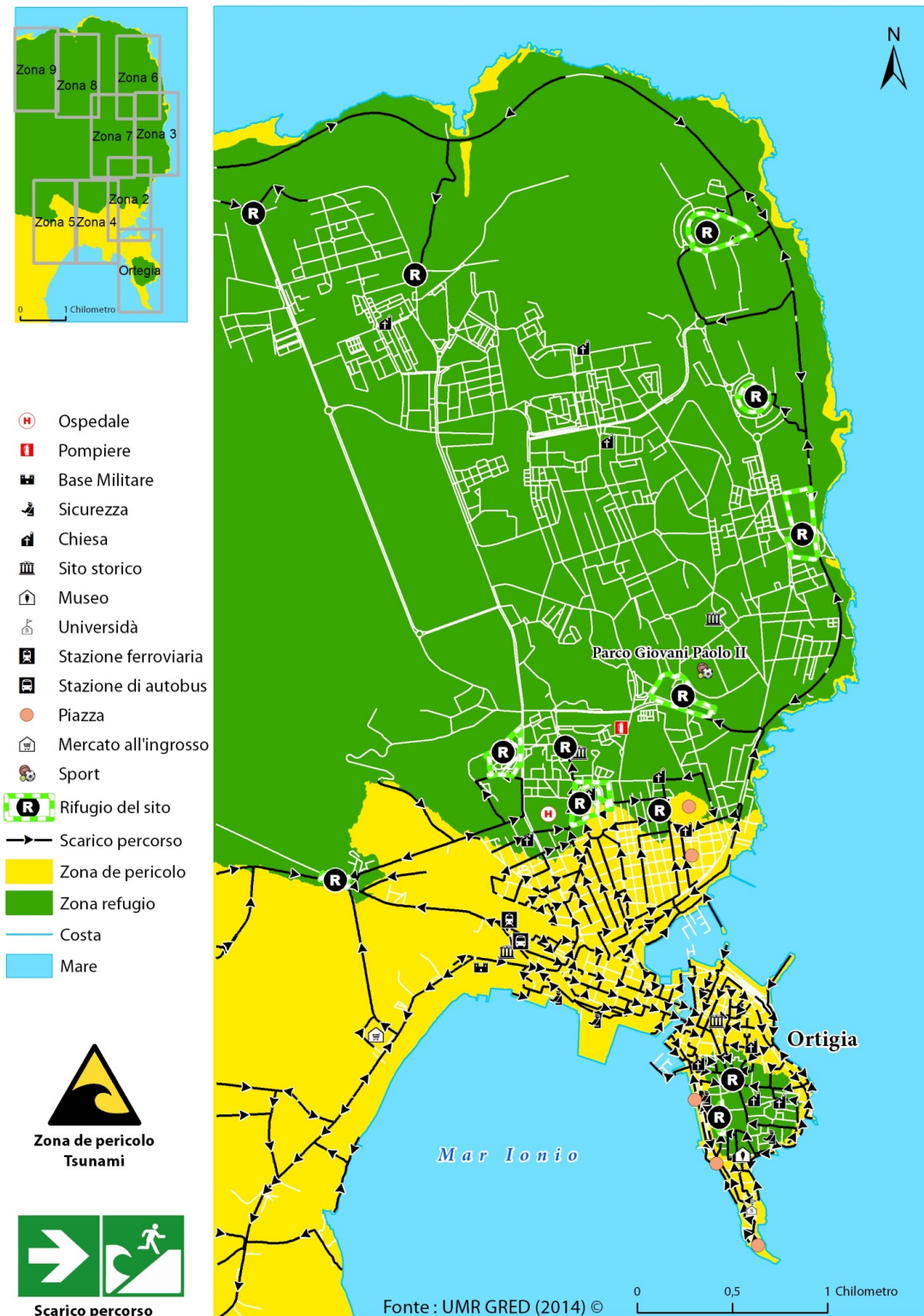


FIGURE 3.23 – Plan d'évacuation en cas de tsunami réalisé dans le cadre du programme Astarte.

Sources : GRED, 2015, Lavigne, 2016

Syracuse (Figure 3.23). Il met en avant une zone refuge (en vert) ainsi qu'une zone à évacuer (en jaune) correspondant à la zone inondable à laquelle s'ajoute une marge de sécurité. La méthode dans la construction de ce plan prend en compte une zone de danger ou d'inondation de 5 mètres, à laquelle est ajoutée une marge de sécurité de 5 mètres supplémentaires ; les zones refuge sélectionnées sont donc toutes situées à au moins 10 mètres au dessus du niveau de l'eau (Carrasco et Cireau, 2014). Des zones refuge (point noir avec un "R") sont mises en avant. Elles ont été sélectionnées en fonction de leur accessibilité et de leur dimension (Carrasco et Cireau, 2014; Lavigne, 2016). Il s'agit dans ce cas de zones refuge au même titre que les zones d'attente du plan de la Protection Civile et ne visent pas à regrouper les personnes sur le long terme. Des itinéraires (en noir) sont indiqués et correspondent au plus court chemin (en distance) pour atteindre une zone refuge.

Le cheminement conseillé dans ce plan d'évacuation est de s'éloigner du bord de mer en direction d'une zone refuge située en altitude et dans les terres.

La confrontation de ces plans révèle la contradiction des informations préconisées aux personnes en train d'évacuer. En effet, mettons-nous à la place de quelqu'un présent à Syracuse, et notamment sur l'île d'Ortigia. Un tremblement de terre se fait ressentir. Si nous avons eu la chance de nous trouver à proximité d'un des rares plans de la Protection Civile, ou du moins, si nous en avons connaissance, nous nous éloignons alors des constructions potentiellement dangereuses pour nous déplacer vers le bord de mer, là où le risque de chute de débris lié à l'endommagement ou l'effondrement des constructions est minime. Quelques minutes plus tard, si tout se passe bien, nous sommes vers le front de mer, mais des vagues de tsunami semblent approcher et, à ce moment là, nous devons nous déplacer à l'inverse de ce que nous venons de faire pour retourner dans les terres et ainsi sortir de la zone inondable. Il convient de préciser que ce retour dans les terres peut être compromis suite à l'effondrement de constructions et à l'obstruction de voies de circulation. Il est donc possible de se retrouver vulnérable sur le front de mer sans pouvoir accéder à une zone refuge. Ces préconisations semblent donc quelque peu contradictoires pour une personne tentant d'évacuer. Une des raisons majeures de cette incohérence résulte de la prise en compte d'un seul aléa dans ces plans d'évacuation.

Il est important de préciser qu'à Syracuse, même si un tsunami peut survenir suite à un glissement de terrain, la grande majorité des tsunamis sont survenus, par le passé, suite à une secousse sismique ressentie sur le site. Cette première indication sous-entend déjà la pertinence de la prise en compte des deux aléas lors de la mise en place d'un plan d'évacuation.

Ces deux plans font aussi émerger des questions quant à la prise en compte de ce contexte multi-risques ; dans ce contexte, comment garantir la sécurité des personnes évacuant tout au long de leur itinéraire d'évacuation ? Comment assurer l'accessibilité à des zones refuge ?

## Conclusion

Ce chapitre permet de revenir sur la capacité de réponse et de protection d'une population face au risque tsunami, à différentes temporalités et selon divers moyens : depuis l'élément déclencheur qui permet d'émettre l'alerte, l'aménagement préalable et la mise en place d'ouvrages de protection, de l'éducation et de l'information de la population jusqu'à la stratégie d'évacuation sur le territoire et la mise en sécurité des personnes.

Les systèmes de veille génèrent l'alerte qui est l'élément déclencheur de l'évacuation des personnes. Ce sont ces organismes de veille, qui, à partir des données de l'évènement source informent la population littorale de la nécessité de se mettre à l'abri. Suite à cette information, les personnes doivent atteindre une zone refuge et il est primordial qu'il y ait à ce moment-là une bonne information sur les itinéraires privilégiés et les zones refuge. Ce qui ressort de l'analyse des sites d'étude est la présence d'une information sur les risques présents sur ces territoires, mais néanmoins sans prise en compte de l'éventualité d'un tsunami. De plus, l'information ne semble pas mise à jour d'un point de vue gouvernemental depuis 2011 pour Saint-Laurent-du-Var et depuis 2004 pour Syracuse. Tout comme l'information, des ouvrages peuvent venir conforter la bonne marche de l'évacuation en réduisant la hauteur ou la vitesse du tsunami. Ce dernier élément est important, car il peut permettre de gagner quelques précieuses minutes dans le processus d'évacuation où le temps est compté.

En fonction de la topographie du territoire et des évènements passés permettant de définir la zone à évacuer, une évacuation horizontale ou verticale est mise en avant. Le premier cas induit de se déplacer plus loin dans le cas d'un littoral en plaine et est donc mis en place lors de la présence d'un fort dénivelé pour garantir une montée rapide des personnes vers un point en dehors de la zone inondable. Le second cas concerne une évacuation verticale et nécessite la sélection de zones refuge bâties et diagnostiquées comme résistantes aux vagues et aux aléas tsunamigènes comme le séisme. Ces stratégies d'évacuations peuvent être combinées afin de permettre à chacun, quelle que soit sa localisation, un accès rapide à une zone refuge. Actuellement, à Saint-Laurent-du-Var, il n'existe pas de stratégie mise en place pour une évacuation en cas de tsunami ou de séisme. En revanche, à Syracuse, la Protection Civile a mis en place une information relative à l'évacuation en cas de tremblement de terre à travers des plans d'évacuation.

La mise en place de stratégies d'évacuation pour une population littorale intègre une multitude de contraintes liées au territoire mais également à la population elle-même. Il est possible de se protéger et d'alerter, mais l'évacuation et la fuite vers une zone refuge restent les seuls moyens fiables pour garantir la mise à l'abri des personnes. Ces dernières peuvent avoir des réactions liées au stress et amenant à des comportements les mettant en danger. Cependant, la stratégie adoptée sur un territoire doit assurer la mise en sécurité de chaque individu.



### CHAPITRE 3. LE TEMPS DE L'ÉVÈNEMENT

Comme le révèlent les préconisations des plans d'évacuation de Syracuse, toutes ces prescriptions semblent néanmoins manquer de pertinence lorsque la possibilité de la survenance de deux aléas combinés n'est pas intégrée. Le tsunami étant directement lié à d'autres aléas, l'exemple de ces plans d'évacuation nous montre à quel point la mise en place de stratégies d'évacuation pour un aléa isolé des autres peut apporter de la contradiction et doit donc intégrer le contexte multi-risques.

---

## CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE

---

Cette première partie permet de poser les éléments qui constituent un territoire littoral et sa population face à un risque de tsunami. L'objectif est d'avoir la connaissance des différents éléments qui sont pris en compte dans la mise en place du modèle et de scénarios d'évacuation de la population littorale face à un tsunami.

A travers l'explication du mode de fonctionnement des tsunamis, cela met en avant la connexion avec un séisme précurseur. Ce dernier peut potentiellement impacter en premier le même territoire que le tsunami. Les effets des deux aléas se retrouvent donc combinés, le tsunami générant des dommages sur un territoire urbanisé déjà fragilisé par les secousses sismiques. En partant de la singularité des deux aléas, le premier chapitre nous a mené à la particularité de leur interconnexion. Le contexte urbain semble propice à l'accumulation des effets combinés du séisme et du tsunami, et pose, à travers la génération de dommages sur les constructions et la nécessité de la population de fuir hors zone d'inondation de l'eau, des problématiques complexes quant à la mise en sécurité des personnes.

Afin de mieux cerner l'environnement dans lequel se tient l'évacuation face au tsunami, le chapitre 2 revient sur le choix des sites refuge, ainsi que l'exposition aux risques et les scénarios qui sont envisagés sur les territoires d'étude. Les sites de Saint-Laurent-du-Var (France) et de Syracuse (Italie), offrent des terrains propices à l'évacuation en milieu urbain tout en générant des problématiques différentes. Saint-Laurent-du-Var présente un front de mer très urbanisé avec de forts enjeux, tandis que Syracuse se compose de l'île ancienne très touristique d'Ortigia avec le point névralgique de l'évacuation au niveau de la jonction entre la partie Sicilienne et Ortigia composée de deux ponts et du port, en pleine zone inondable.

Ce chapitre est également l'occasion de revenir sur les questionnaires qui ont été effectués dans les deux sites d'études auprès de la population. Cette démarche permet de mieux cerner la connaissance des tsunamis par ces personnes, ainsi que leur volonté de réaction

## CONCLUSION PARTIE 1

face à un risque imminent.

Les deux sites sont exposés aux tsunamis engendrés par tremblement de terre proche et lointain ou par glissement de terrain. Cependant, Syracuse a une probabilité plus grande qu'un séisme de grande magnitude et donc fortement ressenti survienne.

Trois scénarios ont été retenus comme scénarios de référence pour chacun des sites. Pour Saint-Laurent-du-Var, nous trouvons un scénario avec un séisme de faille Ligure qui apportera une inondation allant jusqu'à 3 mètres, moins de 20 minutes après sur la côte ; un second scénario avec un séisme tsunamigène serait celui du Nord du Maghreb avec un tsunami traversant la Méditerranée et arrivant 1 heure 15 après sur le littoral français avec un maximum de hauteur d'inondation de 2,3 mètres ; le troisième scénario concerne un glissement de terrain dans la Baie des Anges générant un tsunami de 3 mètres de haut instantanément. Dans le cas de Syracuse, deux scénarios sont aussi avec des tsunamis engendrés par des séismes avec un premier, lointain, provenant de la côte grecque et pouvant générer au bout de 4 heures un tsunami de 6 mètres, le second scénario avec un séisme au large de Syracuse et ressenti sur la côte générant en moins d'une heure, une inondation de 5 mètres ; le troisième scénario est un tsunami engendré par un glissement de terrain et amenant une hauteur d'eau de 1 à 3 mètres en moins de 10 minutes. La vitesse d'arrivée du tsunami à son importance pour la mise en place de l'évacuation et ici elle oscille entre 6-8 m/s pour Saint-Laurent-du-Var et 8-10m/s pour Syracuse.

Des stratégies de protection et d'évacuation des territoires littoraux existent aujourd'hui. Un système de veille à l'échelle mondiale permet d'alerter les pays concernés par l'arrivée d'un tsunami. Chaque pays doit ensuite mettre en place des moyens d'information, de mise à l'abri de la population et de ralentissement ou d'atténuation de l'impact du tsunami. En fonction de chaque territoire, de sa morphologie, de sa topographie, des options d'évacuations verticales ou horizontales peuvent être faites. Sur les deux sites d'étude, il n'y a pas de dispositions spécifiques pour les tsunamis. A Saint-Laurent-du-Var, il n'existe pas d'itinéraires d'évacuation ou de zones refuge ciblées par la mairie. A Syracuse, en revanche, il existe des plans d'évacuation mis en place par la Protection Civile aux abords des sites touristiques, et visant la mise à l'abri des personnes en cas de tremblement de terre. La mise en parallèle avec un plan d'évacuation en cas de tsunami<sup>10</sup>, nous révèle une contradiction dans les instructions d'évacuation ; en effet, le premier isole des itinéraires et des zones refuge sur le front de mer, zones isolées de toutes constructions, tandis que le second préconise des itinéraires et zones refuge vers la partie haute de la ville, hors zone inondable mais au milieu des constructions anciennes qui peuvent s'effondrer.

Cette dernière réflexion sur la mise en place de stratégie d'évacuation révèle que, lorsque deux aléas sont autant inter-connectés, il est difficile de les déconnecter lorsqu'il s'agit d'isoler des mesures de réduction des impacts et de la mise à l'abri des personnes. Cette première partie nous permet de mieux cerner les différents aspects de la mise en place de scénarios

---

10. réalisé dans le cadre d'Astarte

d'évacuation de population littorale dans un contexte multi-risques. Le risque sismique amène un nouveau rapport du piéton à l'espace construit dans lequel il doit cheminer. La prise en compte conjointe des risques sismique et tsunami, prend d'autant plus son sens dans ces sites d'étude qu'elle interroge la lisibilité et la praticabilité des espaces urbains en situation d'évacuation piétonne.



---

## PARTIE 2. UN SYSTÈME RÉACTIF FACE AUX CATASTROPHES

---

*"L'homme marche droit parce qu'il a un but :  
il sait où il va, il a décidé d'aller quelque part et il y marche droit."*

Le Corbusier (2011)

Au-delà de la prise en compte des deux aléas tsunami et séisme, l'environnement urbain dans lequel se déroule l'évacuation génère des questions quant à son influence sur l'évacuation. Que des mesures d'alerte et de mise à l'abri soient déjà existantes ou non, le piéton est face à un choix lors de son évacuation. Cette dernière peut se révéler complexe, notamment dans un contexte multi-risques, comme cela a été abordé lors de la partie 1, chapitre 3. Des informations d'évacuation contradictoires existent sur un même territoire – Syracuse –, posant la question du choix des itinéraires par le piéton lors de sa mise à l'abri.

Contrairement à ce qu'évoque Le Corbusier, l'homme ne marche pas toujours droit au but. L'environnement urbain, à travers les constructions, les perspectives, les indications influence le piéton. Dans l'évacuation, l'itinéraire pour rejoindre une zone refuge n'est pas forcément droit en fonction de l'environnement et de la visibilité qu'à le piéton jusqu'à cette zone de mise à l'abri ; de plus, en fonction du contexte, et notamment de l'impact d'un séisme, le piéton est éventuellement amené à revoir son chemin.

Les chapitres 4 et 5 permettent de construire les problématiques de l'influence urbaine sur l'évacuation à travers les notions de visibilité et de praticabilité l'espace urbain. Elles sont ensuite implémentées dans le modèle STEP, dont le chapitre 6 détaille la construction.

Le piéton, lors de son évacuation, doit faire des choix afin de se mettre à l'abri. Ces choix peuvent être influencés par la présence d'indications de mise à l'abri ou par sa connaissance des lieux. Néanmoins, comme ce fut rappelé dans le chapitre 2, les personnes présentes sont

pour une grande part étrangères aux sites où elles se trouvent (Lavigne, 2016; Dogulu *et al.*, 2014). De plus, la plupart des mesures de prévention présentes sur les sites d'étude ne sont pas connues des personnes interrogées durant les enquêtes (Dogulu *et al.*, 2014).

Face à ce constat et aux dispositifs mis en place sur les sites d'étude, des questionnements se posent concernant les choix des individus lors de leur évacuation. La construction de l'itinéraire est réalisée en fonction de l'environnement urbain, de sa morphologie, des éléments marqueurs présents et du vécu de l'individu (Hillier et Hanson, 1984; Hillier et Vaughan, 2007; Lynch, 1960). Le chapitre 4, pose les questions liées au déplacement piéton en milieu urbain au prisme des recherches existantes. Le choix du piéton n'est pas nécessairement celui du plus court chemin, mais l'idée du chemin le plus simple ; appuyant cette idée, la perspective de vue et de connaissance préalable de l'itinéraire ont un rôle à jouer dans le choix d'une personne. La question soulevée dans ce chapitre concerne la lisibilité en milieu urbain et l'influence sur les choix de l'individu en train d'évacuer.

Les enquêtes sur les terrains d'étude, ont permis la réalisation de cartes mentales avec les personnes interrogées. Les critères d'enquêtes ont un peu varié entre Saint-Laurent-du-Var et Syracuse et les cartes mentales sont plus précises pour la ville sicilienne. La personne interrogée avait pour consigne d'indiquer son itinéraire d'évacuation au départ du lieu où elle se trouve en cas de tsunami. Une analyse des cartes mentales agrégées par points de départ des itinéraires d'évacuation envisagés a été réalisée. Elle permet de mettre en parallèle les résultats d'enquêtes et l'apport théorique afin de mettre en place une variable de lisibilité à intégrer au modèle STEP.

Les choix d'itinéraire d'évacuation d'un piéton sont aussi influencés par l'impact sur les constructions d'un tremblement de terre précurseur au tsunami. En effet, comme précisé dans le chapitre 1, le séisme peut être ressenti sur le territoire exposé au tsunami et entraîner des dégâts sur les constructions. Les ondes sismiques sollicitent les constructions et entraînent des dommages générant des débris et pouvant aller jusqu'à la destruction du bâtiment (Balandier, 2004; Zacek, 1996). Ces débris se répandent sur l'espace de voirie autour du bâtiment. Ces effets des séismes posent la question de la praticabilité de l'espace urbain pour un piéton. En effet, ces débris peuvent obstruer l'espace de voirie, remettant en cause un itinéraire d'évacuation jusqu'à une zone refuge et donc, de fait, son accessibilité.

Les dommages sur les constructions dépendent de nombreux critères de construction parasismique. Il existe des méthodes de diagnostic des constructions, afin de définir leur vulnérabilité sismique. Un travail de terrain a donc été réalisé à Syracuse en 2016, afin de diagnostiquer les bâtiments autour des zones refuge déjà identifiées (Lavigne, 2014). Ce travail permet de définir la classe de vulnérabilité sismique pour chaque construction diagnostiquée. En fonction de l'intensité sismique, l'impact potentiel sur la construction varie. Cela s'organise sous une échelle de degrés de dommages (Grünthal, 2001). A l'issue de cette catégorisation des bâtiments, il est ensuite possible de définir la probabilité de dommage pour chaque classe de vulnérabilité en fonction de l'intensité sismique.

En partant du travail de terrain, il est donc possible de voir l'impact d'un séisme pré-

curseur sur les constructions, ainsi que les conséquences sur le réseau de voirie. La question de l'accessibilité des zones refuge est au cœur de ce questionnement puisque, si les voies sont obstruées, la mise en sécurité des personnes dans ces zones refuge peut être compromise. A partir de ces données, une variable de praticabilité est définie et implémentée dans le modèle STEP.

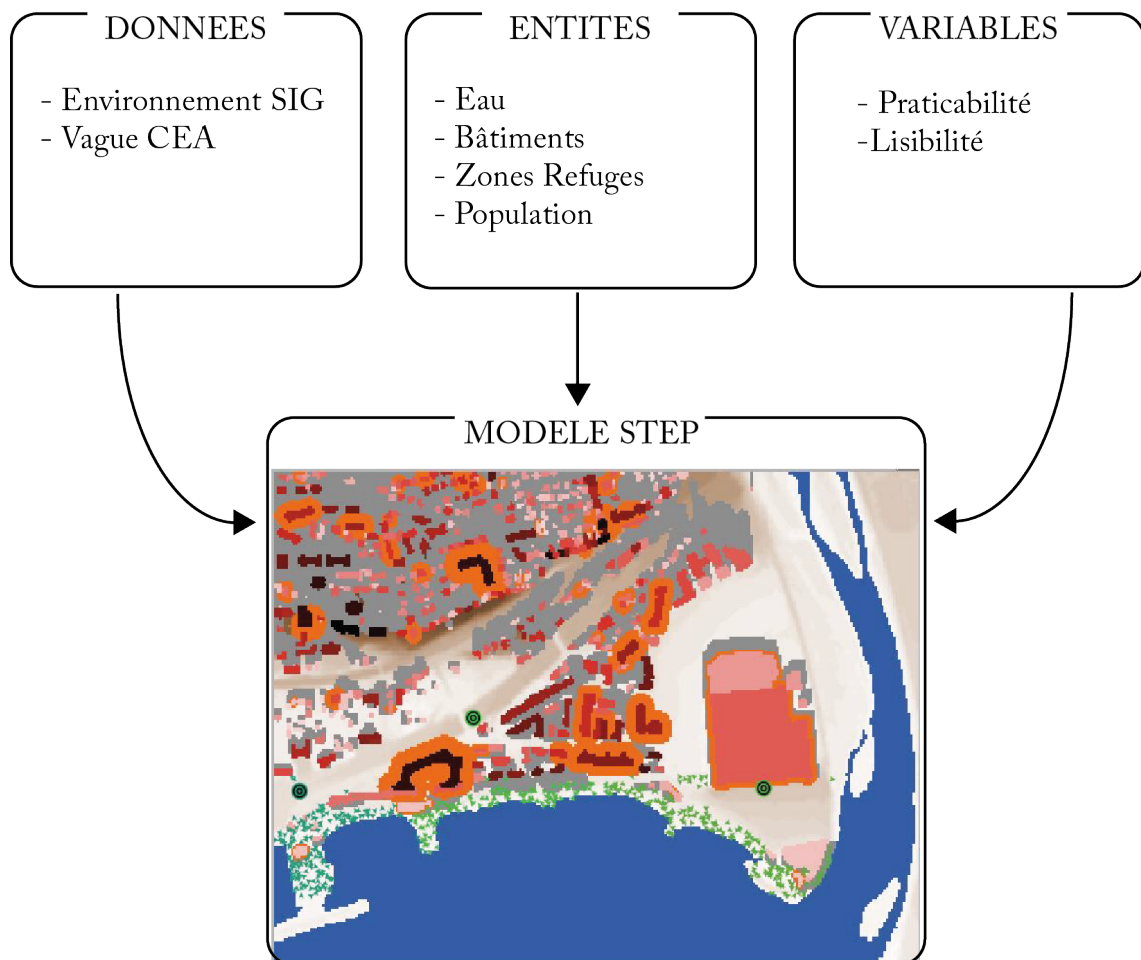


FIGURE 3.24 – Composants du modèle STEP  
Réalisation : Plattard, O., 2018

Les chapitres 4 et 5 posent les questions de la lisibilité et praticabilité de l'espace urbain, amenant à la mise en place de variables implémentables dans le modèle STEP. La modélisation est un outil approprié aux problématiques de dynamique d'évacuation en milieu urbain ; et plus particulièrement la simulation multi-agents qui va permettre la modélisation de systèmes complexes de manière souples (Banos *et al.*, 2015).

La modélisation étant une représentation schématique de la réalité (Haggett, 1965), il existe différents types de modélisations, dont le choix dépend notamment de l'échelle et du degré de détail nécessaires correspondant au système concerné. Le chapitre 6 permet



de revenir sur les différents types de modélisations statiques et dynamiques et plus particulièrement de leurs usages dans le domaine des risques majeurs. Les modèles dynamiques sont abordés selon leur catégorisation du niveau macro avec les modèles à équations différentielles, méso à travers l'usage des automates cellulaires et enfin micro avec les modèles multi-agents.

Le modèle STEP est constitué de différents éléments se référant aux données des sites d'étude, des aléas et à la population (Figure 3.24). Un détail de l'implémentation des différentes entités et de leurs règles respectives est réalisé. L'utilisation des données du CEA sur le tsunami envisagé, permet l'implémentation de l'inondation sous forme d'automate cellulaire. L'environnement du modèle est basé sur des fichiers SIG. Ces derniers permettent également l'implémentation des constructions et l'intégration de la variable de praticabilité à travers un automate cellulaire. De plus, les zones refuge sous forme d'agents aboutissent à l'implémentation de la lisibilité urbaine. Enfin, la population est implémentée sous forme d'agents avec ses caractéristiques d'évacuation.

## CHAPITRE 4

---

### UN DESSIN DE VILLE DÉTERMINANT

---



FIGURE 4.1 – En haut : Vue de Syracuse depuis Ortigia vers la Sicile. En bas : Vue aérienne de Santa Barbara, USA.

Sources : (haut) Plattard, O., 2016, (bas) Duroudier, S., Dutel, F. et Le Goix, R., 2010.

Lorsque l'on se promène dans une ville, il est aisé de remarquer des éléments qui la caractérisent par rapport à une autre, voire ses caractéristiques propres par quartier. Cela peut être lié à son histoire, à son architecture ou encore à sa topographie qui ont façonné une morphologie urbaine particulière.

On peut tenter de mettre en rapport deux paysages urbains bien différents, comme dans la Figure 4.1 avec une vue de Syracuse (Italie) et une de Santa Barbara (Etats-Unis). Ce parallèle a été choisi car il illustre bien les notions de visibilité et lisibilité de l'espace urbain qui sont abordées tout au long de ce chapitre 4. A première vue, le dédale de ruelles au milieu des constructions anciennes d'Ortigia (Figure 4.1, en haut) semble désordonné, tandis que la géométrie perpendiculaire des rues de Santa Barbara (Figure 4.1, en bas) rend la lisibilité de la ville plus simple. Néanmoins, lorsque l'on regarde de plus près, on s'aperçoit que, par la singularité de chaque ruelle, un piéton trouve des points de repères dans Syracuse là où l'homogénéité de morphologie du bâti, rendant chaque rue et carrefour similaires aux voisins, ne lui facilite pas la tâche dans la ville états-unienne.

Pour se repérer lors d'un cheminement, il faut trouver des points de repères ou encore arriver à se situer dans la ville dans son ensemble ou simplement le long d'une voie, de manière consciente ou non (Stonor, 2011). Tout au long d'un itinéraire, une perspective de vue se crée ou encore des éléments marqueurs du paysage viennent comme autant de points de repères (Lynch, 1960). Lors d'une évacuation piétonne en cas de catastrophe, la lisibilité de l'espace urbain est donc susceptible d'exercer une influence sur le choix de l'itinéraire par l'individu.

Afin d'aborder ces notions, il convient, dans un premier temps de définir l'espace urbain dédié à l'évacuation dans le cadre de cette recherche. Cela nous permet, dans un deuxième temps d'aborder la question de la lisibilité de l'espace urbain. Dans ce cadre, les constructions prennent toute leur importance en amenant des perspectives ou, au contraire, des vues obstruées (Hillier, 2007). Elles se placent ici comme obstacles potentiels à une vue dégagée vers une zone refuge. D'un autre côté, les bâtiments constituent également des éléments structurant de l'espace urbain, des points de repères tout au long de l'itinéraire d'évacuation ou comme objectif de refuge (Lynch, 1960). Troisièmement, ces éléments sont confrontés à la réalité des itinéraires indiqués par les personnes interrogées par le biais des cartes mentales réalisées dans le cadre des enquêtes de terrain à Syracuse et Saint-Laurent-du-Var dans le cadre du programme Astarte (Lavigne, 2014).

Enfin, l'analyse de ces cartes mentales nous amènera à la construction de variables et caractéristiques qui permettent l'implémentation de la notion de lisibilité dans le modèle de simulation STEP. L'exploration des différents scénarios de simulation, permet, à travers les résultats, de mettre en évidence l'influence de l'environnement urbain sur les choix de individus et sur leur évacuation.

## 4.1 L'espace de la rue comme réseau pour l'évacuation

Dans cette thèse, il est question du mécanisme d'évacuation d'une population déjà située en dehors des bâtiments. Les personnes évacuantes cheminent donc à l'extérieur, dans l'espace urbain. C'est pourquoi, il est important de préciser, dans un premier temps, l'espace concerné par ce cheminement piéton afin, par la suite, de comprendre les mécanismes liés aux parcours des individus dans ce réseau urbain.

Le réseau viaire pris en compte dans cette thèse est avant tout un réseau de déplacements. Il peut être considéré à différentes échelles, ce qui induit des problématiques différentes. Ces échelles peuvent être divisées en trois niveaux : macro, méso et micro (Figure 4.2). Ces trois niveaux peuvent être étudiés séparément, mais ils sont également imbriqués, puisque faisant partie d'un tout. A l'échelle macro, un réseau de déplacement urbain est vu comme un système de coordination de points stratégiques, de distribution locale ou encore de déplacements rapides (Lagesse, 2015). Cependant, lorsque l'on s'attarde au niveau méso (Figure 4.2), le réseau ne devient plus seulement une continuité de sommets et de segments reliant des points, mais il devient surtout un réseau composé d'un ensemble d'usages piétons ou motorisés. Enfin, au niveau micro, l'espace de la rue est considéré de manière plus détaillée, ainsi qu'à l'échelle de l'individu évoluant dans cet espace de voirie comprenant des vues ou obstacles et en lien avec les autres personnes autour de lui.

Il est question dans cette thèse de cheminement piéton en milieu urbain<sup>1</sup>. Le déplacement piéton trouve sa place dans un espace libre défini principalement par le tissu bâti (Kanellopoulou, 2015). Le choix a donc été fait de considérer comme espace propice à l'évacuation des personnes, tout l'espace libre de voirie, que ce soit les trottoirs, les voies de circulations motorisées ou encore les passages tels qu'une ruelle ou un sentier ; c'est-à-dire tout l'espace non bâti indépendamment de son usage d'origine, hors période d'alerte et d'évacuation en cas de catastrophe.

Ce qui nous intéresse dans cette thèse, sont les niveaux méso et micro (Figure 4.2) :

- le premier pour la prise en compte de tout l'espace libre disponible pour un cheminement piéton, en opposition avec le bâti, obstacles contraignant le réseau.
- le second pour la prise en compte du cheminement individuel et des contraintes induites par l'environnement bâti ainsi que par les interactions avec les autres individus.

Il est important de préciser que les deux échelles du réseau viaire prises en compte dans ce cas d'évacuation piétonne permettent un questionnement lié au cheminement des individus et à l'influence de l'environnement bâti sur leur parcours. Cette influence se base sur plusieurs paramètres qui sont développés dans la sous-partie suivante. Cependant, la forme du réseau viaire fait partie des critères influençant les choix d'itinéraires des

---

1. Comme précisé dans le chapitre 2 de cette thèse, les résultats des questionnaires Astarte révèlent une forte majorité d'intention de fuite piétonne (Lavigne, 2014).



FIGURE 4.2 – Échelles urbaines du réseau viaire, et leur prise en compte dans le modèle.  
Réalisation : Plattard, O., 2015.

personnes. Cette forme n'est pas figée et a évolué au fil du temps. Chaque ville a un réseau de voirie qui a été établi soit par planification soit au fur et à mesure de son histoire et en fonction de sa topographie. Les informations portées par la géométrie du réseau peuvent se révéler riches de sens (Kansky, 1963). En fonction du but ou du contexte de création d'une partie du réseau, la morphologie urbaine est le reflet du contexte historique dans lequel il a été mis en place. La forme peut donc avoir pour vocation de se cacher, dans des ruelles étroites, ou au contraire, plus récemment de s'ouvrir pour exposer l'espace entre le bâti à la vue de tous (Lagesse, 2015).

C'est le cas par exemple à Syracuse où la morphologie des axes et des constructions permet la lecture de son histoire : les ruelles sinueuses d'Ortigia rappellent le passé de la cité antique en proie aux invasions et devant se protéger derrière ses murailles. Elles évoquent également la nécessité de garder la fraîcheur durant l'été et donc de privilégier l'ombre dans les ruelles ; tandis que la partie "continentale" de la ville a été planifiée au XIXème siècle et montre l'expansion rapide de la cité lors de l'unification italienne, les grands axes larges et la géométrie des îlots ne sont pas la marque d'une urbanisation antique.

Ces caractéristiques propres à chaque milieu urbain jouent un rôle dans le cheminement piéton. La morphologie de l'espace libre, en opposition au bâti induit une lisibilité et une visibilité lors de l'itinéraire d'un piéton qui peut influencer ses choix lors de l'évacuation.

## 4.2 Quelle influence du tissu urbain dans le choix de l'individu ?

Lors de l'évacuation sur l'espace de voirie, les personnes font des choix de cheminement afin de se mettre à l'abri ou de rejoindre une zone refuge. Leurs itinéraires ne sont néanmoins pas forcément directs jusqu'à leur mise en sécurité. En effet, en milieu urbain, plusieurs facteurs rentrent en compte dans les choix d'un piéton, comme l'environnement bâti et ses ambiances, perspectives et ouvertures, etc. Les influences de l'environnement urbain sur l'individu sont l'objet de nombreux travaux de recherche, que ce soit pour un cheminement de loisir ou pour des choix déterminants lors d'une évacuation.

### 4.2.1 Connaissance et but de l'itinéraire du piéton

Dans cette thèse, le parcours du piéton est celui de l'évacuation ; or, de nombreux travaux prennent en compte les cheminements des piétons selon leurs habitudes quotidiennes ou dans un cadre de loisir (Golledge, 1997, 1999; Piombini, 2006; Kanellopoulou, 2015). Il est question ici d'un cheminement dans un état de stress et/ou de panique, le but étant de se mettre à l'abri ou bien de rejoindre une zone refuge identifiée le plus rapidement possible.

Le but du déplacement du piéton joue un rôle dans ses choix de cheminement. Il existe différents types de parcours (Golledge, 1997), les plus évidents étant le chemin le plus court le long du linéaire du réseau ou le chemin le plus simple qui minimise les ruptures brutales de perspectives ou de changements de voies. Lagesse (2015, p.350) suppose qu' *"une personne qui ne connaît pas la ville dans laquelle elle évolue aura tendance à choisir les chemins les plus simples alors que celle qui la connaît bien et veut minimiser son temps préférera les plus courts chemins"*. La connaissance de l'environnement urbain dans lequel le piéton évolue a une incidence sur ses choix, puisqu'il est en mesure de choisir au préalable un chemin correspondant à son objectif.

Cependant, les choix d'itinéraires piétons en milieu urbain sont influencés par davantage de paramètres que la simplicité ou la distance, la minimisation du nombre d'obstacles, des efforts, de la dangerosité, du nombre de tronçons, etc...(Golledge, 1999). A ces critères s'ajoutent ceux non quantifiables, comme les ambiances ou encore les souvenirs liés à l'environnement traversé (Piombini, 2006). Ces critères sont développés dans la sous-section suivante. Les éléments influençant les choix des piétons ont également fait l'objet d'une hiérarchisation sous forme d'une pyramide de besoins du plus prioritaire à la base au moins essentiel au sommet (Mateo-Babiano et Ieda, 2005; Mateo-Babiano *et al.*, 2010) (Figure 4.3). Cette pyramide a été réalisée dans un contexte de déplacement piéton non spécifique à celui d'une catastrophe. Le contexte de l'évacuation occulte d'une part, les besoins liés aux ambiances ou à la socialisation que l'on retrouve au sommet de la pyramide et, d'autre part, renforce avant tout le besoin de protection. Ce qui ressort également de cette pyramide est la présence de la facilité de parcours dès le deuxième échelon et qui passe

## Street User Need-Hierarchy

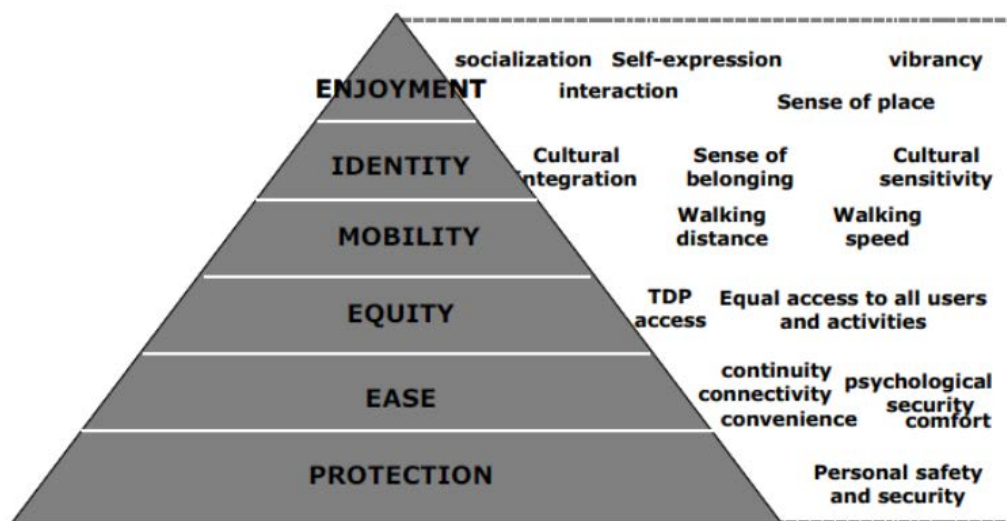


FIGURE 4.3 – Pyramide de hiérarchisation des besoins de l'utilisateur du réseau viaire.  
Sources : Mateo-Babiano et Ieda (2005).

par une continuité dans le trajet, dans les connections et par la reconnaissance du parcours (Mateo-Babiano et Ieda, 2005; Mateo-Babiano *et al.*, 2010; Piombini, 2006). Ces deux premiers besoins de protection et de facilité dans l'itinéraire sont présents dans les choix d'une personne lors d'une évacuation, ce qui aboutit parfois à laisser de côté le plus court chemin.

L'environnement urbain a également une influence sur la mobilité piétonne à travers ses ambiances (Piombini, 2006). Le piéton peut ainsi se trouver devant un choix entre un itinéraire connu et un itinéraire à l'ambiance plus agréable (Cristofol et Bordin, 2013). Dans le cas d'une évacuation, le critère d'un itinéraire agréable peut être discuté et sembler superficiel. Néanmoins, la morphologie urbaine joue un rôle dans le ressenti du piéton, lui permettant de hiérarchiser les informations de son environnement afin de pouvoir faire ses choix d'itinéraires.

### 4.2.2 Environnement urbain comme élément émotionnel du comportement piéton

Comme nous l'avons vu dans la sous-partie précédente, la morphologie urbaine est issue de l'histoire de la ville. La vie quotidienne ayant évolué, une morphologie urbaine ancienne de ruelles étroites comme à Ortigia (Figure 4.1, en haut), n'est plus aujourd'hui une morphologie correspondant aux ambiances créées par les urbanistes. La construction de la ville a laissé la place à plus de respiration urbaine avec la mise en place d'axes plus larges.

Cependant, dans le contexte spécifique d'une évacuation, le choix ne se fait pas seulement sur le caractère agréable de l'ambiance générée ou non par une ruelle ou un axe ; le piéton peut également privilégier le souvenir qu'il a du lieu. Comme le précisent Jakle *et al.* (1985), c'est l'interprétation des messages – diffusés par l'environnement – qui guide les comportements. À travers ses sens, un individu capte l'information brute qui est ensuite assimilée par son système nerveux. Ce filtrage amène les personnes à labéliser et à créer un souvenir des lieux qui les entourent. C'est à partir de ces souvenirs que sont formées les sensations qui permettent à l'individu de se souvenir des rues qu'il a jugé accueillantes ou hostiles via ses sens (vue, odorat, ouïe..).

Les qualités environnementales guidant la marche ne sont pas faciles à mesurer (Ewing et Handy, 2009). Cependant, *"la morphologie de l'environnement est susceptible d'influencer les choix de la marche : des notions d'enclos, transparence décrivent des ambiances différentes qui affectent psychologiquement les piétons et par conséquent leurs comportements dans la rue"* (Kanellopoulou, 2015, p.111).

Le maillage urbain et sa morphologie influencent donc la psychologie du piéton. Le maillage urbain est composé d'îlots (Figure 4.4) que l'on définit comme un groupe de constructions délimité par de la voirie et qui peut être de taille variable. Or, la taille de l'îlot va jouer un rôle dans la connectivité du réseau. De petits îlots permettent plus facilement d'aller d'un point à un autre de la ville sans devoir faire de longs détours. Cela augmente la perméabilité urbaine puisque le marcheur peut facilement accéder aux autres points du réseau (Genre-Grandpierre et Foltête, 2003; Foltete et Piombini, 2007). De plus, le piéton est attiré par les espaces qui se trouvent à proximité visuelle de la chaussée. En effet, les observations de Gehl et Gemzøe (1996) sur les comportements piétons montrent qu'ils préfèrent ne pas faire beaucoup de manœuvres et qu'ils choisiront le trajet le plus simple pour traverser une place ou arriver à une destination. Cependant, la notion de distance peut être altérée par un ressenti : une alternance de bâtiments et de places peut faire imaginer au piéton que la distance à parcourir est plus courte qu'en réalité (Kanellopoulou, 2015).

Les photos de deux rues sur l'île d'Ortigia illustrent ces propos (Figure 4.5). Il s'agit de deux rues indiquées comme itinéraires d'évacuation sur le plan d'évacuation en cas de tsunami sur la ville de Syracuse réalisé par l'UMR GRED ((Lavigne, 2016) (voir Chapitre 2)). La Via Roma (Figure 4.5, à gauche) est une ruelle traversant la moitié de l'île ; cependant, comme la plupart des voies d'Ortigia, elle est ancienne et étroite et sa perspective est très restreinte. Grâce à sa faible largeur, un piéton y trouve de la fraîcheur et de l'ombre sous les fortes chaleurs estivales ; néanmoins, en cas d'évacuation, la menace d'effondrement des bâtiments anciens et le manque de perspective jouent un rôle négatif dans le choix d'une personne cherchant à se mettre à l'abri. La photo de droite est une vue du Corso Matteotti (Figure 4.5). Il s'agit d'un axe créé au XIX<sup>ème</sup> siècle qui relie la place des ponts de jonction entre Ortigia et la Sicile et la Piazza Archimede – zone refuge en cas de tsunami (Lavigne,



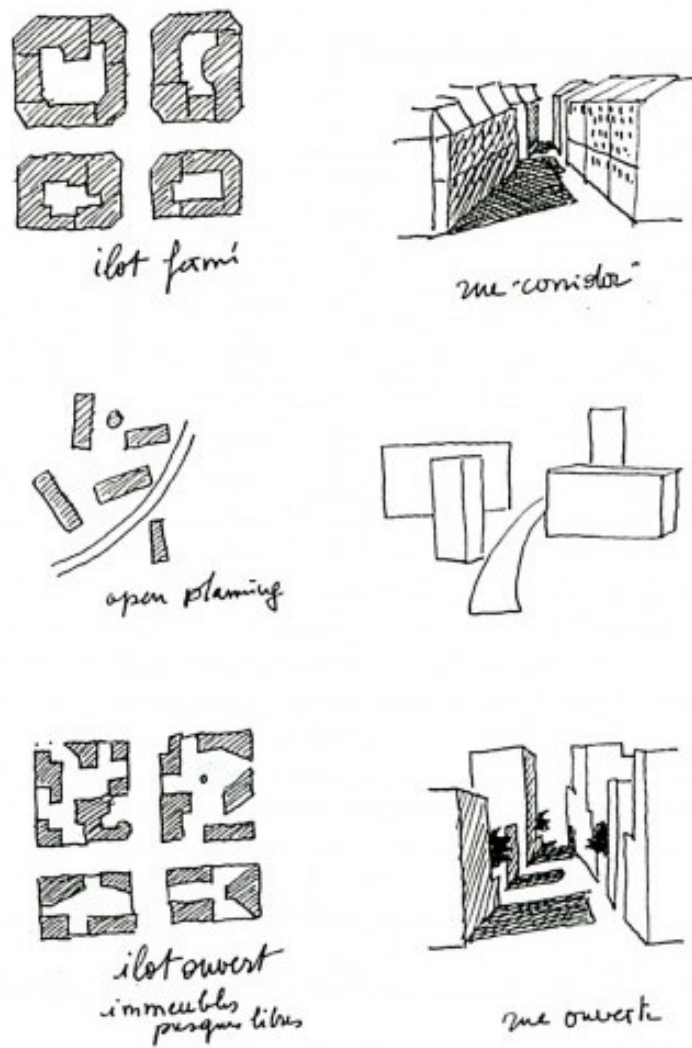


FIGURE 4.4 – Schéma de typologie d'îlots et perspectives associées.  
Sources : de Portzamparc, Ch., Agence 2Portzamparc, projet Quartier Masséna (Paris), 1995-2012.



Via Roma, Ortigia, Syracuse.



Corso Matteotti, Ortigia, Syracuse.

FIGURE 4.5 – Comparaison de la morphologie de deux rues d'Ortigia, Syracuse.  
Sources : Plattard, O., 2016.

2016) –. Il s’agit ici d’une avenue large et droite, offrant une perspective sur sa légère pente et sur la Piazza Archimede tout au fond. Elle n’est pas agréable pour flâner en plein été car elle manque d’ombre pour échapper au soleil sicilien. Cependant, en cas d’évacuation, elle offre une vue dégagée sur des obstacles comme des débris de bâtiments et sur l’objectif de la zone refuge pour la personne cherchant à se mettre à l’abri. Ces deux rues sont des axes très fréquentés de l’île, l’influence de la connaissance des lieux par un piéton peut donc être considéré comme équivalent pour les deux rues.

La morphologie urbaine et l’environnement du piéton ont donc une influence sur la perception de son itinéraire et les choix qu’il fait tout au long de son cheminement. L’influence émotionnelle de l’environnement urbain en cas d’évacuation constitue un travail de thèse en soi ; cet aspect n’est donc pas approfondi pour la construction du modèle STEP. Cependant, il est essentiel de connaître plus en détail l’interaction entre la morphologie urbaine, à travers son réseau de voirie et ses bâtiments, et les piétons. Cela permettra, à travers les notions de lisibilité du tissu urbain, de comprendre les choix des personnes dans les itinéraires d’évacuation.

### 4.2.3 Des éléments marqueurs structurant l’espace urbain

Le piéton s’approprie l’environnement urbain à travers les lieux traversés et les bâtiments. Ses souvenirs formés par les sensations (Jakle *et al.*, 1985) permettent de réutiliser ces informations lorsqu’un choix de cheminement est à faire. L’élément rassurant n’est donc plus seulement la présence de grands axes comme structure du réseau viaire (Lagesse, 2015) ; c’est avant tout le souvenir attaché à un lieu traversé auparavant qui devient déterminant dans le choix du piéton. Parce qu’ils sont connus et rassurants, le piéton privilégie certains parcours à d’autres qui sont plus courts ou qui, de façon objective, ont une ambiance pouvant être qualifiée de plus agréable (Cristofol et Bordin, 2013).

A travers ces souvenirs et sensations que l’individu produit en évoluant dans un espace urbain, un attachement subjectif se crée avec l’environnement. Selon Jakle *et al.* (1985), à travers ce cheminement, la construction d’une carte mentale s’opère, qui aide l’individu à orienter ses pas et à vérifier qu’il a pris le bon chemin. Le piéton garde donc une trace des endroits où il est passé et l’on peut supposer qu’en cas d’évacuation et donc de stress, son choix se portera sur un itinéraire qu’il a déjà pratiqué.

Ce travail de carte mentale trouve une complémentarité dans le travail de Lynch (1960), qui propose que le paysage soit compris ou vécu d’une manière codifiée. Cela signifie que les individus gèrent leur orientation et donc leur mouvement en se basant sur un système de signes – à partir de points, d’axes, de surfaces – qui soit ont capté leur attention, soit sont devenus familiaux au fil du temps. "*Les attributs géographiques de distance ou de direction, si déterminants pour la navigation pédestre, sont ainsi subjectivement et personnellement interprétés et vécus*" (Kanellopoulou, 2015). La présence d’éléments marqueurs dans l’environnement urbain permet ainsi à un piéton de se situer et également de construire mentale-

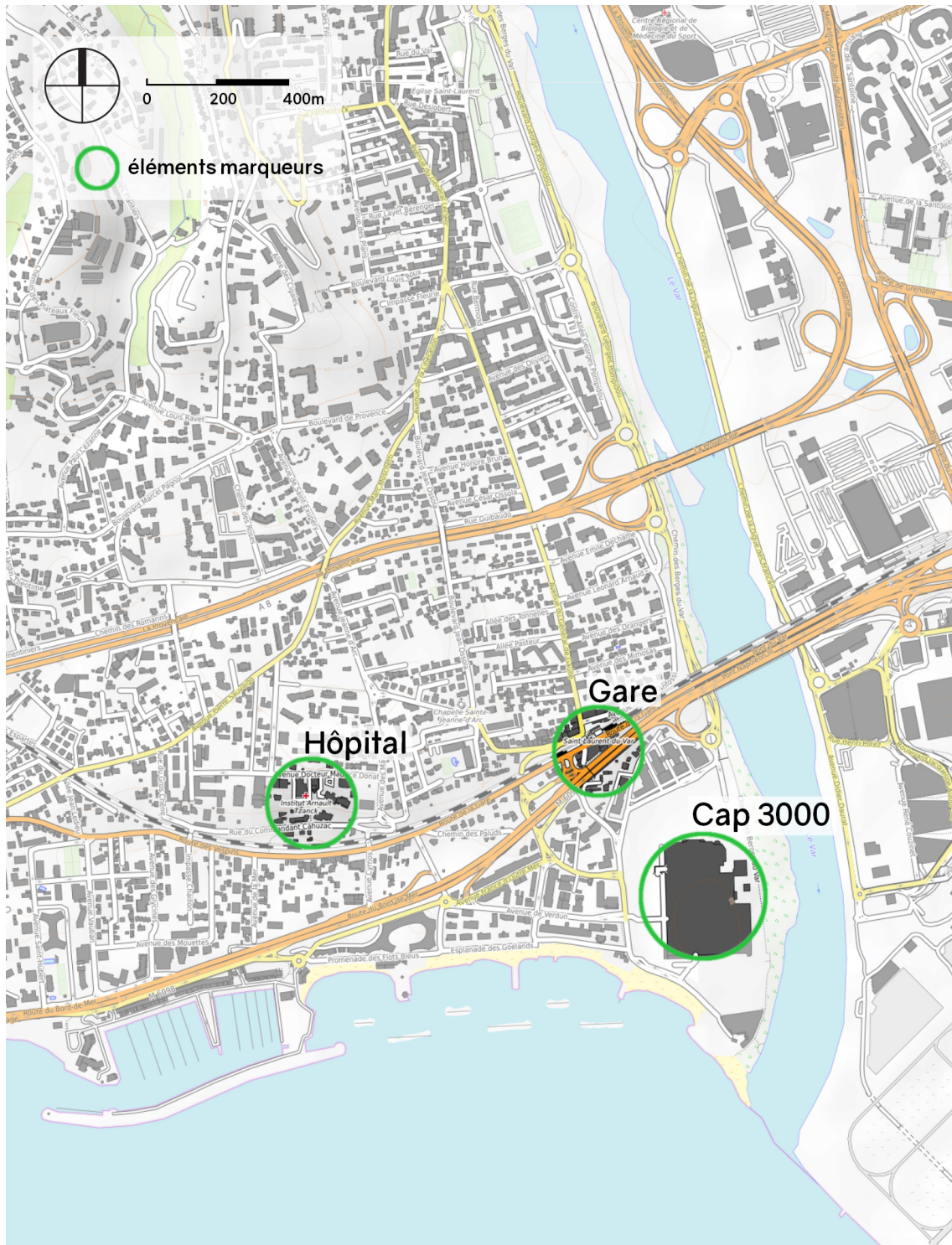


FIGURE 4.6 – Éléments marqueurs, Saint-Laurent-du-Var.  
Réalisation : Plattard, O., 2018, données : OpenStreet Map, 2018.





FIGURE 4.7 – Eléments marqueurs, Syracuse.  
Réalisation : Plattard, O., 2018, données : OpenStreet Map, 2018.

ment sa propre représentation de l'espace urbain dans lequel il évolue (Lynch, 1960, 1959). Ces éléments sont souvent des monuments, ou des édifices remarquables (églises, hôtel de ville...) qui marquent le rythme urbain, mais ils sont également des lieux de passage tels qu'une gare ou encore de manière plus commune, un commerce. Cependant, le dernier cas suppose une récurrence de la fréquentation de cette partie d'un espace urbain tandis que les autres peuvent être appréhendés par les individus dès leur première marche dans la ville.

Des monuments, places ou bâtiments publics marqueurs peuvent être mis en avant dans les sites d'étude (Figures 4.6 et 4.7). Ils ont été identifiés grâce à un travail d'observation réalisé sur les terrains et complété par l'analyse des enquêtes réalisées dans le cadre du programme Astarte (Lavigne, 2014; Gailler *et al.*, 2016). Ces lieux deviennent des références structurantes dans les espaces urbains étudiés pour les piétons pour différentes raisons :

- Le premier élément marqueur, que l'on retrouve aussi bien à Saint-Laurent-du-Var qu'à Syracuse est la gare (Figures 4.6 et 4.7). Il s'agit du point d'entrée dans ces villes pour beaucoup de personnes, que ce soit via le train ou les bus qui disposent d'arrêts à proximité. Les piétons arrivant par la gare orientent leur itinéraire à partir de cet endroit, qui devient ainsi le point de départ structurant leur cheminement urbain. De plus, dans les deux communes, la gare est située légèrement en altitude par rapport au bord de mer, ce qui constitue une indication de mise en hauteur lors d'une évacuation. Enfin, la zone de la gare signifie pour beaucoup une zone facile d'accès, un nœud de transport et qui est toujours accessible, même en cas de catastrophe.
- La deuxième groupe d'éléments marqueurs qui ressort dans les sites de Saint-Laurent-du-Var et de Syracuse est celle des bâtiments publics, monuments et commerces. Dans le cas de Saint-Laurent-du-Var (Figure 4.6), un élément marqueur est le centre commercial Cap 3000. Situé très proche de la plage et fréquenté par des milliers de personnes chaque jour, il est un point de repère pour beaucoup de personnes (Lavigne, 2014). Le second élément marqueur est l'hôpital situé sur un surplomb qui est à la fois visible et indiqué. Sa position géographique est structurante de la commune puisqu'il montre la fin de la "bande" du front de mer et le début de la zone résidentielle située à une altitude plus élevée. Dans le cas de Syracuse (Figure 4.7), l'église Madonna delle Lacrime constitue un point de repère dans la ville. Cette église contemporaine en forme de chapiteau pointu est située en hauteur et sa taille et son originalité en font un monument visible aussi bien au niveau bas de la zone de jonction que depuis l'île d'Ortigia. Il peut être suivi tout au long d'un itinéraire.
- Le troisième ensemble de lieux qui ressort des sites d'étude est constitué d'éléments de voirie, tels que des parcs ou des places. Dans le cas de Syracuse (Figure 4.7), plusieurs espaces publics sont ainsi des marqueurs du tissu urbain. Il s'agit, tout d'abord, la Piazza Duomo qui est, avec sa cathédrale, un espace d'aération notable dans le dédale serré des ruelles d'Ortigia. De plus, c'est vers cette place que converge

la majorité des axes de l'île. Côté sicilien, le parc avec le Panthéon, constitue aussi un point de repère dans le plan géométrique de cette partie du réseau. La zone de jonction entre les deux parties de la ville sert aussi de référence dans la construction du cheminement dans l'espace urbain par le piéton. Enfin, en ce qui concerne Saint-Laurent-du-Var, la commune étant composée de beaucoup de résidences privées avec un réseau peu dédié aux piétons, seule la place devant la gare peut constituer un élément marqueur dans l'espace public (Figure 4.6).

#### 4.2.4 Continuité et perspectives dans l'espace urbain

Le piéton, en plus d'aller vers des éléments marqueurs et structurant du paysage urbain, fait des choix traduisant une simplicité de parcours. Cette simplicité ressentie, passe à travers la facilité du cheminement et dépend du paysage visuel que le parcours offre (Gehl et Gemzøe, 1996). A travers la perspective offerte par la rue ou la continuité du réseau, une influence sur le choix du piéton s'opère. L'étude de l'influence de la continuité rectiligne dans les cheminements piétons a fait l'objet de nombreux travaux (Dalton, 2003; Hillier *et al.*, 1976; Hillier et Hanson, 1984; Hillier, 2007).

Les travaux de *Space Syntax* d'Hillier (2007) portent sur l'analyse des réseaux viaires, de leurs géométrie et connexions. L'étude de la structure du réseau et la reconstruction des lignes de perspective permet d'analyser la géométrie du réseau viaire en corrélation avec la psychologie d'un individu cheminant dans celui-ci (Hillier *et al.*, 1993; Hillier et Iida, 2005). En premier lieu, il s'agit dans ces travaux de comprendre comment un piéton perçoit son environnement. Ensuite, un niveau de profondeur situe les rues autour de la personne selon le nombre de tournants qui la sépare de sa destination.

Dans le cas de *Space Syntax*, il s'agit d'une analyse du réseau via des graphes. La méthode consiste à transformer le graphe des rues en une carte d'axes correspondant aux différentes lignes de perspective. Ensuite, un graphe de lignes est construit dans lequel chacune est représentée par un sommet et où l'intersection entre deux lignes correspond à un arc entre les deux sommets. L'information géographique disparaît alors derrière l'information topologique (Lagesse, 2015). Un premier indice est calculé à partir de ce graphe, qui permettra une hiérarchisation des lignes de perspective. Il est fondé sur la distance la plus courte entre deux nœuds et est fondamental dans le travail de *Space Syntax* (Hillier, 2007). L'étape suivante classe ensuite les axes selon une échelle de couleur, ce qui permet une cartographie de la profondeur du réseau.

Depuis quarante ans, les travaux de *Space Syntax* se sont enrichis et affinés, notamment autour de l'impact de la perception du réseau par l'utilisateur à travers la notion d'angle (Turner, 2001). Il s'agit ici de la définition d'une distance angulaire et de son influence sur les itinéraires piétons (Hillier et Vaughan, 2007). Ces angles de connexion correspondent

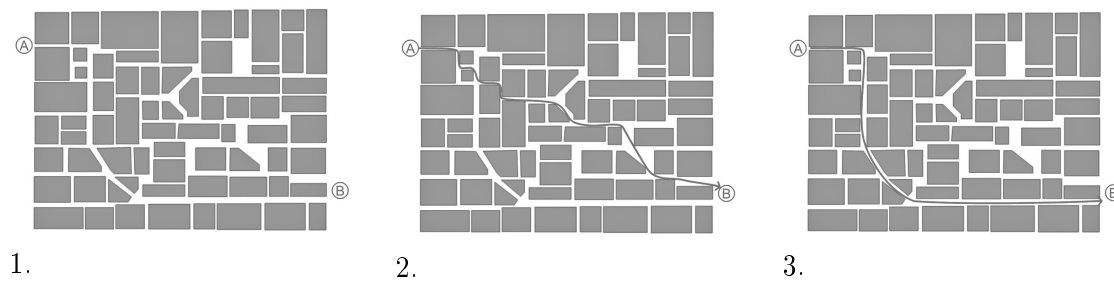


FIGURE 4.8 – Comparaison de choix d’itinéraires piéton en milieu urbain : 1. Quel est le chemin le plus simple pour relier A à B ? 2. Le chemin le plus court en distance. 3. Le chemin le plus continu en perspective.

Sources : Stonor (2011).

aux angles des jonctions de chaque segment du tronçon routier.

Les travaux de Porta *et al.* (2006) complètent ceux de *Space Syntax* en développant une méthode permettant de créer des lignes droites dans le graphe. Chaque arc se connectant à celui qui lui est le plus aligné, dans une limite de 30 degrés, afin d’appartenir à une même ligne. Une continuité de réseau est donc ici recréée.

Enfin, les travaux de *Space Syntax* ne cherchent pas à révéler des structures viaires mais plutôt à reconstituer le point de vue du piéton cheminant en milieu urbain. A travers la notion de continuité dans les lignes de perspective, ils tentent de retracer un mouvement naturel des piétons qui est de se déplacer où leur regard les portent. Dans ce contexte, le changement franc de direction apparaît comme un effort pour l’individu, puisqu’il doit aller au-delà de la perspective et changer de point de vue.

A travers la mise en avant des perspectives dans un cheminement piéton via la continuité du réseau par une méthode de graphe, la *Space Syntax* permet, non pas de questionner la distance dans la construction d’un itinéraire piéton mais, avant tout, de questionner la simplicité dans le déplacement (Stonor, 2011). Cette simplicité est essentielle lors d’une évacuation piétonne, en situation de stress, alors que les décisions deviennent parfois davantage des réflexes. Comme le montre la Figure 4.8, pour relier le point A au point B, ce ne sera pas forcément l’itinéraire le plus court qui sera privilégié. Ici, le chemin le plus court traverse un dédale de rues dans lequel un piéton n’a pas de perspective, et dans lequel il est aisé de perdre ses repères (Figure 4.8 -2.). A l’inverse, un autre chemin est possible, favorisant la continuité de la vue et du réseau (Figure 4.8 -3.), mais n’étant pas le plus court en distance. A travers ces schémas, la théorie de la *Space Syntax* est illustrée comme la recherche, non plus de la distance la plus courte, mais plutôt de la simplicité du cheminement piéton.

Enfin, des travaux ont explorés les différentes stratégies d’itinéraires des piétons à travers la réalisation de cartes mentales (Marchand, 1974). Ses travaux ont consisté à comparer des cartes mentales construites à partir de témoignages et des cartes topographiques. Cela a permis de montrer que l’individu a une perception beaucoup plus symétrique de l’envi-

ronnement dans lequel il se déplace qu'il ne l'est en réalité. Cette rationalisation de l'espace révèle la nécessité de simplification dans la conception des itinéraires.

#### 4.2.5 Un nouveau mode de déplacement connecté

Depuis quelques années, les outils numériques prennent part au guidage et à l'information du déplacement du piéton. Les applications permettant le guidage du piéton donnent une information en temps réel sur le parcours conseillé pour atteindre un objectif (Kannelopoulou, 2015). Ces applications permettent également d'anticiper sur un mode de déplacement privilégié ou des horaires de transports en commun. Les applications de géolocalisation et plus particulièrement via l'usage téléphone portable deviennent ainsi des outils de flexibilisation des individus, permettant l'idée du "dernier moment" toujours possible (Piombini, 2006).

Lors des enquêtes réalisées sur les sites d'étude (Lavigne, 2014), il est ressorti que suite à une alerte, environ 30% des personnes interrogées souhaiteraient confirmer cette information avant d'évacuer (voir annexe 8.4). Pour une grande part, cette confirmation s'effectue via les réseaux sociaux consultés sur un téléphone portable. Cette vérification demande du temps avant d'évacuer et il n'est pas mentionné dans les enquêtes si, lors de l'évacuation qui est majoritairement piétonne sur les sites d'étude, les personnes interrogées souhaitent s'orienter avec leurs téléphones ou sans (Lavigne, 2016).

Cependant, comme le précise Piombini (2006) *"il serait illusoire d'espérer un changement profond des pratiques de déplacements en milieu urbain"* avec les téléphones portables. Le recul sur l'influence de ces outils sur le déplacement piéton, de surcroît en situation d'urgence n'est pas suffisant aujourd'hui. L'utilisation des outils numériques durant l'évacuation n'est donc pas prise en compte dans le modèle STEP développé durant cette thèse. Néanmoins, il serait intéressant d'approfondir les études sur cette pratique afin de juger de son influence sur le délai de l'évacuation et le choix d'itinéraire de mise en sécurité.

L'influence du milieu urbain sur les choix du piéton s'opère donc à différents niveaux : au niveau des bâtiments à la fois comme repères dans la ville et comme des obstacles à la visibilité de l'individu et au niveau du maillage du réseau, générant variablement une continuité de perspective et de vision. Le piéton, connaissant ou non l'environnement dans lequel il évolue, fait des choix de manière rationnelle ou émotionnelle. Avant de définir une méthode d'implémentation d'une variable dans le modèle STEP, il semble important de repositionner ces théories de lisibilité et visibilité dans l'espace urbain dans les sites d'étude.



### 4.3 Depuis les cartes mentales réalisées sur les sites d'étude jusqu'au modèle STEP

Durant les enquêtes effectuées dans le cadre d'Astarte sur les sites de Nice/Saint-Laurent-du-Var et Syracuse, des cartes mentales ont été réalisées. Il était demandé aux personnes d'indiquer leur intention soit de cheminement, soit de localisation de leur mise en sécurité en cas d'évacuation face à un tsunami. L'analyse des intentions des personnes interrogées avec les éléments théoriques exposés dans ce chapitre permet d'isoler des données afin d'implémenter une variable dans le modèle STEP.

#### 4.3.1 Réalisation de cartes mentales sur les sites d'étude

Dans les enquêtes menées sur les sites d'étude, des intentions d'évacuation étaient demandées aux personnes interrogées afin, par la suite, de constituer des cartes mentales. Pour rappel, ont été réalisés, dans le cadre du programme Astarte, 172 questionnaires à Nice, 146 à Saint-Laurent-du-Var et 82 à Villefranche-sur-Mer, soit un total de 400 enquêtes pour la région niçoise et 148 questionnaires ont été menés à Syracuse dont 107 sur l'île d'Ortigia (voir chapitre 2) (Lavigne, 2014). Cependant, comme pour les autres questions, les personnes étaient libres de répondre ou non, la totalité des personnes interrogées n'a donc pas donné d'intentions d'évacuation.

Après avoir répondu aux questions concernant leur connaissance du risque tsunami, les personnes étaient amenées à indiquer sur une carte du territoire où elles se trouvent, leur volonté de mise à l'abri en cas d'arrivée d'un tsunami. Ces indications n'ont pas été relevées de la même manière en fonction des sites d'enquêtes. En effet, dans le cas du Sud de la France, les enquêtes ont été remplies sur des formulaires papier, tandis qu'à Syracuse, elles ont été réalisées sur supports numériques. La conséquence de l'usage de ces différents supports est une différence de précision dans les réponses : dans le cas de Saint-Laurent-du-Var, les personnes ont indiqué une zone de destination ou une intention de direction de mise à l'abri (Figure 4.9) ; alors que dans le cas de Syracuse, les réponses sont plus précises avec l'itinéraire envisagé jusqu'à un point de mise en sécurité (Figure 4.10).

Dans le cadre de l'étude des sites dans Astarte, des cartes regroupant la totalité des réponses des cartes mentales des questionnaires ont été réalisées pour Saint-Laurent-du-Var (Figure 4.9) et Syracuse (Figure 4.10). Ces cartes mettent en avant les flux (en rouge) avec l'indication du pourcentage de réponses correspondant à chaque flux.

Dans le cas de Saint-Laurent-du-Var, les enquêtes ont été exclusivement effectuées sur la plage (Figure 4.9). Hormis une indication précise d'objectif de mise à l'abri vers le centre commercial Cap 3000, les autres indications d'intentions d'évacuation restent plutôt floues. Les personnes interrogées expriment la volonté d'aller vers la zone de Saint-Laurent-du-Var où le dénivelé est important et où elles ont la sensation de monter en altitude. Les indications concernent les zones au-delà des voies ferrées, vers l'hôpital, vers la gare et

même au-delà, vers les zones résidentielles.

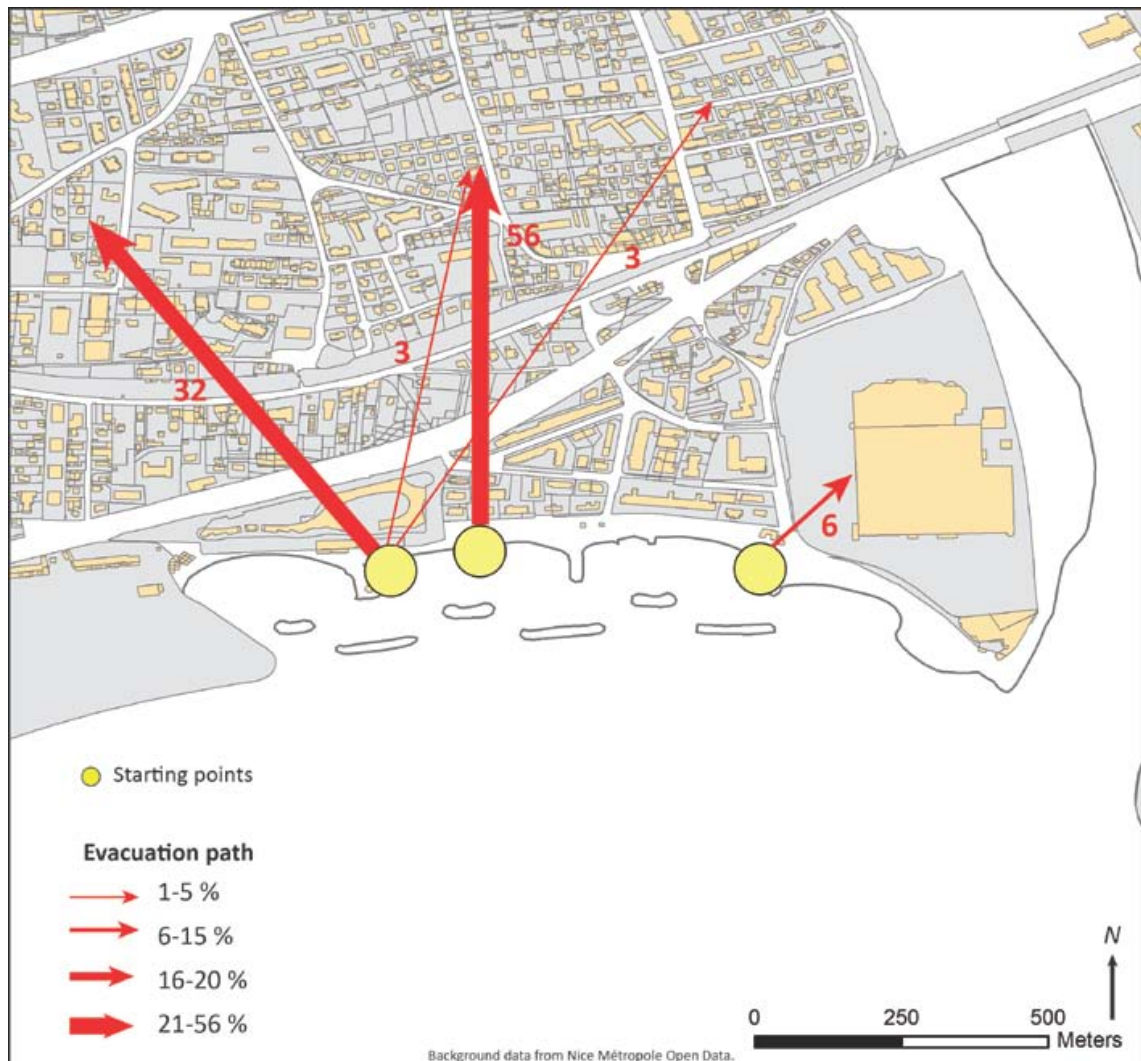


FIGURE 4.9 – Carte agrégeant les intentions d'évacuation des personnes enquêtées, issues des cartes mentales des enquêtes à Saint-Laurent-du-Var.

Sources : Lavigne (2016).

La carte qui regroupe tous les itinéraires issus des cartes mentales réalisées lors des enquêtes à Syracuse (Figure 4.10) apporte des informations plus précises que celle de Saint-Laurent-du-Var. En effet, les personnes interrogées ont non seulement indiqué le lieu vers lequel elles ont l'intention de trouver refuge, mais également l'itinéraire qu'elles ont l'intention de suivre pour se rendre jusqu'à cet endroit. Les enquêtes ont été effectuées à différents lieux dans Syracuse avec une majorité sur l'île d'Ortigia. Les points jaunes représentent les lieux où les questionnaires ont été réalisés et permettent donc de visualiser le lieu de départ des personnes enquêtées ; les points verts symbolisent les points d'arrivée et donc de mise à l'abri envisagés par les personnes interrogées.

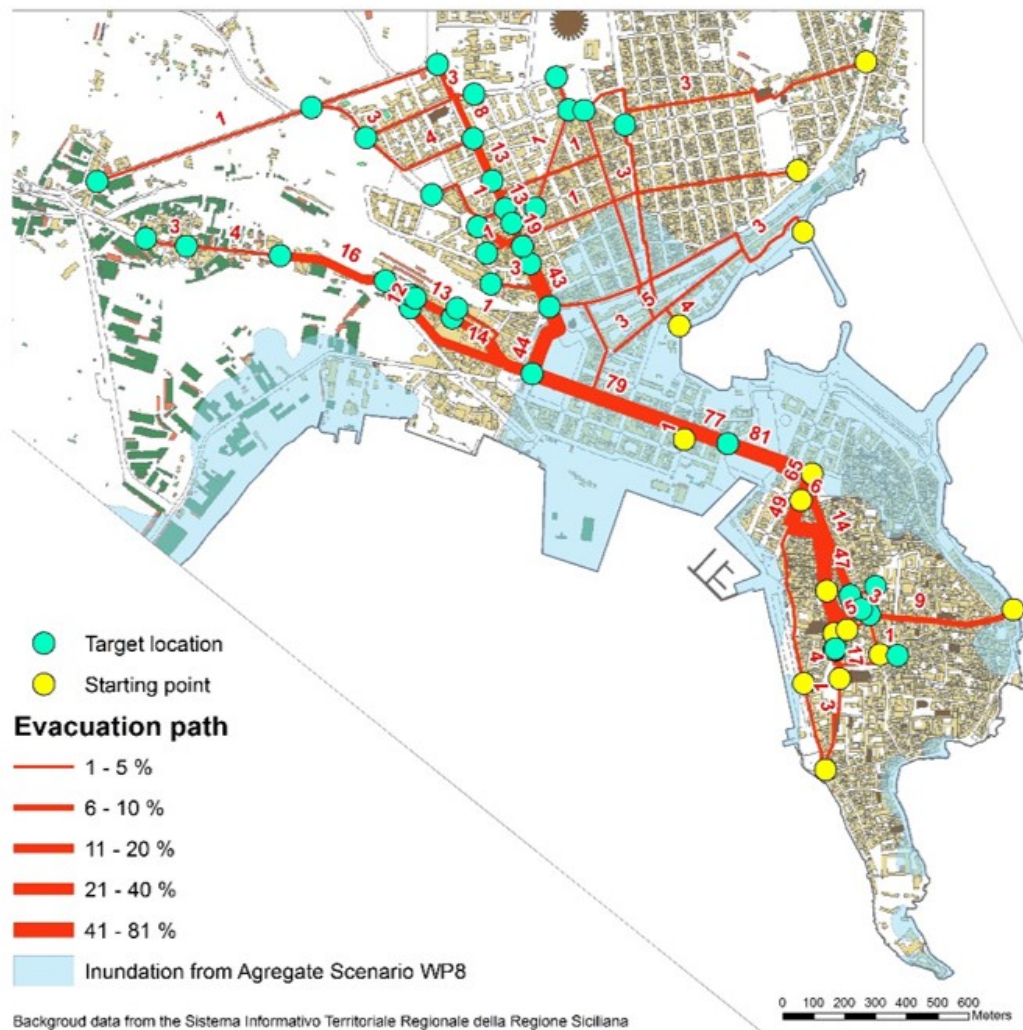


FIGURE 4.10 – Carte agréant les intentions d'évacuation des personnes enquêtées, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.

Sources : Lavigne (2016).

Alors qu'une majorité d'enquêtes – et donc de points de départ – a été réalisée sur l'île d'Ortigia, la carte 4.10 met en avant une grande part de points d'arrivée dans la partie "continentale" de la ville. De plus, la quasi-totalité de ces points d'arrivée sont situés hors zone inondable. A part quelques lieux d'arrivée en zone inondable ou très proche de cette zone, les personnes envisagent de monter en altitude et de s'éloigner du bord de mer le plus possible. Enfin, une grande partie des personnes interrogées émettent l'idée d'aller trouver refuge vers la gare, l'église Madonna delle Lacrime, ou sur l'avenue montante entre ces deux lieux. En ce qui concerne les quelques personnes envisageant de rester à Ortigia, les lieux évoqués sont les Piazza Archimede et Piazza Duomo. Ces lieux proposés correspondent donc bien aux éléments marqueurs identifiés lors du travail terrain à Syracuse (Lynch,

1960) et qui ont été présentés dans la figure 4.7. Les deux places d'Ortigia sont touristiques et centrales. De plus, dans l'autre partie de la ville, la gare étant le point d'entrée de nombreux touristes dans la cité, la plupart des personnes interrogées indique souhaiter y trouver refuge. Il s'agit en effet d'un des points d'arrivée à Syracuse et donc d'un lieu qu'elles ont repéré dès leur arrivée dans un milieu urbain qu'elles ne connaissent pas ou peu. En ce qui concerne les autres points d'arrivée côté "continental", l'église Madonna delle Lacrime est située proche des temples grecs, hauts lieux touristiques de la commune et elle constitue, par sa forme originale de chapiteau, un point de repère visible depuis Ortigia. Enfin, les avenues côté "continent" sont larges et leur pente est perceptible, ce qui permet au piéton de se rendre compte très facilement de sa prise d'altitude par rapport au port.

Les flux (en rouge) sont constitués par l'agrégation de toutes les intentions d'itinéraire indiqués par les personnes enquêtées. Ce que l'on peut immédiatement remarquer sur la carte, c'est le flux très important de personnes souhaitant se rendre d'Ortigia vers la partie sicilienne de Syracuse. En effet, la quasi totalité des personnes a montré l'intention de quitter Ortigia afin de trouver refuge en retournant de l'autre côté de la cité. Ces intentions traduisent une méconnaissance de la mise en danger que cela induit puisque pour se rendre sur le "continent", les personnes vont devoir traverser la partie de jonction du port ; cette zone est le passage incontournable entre Ortigia et le reste de Syracuse et elle se situe dans la zone inondable en cas de tsunami. Les personnes se trouvant à Ortigia se mettent donc en danger afin de trouver refuge sur le "continent". De plus, cette zone de jonction est aujourd'hui indiquée comme zone refuge en cas de séisme – dans les plans d'évacuation en cas de séisme de la Protection Civile – (voir chapitre 3). Cela peut entraîner la confusion lors de l'évacuation des personnes pensant être dans une zone sécurisée, mais les mettant d'autant plus en danger de l'inondation.

Les flux regroupant toutes les intentions d'itinéraire ne nous apportent qu'une tendance générale d'évacuation. Or, une analyse plus détaillée des itinéraires permet un questionnement au regard des théories exposées précédemment dans ce chapitre, concernant l'influence de la lisibilité et de la visibilité lors du cheminement piéton en espace urbain. Il semble donc important d'analyser de manière plus détaillée les itinéraires évoqués dans les cartes mentales. Des itinéraires plus précis ayant été indiqués durant les enquêtes à Syracuse, nous analysons donc plus précisément les intentions d'itinéraire d'évacuation sur ce site d'étude, laissant de côté Saint-Laurent-du-Var.

### 4.3.2 Analyse des résultats issus des cartes mentales réalisées à Syracuse

Afin de pouvoir analyser plus en détail les intentions d'itinéraire d'évacuations des personnes interrogées à Syracuse, un travail de décomposition d'information cartographique a été effectué. En effet, chaque lieu d'enquête correspond à un point de départ ; une carte est constituée autour de ce point de départ et des intentions d'itinéraire indiquées sur les

cartes mentales issues des enquêtes réalisées à cet endroit. Il y a eu 16 lieux d'enquêtes et il y a donc 16 cartes agrégeant les volontés d'itinéraire issues des cartes mentales des enquêtes de terrain pour Syracuse (Figures 4.11 et 4.12 et Annexes 8.4). Il peut y avoir plusieurs personnes enquêtées pour un point de départ et donc plusieurs itinéraires et points d'arrivée par carte. Chaque carte dispose des informations suivantes :

- Le point de départ (en rouge) qui correspond au lieu où a été réalisée l'enquête.
- L'itinéraire d'évacuation indiqué par la personne enquêtée (en orange).
- Le point d'arrivée envisagé (en violet) par la personne interrogée.
- Les zones refuge (en vert) identifiées dans le programme Astarte (Lavigne, 2014) (voir chapitre 3). La zone refuge la plus proche en distance est surlignée en vert.
- L'itinéraire (en vert) le plus court en distance pour se rendre à cette zone refuge.

Ces éléments permettent avant tout, pour un même point de départ, de mettre en parallèle les informations d'évacuations théoriques comprenant l'itinéraire le plus court ainsi que la zone refuge la plus proche, avec les intentions d'évacuations exprimées par les personnes interrogées. Cette comparaison permet d'identifier si les intentions d'itinéraire se conforment au trajet le plus direct en distance ou si elles font références aux facteurs exposés précédemment dans ce chapitre, à savoir une influence de la lisibilité urbaine, de la connaissance des lieux, des perspectives ou d'éléments identifiés comme éléments marqueurs dans la ville.

Sur les 16 cartes réalisées, deux sont analysées dans ce chapitre car elles rendent compte de la diversité des itinéraires exprimés lors des enquêtes (les 14 autres cartes sont consultables en annexe 8.4). La première est la carte construite autour du point de départ numéro 1 situé à Ortigia, sur la promenade de front de mer à l'est et qui compte 7 itinéraires et 4 points d'arrivée (Figure 4.11). La seconde est la carte construite autour du point de départ numéro 6, également situé à Ortigia mais, cette fois-ci, au coeur de l'île, proche de la Piazza Duomo, et qui comprend douze itinéraires avec le même nombre de points d'arrivée (le douzième point étant situé hors cadrage à l'ouest) (Figure 4.12).

La première carte 4.11 est constituée autour d'un point de départ situé en zone inondable, sur la voie du front de mer, la Via dei Tolomei. Depuis ce lieu, la vue est dégagée sur la partie continentale de Syracuse (Figure 4.13 A.), on y distingue la flèche de l'église Madonna delle Lacrime nettement visible au milieu des bâtiments. La Via della Maestranza (Figure 4.13 B.) est la voie qui permet de rejoindre la Piazza Archimede depuis cet endroit du quai. Cette rue fait partie des plus large de l'île, cependant depuis le point de départ, la perspective dans la rue est quasi nulle puisqu'il y a un coude au début. Cette voie est la plus directe pour rejoindre la Piazza Archimede, soit la zone refuge la plus proche du point de départ.

La seconde carte (Figure 4.12) a un point de départ hors zone inondable, situé dans la partie centrale d'Ortigia, tout proche de la Piazza Duomo, sur Via Saverio Landolina (Figures 4.14). Cette ruelle est étroite mais très empruntée par les touristes. Elle débouche

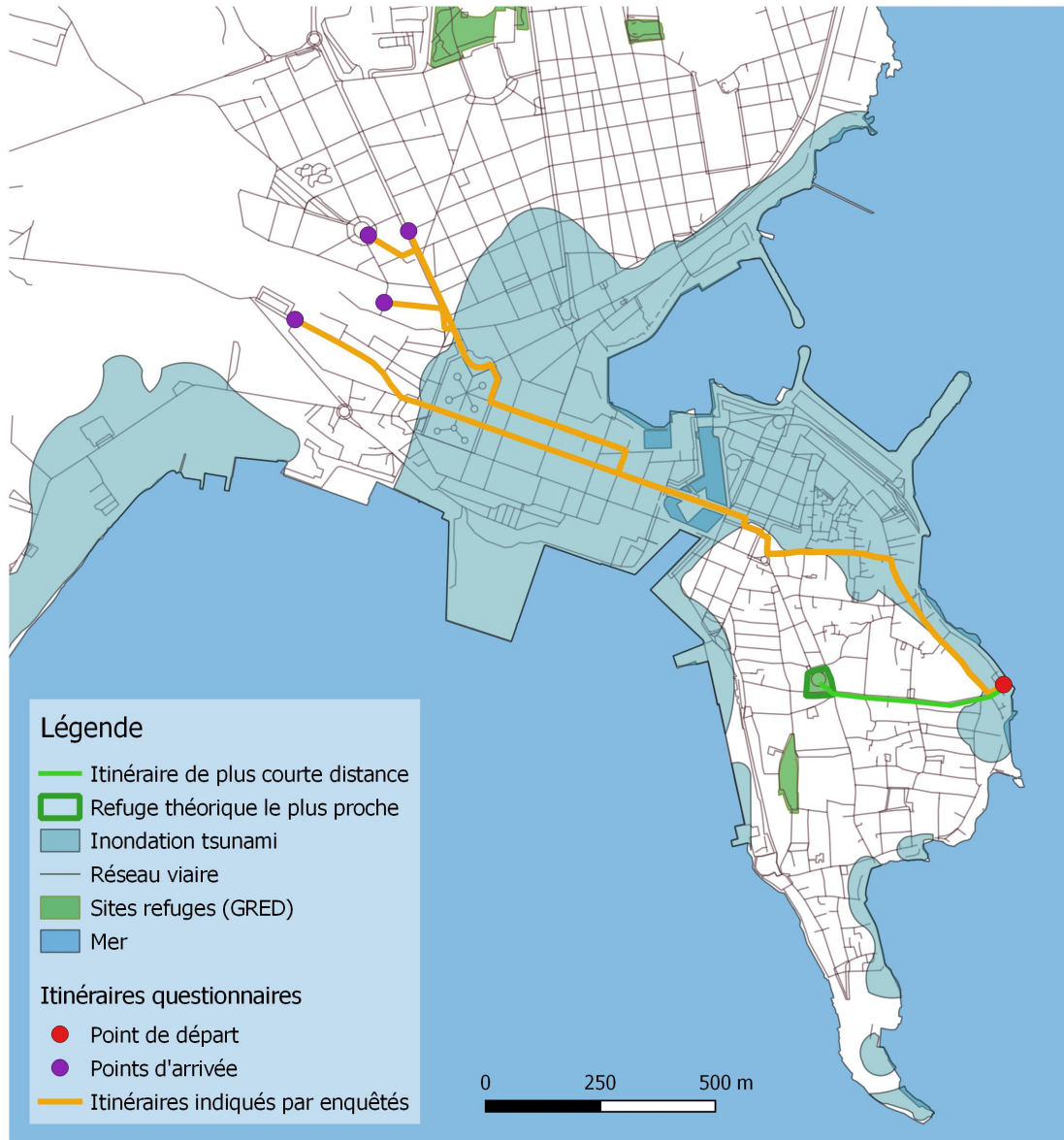


FIGURE 4.11 – Carte agrégeant les intentions d’itinéraire d’évacuation des sept personnes enquêtées au point de départ 1, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.  
Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : Lavigne (2016).



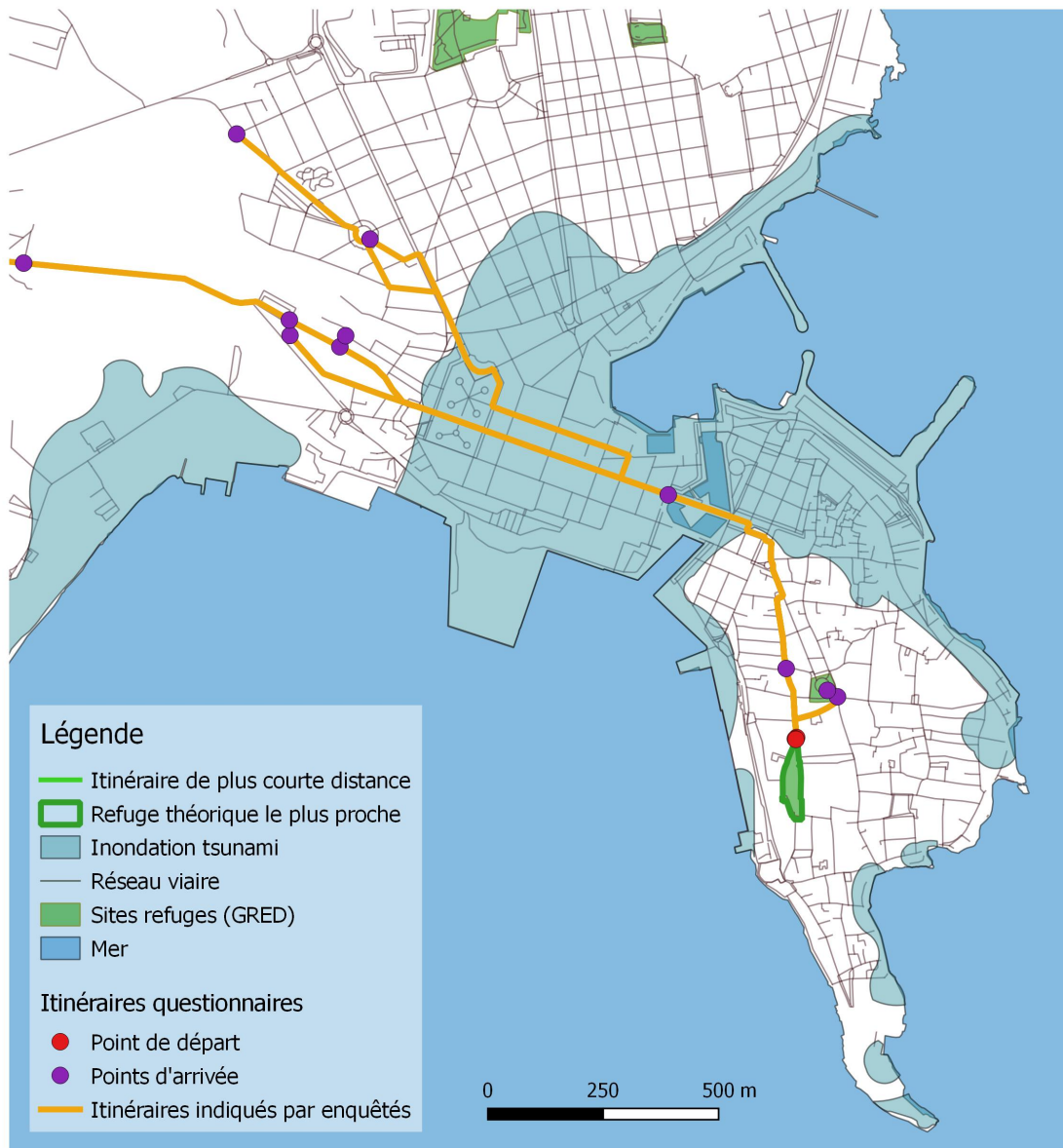


FIGURE 4.12 – Carte agrégeant les intentions d’itinéraire d’évacuation des douze personnes enquêtées au point de départ 6, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.  
Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : Lavigne (2016).



A. Via dei Tolomei, Syracuse.



B. Via della Maestranza, Syracuse

FIGURE 4.13 – Vues depuis le point de départ numéro 1, à Ortigia, Syracuse.  
Sources : Plattard, O., 2016.

sur le côté Nord de la Piazza Duomo. Cette rue est très légèrement sinueuse (Figure 4.14 B.) mais dispose d'une perspective sur la Piazza Duomo depuis son intersection avec la Via Collegio (Figure 4.14 A., on aperçoit l'église Santa Lucia de la Piazza Duomo.). Le point de départ pour cette carte se situe donc tout proche de la zone refuge de la Piazza Duomo.



A. Vue vers Piazza Duomo.



B. Vue de la rue.

FIGURE 4.14 – Vues Via Saverio Landolina depuis le point de départ numéro 6, à Ortigia, Syracuse.

Sources : Plattard, O., 2016.

Tout d'abord, la première carte met en avant (Figure 4.11) qu'aucun point d'arrivée des intentions d'évacuation ne se situe sur Ortigia. Ils sont tous localisés sur la partie



"continentale" de la ville. Cela implique, comme évoqué dans la sous-partie précédente concernant la carte mentale de l'ensemble des intentions d'évacuation pour Syracuse (Figure 4.10), que les personnes évacuant passent par la zone de jonction entre Ortigia et le "continent". Cette zone est inondable et cela représente donc une mise en danger des personnes.

De plus, la seconde carte (Figure 4.12) montre des intentions d'itinéraire avec une dynamique similaire puisque seulement trois intentions d'itinéraire des personnes enquêtées sur les 12 que comporte la carte indiquent rester sur Ortigia. Toutes les autres expriment l'intention d'évacuer vers l'autre partie de Syracuse, se mettant alors en danger. Un des points d'arrivée se situe vers la zone de jonction des ponts, au milieu de la zone inondable ; il s'agit du seul point de la carte à ne pas chercher à aller en hauteur. Sur les trois points d'arrivée d'Ortigia, deux sont situés sur la Piazza Archimede, qui, bien que n'étant pas la zone refuge la plus proche – il s'agit de la Piazza Duomo – constitue une mise en sécurité proche et rapide.

Dans les deux cartes présentées, aucun point ne se situe dans la zone refuge la plus proche en distance. C'est d'ailleurs une tendance que l'on retrouve sur la majorité des cartes mentales (voir annexes 8.4).

Le faible taux de points d'arrivée des intentions d'itinéraire des personnes interrogées sur l'île d'Ortigia peut s'expliquer pour plusieurs raisons :

- un manque de confiance dans le fait de rester sur l'île et une crainte de ne pas y être en sécurité, même si cela implique de se mettre en danger pour arriver dans l'autre partie de la ville.
- un dédale de ruelles plutôt opaque, sans perspective de vues et dans lequel il n'est pas facile de s'orienter.
- une partie "continentale" qui présente une plus grande part d'éléments marqueurs, comme la gare qui concentre plusieurs points d'arrivée ou bien l'avenue montant vers l'église Madonna delle Lacrime dont la flèche est visible tout au long d'un parcours depuis le point de départ.

De plus, pour les deux cartes, les itinéraires envisagés suivent le même chemin jusqu'à arriver de l'autre côté de Syracuse. Dans le cas de la carte 4.11, le cheminement indiqué ne rentre pas dans l'île mais suit la Via Vittorio Veneto. Cette rue n'est pas plus large que Via della Maestranza mais dispose d'une vue plus ouverte et permet de rejoindre directement la zone d'entrée dans Ortigia avec les ponts et le marché. C'est un axe très direct et emprunté par les touristes. Ce choix d'itinéraire peut être rapproché de l'idée que le choix du piéton se fait davantage pour un lieu connu, celui-ci, dans ce cas, couplé avec les perspectives de vue et les travaux de *Space Syntax*.

En ce qui concerne la carte 4.12, les intentions d'itinéraire suivent toutes le même chemin qui est de remonter la Via Saverio Landelina jusqu'à la zone des ponts afin de passer côté "continent". Il peut être présenté comme étant l'itinéraire le plus simple car il

comprend le moins de changement de direction (Hillier, 2007). Cependant, ces intentions d'itinéraire montrent bien une dynamique de "retour sur ses pas" de la part des personnes en retournant côté "continent", zone d'où elles sont obligatoirement arrivées, plutôt qu'en allant vers la Piazza Duomo, qui se situe un peu plus loin dans leur cheminement et qui est un lieu où qu'elles n'ont peut-être pas encore visité. L'objectif majoritairement mis en avant est celui de gagner en altitude en se dirigeant vers la gare.

En somme, ces cartes mentales mettent en avant que le choix du piéton n'est pas toujours celui du plus court chemin, bien que celui-ci soit très direct dans le cas de la Piazza Archimede (Figure 4.11) et extrêmement proche avec la Piazza Duomo (Figure 4.12). Ce choix est influencé soit par l'aspect inconnu et incertain des ruelles d'Ortigia dans le cas des personnes interrogées étrangères au site, soit, à l'inverse, par la facilité de déplacement et l'assurance, au bout du parcours de se trouver dans un lieu déjà connu où l'on pense être en sécurité. Les lieux marqueurs comme la gare ou l'avenue menant à l'église Madonna delle Lacrime regroupent la plupart des intentions d'arrivée d'itinéraire des personnes interrogées.

Ces deux cartes – ainsi que celles en annexes – illustrent l'importance de la prise en compte de l'influence du milieu urbain sur le cheminement piéton. Ces cartes agrégeant les résultats des cartes mentales issues des enquêtes révèlent des intentions d'itinéraire qui ne favorisent pas le plus court chemin jusqu'à une zone refuge. Les choix de cheminement semblent davantage liés au ressenti du piéton évoluant en milieu urbain et également aux points de repères et perspectives qui se dégagent au fur et à mesure de son cheminement.

### 4.3.3 Vers l'implémentation de la visibilité dans le modèle STEP

L'analyse des cartes mentales réalisées à partir des intentions de déplacements lors de l'évacuation sur les sites d'étude nous montre, que le cheminement piéton est plus complexe qu'un itinéraire de plus court chemin distance/temps vers la zone refuge la plus proche. Il semble donc pertinent d'intégrer des paramètres liés à la lisibilité de l'espace urbain dans le modèle STEP.

Avant d'intégrer les informations de cheminement piéton en milieu urbain à la modélisation, il faut prendre en compte les données théoriques et empiriques concernant les sites d'étude. Le choix d'itinéraires subit des influences en fonction de la connaissance de l'environnement, du ressenti, et surtout de la perspective de vision offerte au piéton. Il s'agit donc ici de facteurs liés à la lisibilité et la visibilité de l'environnement urbain.

Créer une variable de choix d'itinéraires d'évacuation en fonction de tous les éléments vus dans ce chapitre est un sujet de recherche sur le comportement du piéton. Or, la problématique qui se pose ici n'est pas de coller à la réalité des choix des individus évacuant, mais plutôt de tenir compte de cette lisibilité et visibilité en milieu urbain. Il s'agit de s'affranchir des graphes de plus court chemin constituant souvent les plans d'évacuation, sans

pour autant coller pleinement à la *Space Syntax* qui ne prend pas en compte le contexte de stress d'une évacuation.

Le choix du piéton repose sur un rapport entre l'individu et l'environnement urbain et bâti dans lequel il chemine. C'est sur cet élément que l'on s'appuie afin d'intégrer des paramètres de visibilité dans la modélisation. Ces paramètres prennent la forme d'une variable principale attachée aux zones refuge et aux constructions et d'éléments de visibilité qui sont des caractéristiques des piétons (voir chapitre 6) :

— La variable de visibilité attachée aux constructions :

En se basant sur le bâti comme opposition à l'espace non construit où chemine le piéton, le bâtiment joue le rôle d'obstacle. A travers cela, une influence peut s'exercer sur la visibilité qu'a le piéton. La variable se construit donc autour des éléments bâtis comme entraves à la visibilité de la zone refuge pour le piéton. Un bâti peut empêcher la vision de la zone refuge à une personne et donc constituer des zones "d'ombre" dans lesquelles le piéton est amené à chercher son chemin, ne sachant où aller car n'ayant pas de point de repère ou de perspective vers la zone refuge.

— Des caractéristiques attachées aux personnes :

Plusieurs paramètres se référant à la visibilité des personnes durant l'évacuation sont également implémentés dans le modèle STEP. Il s'agit de la vision des personnes ainsi que de la probabilité de chercher son chemin pour une personne se situant dans la zone d'ombre de non-visibilité de la zone refuge.

Cette variable de visibilité des piétons en contexte urbain est donc construite de façon multiple. Cependant, dans le modèle STEP, elle ne permet pas d'intégrer les notions d'angles de perspectives liés à la *Space Syntax*. Elle semble néanmoins a priori répondre à la problématique du choix d'itinéraire intégrant d'autres paramètres que celui du plus court chemin en intégrant un phénomène de recherche d'itinéraire et de perspectives de vue vers les zones refuge. Les construction et implémentation de ces paramètres dans le modèles STEP sont détaillées dans le chapitre 6 de cette thèse.

## Conclusion

Dans le cadre de cette thèse, tout l'espace du réseau de voirie hors espace bâti est considéré pour l'évacuation piétonne. Les constructions viennent donc en opposition avec les espaces permettant le cheminement piéton. L'espace bâti structure l'évacuation en conditionnant la zone de cheminement et également la perspective et la vision du piéton lors de son itinéraire.

De nombreuses recherches mettent en avant l'influence de l'environnement urbain sur les choix de cheminement piéton. Un premier aspect de ressenti et d'ambiance urbaine peut orienter les choix des personnes. Cependant, une évacuation se déroule sous une contrainte de stress et le choix ne se fait pas majoritairement en lien avec le confort d'un lieu mais plutôt par la simplicité de cheminement. La connaissance des lieux a aussi son importance dans les choix de direction. En effet, des lieux marqueurs dans la ville servent de points de repère et le piéton peut hiérarchiser l'espace urbain en fonction d'eux.

A travers les travaux de *Space Syntax*, l'idée de chemin simple car avec des angles doux et donc peu de changements brutaux de direction amène l'importance de la perspective et de la vision qu'a un individu sur ce qui vient plus loin sur son chemin.

Durant les enquêtes réalisées sur les sites de Saint-Laurent-du-Var et Syracuse, des cartes mentales d'intentions d'itinéraire d'évacuation et de lieux de mise à l'abri ont été réalisées avec les personnes interrogées. L'analyse de ces cartes regroupant toutes les intentions des personnes enquêtées nous révèlent que la plupart souhaiteraient aller trouver refuge vers des lieux marqueurs de l'espace urbain comme les gares ou des monuments. L'idée d'aller en hauteur ressort quasi-majoritairement des entretiens.

De plus, lorsque l'on regarde de manière individuelle les intentions d'itinéraire à Syracuse, de nouveaux éléments apparaissent. Il ressort de manière évidente que ce n'est jamais le plus court chemin vers la zone refuge la plus proche qui est évoqué par les personnes interrogées. Les intentions d'itinéraire incluent pour la très grande majorité une mise en danger par des itinéraires longs traversant la zone inondable. Enfin, la plupart des lieux évoqués par les personnes comme point d'arrivée de mise en sécurité sont à proximité des éléments marqueurs.

Ces analyses de cartes mentales montrent l'importance de la prise en compte de ces influences dans le choix des itinéraires et de ne pas toujours privilégier le chemin le plus court en distance/temps dans la simulation d'évacuation. Une variable de visibilité est donc intégrée au modèle STEP. A travers le bâti comme obstacle à la visibilité des zones refuge, des zones de non-visibilité des zones refuge dans lesquelles les personnes chercheront leur chemin sont générées. Cette variable ne cherche pas à recréer en détail le comportement humain influencé par son environnement, mais elle permet de prendre en compte le bâti et remet en cause l'idée d'une évacuation par le plus court chemin.



## CHAPITRE 5

---

### LA VILLE COMME ESPACE PRATICABLE

---



FIGURE 5.1 – Photographie de dommages suite au tremblement de terre de l'Aquila (Italie) en 2009.

Sources : Toscana Media News, article 1er novembre 2016, consulté le 8 février 2017.

Une personne cheminant dans un environnement urbain lors d'un tremblement de terre se retrouve vulnérable au milieu de cet espace bâti. Un séisme devient meurtrier pour un individu dès lors que des débris peuvent lui tomber dessus. En effet, lors d'un séisme, la sollicitation des structures bâties par les secousses sismiques et les dégâts qu'elles engendrent – pouvant conduire jusqu'à l'effondrement total d'un bâtiment – est le risque majeur. Ces effondrements, même partiels, outre le fait qu'ils constituent un danger mortel pour les personnes, peuvent obstruer des voies de circulation du fait des débris. Ce fut le cas récemment en Italie lors du séisme de l'Aquila, comme on l'observe sur la Figure 5.1. Nous percevons l'ampleur des débris qui peuvent s'amonceler au pied des constructions ; ils recouvrent totalement l'espace de voirie dédié au déplacement et le rendent impraticable. C'est cette question de praticabilité de l'espace urbain et d'accès aux zones refuge qui est abordée dans ce chapitre. Nous tenterons d'obtenir un éclairage avec la mise en place d'une méthode de présomption de vulnérabilité sismique des bâtiments ; à partir de celle-ci, une probabilité d'effondrement des constructions est déduite pouvant remettre en cause la praticabilité de l'espace urbain, notamment lors d'une évacuation.

Un diagnostic de terrain pour déterminer la vulnérabilité au séisme des constructions a été réalisé à Syracuse, plus précisément sur l'île d'Ortigia autour des Piazza Archimede et Piazza Duomo (zones refuge définies dans le plan d'évacuation (Figure 3.22) (voir chapitre 3). Le choix de ce site pour le diagnostic est issu de l'analyse des plans d'évacuation présents à Syracuse (Figures 3.21 et 3.22 présentées dans le chapitre 3)). La présence de ces plans d'évacuation permet la mise en place d'un diagnostic, par la sélection des bâtiments à diagnostiquer en priorité, tôt dans le travail de thèse.

La méthode de diagnostic utilisée permet la classification d'un bâtiment en fonction de sa vulnérabilité estimée. Afin de mettre en place cette estimation, une grille d'analyse visuelle est définie. Elle a permis le diagnostic des bâtiments entourant la place et notamment ceux situés le long des voies débouchant sur les places désignées comme zones refuge.

Le questionnement auquel ce diagnostic tente de répondre est celui de l'accès aux zones refuge en cas d'effondrement lié au séisme précurseur au tsunami. La classification des constructions, permet, pour une magnitude sismique, de définir la probabilité d'effondrement partiel ou total. La praticabilité de la voirie pourra être remise en cause en fonction de ces paramètres.

Enfin, cela nous amène à la transposition de cette vulnérabilité dans les scénarios envisagés à Syracuse avec une secousse sismique préalable au tsunami. Cette probabilité d'effondrement permet d'inclure une variable d'effondrement au modèle de simulation STEP. Cette variable nous permettra d'observer les potentiels effets sur la mise en place de stratégies d'évacuation et sur la mise en sécurité des personnes à travers les scénarios simulés et leurs résultats dans la dernière partie de cette thèse.

## 5.1 Mise en place d'une méthode de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti à Syracuse

### 5.1.1 Le choix de Syracuse

La mise en place d'une démarche de définition et de construction de la praticabilité de l'espace urbain dans le cas d'une évacuation face à un tsunami prend son sens sur le site de Syracuse. En effet, l'impact de l'inondation sur la partie bâtie de la ville y est plus important que sur le site de Saint-Laurent-du-Var. La partie de la jonction de l'île d'Ortigia avec la partie "continentale" de la ville pouvant être totalement submergée en cas de tsunami, la liaison entre les deux zones ne sera, dans ce cas, plus possible. Cela sous-entend qu'il est nécessaire d'assurer une évacuation vers des zones refuge sur l'île d'Ortigia.

Le tsunami n'est pas le seul aléa à avoir un impact fort sur la cité sicilienne puisque le risque sismique y est également important (voir chapitre 2). Les dommages qu'un séisme peut engendrer sont importants, comme ce fut le cas en 1693, où la quasi totalité des constructions d'Ortigia furent détruites (Argnani *et al.*, 2012; Tinti, 2015). Cet effondrement des constructions pose question lorsqu'on le met en parallèle avec le plan d'évacuation face au risque tsunami pour la ville de Syracuse et qui préconise une fuite vers des zones refuge sur l'île d'Ortigia (voir chapitre 3). Le fait d'emprunter des ruelles souvent très étroites de la petite île amène deux questionnements :

- le premier porte sur la garantie d'une circulation sécurisée le long de ces voies, c'est-à-dire sans chutes de débris pouvant mettre en danger la vie des personnes en train d'évacuer ;
- le second renvoie à la praticabilité et l'accessibilité de ces zones refuge, c'est-à-dire la possibilité d'un cheminement obstrué par les débris et rendant impossible le franchissement piéton et sa mise à l'abri.

Malgré la taille restreinte de l'île d'Ortigia, toutes les constructions ne furent pas diagnostiquées ; en particulier parce que l'objectif est de cibler les bâtiments pouvant avoir un impact sur l'accessibilité des zones refuge. La décision fut prise de partir des zones refuge sélectionnées par l'UMR GRED dans le cadre d'Astarte (Lavigne, 2016) pour la mise en place d'un plan d'évacuation en cas de tsunami (voir chapitre 3) que sont les Piazza Archimede et Piazza Duomo (Figure 5.2). S'inscrire dans la suite de ce travail de mise en place de plan d'évacuation permet d'apporter un élément supplémentaire de définition de zones refuge en prenant en compte le contexte multi-risques propre au tsunami et à ce territoire.

La Piazza Archimede est une place carrée avec une fontaine centrale surplombée par Archimède et entourée de bâtiments institutionnels et centraux tels que la préfecture de police et des banques (Figure 5.3). Les constructions en pierres sont en moyenne de 12 mètres de hauteur. Le Corso Matteoti débouche sur cette place. Cette rue constitue une des voies de circulation large de l'île, reliant la Piazza Archimede à la zone de jonction avec le "continent" (Figure 5.5). Deux voies touristiques partent de la place, la Via Roma, qui





FIGURE 5.2 – Zoom sur le plan d'évacuation dans le cas d'un tsunami de Syracuse avec localisation des deux zones refuge d'étude : Piazza Archimede et Piazza Duomo.  
Réalisation : Plattard, O., 2017, d'après UMR GRED, 2014, Lavigne (2016).

prend la direction de la pointe de l'île et passe à côté de la cathédrale, et la Via Maestranza, qui mène à la rive Ouest de l'île, zone des remparts et de promenade sur le front de mer et de baignade. Contrairement au cours Matteotti, ces deux rues sont étroites d'environ 5 à 7 mètres de large, et donc plutôt sombres mais néanmoins des axes très fréquentés. D'autres ruelles partent de la Piazza Archimede, plus étroites et moins touristiques. Toutes ces voies ont été signalées comme itinéraires d'évacuation sur le plan d'évacuation en cas de tsunami mis en place dans le cadre d'Astarte (en noir sur la figure 5.2).

La Piazza Duomo est située sur le côté Est d'Ortigia (Figure 5.5). Il s'agit d'une place de plus grande taille, toute en longueur, sur laquelle se trouve la cathédrale de Syracuse, l'église Santa Lucia ainsi que des hôtels; il s'agit donc d'une place très touristique (Figure 5.4). La cathédrale et l'église constituent des édifices très hauts, tandis que ceux sur la partie légèrement arrondie sont d'une hauteur de 15 à 20 mètres. Les ruelles débouchant



FIGURE 5.3 – Vues de la Piazza Archimede, Syracuse.  
Sources : Plattard, O., 2016.



FIGURE 5.4 – Vues de la Piazza Duomo, Syracuse.  
Sources : Plattard, O., 2016.

sur la place ne sont pas des axes traversant l'île. Au sud, la Via Pompeo Picherali, large de 7-8 mètres et longeant l'église Santa Lucia, mène jusqu'au front de mer et est très touristique. Au centre de la place, sur son côté Ouest, à proximité de la cathédrale, se situe la Piazza Minerva. Cette place rectangulaire permet la connexion entre la Via Roma et la Piazza Duomo. Sur le côté Est de la place, la Via delle Carceri Vecchie, étroite elle aussi entre des immeubles mesurant une vingtaine de mètres de haut, tourne à angle droit en direction du nord vers la rue surplombant le port et la Porta Marina. Dans le plan d'évacuation, seules les voies au sud et à l'est de la place sont symbolisées comme itinéraires d'évacuation (en noir sur la figure 5.2).

Le diagnostic de vulnérabilité sismique des bâtiments est effectué sur ceux localisés à la jonction entre les rues et les places. En étudiant les bâtiments situés à ces emplacements, l'objectif est d'analyser l'accès direct aux zones refuge. Ce choix fut également guidé par le compromis à faire entre l'exhaustivité du diagnostic, devant théoriquement prendre en



être réalisé un relevé plus détaillé afin de proposer des confortements parasismiques<sup>3</sup>. La méthode ici retenue correspond à celle développée lors des diagnostics à l'échelle de quartiers. En effet, pour pouvoir effectuer un diagnostic détaillé il faut fournir des plans et calculs afin d'étudier la structure de la construction et définir sa vulnérabilité en cas de secousse sismique ; il faut également pouvoir rentrer dans les bâtiments ce qui est compliqué, notamment pour la Piazza Archimede sur laquelle se trouvent la préfecture de police ainsi que des établissements bancaires. Le diagnostic est donc réalisé visuellement, sans sondage approfondi de l'état de la structure du bâtiment.

Il convient de préciser qu'il existe d'autres méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des constructions aux séismes que celle de Zacek (1996). On peut citer notamment celles développées par l'Agence Française de génie Parasismique (AFPS) et par le Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA) en France ou encore des méthodes japonaises, néo-zélandaises ou canadiennes (CETE Méditerranée (DREC/SVGC-SIG), 2008). Toutes ces méthodes ne présentent pas les mêmes caractéristiques d'application. La méthode utilisée dans le cas de cette recherche a été mise en place par un architecte et ingénieur en parasismique et est destinée aux architectes ayant une connaissance de la construction parasismique. Cependant, elle est moins précise que la méthode de l'AFPS qui nécessite des calculs de la structure mais inclut donc la prise en compte de beaucoup plus de données sur la construction (plans et détails de construction...) afin d'aboutir sur un diagnostic plus détaillé de vulnérabilité sismique. La méthode de Zacek amène donc, pour une évaluation de la vulnérabilité d'un bâtiment plus précise à se rapprocher d'une autre méthode nécessitant une analyse plus en détail, un accès à plus de données et donc plus longue, comme le précise Zacek (1996) : *"Un examen extérieur sans inspection des éléments structuraux et de leurs liaisons, sans calcul et sans tenir compte de la nature du sol ou du site ne permet pas d'effectuer un diagnostic précis de la résistance des constructions aux séismes (...) la vulnérabilité des ouvrages exposés à des secousses amplifiées ou à des effets induits (...) ne peut être estimée qu'avec le concours d'un géotechnicien qualifié."* Toutefois, l'avantage de la méthode de Zacek (1996) est quelle s'applique à tous types de constructions, en plus d'être simple et rapide (CETE Méditerranée (DREC/SVGC-SIG), 2008). Enfin, cette méthode utilisée également par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) notamment lors de diagnostics officiels en France, se base sur l'expérience de diagnostic de terrain de Zacek tout en adoptant le cadre réglementaire de l'EMS-98 (Grünthal, 2001) (voir chapitre 1).

L'évaluation de la vulnérabilité d'un bâtiment est réalisée à partir d'une grille d'analyse exigeant un examen visuel de la construction sur plusieurs points (Figure 5.6). Cette fiche reprend des éléments de celles utilisées lors des terrains effectués en 2012 et 2013 d'après la méthode de Zacek (2004) et adaptée au terrain de Syracuse. Cette adaptation intervient notamment au niveau de la mise en œuvre et des matériaux de constructions variables en fonction des pays, de la nature du sol spécifique à chaque site.

---

3. Exercice réalisé sur une maison à Ica (Pérou), décembre 2012.



CHAPITRE 5. LA VILLE COMME ESPACE PRATICABLE

- CORRIGÉ D'APRES GOOGLE MAPS -

3

Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016	
<b>LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?</b> <u>PIAZZA ARCHIMEDE</u>	
Rue : <u>Piazza Archimede</u>	Bâtiment : <u>&amp; Via della Maestranza</u>
<b>CARACTERISTIQUES GENERALES :</b>	
Nature de l'occupation : <u>Préfecture</u>	<u>XX<sup>o</sup>s</u>
Surface au sol (m <sup>2</sup> ) : <u>± 300 m<sup>2</sup></u>	Surface habitable (m <sup>2</sup> ) :
Nombre de niveaux : <u>5</u>	Hauteur (m) : <u>18 m</u>
Type de toiture du dernier niveau : dalle béton <u>charpente bois</u> <u>charpente acier</u>	
Type de construction : Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / Autre :	
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) :	
<b>PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :</b>	
RdC	R + 1 2 3
<u>PIAZZA ARCHIMEDE</u>	<u>batiment de la préfecture ?</u>
<u>rectifié Google maps</u>	<u>FAÇADE PIAZZA ARCHIMEDE</u>
<u>VIA DELLA MAESTRANZA</u>	<u>FAÇADE PIAZZA ARCHIMEDE</u>
Références des photos :	
<b>FACTEURS DE VULNERABILITE :</b>	
<b>1 Construction</b>	
Forme en plan : sym. 2 axes <u>sym. 1 axe</u> <u>pas de sym.</u> régulière <u>irrégulière</u>	élancement : <u>1/2</u>
Forme en élévation : <u>régulière</u> irrégulière très irrégulière	niveaux en retrait ( ) niveaux en saillie ( )
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non (?)	
Niveaux non contreventés ( ) Niveaux souples modérés (X) importants ( )	
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) <u>oui</u> non	
Absence d'encadrement des trumeaux : oui non (?) Absence d'encadrement des baies : <u>oui</u> non ?	
Poteau court : oui <u>non</u> Poteau élancé : oui <u>non</u>	Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui <u>non</u>
Porte-à faux importants : oui <u>non</u> Edicules élancés : oui <u>non</u>	Masses importantes en hauteur : oui <u>non</u>
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : <u>oui</u> non	
Etat de conservation de la structure : bon <u>normal</u> mauvais	
Surélévations prévisibles : oui <u>non</u>	
Divers :	
<b>2 Nature du sol /orographie + rue</b>	
Période propre du sol :	Période propre du bâtiment : Risque de résonance : faible modéré élevé
Pente en % : <u>/</u>	
Sommet de colline : oui <u>non</u> Proximité d'un changement de pente : oui <u>non</u>	
Divers :	
Largeur de rue : <u>PIAZZA + ± 6M</u>	
<b>EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE :</b> A B C D E F	

FIGURE 5.6 – Fiche de diagnostic de la vulnérabilité sismique du bâtiment de la préfecture, Piazza Archimede. Version terrain corrigée via Google maps pour la vue satellite.

Sources : Plattard, O., 2016.

- Les caractéristiques générales de la construction :  
il s'agit ici de poser les éléments fondamentaux qui concernent la construction comme son année de construction, la nature de son occupation ainsi que ses surface et hauteur. Des premiers éléments de constructions sont observés tels que les matériaux et la toiture. Les matériaux et leur mise en œuvre sont des données qui permettent dès le départ de se faire une idée sur la classe de vulnérabilité du bâtiment (Grünthal, 2001). Cependant, d'autres éléments plus détaillés sont nécessaires pour la définir de manière plus précise.
- Des plans et élévations du bâtiments à main levée :  
cette deuxième partie demande de dessiner la construction à travers des plans et des élévations. Le dessin est un procédé qui permet de mettre en avant les régularités et irrégularités de la construction. En parasismique, la régularité des descentes de charges dans la structure est un des principes fondamental et cela peut se déduire du dessin du plan ou de la façade de la construction.
- Facteurs de vulnérabilité :  
cette troisième partie permet de pointer du doigt les éléments qui peuvent altérer la résistance de la construction face aux secousses sismiques. Elle requiert notamment d'analyser la régularité – de construction et de descente de charges – du bâtiment, élément déterminant lors d'une sollicitation d'une construction, et dans des éléments spécifiques et plus précis que la composition générale que met en avant le dessin. Il s'agit ici d'aller dans le détail de la construction afin de mettre en avant les irrégularités dans la structure pouvant accentuer la vulnérabilité, comme un effet de poteau court, d'encadrement des trumeaux ou encore de masses importantes en hauteur. Cette partie replace également le bâtiment dans sa mitoyenneté et la sollicitation éventuelle des constructions voisines en cas d'absence de joint vide entre eux.
- Nature du sol/orographie :  
cette quatrième et dernière partie de la fiche de diagnostic permet de replacer la construction dans son environnement. Le premier paramètre porte sur la période du sol puisque les ondes sismiques ne se déplacent pas de la même manière dans le sol rocheux que dans un sol mou (Balandier, 2004). De plus, des éléments comme la pente ou la largeur de rue permettent de replacer la construction dans son environnement plus global que son voisinage direct comme c'est le cas dans la troisième partie de la fiche.

Le diagnostic a été réalisé en plusieurs étapes. La première s'est déroulée sur le terrain en remplissant la fiche dans la rue en face de la construction. Cette première étape a pris plusieurs jours puisque neuf et treize bâtiments ont respectivement été diagnostiqués sur les Piazza Archimede et Duomo. Les fiches ont été remplies et numérotées et des photos de chaque bâtiment ont également été réalisées pour compléter chaque fiche.

Le diagnostic nécessite cependant d'observer toutes les façades de la construction, y

compris celles de la face arrière donnant sur cour, afin de fournir le diagnostic le plus complet possible. En effet, notamment sur la place Duomo, les magnifiques façades restaurées cachent bien l'état et la morphologie de la construction derrière elles. Il est arrivé que je ne puisse pas accéder à l'arrière cour du bâtiment et que j'ai du mal à évaluer certains éléments nécessaires au diagnostic. C'est pourquoi, j'ai du ajouter une étape de vérification dans le diagnostic via des photos aériennes<sup>4</sup> (Figure 5.6). Cette étape m'a permis de réaliser des plans plus précis, notamment grâce à la fonction de vue 3D qui permet de donner une perspective à la vue aérienne et dès lors de pouvoir affiner la morphologie du bâtiment. A cette donnée s'ajoute la vision plus claire d'extension des constructions.

---

4. consultation des images satellites sur Google Maps de août à novembre 2016.

## 5.2 La vulnérabilité sismique des constructions

Grâce au protocole établi, chaque bâtiment des Piazza Archimede et Piazza Duomo a pu être diagnostiqué et s'est vu attribué une – ou plusieurs – classe de vulnérabilité sismique (Dernière section en bas de la fiche, voir figure 5.6).

### 5.2.1 Définition réglementaire des classes de vulnérabilité sismique des bâtiments

La méthode utilisée s'appuie sur la réglementation européenne et plus précisément l'échelle macrosismique européenne (EMS-98) (Grünthal, 2001). Cette dernière est une échelle d'intensité visant à créer un zonage en fonction de deux critères. D'une part, des dommages observés sur les constructions et infrastructures et, d'autre part, du ressenti des populations sur une région ayant subi un tremblement de terre (voir chapitre 1). L'intensité sismique est la représentation des dommages liés au séisme contrairement à la magnitude qui est une échelle de mesure de l'énergie libérée lors d'un séisme.

Les matériaux de construction et leur mise en œuvre constituent les facteurs principaux de vulnérabilité d'un bâtiment face aux secousses sismiques. En effet, certains matériaux vont avoir une meilleure réaction lorsqu'ils se trouveront sollicités (Zacek, 1996). C'est pourquoi l'EMS-98 procède à une classification de vulnérabilité des structures en fonction des matériaux (Figure 5.7). Les classes de vulnérabilité s'échelonnent de A à F, respectivement du plus au moins vulnérable. Cette classification se construit par matériau sous la forme de sa vulnérabilité la plus probable avec une extension possible en fonction de sa mise en œuvre. Les matériaux de construction sont classés en quatre catégories : la maçonnerie, le béton armé, l'acier et le bois. L'acier, tout comme le béton armé avec une conception parasismique, ont un bon comportement sous sollicitation sismique du fait des propriétés de ces matériaux et sont donc classés E avec une extension jusqu'à F en fonction de la conception. Le bois et le béton armé sans conception parasismique ont un comportement moyen avec des classes de vulnérabilité les plus probables de C et D. La maçonnerie est le matériau avec le moins bon comportement face aux sollicitations sismiques et est de ce fait catégorisé dans les classes de A à D. La maçonnerie peut être renforcée ce qui lui apporte un meilleur comportement face aux sollicitations sismiques.

Comme nous l'avons déjà évoqué, le matériau n'est pas l'unique critère intervenant dans le comportement d'une construction sous sollicitations sismiques. La mise en œuvre et la régularité de la construction jouent aussi un rôle substantiel. Un même matériau peut être mis en œuvre de manière différente ce qui lui confère des propriétés de résistance différentes. De plus, la discontinuité de mise en œuvre ou de matériau constitue un point faible et amène un potentiel endommagement de la structure. A titre d'exemple, le béton n'a pas les mêmes propriétés physiques que le bois. La charge de sollicitation contenue dans le matériau ne peut pas être assimilée de la même manière lors d'un séisme et entraîne



Type de structure	Classe de vulnérabilité					
	A	B	C	D	E	F
MAÇONNERIE	Moellon brut, pierre tout venant	○				
	Brique crue (adobe)	○	—			
	Pierre brute	○	—			
	Pierre massive		○	—		
	Non renforcée, avec des éléments préfabriques		○	—		
	Non renforcée, avec des planchers en béton armé		○	—		
	Renforcée ou chaînée			○	—	
BÉTON ARMÉ	Ossature sans conception parasismique (CPS)		○	—		
	Ossature avec un niveau moyen de CPS		○	—		
	Ossature avec un bon niveau de CPS			○	—	
	Murs sans CPS		○	—		
	Murs avec un niveau moyen de CPS			○	—	
	Murs avec un bon niveau de CPS				○	—
ACIER				○	—	
BOIS				○	—	

○ Classe de vulnérabilité la plus probable; — Intervalle probable;  
 ..... Intervalle de probabilité plus faible, cas exceptionnels

FIGURE 5.7 – Tableau de vulnérabilité : différenciation des structures en classes de vulnérabilités de A à F.

Sources : Grünthal (2001).

une rupture, c'est-à-dire que le matériaux cède sous la contrainte. Ce fût notamment le cas pendant le tremblement de terre de Kobe où le premier étage de nombreuses constructions s'est effondré sur lui-même. Cela s'explique notamment par la technique de construction japonaise qui, jusqu'alors, mettait en œuvre le rez-de-chaussée dans un matériau comme le béton armé pour ensuite changer la structure des étages supérieurs pour de l'acier ou du bois. Cette expérience d'effondrement a permis de repenser les techniques de mise en œuvre des matériaux en évitant les ruptures de matériau dans une même structure.

Dans le cas de Syracuse, la très grande majorité des constructions est réalisée en maçonnerie, soit en moellons soit en pierres massives ou brutes. Beaucoup de bâtiments ont été reconstruits sur les décombres du tremblement de terre de 1693 qui avait mis à terre la grande majorité des bâtiments d'Ortigia. D'après la classification par matériau de l'EMS-98, nous constatons que cette nature de construction n'a pas un bon comportement face aux secousses sismiques (Figure 5.7).

Cependant, le comportement de la construction va dépendre de sa période propre ( $T_{bat}$ ) ainsi que de la nature du sol (et de sa période propre  $T_{sol}$ ). Sous les sollicitations sismiques, une structure se met à osciller. Cette oscillation, soit la période propre du bâtiment ( $T_{bat}$ ), dépend de son degré de rigidité. De manière grossière, il peut être distingué les bâtiments souples, semi-rigides et rigides. Ces trois catégories sont liées à la nature des matériaux influençant sa flexibilité – par exemple, l'acier apportant plus de souplesse que la maçonnerie – et également de ses masse et dimension – un gratte-ciel ayant une plus grande période d'oscillations qu'une maison individuelle, plus rigide –. De plus, les forces d'inertie qui sollicitent les constructions sont d'autant plus grandes que les constructions sont lourdes et massives, comme la maçonnerie. Les bâtiments d'Ortigia, majoritairement en maçonnerie et de faible hauteur peuvent être considérés dans la grande majorité comme rigides. Il existe un calcul permettant de définir la période propre d'une construction par approximation – lorsque l'on n'a pas accès aux détails de la construction – (Zacek, 1996). Cette période propre de la construction ( $T_{bat}$ ) peut être calculée à partir de la formule de  $T_{bat} = \frac{n}{30}$  dans le cas d'un bâtiment rigide et  $T_{bat} = \frac{n}{20}$  pour un bâtiment semi-rigide, avec  $n =$  nombre de niveaux du bâtiment.

Or, le sol a lui aussi une période propre d'oscillation ( $T_{sol}$ ) en fonction de sa nature. Tout comme pour les matériaux de construction, les types de sol peuvent être classés de bons (rocher) à mauvais (sédiment), le premier étant plus "dur" et le second plus "mou". La période propre du sol ( $T_{sol}$ ) est un élément important dans la détermination de la vulnérabilité sismique des constructions puisque si la période du sol est proche ou similaire à celle du bâtiment, il peut y avoir un risque de résonance – les deux oscillent sur la même période –. Le phénomène de résonance amplifie la sollicitation sismique jusqu'à entraîner l'effondrement de la construction (voir chapitre 1).

N'ayant pas pu avoir accès aux données de période propre du sol ( $T_{sol}$ ) pour Syracuse, j'ai dû la calculer en fonction de l'épaisseur du sol et de la vitesse des ondes de cisaillements. Ce calcul n'est pas aussi précis que des relevés mais permet de donner un ordre de grandeur de période propre du sol sur une zone. L'île d'Ortigia étant rocheuse et les deux places se trouvant sur le "sommet de l'île" cela a facilité le calcul. Des valeurs moyennes ont pu être utilisées avec une altitude moyenne de 20 mètres et une vitesse des ondes sismiques de cisaillement de  $800\text{m/s}^5$ .

$$T_{sol} = \frac{4H}{V_s} = \frac{4 \times 20}{800} = 0,1 \text{ s}$$

$T_{sol} =$  période propre du sol en secondes (s).

---

5. Sources : Seismic Portal, consulté en mai 2018, <http://www.seismicportal.eu/>

$H$  = épaisseur du sol en mètres (m).

$V_s$  = vitesse des ondes sismiques de cisaillement en mètres/seconde (m/s).

Cette période propre de sol ( $T_{sol}$ ) égale à 0,1 seconde, signifie que les bâtiments ayant une période propre ( $T_{bat}$ ) proche de cette valeur ont un fort risque de rentrer en résonance. Pour les bâtiments en maçonnerie, rigides, présents à Syracuse la formule de calcul approximatif correspond à  $T_{bat} = \frac{n}{30}$ . Or,  $T_{bat} = \frac{3}{30} = 0,1$  seconde. Cela signifie que les bâtiments de 3 étages en maçonnerie ont une période propre ( $T_{bat}$ ) identique à celle du sol ( $T_{sol}$ ). Ces bâtiments sont donc très vulnérables, notamment à cause du risque d'entrée en résonance.

Enfin, la construction subi des dommages qui peuvent aller jusqu'à son effondrement total d'après l'EMS-98. Ces dommages sont classés en cinq degrés de dégâts (Grünthal, 2001). La réglementation propose une classification pour les bâtiments en maçonnerie (Figure 5.8) ainsi que pour ceux en béton armé. Le degré 1 (DG1) renvoie à des dégâts légers et le degré 5 (DG5) concerne la destruction totale de la construction. A partir du degré 3 (DG3) – dégâts sensibles à importants –, il peut être considéré que les dommages sont une menace pour les personnes puisque des débris tombent sur la voie de circulation. Nous ne tenons pas compte des dommages pouvant survenir à l'intérieur des bâtiments puisque, dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons au cheminement piéton sur le réseau de voirie. Le degré 4 (DG4) – dégâts très importants –, est considéré comme le degré à partir duquel la circulation sur la voirie est remis en cause par les débris liés à l'effondrement partiel des structures.

La construction subissant des dommages de DG4 et DG5 génère des débris qui se répandent à sa base. Afin de définir l'emprise potentielle de ces débris au sol, nous appliquons la règle suivante : l'emprise au sol des débris = 1/3 de la hauteur totale du bâtiment (Zacek, 2004). Par exemple, pour le bâtiment de la préfecture présenté dans la figure 5.6 qui a une hauteur de 18 mètres, l'emprise de son effondrement potentiel est d'un rayon d'environ 6 mètres autour du bâtiment.

### 5.2.2 Des premiers résultats issus du diagnostic de terrain

Neuf bâtiments ont été diagnostiqués sur la Piazza Archimede et treize sur la Piazza Duomo, soit vingt-deux au total. Les constructions sur les deux places sont semblables en termes de période de construction, évaluée au XVIIIème siècle – post-séisme de 1693 –, à part quelques exceptions, comme le bâtiment de la préfecture sur la Piazza Archimede (Figures 5.3 et 5.4). Ils ont, pour la grande majorité, été reconstruits sur les décombres du désastre de 1693. De plus, suite à la vérification faite via GoogleMaps, il est ressorti que plusieurs constructions sont composées d'une façade entretenue et régulière, tandis que l'arrière cour révèle une construction vétuste et faite de nombreuses extensions ou surélévations. Cela est particulièrement visible sur la Piazza Duomo qui offre un aspect très entretenu et uniforme dans le dessin de ses façades (Figure 5.4). Ces dernières, tels des

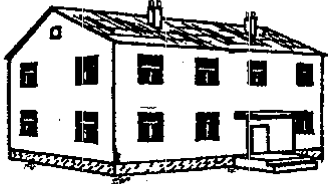




Classification des dégâts aux bâtiments en maçonnerie	
	<p><b>Degré 1: Dégâts négligeables à légers</b> (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux)</p> <p>Fissures capillaires dans très peu de murs. Chute de petits débris de plâtre uniquement. Dans de rares cas, chute de pierres descellées provenant des parties supérieures des bâtiments.</p>
	<p><b>Degré 2: Dégâts modérés</b> (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)</p> <p>Fissures dans de nombreux murs. Chutes de grands morceaux de plâtre. Effondrement partiel des cheminées.</p>
	<p><b>Degré 3: Dégâts sensibles à importants</b> (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants)</p> <p>Fissures importantes dans la plupart des murs. Les tuiles des toits se détachent. Fractures des cheminées à la jonction avec le toit; défaillance d'éléments non structuraux séparés (cloisons, murs pignons).</p>
	<p><b>Degré 4: Dégâts très importants</b> (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)</p> <p>Défaillance sérieuse des murs; défaillance structurale partielle des toits et des planchers.</p>
	<p><b>Degré 5: Destruction</b> (dégâts structuraux très importants)</p> <p>Effondrement total ou presque total.</p>

FIGURE 5.8 – Tableau de classification sous 5 degrés (1 à 5) des dégâts aux bâtiments en maçonnerie.

Sources : Grünthal (2001).

décors, cachent, dans un but touristique, en réalité des bâtiments beaucoup plus vétustes.

La vétusté et la mise en œuvre des constructions expliquent pour partie la classification obtenue sur ces deux places (Tableau 5.1). Il ressort en effet de ce diagnostic que la majorité des constructions sont de classes A ou B, avec deux exceptions de classe C pour les deux bâtiments administratifs construits plus récemment. Ces deux derniers sont en ossature béton armé ce qui leur apporte une meilleure résistance que les constructions en maçonnerie de moellons ou pierres. En outre, la majorité des bâtiments diagnostiqués a pour matériaux

de la maçonnerie leur conférant une nature plutôt rigide. Or, l'île d'Ortigia étant rocheuse, la période propre du sol ( $T_{sol}$ ) et de ces constructions ( $T_{bat}$ ) sont, d'après les estimations, très proches. Le risque d'entrée en résonance est donc élevé. Or, lors de l'entrée en résonance d'une construction avec le sol, une amplification importante de l'action sismique sur la structure intervient, amenant à sa destruction (Zacek, 1996). Du fait du risque d'entrer en résonance élevé, les bâtiments diagnostiqués ont une vulnérabilité d'autant plus importante avec une classification en A d'une majorité d'entre eux.

ZONES REFUGE	CLASSES DE VULNERABILITE				TOTAL
	A	B	C	D	
Piazza Archimede	4	4	1	0	9
Piazza Duomo	9	3	1	0	13
TOTAL	13	7	2	0	22

TABLE 5.1 – Classes de vulnérabilité des bâtiments diagnostiqués sur les Piazza Archimede et Piazza Duomo.

Sources : Plattard, O., relevés de terrain, 2016.

Le diagnostic de terrain permet de révéler l'importance de la vulnérabilité des bâtiments aux abords des zones refuge (Table 5.1). De plus, les plans des Piazza Archimede (Figure 5.9) et Duomo (Figure 5.10) permettent de situer chaque bâtiment diagnostiqué selon une numérotation correspondant à celle des fiches (voir fiches en Annexe 8.4).

Une gamme de valeurs indique la hauteur de chaque bâtiment. Cette gamme discrétisée tous les 3 mètres comporte les tons les plus clairs pour les hauteurs les plus basses. Le choix de pas de 3 mètres fait référence à la règle de l'emprise au sol des débris d'un bâtiment correspondant à un tiers de sa hauteur totale, et donc à la division par 3 de la hauteur du bâtiment. Afin de symboliser l'emprise au sol de l'effondrement potentiel, des pointillés apparaissent autour des constructions selon la distance correspondant à leur hauteur. Les hachures permettent une représentation de l'emprise des destruction sur l'espace public et notamment les voies de circulation. Enfin, un surlignage du contour du bâtiment indique sa classe de vulnérabilité. Plus le surlignage est foncé, plus la vulnérabilité présumée de la construction est importante.

L'emprise au sol de l'effondrement potentiel des constructions sur les deux plans, occupe une part importante de la surface au sol et recouvre totalement ou partiellement les espaces de voirie. En effet, pour les deux places, les hachures représentant les débris recouvrent la totalité, à l'exception d'une rue, le Corso Matteoti (Figure 5.9), les voies d'accès aux zones refuge. Certaines rues sont concernées par l'emprise de l'effondrement potentiel de plusieurs bâtiments.

Ces obstructions quasi-totales des accès aux deux zones refuge se comprennent du fait de la particularité du tissu urbain de l'île d'Ortigia, composé d'une hauteur relativement importante des bâtiments par rapport à la largeur des rues. En effet, les constructions mesurent en majorité de 12 à 18 mètres de haut sur la Piazza Archimede (Figure 5.9), tandis que les rues, hors Corso Matteoti, ont des largeurs allant de moins de 3 mètres à

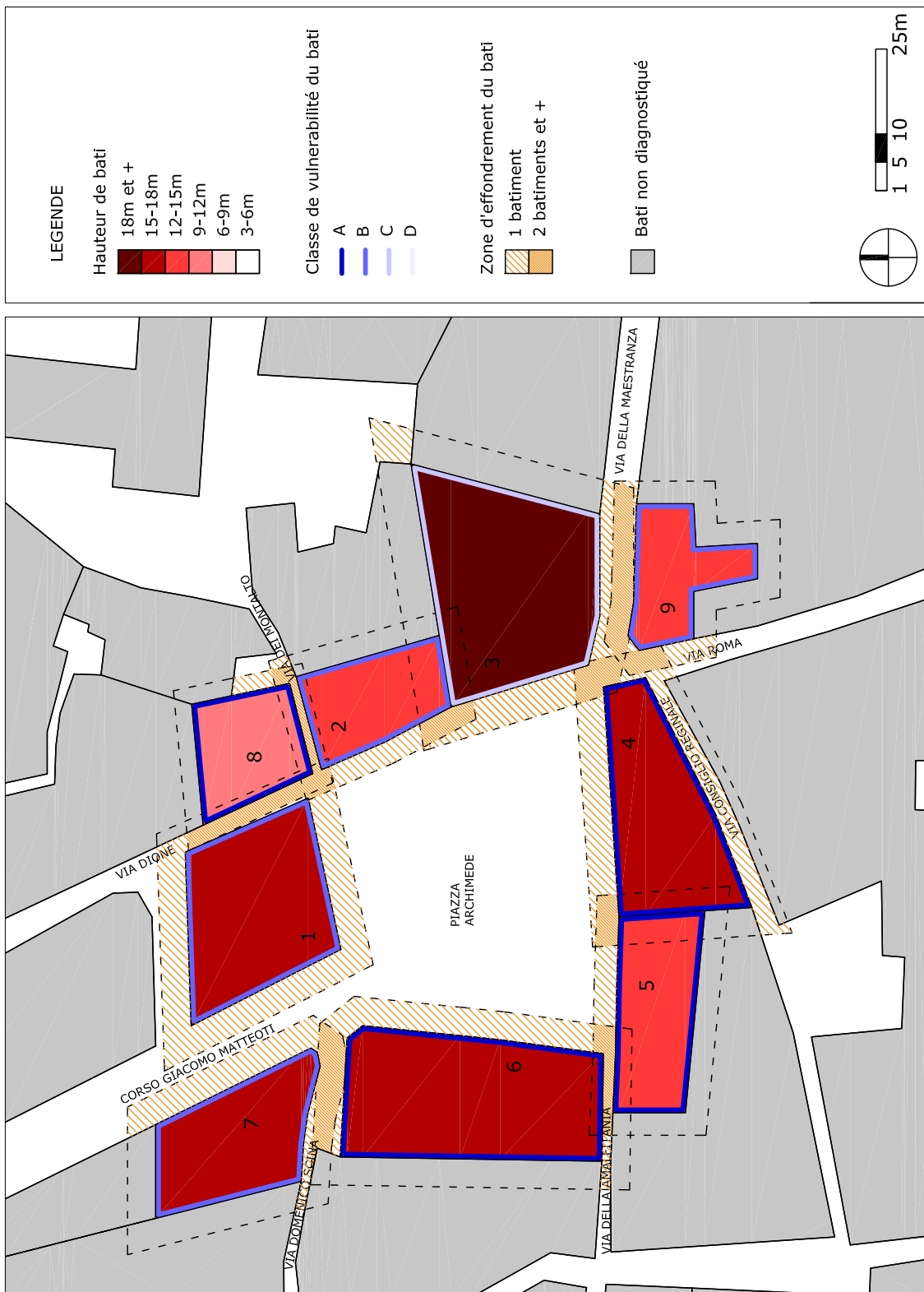


FIGURE 5.9 – Plan des bâtiments diagnostiqués avec indication de leur classe de vulnérabilité, hauteur et emprise de leur effondrement, Piazza Archimede.

Réalisation : Plattard, O., 2016.

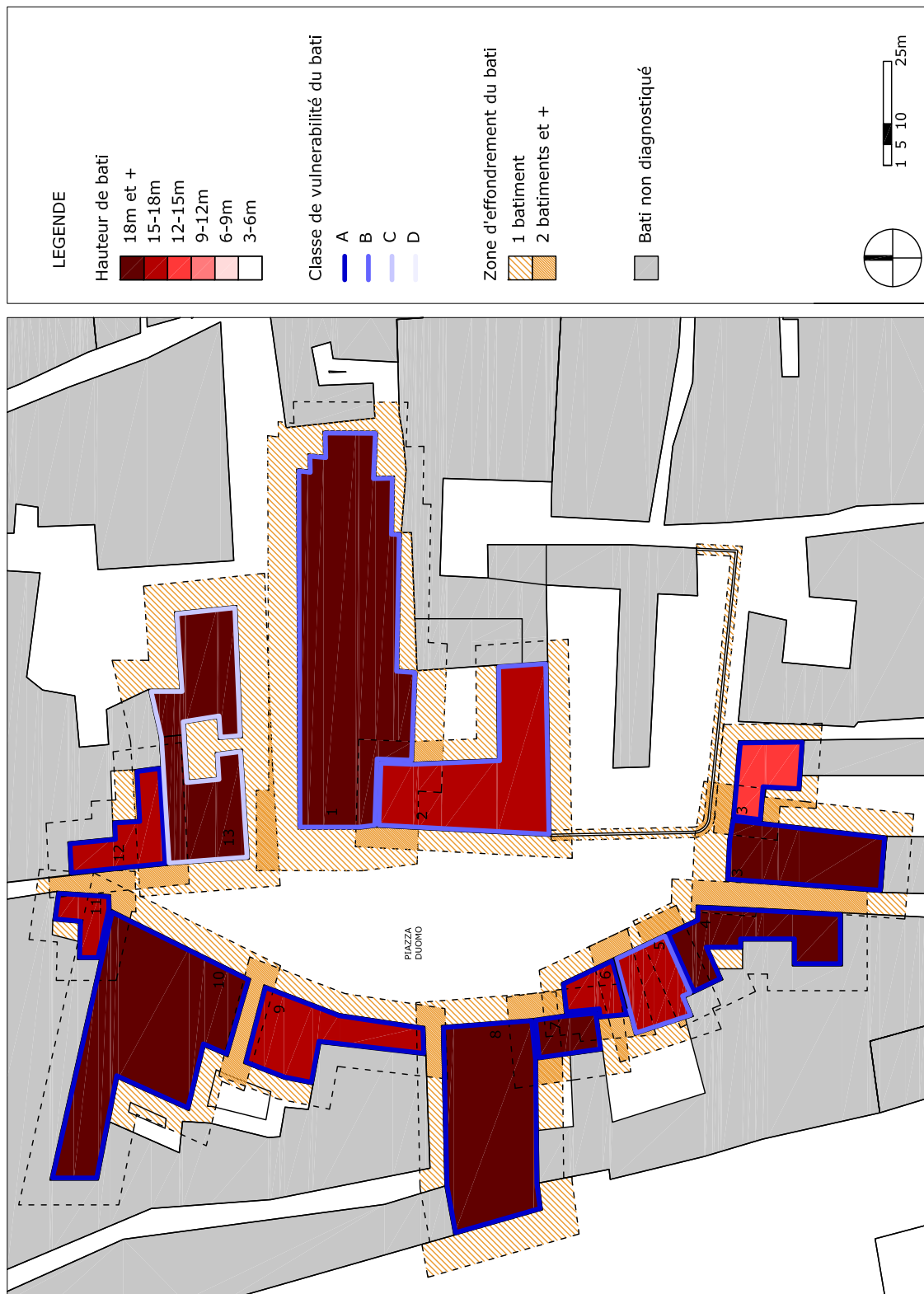


FIGURE 5.10 – Plan des bâtiments diagnostiqués avec indication de leur classe de vulnérabilité, hauteur et emprise de leur effondrement, Piazza Duomo.

Réalisation : Plattard, O., 2016.

6 mètres (Figure 5.3). Sur cette place, l'effondrement des bâtiments obstrue aisément les ruelles étroites, pouvant par la même occasion, endommager les bâtiments sur le trottoir en face. En ce qui concerne la Piazza Duomo (Figure 5.10), les bâtiments sont principalement d'une hauteur de 18 mètres ou plus. Cela s'explique notamment par la présence de deux églises auxquelles fait face un ensemble de façades tout aussi imposantes. La Piazza Duomo est plus aérée et grande que la Piazza Archimede mais la présence de ces hauts bâtiments, comme le Duomo, mène à la même conclusion sur le rapport entre la hauteur des constructions et la largeur des rues (Figure 5.4). En revanche, le plan permet d'observer que l'emprise potentielle des destructions sur l'espace de voirie obstrue la totalité des ruelles d'accès à la zone refuge.

Tous les bâtiments n'appartiennent pas la même classe de vulnérabilité et n'ont donc pas la même probabilité d'endommagement sous contrainte sismique. Cependant, à ce niveau de résultats, on constate que potentiellement l'accès à ces deux zones refuge puisse être remis en cause. Ce constat doit toutefois être nuancé en fonction de l'intensité sismique. Nous proposons donc d'enrichir ces résultats par une estimation de la probabilité d'effondrement de ces bâtiments en fonction de l'intensité du séisme. Cela permet de mettre en avant la praticabilité de ces voies d'accès aux zones refuge en cas de séisme de référence.



### 5.3 Quelle praticabilité de l'espace urbain au cours de l'évacuation en fonction de la probabilité d'effondrement du bâti ?

En fonction de l'échelle d'intensité sismique (EMS-98), la probabilité d'une construction de subir des dommages allant de DG1 à DG5 est précisée (Figure 5.8). En fonction de la vulnérabilité sismique d'un bâtiment, nous pouvons établir une probabilité d'endommagement par degré selon l'intensité sismique. En effet, l'échelle d'intensité comprend douze niveaux qui sont définis par les effets sur les humains, objets et constructions (voir Annexes 8.4, Grünthal (2001)). C'est donc ce dernier point qui nous intéresse ici, puisque plus le niveau d'intensité sismique est élevé plus il y a des dommages de degré élevé sur les constructions en fonction de leur classe de vulnérabilité.

Les premiers dommages sur les constructions apparaissent à partir de l'intensité sismique VI, pour les bâtiments faisant partie des classes de vulnérabilité A et B. Cependant, comme il a été évoqué précédemment, à partir du DG3, les dommages deviennent significatifs pour la sécurité des personnes cheminant dans l'espace public et les DG4 et DG5 remettent en cause la praticabilité de cet espace de voirie.

La terminologie de l'échelle de l'EMS-98, telle qu'elle est décrite dans le document officiel reste vague quant au pourcentage de constructions affectées à chaque niveau de l'échelle. Les termes employés sont "un peu", "beaucoup" et "la plupart". Cependant, dans la réglementation, une indication de fourchette de valeur est proposée (Figure 5.11). Celle-ci nous est utile afin de mettre en place une probabilité d'effondrement des bâtiments diagnostiqués en fonction de leur classe de vulnérabilité et par niveau d'intensité sismique.

#### **Définitions des quantités**

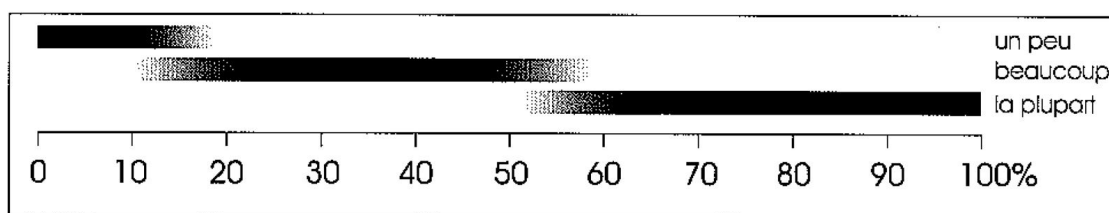


FIGURE 5.11 – Indication de fourchette de valeur pour la terminologie employée dans la définition des niveaux d'intensité de l'EMS-98.

Sources : Grünthal (2001).

En partant de ces indications de valeurs (Figure 5.11), il est possible de définir des probabilités d'effondrement par intensité sismique pour chacune des places étudiées. Pour cela, nous considérons la totalité des bâtiments diagnostiqués pour la place concernée. A chaque niveau d'intensité sismique, nous utilisons ces valeurs indicatives de l'EMS-98 pour

déterminer la probabilité de dégâts pour chaque degré de dommages. Le calcul est, dans un premier temps, effectué par niveau d'intensité sismique en rapportant les valeurs de l'échelle en fonction de la classe de vulnérabilité du bâtiment (Tables 5.2 et 5.3). Puis, dans un second temps, ces résultats détaillés acquis par niveau d'intensité sismique sont rassemblés afin de donner un pourcentage d'endommagement par degré DG en fonction du niveau d'intensité sismique pour l'ensemble des bâtiments (Figures 5.12 et 5.13).

Cela nous permet d'obtenir les valeurs suivantes pour la Piazza Archimede (Table 5.2 et Figure 5.12) et la Piazza Duomo (Table 5.3 et Figure 5.13).

Degré d'intensité	Nombre total de bâtiments	Degré de dégâts				
		DG1	DG2	DG3	DG4	DG5
VI	9	52,8	20,0	4,4	0,0	0,0
VII	9	87,2	63,9	31,1	6,7	0,0
VIII	9	98,3	88,3	63,9	31,1	6,7
IX	9	100,0	98,3	88,3	63,9	24,4
X	9	100,0	100,0	98,3	88,3	46,1
XI	9	100,0	100,0	100,0	98,3	62,2

TABLE 5.2 – Pourcentage d'endommagement pour chaque degré de dégâts en fonction du niveau d'intensité sismique, Piazza Archimede.

Sources : Plattard, O., 2017.

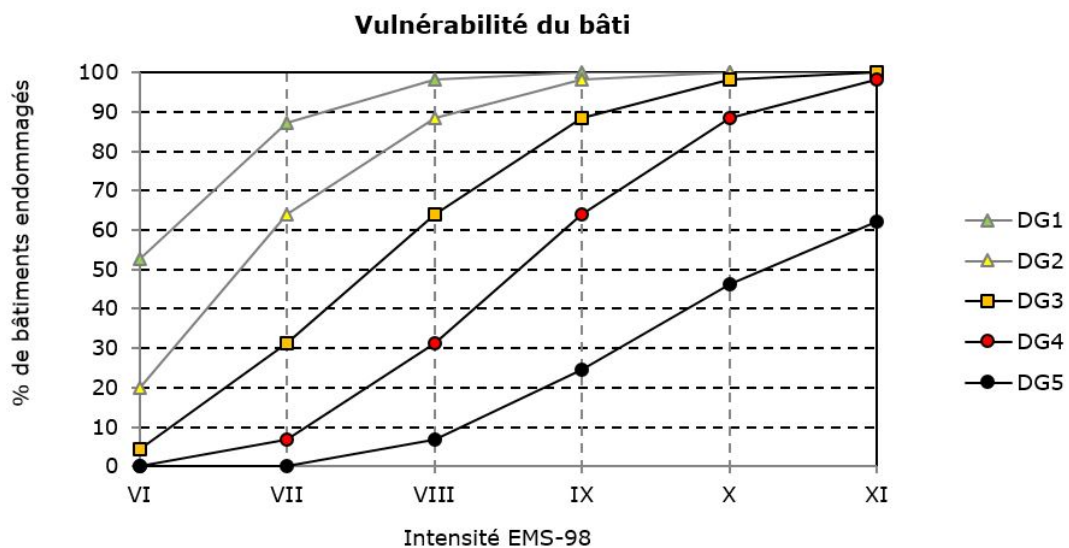


FIGURE 5.12 – Indication du pourcentage de bâtiments endommagés pour chaque degré de dégâts en fonction de l'intensité sismique EMS-98, pour l'ensemble des bâtiments de la Piazza Archimede.

Sources : Plattard, O., 2017.

Degré d'intensité	Nombre total de bâtiments	Degré de dégâts				
		DG1	DG2	DG3	DG4	DG5
VI	13	60	24,2	6,9	0,0	0,0
VII	13	92,3	72,7	41,5	10,4	0,0
VIII	13	98,8	93,1	72,7	41,5	10,4
IX	13	100,0	98,8	93,1	72,7	41,5
X	13	100,0	100,0	98,8	93,1	72,7
XI	13	100,0	100,0	100,0	98,8	65,4

TABLE 5.3 – Pourcentage d'endommagement pour chaque degré de dégâts en fonction du niveau d'intensité sismique, Piazza Duomo.

Sources : Plattard, O., 2017.

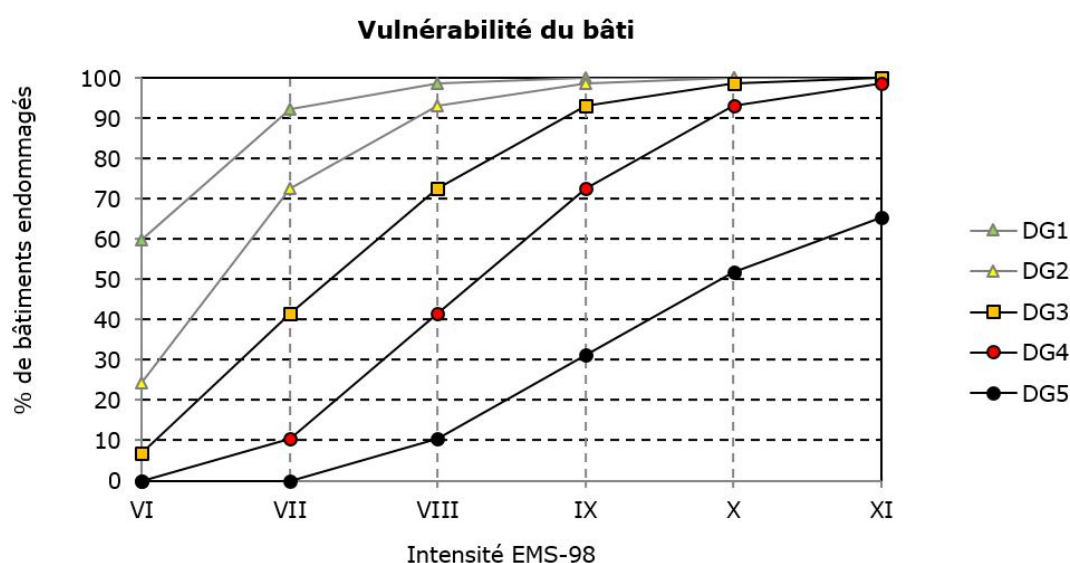


FIGURE 5.13 – Indication du pourcentage de bâtiments endommagés pour chaque degré de dégâts en fonction de l'intensité sismique EMS-98, pour l'ensemble des bâtiments de la Piazza Duomo.

Sources : Plattard, O., 2017.

Ces tableaux et graphiques retranscrivent les valeurs de pourcentage de bâtiments endommagés en fonction de l'intensité sismique EMS-98 et de leur degré de dégâts. Les indications pour les DG1 et DG2 ont été volontairement indiquées en grisé puisque l'effondrement devient problématique à partir de DG3. Nous remarquons d'ores et déjà que la Piazza Duomo obtient des pourcentages d'endommagement supérieurs d'une dizaine de points par rapport à la Piazza Archimede (Tables 5.2, 5.3 et Figures 5.12, 5.13). Cela s'explique notamment par le plus grand nombre de bâtiments de classe de vulnérabilité A autour de la Piazza Duomo.

De plus, nous observons sur ces résultats que le seuil de 50% d'endommagement de DG3 ou plus s'effectue dans les deux cas entre les intensités sismiques VII et VIII (Tables 5.2, 5.3 et Figures 5.12, 5.13). Ce seuil représente une chance sur deux pour une personne cheminant

sur l'espace de voirie de voir sa sécurité altérée par la chute de débris des constructions. De surcroît, le passage à plus de 50% d'endommagement de DG4 et DG5 s'effectue entre les intensités sismiques VIII et IX (Tables 5.2, 5.3 et Figures 5.12, 5.13). Cela sous-entend que le cheminement sur les espaces de voiries au pied de ces immeubles peut se retrouver obstrué par les débris liés à l'effondrement partiel ou total des constructions, remettant ainsi en cause les itinéraires d'évacuation le long de ces voies. Il convient cependant d'illustrer l'intensité EMS-98 dont il est question au regard des événements passés et des intensités sismiques relevées à Syracuse.

### 5.3.1 Conclusion quant à la praticabilité des itinéraires et à l'accessibilité des zones refuge à Syracuse

Afin d'obtenir un état des lieux de l'effondrement du bâti en fonction de sa vulnérabilité plus concret, l'étape suivante consiste donc à intégrer les données correspondant à un événement de référence à Syracuse. Pour cela, nous nous fondons sur le tremblement de terre de 1693 qui généra un tsunami (voir chapitre 2). Les événements plus récents comme 1908 et 1990 n'ont pas eu une intensité suffisante pour que cela ait un impact sur les constructions. A Syracuse, les intensités sismique s'élevaient respectivement à VI et V (Stucchi *et al.*, 2007; Locati *et al.*, 2016)<sup>6</sup>. L'épicentre du séisme de 1693 se situe à l'est, au large de Syracuse et fut d'une magnitude Mw.7,4. L'intensité sismique selon l'EMS-98 à Syracuse est estimée à IX (Stucchi *et al.*, 2007; Locati *et al.*, 2016)<sup>7</sup> (voir chapitre 1).

Ces plans des Piazza Archimede (Figure 5.14) et Piazza Duomo (Figure 5.15), pour une situation comparable avec le séisme de 1693, représentent donc la probabilité pour chaque bâtiment, en fonction de sa classe de vulnérabilité, de subir des dommages DG4 et DG5 pour une intensité sismique IX.

Une gamme de couleur de quatre valeurs permet de représenter la probabilité d'effondrement des constructions. Les valeurs sont échelonnées tous les 25%. Les hachures correspondant à cette probabilité sont signifiées pour le bâtiment ainsi que le périmètre d'emprise de son effondrement.

Ce qui ressort de ces plans est que la grande majorité des constructions subit des dommages de DG4 et DG5 dans plus de 50% des cas. Cela s'explique du fait que de nombreux bâtiments sont classés en vulnérabilité A ou B. Or, la mise en sécurité d'une personne et son cheminement ne peuvent être garanti sur un itinéraire où il y a plus d'une chance sur deux qu'il y ait un effondrement de bâti. Ces dommages remettent en effet en cause la sécurité de la personne mais surtout la praticabilité de l'itinéraire. Dans le cas d'un événement référence semblable à celui de 1693, il peut être conclu que l'accessibilité des deux zones refuge d'Ortigia que sont les Piazza Archimede et Piazza Duomo est très probablement compromise. En effet, dans près de 3/4 des cas, les places ne seront accessibles que par

6. bases de données consultées en février 2018.

7. base de données consultée en février 2018.

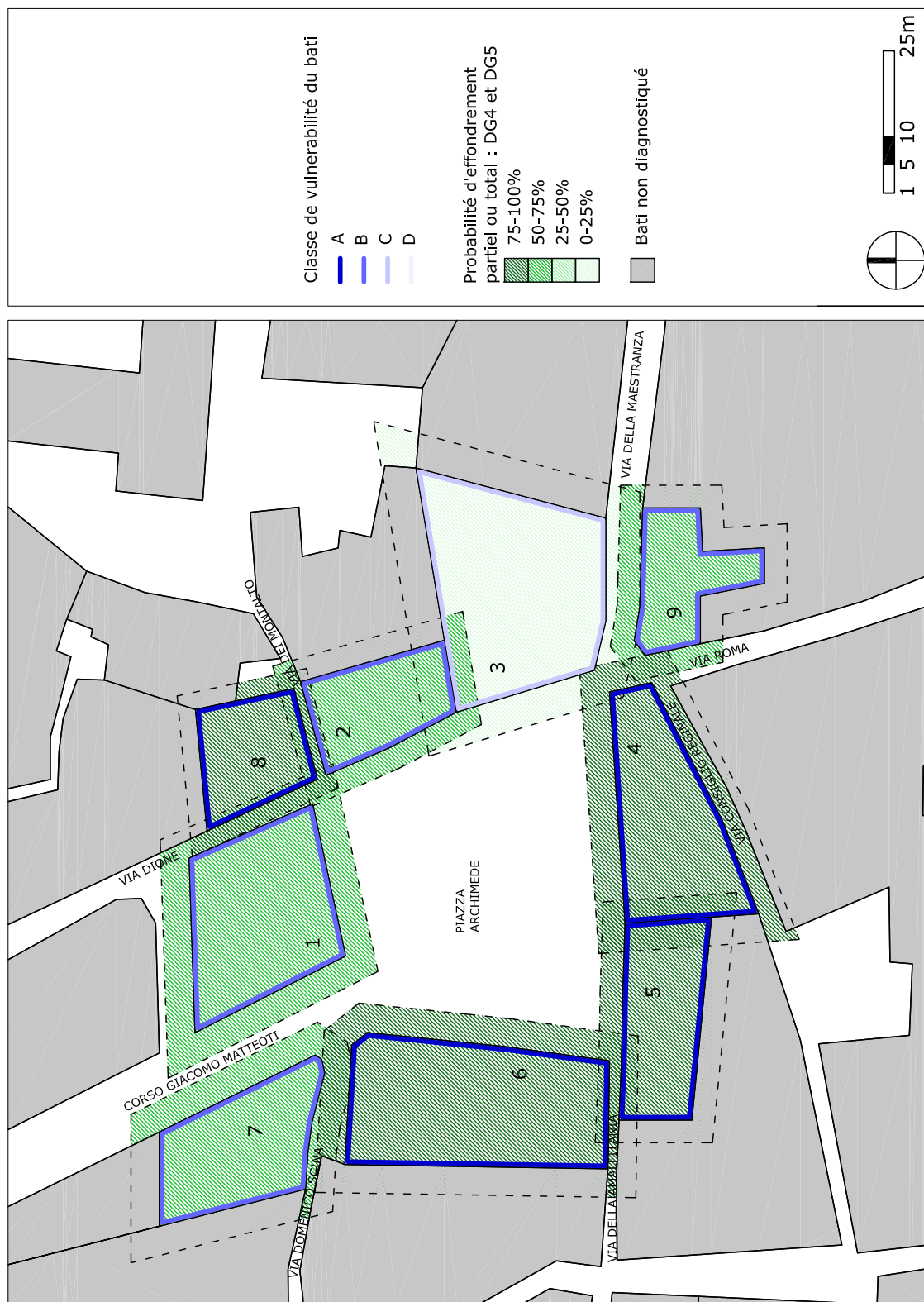


FIGURE 5.14 – Plan des bâtiments diagnostiqués avec indication de leur classe de vulnérabilité et de leur probabilité d'effondrement partiel ou total (DG4 et DG5) dans le cas du séisme de référence de 1693, Piazza Archimede.

Réalisation : Plattard, O., 2017.

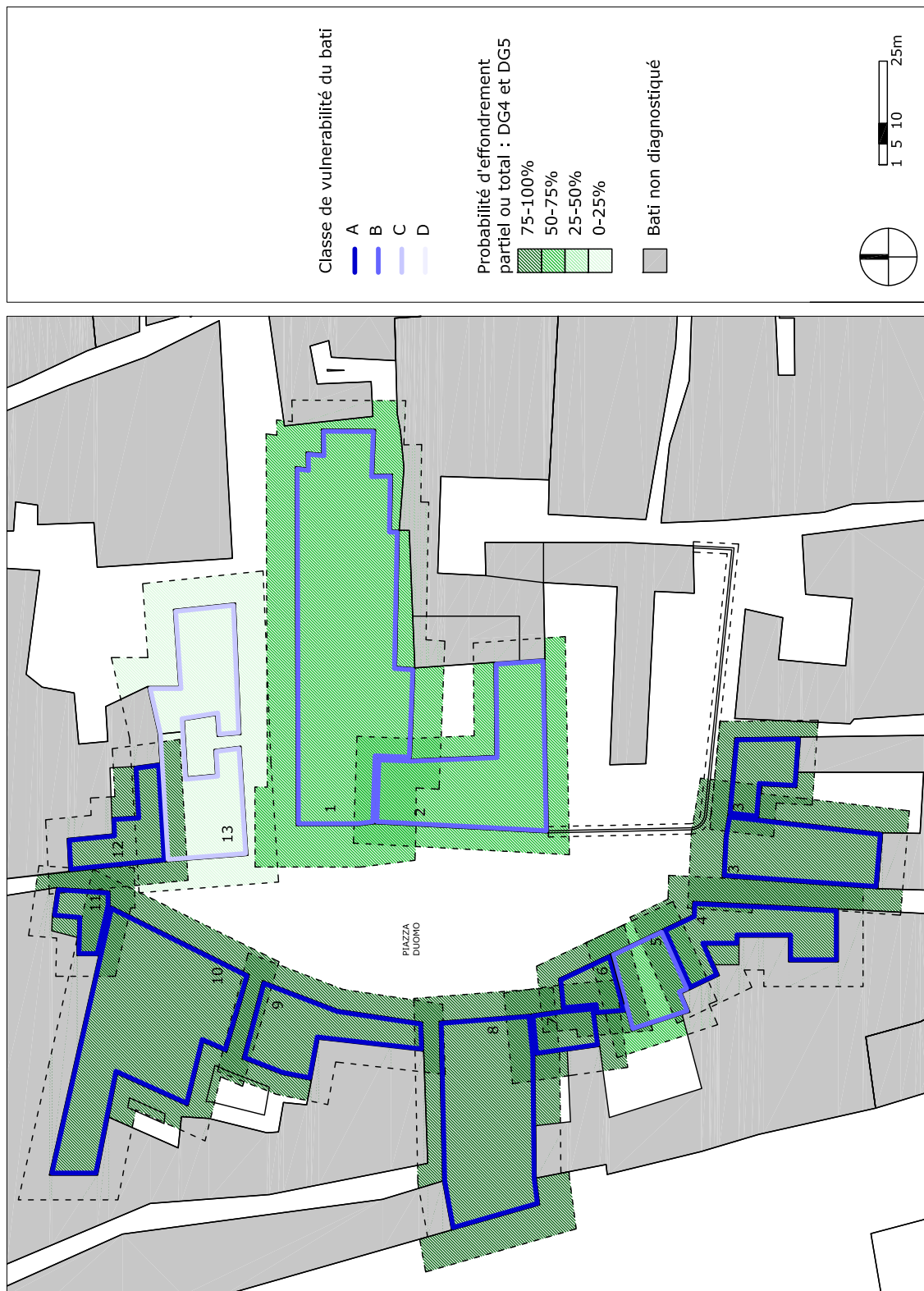


FIGURE 5.15 – Plan des bâtiments diagnostiqués avec indication de leur classe de vulnérabilité et de leur probabilité d’effondrement partiel ou total (DG4 et DG5) dans le cas du séisme de référence de 1693, Piazza Duomo.

Réalisation : Plattard, O., 2017.

une voie d'accès au lieu de tous les itinéraires proposés sur les plans d'évacuation (voir chapitre 3). Les quelques bâtiments de classe de vulnérabilité C, moins sujets à l'effondrement, ne peuvent garantir l'accessibilité aux zones refuge.

### 5.3.2 Vers l'intégration d'une probabilité d'effondrement des constructions dans le modèle STEP

Les résultats de la mise en place de classification de vulnérabilité du bâti des zones refuge que sont la Piazza Archimede et la Piazza Duomo dans le cadre d'une évacuation face à un tsunami (Lavigne, 2016), montrent que leur accessibilité et la sécurité tout au long de l'itinéraire ne peuvent pas être garanties dans le cas d'un évènement de référence tel que le séisme de 1693 à Syracuse.

La prise en compte de cette information dans le modèle STEP semble donc pertinente. Elle permet d'intégrer l'obstruction de l'espace public propice à l'évacuation. Elle enrichi donc les scénarios d'évacuation face à un tsunami en intégrant une variable pouvant remettre en cause des itinéraires jusqu'alors privilégiés.

Une variable de praticabilité est intégrée au modèle STEP (voir chapitre 6). Afin de définir la praticabilité de l'espace de voirie, une probabilité d'effondrement du bâtiment est mise en place, en observant la règle de l'emprise au sol d'un tiers la hauteur de la construction. Les zones subissant un effondrement sont alors impraticables dans le modèle, obligeant ainsi les agents à devoir trouver une alternative d'itinéraire pour atteindre la zone refuge.

Cette probabilité d'effondrement est en partie théorique bien que construite à partir du travail de terrain et des résultats de diagnostic effectué à Syracuse. En effet, afin d'obtenir une probabilité réelle pour un site d'étude, il est nécessaire de diagnostiquer un grand nombre de constructions afin, soit de réaliser un zonage de vulnérabilité exhaustif, soit d'avoir un panel suffisant pour extrapoler la vulnérabilité à l'ensemble d'un quartier pour des constructions similaires.

Par ailleurs, le premier modèle STEP est réalisé sur le site de Saint-Laurent-du-Var. La variable d'effondrement qui est implémentée ne peut pas se baser sur la vulnérabilité réelle de ce site. Tout d'abord parce que le diagnostic de vulnérabilité n'a pas été réalisé à Saint-Laurent-du-Var mais uniquement sur les deux zones refuge d'Ortigia à Syracuse. Mais également parce qu'à cela s'ajoute le fait que la grande majorité des constructions de Saint-Laurent-du-Var, notamment sur la zone du front de mer, a été réalisée en béton armé ou maçonnerie chaînée ce qui leur confère une classe de vulnérabilité supérieure aux constructions maçonnées de Syracuse. Il convient également de souligner que les évènements références envisagés sur Saint-Laurent-du-Var ne comprennent pas de secousses sismiques ressenties outre le cas de l'évènement de référence du séisme de Ligurie de 1887. Dans ce cas, le tremblement de terre d'une magnitude de Mw 6,3 a été défini d'une intensité sismique EMS-98 de VII. Or, à ce niveau d'intensité sismique, seules les constructions de classe de

vulnérabilité A subissent des dommages de DG4 pouvant remettre en cause la praticabilité de l'itinéraire.

Il est donc défini une probabilité d'effondrement théorique, basée sur le relevé de Syracuse et donc sur des classes de vulnérabilité de bâtiments allant de A à C. Cela permet également d'inclure une variable suffisamment significative dans le cas d'intensité importante pour remettre en cause le cheminement piéton vers les zones refuge du modèle.

Enfin, la variable d'effondrement concerne aléatoirement les bâtiments. En effet, l'attribution d'une classe de vulnérabilité pour chaque construction est envisageable mais ne vise pas la même démarche que celle de la praticabilité de l'itinéraire et de l'influence que peut avoir un effondrement sur le chemin d'un agent. La probabilité d'effondrement est donc la même pour tous les bâtiments, ce qui peut s'apparenter à tous les considérer de la même classe. Cependant, l'effondrement étant aléatoire, il n'est pas toujours question du même espace de voirie rendu impraticable puisque ce ne sont pas toujours les mêmes constructions effondrées.



### Conclusion

Chaque construction sollicitée par les ondes sismiques lors d'un tremblement de terre subit des dommages pouvant aller jusqu'à sa destruction totale. Ces dommages ont un impact sur la praticabilité de l'espace de voirie servant à l'évacuation face à un tsunami faisant suite à ces secousses sismiques. Il semble donc intéressant de mettre en place une méthode permettant de définir l'impact de la probabilité d'effondrement des bâtiments et d'obstruction de la voirie.

Afin de répondre à cette question de praticabilité de l'espace urbain, une analyse de la vulnérabilité sismique des constructions a été effectuée à Syracuse. Le diagnostic a été réalisé sur une sélection de bâtiments, et plus précisément ceux situés aux embouchures des voies de circulation sur les zones refuge que sont la Piazza Archimede et la Piazza Duomo. Ce diagnostic ciblé permet d'estimer la probabilité d'effondrement du bâti en fonction de l'intensité sismique. Suite au diagnostic, à chaque bâtiment fût attribué une classe de vulnérabilité. Cette dernière permet par la suite d'estimer le degré de dommages sous sollicitation sismique. Les constructions d'Ortigia sont en grande majorité anciennes et en maçonnerie. Elles sont classées en majorité A, c'est-à-dire qu'elles ont une grande vulnérabilité aux sollicitations sismiques ; sans compter le risque d'entrer en résonance élevé entre ces constructions rigides et le sol rocheux d'Ortigia.

Les résultats des diagnostics montrent que l'accès aux zones refuge est très compromis dans le cas d'un séisme de référence comme celui de 1693, estimé à une intensité sismique EMS-98 de IX. De manière plus générale, l'accès aux deux places de manière sécurisée n'est pas garanti à partir d'un degré d'intensité sismique EMS-98 de VII à VIII.

Suite à ces résultats, il semble important d'implémenter une variable de praticabilité dans le modèle STEP. Elle vise à définir une probabilité d'effondrement aléatoire en fonction de l'intensité sismique choisie. L'intégration de cette variable permet la prise en compte d'obstruction d'itinéraire visant la déviation et le choix d'un autre chemin par les agents lors de scénarios de fuite en cas de tsunami. Ainsi, l'apport de nouvelles données concernant l'évacuation et le choix d'itinéraire différents jusqu'à la zone refuge, permettrait de sortir d'une considération de plus court chemin et de cerner l'influence d'un évènement précurseur dans la bonne marche de l'évacuation.

Ce constat d'inaccessibilité des zones refuge amène finalement à penser qu'il faut d'autres solutions pour l'évacuation des populations. Pour cela il convient de définir des zones refuge hors de tout effondrement et inondation.

---

### LA CONSTRUCTION DU MODÈLE STEP

---

*“On peut tromper mille fois mille personnes, non non, on peut tromper une fois mille personnes, mais on ne peut pas tromper mille fois mille personnes. Non, on peut tromper une fois mille personnes mais on ne peut pas tromper mille fois une personne. Non...  
On peut tromper une personne mille fois. On peut tromper mille personnes une fois.  
Mais on ne peut pas tromper mille personnes, mille fois.”*  
Berberian A., 1994, *La Cité de la peur*<sup>1</sup>.

Il est difficile de recréer une situation d'évacuation de population en cas de catastrophe majeure comme un tsunami, tel un exercice grandeur nature d'évacuation d'une plage, et de demander aux personnes se trouvant dans la zone de fuir. Même si les exercices d'alerte existent aujourd'hui, ils concernent souvent des procédures d'évacuation en cas d'incendie ou de confinement dans un bâtiment en cas de pollution industrielle. Dans le cas d'un évènement majeur comme un tsunami, le territoire à évacuer est d'une grande superficie et la répétition de ces exercices plusieurs dizaines ou centaines de fois ne semble pas envisageable et réaliste.

L'approche par modélisation permet la répétition de scénarios d'un évènement, afin d'en observer les dynamiques. La modélisation permet de représenter un système et ses mécanismes. En effet, comme le spécifie Haggett (1965), *"un modèle est une représentation simplifiée de la réalité en vue de la comprendre ou de la faire comprendre"*. Qu'elle soit prédictive ou non, la modélisation peut chercher à expliquer et/ou comprendre un système (Banos et Sanders, 2013). Un état des lieux des différentes échelles de modélisation statiques et dynamiques est réalisé dans ce chapitre. Il permet d'appréhender les niveaux de

---

1. Citation d'origine d'Abraham Lincoln : *"You can fool some of the people all the time and all the people some of the time but you cannot fool all the people all the time"*.

granularité des modèles macros, mésos et micros. Chacun d'entre eux permet de s'adapter au contexte et aux questions de recherche liés au système modélisé, et notamment dans le domaine des risques majeurs.

Cet état des lieux permet de poser le cadre d'une modélisation hybride privilégiée dans le cas du modèle STEP (Séisme Tsunami Evacuation Population). La modélisation multi-agents, les automates cellulaires et l'implémentation des SIG viennent ici comme outils appropriés pour répondre aux deux problématiques majeures soulevées pendant cette thèse. Permettant de mettre en place un modèle complexe basé sur les données existantes et la combinaison de plusieurs mécanismes de modélisation, la création de plusieurs scénarios d'évacuation en milieu urbain est rendue faisable, afin de comprendre l'influence de cet environnement sur les choix de la population.

La construction du modèle STEP est exposée dans la seconde partie de ce chapitre. Elle permet d'évoquer les différentes entités et leurs mécanismes implémentés dans le modèle STEP sur la commune de Saint-Laurent-du-Var.

## 6.1 La mise en place d'un modèle

La modélisation se révèle être un outil privilégié dans le domaine de la prévention des risques, que ce soit à travers l'utilisation de modèles prédictifs ou descriptifs. Il peut être distingué plusieurs types de modélisations. Drogoul *et al.* (2008) nous rappelle qu' "*un modèle est appelé statique quand il a pour propos la représentation de la structure d'un système de référence photographié à un instant donné, sans allusion à son évolution dans le temps. Inversement, un modèle sera appelé dynamique quand il inclura dans sa représentation des hypothèses ou des règles concernant l'évolution dans le temps du système de référence*". De plus, Mathian et Sanders (2014) précisent que "*les approches sta(tis)tiques et dynamiques peuvent être considérées comme complémentaires plutôt que concurrentielles*". Cependant, nous nous attachons dans cette sous-partie à respecter cette différenciation entre les modèles statiques et dynamiques, incluant également au sein du second type, les différents niveaux de granularité de modélisation.

### 6.1.1 Modèles statiques

La première catégorie concerne les modèles statiques. Ces derniers, à travers l'utilisation de données statistiques et/ou géographiques permettent la modélisation de l'état d'un système à un instant T. Cette photographie descriptive n'est donc pas évolutive dans le temps, mais rend compte d'un état du système étudié à un niveau et à un moment donné (Mathian et Sanders, 2014).

Ce type de modélisation peut être utilisé dans le domaine des risques majeurs, notamment en matière de prévention et de la gestion de l'évacuation. Il est possible de modéliser un évènement afin de définir un zonage, notamment dans le cas d'une inondation ou d'un évènement submersif – comme pour la mise en place de Plan de Prévention des Risques Naturels ou Inondation –. C'est par exemple le cas sur la région niçoise avec le travail réalisé sur le tsunami de 1979 de l'aéroport de Nice sur la commune d'Antibes par Sahal et Lemahieu (2011); Sahal (2011) (Figure 6.1). A travers la modélisation de l'inondation du tsunami de 1979, ce travail a porté sur la comparaison avec d'autres modélisations du même évènement réalisées suivant d'autres méthodes, par d'autres chercheurs (Labbé *et al.*, 2010). Cette modélisation de l'évènement avait pour objectif la mise en place de cartes d'évacuation sur le site d'étude, via une modélisation des plus courts chemins distance/temps pour évacuer jusqu'à des zones refuge sélectionnées (Sahal, 2011). Cette seconde étape fut l'objet d'une macro simulation et est détaillée ci-après.

De plus, ces modélisations ont pour objectif la mise en place de plans d'évacuation en se basant sur l'utilisation des SIG et de graphes de plus courts chemins, notamment en terme de distance et de temps de parcours. C'est l'approche développée par Peroche (2016) qui propose une méthode par intégration de multiples couches d'informations géo-référencées

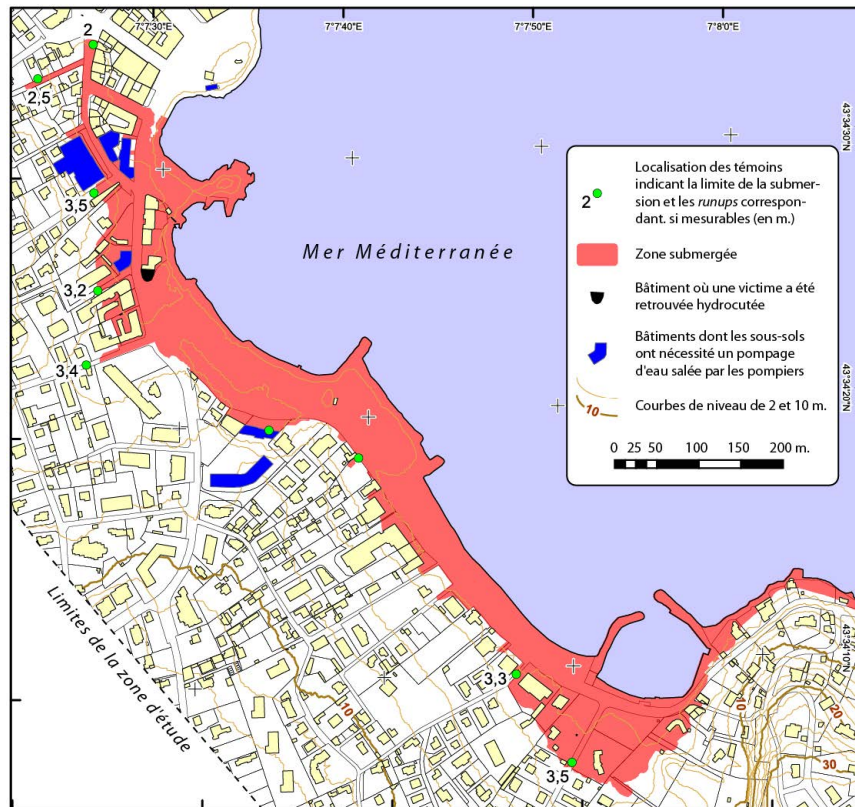


FIGURE 6.1 – Limites de la submersion marine consécutive à l’effondrement du terre-plein de l’aéroport de Nice du 16 octobre 1979 et hauteurs de l’inondation correspondantes dans les quartiers de La Salis et du Ponteil, à Antibes, France.

Sources : Sahal et Lemahieu (2011); Sahal (2011).

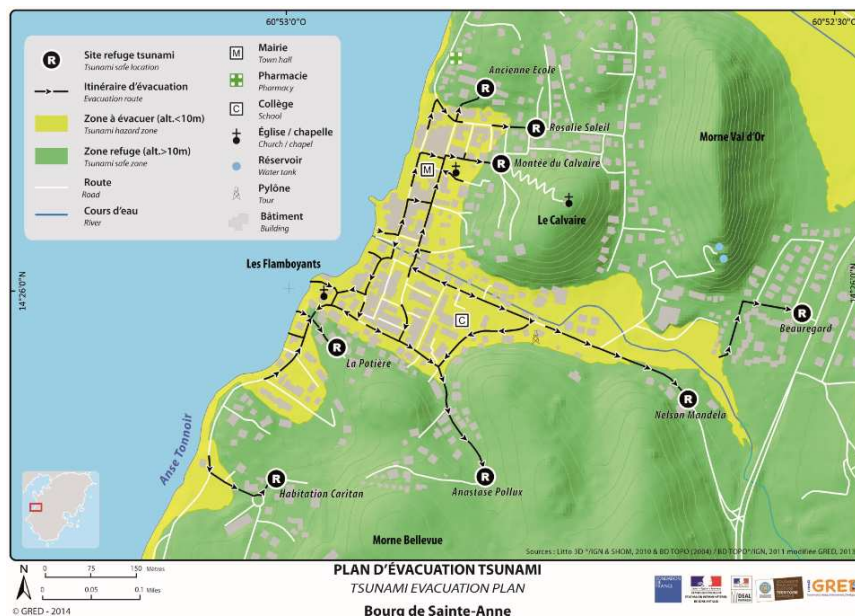


FIGURE 6.2 – Extrait du référentiel national proposé pour les plans d’évacuation en cas d’alerte tsunami après validation par les autorités locales, bourg de Sainte-Anne, Guadeloupe, France.

Sources : Peroche (2016).

au sein d'un SIG qui lui permet, après traitements, de créer des cartes de synthèse pour l'aide à la décision et à la planification. Il s'agit ici d'un état des lieux des dispositifs et de l'exposition au tsunami, afin d'identifier des zones refuge et de rechercher l'itinéraire optimum en terme de distance/temps pour les atteindre, et également de déterminer une signalétique et des plans d'évacuation du territoire (Figure 6.2). La population et ses caractéristiques sont donc considérées de manière homogènes et la dynamique de l'évacuation n'est pas ici l'objet étudié.

### 6.1.2 Modèles dynamiques

La seconde catégorie de modélisation concerne les modèles dynamiques. Contrairement aux modèles statiques, ces modèles dynamiques sont la représentation d'un système et de son évolution dans le temps (Drogoul *et al.*, 2008). Ces modèles s'attachent à représenter les règles et processus d'évolution d'un système. En géographie, trois niveaux de granularité de modélisation sont à distinguer : les modèles macroscopiques, mésoscopiques et microscopiques.

#### Modèles macroscopiques

La modélisation à l'échelle macroscopique implique des modèles mathématiques ou agrégés. Cette échelle sous-entend un traitement des hypothèses d'évolution du système selon des règles plus globales que dans les autres types de modélisations dynamiques. Cette modélisation agrégée permet donc de décrire l'évolution dans le temps d'une population d'individus ayant des caractéristiques particulières, et non l'évolution des individus eux-mêmes (Corson et Olivier, 2015). En effet, les modèles à équations différentielles intègrent moins d'hétérogénéité et moins de souplesse dans les interactions spatiales (Banos et Sanders, 2013).

Les modèles macros peuvent être utilisés pour des simulations de phénomènes globaux sur un large territoire (Reulier, 2015). Dans le domaine des risques majeurs, ils sont présents dans la modélisation de phénomènes physiques (ruissellement, inondation...) ou de dynamiques de population ou d'évacuation. Des modélisations de dynamique de tsunami existent comme le modèle TUNAMI, qui a été développé au Japon (Imamura *et al.*, 2006) (Figure 6.3), ou le modèle de tsunami en Méditerranée du CEA (Gailler *et al.*, 2013, 2016) (Figure 6.4). Il s'agit ici de générer une onde de tsunami et de suivre son comportement de propagation. Cela permet notamment de déterminer un délai de diffusion et donc d'arrivée sur la côte, ainsi que la hauteur d'inondation à envisager.

De plus, ces modélisation agégées peuvent être utilisées afin d'étudier des dynamiques de population, notamment lors d'évacuation. Ces types de modélisation simulent les dyna-

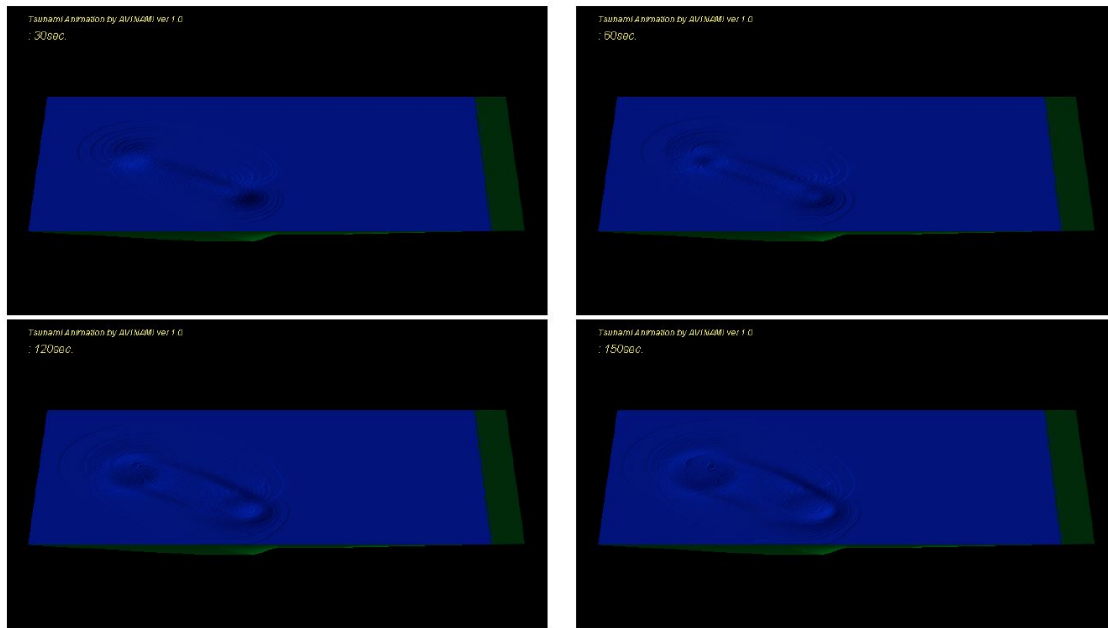


FIGURE 6.3 – Exemple d’initialisation et propagation de l’eau selon le modèle TUNAMI, paramètres AVINAMI.

Sources : Imamura *et al.* (2006).

miques globales de la population sans prendre en compte la singularité du comportement individuel. On peut citer le travail de Provitolo *et al.* (2015) qui modélise de manière conceptuelle et mathématique différentes « séquences » de comportements humains collectifs susceptibles de se produire lors d’un évènement catastrophique. Ce modèle permet donc de tirer des informations sur la dynamique globale de l’évacuation de la population sans prise en compte de la diversité des comportements humains et d’éventuels effets dominos.

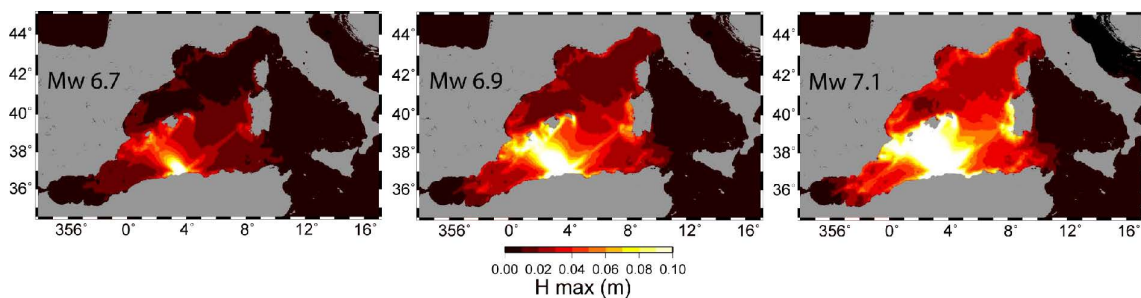


FIGURE 6.4 – Exemple de modélisation des hauteurs maximum de vagues de tsunami obtenues à partir de trois scénarios pour un même évènement, en prenant en compte une magnitude approximative de  $\pm 0.2$  (après trois heures de propagation).

Sources : Gailler *et al.* (2013).

Enfin, la modélisation statique peut être couplée avec une modélisation dynamique comme dans le cas du travail de Sahal (2011). L’utilisation de macro-simulateur, comme

Evacuation Route Tools, a permis à l'auteur de définir les itinéraires optimum d'évacuation à partir de dynamiques de population globale (Figure 6.5). Cependant, ces itinéraires sont optimisés en termes de distance par rapport au temps de parcours au long d'un itinéraire jusqu'à une zone refuge, sans tenir compte de caractéristiques de comportement individuel et d'interactions entre les personnes évacuantes.

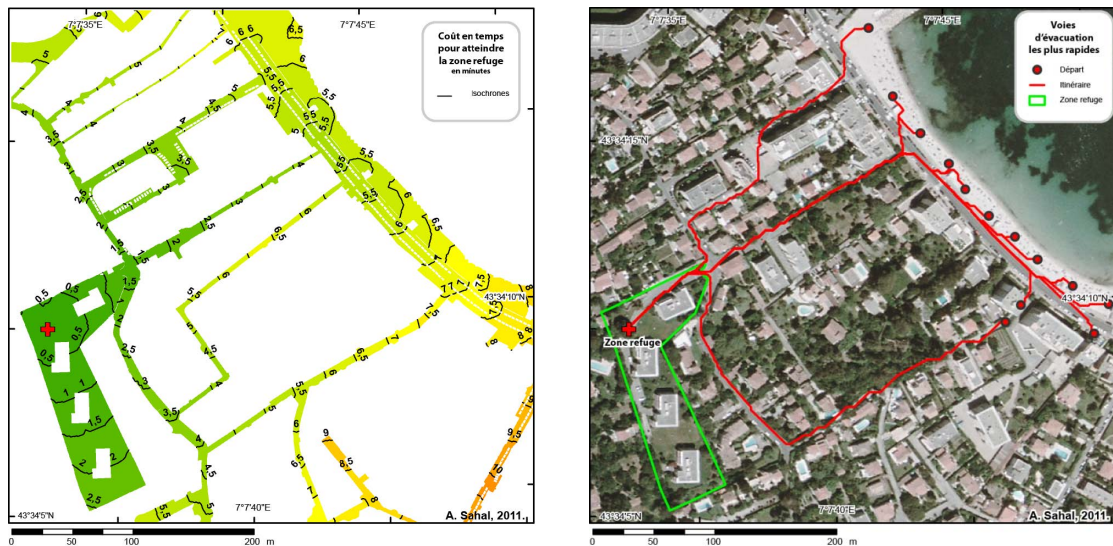


FIGURE 6.5 – Accessibilité de la zone refuge et exemples de voies d'évacuation optimales selon le macro-simulateur Evacuation Route Tools dans le quartier de La Salis, à Antibes, France.

Sources : Sahal (2011).

### Automates cellulaires

La modélisation à un niveau de granularité mésoscopique implique les automates cellulaires. Ces modèles spatialisés sont, comme leur nom l'indique, constitués d'une matrice cellulaire. Il s'agit d'un ensemble de cellules évolutives qui interagissent entre elles (Reulier, 2015). Comme le définit Langlois (2010), un automate cellulaire est comme *"une machine formelle ou technologique qui permet de représenter un système spatio-temporel avec une dynamique en général discrète. Un automate cellulaire est lui-même un système dont les composants sont appelés des cellules. Chaque cellule est un automate (le plus souvent à nombre fini d'états) qui est connecté à d'autres cellules (ses voisines) formant ainsi un réseau d'automates"*.

Les automates cellulaires peuvent être résumés par cinq éléments les composant (Langlois, 2007; Douvinet, 2008) :

- un espace discrétisé en une matrice cellulaire (linéaire, surfacique ou volumétrique),
- chacune des cellules contient une valeur d'attribut extraite d'un ensemble discret d'états possibles,



- un fonctionnement itératif, approche temporelle discrète,
- des règles de transition pour passer d'un état à un autre,
- des règles de voisinage impactant directement les règles de transition.

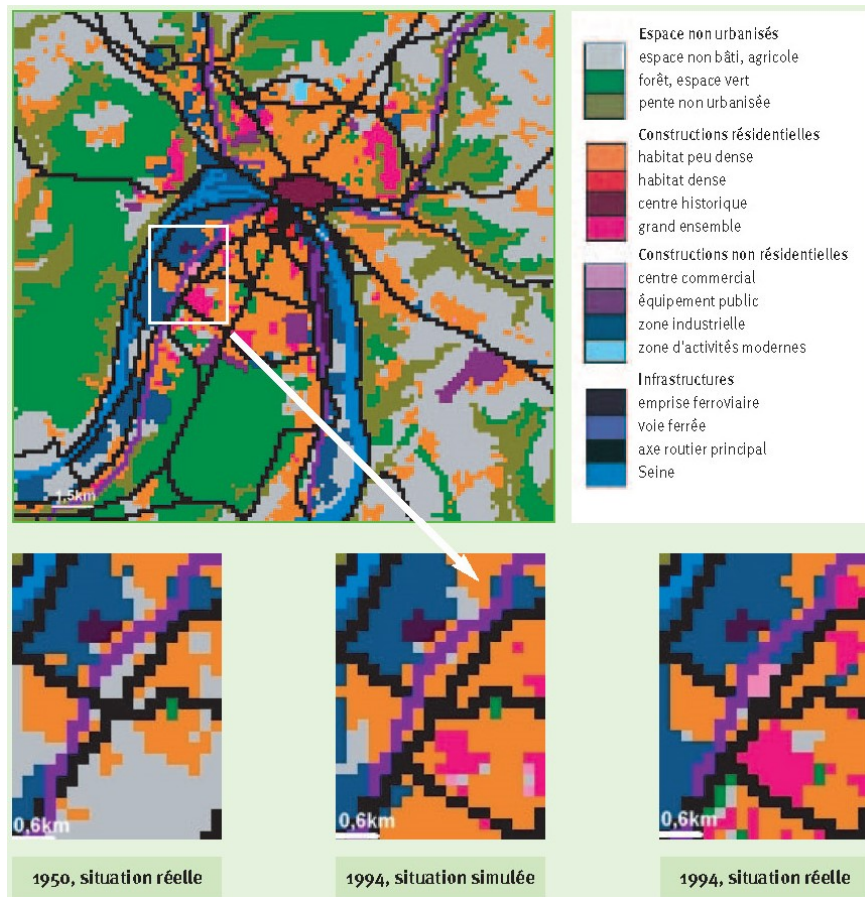


FIGURE 6.6 – Vue générale et zoom de SpaCelle pour comparaison de l'évolution entre le cas simulé et les données d'évolution réelle de l'agglomération rouennaise.

Sources : Dubos-Paillard *et al.* (2003).

Dans un modèle d'automate cellulaire, chaque cellule évolue donc d'un état à un autre, en fonction de ses attributs et de son voisinage. Le modèle du jeu de la vie (Gardner, 1970) est emblématique du fonctionnement des automates cellulaires (Mathian et Sanders, 2014). Dans cet automate, chaque cellule a deux états possibles : soit vivante, soit morte. Chaque cellule, en fonction de son voisinage peut "naître", rester vivante ou mourir. Ces trois règles de transition simples amènent cependant à l'émergence d'une multitude de configurations spatiales et temporelles. Ce mécanisme des automates cellulaires, faisant dépendre le changement d'un lieu (la cellule) en fonction de l'état des lieux des cellules voisines, permet de répondre à des hypothèses d'évolution d'espaces géographiques (Mathian et Sanders, 2014). C'est par exemple le cas du modèle SpaCelle (Dubos-Paillard *et al.*, 2003), concernant l'évolution urbaine de l'agglomération rouennaise de 1950 à 2000. Chaque cellule fait partie d'un type d'occupation du sol auquel correspondent des attributs et des règles pour

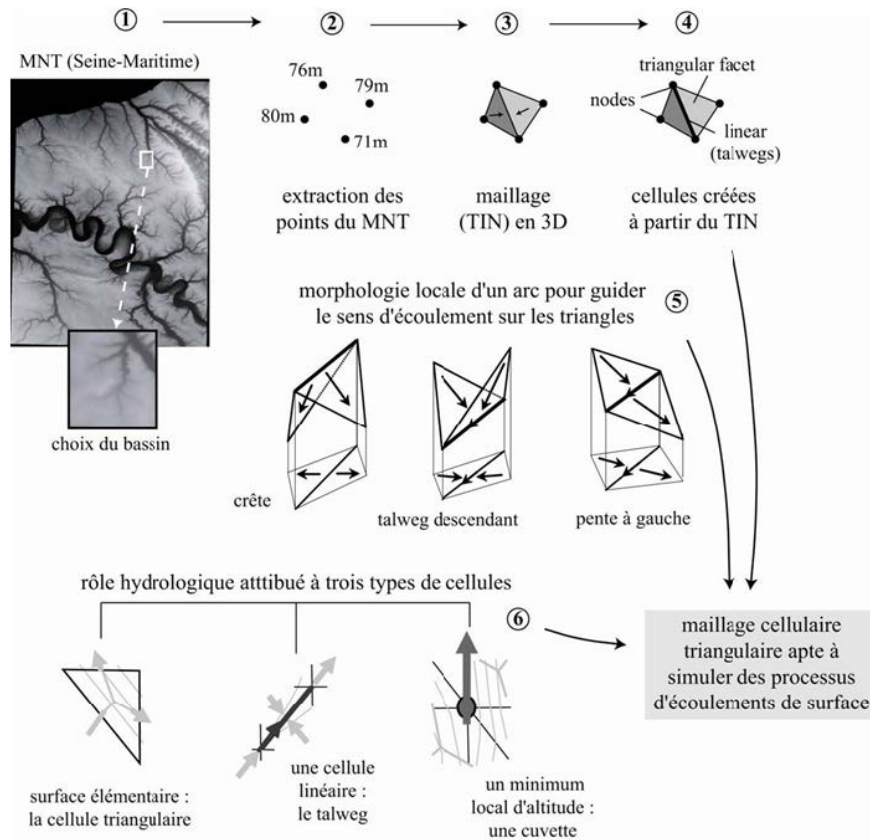


FIGURE 6.7 – Construction du maillage de cellules triangulaires de l'automate RuiCells. Sources : Douvinet (2008) d'après Langlois et Delahaye (2002).

chaque état. Ce modèle a été validé par confrontation avec la dynamique réelle d'évolution de l'agglomération et a permis de réaliser des simulations de différents scénarios d'aménagement (Langlois, 2010) (Figure 6.6).

Des modélisations par automates cellulaires sont également utilisées dans le domaine des risques, comme pour l'étude de l'érosion ou du ruissellement. Par exemple, le modèle RuiCells simule des phénomènes de crues turbides intenses et des coulées de boues dans les bassins versants (Langlois et Delahaye, 2002; Langlois, 2010; Douvinet, 2008). Une des particularités de l'automate RuiCells est sa structure en maillage triangulaire (Figure 6.7). Cela permet de créer des liens d'écoulement entre cellules à partir des éléments du graphe topologique, c'est-à-dire qu'à chaque itération, les données transitent de cellule en cellule sur la base des axes d'écoulement du graphe (Delahaye, 2005; Douvinet, 2008; Reulier, 2015). Cette modélisation permet à travers les données de sorties de simulation d'analyser *"la part de chaque variable de forme (deux ou trois dimensions (si on intègre la pente)) et ainsi de mieux caractériser le rôle de la morphologie dans la réponse hydrologique du bassin"* (Delahaye, 2005).

Les automates cellulaires permettent donc de mettre en avant des processus évolutifs

qui engendrent la configuration ou la structure à laquelle on s'intéresse (Banos et Sanders, 2013). En cela, les automates cellulaires et les systèmes multi-agents ont un fonctionnement proche puisqu'ils sont constitués d'un ensemble d'entités et d'états régis par des règles de transition.

### **Systemes multi-agents**

Le niveau de granularité microscopique est notamment constitué des systèmes multi-agents. Ces derniers, comme leur nom l'indique, permettent une formalisation d'interactions locales entre des agents et leur environnement (Ferber, 1995). La définition d'un modèle multi-agents peut être synthétisée en quatre notions fondamentales (Occello *et al.*, 2001; Bouquet *et al.*, 2015) :

- Les agents : ensemble des entités actives du système disposant d'un comportement propre.
- L'environnement : milieu où évoluent les agents, souvent spatialisé, sa structure dépend du domaine d'application.
- Les interactions : ensemble des langages et des protocoles d'échanges entre les agents.
- L'organisation : ensemble des regroupements des agents au sein d'entités fédératrices où le but est commun à tous les agents.

L'agent apparait donc comme l'élément central constitutif de ce type de modélisation individu-centrée. Il est en capacité d'interagir selon des règles avec son environnement, et également avec les autres agents du modèle. Les propriétés minimales dont dispose un agent pour être considéré en tant que tel peuvent être résumées selon ces quatre caractéristiques (Wooldridge, 1997; Bouquet *et al.*, 2015) :

- L'autonomie : capacité à évoluer selon un comportement propre sans intervention de l'extérieur.
- La réactivité : capacité à réagir en fonction d'événements extérieurs.
- La proactivité : capacité à prendre des décisions de manière plus ou moins élaborée afin d'accomplir des objectifs.
- La sociabilité : capacité à interagir avec d'autres agents.

L'approche individu-centrée est largement utilisée dans la modélisation de comportements ou d'évacuation de population en cas de catastrophe. Les systèmes multi-agents sont en effet de bons outils pour l'étude de l'organisation de l'espace géographique et des dynamiques qui y sont observables (Daudé, 2013). Cependant, en fonction des problématiques posées – de territoire, de transport, d'itinéraire, de population –, les modèles multi-agents n'ont pas les mêmes caractéristiques et degrés de granularité.

A travers le modèle Toxi-city, les effets de la configuration urbaine et de la connaissance du risque sur le taux de survivants lors de la diffusion d'un nuage toxique ont été

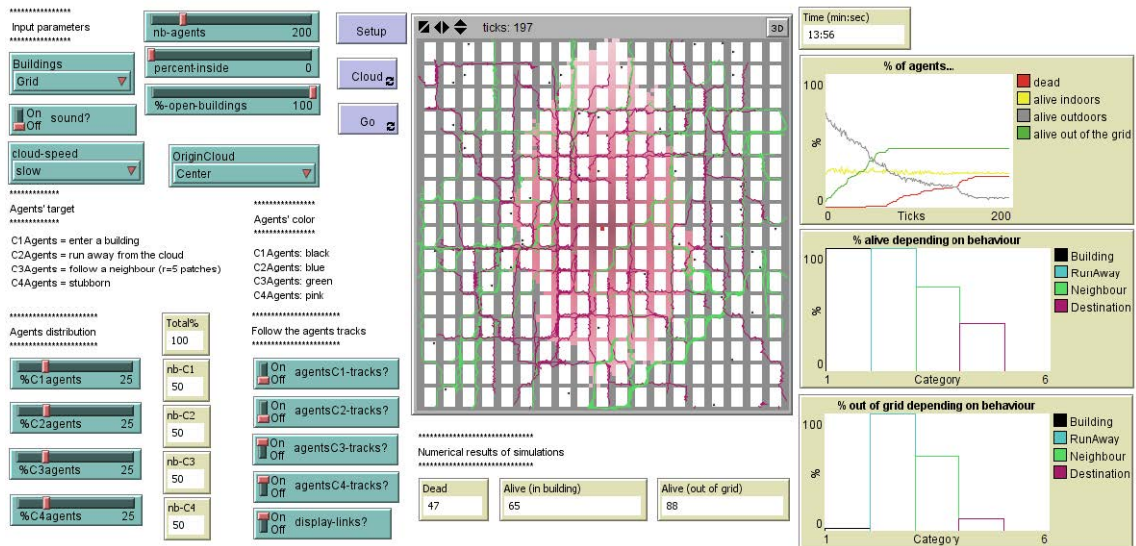


FIGURE 6.8 – Vue de l’interface du modèle Toxi-city pour un scénario avec une grille spatiale régulière.

Sources : Salze *et al.* (2014).

étudiés (Salze *et al.*, 2014). L’environnement du modèle se base sur un fichier SIG, mais propose cependant d’y ajouter une configuration spatiale, au choix régulière ou aléatoire (Figure 6.8). Les agents se répartissent sous quatre types qui sous-entendent des règles d’évolution différentes. Deux choix peuvent être fait à l’initialisation concernant les agents que sont leur vitesse (coureur ou marcheur) et leur localisation (intérieur ou extérieur d’un bâtiment). Les agents se déplacent sur les cellules de l’environnement et pas sur des segments de graphe de réseau. Une troisième entité est le nuage toxique qui se propage à une vitesse donnée dans le scénario. A travers les différents scénarios, ce modèle permet d’analyser des résultats sur le lien entre les types de comportements des agents et le nombre de victimes ou encore l’influence de la morphologie urbaine choisie. Les résultats sont donc révélateurs de dynamiques et d’influences à différents niveaux.

Par sa capacité à modéliser des systèmes complexes de façon maléable en fonction du contexte, de la connaissance du système réel et de la question scientifique posée (Banos *et al.*, 2015), l’approche multi-agents est un outil privilégié dans les problématiques liées à l’évacuation des populations en cas de tsunami. Comme le rappelle Mas *et al.* (2015), depuis le modèle de Usuzawa *et al.* (1997) concernant l’évacuation de la population lors du tremblement de terre d’Hokkaido en 1993 – sur un graphe du réseau routier –, de nombreux modèles ont été réalisés sur les problématiques d’évacuation de la population (Sugimoto *et al.*, 2003; Clerveaux *et al.*, 2008; Sahal, 2011; Dewi, 2012; Wood et Schmittlein, 2012; Gonzalez-Riancho *et al.*, 2013). L’utilisation de la modélisation multi-agents permet de définir des actions et comportements variés pour les agents, tout en générant des situations d’encombrement et de foule (Helbing *et al.*, 2005; Helbing et Balmelli, 2011). C’est pourquoi,

de nombreux modèles mettent en avant, dans le contexte de l'évacuation face à un tsunami, les problématiques liées à la foule (Imamura *et al.*, 2001; Fujioka *et al.*, 2002; Lämmel *et al.*, 2010; Mas *et al.*, 2012c,b,a; Nguyen *et al.*, 2012; Takagi *et al.*, 2014), ou liées aux modes de transport (Imamura *et al.*, 2001; Fraser *et al.*, 2014; Leon et March, 2014; Murakami *et al.*, 2012).

Certains modèles multi-agents d'évacuation de population en cas de tsunami sont implémentés avec un réseau sous forme de graphe sur lequel se déplacent les agents (Imamura *et al.*, 2006; Mas *et al.*, 2012a; Nguyen *et al.*, 2012; Czura *et al.*, 2015). C'est le cas notamment de Mas *et al.* (2012a) qui ont mis en place un modèle d'évacuation sur le quartier de La Punta au Pérou, avec une problématique axée sur l'exploration du comportement humain en cas d'évacuation (Figure 6.9). Le tsunami est implémenté à partir du modèle macro TUNAMI (Imamura *et al.*, 2006) et l'environnement à partir d'une base SIG. Cette évacuation considère des agents piétons et des véhicules et un agent correspond à une famille de quatre personnes. Le déplacement s'effectue sur les segments d'un réseau sous forme de graphe et la dynamique d'évacuation est de rejoindre la zone refuge par le chemin le plus court en distance. La principale analyse des résultats de ce modèle révèle la nécessité de combiner des évacuations verticale et horizontale pour une évacuation la plus efficace possible (voir chapitre 3).

Une autre modélisation multi-agents d'évacuation en cas de tsunami est celle de Nguyen *et al.* (2012), concernant le littoral de Nha-Trang au Vietnam et l'analyse du comportement humain face à l'alerte et aux indications durant le déplacement (Figure 6.10). Un plus grand nombre de caractéristiques définissent les agents qui peuvent être meneur ou suiveur, qui vont se répartir différemment en fonction des heures de la journée et qui vont se déplacer sur les segments et nœuds du réseau de voirie. De plus, une alerte est diffusée et des indications sont disposées à certains endroits des itinéraires. Les résultats des simulations donnent notamment le délai entre le moment de départ et l'arrivée aux zones refuge, afin de déterminer l'influence des indications et des deux groupes d'agents – en fonction de la proportion de meneurs et de suiveurs – sur le délai de mise en sécurité.

Enfin, la modélisation multi-agents peut également avoir un rôle d'outil d'aide à la décision ou de sensibilisation de la population aux risques majeurs (Bécu *et al.*, 2015). Pour aller plus loin, l'utilisation de modèles multi-agents peut devenir participative, c'est-à-dire d'intégrer des participants ou acteurs au modèle. S'apparentant au jeu sérieux, il s'agit dans ce cas de faire interagir des acteurs/utilisateurs autour d'une simulation (Bécu *et al.*, 2015).

C'est le cas, par exemple, du modèle SPRITE (Adam *et al.*, 2016; Taillandier *et al.*, 2017), modèle de simulation participative pour la sensibilisation au risque de submersion marine sur l'île d'Oléron (Figure 6.11). L'acteur est ici à la place d'un décideur politique ayant en charge la gestion territoriale de l'île. Le modèle contient quatre types d'agents : Parcelle, Territoire, Joueur et Habitant. Les agents Parcelle et Territoire sont géographiques

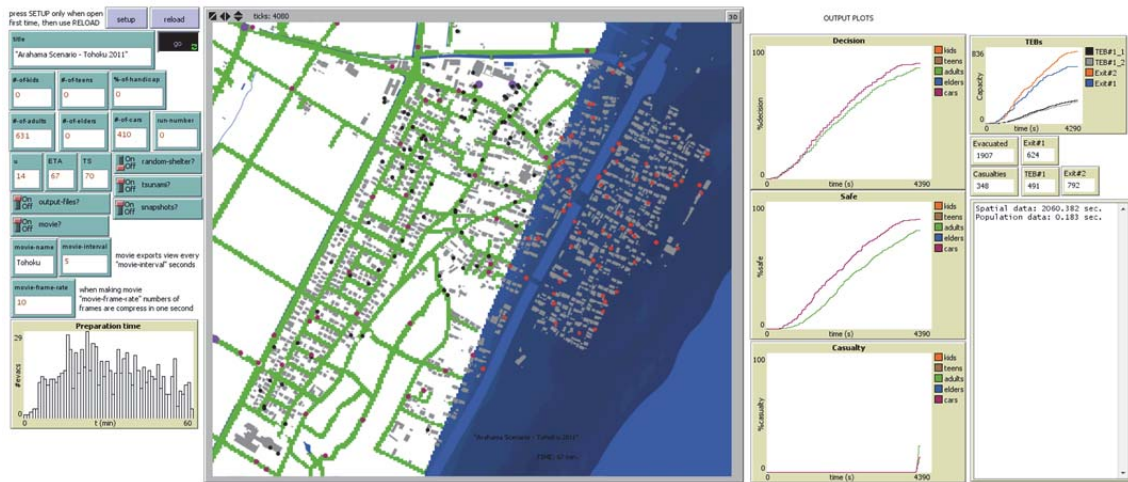


FIGURE 6.9 – Vue de l’interface du modèle GUI of TUNAMI-EVAC1 d’évacuation en cas du tsunami.

Sources : Mas *et al.* (2012a).

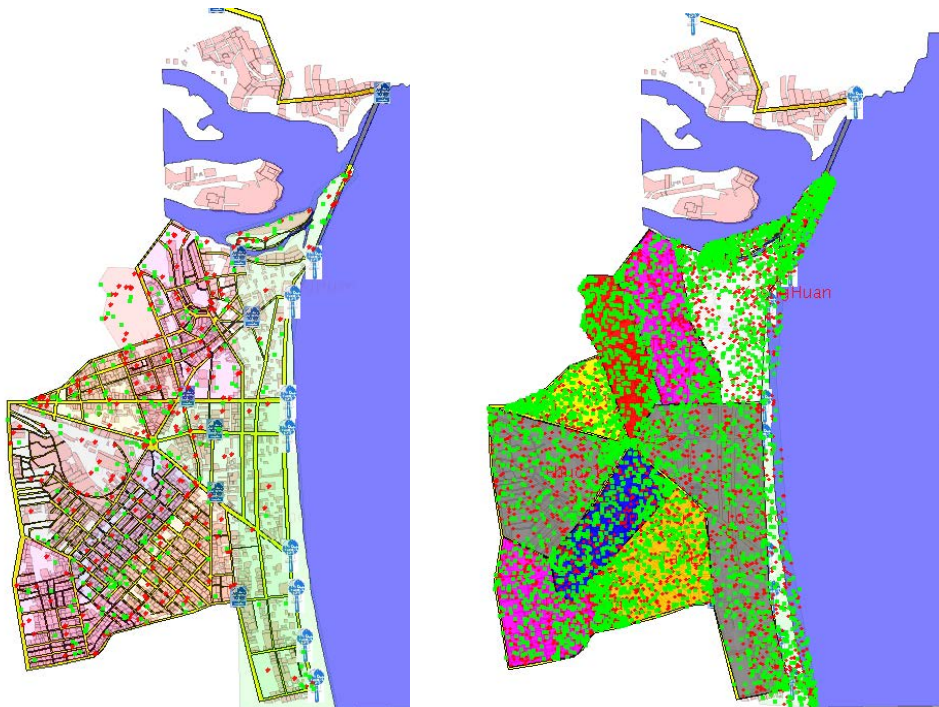


FIGURE 6.10 – Vues de la simulation avec, à gauche, le réseau de voirie et les indications d’évacuation et, à droite, répartition de la population en agents meneurs (en rouge) et en agents suiveurs (en vert).

Sources : Nguyen *et al.* (2012).



et constituent l'environnement de jeu. L'agent Habitant est autonome et dispose de règles évolutives à chaque itération. Le joueur peut prendre des décisions en fonction des informations des autres agents du modèle. A chaque pas de temps, il peut décider de la politique de prévention des risques à mener sur son territoire jusqu'à la survenance d'un évènement de submersion marine. En fonction de l'impact de cette submersion, il peut ensuite renouveler ses choix ou revoir sa politique. Cette simulation participative permet donc, de manière ludique et concrète, de mesurer les effets des choix menés en gestion des risques de submersion sur un territoire.

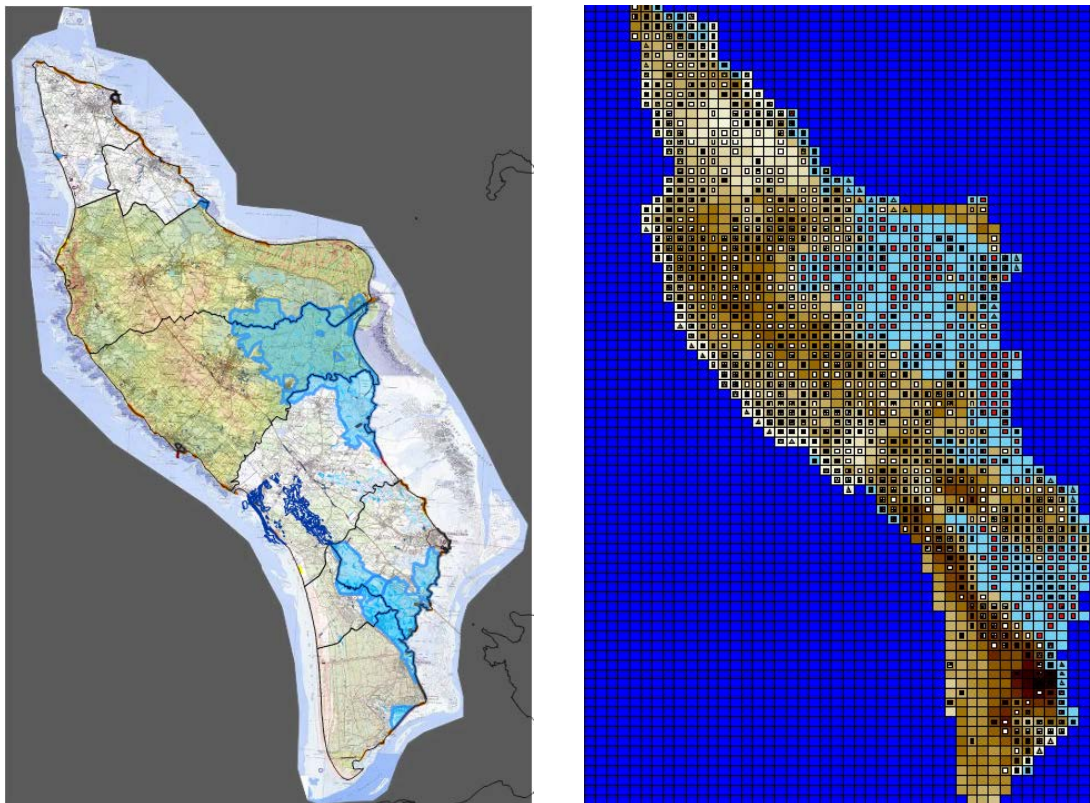


FIGURE 6.11 – Vues de la submersion lors de Xynthia sur l'île d'Oléron, à gauche : carte réelle et à droite : simulation SPRITE.

Sources : Adam *et al.* (2016); Taillandier *et al.* (2017).

### 6.1.3 Positionnement du modèle STEP

Le modèle STEP est un modèle dynamique d'évacuation de population littorale en milieu urbain en cas de séisme et de tsunami. Le modèle doit donc s'adapter aux niveaux de granularité induits par le contexte du territoire littoral urbanisé, des aléas et de la population qui évacue. Cette contrainte est complétée par la construction du modèle autour des deux problématiques majeures développées au cours de cette thèse concernant l'influence de l'environnement urbain et du contexte multi-risques sur l'évacuation de la

population. Par rapport aux modèles d'évacuation en cas de tsunami présentés précédemment, le modèle STEP s'affranchit, tout d'abord, d'un réseau sous forme de graphe pour le déplacement des individus ; ensuite, la prise en compte du contexte multi-risques et de l'influence de l'environnement urbain permet de s'extraire de la logique de plus court chemin en distance/temps pour les itinéraires des individus jusqu'aux zones refuge.

De plus, le modèle STEP est un modèle hybride implémenté sous forme d'automates cellulaires et de multi-agents (Figure 6.12). La combinaison de ces deux types de modèles prend place dans un environnement implémenté à partir de données SIG. Plusieurs niveaux de modélisation sont donc implémentés sous un seul modèle STEP (Figure 6.12).

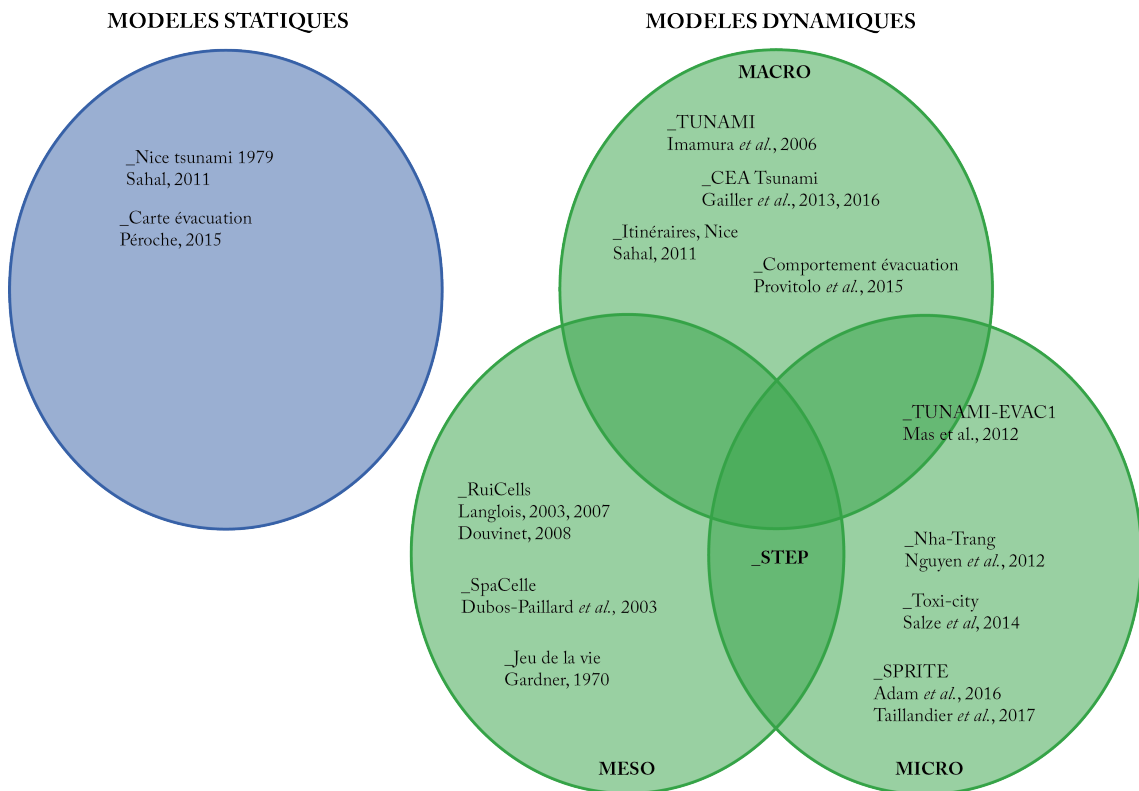


FIGURE 6.12 – Cartographie des modèles présentés chapitre 6 en fonction de leur degré de granularité et positionnement du modèle STEP.

Réalisation : Plattard, O., 2018.

De plus, deux courants principaux s'opposent en modélisation (Banos et Sanders, 2013; Banos *et al.*, 2015)

- KISS (Keep it simple Stupid) : où le système observé est réduit à sa plus simple représentation pour notamment mettre en avant sa dynamique.
- KIDS (Keep it Descriptive Stupid) : où le système observé est décrit dans toute sa complexité , souvent à partir de données SIG, en vue de décrire le plus fidèlement possible le système réel.



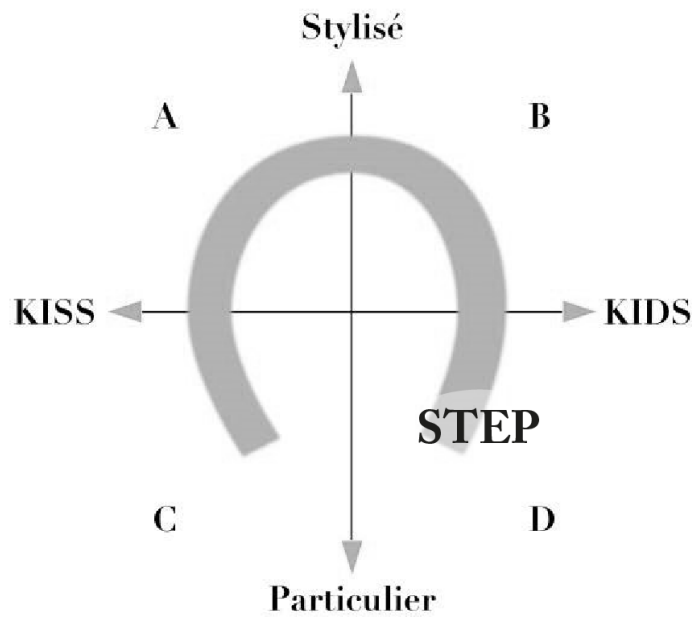


FIGURE 6.13 – Positionnement du modèle STEP dans le fer à cheval KISS/KIDS.  
Réalisation : Plattard, O., 2019 d'après (Banos et Sanders, 2013).

Ils sont mis en relation avec des niveaux d'abstractions du stylisé au particulier par Banos et Sanders (2013), dans une représentation selon deux dimensions avec un fer à cheval représentant le parcours de modélisation (Figure 6.13). Le niveau stylisé correspond à une organisation-type, observée de manière répétée dans le temps et/ou l'espace ; tandis que le niveau particulier correspond à une organisation spatiale précise, observée en un lieu donné à un moment donné (Banos et Sanders, 2013).

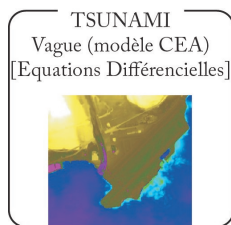
La modélisation de STEP est spatialisée sur un site d'étude, Saint-Laurent-du-Var, avec l'intégration de SIG comme données de base de l'environnement du modèle, ainsi que des scénarios d'évènements basés sur les évènements de référence. Le modèle STEP se situe donc au niveau du quadrant D, à l'intersection du particulier et KIDS (Figure 6.13).

## 6.2 Construction d'un modèle de référence

Un premier modèle STEP (Séisme Tsunami Evacuation Population) est réalisé sur le site de Saint-Laurent-du-Var. La facilité d'accès aux données SIG de la commune fut un des critères pour débiter l'implémentation sur ce site d'étude. Cette sous-partie présente les éléments intégrés au modèle STEP, afin de répondre au mieux aux problématiques d'évacuation piétonne en milieu urbain évoquées dans les chapitres 4 – lisibilité – et 5 – praticabilité –.

### 6.2.1 Modélisation du tsunami

#### Modèle de tsunami du CEA



Dans le cadre du programme Astarte, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) a modélisé les scénarios de tsunamis de référence envisagés pour le littoral niçois, en se basant sur les événements passés (voir chapitre 2)(Gailler *et al.*, 2016, 2013).

L'environnement bathymétrique et topographique utilisé est composé des données des bases GEBCO (GEneral Bathymetric Chart of the Oceans), ainsi que SHOM (Service Hydrographique et Oceanographique de la Marine) et IGN (Institut National de l'Information Géographique et Forestière), permettant une rugosité de grille allant de 1800 mètres à 25 mètres. Cependant, le littoral dispose d'une plus haute résolution allant de 1 à 5 mètres (Gailler *et al.*, 2016).

De plus, cette modélisation se base sur les données des événements passés de référence (*worst-case*) pour le littoral niçois, que sont les séismes et tsunamis de la faille Ligure en 1887 et de Boumerdès en 2003 (voir chapitre 2). La modélisation de la rupture et de la magnitude sismique s'appuie sur ces données historiques et la base de données des failles sismiques du CENALT (CENtre National d'Alerte aux Tsunamis) (Gailler *et al.*, 2013; Schindelé *et al.*, 2015).

Pour chaque scénario sont calculées les hauteurs maximales et instantanées des vagues, la vitesse du courant horizontal et l'inondation. La simulation de la propagation est réalisée à une résolution de 1800 mètres en eaux profondes, puis affinée au fur et à mesure, jusqu'à 5 mètres pour l'arrivée sur la côte niçoise. Ce choix d'affinage est issu de la comparaison de la granularité de la grille (25 mètres, 5 mètres ou 1 mètre) sur les résultats de modélisation, en termes de précision et de temps de calcul. La résolution à un mètre nécessite une trop grande demande en calcul, tandis que la résolution à 5 mètres est retenue pour la précision relevée sur la modélisation des amplifications locales par rapport au temps de calcul demandé (Figure 6.14) (Gailler *et al.*, 2016).

Le scénario de séisme tsunamigène présenté figure 6.14 est situé au Nord de l'Algérie

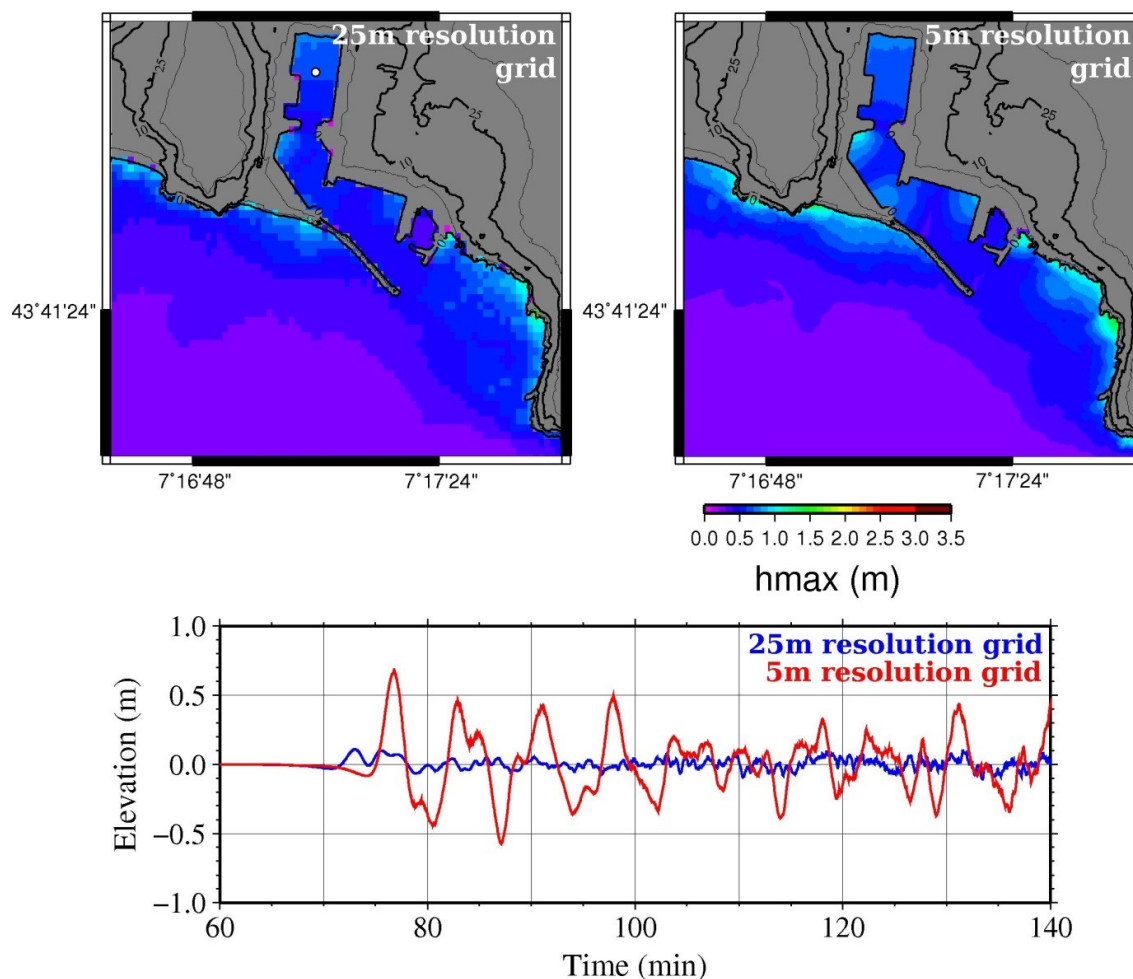


FIGURE 6.14 – Comparaison de granularité de 25 mètres et 5 mètres du modèle de tsunami sur le front de mer niçois (ici, le port de Nice), pour un évènement de référence du type du séisme de Boumerdès en 2003 (Mw 7.5).

Sources : Gailler *et al.* (2016).

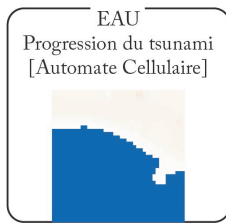
et considère une magnitude de Mw 7.5. La localisation de l'épicentre permet une propagation directe du tsunami, lui permettant de conserver son énergie. Selon les résultats de simulation, le tsunami atteint la côte après 1h15 de propagation (Gailler *et al.*, 2016). La hauteur maximum de l'eau est atteinte au bout de 2h45 avec notamment 2,3 mètres au Cap d'Antibes et à l'aéroport de Nice. La vitesse horizontale maximum atteinte est de 6-8 m/s (22-29 km/h) au niveau du sud-est de l'aéroport de Nice (Gailler *et al.*, 2016; Tinti, 2015).

Le modèle de tsunami mis en place par le CEA ne concerne que la propagation en mer et ne prend pas en compte l'inondation du littoral. Comme le précise Gailler *et al.* (2013) : *"Comme la précision des modèles numériques est intrinsèquement limitée par des erreurs de bathymétrie et de topographie, et que le calcul des cartes d'inondation est plus complexe et coûteux en termes de temps de calcul, seule la modélisation de la propagation offshore*

par tsunami est incluse dans la base de données de prévision."

Le modèle STEP est cependant dépendant de l'inondation du tsunami sur le territoire urbanisé, en vue de l'évacuation de la population. Le modèle développé par le CEA constitue donc une base de données d'entrée concernant le tsunami indispensable à la mise en place de la propagation de l'eau dans le modèle STEP, selon les scénarios d'évènements de référence envisagés pour Saint-Laurent-du-Var.

### Implémentation et inondation du rivage



La modélisation de tsunami réalisée par le CEA ne prend pas en compte l'inondation du territoire littoral. Or, dans le modèle STEP, il est nécessaire de modéliser la progression de l'eau sur le territoire urbanisé dans la dynamique d'évacuation de la population.

Une recherche a été effectuée des modèles existants d'inondation d'un territoire par un tsunami. Tout comme le modèle du CEA, ces modélisations sont à équations différentielles (Imamura *et al.*, 2006; Mas *et al.*, 2012c). Jugeant non nécessaire le détail de l'hydrodynamique de l'eau dans le modèle d'évacuation au regard du questionnement du modèle STEP et de son échelle, ces modèles macros ne semblent donc pas pertinents pour l'implémentation du modèle STEP. En effet, la problématique de cette recherche est davantage liée à l'influence du contexte multi-risques et de l'environnement urbain qu'au comportement humain en fonction de l'hydrodynamique de l'inondation du tsunami.

La modélisation choisie est donc celle de l'automate cellulaire avec des propriétés liées à l'eau sur chaque cellule, et des règles de transition lors de la propagation de l'eau. Une cellule est considérée comme de l'eau ou du sol de manière binaire en fonction de l'attribut *is-water* ? (0;1) avec 1 = eau. Une cellule eau est colorée en bleu.

Lors de l'initialisation, les cellules qui sont de l'eau sont celles dont l'altitude est inférieure ou égale à 0.

En ce qui concerne l'arrivée et la propagation du tsunami, les résultats de la modélisation mise en place par le CEA permettent d'obtenir des données d'entrée pour le modèle telles que la vitesse de l'eau, la hauteur d'eau et le délai d'arrivée sur le trait de côte, pour chaque scénario de référence sur Saint-Laurent-du-Var.

Deux variables sont modulées en fonction du scénario choisi :

- *water-height* : la hauteur d'inondation en mètres.

Cette hauteur d'eau est un des paramètres qui permet de stopper la propagation ; lorsque l'altitude attribuée à une cellule est supérieure à la hauteur d'eau sélectionnée, l'eau ne s'y propage pas.

- *water-front-speed* : la vitesse de propagation de l'eau en km/h.

La vitesse est définie selon un rapport de distance et du pas de temps choisi – 1

tick = 1 seconde – et de la taille d’une cellule – 1 patch = 5 mètres –. La vitesse est donc un rapport de mètres par seconde qui est ensuite mis à l’échelle du km/h pour plus de facilité de prise en main lors du choix de la valeur de cette variable à l’initialisation.

La propagation de l’eau intervient dans la simulation en fonction du scénario choisi et du délai d’arrivée du tsunami ; c’est-à-dire que l’évacuation peut débuter avant l’arrivée du tsunami sur le front de mer. Néanmoins, ce délai est réduit de 5 minutes, temps estimé de délai d’alerte depuis le signalement de l’évènement source par le centre de veille jusqu’aux autorités en charge de l’alerte et de la mise en sécurité des populations (voir chapitre 3). Le début de propagation de l’eau est donc implémenté à partir du pas de temps correspondant au délai d’arrivée de l’eau sur le littoral. Par exemple, pour un scénario correspondant au séisme de la faille Ligure de 1887, le délai envisagé est de 15 minutes (voir chapitre 2) :

15 min. - 5 min. = 10 min.

pas de temps : 1 tick = 1 seconde

soit un déclenchement de la propagation de l’eau au bout de 600 ticks ou 600 secondes. Le délai de déclenchement est, dans la version du modèle détaillée ici, inclus au code. Cependant, il serait plus ergonomique de l’inclure à l’interface sous forme d’une variable à choisir lors de l’initialisation, au même titre que la hauteur ou la vitesse.

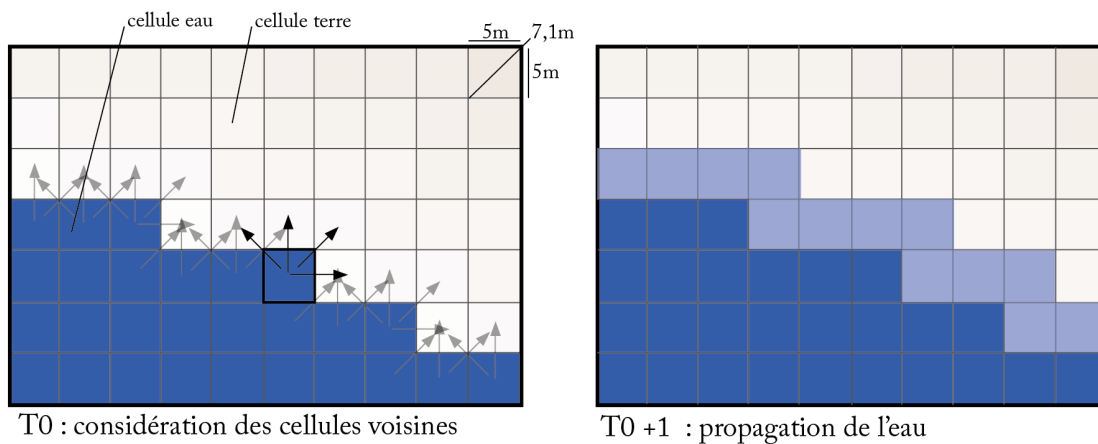


FIGURE 6.15 – Processus de propagation de l’eau.  
Réalisation : Plattard, O., 2018.

La propagation de l’eau suit des règles de contamination entre cellules. Une cellule considère ses voisines et respecte des règles de transition (Figure 6.15) :

- considérer ses voisines qui ne sont pas déjà de l’eau, qui ont une altitude inférieure ou égale à la hauteur d’inondation choisie, qui ne sont pas une construction.

- contaminer une ou des voisines en fonction de la vitesse choisie.

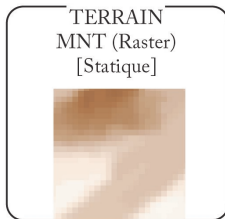
Si la vitesse choisie est supérieure ou égale à la taille d'une cellule parcourue en une seconde, alors la cellule devient de l'eau.

Si la vitesse choisie correspond à moins de la taille d'une cellule parcourue en une seconde, alors un système cumulatif permet de ne contaminer une cellule que lorsque le nombre de tick pour parcourir la distance de cette cellule est atteinte.

La vitesse de la propagation de l'eau est constante et ne subit pas les effets du relief ou de la rugosité des sols. Le calcul de la perte d'énergie et de vitesse d'un tsunami est complexe et nécessite une prise en compte au cas par cas des environnements traversés et de leurs caractéristiques. Ce niveau de précision hydrodynamique du tsunami sur le territoire n'est pas celui recherché dans le modèle STEP dont l'objectif est d'observer la dynamique de l'évacuation en milieu urbain de manière globale.

La propagation de l'eau s'arrête lorsque toutes les cellules contiguës disposant des caractéristiques de diffusion de l'eau sont contaminées.

### 6.2.2 Construction du terrain



L'environnement du modèle STEP concerne la zone de front de mer de Saint-Laurent-du-Var. Pour implémenter cette zone dans le modèle, des données SIG ont été collectées. Afin de disposer de la topographie du terrain de la zone modélisée, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de format Raster est implémenté. Il s'agit d'un MNT issu du RGE Alti fourni par l'IGN. Le MNT a été récupéré

en 2015 pour la commune de Saint-Laurent-du-Var.

La granularité du MNT conditionne celle du modèle. Dans le fichier utilisé pour Saint-Laurent-du-Var, chaque cellule a un dimensionnement de 5 mètres par 5 mètres de côté. Cette taille est conservée lors de l'implémentation, ainsi, chaque patch ou cellule du modèle est un carré de 5 mètres de côté également. Il n'y a donc pas de détérioration de la granularité lors du passage du SIG au modèle.

L'implémentation du fichier SIG dans le modèle est réalisée avec l'extension [GIS]. Elle nécessite un cadrage préalable de la zone modélisée sous un logiciel de SIG. De plus, le système de coordonnées géographiques doit être commun à tous les fichiers implémentés dans le modèle. Dans le cas de STEP, il est utilisé le système de coordonnées projeté UTM (Universal Transversal Mercator).

Le fichier intégré en premier dans le modèle sert de référence de cadrage et d'échelle aux autres fichiers SIG intégrés par la suite. Dans ce modèle, le MNT sert de fichier SIG de référence.

Cette intégration de la topographie donne à chaque cellule un attribut d'altitude : *altitude*. Cet attribut est unique par cellule, c'est à dire que l'altitude est constante sur la totalité de la cellule.

Afin de visualiser le relief, un dégradé de couleur marron est mis en place sur les cellules allant du plus clair pour les altitudes les plus basses, au plus foncé pour les altitudes les plus élevées (Figure 6.16).

Cet environnement est statique, l'attribut d'altitude des cellules n'étant pas modifié au cours de la simulation.

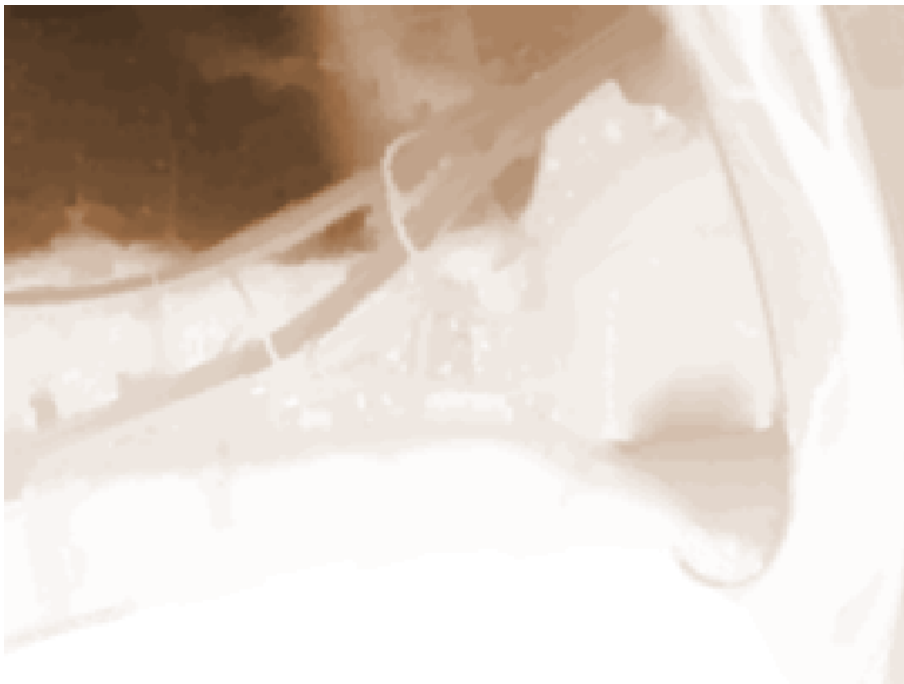
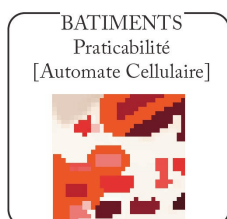


FIGURE 6.16 – Représentation du terrain dans le modèle STEP, cadrage de Saint-Laurent-du-Var.

Sources : Plattard, O., 2018.

### 6.2.3 Implémentation des constructions

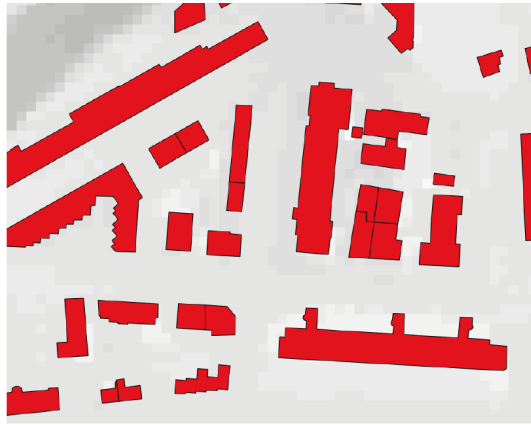


L'environnement urbain du modèle STEP est également constitué des constructions. Un fichier SIG comprenant les données des bâtiments de la commune est implémenté dans le modèle. Ce fond vecteur est issu de la BD Topo de l'IGN. Il a été récupéré en 2015 pour la commune de Saint-Laurent-du-Var (Figure 6.17(1)).

Lors de l'intégration dans le modèle, ce fichier vecteur adopte la granularité et le cadrage du MNT préalablement implémenté.

Le fichier vecteur est constitué de polygones pour chaque construction, et lors de l'implémentation dans le modèle, les bâtiments sont représentés sous cette même forme (Figure 6.17(2)). Cependant, le modèle nécessite des bâtiments représentés sous forme de

cellules. Cette modification est effectuée lors de l'implémentation avec l'extension [GIS] (Figure 6.17(3)).



1. SIG : Fichier vecteur BD Topo



2. Modèle : Bati en polygones



3. Modèle : Bati en cellules avec altitude



4. Modèle : Bati en cellule avec altitude et effondrement

FIGURE 6.17 – Représentation du bâti dans le modèle STEP : le fichier SIG (1), sous forme vectorielle dans le modèle (2), en cellules par altitude dans le modèle (3) et dans le modèle avec l'effondrement du bâti (4), pour le site de Saint-Laurent-du-Var.

Réalisation : Plattard, O., 2018.

Le fichier vecteur permet la prise en compte des données de la table attributaire du fichier SIG dans le modèle. Plusieurs attributs, issus des données de la table attributaire, sont liés aux constructions :

- *is-building?* : attribut binaire définissant le statut de cellule construite (= 1) ou non bâtie (= 0).
- *building-ID* : attribut de numéro de bâtiment correspondant au numéro attribut



d'objet de la table attributaire.

- *buildings-height* : hauteur totale de la construction.

La hauteur est représentée par un dégradé de couleur du plus clair pour le moins élevé au plus foncé pour le plus haut.

Les constructions sont structurantes de l'environnement urbain du modèle. Elles sont des obstacles à la propagation de l'eau, mais aussi pour les agents lors de l'évacuation. La hauteur d'un bâtiment (*buildings-height*) conditionne plusieurs règles dans le modèle STEP :

- L'eau ne peut submerger un bâtiment que si sa hauteur totale est inférieure à la hauteur d'inondation du scénario.
- La hauteur a un rôle dans la visibilité des zones refuge par les agents du modèle (voir chapitre 7).
- La hauteur permet de déterminer l'emprise au sol des débris d'un bâtiment en cas d'endommagement par un tremblement de terre (chapitre 8).

Le tremblement de terre précurseur au tsunami impacte les constructions, pouvant les endommager partiellement ou totalement (chapitre 5). Lors d'un endommagement, des débris se répandent autour du bâtiment endommagé. Comme nous l'avons vu durant le chapitre 5, une probabilité d'effondrement des bâtiments en fonction de l'intensité sismique a été définie à partir du travail réalisé sur le terrain de Syracuse. Elle est intégrée au modèle STEP de Saint-Laurent-du-Var sous forme de variable aléatoire. En fonction du choix d'un scénario avec séisme précurseur, des constructions subissent des dommages en fonction d'une probabilité d'effondrement appliquée à l'ensemble des bâtiments. Dans cette version du modèle STEP mis en place, la probabilité est uniforme pour toutes les constructions, indépendamment d'une présomption de vulnérabilité sismique. Les constructions sont impactées aléatoirement ; cela implique donc que d'une simulation à une autre, ce ne sont pas toujours les mêmes constructions qui subissent des dommages. Dans le modèle actuel, la probabilité d'effondrement (*Probability-Collapse*) doit être définie manuellement dans l'interface.

L'effondrement des constructions est une modélisation par automate cellulaire. Une construction est considérée dans son ensemble de cellules via son numéro d'attribut (*building-ID*). Les cellules bâties suivent les règles de transition suivantes (Figure 6.18) :

- Tirage au sort d'une cellule bâtie (*is-building* = 1) et non déjà effondrée (*is-collapsed-building?* = 0).
- Prise en compte de toutes les cellules ayant le même identifiant de bâtiment (*building-ID*).
- Considérer les cellules voisines non bâties dans un rayon correspondant à la hauteur du bâtiment (*buildings-height*) divisée par 3, selon la règle définie au chapitre 5.
- Contaminer les cellules voisines en changeant leur attribut *collapse-mess* correspon-

— dant aux débris et en leur donnant la couleur orange.

- Toutes les cellules ayant le même *building-ID* deviennent effondrées (*is-collapsed-building* ? = 1).

Ce même processus est répété jusqu'à obtenir le nombre de bâtiments effondrés correspondant à la probabilité indiquée dans le scénario.

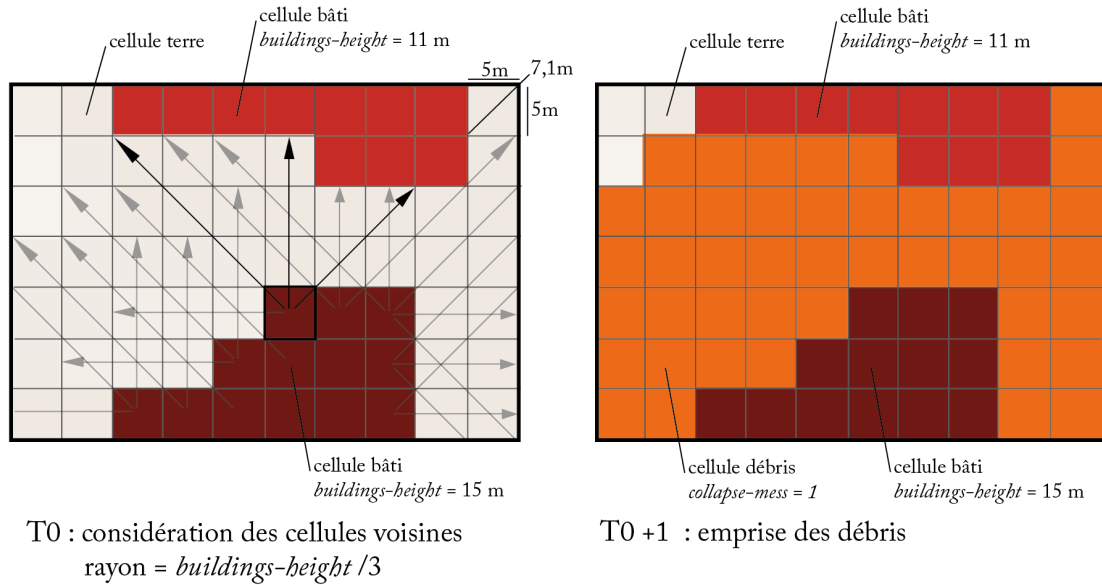
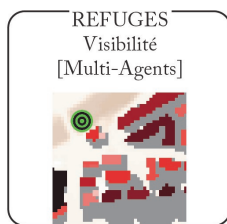


FIGURE 6.18 – Processus d'effondrement du bâti dans le modèle STEP.  
Réalisation : Plattard, O., 2018.

### 6.2.4 Intégration des zones refuge



Les zones refuge constituent les objectifs de mise en sécurité pour les personnes lors de l'évacuation. Dans le modèle STEP, les zones refuge ne sont pas des lieux spécifiques, mais signalent un endroit qui est sécurisé et qui est le point d'arrivée des agents. En cela, les zones refuge peuvent être situées sur un espace libre (parc, rue, place...) ou sur un bâtiment. L'intention est, en fonction des scénarios, de pouvoir envisager différentes configurations de positionnement de zones refuge et d'en voir les répercussions sur les résultats de l'évacuation.

Dans le modèle, les zones refuge sont des agents *target* représentés sous forme de cible dans les tons de vert, et ayant un attribut *target-ID*, permettant de leur attribuer un numéro propre (Figure 6.19). Lors de l'initialisation, plusieurs informations relatives aux *targets* doivent être choisies :

- *Number-Targets* : permet de définir le nombre de zones refuge voulues dans le modèle.
- *Height-of-target* : permet de définir la hauteur de la zone refuge, en mètres. Cette hauteur ne correspond pas à une hauteur construite et peut représenter la signalisation d'une zone refuge, notamment quand le choix est fait de la positionner sur un bâtiment existant. Dans ce dernier cas, la hauteur sélectionnée s'ajoute à la hauteur du bâtiment.
- *location* : une localisation est donnée à chaque zone refuge. Pour cela, trois actions sont possibles :
  - *random-location ? off* : la localisation des zones refuge est fixe et leurs coordonnées sont indiquées dans le code du modèle.
  - *random-location ? on* : permet une initialisation avec une position aléatoire des zones refuge. Dans ce cas, elles sont situées en dehors des cellules bâties, hors des cellules étant de l'eau et hors de la zone de danger (zone inondable + marge de sécurité, voir chapitre 3).
  - *move-target* : cette option peut être activée après l'initialisation et permet de déplacer manuellement les zones refuge directement dans l'interface du modèle afin d'ajuster leur positionnement.

Les zones refuge disposent d'une capacité d'accueil illimitée.

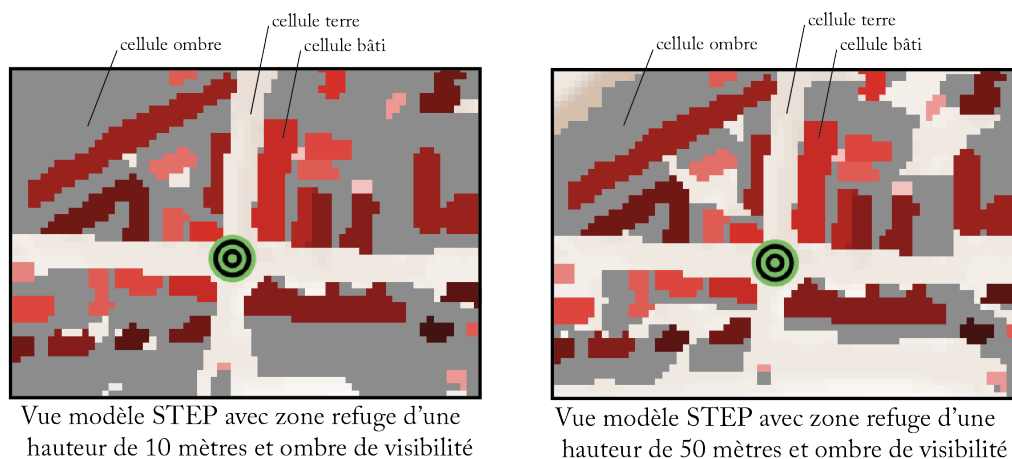


FIGURE 6.19 – Vues du modèle STEP avec une zone refuge à deux hauteurs différentes et influence sur les zones d'ombre des bâtiments.

Réalisation : Plattard, O., 2018.

Outre le fait qu'elles constituent l'objectif de mise en sécurité des individus, les zones

refuge permettent également d'introduire la variable de visibilité dans l'espace urbain (voir chapitre 4).

Lors de l'initialisation du modèle, les zones refuge sont, en fonction de leur localisation et de leur hauteur, visibles ou non selon les cellules (Figure 6.20). Cette notion de visibilité est représentée par des zones d'ombre de non-visibilité des zones refuge. Ces zones sont construites en fonction de la hauteur de la zone refuge, de la hauteur des bâtiments et de la distance entre ceux-ci (Figure 6.20). Ces dernières sont formalisées par un attribut de cellule : *hidden-shadow?*. Lorsqu'un individu est situé dans cette zone d'ombre (*hidden-shadow?* = 1), il n'est pas en mesure de voir la zone refuge la plus proche de lui. L'ombre s'initialise conjointement aux zones refuge et est donc mise à jour en cas de modification de leur hauteur ou localisation.

Il n'y a pas d'indications permettant de situer les zones refuge dans les zones d'ombre. Cela correspond au fait que les sites d'étude ne disposent d'aucune indication d'itinéraires d'évacuation à ce jour, le modèle STEP est donc proche de la réalité des terrains d'étude. La zone d'ombre détermine des caractéristiques des agents évacués se trouvant dans cette zone (voir partie ci-après).

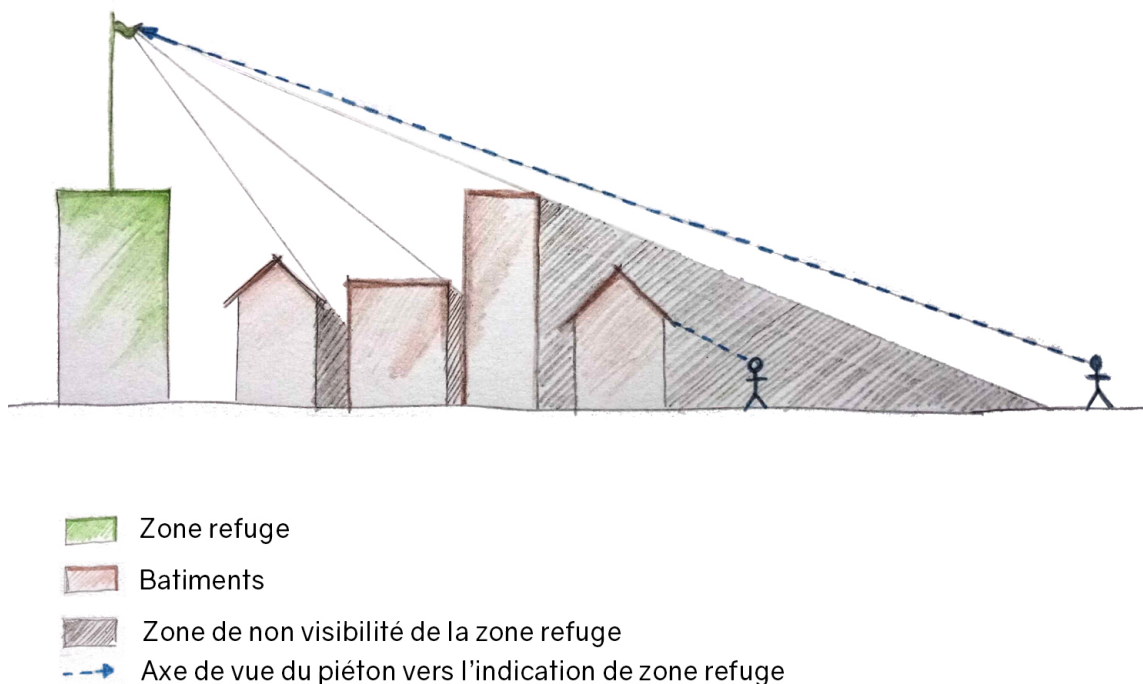
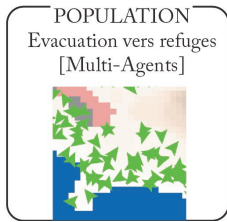


FIGURE 6.20 – Construction de la variable de visibilité : création de zones d'ombre de non-visibilité des zones refuge en fonction de sa hauteur et de la hauteur des bâtiments.

Réalisation : Plattard, O., 2018.

### 6.2.5 Implémentation de la population



La dernière entité constitutive de ce modèle d'évacuation est la population. Elle est implémentée dans le modèle STEP sous forme d'agents *person*. Ces agents ont comme objectif principal de rejoindre une zone refuge.

Un agent *person* correspond à un individu. Les agents ont des attributs :

- *my-target* : attribut correspondant au lien entre la zone refuge la plus proche de l'agent *person* et l'agent *person* lui-même. Au départ, chaque agent est lié à la zone refuge la plus proche de lui et qu'il est sensé rejoindre. Afin de représenter cet attachement, l'agent *a*, à l'initialisation, l'attribution de la couleur – dans les tons de vert – de la zone refuge lui correspondant.
- *is-victim?* : attribut binaire permettant de spécifier si un agent a été rattrapé ou touché par l'eau (*is-victim?* true). Lorsqu'il est positif, l'agent est immobilisé et ne peut plus rejoindre de zone refuge. Il est alors de couleur rouge.
- *target-reached?* : attribut binaire permettant de spécifier si l'agent *person* a atteint son objectif de rejoindre une zone refuge (*target-reached?* true). Dans ce cas, l'agent s'immobilise au niveau de la zone refuge *target* et ne se déplace plus. Cet attribut vient en complément de l'attribut *is-victim?*. A la fin de la simulation, certains agents *person* peuvent ne pas être rattrapés par l'eau, mais cependant sans avoir rejoint une zone refuge (*is-victim?* false et *target-reached?* false).

Lors de l'initialisation, les agents *person* sont localisés de manière aléatoire dans une zone définie sur le bord de mer (Figure 6.21 (1)). Ils sont en zone inondable sans pour autant se situer sur une cellule d'eau (*is-water?* = 0), bâtie (*is-building?* = 0) et ayant de l'effondrement de construction (*collapse-mess* = 0). Certaines caractéristiques sont définies lors de l'initialisation :

- *Number-agents* : définition du nombre d'agents *person* à créer. Variation de 10 à 1000 dans ce modèle avec une valeur standard de 500 agents basée sur les relevés de population effectués sur les plages de Saint-Laurent-du-Var et Nice (Robert *et al.*, 2008; Lavigne, 2014).
- *Walking-Speed-Agents* : définition de la vitesse des agents *person* en km/h. Variation de 0 à 20 km/h avec une valeur standard de 5 km/h, basée sur les valeurs moyennes de vitesse d'individus en évacuation (Sahal, 2011; Peroche, 2016) .

Tout comme pour la vitesse de propagation de l'eau (*water-front-speed*), la vitesse est définie selon un rapport de distance et du pas de temps choisi – 1 tick = 1 seconde – et de la taille d'une cellule – 1 patch = 5 mètres –. La vitesse est donc un rapport de mètres par seconde qui est ensuite mis à l'échelle du km/h pour plus de facilité de prise en main lors du choix de la valeur de cette variable à l'initialisation.

- *vision* : définition du rayon de vision des agents *person*. Lors de leur déplacement,

le paramètre de *vision* permet aux agents de considérer un rayon en nombre de cellules autour d'eux.

- *noise* : définition du niveau d'aléatoire dans le mouvement de l'agent *person* lors de son déplacement. Si *noise* = 0, l'agent se déplace linéairement sans variation.

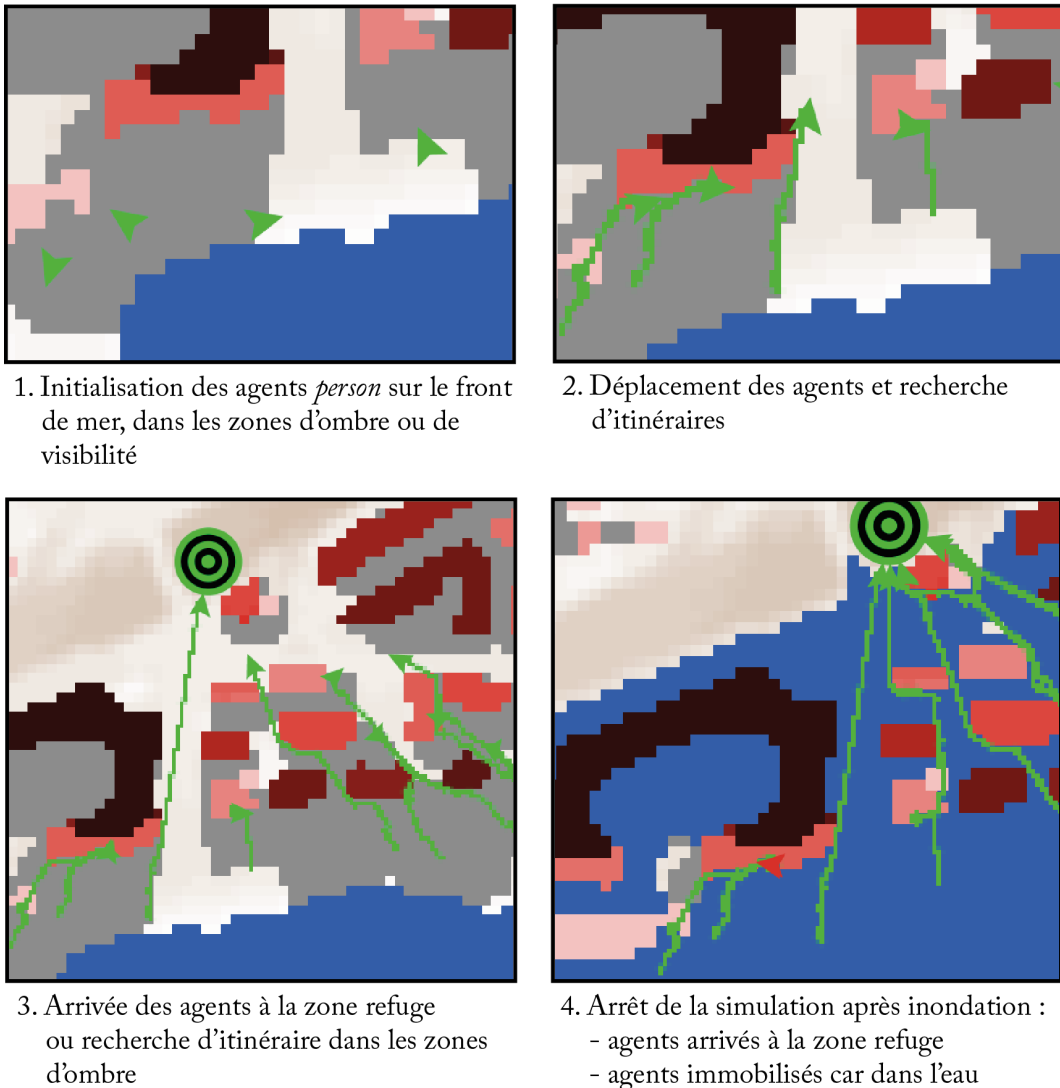


FIGURE 6.21 – Vues du modèle STEP : initialisation de la population et mécanismes de déplacement.

Réalisation : Plattard, O., 2018.

Les agents *person* se répartissent aléatoirement et se retrouvent donc sur des cellules ayant des attributs différents, ce qui a une influence sur leur évacuation vers les zones refuge *target* (Figure 6.21 (1)). C'est le cas des cellules de zones de non visibilité des zones refuge (*hidden-shadow?* = 1). Un agent se trouvant sur une cellule avec ces propriétés n'a pas de vision de la zone refuge vers lequel il doit aller (*my-target*). Cette non visibilité

peut induire le fait de chercher son itinéraire et de ne pas savoir vers où se diriger. Dans ce sens, une probabilité d'errance afin de rechercher son chemin est implémentée au modèle *probability-search-when-shadow* (Figure 6.21 (2) et (3)). Cette probabilité peut être choisie au moment de l'initialisation et s'exprime de 0 à 1, avec 1 comme valeur exprimant que la totalité des agents se situant en zone d'ombre connaît le chemin.

Les agents *person* sont également en relation les uns avec les autres, notamment à travers un processus d'imitation. Pour cela, des agents imitent d'autres agents en les suivant dans leur déplacement. Dans le modèle, cela se traduit concrètement par le changement d'objectif de l'agent qui n'est plus simplement de rejoindre la zone refuge *target* la plus proche, mais de suivre l'agent qui devient son nouvel objectif *my-new-target*. Ce processus d'imitation concerne les agents qui sont dans la zone d'ombre (*hidden-shadow?* = 1) et qui cherchent leur itinéraire. Pour cela, plusieurs caractéristiques définissent la dynamique d'imitation :

- *imitation?* : permet d'avoir un processus d'imitation parmi les agents *person* (*imitation?* on).
- *is-imitator?* : attribut définissant le statut de suiveur (*is-imitator?* = 1) d'un agent *person*.
- *proportion-imitators* : définition de la proportion d'agents *person is-imitator?* = 1 dans la population totale. Valeur en pourcentage allant de 0 à 100 à définir lors de l'initialisation.

Suite à l'initialisation du nombre d'agents *person* choisi, chacun d'entre eux tente de rejoindre une zone refuge *target*. Pour cela, un agent se déplace à la vitesse décidée au départ en considérant les cellules dans le rayon *vision* autour de lui. Il ne peut pas se déplacer sur les cellules d'eau (*is-water?* = 1), les cellules bâties (*is-building?* = 1) et les cellules d'effondrement (*collapse-mess* = 1). En fonction de sa situation, plusieurs opportunités de déplacement s'offrent à lui (Figure 6.21) :

- situation sur une cellule avec une bonne visibilité (*hidden-shadow?* = 0) : l'agent *person* se dirige en direction de la zone refuge la plus proche auquel il est lié *my-target*.
- situation sur une cellule sans visibilité (*hidden-shadow?* = 1) :
  - l'agent *person* cherche son chemin car il ne sait pas dans quelle direction se trouve la zone refuge la plus proche de lui *my-target*. Il erre sur les cellules, revenant parfois sur des cellules déjà traversées.
  - l'agent *person* connaît le chemin pour aller vers la zone refuge la plus proche *my-target*, car il bénéficie de la probabilité de connaissance du chemin en zone d'ombre (*probability-search-when-shadow*).
  - l'agent *person* suit un autre agent *person* par processus d'imitation. Cela peut lui permettre de suivre un agent connaissant le chemin jusqu'à la zone refuge la plus proche, ou, dans le cas contraire, de suivre un agent ne connaissant pas

non plus le chemin.

Le scénario définit la fin de la simulation et l'étendue de l'inondation. A l'issue de la simulation, les agents ont soit rejoint une zone refuge, soit été rattrapés par l'eau, soit ni l'un ni l'autre (Figure 6.21 (4)).



## Conclusion

La modélisation est un outil privilégié pour la thématique des risques majeurs. En fonction de l'échelle de modélisation utilisée, des processus différents peuvent être étudiés sur un territoire exposé aux risques. En ce qui concerne la modélisation d'évacuation de population, les simulations macroscopiques ou microscopiques sont les plus pertinentes. La simulation multi-agents – microscopique – est la plus à même de faire émerger des spécificités propres aux individus, avec un niveau de détails adaptable à la problématique soulevée.

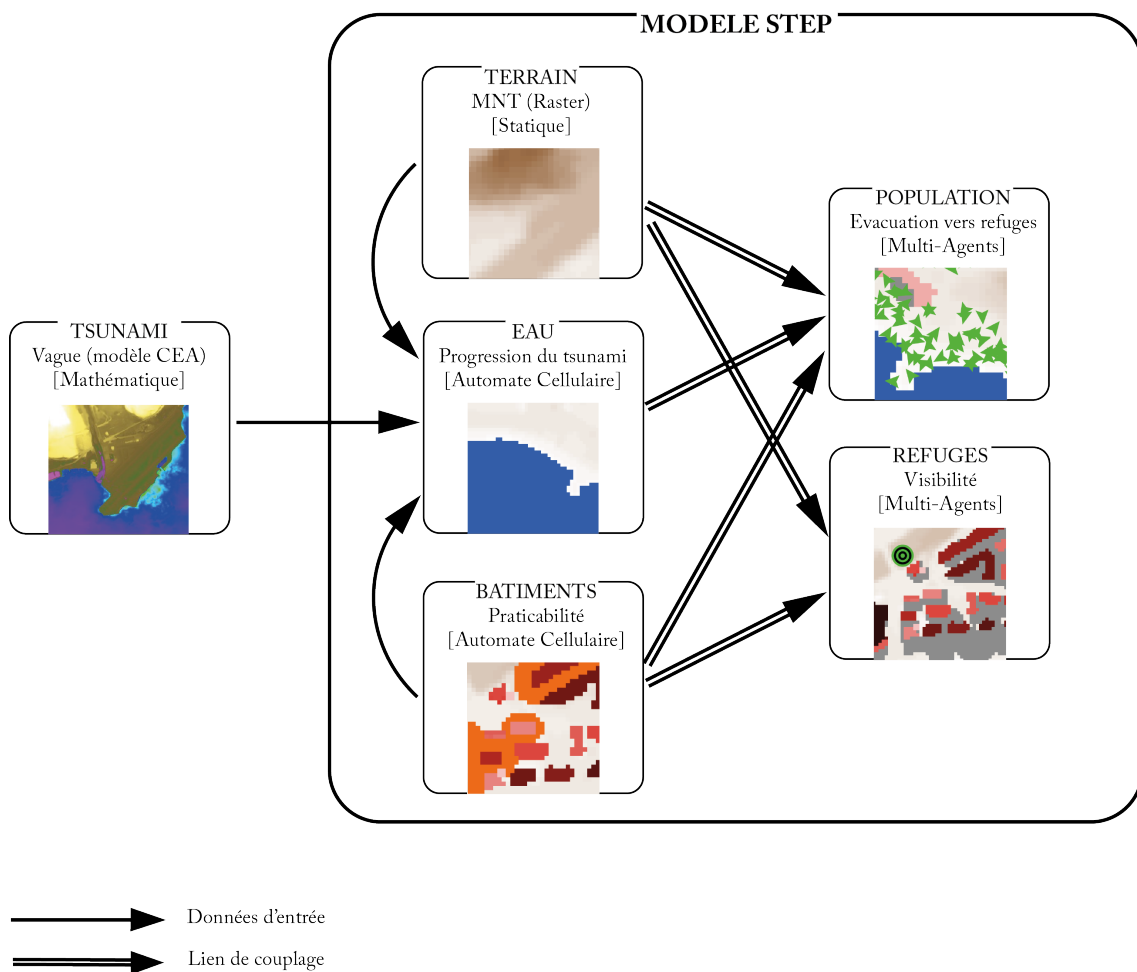


FIGURE 6.22 – Modèle STEP : relations entre composants et sous-modèles.  
Réalisation : Plattard, O., 2018.

Le modèle STEP est implémenté autour des problématiques soulevées par une évacuation piétonne en milieu urbain (voir chapitres 4 et 5). Plusieurs dynamiques sont développées dans l'environnement spatialisé statique (Figure 6.22) :

- La dynamique de la propagation de l'eau sous forme d'automate cellulaire.
- La dynamique de séisme précurseur avec l'effondrement de certaines constructions

sous forme d'automate cellulaire.

- La dynamique de la visibilité dans le tissu urbain à travers les zones d'ombre de non-visibilité des zones refuge sous forme d'agents.
- La dynamique de la population devant évacuer jusqu'aux zones refuge sous forme d'agents.

Le modèle STEP prend donc la forme d'un modèle hybride regroupant des modèles d'automates cellulaires et de multi-agents ; ce qui correspond à différents mécanismes et échelles de dynamiques. Des liens entre ces différents modèles permettent de construire STEP (Figure 6.22). Cette pluralité de modèles peut traiter de manière conjointe les différentes problématiques liées à l'évacuation piétonne en milieu urbain que sont l'influence de la visibilité de l'environnement urbain et la praticabilité des itinéraires résultant des impacts d'un tremblement de terre précurseur au tsunami sur le déroulement de l'évacuation.

## Conclusion de la seconde partie

Cette seconde partie permet, à travers ses trois chapitres, de poser les deux problématiques liées à l'influence de l'environnement urbain et d'un contexte multi-risques sur l'évacuation piétonne qui sont développées dans le modèle STEP. Cette partie se termine avec le chapitre 6 qui place le modèle STEP dans l'environnement des modèles de simulation et qui détaille la construction et l'implémentation de ce modèle.

Le cheminement piéton en milieu urbain est un sujet combinant plusieurs niveaux de problématiques et ayant fait l'objet de nombreux travaux. Il est cependant possible de voir émerger l'idée qu'un itinéraire piéton n'est pas forcément le trajet optimal en terme de distance ou de temps pour aller d'un point A à un point B. En effet, le chapitre 4, nous montre que, dans les travaux réalisés, le choix d'itinéraires par les piétons fait appel à de multiples contraintes. La connaissance du terrain, l'objectif du déplacement, la présence d'éléments marqueurs et de perspectives dans l'espace urbain sont autant d'éléments ayant une influence sur le choix du piéton lors de son cheminement. L'itinéraire choisi par un piéton n'est pas obligatoirement le plus court mais plutôt celui qui lui semble le plus simple.

Plusieurs éléments marqueurs de l'espace urbain ont été relevés sur les sites d'étude. Les cartes mentales réalisées lors des enquêtes Astarte sur les sites d'étude, et plus particulièrement à Syracuse, permettent d'évaluer les itinéraires souhaités par les personnes interrogées en cas d'évacuation face à un tsunami. On y trouve les éléments marqueurs de la commune comme majorité des points d'arrivée des itinéraires envisagés. De plus, ces cartes, à travers une décomposition par point de départ, viennent confirmer l'idée qu'un piéton ne choisit pas le trajet le plus court jusqu'à une zone refuge en cas d'évacuation. Le choix est d'aller vers des rues offrant une perspective de vue ou des itinéraires connus auparavant.

La seconde problématique abordée dans cette thèse concerne la praticabilité de l'espace urbain tout au long de l'itinéraire d'évacuation jusqu'à une zone refuge, dans un contexte multi-risques, c'est-à-dire avec la prise en compte d'un séisme précurseur. Le chapitre 5 aborde la construction de cette problématique à travers la prise en compte du risque sismique sur les sites d'étude, et en particulier Syracuse. Un travail de diagnostic de la vulnérabilité sismique des bâtiments a été réalisé sur l'île d'Ortigia à Syracuse. Les constructions diagnostiquées sont celles situées en périphérie des zones refuge, car leur effondrement en cas de séisme est à même d'obstruer l'accès à la mise en sécurité des personnes. Cette probabilité d'effondrement est liée à leur vulnérabilité sismique et à l'intensité sismique envisagée sur le site. Les résultats principaux du diagnostic montrent que la majorité des constructions diagnostiquées sont vulnérables et que leur effondrement, au regard de simulation d'évènement de référence, tel que celui de 1693, remet en cause l'accès aux zones refuge situées à Ortigia.

Face à ce constat de remise en cause de la mise en sécurité des personnes, la prise en compte du risque sismique dans le modèle STEP semble nécessaire. Une variable d'effon-

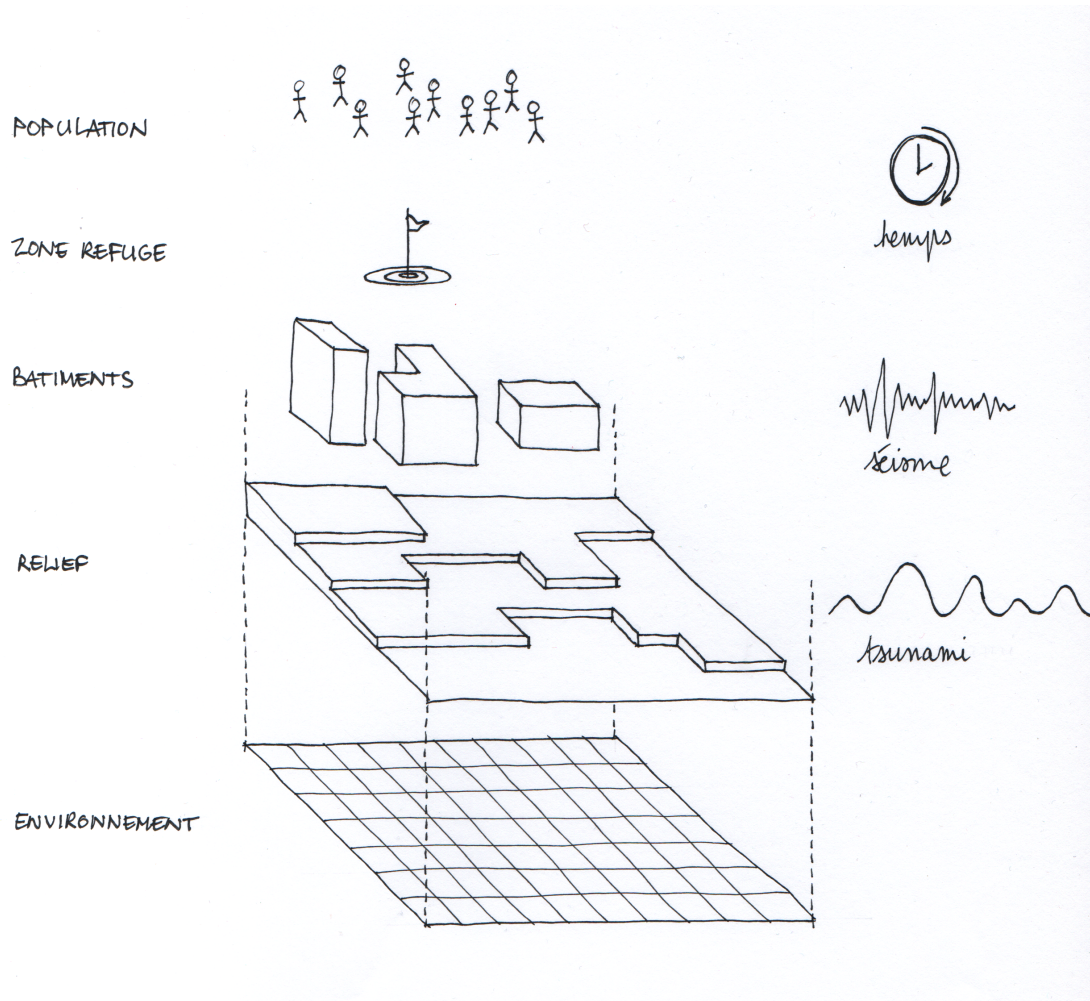


FIGURE 6.23 – Schéma de construction du modèle STEP.  
Réalisation : Plattard, O., 2019.

drement est donc implémentée dans le modèle qui obstrue le passage des personnes, les obligeant à chercher un autre chemin pour rejoindre une zone refuge.

Le chapitre 6 aborde le positionnement du modèle au cœur des différentes modélisations existantes et plus particulièrement dans les questionnements autour des risques majeurs. Ces modèles regroupent plusieurs caractéristiques communes que sont le réseau de voirie sous forme de graphe et le déplacement piéton sur ces réseaux. De plus, ils ne prennent en compte qu'un seul aléa : le tsunami, laissant de côté l'aléa déclencheur comme le tremblement de terre qui peut être ressenti et entraîner des dégâts impactant l'évacuation. Le modèle STEP est un modèle hybride construit à partir de données géographiques de terrain. Il intègre des simulations par automates cellulaires et multi-agents.

Le modèle STEP est implémenté à partir de données géographiques de terrain afin de construire l'environnement constitué principalement par le relief et les bâtiments (Figure 6.23). Les individus et les zones refuge sont des agents du modèle. Les caractéristiques

du tsunami sont basées sur les simulations existantes des évènements de référence.

De plus, la problématique de la lisibilité du milieu urbain est implémentée via la hauteur des zones refuge qui permet de créer des zones de non-visibilité. Les individus ont également des caractéristiques abordant la lisibilité à travers, notamment, la vision durant leur déplacement et la probabilité de chercher son chemin en zone de non-visibilité. La hauteur se place ici comme le paramètre principal de la construction de la variable de lisibilité de l'espace urbain. Les résultats issus des scénarios, qui font varier la hauteur et les autres paramètres du modèle, permettent de voir l'influence de la lisibilité sur l'évacuation (voir chapitre 7).

Enfin, La prise en compte du contexte multi-risques dans le modèle passe par la prise en compte d'un séisme précurseur au tsunami. Le séisme est modélisé à travers une probabilité d'effondrement des bâtiments. L'effondrement est, dans le cas du modèle de cette thèse, aléatoire et n'intervient donc pas sur les mêmes constructions dans les différentes simulations. Cet effondrement apporte des débris sur l'espace d'évacuation. Ces débris sont infranchissables par les individus qui doivent donc trouver un autre itinéraire jusqu'à une zone refuge. Les résultats issus des scénarios avec séisme précurseur sont analysés au chapitre 8. Ils permettent d'évaluer l'influence de la prise en compte d'un contexte multi-risques et de son importance dans la mise en place de stratégies d'évacuation en cas de tsunami.

---

## PARTIE 3. INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN ET DU CONTEXTE MULTI-RISQUES DANS LES RÉSULTATS ISSUS DES SCÉNARIOS STEP

---

Le modèle STEP (Séisme-Tsunami-Évacuation-Population) est un modèle hybride combinant des données SIG, des automates cellulaires et du multi-agents. Les constructions des différentes variables s'inscrivent dans deux problématiques principales que sont l'influence de la lisibilité du piéton évacuant dans un espace urbain bâti (voir chapitre 4) et l'influence de la prise en compte d'un contexte multi-risques – ici, un séisme avant un tsunami – dans la praticabilité de l'espace urbain tout au long de l'itinéraire d'évacuation jusqu'à une zone refuge (voir chapitre 5).

Lors de la phase exploratoire du modèle, il est apparu que, pour plus de clarté dans les sorties et traitements des résultats, il est intéressant de créer trois scénarios STEP principaux. En effet, la problématique de la lisibilité de l'espace urbain est implémentée dans le modèle sous la forme d'une variable construite à partir de la hauteur et de la localisation des zones refuge. La hauteur *Height-of-target* permet de construire, en fonction des bâtiments, des zones de non-visibilité des zones refuge. La hauteur des zones refuge constitue donc un paramètre de base du modèle STEP. Dans le cas de la problématique de la praticabilité de l'espace urbain dans un contexte multi-risques, la prise en compte d'un séisme se traduit dans le modèle par un effondrement aléatoire de certaines constructions ; les débris se répandent autour de la construction effondrée, sur l'espace de voirie. Les débris sont infranchissables par les agents *person* et peuvent les amener à chercher un autre itinéraire jusqu'à une zone refuge. Le séisme constitue donc le second paramètre de base du modèle STEP.

L'intention principale est de faire varier la visibilité et le séisme de manière isolée. Les trois scénarios se répartissent donc selon la variation, dans un premier temps, de la hauteur des zones refuge et, dans un second temps, de la présence ou absence de séisme précurseur à




	ALEAS	ZONES REFUGES		AGENTS <i>PERSON</i>		
	SEISME	LOCALISATION Proche = ZR1 Loin = ZR2	HAUTEUR (valeur en mètres)	VISION (valeur : 1 à 5)	TAUX D'IMITATION (valeur en pourcentage)	PROBABILITE DE CHERCHER SON CHEMIN (valeur : 0 à 1)
<p>STEP 1</p> 	NON	ZR 1 ZR 2	5	2 3	10 20 50	0,6 0,8 0,9
<p>STEP 2</p> 	NON	ZR 1 ZR 2	60	2 3	10 20	0,8 0,9
<p>STEP 3</p> 	OUI	ZR 1 ZR 2	60	2 3	10 20	0,8 0,9

FIGURE 6.24 – Trois scénarios de simulation du modèle STEP.  
Réalisation : Plattard, O., 2019.

l'arrivée du tsunami (Figure 6.24) :

- STEP 1 correspond à des scénarios avec une hauteur de zones refuge définie à 5 mètres et sans séisme.
- STEP 2 correspond à des scénarios avec une hauteur de zones refuge définie à 60 mètres et sans séisme.
- STEP 3 correspond à des scénarios avec une hauteur de zones refuge définie à 60 mètres et avec séisme.

Au cœur de ces trois scénarios STEP, les autres variables du modèle varient de manière similaire, afin de pouvoir analyser leur influence sur l'évacuation. Afin d'observer cette influence, plusieurs types de résultats sont issus des simulations :

- le pourcentage d'agents *person* ayant atteint une zone refuge, ou "sauvés", et le pourcentage d'agents *person* ayant été rattrapé par l'eau, ou "victimes", à l'issue de la simulation. Les agents n'étant dans aucune de ces deux catégories, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas été rattrapés par l'eau mais n'ont pas eu le temps de rejoindre une zone refuge ne font pas l'objet d'un indicateur spécifique en sortie de modèle, mais sont calculables par déduction.
- le temps de déplacement d'un agent *person* pour atteindre une zone refuge à travers le taux de "sauvés" et de "victimes" en fonction du temps du modèle (1 tick = 1 seconde).
- la dynamique de déplacement des agents *person* à travers la comptabilisation du nombre de passages d'agent par cellule au cours de la simulation.

Cette partie se divise en deux chapitres permettant d'aborder séparément chacune des problématiques du modèle STEP.

Le chapitre 7 met en relation les scénarios STEP 1 et STEP 2 ; il permet donc une analyse et discussion des résultats concernant la problématique de la lisibilité de l'espace urbain. Dans un premier temps, les conditions d'initialisation des différents paramètres du modèle sont définies. Elles permettent de mettre en avant les différents sous-scénarios testés et dont les résultats sont extraits. Dans un second temps, les différents types de résultats sont analysés de manière globale, afin de mettre en avant les influences des différents paramètres. Ces résultats sont analysés, tout d'abord, par variables liées à la visibilité directe des agents, c'est-à-dire la hauteur des zones refuge, la proportion d'imitation et de probabilité de recherche de chemin dans les zones de non-visibilité des zones refuge, et la vision ; puis, l'effet de la variation de localisation des zones refuge est ensuite abordée. Les effets combinés des différentes variables sont analysés au travers des résultats de sortie du modèle afin de rendre compte de l'influence des variables de manière isolée et combinée à d'autres variables.

Le chapitre 8 permet l'analyse et la discussion des résultats issus de STEP 2 et STEP 3. Il s'agit ici de ne pas faire varier la base de la variable de lisibilité qu'est la hauteur des zones refuge. Cette variable est donc fixe à l'ensemble des scénarios et seule la variable de séisme varie, afin de recentrer les résultats sur la problématique de la praticabilité de l'espace urbain pour une évacuation piétonne en contexte multi-risques. Tout d'abord, les conditions d'initialisation du modèle pour les différents scénarios sont détaillées. Ensuite, les résultats sont abordés de manière globale puis plus détaillée par variable, ainsi qu'en effet croisé entre les variables. Une analyse de l'influence de chaque variable au regard de la présence d'un séisme est mise en avant. Enfin, une analyse davantage comparative est nécessaire afin de mettre en valeur l'influence de la prise en compte d'un risque sismique sur une évacuation piétonne.





---

### LA LISIBILITÉ DU MILIEU URBAIN DANS LE MODÈLE STEP

---



Scénario STEP 1 :  
ZR2, vision 2, H. 5m, Imit.20



Scénario STEP 2 :  
ZR1, vision 2, H. 60m, Imit.20

FIGURE 7.1 – Liens QR codes vers les vidéos de simulation du modèle STEP pour les scénarios indiqués.

Réalisation : Plattard, O., 2019.

La question de l'influence de la lisibilité en milieu urbain sur l'évacuation piétonne est une des deux problématiques intégrées au modèle STEP. Elle est posée à travers la mise en perspective du positionnement et des caractéristiques des zones refuge et du déplacement des piétons via leur choix afin d'atteindre une zone refuge par un itinéraire de plus court chemin ou de plus simple chemin (voir chapitre 4). Cette hypothèse est issue du cheminement présenté dans le chapitre 4 de cette thèse, basé sur des travaux existants sur les déplacements piétons en milieu urbain, ainsi que sur les cartes mentales issues des questionnaires réalisés sur le terrain sur lesquelles les personnes interrogées devaient indiquer

leur souhait d'itinéraire d'évacuation en cas de tsunami. Les cartes mentales montrent qu'a priori, les personnes interrogées n'envisagent d'évacuer ni vers la zone refuge la plus proche, ni par le plus court chemin.

Cette problématique est présente dans le modèle sous plusieurs aspects. Tout d'abord, via la présence de zones de non-visibilité des zones refuge qui sont générées en fonction de la hauteur et des caractéristiques de localisation et de hauteur des bâtiments environnants. De plus, l'idée que les personnes cherchent un itinéraire et ne se dirigent pas toujours directement vers la zone refuge la plus proche est présente à travers une probabilité de recherche de chemin lorsque l'on se situe dans une zone d'ombre.

Une division selon 3 scénarios principaux est faite dans le protocole de simulation (Figure 7.3). Ce chapitre concerne les scénarios STEP 1 et STEP 2, qui ont comme distinction principale une variation de hauteur des zones refuge de 5 à 60 mètres. Cette dernière induit une variation des zones de non-visibilité des zones refuge et influe sur les paramètres liés à la visibilité en milieu urbain. Les QR codes ci-dessus (Figure 7.1) sont des liens vers des vidéos du modèle STEP en train de tourner pour deux des scénarios avec cette variation de hauteur des zones refuge.

Dans ce chapitre, il est question de la simulation et de l'analyse des résultats issus de ces simulations de scénarios ne prenant pas en compte le séisme précurseur, c'est-à-dire hors contexte multi-risques. L'isolement des résultats liés à l'influence d'un tremblement de terre avant l'arrivée du tsunami permet une analyse plus claire de l'influence de la lisibilité sur l'évacuation. Les résultats sont traités sous trois formes principales :

- des boîtes à moustaches présentant les pourcentages d'agents *person* ayant atteint la zone refuge ou ayant été rattrapés par l'eau,
- des graphiques montrant la médiane des agents *person* ayant atteint la zone refuge ou ayant été rattrapés par l'eau en fonction du temps,
- des cartes de trafic présentant pour chaque cellule, le nombre total de passages d'agents *person* au cours de la simulation.

Dans un premier temps, les scénarios pris en compte et les paramètres d'initialisation du modèle sont détaillés pour les aléas, la population et les zones refuge ; puis, le protocole de simulation et de sortie de résultats est expliqué. Dans un second temps, les résultats et effets liés aux variables de visibilité des personnes, telles que la vision, l'imitation ou les zones d'ombre sont analysés. Enfin, dans un dernier temps, Les résultats liés à la localisation des zones refuge sont analysés dans la perspective de l'importance du choix des zones refuge pour une évacuation permettant la mise à l'abri d'une majorité de personnes.

## 7.1 Les scénarios et paramètres pris en compte dans les simulations du modèle STEP concernant la lisibilité

Avant d'analyser les résultats, il est important de détailler les conditions de simulation du modèle STEP. Les paramètres sont définis lors de l'initialisation, et certains d'entre eux ont des valeurs différentes en fonction des scénarios. Cela permet d'analyser les résultats concernant la problématique de l'influence de la lisibilité du milieu urbain sur l'évacuation.

### 7.1.1 Initialisation des paramètres des aléas

Lors de l'initialisation, les paramètres concernant les aléas séisme et tsunami sont définis dans l'interface. Ces paramètres sont fixes entre toutes les simulations et les différents scénarios afin de pouvoir mettre en évidence l'influence des autres paramètres qui interviennent plus directement dans le questionnement de la lisibilité urbaine.

#### Séisme

Il n'y a pas de prise en compte du risque sismique dans ces scénarios afin de ne pas influencer les résultats sur la lisibilité par la présence de la variable d'effondrement. Le bouton *Séisme* de l'interface du modèle STEP est donc sur *off*.

#### Tsunami

Un scénario de référence a été choisi pour l'ensemble des scénarios de simulations d'évacuation. Il s'agit de celui du tsunami issu du séisme de la faille Ligure de 1887. Une moyenne a été faite entre les données issues des différents travaux de recherche, notamment pour la hauteur d'inondation (voir chapitre 2, figure 2.23).

La hauteur de l'inondation est sélectionnée dans l'interface directement. Elle est de 3 mètres pour l'ensemble des simulations.

La vitesse de propagation de l'eau est sélectionnée dans l'interface directement. La vitesse issue de la modélisation du tsunami par le CEA se situe entre 22 et 29 km/h (voir chapitre 2, figure 2.23). La vitesse définie à l'initialisation est de 25 km/h pour l'ensemble des simulations.

Le délai d'arrivée du tsunami sur le front de mer est basé sur les données issues du scénario modélisé par le CEA (voir chapitre 6 et chapitre 2, figure 2.23). Le délai d'arrivée après le séisme de la faille Ligure est de 15 minutes. Considérant un délai de réaction de la

population de 5 minutes après le séisme (Sugimoto *et al.*, 2003), l'arrivée du tsunami sur la côte survient donc 10 minutes après le début de la simulation.

Ce délai d'arrivée du tsunami est défini directement dans le code du modèle STEP. Il est signifié en tick avec une valeur de 1 tick = 1 seconde. Le début de la propagation de l'eau dans le modèle STEP est donc défini dans le code à 600 ticks après le début de la simulation car 600 ticks = 10 minutes.

### 7.1.2 Initialisation des paramètres de la population

La population est initialisée en zone inondable, hors cellules bâties et hors de l'eau. Les agents *person* se répartissent aléatoirement sur les cellules répondant à ces critères lors de l'initialisation.

#### Taille de la population

Ce paramètre est fixe à toutes les simulations et est défini directement dans l'interface lors de l'initialisation. Des comptages ont été réalisés dans le cadre d'Astarte qui comptabilise entre 200 et 500 personnes par heure en mars sur la plage (Lavigne, 2016); un autre comptage a été effectué par Robert *et al.* (2008) en été, qui comptabilise entre 300 et 800 personnes par heure sur la plage. En ce basant sur ces chiffres, le nombre d'agents initialisé est défini pour avoir un échantillon important d'agents *person* dans le modèle tout en préservant une fluidité de calcul lors du déroulement de la simulation.

Le nombre d'agents *person* est initialisé à 500 pour l'ensemble des simulations.

#### Vitesse de déplacement

Ce paramètre est fixe à toutes les simulations et est défini directement dans l'interface lors de l'initialisation. La vitesse des agents *person* est fixe durant tout le déroulement de la simulation. La vitesse se base sur des travaux de recherche sur la vitesse moyenne de déplacement en cas d'évacuation qui met en avant des valeurs oscillant entre 4,8 km/h et 5,4 km/h (Mayaguezz, 2015).

La vitesse des agents *person* est initialisée à 5 km/h pour l'ensemble des simulations.

#### Angle de déplacement

Ce paramètre est fixe à toutes les simulations et est défini directement dans l'interface lors de l'initialisation. Le paramètre *noise* permet d'apporter de l'aléatoire dans l'angle de déplacement de l'agent *person*. La valeur ne varie pas mais permet que l'agent ne se déplace pas en ligne droite et considère d'autres angles de déplacement, notamment lorsqu'il cherche son chemin en zone d'ombre (*hidden-shadow ? true*).

L'angle de déplacement *noise* des agents est initialisé à 150 pour l'ensemble des simulations.

### Proportion d'imitateurs

Ce paramètre est variable en fonction des scénarios de simulation. La proportion d'imitateurs dans la population totale des agents *person* est définie directement dans l'interface pour une valeur comprise entre 0 et 100.

Dans la première exploration du modèle, des valeurs de 10% et 20% d'imitateurs ont été choisies à l'initialisation. Ces valeurs permettent de garder une proportion correspondant aux comportements d'imitations observés lors d'évacuation (Sahal, 2011). Cependant, les deux valeurs étant proches, une autre série d'exploration a été effectuée avec une valeur d'imitation de 50% pour les scénarios avec une hauteur de zones refuge à 5 mètres.

### Probabilité de chercher son chemin

Ce paramètre est variable en fonction des scénarios de simulation. La probabilité pour un agent *person* situé en zone d'ombre (*hidden-shadow ? true*) de chercher son chemin est définie directement dans l'interface pour une valeur comprise entre 0 et 1.

Des valeurs de 0.4, 0.2 et 0.1 ont été définies. La valeur de 0.4 correspond aux résultats de l'enquête de terrain qui comptabilise environ 40% de personnes locales présentes sur le terrain (Lavigne, 2014). Des valeurs plus faibles ont également été choisies afin d'envisager une part plus faible de la population connaissant le chemin. Les valeurs les plus faibles ont été testées sur toutes les hauteurs dans un premier temps, puis complétées par une exploration pour 0.4 pour les scénarios avec une hauteur de zones refuge à 5 mètres. Suite à l'analyse des résultats et la faible influence de ce paramètre, il a été choisi de ne pas simuler les autres scénarios afin de se focaliser sur les autres résultats.

### Vision

Ce paramètre est variable en fonction des scénarios de simulation. La vision correspond au rayon dans lequel l'agent *person* va évaluer les cellules à chaque pas. Le paramètre de vision est défini dans l'interface du modèle STEP pour une valeur comprise entre 1 et 5 cellules, soit de 0 à 35,5 mètres.

Le paramètre de *vision* des agents est initialisé à 2 et 3 pour l'ensemble des simulations. Une valeur supérieure a été envisagée mais pose un problème dans le déplacement des agents pouvant considérer des patchs derrière un bâtiment à partir d'une vision égale à 4.

### 7.1.3 Initialisation des paramètres des zones refuge

Les zones refuge *target* sont des agents du modèle STEP. Elles sont les objectifs que doivent atteindre les agents *person* afin d'être considérés comme à l'abri.

#### Nombre

Ce paramètre est fixe à toutes les simulations et est défini directement dans l'interface lors de l'initialisation. Le nombre de zones refuge peut varier de 1 à 5 dans le modèle actuel. Dans tous les scénarios simulés dans le cadre de cette thèse, le nombre de zones refuge a été défini à 3.

#### Hauteur

Ce paramètre est variable en fonction des scénarios de simulation. La hauteur correspond à la hauteur de la zone refuge de manière globale, c'est-à-dire y compris un élément de signalétique permettant de la repérer de loin. Les zones refuge des scénarios testés ne sont pas des zones bâties. Il est cependant possible de positionner une zone refuge sur une construction. De plus, la hauteur de la zone refuge va permettre l'apparition de la zone de non-visibilité (voir chapitres 4 et 6). La hauteur est définie directement dans l'interface pour une valeur oscillant entre 0 et 100 mètres.

Deux hauteurs ont été testées dans les scénarios simulés : 5 mètres et 60 mètres de haut. Ces deux hauteurs ont volontairement été choisies pour leur valeur de grande différence afin de permettre la mise en valeur de l'effet de la visibilité et de la variable dans l'analyse des résultats.

#### Localisation

La localisation est variable en fonction des scénarios de simulation. Lors de l'initialisation, il fut choisi un positionnement pour chaque zone refuge. Cela signifie que le paramètre *random* de positionnement aléatoire des zones refuge pouvant être activé dans l'interface est sur *off*. Le paramètre *move-target* qui permet de déplacer manuellement une zone refuge dans l'environnement du modèle n'est pas utilisé dans les scénarios simulés.

Les trois zones refuge *target* présentes dans les scénarios simulés vont avoir une localisation définie au préalable. Les trois zones refuge des scénarios sont situées selon deux configurations (Figure 7.2) :

- Configuration 1 – ZR1 : une localisation en bordure de la zone inondable. Cette localisation correspond à une évacuation verticale avec des zones refuge bâties qui permettent de ne pas avoir à parcourir une distance importante entre la plage et la mise à l'abri.

- Configuration 2 – ZR2 : une localisation en altitude, à une plus grande distance de la plage. Cette localisation correspond aux intentions des personnes interrogées renseignées dans les cartes mentales des enquêtes de terrain (Lavigne, 2014) (voir chapitre 4). Cette configuration s'apparente à celle d'une évacuation horizontale visant à sortir de la zone de danger, mais nécessitant de parcourir une distance plus longue pour se mettre à l'abri.

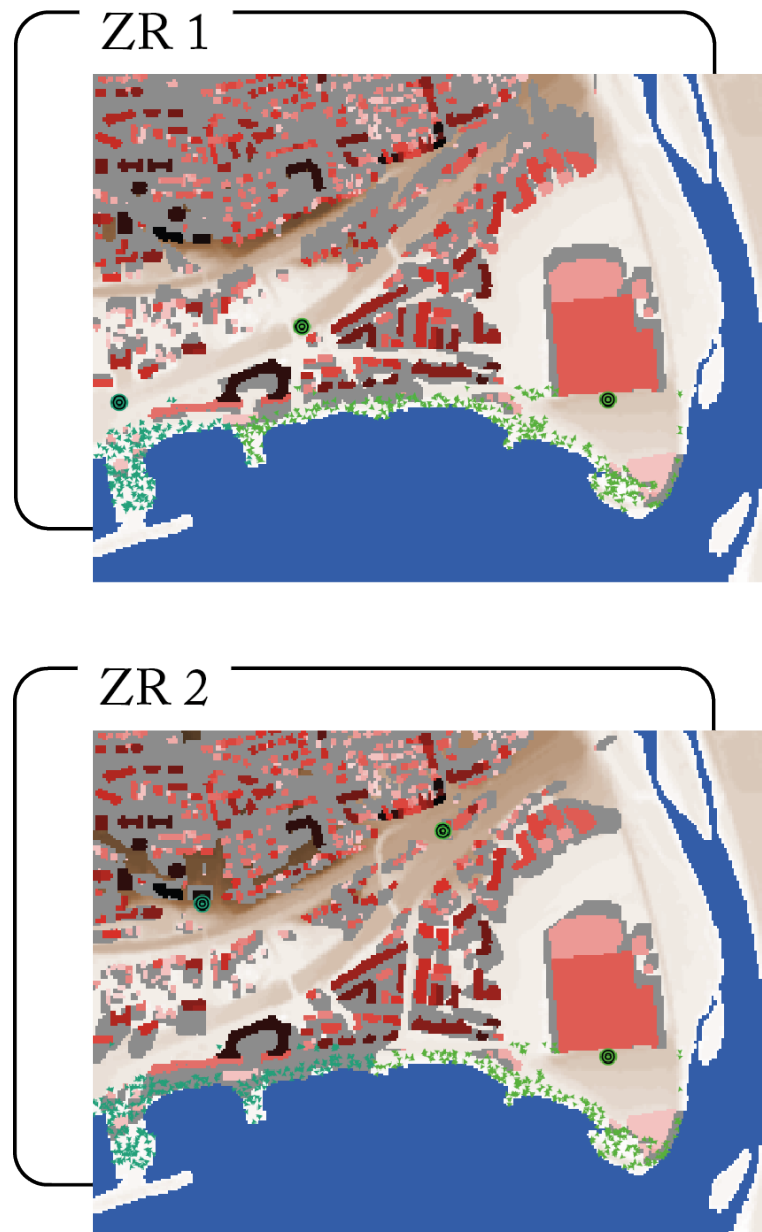


FIGURE 7.2 – Vues de l'interface du modèle STEP pour les localisations des zones refuge ZR1 et ZR2.

Réalisation : Plattard, O., 2019.



7.1.4 Protocole de simulation




	ALEAS	ZONES REFUGES		AGENTS <i>PERSON</i>		
	SEISME	LOCALISATION Proche = ZR1 Loin = ZR2	HAUTEUR (valeur en mètres)	VISION (valeur : 1 à 5)	TAUX D'IMITATION (valeur en pourcentage)	PROBABILITE DE CHERCHER SON CHEMIN (valeur : 0 à 1)
<p>STEP 1</p> 	NON	ZR 1 ZR 2	5	2 3	10 20 50	0,6 0,8 0,9
<p>STEP 2</p> 	NON	ZR 1 ZR 2	60	2 3	10 20	0,8 0,9
<p>STEP 3</p> 	OUI	ZR 1 ZR 2	60	2 3	10 20	0,8 0,9

FIGURE 7.3 – Scénarios STEP 1 et STEP 2 et valeurs des variables simulées et analysées dans ce chapitre.

Réalisation : Plattard, O., 2019.

Dans ce chapitre, sont analysés les résultats issus des scénarios de simulation d'évacuation sans séisme précurseur. Il s'agit des scénarios STEP 1 et STEP 2 (Figure 7.3). Dans un premier temps, l'analyse de ces deux scénarios permet de mettre en avant l'influence des

différents paramètres ayant un rôle dans la variable de lisibilité, sans influence du contexte multi-risques.

Pour chaque configuration de scénario, 100 répliques du modèle ont été effectuées. Ces simulations ont permis de générer plusieurs résultats :

- Une sortie d'indicateurs du nombre d'agents *person* ayant atteint les zones refuge (en pourcentage) et d'agents *person* ayant été rattrapés par l'eau (en pourcentage) pour chaque simulation.
- Une sortie d'indicateurs du nombre d'agents *person* ayant atteint les zones refuge (en pourcentage) et d'agents *person* ayant été rattrapés par l'eau (en pourcentage) pour chaque pas de temps (en tick) durant la simulation.
- Une sortie de fichier raster d'une carte de trafic comptabilisant le nombre de passages d'agents *person* par cellule durant la simulation.

## 7.2 Analyse générale des résultats et influence des différents paramètres

Dans ce chapitre, sont analysés les résultats issus de la variation de cinq paramètres influant sur la lisibilité de l'espace urbain :

- Hauteur des zones refuge
- Nombre d'imitateurs
- Probabilité de chercher son chemin dans une zone de non-visibilité des zones refuge
- Vision
- Localisation des zones refuge

Dans un premier temps, des résultats sous forme de boîtes à moustaches sont analysés. Il s'agit de mesurer l'effet de la variation de chaque paramètre toutes choses égales par ailleurs (Figure 7.4). Pour chaque variable, le graphique décompose les résultats entre le pourcentage du nombre de personnes ayant rejoint les zones refuge, les "sauvés" (en vert), et le pourcentage du nombre de personnes ayant été touchées par l'eau, les "victimes" (en rouge). Il peut être souligné que dans la majorité des cas, pour chaque variable, les résultats montrent une plus grande part d'agents "sauvés" que d'agents "victimes".

Dans un second temps, les résultats sous forme de tableau présentant les valeurs minimum et maximum, des quantiles et des médianes du nombre d'agents "sauvés" ou "victimes" viendront en appui de la représentation sous forme de boîtes à moustaches. Un test d'égalité des médianes de Willcoxon a été réalisé. La *p-value* renseigne la significativité de la différence entre les médianes (de "sauvés" ou de "victimes") prises pour chacune des modalités des paramètres intra-scénarios STEP 1 et 2 (Localisation des zones refuge, vision des agents, proportion d'imitateur et probabilité des chercher son chemin) et inter-scénarios STEP 1 et 2 pour les paramètres de hauteur des zones refuge. Plus la valeur *p-value* est basse (proche de 0), plus les médianes sont différentes (relation statistique significative) et donc plus le paramètre produit des différences dans les résultats du nombre de "sauvés" et "victimes", et inversement.

Dans un troisième temps, des résultats sous forme de graphiques présentant les médianes du nombre d'agents "sauvés" ou "victimes" pour chaque scénario permettent une analyse en fonction du temps de l'évacuation. Ces résultats en fonction du temps viennent compléter les analyses des résultats présentées auparavant. Ces médianes ont été calculées sur la base des résultats des 100 simulations pour chaque scénario.

Enfin, dans un dernier temps, ces résultats sont complétés par une analyse des cartes de trafic présentant le nombre de passages des agents *person* par cellule. Ces cartes de trafic présentent les résultats agrégés pour l'ensemble des 100 simulations pour chaque scénario. Les cartes de trafic permettent notamment une visualisation des effets d'encombres lors de l'évacuation et sont davantage utilisées lors des analyses plus détaillées en 7.3.

A première vue des résultats, quelques éléments sont observables. Toutes les variations

de variables n'ont pas les mêmes effets sur les résultats issus du modèle. Les boîtes à moustaches de la figure 7.4 mettent en valeur des écarts importants des résultats pour la localisation des zones refuge avec des variations plus faibles pour les autres variables qui, quant à elles, présentent une grande étendue. Ces résultats sont confirmés par les valeurs de la figure 7.5, qui présentent les écarts des résultats pour les scénarios STEP 1 et STEP 2. Ils mettent en avant, l'écart important des valeurs des résultats entre les deux localisations des zones refuge, ainsi que la significativité de la différence entre les médianes. La vision est également mise en avant comme ayant des écarts de résultats importants, tandis que les autres variables ont des différences moins significatives.

En ce qui concerne le paramètre de variation de la hauteur des zones refuge sur laquelle sont basés les scénarios STEP 1 et STEP 2, il a été choisi des valeurs avec un grand écart : 5 mètres et 60 mètres. L'intention du choix de ces valeurs extrêmes est d'effectuer une pré-analyse de l'impact de la hauteur des zones refuge sur les résultats. La figure 7.4 illustre que, tenant compte de l'ensemble des scénarios, la variation des résultats entre une hauteur de 5 mètres et une de 60 mètres est minime. En effet, pour les deux hauteurs, les médianes des résultats ont des valeurs proches – entre 69,1 et 73,9% pour les "sauvés" et 23,8 et 25% pour les "victimes" – (Figure 7.5). Les valeurs des quantités extrêmes subissent également peu de variations entre les deux hauteurs .

Ces premiers résultats montrent donc que l'impact du changement de hauteur n'a peut-être pas l'influence directe escomptée sur les résultats de l'évacuation. D'autres simulations avec des valeurs intermédiaires ne sont donc pas nécessaires. Cependant, une analyse plus détaillée est réalisée dans la suite de ce chapitre.

Lors de la première série de simulations, les résultats des proportions d'agents *person* imitateurs et cherchant leur chemin n'ont pas été traités séparément. Des valeurs de 10 et 20% ont été paramétrées. L'analyse des résultats montre une faible variation des résultats correspondants aux différentes valeurs (Figure 7.4). Cet effet est confirmé par la figure 7.5, avec des écarts de moins de 5 points entre les valeurs des résultats pour les "sauvés" et les "victimes".

Ce choix initial a été fait afin de ne pas multiplier les scénarios. Cependant, il est apparu très rapidement que ces variables nécessitent des valeurs de départ plus importantes ainsi qu'un traitement séparé de leurs données. Des valeurs plus importantes de 50% d'imitateurs et de 40% de personnes connaissant le chemin vers la zone refuge – valeur correspondant au 40% de locaux ayant répondu aux enquêtes – permettent de mieux observer l'influence de ce paramètre sur l'évacuation.

Le paramètre de vision fait varier le rayon du nombre de cellules prises en compte par l'agent *person* lors de son déplacement. Les valeurs de 2 et 3 cellules ont été retenues dans les scénarios simulés. Dans la figure 7.4, on observe qu'il y a une variation des valeurs des boîtes à moustaches entre les deux visions. Une différence de près de 15% est visible

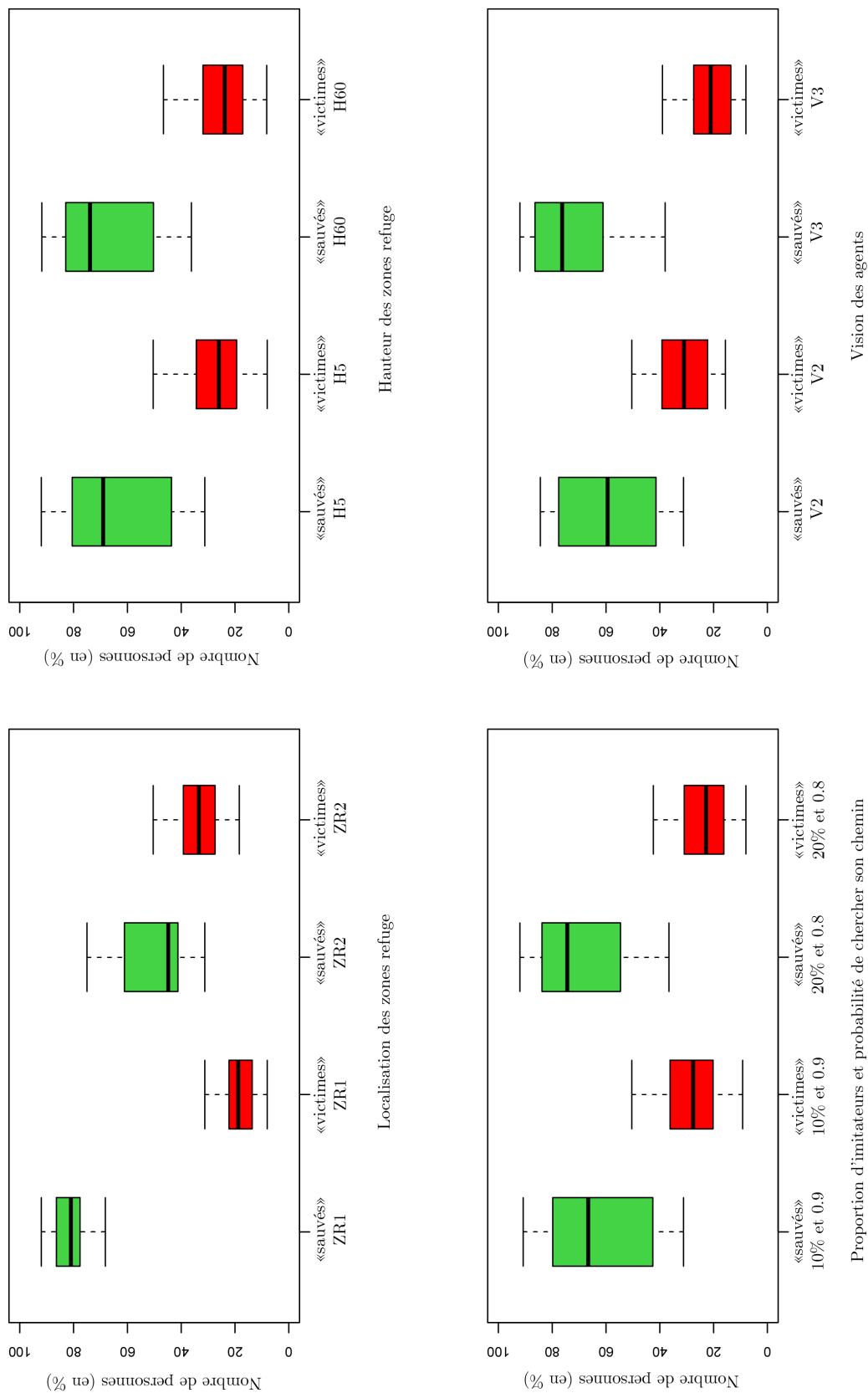


FIGURE 7.4 – Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes", en rouge) pour les différentes variables.

Réalisation : Plattard, O., 2019.

Paramètres d'initialisation	Valeurs du nombre de "sauvés" (en %)					Valeurs du nombre de "victimes" (en %)				
	minimum	1er quantile	médiane	3ème quantile	maximum	minimum	1er quantile	médiane	3ème quantile	maximum
Localisation des zones refuge										
ZR1	67	77	80,8	85,6	92,2	5,8	13,75	19	22,85	33
ZR2	31,2	39,55	44	62,4	71,4	18,4	26,2	34	39,2	50,4
Vision des agents										
V2	31,2	39,6	58,8	77,2	84,4	15,4	22,8	31,3	39,2	50,4
V3	38	62,4	72,9	85,6	92,2	5,8	13,75	21,4	26,2	39
Proportion d'imitateurs (en %)										
10	31,2	41,95	68,9	79,8	90,8	9,2	20,2	27	36,05	50,4
20	36,6	56,6	72,3	84	92	8	15,95	23	31,05	42,4
50	35	52,55	69,1	82,05	92,2	5,8	17,8	24,1	31,45	44,2
Probabilité de chercher son chemin dans les zones de non-visibilité des zones refuge (0 à 1)										
0,6	33,6	40,05	67,6	79,6	87,2	12	20,25	23,4	35,75	43,8
0,8	35,8	52,55	69,2	82	92,2	5,8	18	23,6	31,25	44,2
0,9	31,2	40,2	59,3	77,65	85,4	14,4	22,1	29,5	38,2	50,4
<b>TOTAL STEP1 (H5 sans séisme)</b>	<b>31,2</b>	<b>44</b>	<b>69,1</b>	<b>80,8</b>	<b>92,2</b>	<b>5,8</b>	<b>19</b>	<b>25</b>	<b>34</b>	<b>50,4</b>
Localisation des zones refuge										
ZR1	72,8	78,35	82,9	86,8	91,8	8,2	13,2	17,1	21,6	27
ZR2	36,2	42,2	50,3	62,7	75	18,8	26,8	31,9	38,4	46,6
Vision des agents										
V2	36,2	42,2	60,8	78,25	83,2	16,8	21,6	28,9	38,4	46,6
V3	51,8	62,9	78,7	86,8	91,8	8,2	13,2	18,2	26,8	32,6
Proportion d'imitateurs (en %)										
10	36,2	50,4	68,9	82,25	90,8	9,2	17,6	25,5	33,35	46,6
20	38,2	58,4	75	83,2	91,8	8,2	16,8	22,8	30,8	40,2
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Probabilité de chercher son chemin dans les zones de non-visibilité des zones refuge (0 à 1)										
0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,8	38,2	58,4	75	83,2	91,8	8,2	16,8	22,8	30,8	40,2
0,9	36,2	50,4	68,9	82,25	90,8	9,2	17,6	25,5	33,35	46,6
<b>TOTAL STEP2 (H60 sans séisme)</b>	<b>36,2</b>	<b>51,05</b>	<b>73,9</b>	<b>82,85</b>	<b>91,8</b>	<b>8,2</b>	<b>17,15</b>	<b>23,8</b>	<b>31,85</b>	<b>46,6</b>
<b>TOTAL STEP1 (H5 sans séisme)</b>	<b>31,2</b>	<b>44</b>	<b>69,1</b>	<b>80,8</b>	<b>92,2</b>	<b>5,8</b>	<b>19</b>	<b>25</b>	<b>34</b>	<b>50,4</b>
<b>TOTAL STEP2 (H60 sans séisme)</b>	<b>36,2</b>	<b>51,05</b>	<b>73,9</b>	<b>82,85</b>	<b>91,8</b>	<b>8,2</b>	<b>17,15</b>	<b>23,8</b>	<b>31,85</b>	<b>46,6</b>

\* Test d'égalité des médianes de Wilcoxon. La p-value renseigne la significativité de la différence entre les médianes (de "sauvés" ou de "victimes") prises pour chacune des modalités des paramètres intra-scénarios STEP (Localisation des zones refuge, vision des agents, proportion d'imitateur et probabilité de chercher son chemin) et inter-scénarios STEP pour les paramètres de hauteur des zones refuge et de présence de séisme. Plus la valeur p-value est basse (proche de 0), plus les médianes sont différentes (relation statistique significative) et donc plus le paramètre produit des différences dans les résultats du nombre de "sauvés" et "victimes", et inversement.

FIGURE 7.5 – Valeurs du nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ou ayant été rattrapées par l'eau par variable, pour les scénarios STEP 1 et STEP 2 et valeur d'égalité des médianes selon le test de Willcoxon.

Réalisation : Plattard, O., 2019.

entre les deux valeurs au bénéfice de la vision 3 qui cumule plus de "sauvés" et moins de "victimes". Cet écart est confirmé par les résultats figure 7.5 qui mettent en avant la significativité de la différence des médianes du nombre de "sauvés" et de "victimes" pour les visions 2 et 3.

Une analyse plus détaillée qui est développée ci-après permet de mettre en avant l'influence de la variation des valeurs de vision sur l'évacuation. Néanmoins, il est déjà observable que ce paramètre a une influence importante sur la visibilité du piéton lors de l'évacuation et sur sa capacité de mise à l'abri.

Enfin, les résultats permettent l'analyse de l'influence de la localisation des zones refuge selon les deux configurations proche ou lointaine. La figure 7.4 montre la variation importante des résultats des différentes simulations entre les deux configurations de localisation des zones refuge. Un écart de 44 points est observable entre les valeurs médianes des résultats du nombre de "sauvés" et de 15% pour les "victimes" en STEP 1 et de 32% pour les sauvés en STEP 2, puisque la hauteur de 60 m des zones refuge permet de ne pas avoir une valeur médiane du nombre de "sauvés" en dessous de 50%. La différence de ces médianes des résultats entre les deux localisations est significative pour les scénarios STEP 1 et STEP 2. De plus, il s'agit de la seule variable ayant une médiane située en-dessous de 50% pour le nombre d'agents "sauvés"; il s'agit de la configuration ZR2, avec des zones refuge situées loin de la plage.

Les boîtes à moustaches de la variable de localisation présentent une étendue plus faible que pour les autres variables – 15 points pour le nombre de "sauvés" en ZR1 et 20 points en ZR2 –. Les résultats généraux présentés dans cette figure pour la variable de localisation des zones refuge montrent une grande influence du choix de la localisation sur le pourcentage d'agents *person* "sauvés" ou "victimes". Il est donc nécessaire de regarder ces résultats plus en détail.

Lorsque l'on observe les résultats sous forme de graphiques qui mettent en relation le pourcentage d'agents *person* "sauvés" ou "victimes" en fonction du temps en ticks (un tick = une seconde), plusieurs éléments sont mis en avant. Tout d'abord, l'analyse des courbes de moyennes et de médianes des 100 simulations pour chaque scénario ne met en avant que des variations minimales (voir annexe 8.4). Le choix est de présenter les résultats sous forme de médianes des 100 simulations afin de garder une facilité de lecture avec les résultats sous forme de boîte à moustaches.

De plus, au niveau des courbes présentant les médianes du nombre de "sauvés" – et également pour les "victimes", mais de façon moins claire – pour les 16 types de scénarios simulés, une division est visible (Figure 7.6); 8 scénarios ont des résultats 20 à 40% plus élevés pour les "sauvés" et 15% plus faibles pour les "victimes" que les 8 autres. Il s'agit des scénarios ayant la localisation des zones refuge en ZR1. Les courbes accentuent d'autant plus l'effet de la localisation en mettant en avant que les scénarios avec ZR1 ont un pourcentage maximum de "sauvés" atteint plus tôt, avant l'arrivée de l'inondation – soit

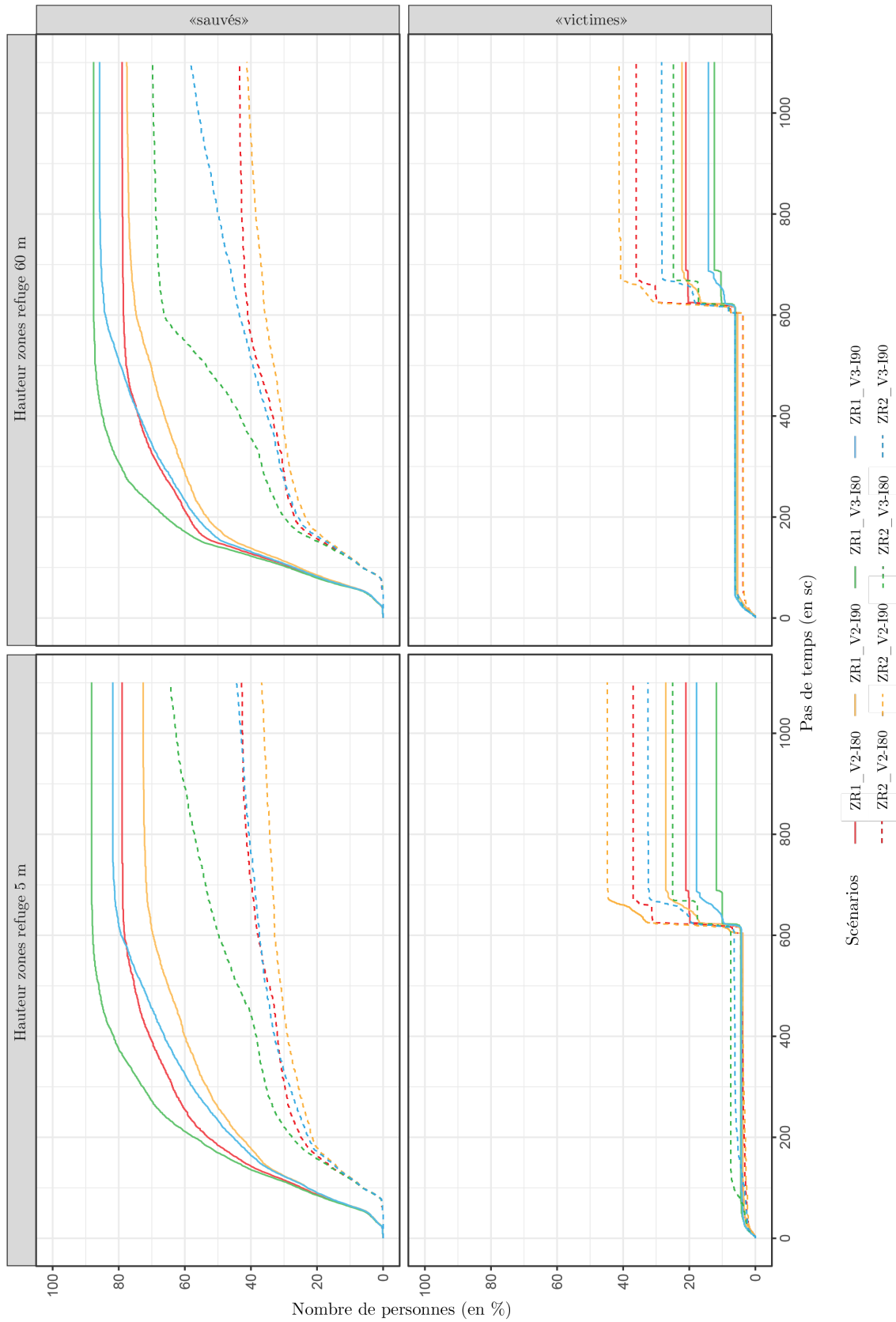


FIGURE 7.6 – Moyennes du nombre de personnes ayant atteint les zones refuge "sauvés", ou ayant été rattrapées par l'eau "victimes", en fonction du temps pour les différents scénarios simulés STEP 1 et STEP 2.

Réalisation : Plattard, O., 2019.



à 600 ticks –, que pour ceux en ZR2 pour lesquels les courbes continuent leur progression plus longtemps, sans effet de palier atteint avant la fin de la simulation. Une sous-division de ces deux groupes peut être également observée avec des résultats montrant un nombre plus élevé de "sauvés" pour les scénarios en vision 3 (Figure 7.6).

Enfin, sur la figure 7.6, au niveau des courbes médianes pour le nombre d'agents "victimes", une augmentation importante est visible entre les ticks 600 et 700. Cette progression instantanée du nombre de "victimes" est liée à l'arrivée du tsunami et au début de l'inondation. La progression de l'eau sur la terre va toucher rapidement les agents se trouvant encore proches de la plage et n'ayant pas trouvé de chemin jusqu'à une zone refuge ; cela amène une augmentation rapide du nombre d'agents "victimes", touchés par l'eau. De petits paliers peuvent apparaître également montrant l'effet de certaines zones de non-visibilité des zones refuge plus éloignées du front de mer et ayant retardé la mise à l'abri des agents.

La figure 7.5 présentant les valeurs des résultats pour le nombre de "sauvés" et "victimes" permet la mise en valeur de l'influence des variables en commençant par la localisation des zones refuge qui a la différence des médianes la plus significative, puis la vision, et enfin l'imitation et la probabilité de chercher son chemin avec la différence entre les médianes les moins significatives.

Les résultats sont détaillés ci-après avec, dans un premier temps, les variables concernant directement les agents *person* et leur visibilité : la hauteur des zones refuge, la proportion d'imitateurs et de personnes cherchant leur chemin ainsi que la vision. Le traitement des résultats concernant la localisation des zones refuge fait l'objet d'une autre sous-partie, ce paramètre ayant une forte influence, mais ne constituant pas directement la construction de la lisibilité des agents.

### 7.3 Quelle visibilité pour les personnes ?

Certains paramètres choisis à l'initialisation du modèle STEP ont un effet sur la visibilité des agents *person*, comme la hauteur des zones refuge avec la création des zones d'ombre et la probabilité pour un agent de chercher son chemin. A cela s'ajoutent la proportion d'imitateurs et la variation de la vision des agents. Les résultats des simulations de différents scénarios détaillés ci-après nous permettent d'analyser l'effet de chacun de ces paramètres, en effets combinés ou non, sur l'évacuation. La figure 7.7 illustre significativement les effets de différents paramètres et sert de base d'analyse, les autres résultats sont placés en annexes 8.4.

#### 7.3.1 Influence du paramètre de la hauteur des zones refuge sur l'évacuation

De manière générale, le paramètre de hauteur des zones refuge a une influence plus faible sur l'évacuation qu'envisagé a priori avec des valeurs extrêmes de 5 et 60 mètres. En effet, les effets croisés entre le paramètre de la hauteur et les autres variables montrent une influence minimale – moins de 10% d'écart – sur les résultats de ce changement conséquent de hauteur (annexes 8.4). Cette planche de résultats (figure 7.7) met cependant en avant un effet de la hauteur de 60 mètres pour les zones refuge dans deux configurations :

- lorsque l'imitation est faible (10%) et la probabilité de chercher son chemin est forte (90%), le paramètre de zone refuge a une influence sur le nombre d'agents *person* ayant rejoint une zone refuge faisant passer la médiane d'environ 60% à 70%. La variation est très faible lorsque l'on est dans une configuration avec 20% d'imitateurs et 80% de probabilité de chercher son chemin.
- lorsque la localisation des zones refuge est plus éloignée du front de mer – ZR2 –, la hauteur des zones refuge à 60 mètres a une influence sur le nombre d'agents *person* "sauvés" en plaçant une médiane à environ 50% contrairement aux résultats des scénarios à 5 mètres.

Le paramètre de hauteur a peu d'effet sur l'évacuation mais, afin de regarder plus en détail les résultats montrant une variation, il convient de se pencher sur les résultats d'effets combinés de plusieurs paramètres.

Les résultats des effets combinés pour les variables de hauteur, de vision ainsi que de proportion d'imitateurs et de probabilité de chercher son chemin, montrent également une faible variation entre les hauteurs de 5 et 60 mètres (annexes 8.4). Comme pour les effets croisés analysés précédemment, une faible variation apparaît au bénéfice de la hauteur de 60 mètres en cas de faible proportion d'imitateurs ; cette variation est plus visible en vision 3 que en vision 2, avec une réduction de l'étendue des résultats dans la configuration de vision 3, hauteur de 60 mètres.

Cet effet combiné de la hauteur, de la proportion d'imitateurs et de probabilité de cher-

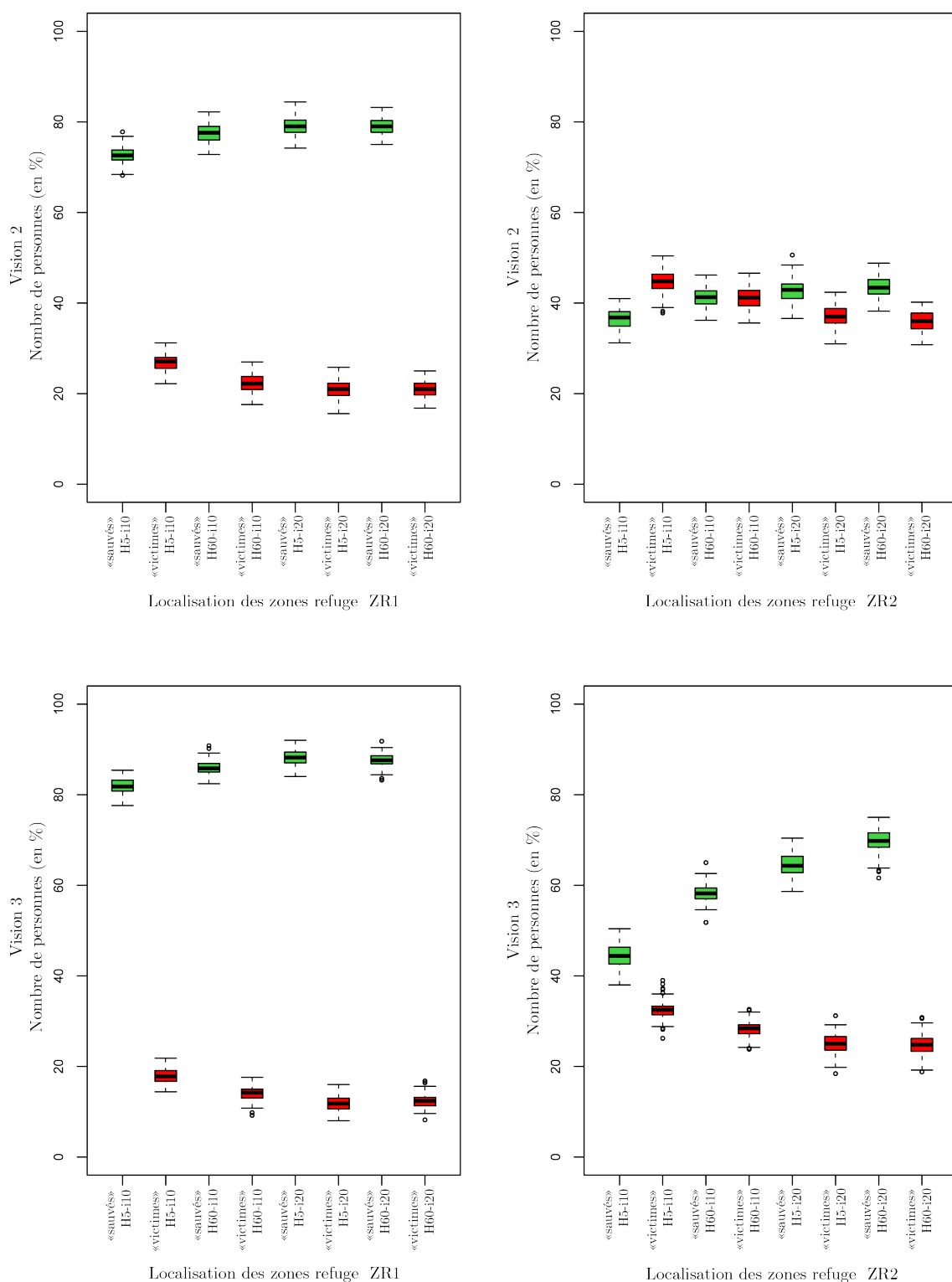


FIGURE 7.7 – Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes", en rouge) selon les paramètres de vision (2 ou 3), la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR2), la hauteur des zones refuge (5 ou 60 m) et le nombre d'imitateurs et de probabilité de chercher son chemin (10 ou 20%).

Réalisation : Plattard, O., 2019.

cher son chemin est également confirmé lorsque l'on combine toutes les variables (Figure 7.7 et annexes 8.4). En effet, les résultats mettent en avant des profils variant peu entre les différentes configurations lorsque la localisation des zones refuge n'est pas prise en compte. L'influence de la hauteur sur le nombre d'agents *person* "sauvés" et "victimes" a un effet minime – moins de 5% de variation – pour les différents scénarios avec une localisation des zones refuge ZR1. En revanche, des effets sont observables dans les configurations ZR2 :

- en vision 2, les médianes des boîtes à moustaches pour chaque scénario sont en dessous de 50%. Néanmoins, dans la configuration de 10% d'imitateurs, la hauteur de zone refuge à 60 mètres permet d'augmenter le nombre d'agents *person* "sauvés", inversant ainsi la tendance en réduisant la part de simulation ayant plus de "victimes" que de "sauvés".
- en vision 3, les résultats ont une variabilité importante. Pour un taux d'imitateurs et d'agents cherchant leur chemin de 10%, la hauteur de la zone refuge a un effet important. A 60 mètres de hauteur, elle permet de garantir plus de 50% d'agents "sauvés". Dans la configuration avec 20% d'imitateurs et d'agents cherchant la zone refuge, l'influence de la hauteur a un effet beaucoup plus restreint avec cependant un peu plus d'agents sauvés pour la hauteur de 60 mètres.

De manière générale, sur la figure 7.6, le paramètre de hauteur ne montre pas une influence importante. Néanmoins, lorsque l'on observe les courbes de manière plus détaillée, il ressort que pour chaque "sous-groupe", les scénarios avec une hauteur de zones refuge de 60 mètres présentent un pourcentage de "sauvés" supérieur de 20 à 40% à celui des scénarios pour une hauteur de 5 mètres. Cette tendance est confirmée par la comparaison des scénarios par les figures 7.13 et 7.14.

De plus, la comparaison des courbes par scénarios STEP 1 et STEP 2 (Figures 7.13 et 7.14) mettent en avant une temporalité plus courte pour les agents de rejoindre les zones refuge lorsque la hauteur est à 60 mètres, visible en ZR1. La durée pour avoir 50% de "sauvés" est plus courte dans une configuration ZR1, avec comme optimum le scénario en vision 3 et 20% d'imitation.

Les cartes de trafic permettent d'observer les dynamiques de déplacement des agents *person* pour les configurations pour lesquelles les boîtes à moustaches montrent une variation de résultats en fonction des différentes hauteurs (Figure 7.8). Dans le cas de la localisation des zones refuge en ZR2 pour une vision des agents de 3 et un niveau d'imitateurs et de probabilité de chercher son chemin de 10%, la hauteur des zones refuge semble avoir un effet (Figure 7.7). Les cartes de trafic montrent le nombre de passages d'agents *person* par cellule pour tous les scénarios de la configuration concernée.

La comparaison des deux cartes nous montre un plus grand nombre de passages sur les cellules lorsque la hauteur est de 5 mètres. La prédominance de la couleur rouge foncée, montrant un niveau élevé de passages sur une cellule, traduit le fait qu'à une hauteur de 5 mètres, les zones d'ombre (*hidden-shadow*) sont plus importantes, laissant à l'agent *person*



FIGURE 7.8 – Cartes de trafic pour les configurations en localisation ZR2, vision 3, imitateurs et probabilité de chercher son chemin 10%, hauteur de zones refuge à 5 mètres (en haut) et à 60 mètres (en bas).

Sources : Plattard, O. et Chalonge, L., 2019

une surface plus grande où il a une forte probabilité de chercher son chemin. Ces zones de trafic important sont présentes à davantage d'endroits, et ce tout au long de l'itinéraire jusqu'à la zone refuge. Cela laisse supposer des encombrements de voirie ; une analyse des cartes de trafic de chaque scénario permettrait éventuellement de faire émerger certaines dynamiques d'obstruction.

L'observation de ces deux cartes permet également de mettre en avant que davantage d'agents semblent rejoindre les zones refuge lorsque leur hauteur est de 60 mètres. En effet, les traces claires sont plus étendues que pour la carte de trafic concernant les simulations avec les zones refuge de 5 mètres de haut.

Enfin, dans les deux cas, le front de mer construit semble créer une barrière générant du trafic puisque créant une zone d'ombre. Proche des immeubles du front de mer, les agents ont un taux de passages élevé par cellule. Ce dernier s'atténue fortement pour la suite de l'itinéraire pour les deux scénarios, bien que de forts points de congestion sont toujours présents à l'ouest pour une hauteur de 5 mètres.

La variable de hauteur des zones refuge n'a donc pas d'effet important sur les résultats issus des différentes configurations simulées. Il convient néanmoins d'analyser les résultats de l'imitation et de la probabilité de recherche en zone d'ombre, ces zones étant directement générées par la hauteur des zones refuge. Même si l'effet de la hauteur est globalement minime, il permet de garantir un pourcentage d'agents "sauvés" supérieur dans la configuration à 60 mètres qu'à 5 mètres de hauteur ; cet effet est d'autant plus important que les zones refuge sont éloignées du bord de mer et que les agents ont un itinéraire plus long à parcourir.

De plus, la grande hauteur de zone refuge semble réduire le nombre de passages des agents par cellules, ce qui sous-entend moins de recherche de chemin par les agents qui arrivent plus facilement à rejoindre une zone de visibilité des zones refuge. Ces différentes analyses sont néanmoins à mettre en perspective avec les résultats concernant les autres variables.

Le faible effet de la variation de hauteur montré par l'analyse sous différentes formes des résultats des simulations pose question. En effet, le fait que des effets de cette variable soient visibles avec la localisation des zones refuge ZR2 induit une influence des zones d'ombre sur l'évacuation. Néanmoins, dans la configuration ZR1, pour les deux hauteurs de zones refuge, le front de mer se retrouve dans la zone d'ombre (Figure 7.9). Cet effet pourrait être qualifié d'effet de site dû aux constructions importantes du bord de mer à Saint-Laurent-du-Var (voir chapitre 2). Dans le cas en ZR2, la hauteur des zones refuge a une influence sur l'itinéraire des agents une fois sortis de la zone d'ombre du front de mer, amenant une variation dans les résultats.

Afin de confirmer cette hypothèse, il semblerait nécessaire de réaliser des simulations sur un autre site en adaptant le modèle STEP à un territoire ne présentant pas cette caractéristique forte de front de mer bâti comme à Saint-Laurent-du-Var. De plus, l'insertion

de signalétique pouvant guider les agents tout au long de leur itinéraire jusqu'aux zones refuge est aussi une évolution à apporter au modèle STEP. Cet ajout compléterait le rôle de la hauteur pour la construction de la variable de visibilité.

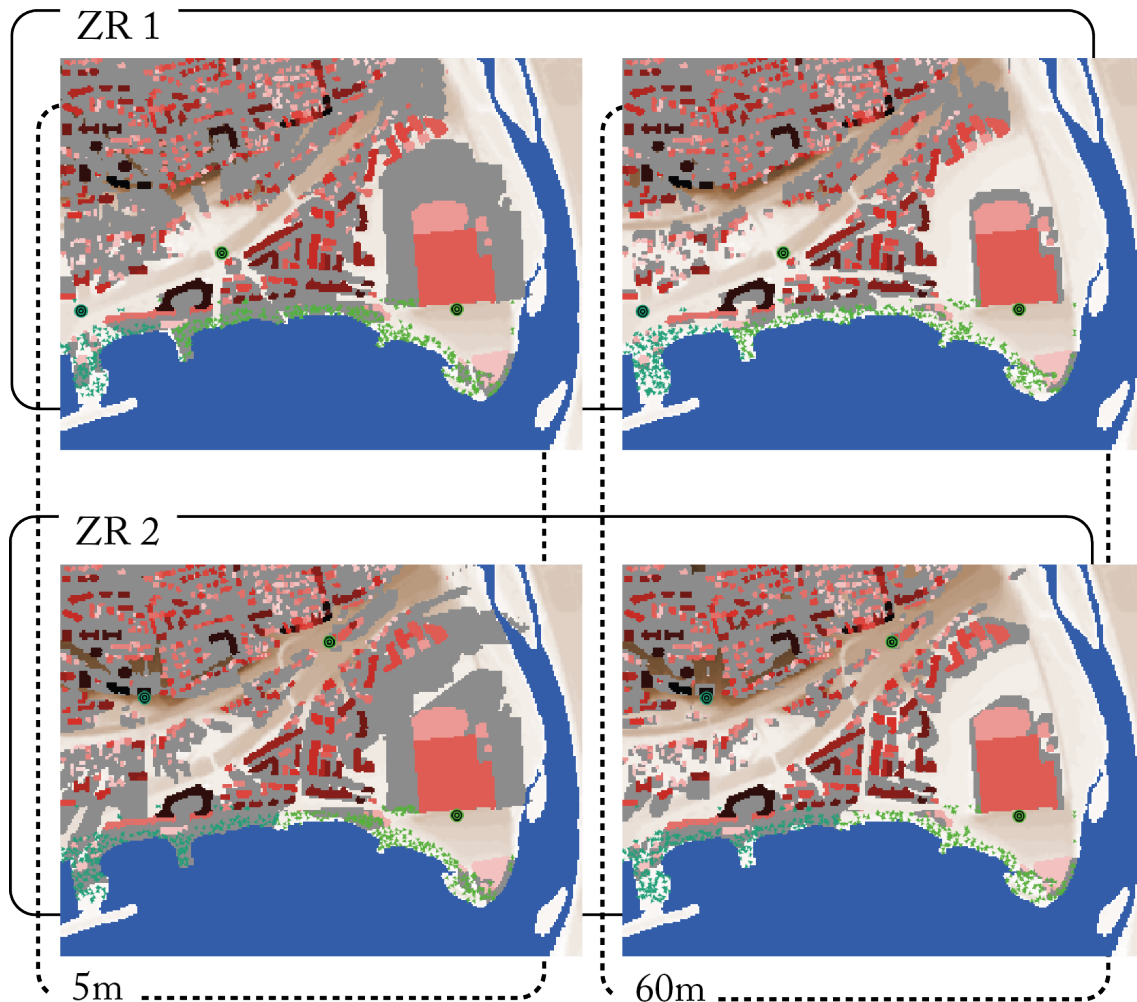


FIGURE 7.9 – Vues du modèle STEP à l’initialisation pour les localisation de zones refuge ZR1 et ZR2 (ligne) et pour des hauteurs de 5 mètres et 60 mètres (colonne).

Réalisation : Plattard, O., 2019.

### 7.3.2 Influence du nombre d’imitateurs et de la probabilité de chercher son chemin ?

Comme il a été vu à un niveau général, l’influence du pourcentage d’imitateurs et de probabilité de chercher son chemin dans les zones d’ombre semble être faible – moins de 10% de variation des résultats –. Néanmoins, une analyse des résultats à travers les effets croisés avec les autres variables est nécessaire.

Les résultats des effets croisés entre le nombre d’imitateurs (10 et 20%) et la probabilité

de chercher son chemin (0.8 et 0.9) et les autres variables (annexes 8.4) montrent une faible variation. Néanmoins, quelques résultats présentent un effet de la part d'imitateurs à 20% lors d'une hauteur de zones refuge de 5 mètres. De manière générale, il semble que le taux d'imitateurs à 20% garantisse une part plus importante d'agents "sauvés" que le taux de 10% (annexes 8.4) ; ce dernier taux étant le seul pour lequel on observe une valeur d'agents "sauvés" inférieur à 50% pour une localisation ZR2 (annexes 8.4).

Le taux d'imitation à 20% montre aussi un effet pour une localisation ZR2, toutes choses égales par ailleurs pour la hauteur et la vision, avec une médiane supérieure à 50% pour les "sauvés" (annexes 8.4). Cet effet pour un taux d'imitateurs de 20% est également visible sur la figure 7.7, de manière prononcée pour une configuration en vision 3 avec une localisation des zones refuge ZR2, pour les deux hauteurs de zones refuge avec environ 20% d'écart avec les résultats pour un taux d'imitateurs à 10% ; c'est également le cas de manière minimale en vision 2 et ZR2, avec une hauteur de 5 mètres, où le taux de 20% d'imitateurs permet d'inverser les résultats en permettant de conserver plus d'agents "sauvés" que d'agents "victimes".

De plus, les premières valeurs choisies étant 10 et 20% d'imitateurs et une probabilité de recherche de chemin de 0.8 et 0.9, de nouvelles simulations ont été effectuées avec des valeurs plus importantes d'imitation à 50% et de probabilité de recherche à 0.6 (Figure 7.10). Ces nouveaux scénarios ont été testés dans un premier temps pour une hauteur de zones refuge de 5 mètres, car les analyses des résultats des premiers scénarios montrent des variations plus importantes – bien que de quelques pourcentages – à cette hauteur.

Avec ces nouveaux résultats, la tendance de la faible influence de ces deux variables est confirmée puisque l'on observe une variation de quelques pourcentages entre la probabilité de recherche de chemin à 0.8 et 0.9 et la proportion d'imitateurs à 20% et 50% (Figure 7.10). Une légère hausse d'agents "sauvés" apparaît en vision 3 pour une probabilité de chercher son chemin de 0.6 (annexes 8.4).

En effets croisés, l'influence de ces variables reste tout aussi minimale, bien qu'une tendance de baisse de nombre d'agents "sauvés" est observable lorsque la proportion d'imitateurs est à 50%, pour toutes les valeurs de recherche de chemin (annexes 8.4). Il y a donc un effet de seuil de baisse du nombre de sauvés. Cette tendance peut être expliquée par le fait qu'un agent *person* imitateur va suivre un autre agent *person* qui va passer à proximité de lui et qui va devenir son objectif *my-target*. Ce choix n'inclue pas de garantie d'emprunter le bon itinéraire et d'accéder à la zone refuge. Avec la hausse du nombre d'imitateurs, un agent *person* qui va devenir un leader va être suivi par plus d'imitateurs qui seront entraînés le cas échéant dans les mauvais choix du leader, entraînant plus d'agents "victimes".

L'effet de la variation de la proportion d'imitation et de probabilité de chercher son chemin semble néanmoins avoir un effet visible sur les cartes de trafic via le nombre de passages d'agents *person* par cellule (Figure 7.11). En effet, les cartes de trafic présentant les scénarios avec le moins d'imitation (10%) et le plus de probabilité de chercher son che-



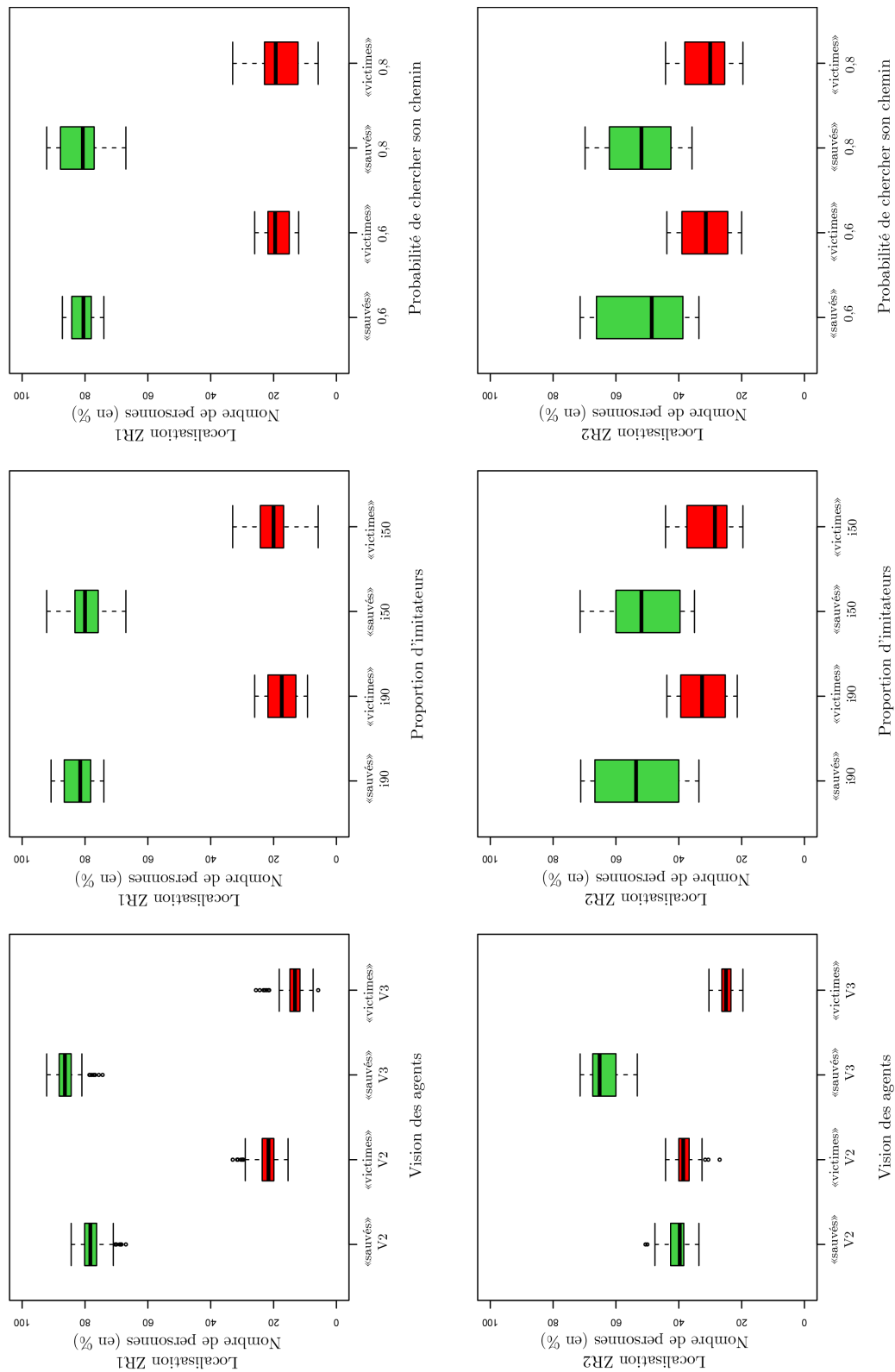


FIGURE 7.10 – Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes", en rouge), effets croisés selon la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR2) et la vision (2 ou 3), la proportion d'imitateurs (10 ou 50%) et la probabilité de recherche (0.8 ou 0.6) pour une hauteur de zones refuge de 5 mètres.

Réalisation : Plattard, O., 2019.



FIGURE 7.11 – Cartes de trafic pour les configurations en localisation ZR1, vision 3, hauteur de zones refuge à 60 mètres avec une variation de la proportion d’imitateurs et probabilité de chercher son chemin, respectivement 20% et 0.8 en haut et 10% et 0.9 en bas.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.

min (0.9), mettent en avant des traces de passages plus étendues, mais surtout un nombre de passages par cellule plus élevé que les autres configurations; c'est par exemple le cas pour les scénarios dont les cartes de trafic sont présentées en figure 7.11. Ces nombres de passages par cellule plus élevés sont notamment visibles pour les cellules situées en zone de non-visibilité des zones refuge et donc de recherche de chemin. Cet effet peut être mis en relation avec les résultats des courbes de l'évolution du nombre de "sauvés" et de "victimes" en fonction du temps (Figures 7.6, 7.13 et 7.14), grâce auxquelles on peut observer que le nombre d'agents "sauvés" est légèrement plus élevé plus rapidement dans le cas des scénarios avec une imitation à 20% et une probabilité de recherche de chemin à 0.8. Les agents cherchent davantage un chemin et ont moins de probabilité de suivre un autre agent ou de connaître le chemin jusqu'à une zone refuge en étant en zone de non-visibilité. La variation de ce paramètre, bien qu'ayant un effet minime sur le résultat total du nombre d'agents "sauvés" ou "victimes", a une influence sur la fluidité et la rapidité de la mise à l'abri des agents.

Les résultats montrent donc peu de variations entre les différentes variables d'imitation et de recherche de chemin. Néanmoins, la baisse du nombre d'agents "sauvés" pour une proportion d'imitation de 50% tandis qu'une hausse s'effectue entre 10 et 20%, illustre l'effet de non garantie de choix du bon itinéraire des agents *person*, entraînant d'autres agents avec eux. Cependant, une exploration plus poussée de ces configurations serait nécessaire afin de tester ces variables pour d'autres hauteurs de zones refuge même si les premiers résultats montrent plus d'influence sur une faible hauteur, ainsi qu'afin d'isoler des proportions optimales de ces deux variables pour obtenir un haut taux d'agents "sauvés".

### 7.3.3 Influence du paramètre de vision ?

Le paramètre de vision permet de définir le rayon dans lequel les cellules sont prises en compte par un agent *person* lors de son déplacement. Ce paramètre définit donc de manière directe la vision des agents. Dans les scénarios simulés, la vision a été définie à 2 et 3 et semble avoir, de manière générale, une influence importante sur les résultats.

Par une analyse des effets croisés selon la vision et les autres paramètres, on observe que pour l'ensemble des paramètres (Figure 7.12), la vision à 3 garanti davantage d'agents *person* "sauvés" – environs 15 à 20% – que la vision à 2. L'effet croisé de la vision et de la hauteur montre une augmentation du nombre de "sauvés" et une diminution de l'étendue des résultats entre la vision 2 et la vision 3 et également, en vision 3 pour une hauteur de 60 mètres. Une observation proche est faite pour l'effet croisé entre la vision et le taux d'imitateurs, avec une augmentation du nombre de "sauvés" en vision 3 avec un effet d'autant plus important lorsque la vision 3 est combinée avec un taux d'imitateurs de 20%. Enfin, pour l'effet croisé entre la vision et la localisation des zones refuge, l'augmentation du nombre de "sauvés" la plus marquée est celle entre la vision 2 et 3 en ZR2, avec un écart

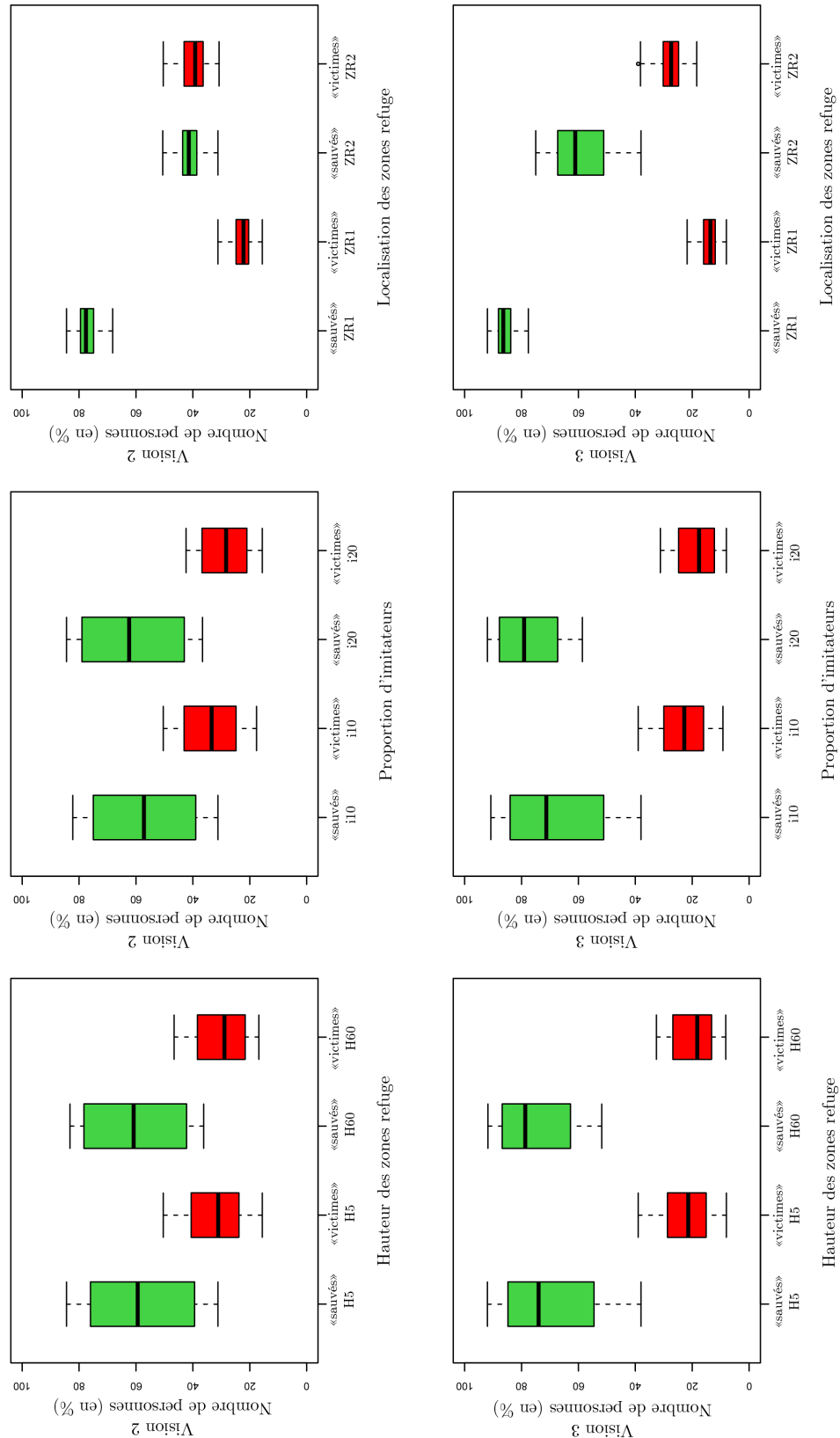


FIGURE 7.12 – Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes", en rouge), effets croisés selon la vision (2 ou 3) et la hauteur des zones refuge (5 ou 60 mètres), la proportion d'imitateurs et de recherche de chemin (10 et 20%) et la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR2).

Réalisation : Plattard, O., 2019.

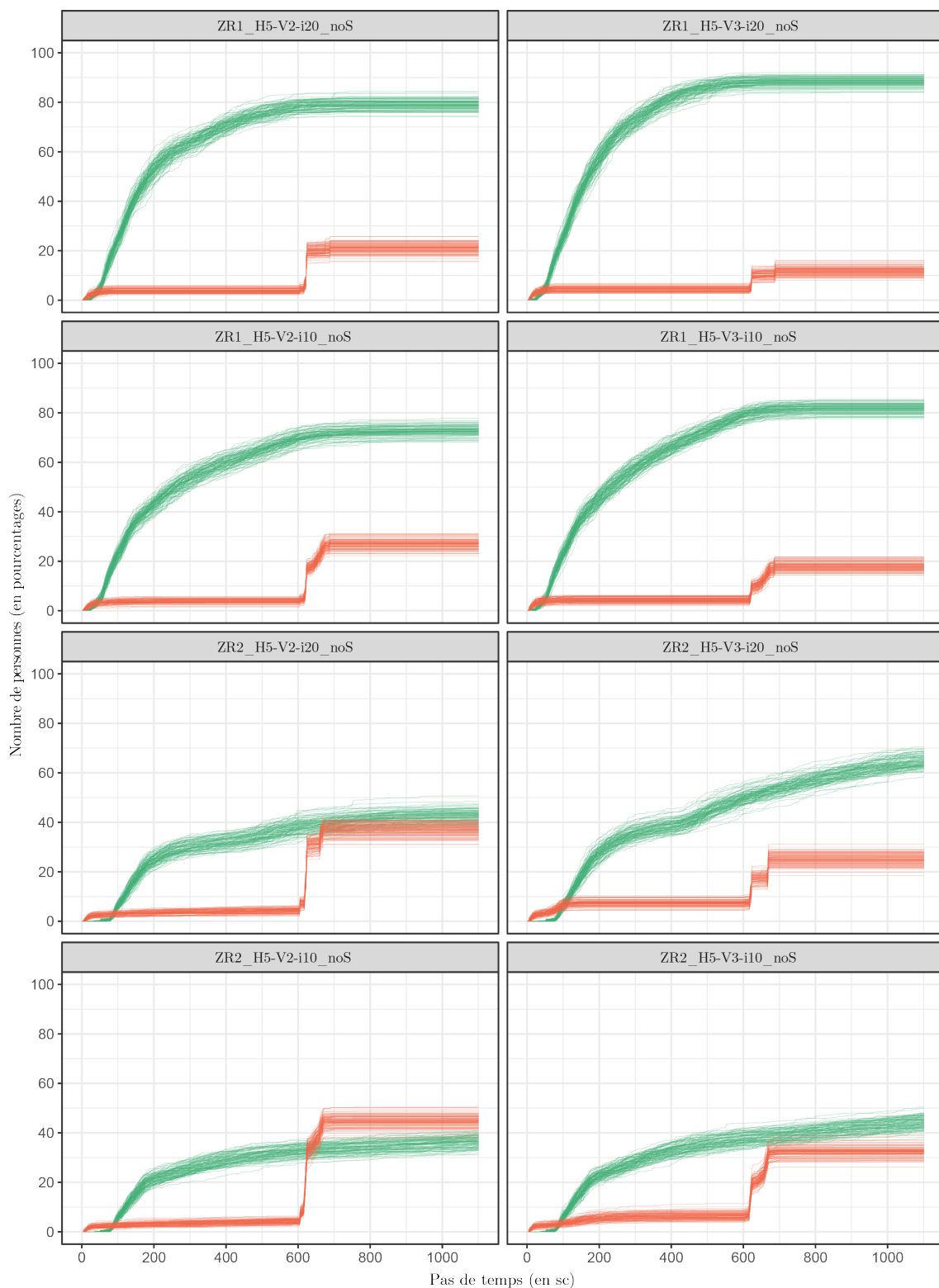


FIGURE 7.13 – Evolution du nombre d'agents ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapés par l'eau ("victimes", en rouge), en fonction du temps en ticks pour toutes les simulations par scénario STEP 1 (H.5m sans séisme).

Réalisation : Plattard, O., 2019.

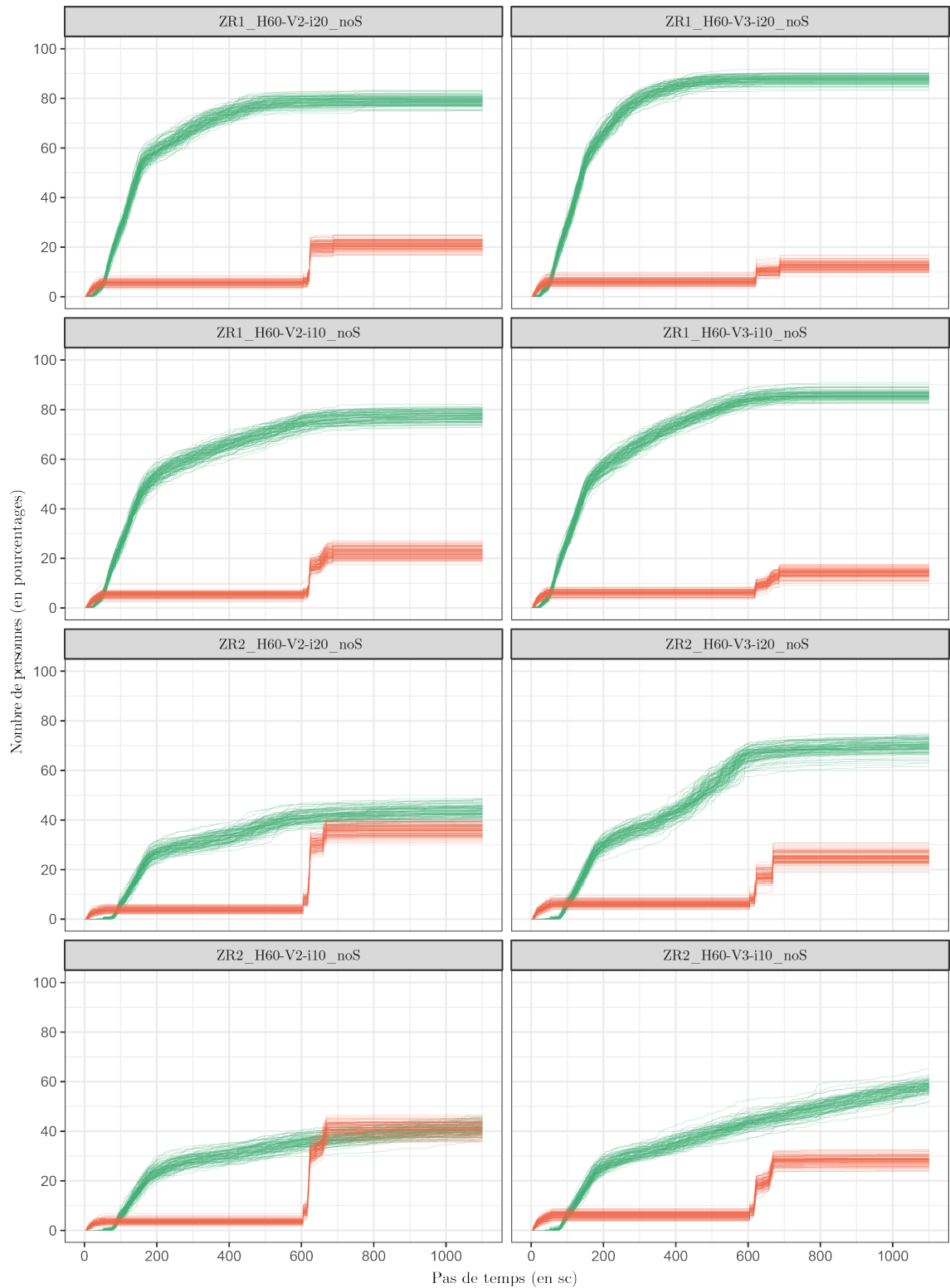


FIGURE 7.14 – Evolution du nombre d'agents ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapés par l'eau ("victimes", en rouge), en fonction du temps en ticks pour toutes les simulations par scénario STEP 2 (H.60m sans séisme).

Réalisation : Plattard, O., 2019.

de plus de 20%. Cet effet en ZR2 est également largement visible dans d'autres résultats (voir annexes 8.4).

La figure 7.7 permet également d'observer l'influence de la vision sur les résultats. Pour une localisation de zones refuge en ZR1, la vision 3 apporte globalement une plus grande part de "sauvés" avec un "pic" à près de 90% pour un effet combiné avec 20% d'imitateurs et une probabilité de 0.8 de chercher son chemin, pour les hauteurs de 5 mètres et 60 mètres indifféremment. Il s'agit ici de la configuration des scénarios simulés comptabilisant le plus d'agents *person* "sauvés". La proximité des zones refuge du bord de mer – ZR1 – couplée à une vision des agents d'un rayon plus important – vision 3 – ainsi qu'à un taux d'imitateurs et de personnes connaissant le chemin de 20% permet de garantir une évacuation optimale avec un haut taux d'agents réussissant à atteindre les zones refuge. Dans le cas d'une localisation des zones refuge plus loin du bord de mer – ZR2 –, l'effet de l'augmentation de la vision des agents est d'autant plus visible. En ZR2, pour une vision de 2, le pourcentage d'agents "sauvés" oscille autour de 40% avec davantage de "victimes" que de "sauvés" pour une configuration de hauteur 5 mètres avec 10% d'imitateurs. Pour la même localisation, la vision 3 apporte toujours plus de "sauvés" que de "victimes". De plus, la vision 3 combinée à un taux d'imitation de 20% présente une nette amélioration dans le nombre d'agents "sauvés". Ce taux de "sauvés", bien que restant plus restreint qu'en ZR1, illustre l'effet combiné de la vision et du taux d'imitation et de probabilité de chercher son chemin.

Lorsque l'on observe les résultats des courbes présentant l'évolution du nombre d'agents *person* "sauvés" ou "victimes" (Figures 7.6, 7.13 et 7.14), on remarque un effet de la variation du paramètre de vision. De manière générale, on observe que pour un même scénario, la vision 3 apporte un niveau plus élevé d'agents "sauvés" au final. Au niveau des résultats des "victimes", la présence de paliers successifs d'augmentation du nombre de personnes touchées par l'eau traduit le fait que les agents ont pu se déplacer et s'éloigner du front de mer (Figures 7.13 et 7.14); le premier palier montre les agents étant restés proches de la plage et les autres paliers, des agents étant déjà sur le chemin de mise en sécurité vers les zones refuge. Néanmoins, aucun effet majeur de la variation de la vision n'est visible sur les cartes de trafic pour les différents scénarios.

Le paramètre de vision a donc plus d'influence sur les résultats des simulations qu'espéré a priori. Il s'agit d'ailleurs du paramètre concernant directement la visibilité des agents *person* ayant le plus d'influence sur l'évacuation. Les agents peuvent évaluer des cellules dans un rayon plus élargi quand la vision est plus grande et sont donc davantage en mesure de sortir des zones d'ombre et de trouver l'itinéraire jusqu'à une zone refuge. Ce paramètre étant influant, il semble important de pouvoir le faire varier sur d'autres valeurs. Néanmoins, comme évoqué précédemment, le modèle STEP ne permet pas, dans son code actuel, une valeur de vision supérieure à 3. En effet, à partir d'une vision à 4, les agents

*person* sont dans la capacité d'évaluer les cellules se trouvant derrière des obstacles comme des bâtiments et donc de passer outre ces obstacles. Une des perspectives d'évolution du modèle STEP serait donc d'affiner et d'optimiser le code afin de permettre une variation plus importante de la vision.

L'analyse de la variable de visibilité construite à partir de la hauteur des zones refuge et étant en lien direct avec la proportion d'imitateurs et la probabilité de chercher un chemin, nous a montré que chaque élément pris séparément a une influence faible sur l'évacuation. Pris en effets combinés, des effets apparaissent aux niveaux des résultats de sortie du modèle STEP. La hauteur qui permet de construire la variable via les zones d'ombre de non-visibilité des zones refuge a, au final, un effet faible sur les résultats ; il peut être lié à un effet de site et qui mériterait donc une implémentation sur un autre site que Saint-Laurent-du-Var. L'influence des variables d'imitation et de recherche est visible mais a, cependant, une limite liée à l'entraînement des agents dans des mauvais comportements amenant une stagnation puis une régression du nombre d'agents "sauvés".

Enfin, l'analyse des effets de la variation du paramètre de vision qui concerne directement la visibilité de l'agent *person* indépendamment de sa situation montre un effet important sur les résultats issus des simulations. Les agents pouvant prendre en compte des cellules dans un rayon plus important autour d'eux ce qui leur permet de trouver le chemin jusqu'à une zone refuge.



## 7.4 Effet de la localisation des zones refuge ?

Les deux configurations du modèle STEP 1 et STEP 2 (Figure 7.3) ont été testées chacune pour deux localisations des zones refuge ZR1 et ZR2 (Figure 7.2).

Une première analyse générale montre que cette différence de localisation a un effet important visible dans les résultats de sortie des simulations. La localisation, et à travers elle la stratégie d'évacuation choisie, horizontale et/ou verticale (voir chapitre 3), est donc un choix important pour l'évacuation ; son effet est cependant à analyser plus en détail, notamment de manière croisée avec les autres variables du modèle STEP.

### 7.4.1 Influence de la localisation

A travers l'analyse des effets croisés entre la localisation des zones refuge en ZR1 ou ZR2 et les autres variables, la grande influence de celle-ci est confirmée (Figure 7.15). Ces résultats considèrent les effets croisés entre la localisation des zones refuge et chacune des variables, les autres étant considérées toutes choses égales par ailleurs. Ces résultats montrent que la localisation en ZR1 apporte un taux d'agents *person* "sauvés" au-delà de 75%, et ce pour chaque variable ; les variations par variable en ZR1, sont quant à elles minimales avec l'effet le plus prononcé pour la variation de la vision de 2 à 3. Les résultats pour une localisation en ZR2 montrent, de manière générale, un pourcentage plus faible d'agents *person* "sauvés".

Il semble nécessaire de compléter l'analyse des effets croisés par variable (Figure 7.15) par une analyse des effets combinés des variables (Figure 7.16) afin de comprendre plus en détail ces résultats, notamment en ZR2.

La prise en compte de la variable de hauteur montre une faible variation des résultats entre les deux hauteurs pour les deux localisations. Cependant, une étendue importante des résultats est visible sur les boîtes à moustaches (Figure 7.15), et plus particulièrement en ZR2 pour une hauteur de 60 mètres. Le détail par scénario (Figure 7.16), montre que cette étendue est due à l'écart des résultats entre les scénarios de vision 2 qui ont une médiane d'agents *person* "sauvés" autour de 40% et la vision 3 pour laquelle on observe des résultats de "sauvés" autour de 60 et 70% ; la variation des proportions d'imitateurs et de recherche de zone refuge joue un rôle dans les résultats pour la vision 3.

L'étendue de la boîte à moustaches observée pour la hauteur de 5 mètres en ZR2 (Figure 7.15) est liée à la présence du scénario en vision 3 pour un taux de recherche de chemin et d'imitateurs de 20% qui montre un pourcentage d'agents *person* "sauvés" de plus de 60% tandis que les trois autres scénarios – vision 2, imitation 10 et 20% et vision 3 imitation à 20% –, ont un taux de "sauvés" autour de 40% et un pourcentage de "victimes" de plus de 30% (Figure 7.16). La variation du taux d'imitation et de recherche de chemin a un effet sur cette configuration de scénario.

Des résultats similaires à ceux de la hauteur sont observables pour la variable d'imitateurs et de probabilité de chercher son chemin (Figure 7.15) ; peu de variations sont visibles en ZR1. En revanche, les résultats pour une localisation ZR2, montrent une plus grande variabilité et étendue. La variation du pourcentage d'imitation et de probabilité de chercher son chemin en 10 et 20% amène une petite variation du pourcentage d'agents "sauvés" respectivement avec une médiane autour de 40 et 50% et un pourcentage de "victimes" respectivement autour de 35 et 30%.

L'étendue de la boîte à moustaches correspondant à un pourcentage d'imitation de 20% en ZR2 (Figure 7.15) montre une grande disparité de résultats qui peut être observée par détail des scénarios (Figure 7.16). Une variation de résultats s'observe entre les visions 2 et 3. En effet, pour une ZR2 avec imitation 20%, en vision 2, les pourcentages d'agents *person* "sauvés" et "victimes" sont respectivement autour de 40% et 35% ; tandis qu'en vision 3, ces résultats se situent respectivement autour de 70% et 25%. La variation de la hauteur des zones refuge n'a pas ou peu d'effet sur les résultats de ces scénarios.

Les boîtes à moustaches correspondant aux résultats pour une localisation ZR2 et un taux d'imitation et de recherche de chemin à 10% présentent une moins grande étendue avec, dans le cas du pourcentage d'agents *person* "sauvés", une médiane basse autour de 40% et une médiane autour de 35% pour les "victimes" (Figure 7.15). Dans le détail des scénarios (Figure 7.16), un seul présente un pourcentage de "sauvés" supérieur à 50% ; il s'agit du scénario en vision 3, hauteur de zones refuge à 60 mètres avec environ 55% d'agents "sauvés". Les scénarios en ZR2 avec un taux d'imitation à 10% montrent une influence de la vision et également, une influence de la hauteur des zones refuge. Avec une vision 2, le nombre d'agents "sauvés" est au plus bas avec une médiane à 35% environ pour une hauteur de 5 mètres et 40% pour 60 mètres. Ce scénario avec une hauteur de 5 mètres est celui qui montre le plus faible pourcentage de "sauvés" avec davantage de "victimes" (Figure 7.16).

La vision est la variable dont les résultats analysés à la sous-partie 7.3.3 montrent une influence importante sur le nombre d'agents *person* "sauvés" et "victimes". L'analyse des effets croisés entre la variable de vision et la localisation des zones refuge (Figure 7.15), montre une forte différence de résultats entre ZR1 et ZR2. Il est important de préciser qu'à part la boîte à moustaches présentant les résultats du pourcentage de "sauvés" pour une vision 3 en ZR2, les autres boîtes à moustaches présentent une étendue très faible (Figure 7.15). Cette faible étendue traduit une faible disparité de résultats de sortie du modèle quant aux nombres d'agents *person* "sauvés" ou "victimes" pour ces trois configurations ; elle traduit aussi la faible influence des autres paramètres dans les résultats.

Les résultats pour une localisation ZR1 présentent une médiane autour de 75 et 85% pour le pourcentage d'agents "sauvés" pour respectivement la vision 2 et 3. Ces résultats sont confirmés par l'analyse des boîtes à moustaches par scénarios qui met en avant la constance du nombre élevé d'agents "sauvés" et du nombre bas de "victimes" pour tous

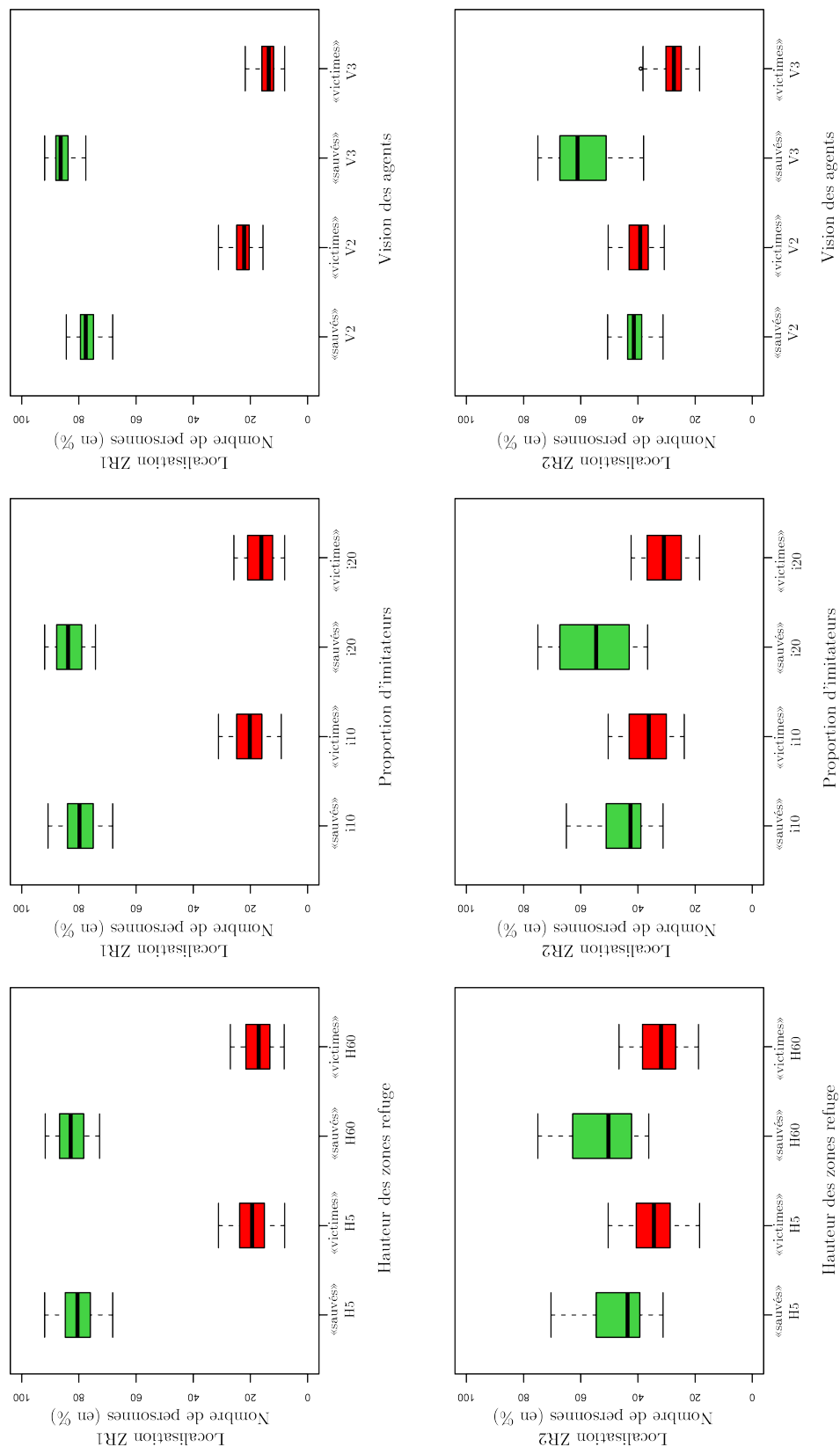


FIGURE 7.15 – Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés" en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes" en rouge), effets croisés selon la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR2) et la hauteur des zones refuge (5 ou 60 mètres), la proportion d'imitateurs et de recherche de chemin (10 et 20%) et la vision (2 ou 3).

Réalisation : Plattard, O., 2019.

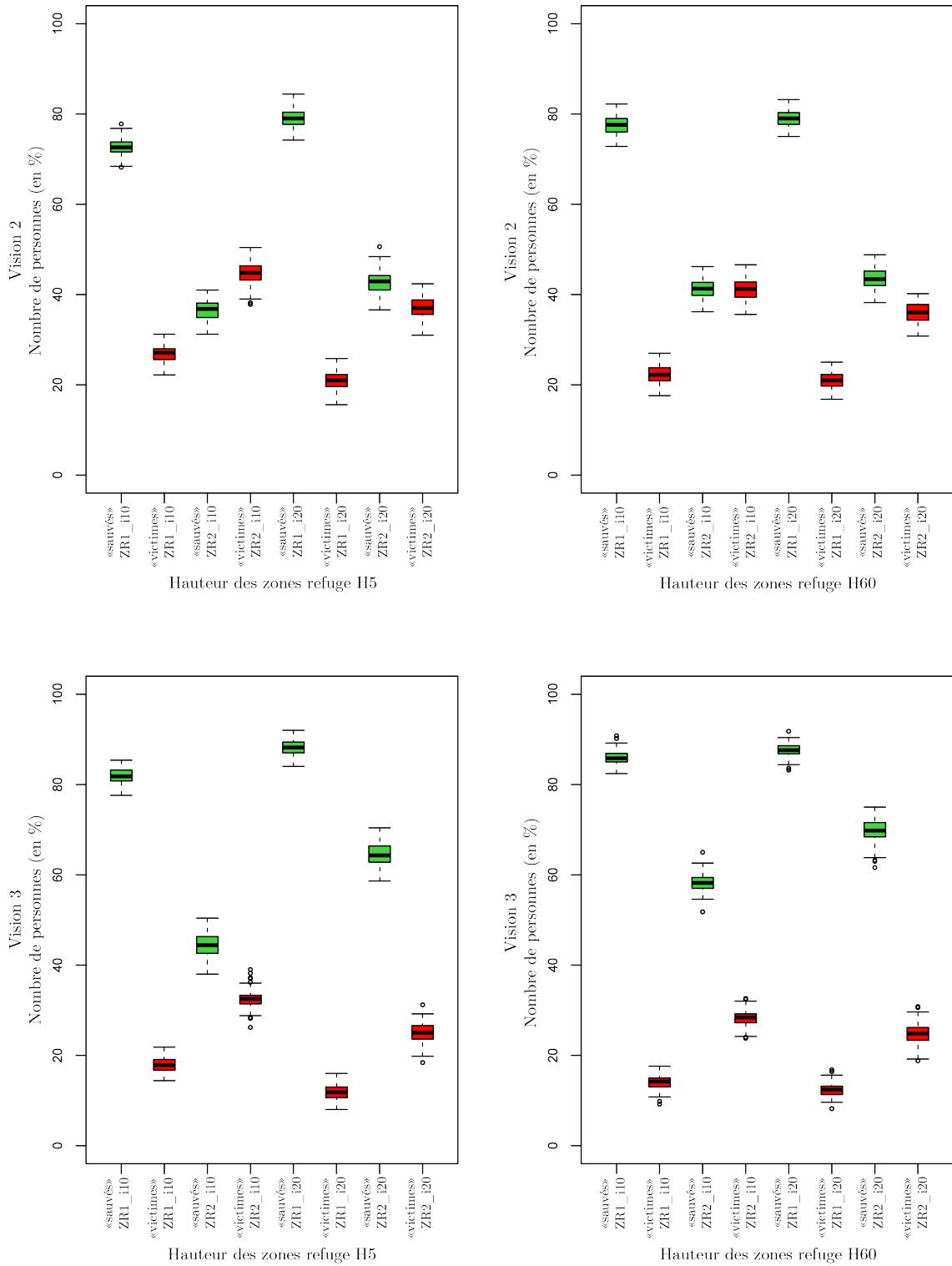


FIGURE 7.16 – Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés" en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes" en rouge), effets croisés selon la vision (2 ou 3) et la hauteur des zones refuge (5 ou 60 mètres), la proportion d'imitateurs et de recherche de chemin (10 et 20%) et la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR2).  
Réalisation : Plattard, O., 2019.

les scénarios en ZR1, variables de vision, imitation et hauteurs confondues (Figure 7.16).

Les résultats des effets croisés pour ZR2 et vision 2 montrent des résultats proches de 40% pour les "sauvés" et les "victimes" (Figure 7.15); l'étendue faible des boîtes à moustaches correspondantes souligne la faible variabilité des résultats de sortie pour l'ensemble des scénarios, en sous-entendant la faible influence des paramètres de hauteur et d'imitation dans cette configuration. Cette dernière correspond aux résultats comptabilisant avec le moins d'étendue le maximum d'agents *person* "victimes".

Enfin, les effets croisés entre la vision 3 et ZR2 mettent en avant un pourcentage de "victimes" peu étendu avec une médiane autour de 25% tandis que la boîte à moustaches concernant le pourcentage de "sauvés" a une étendue plus grande avec une médiane autour de 60% (Figure 7.15). Lorsque l'on observe le détail par scénario – pour la configuration ZR2 et vision 3 – (Figure 7.16), on remarque que l'étendue des résultats pour les "sauvés" oscille entre 40 et 70% environ en fonction des variations de la hauteur et du taux d'imitation et de probabilité de chercher son chemin. La hauteur des zones refuge va jouer un rôle lorsque l'imitation est basse puisqu'en réduisant les zones d'ombre de non-visibilité, elle va permettre une vue de l'objectif par le plus grand nombre d'agents.

L'importance de la localisation des zones refuge sur l'évacuation est aussi visible sur les cartes de trafic de sorties des simulations, comme par exemple pour un scénario pour une hauteur de 60 mètres, en vision 2, 20% d'imitation et une probabilité de rechercher de chemin à 0.8 avec une localisation en ZR1 (Figure 7.17 en haut) et en ZR2 (Figure 7.17 en bas). Cette comparaison de ces deux scénarios met en avant des cellules avec un nombre de passages très important en ZR2. Une forte concentration d'un nombre de passages élevé par cellule sur la zone du front de mer est visible, ainsi que quelques points de trafic élevé autour de certaines constructions. La zone du front de mer qui dispose de quelques zones de non-visibilité en ZR1 se retrouve avec une zone de non-visibilité très étendue en ZR2 (Figure 7.9). Les agents doivent donc chercher l'itinéraire dans cette zone de non-visibilité plus grande entraînant des zones à très fort trafic.

Il est important de souligner que la zone refuge se trouvant proche du centre commercial Cap 3000 et proche de la plage a une trace des agents voulant la rejoindre différente entre les deux configurations pourtant sa localisation et hauteur n'ont pas été modifiées; cela s'explique par le fait que les autres zones refuge ont une localisation plus éloignée de la plage et que davantage d'agents rejoignent cette zone refuge du Cap 3000, générant donc plus de passages par cellule.

Ces résultats peuvent être recoupés avec ceux des graphiques montrant l'évolution du nombre de "sauvés" ou de "victimes" en fonction du temps (Figures 7.6, 7.13 et 7.14). Ces graphiques mettent avant la distinction entre les scénarios ZR1 et ZR2. Sur la figure 7.6 qui présente les médianes des scénarios testés en STEP 1 et STEP 2, les scénarios ayant le plus d'agents "sauvés" et le moins de "victimes" sont ceux avec une localisation ZR1. De plus, cette figure met en avant le délai supplémentaire nécessaire aux agents pour rejoindre



FIGURE 7.17 – Cartes de trafic pour les configurations en vision 2, hauteur de zones refuge à 60 mètres, proportion d’imitateurs à 20% et probabilité de chercher son chemin à 0.8, pour une localisation ZR1 en haut et ZR2 en bas.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.

les zones refuge en ZR2.

Le même effet est constaté lorsque l'on regarde les courbes de toutes les simulations par scénario (Figures 7.13 et 7.14). De plus, cette décomposition par scénario montre une plus grande disparité de courbes pour la localisation ZR2 que pour celle en ZR1 avec une progression du nombre de "sauvés" moins brutale mais plus continue au fil du temps de la simulation. La localisation ZR2 induit un temps de parcours plus long avec des zones de non-visibilité plus importantes ce qui étale davantage dans le temps l'arrivée des agents à la zone refuge ; contrairement, en ZR1, l'agent est plus rapidement sorti de la zone de non-visibilité et à proximité d'une zone refuge ce qui s'observe sur les graphiques par une arrivée plus précoce à la zone refuge.

Enfin, sur les courbes pour une configuration ZR2, il est visible un premier palier d'agents "sauvés" de 20 à 30% environ (Figures 7.13 et 7.14). Ce palier est dû à la localisation d'une zone refuge proche du centre commercial Cap 3000 qui reste proche de la plage et draine donc pas mal d'agents. Si l'on considère que ce premier palier correspond aux nombres d'agents ayant atteint cette zone refuge et que le reste de la courbe correspond aux agents ayant atteint les autres zones refuge situées plus loin de la plage, on remarque que dans certains scénarios, très peu d'agents atteignent les autres zones refuge. Cette abstraction accentue d'autant plus le décalage du nombre d'agents "sauvés" ou "victimes" entre les configurations ZR1 et ZR2.

#### 7.4.2 Le modèle STEP et le choix des zones refuge

Les résultats de sortie des simulations des différents scénarios mettent en avant le rôle de la localisation des zones refuge et donc l'importance de ce choix. Pour rappel, les deux localisations des zones refuge des scénarios du modèle STEP pour Saint-Laurent-du-Var correspondent pour ZR1 à une localisation proche de la zone inondable et pour ZR2 à une localisation correspondant aux réponses aux enquêtes effectuées sur le terrain. Néanmoins, les résultats montrent quelques limites de ces choix de localisation des zones refuge.

Premièrement, dans les deux configurations de localisation, une des trois zones refuge se situe vers le centre commercial Cap 3000, entre la plage et l'embouchure du Var (Figure 7.9). De plus, cette zone refuge située à proximité de la plage semble apporter une base non négligeable d'agents "sauvés" lors de la localisation en ZR2. Un biais de comparaison entre les deux configurations peut donc exister puisque la même localisation est présente dans les deux cas. Cependant, la volonté de la localisation en ZR2 n'est pas de situer les zones refuge plus loin de la plage, mais de respecter les 3 principaux lieux de refuge évoqués par les personnes interrogées durant les enquêtes sur le terrain (voir chapitre 4).

Deuxièmement, la topographie de Saint-Laurent-du-Var semble idéale pour une stratégie d'évacuation horizontale (voir chapitre 3) de laquelle la configuration ZR2 se rapproche le plus. Néanmoins, cette configuration présente clairement des résultats avec un nombre d'agents "sauvés" plus faible et un nombre de "victimes" plus élevé que pour la configuration ZR1. Ce constat pose donc la question de la stratégie à adopter avec peut-être la

nécessité de considérer une évacuation verticale dans des bâtiments plus proches du front de mer. En effet, la rapidité de l'arrivée du tsunami semble compromettre un déplacement des agents loin de la plage, même si pour la localisation ZR2, les zones refuge se situent à moins de 500 mètres du front de mer.

La localisation des zones refuge constitue donc le paramètre influant le plus sur l'évacuation malgré les variations des autres paramètres du modèle qui n'arrivent pas à compenser les variations de résultats entre les deux localisations des zones refuge. La temporalité rapide d'un tsunami à Saint-Laurent-du-Var permet aux agents de rejoindre des zones refuge proches de la plage, mais d'autres configurations pourraient être testées afin de définir des stratégies permettant une mise à l'abri du maximum d'agents.



## Influences principales et conclusion

L'analyse des résultats issus des simulations pour les scénarios STEP 1 et STEP 2 met en avant l'influence de différents paramètres sur la visibilité en milieu urbain au cours d'une évacuation. Néanmoins, la localisation des zones refuge est le paramètre dont la variation influe le plus sur les résultats issus du modèle.

La figure 7.18 présentant l'écart entre les valeurs de médiane du nombre de "sauvés" et de "victimes" pour les scénarios STEP 1 et STEP 2, permet la mise en valeur de l'importance de la localisation des zones refuge. La variation entre les deux localisations présente les résultats avec le plus grand écart de valeurs. En effet, deux localisations ont été testées dans les scénarios et l'effet sur les résultats via les valeurs des résultats issus du modèle, les boîtes à moustaches présentant le nombre d'agents "sauvés" et "victimes", les cartes de trafic et l'évolution du nombre de "sauvés" et "victimes", montrent une augmentation du nombre d'agents rattrapés par l'eau et une baisse du nombre d'agents ayant atteint les zones refuge lorsque la localisation est plus éloignée du front de mer. Entre les deux localisations, des écarts de 19 à 38% sont visibles dans les résultats du nombre d'agents "sauvés" et de 13 à 17% pour les agents "victimes" (Figure 7.18). La localisation est le paramètre ayant le plus d'effet sur les résultats et met en avant l'importance de la définition de la stratégie d'évacuation via le choix de la localisation des zones refuge.

Les autres paramètres ont un effet plus restreint sur les résultats issus des scénarios STEP 1 et STEP 2 (Figure 7.18). La variation de la vision des agents a néanmoins un effet sur les résultats avec des écarts allant jusqu'à 23% pour les "sauvés" et 13% pour les "victimes". Elle est donc la seconde variation la plus influente sur les résultats ; cela s'explique par le fait qu'elle accroît la vue des agents leur permettant d'évaluer leur environnement dans un rayon plus important et donc de trouver leur chemin jusqu'à une zone refuge.

Les autres variations de paramètres présentent des écarts faibles (moins de 10%) dans les résultats (Figure 7.18). Néanmoins, en effet combiné avec les autres paramètres ayant un rôle dans la visibilité des agents, une variation est visible sur les résultats. L'imitation et la probabilité de chercher son chemin ont un effet minime sur l'évacuation ; ces variables ont même un effet négatif lorsqu'elles atteignent un certain niveau – notamment 50% d'imitation – puisque ces niveaux amènent l'entraînement des agents dans des mauvais itinéraires qui engendrent davantage de "victimes".

Enfin, le paramètre de hauteur des zones refuge sur lequel sont construites les zones de non-visibilité des zones refuge se révèle moins influant sur les résultats de l'évacuation qu'envisagé au départ. La comparaison des résultats du total pour chaque scénario équivaut aux résultats pour les hauteurs de zones refuge de 5 mètres et 60 mètres (Figure 7.18), met en avant des écarts de moins de 5 points en moyenne. Il ne faut cependant pas négliger la variation de la hauteur des zones refuge puisque l'influence des autres paramètres est directement liée à la construction des zones de non-visibilité des zones refuge et donc du paramètre de leur hauteur.

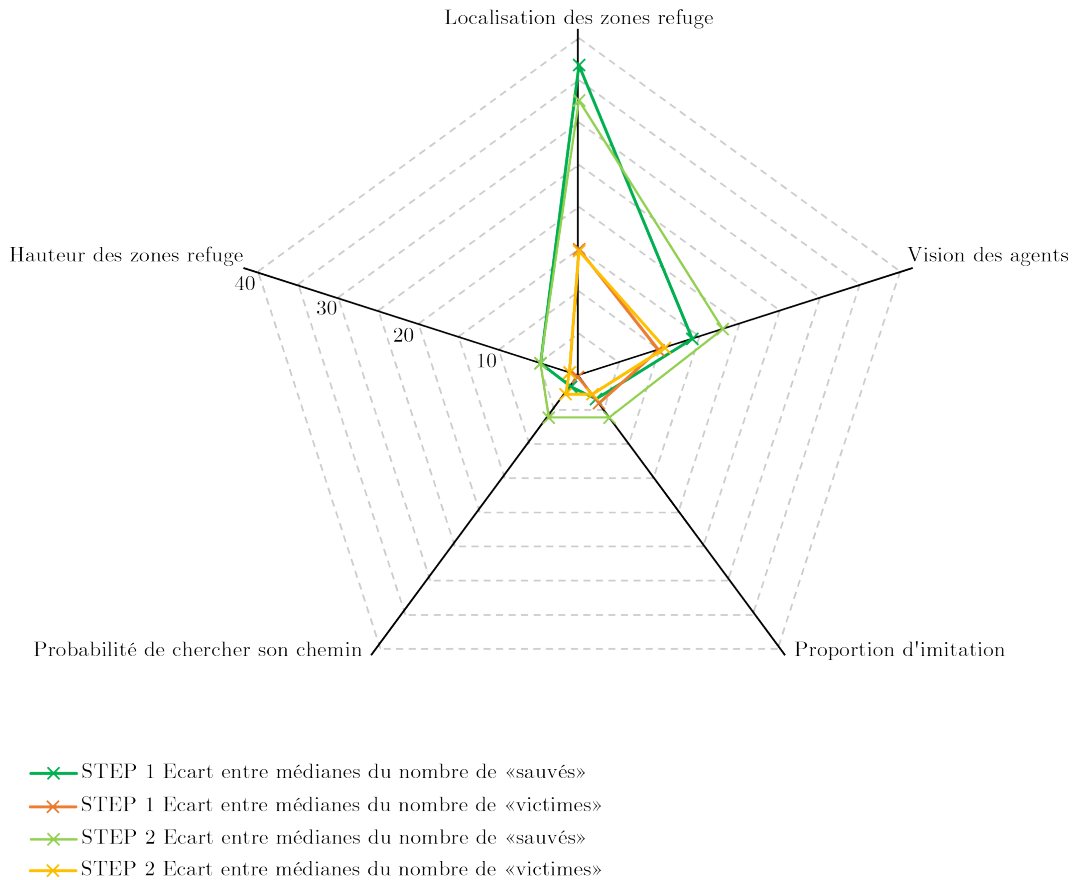


FIGURE 7.18 – Diagramme polaire des effets des variables par valeur d'écart entre les médianes des résultats pour les "sauvés" et "victimes" des scénarios STEP 1 et STEP 2.  
Réalisation : Plattard, O., 2019.

Les scénarios simulés ne sont pas exhaustifs et des perspectives sont à envisager. Tout d'abord, d'autres scénarios avec d'autres variations des paramètres doivent être explorés afin de définir de manière plus détaillée des effets combinés ou des effets de seuil. Pour cela, certaines variables nécessitent une amélioration du code du modèle STEP, comme par exemple pour la vision.

Ensuite, la variable de visibilité et la stratégie de localisation des zones refuge pourraient être complétées avec de la signalétique présente au long de l'itinéraire. D'autres localisations doivent être envisagées avec notamment un travail de sélection de bâtiments pouvant être des zones refuge verticales proches du front de mer, ces constructions nécessitant un diagnostic de terrain.

Enfin, il semble primordial d'adapter le modèle STEP sur un autre site que Saint-Laurent-du-Var. Le modèle STEP a été construit de manière adaptable sur différents sites ; les résultats analysés dans ce chapitre montrent des variations et des effets qui peuvent être liés au site. Adapter le modèle STEP à un autre site permettrait de mettre en avant d'autres effets des variables et d'autres stratégies d'évacuation.



---

### LA PRATICABILITÉ DES ITINÉRAIRES D'ÉVACUATION EN CONTEXTE MULTI-RISQUES DANS LE MODÈLE STEP

---

La praticabilité de l'espace urbain durant l'évacuation est la seconde problématique abordée dans le modèles STEP. Cette question est posée à travers la prise en compte du contexte multi-risques dans lequel se déroule l'évacuation ; dans le cas du modèle STEP, il s'agit d'un tsunami avec un séisme précurseur. La considération d'un séisme précurseur, entraîne des dommages et l'effondrement de certaines structures bâties. Leurs débris présents sur l'espace de voirie sont alors un frein au déplacement de la population. A travers cette notion de praticabilité, les itinéraires de mise en sécurité et l'accessibilité des zones refuge sont ainsi questionnés.

Les résultats discutés dans ce chapitre sont issus des scénarios STEP 2 et STEP 3 qui incluent respectivement un tsunami sans séisme précurseur et un tsunami avec le séisme précurseur et l'effondrement des constructions (Figure 8.1, liens QR codes vers des vidéos du modèle STEP 2 et STEP 3). Ces deux configurations de scénarios ont une hauteur de zones refuge fixe et identique, ce qui permet de ne pas faire varier les paramètres liés à la construction de la variable de visibilité des zones refuge afin de pouvoir se concentrer sur l'influence de la prise en compte du séisme sur l'évacuation de la population.

Les résultats de sortie des scénarios analysés dans ce chapitre apparaissent sous trois formes :

- des boites à moustaches présentant les pourcentages d'agents *person* "sauvés" et "victimes",
- des graphiques présentant les médianes des agents *person* "sauvés" et "victimes" par scénarios,
- des cartes de trafic comptabilisant le nombre de passages des agents *person* par cellule au cours d'une simulation.

## CHAPITRE 8. LA PRATICABILITÉ DES ITINÉRAIRES DANS STEP

Tout d'abord, un détail des paramètres pour les aléas, la population et les zones refuge pris en compte lors de l'initialisation des scénarios est effectué. Ensuite, un descriptif du protocole de simulation et les sorties des résultats est réalisé. De plus, une analyse des résultats par comparaison entre ceux issus des scénarios avec et sans séisme précurseur est réalisé au regard des variations de chaque variable (localisation des zones refuge, vision des agents, part d'imitateurs). Enfin, il est amorcé une discussion de ces résultats et des perspectives d'évolution du modèle et de la prise en compte du contexte multi-risques en cas d'évacuation de population d'une population en cas de tsunami.



Scénario STEP 2 :  
ZR1, vision 2, H. 60m, Imit.20



Scénario STEP 3 :  
ZR1, vision 2, H. 60m, Imit.20, séisme

FIGURE 8.1 – Liens QR codes vers les vidéos de simulation du modèle STEP.  
Réalisation : Plattard, O., 2019.

## 8.1 Les scénarios et paramètres pris en compte

Les scénarios dont les résultats sont analysés dans ce chapitre considèrent la problématique du contexte multi-risques dans l'évacuation de la population avec la prise en compte d'un tremblement de terre avec effondrement des constructions préalable à l'arrivée du tsunami. Des paramètres ont été définis dès l'initialisation pour chacun des scénarios simulés. Une grande partie sont similaires à ceux définis à l'initialisation et présentés dans le chapitre 7 ; ils ne sont pas détaillés ici et seuls les paramètres présentant un changement le sont.

### 8.1.1 Initialisation des paramètres des aléas

Les paramètres concernant les aléas sont définis à l'initialisation du modèle STEP. Ils sont fixes pour l'ensemble des scénarios et simulations afin de garantir une comparaison basée sur les mêmes données. Néanmoins, l'effondrement des bâtiments qui survient en cas de séisme est aléatoire ce qui apporte une diversité de configurations pour les simulations avec séisme.

#### Séisme

Ce paramètre est variable en fonction des scénarios de simulations. Dans le cas d'un scénario avec séisme, le bouton *Séisme* de l'interface du modèle STEP est donc sur *on*. Dans cette configuration, les bâtiments s'effondrent selon une probabilité définie en fonction de l'EMS-98 (voir chapitre 6). Néanmoins, dans le cas de Saint-Laurent-du-Var, la probabilité définie dans le modèle STEP est fictive car la magnitude sismique envisagée et la mise en œuvre des bâtiments sur le littoral français ne laissent pas présager d'effondrement, contrairement au cas de Syracuse (voir chapitre 5). L'effondrement d'une construction génère des cellules de débris dans un rayon d'un tiers la hauteur du bâtiment (voir chapitre 6). Dans les scénarios testés pour Saint-Laurent-du-Var, cette probabilité est de 5% et intervient de façon aléatoire sur l'ensemble des cellules bâties. Les constructions effondrées varient selon les simulations des différents scénarios.

Dans le cas de scénarios sans séisme, le bouton *Séisme* de l'interface est sur *off* et aucun effondrement ne survient.

#### Tsunami

Les paramètres concernant le tsunami et l'inondation sont les mêmes que ceux définis et détaillés dans le chapitre 7.

La hauteur de l'inondation est fixée à 3 mètres.

La vitesse de propagation de l'eau est de 25 km/h.

L'arrivée du tsunami intervient au bout de 10 minutes, soit 600 ticks.

### 8.1.2 Initialisation des paramètres de la population

La population est constituée des agents *person* qui se répartissent aléatoirement sur les cellules en zone inondable, hors cellules bâties, de débris des effondrements des constructions et hors des cellules d'eau.

#### Nombre

Le nombre d'agents *person* initialisé est fixe à toutes les simulations et est de 500 (voir chapitre 7).

#### Vitesse de déplacement

La vitesse des agents est fixe à tous les scénarios. Elle est définie dans l'interface à 5 km/h (voir chapitre 7).

#### Noise

Comme présenté dans le chapitre 7, ce paramètre est fixe à toutes les simulations ; il est initialisé à 150.

#### Proportion d'imitateurs

Comme présenté au chapitre 7, le pourcentage d'imitateurs varie entre les valeurs de 10 et de 20% dans les différents scénarios.

#### Probabilité de chercher son chemin

Ce paramètre varie en fonction des scénarios. La probabilité de chercher son chemin dans les zones de non-visibilité des zones refuge est initialisé à 0,8 ou 0,9 (voir chapitre 7).

#### Vision

Comme présenté dans le chapitre 7, ce paramètre de vision est initialisé à des valeurs de 2 ou 3 en fonction des scénarios.

### 8.1.3 Initialisation des paramètres des zones refuge

Dans le modèle STEP, les zones refuge *target* sont les objectifs que doivent atteindre les agents *person* pour être considérés comme "sauvés".

**Nombre**

Comme dans le chapitre 7, les zones refuge initialisées sont au nombre de 3 pour l'ensemble des scénarios.

**Hauteur**

Contrairement au paramétrage défini dans le chapitre 7, la hauteur des zones refuge est, dans le cas des scénarios STEP 2 et STEP 3, fixe à l'ensemble des scénarios. Ce choix permet de rendre compte de l'effet de la présence d'un séisme précurseur en faisant abstraction de l'effet de variation de la hauteur des zones refuge et donc de la variable de visibilité.

La hauteur définie à l'initialisation est de 60 mètres.

**Localisation**

La localisation des zones refuge est variable selon les scénarios entre les configurations ZR1 – proches du front de mer, en limite de la zone inondable – et ZR2 – localisation correspondant aux intentions d'évacuation des personnes exprimées via les cartes mentales lors des enquêtes de terrain (voir chapitre 4) et située en altitude et davantage dans les terres – (voir chapitre 7).

**8.1.4 Protocole de simulation**

L'analyse des résultats issus des scénarios de simulation avec et sans séisme précurseur au tsunami sont analysés dans ce chapitre ; cela correspond aux configurations STEP 2 et STEP 3 (Figure 8.2). La mise en comparaison des résultats issus de ces scénarios vise à mettre en valeur l'influence de la prise en compte du contexte multi-risques à travers un séisme précurseur dans l'évacuation de la population en cas de tsunami.

Comme pour les configurations STEP 1 et STEP 2, 100 répliques du modèle ont été réalisées pour chacun des scénarios (voir chapitre 7). Ces simulations ont permis de générer plusieurs résultats :

- Une sortie d'indicateurs du nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en pourcentage) et de personnes ayant été rattrapées par l'eau ("victimes", en pourcentage) pour chaque simulation.
- Une sortie d'indicateurs du nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en pourcentage) et de personnes ayant été rattrapées par l'eau ("victimes", en pourcentage) pour chaque pas de temps (en tick) durant la simulation.
- Une sortie de fichier raster d'une carte de trafic comptabilisant le nombre de passages d'agents *person* par cellule durant la simulation.



CHAPITRE 8. LA PRATICABILITÉ DES ITINÉRAIRES DANS STEP




	ALEAS	ZONES REFUGES		AGENTS <i>PERSON</i>		
	SEISME	LOCALISATION Proche = ZR1 Loin = ZR2	HAUTEUR (valeur en mètres)	VISION (valeur : 1 à 5)	TAUX D'IMITATION (valeur en pourcentage)	PROBABILITE DE CHERCHER SON CHEMIN (valeur : 0 à 1)
 <p>STEP 1</p>	NON	ZR 1 ZR 2	5	2 3	10 20 50	0,6 0,8 0,9
 <p>STEP 2</p>	NON	ZR 1 ZR 2	60	2 3	10 20	0,8 0,9
 <p>STEP 3</p>	OUI	ZR 1 ZR 2	60	2 3	10 20	0,8 0,9

FIGURE 8.2 – Scénarios STEP 2 et STEP 3 et valeurs des variables simulées et analysées dans ce chapitre.

Sources : Plattard O., 2019

## 8.2 Analyse générale des résultats et influence des différents paramètres

L'effet de la prise en compte d'un séisme précurseur à l'arrivée du tsunami par l'effondrement des constructions est analysé en mettant en comparaison les résultats issus des scénarios avec prise en compte ou absence de séisme, au regard des variables de la proportion d'imitateurs et de recherche de chemin, de la vision des agents et de la localisation des zones refuge.

Dans un premier temps, les résultats sont analysés par variables toutes choses égales par ailleurs (Figure 8.3). Pour chaque variable, les résultats sont présentés sous forme de boîtes à moustaches permettant de montrer les pourcentages d'agents ayant atteint les zones refuge, c'est-à-dire les "sauvés" (en vert) et les pourcentages d'agents ayant été touchés par l'eau, les "victimes" (en rouge).

De manière générale, on observe que les médianes du nombre d'agents *person* "sauvés" sont plus élevées que celles des agents "victimes" (Figure 8.3). Cependant, il convient de souligner que les boîtes à moustaches présentent une étendue importante amenant dans la plupart des cas un chevauchement des boîtes à moustaches. Ce constat permet de déduire une grande hétérogénéité des résultats avec un inversement de résultats amenant un pourcentage plus élevé d'agents "victimes" que de "sauvés".

Dans un second temps, les résultats sous forme de tableau présentant les valeurs minimum et maximum, des quantiles et des médianes du nombre d'agents "sauvés" ou "victimes" viendront en appui de la représentation sous forme de boîtes à moustaches (Figure 8.4). Un test d'égalité des médianes de Willcoxon a été réalisé. La *p-value* renseigne la significativité de la différence entre les médianes (de "sauvés" ou de "victimes") prises pour chacune des modalités des paramètres intra-scénarios STEP 2 et 3 (Localisation des zones refuge, vision des agents, proportion d'imitateurs et probabilité des chercher son chemin) et inter-scénarios STEP 2 et 3 pour les paramètres de présence de séisme. Plus la valeur *p-value* est basse (proche de 0), plus les médianes sont différentes (relation statistique significative) et donc plus le paramètre produit des différences dans les résultats du nombre de "sauvés" et "victimes", et inversement. La figure 8.4 présente des résultats avec des écarts de valeurs importants avec des différences entre les médianes significatives pour les variables de localisation des zones refuge et de vision des agents, tout comme dans le cas des scénarios STEP 1 et 2. La prise en compte du séisme présente également une différence entre les médianes significative.

Enfin, une comparaison avec les résultats sans prise en compte du séisme présentés au chapitre 7, permet également de mettre en avant l'influence de la prise en compte d'un séisme précurseur au tsunami sur les résultats. De manière générale, la comparaison des figures 7.4 et 8.3 met en avant des médianes plus basses de 10% pour le pourcentage d'agents

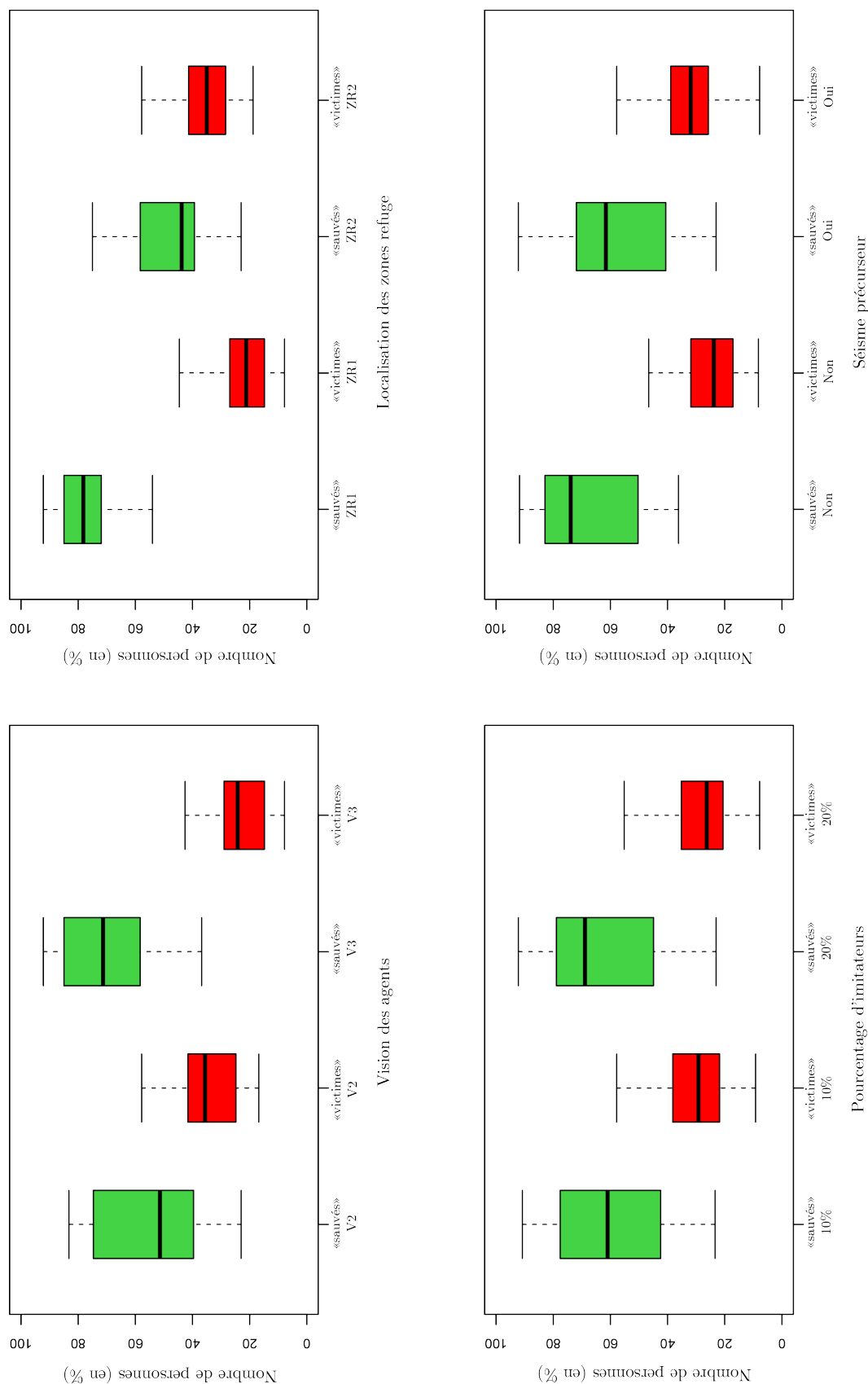


FIGURE 8.3 – Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes", en rouge), par variable de vision, localisation des zones refuge, imitation et séisme toutes choses égales par ailleurs.

Réalisation : Plattard, O., 2019.

Paramètres d'initialisation	Valeurs du nombre de "sauvés" (en %)					Valeurs du nombre de "victimes" (en %)						
	minimum	1er quantile	médiane	p-value*	3ème quantile	maximum	minimum	1er quantile	médiane	p-value*	3ème quantile	maximum
STEP 2	Localisation des zones refuge	ZR1	72,8	78,35	82,9	3,90 <sup>-122</sup>	86,8	91,8	17,1	1,10 <sup>-122</sup>	21,6	27
		ZR2	36,2	42,2	50,3		62,7	75	31,9		38,4	46,6
	Vision des agents	V2	36,2	42,2	60,8	1,60 <sup>-34</sup>	78,25	83,2	28,9	1,60 <sup>-39</sup>	38,4	46,6
		V3	51,8	62,9	78,7		86,8	91,8	18,2		26,8	32,6
	Proportion d'imitateurs (en %)	10	36,2	50,4	68,9	0,0001	82,25	90,8	25,5	4,80 <sup>-6</sup>	33,35	46,6
		20	38,2	58,4	75		83,2	91,8	22,8		30,8	40,2
	Probabilité de chercher son chemin dans les zones de non-visibilité des zones refuge (0 à 1)	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,8	38,2	58,4	75	0,0001	83,2	91,8	22,8	4,80 <sup>-6</sup>	30,8	40,2
	TOTAL STEP2 (H60 sans séisme)	0,9	36,2	50,4	68,9		82,25	90,8	25,5		33,35	46,6
			<b>36,2</b>	<b>51,05</b>	<b>73,9</b>		<b>82,85</b>	<b>91,8</b>	<b>23,8</b>		<b>31,85</b>	<b>46,6</b>
STEP 3	Localisation des zones refuge	ZR1	54	66,8	71,9	2,03 <sup>-125</sup>	78,2	92,2	26,9	2,30 <sup>-60</sup>	32,4	44,6
		ZR2	23	36,2	40,6		49,6	71,4	31,35		45	57,8
	Vision des agents	V2	23	36,2	48,8	4,60 <sup>-31</sup>	67,2	79	32,15	5,10 <sup>-72</sup>	45	57,8
		V3	36,8	49,6	66,8		78	92,2	26,8		31,65	42,6
	Proportion d'imitateurs (en %)	10	23,4	39,6	58,4	0,18	71	89,4	27,4	0,0033	40,05	57,8
		20	23	41,2	62,6		73,05	92,2	24,2		38,1	55,2
	Probabilité de chercher son chemin dans les zones de non-visibilité des zones refuge (0 à 1)	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,8	23	41,2	62,6	0,18	73,05	92,2	24,2	0,0033	38,1	55,2
	TOTAL STEP3 (H60 avec séisme)	0,9	23,4	39,6	58,4		71	89,4	27,4		40,05	57,8
			<b>23</b>	<b>40,6</b>	<b>61,6</b>		<b>71,85</b>	<b>92,2</b>	<b>25,75</b>		<b>38,85</b>	<b>57,8</b>
TOTAL STEP2 (H60 sans séisme)	<b>36,2</b>	<b>51,05</b>	<b>73,9</b>		<b>82,85</b>	<b>91,8</b>	<b>23,8</b>		<b>31,85</b>	<b>46,6</b>		
TOTAL STEP3 (H60 avec séisme)	<b>23</b>	<b>40,6</b>	<b>61,6</b>		<b>71,85</b>	<b>92,2</b>	<b>25,75</b>		<b>38,85</b>	<b>57,8</b>		

\* Test d'égalité des médianes de Wilcoxon. La p-value renseigne la significativité de la différence entre les médianes (de "sauvés" ou de "victimes") prises pour chacune des modalités des paramètres intra-scénarios STEP (localisation des zones refuge, vision des agents, proportion d'imitateur et probabilité de chercher son chemin) et inter-scénarios STEP pour les paramètres de hauteur des zones refuge et de présence de séisme. Plus la valeur p-value est basse (proche de 0), plus les médianes sont différentes (relation statistique significative) et donc plus le paramètre produit des différences dans les résultats du nombre de "sauvés" et "victimes", et inversement.

FIGURE 8.4 – Valeurs du nombre de personnes ayant atteint les zones refuge "sauvés", ou ayant été rattrapées par l'eau "victimes", par variable, pour les scénarios STEP 2 et STEP 3 et valeur d'égalité des médianes selon le test de Willcoxon.

Réalisation : Plattard, O., 2019.

"sauvés" et plus élevées de 5 à 10% pour les agents "victimes" pour les variables de vision et d'imitation lorsqu'il y a une prise en compte d'un séisme ; cette influence semble plus minime pour la variation de localisation de zones refuge au regard des résultats sous forme de boîtes à moustaches.

Tout d'abord, la variation de la variable de vision des agents *person* de 2 à 3 – soit 15 à 23 mètres – a une influence sur les résultats (Figure 8.3). Comme présenté au chapitre 7, la vision 3 présente dans les résultats un taux de "sauvés" plus élevé de 19% environ et de "victimes" plus faible de 12% environ que pour la vision 2 (Figure 8.4). De plus, la boîte à moustaches (Figure 8.3) pour les résultats du nombre de "sauvés" en vision 2 a une étendue importante avec une médiane basse, à 48,8% (Figure 8.4), ce qui indique que la majorité des scénarios ont un faible taux de "sauvés" ; l'effet inverse est observé pour la boîte à moustaches présentant le pourcentage de "victimes" en vision 2. Une analyse plus détaillée de cette variable au regard de la prise en compte d'un séisme précurseur permet de comprendre ces effets.

La variation de la variable d'imitation de 10 à 20% couplée à la probabilité de chercher son chemin de 0.8 et 0.9, toutes choses égales par ailleurs quant aux autres variables a une faible influence sur les résultats du pourcentage de "sauvés" – 4,2% – et de "victimes" – 2,2% – (Figures 8.3 et 8.4). Les pourcentages des résultats varient un peu avec la prise en compte du séisme par rapport aux résultats présentés au chapitre 7, une analyse plus détaillée permet de confirmer ou d'infirmer une similarité d'influence de cette variable sur les résultats.

Comme présenté dans le chapitre 7, les résultats liés à la localisation des zones refuge selon les configurations ZR1 et ZR2 montrent une variation importante de 32% pour les "sauvés" et de 11% pour les victimes (Figure 8.3) dans les scénarios avec prise en compte du séisme. Les médianes du pourcentage de "sauvés" et de "victimes" en ZR2 sont très proches – environ 10% d'écart – ce qui laisse présager des résultats avec plus de "victimes" que de "sauvés" dans le détail des scénarios. La différence des valeurs des médianes du nombre de "sauvés" et de "victimes" est très significative (Figure 8.4). Les boîtes à moustaches présentent une étendue moins importante que pour les autres variables ; cela appuie l'influence du choix de localisation des zones refuge. De plus, la comparaison avec les scénarios sans prise en compte du séisme (Figures 7.4 et 8.3), montre des résultats très proches.

Enfin, la prise en compte d'un séisme dans les simulations a une influence sur les résultats, comme le montre la figure 8.4 avec une différence entre les valeurs des médianes du nombre de "sauvés" et de "victimes" significative. La médiane des résultats du nombre de "sauvés" est cependant plus basse lorsqu'un séisme est pris en compte avec une boîte à moustaches très étendue (Figure 8.3). Les résultats semblent très hétérogènes lorsqu'il y a un séisme, ce qui peut être dû au caractère aléatoire de la variable d'effondrement des bâtiments. Ce constat nécessite néanmoins une analyse détaillée des résultats par configuration de scénarios.

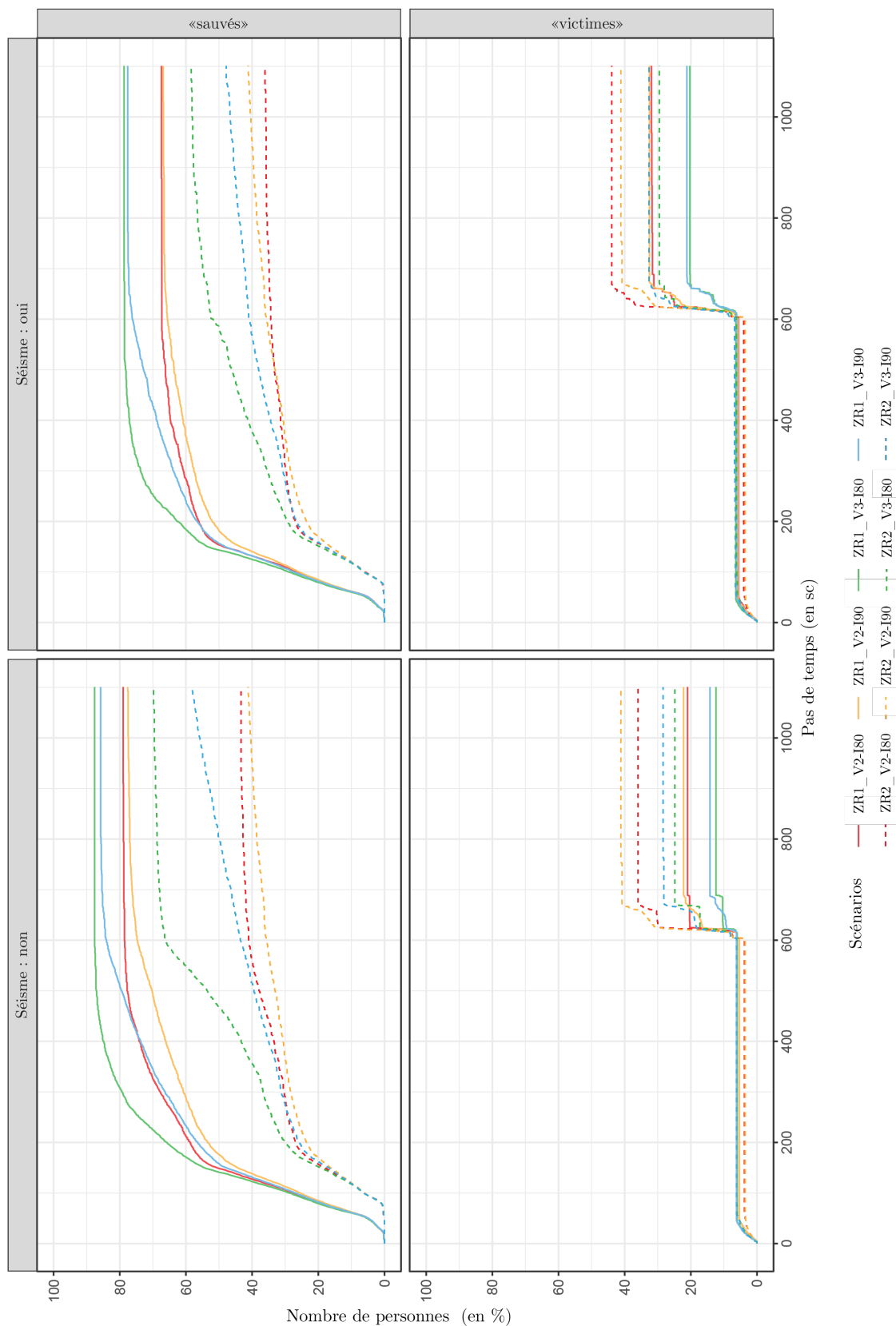


FIGURE 8.5 – Médianes des résultats des scénarios pour une hauteur de zones refuge de 60 mètres sans ou avec séisme, en fonction du temps.

Réalisation : Plattard, O., 2019.

L'analyse des valeurs issues du modèle ainsi que des boîtes à moustaches nécessite un complément avec les médianes des résultats de l'évolution du nombre d'agents *person* "sauvés" et "victimes" en fonction du temps de la simulation (Figure 8.5). Trois effets sont rapidement identifiables :

- pour des configurations de scénarios identiques, la totalité de celles prenant en compte un séisme présente moins de "sauvés" et plus de "victimes",
- des sous-divisions de résultats sont visibles – comme pour les résultats sans séisme analysés au chapitre 7 – entre les scénarios avec une localisation ZR1 et ZR2, puis ceux avec une vision 2 ou 3 ; cette répartition est plus claire pour les médianes présentant les agents "sauvés",
- pour les courbes présentant les "victimes", les paliers d'arrivée de l'eau sont moins francs et l'évolution de la courbe se fait plus progressivement que lorsqu'il n'y a pas de séisme.

De plus, les cartes de trafic sont analysées plus en détail en fonction des scénarios. Il faut préciser qu'à cause de la variable aléatoire d'effondrement des constructions, les cartes de trafic par scénario avec séisme ne peuvent pas représenter une agrégation des 100 simulations. La comparaison de deux cartes de trafic présentant un scénario avec séisme et un sans (Figure 8.6) met en avant l'impossibilité de réaliser une carte de trafic pour les 100 simulations alors que les bâtiments effondrés ne sont pas toujours les mêmes et que les dynamiques de déplacement peuvent donc fortement différer d'une simulation à une autre pour un même scénario (voir annexes 8.4). En effet, il est visible sur la carte de trafic avec séisme (Figure 8.6, en bas) les marques des effondrements autour des bâtiments du front de mer avec des cellules à fort trafic (en rouge) en périphérie des débris ; la rue perpendiculaire à la plage et longeant le bâtiment en arc de cercle ne semble pas avoir un trafic important – les cellules sont claires – pour l'agrégation des 100 simulations avec séisme alors que l'on voit que pour la carte de trafic du scénario sans séisme (Figure 8.6, en haut), il s'agit d'un axe très emprunté par les agents – les cellules sont rouges –. Cet effet du faible nombre de passages par cellule est sans aucun doute lié à l'effondrement de ce bâtiment en arc de cercle dans plusieurs simulations, dont la hauteur induit une obstruction totale de la rue par ses débris rendant le passage des agents impossible.

Les cartes de trafic pour une simulation sont néanmoins un support important pour comprendre et mettre en avant les dynamiques d'évacuation avec un séisme précurseur au tsunami. Les cartes de trafic utilisées dans ce chapitre ne sont donc pas des agrégations des 100 simulations par scénarios, mais une simulation est choisie en guise d'exemple par scénario afin de mettre en avant la dynamique de déplacement piéton au regard de l'effondrement.

La figure 8.4 présentant les valeurs des résultats pour le nombre de "sauvés" et "victimes" permet la mise en valeur de l'influence des variables en commençant par la localisa-



FIGURE 8.6 – Cartes de trafic pour les configurations en localisation ZR2, vision 2, imitateurs et probabilité de chercher son chemin 10%, hauteur de zones refuge à 60 mètres, sans séisme (en haut) et avec séisme (en bas).

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



tion des zones refuge qui a la différence des médianes la plus significative, tout comme pour les scénarios présentés au chapitre 7 ; La prise en compte du séisme et la vision présentent également des résultats très significatifs ; enfin, l'imitation et la probabilité de chercher son chemin ont les différences entre les médianes des résultats du nombre de "sauvés" et de "victimes" les moins significatives, comme pour les scénarios présentés au chapitre 7.

La prise en compte du tremblement de terre semble donc avoir un effet sur les résultats de sortie du modèle. Il est cependant nécessaire d'analyser plus en détail pour chaque configuration et scénario l'influence de ce contexte multi-risques sur l'évacuation de la population.

### 8.3 La prise en compte du risque sismique dans les résultats

Une analyse des résultats par effets croisés entre les variables et par scénario est nécessaire pour mettre en avant l'influence de la prise en compte du risque sismique dans une évacuation de population face à un tsunami. Elle est réalisée par variable afin d'isoler des effets combinés de chacune sur la praticabilité de l'espace urbain.

#### 8.3.1 Influence du paramètre de vision

Une lecture globale des résultats de tous les scénarios du modèle STEP nous montre que le paramètre de vision a une influence. Lorsque la variable vision est de 3, le nombre d'agents *person* "sauvés" est plus élevé, de 10 à 20%, et le nombre de "victimes" plus bas, d'environ 15%, que lorsque la variable vision est à 2.

De manière plus détaillée, une analyse des effets croisés entre la variable vision et celle du séisme permet d'observer que pour les visions 2 et 3, la présence d'un séisme entraîne davantage de "victimes" et moins de "sauvés" (Figure 8.7). La médiane des résultats du nombre de "sauvés" est en-dessous de 50% pour les scénarios avec séisme et de vision 2. Pour la vision 2, l'étendue des boîtes à moustaches et la proximité des valeurs des résultats pour les "sauvés" et "victimes" amènent à penser que plusieurs simulations ont générées davantage d'agents "victimes" que de "sauvés". En fonction des constructions effondrées, les agents doivent chercher un itinéraire et la vision a un rôle important à jouer. Plus la vision est importante, plus les agents pourront évaluer les cellules autour d'eux dans un grand rayon leur permettant de trouver plus rapidement un chemin vers une zone refuge.

Une analyse des résultats par scénario précise l'effet de la variation de la variable vision (Figure 8.8). Les scénarios avec une configuration en vision 3 ont des résultats avec plus de "sauvés" et moins de "victimes" que les scénarios avec une vision à 2. Les variations entre les résultats des scénarios semblent avoir les mêmes proportions, environ 20%, lorsqu'il y a un séisme que pour les scénarios sans séisme. Enfin, l'influence de la vision est d'autant plus visible dans une configuration de zones refuge en ZR2 (Figure 8.8). En effet, en ZR2, les scénarios avec un taux d'imitation à 20% montrent un taux de "sauvés" de 30% plus élevé en vision 3 que pour une vision 2. L'effet combiné de la vision avec ce taux d'imitation apporte une plus grande variation des résultats que celle déjà présente dans les autres scénarios.

Les résultats présentant l'évolution du nombre d'agents *person* "sauvés" et "victimes" en fonction du temps de la simulation permettent une lecture de l'influence du paramètre de vision au fil de l'évacuation avec séisme (Figure 8.9). La variation des résultats entre les différents scénarios pour une vision à 2 ou 3 est observable ; les configurations pour lesquelles la variation de vision semble avoir un effet sont celles avec un taux d'imitation

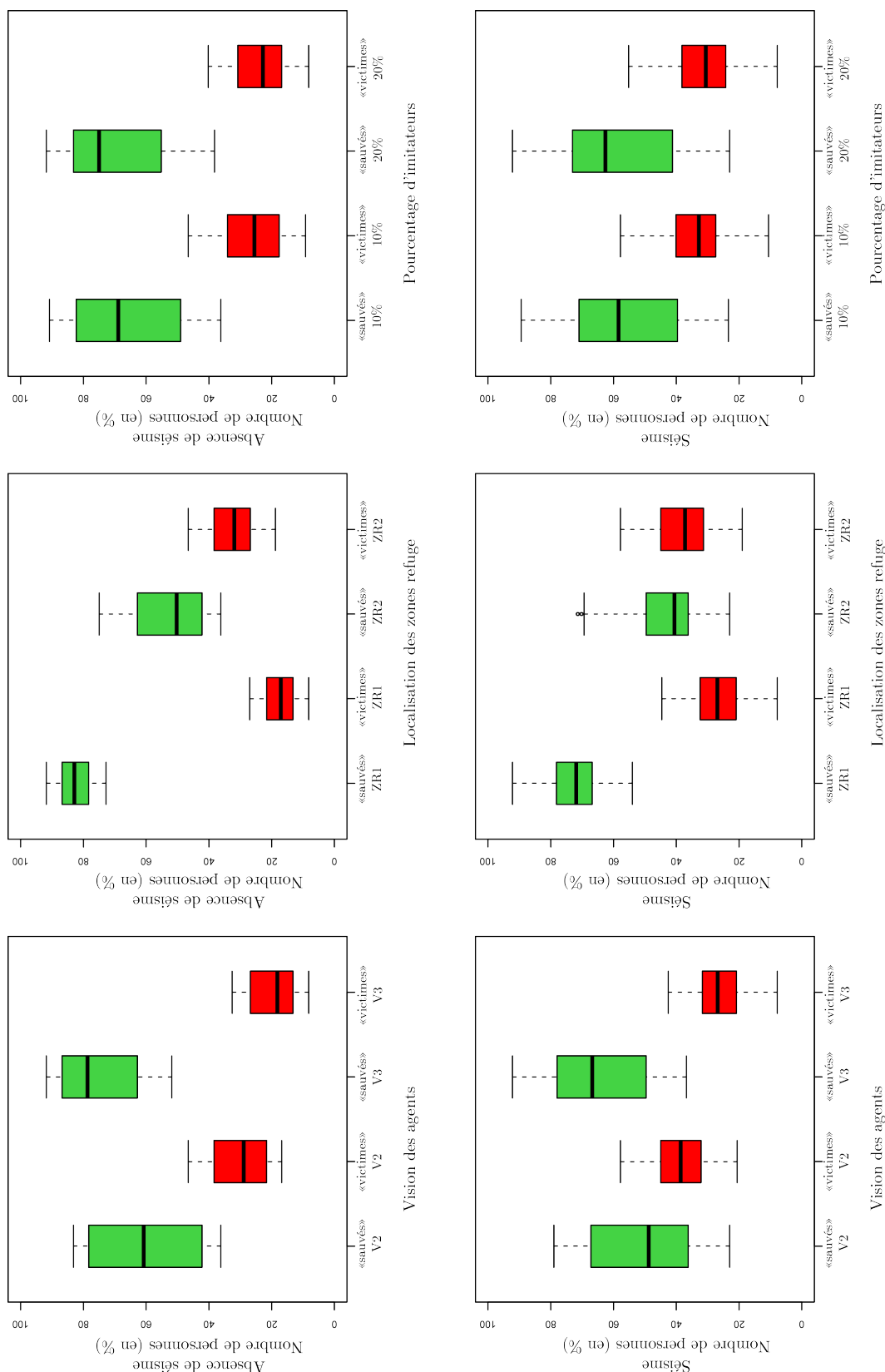


FIGURE 8.7 – Nombre d'agents ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapés par l'eau ("victimes", en rouge), effets croisés selon la présence d'un séisme (oui/non), la vision (2 ou 3), la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR2) et le pourcentage d'imitation (10 ou 20%).

Réalisation : Plattard, O., 2019.

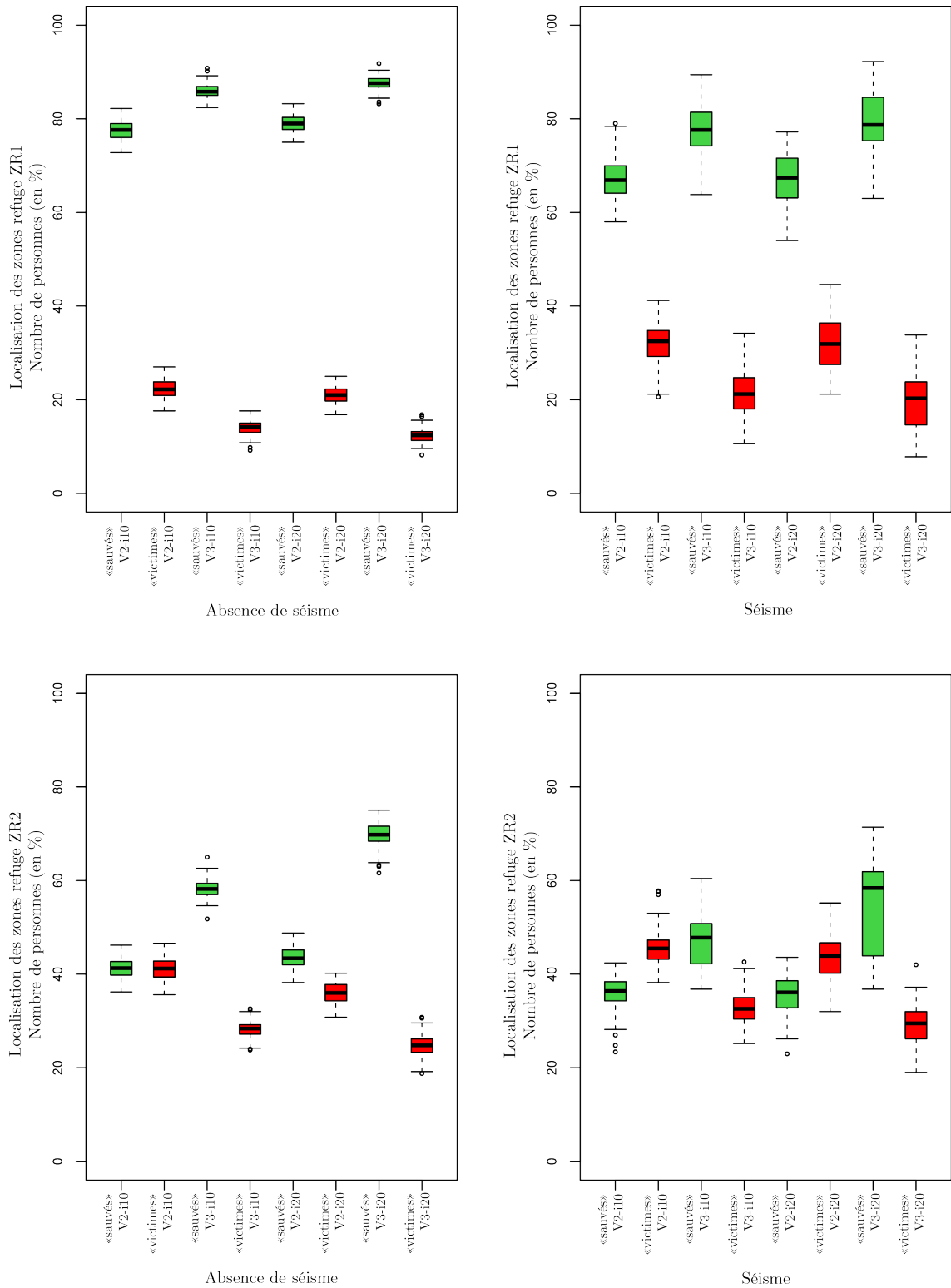


FIGURE 8.8 – Nombre d’agents ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapés par l’eau ("victimes", en rouge), selon la présence d’un séisme (oui/non), la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR2), le pourcentage d’imitation (10 ou 20%) et la vision (2 ou 3).

Réalisation : Plattard, O., 2019.

et de recherche de chemin à 10%. En effet, lorsque cette variable est à 20%, l'influence de la vision permet une évacuation plus rapide avec une plus grande part d'agents "sauvés" et moins de "victimes" au final. Néanmoins, dans l'autre configuration, la vision a un effet sur l'évolution de ces taux au long de l'évacuation (Figure 8.9) :

- dans la configuration ZR1, on voit que les courbes de "sauvés" continuent d'augmenter tout au long de l'évacuation. Cela laisse imaginer que les agents cherchant leur chemin en évitant les zones effondrées arrivent davantage à le trouver avec une vision à 3. Les courbes montrant le taux de "victimes" ne présentent pas de variations importantes en dehors du taux de "victimes" plus bas en vision 3 qu'en vision 2 ;
- dans la configuration ZR2, les courbes de l'évolution du nombre d'agents "sauvés" présentent une dynamique différente en vision 3 qu'en vision 2. L'évolution est continue après le premier palier. Cependant, sur la centaine de simulations effectuées pour ce scénario, les courbes se divisent en deux groupes avec un premier présentant un taux faible, autour de 40%, d'agents "sauvés" et le second un taux plus élevé, autour de 60%. La vision 3 permet d'avoir plus d'agents atteignant les zones refuge, avec cependant une très grande disparité de résultats.

Les effets de la variation de la vision sont semblables à ceux analysés dans le chapitre 7. La vision influence donc les résultats en permettant aux agents *person* d'évaluer les cellules autour d'eux dans un rayon plus ou moins important. La vision constitue donc une variable pouvant garantir une plus grande part d'agents atteignant une zone refuge. Tout comme exprimé dans le chapitre 7, il serait intéressant d'optimiser le code du modèle STEP afin de pouvoir tester des valeurs plus importantes pour la vision.

### 8.3.2 Influence du nombre d'imitateurs et de la probabilité de chercher son chemin

Les variables d'imitations et de recherche de chemin dans les zones de non-visibilité des zones refuge ont des variations de 10 et 20% qui présentent peu d'influence sur les résultats des scénarios avec séisme. Ce constat était déjà celui issu des analyses réalisées au chapitre 7 pour les scénarios sans séisme précurseur et effondrement des constructions.

L'analyse des effets croisés entre les variables d'imitation et de recherche de chemin et la présence d'un séisme (Figure 8.7) met en avant la faible variation des résultats du nombre d'agents "sauvés" et "victimes". Le nombre de "sauvés" est légèrement plus important et le nombre de "victimes" plus faible pour une imitation à 20%, mais cette variation reste autour de 5%. Néanmoins, il est important de signaler la grande étendue des boîtes à moustaches, environ 30%, notamment pour les résultats pour les scénarios avec séisme. Cette étendue importante laisse envisager une grande hétérogénéité des résultats des différentes simulations.

Une analyse plus détaillée par scénario permet de mettre en avant les scénarios et résultats générant cette grande étendue des boîtes à moustaches (Figure 8.8). Les scénarios ont une grande variabilité de résultats en fonction des autres variables tandis que les variables d'imitation et de recherche de chemin n'ont pas une influence sur les résultats. La disparité des pourcentages d'agents "sauvés" et "victimes", notamment liée à la localisation des zones refuge, explique l'étendue des boîtes à moustaches. L'influence de la variable d'imitation est néanmoins un peu plus visible pour les scénarios en configuration ZR2.

L'analyse des courbes de l'évolution du nombre d'agents "sauvés" et "victimes" en fonction du temps de la simulation confirme la faible influence de la variation de l'imitation et de la recherche de chemin dans les scénarios avec un séisme (Figure 8.7).

La variable d'imitation et de recherche de chemin dans les zones de non-visibilité des zones refuge nécessiterait d'être testée sur d'autres valeurs afin de pouvoir mettre en avant d'éventuels effets ponctuels sur les résultats. Cependant, la faible influence sur les résultats présentés chapitre 7 et 8 laisse présager une nécessité d'affiner cette variable, d'autant plus lorsque la présence d'un séisme – comme pour la localisation des zones refuge – semble avoir un effet fort sur les résultats.

### 8.3.3 Influence du choix de la localisation des zones refuge

Le choix de localisation des zones refuge a une influence importante sur les résultats de simulations sans séisme (voir chapitre 7) ; cet effet semble également important pour les résultats de simulations avec séisme (Figure 8.7). Une analyse des effets croisés entre la localisation des zones refuge et la présence d'un séisme dans la simulation permet de mettre en avant que la variable de localisation apporte une plus grande variation de résultats que les autres. Avec ou sans séisme, la localisation ZR1 apporte une plus grande part d'agents "sauvés", de 20 à 40%, et moins de "victimes", de 10 à 20%, qu'en ZR2. Néanmoins, ces résultats semblent respectivement plus faibles et plus élevés lorsqu'il y a un séisme.

De plus, les boîtes à moustaches présentent une faible étendue pour les scénarios sans séisme en ZR1 alors que pour la même localisation avec séisme, l'étendue et donc l'hétérogénéité des résultats est plus importante (Figure 8.7). Pour une configuration ZR2, l'étendue des boîtes à moustaches est importante avec ou sans séisme ; cependant, le taux de "sauvés" est plus bas et celui des "victimes" plus élevé avec un séisme. Les résultats sont d'ailleurs très proches avec une grande étendue, ce qui laisse supposer un inversement de résultats sur certains scénarios avec davantage de "victimes" que de "sauvés". Une analyse des résultats par scénario permet de comprendre ces effets.

Les résultats sous forme de boîtes à moustaches présentant le nombre d'agents *person* "sauvés" et "victimes" pour chaque scénario permettent de confirmer l'influence de la localisation des zones refuge au regard de la présence d'un séisme (Figure 8.8). De manière

## CHAPITRE 8. LA PRATICABILITÉ DES ITINÉRAIRES DANS STEP

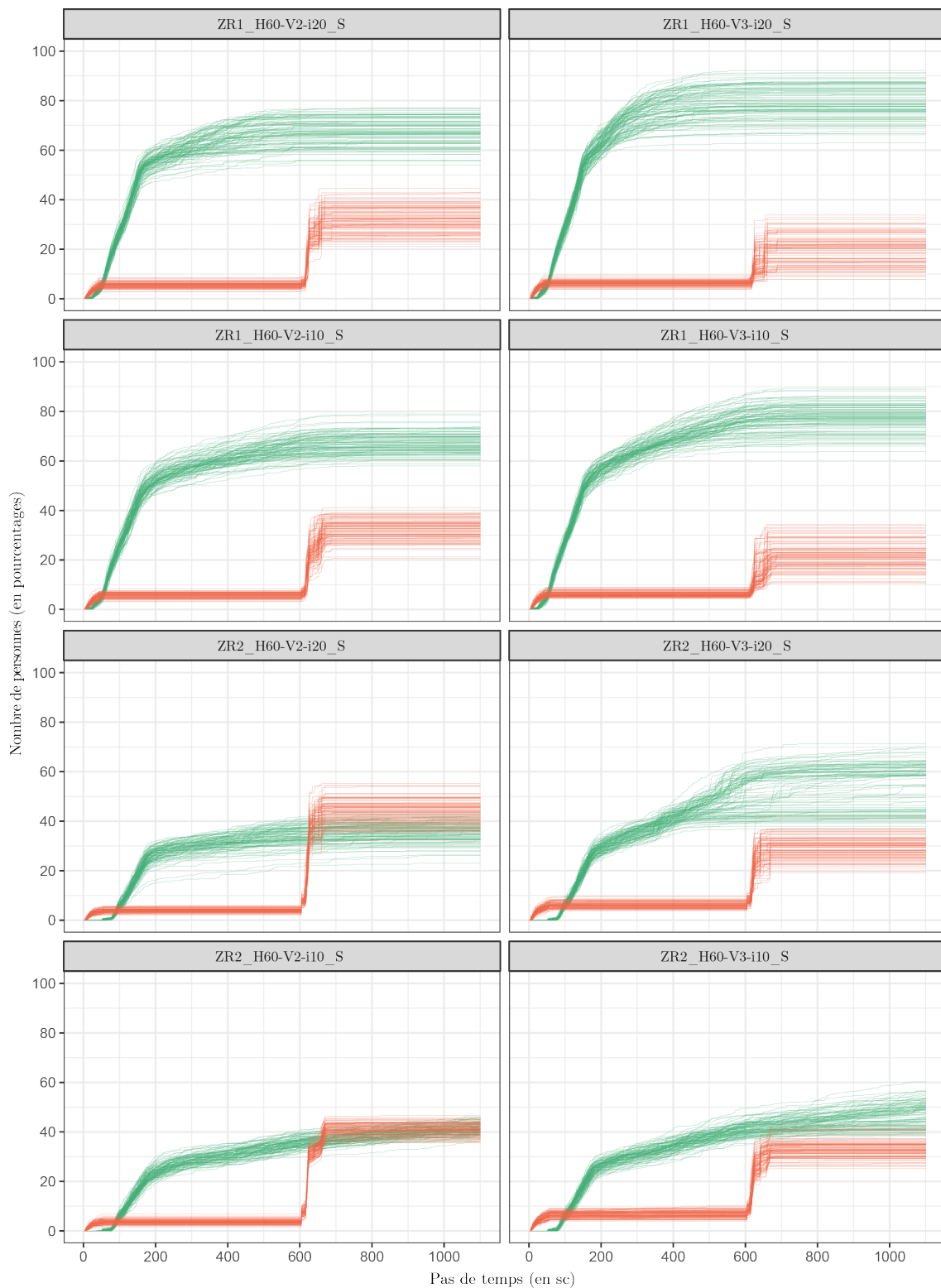


FIGURE 8.9 – Evolution du nombre d'agents ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapés par l'eau ("victimes", en rouge) en fonction du temps de la simulation pour toutes les simulations par scénario avec séisme.

Réalisation : Plattard, O., 2019.

générale, sur l'ensemble des scénarios, l'effet de la localisation des zones refuge semble similaire, néanmoins, quelques effets sont mis en avant :

- les résultats avec séisme présentent des étendues plus importantes que les résultats des scénarios sans séisme ;
- les résultats en ZR1 avec séisme comptent plus de "victimes" et moins de "sauvés" lorsqu'il y a un séisme. Ces résultats – agrégeant les 100 simulations par scénario – montrent cependant une forte hétérogénéité de par l'étendue des boîtes à moustaches ;
- en ZR2, les scénarios avec une variable de vision à 2 comptent plus de "victimes" que de "sauvés" ;
- en ZR2, les scénarios avec séisme et vision 3, ont des résultats hétérogènes représentés par l'étendue de la boîte à moustaches.

La présence d'un séisme dans la simulation semble renforcer l'effet de la localisation des zones refuge en abaissant le niveau de "sauvés" et en augmentant le nombre de "victimes".

Les courbes de l'évolution du nombre d'agents "sauvés" et "victimes" en fonction du temps (Figure 8.9), confirment l'effet de la localisation des zones refuge présenté au chapitre 7. En ZR2, la temporalité pour rejoindre les zones refuge est beaucoup plus longue. De plus, beaucoup d'agents n'arrivent pas jusqu'à une zone refuge. L'effet de la proximité de la zone refuge située vers le centre commercial Cap 3000 (voir chapitre 7), est visible par le palier d'agents "sauvés" en ZR2. Si l'on prend en considération le nombre d'agents "sauvés" à partir de ce palier, il semble que peu d'agents atteignent les autres zones refuge. Il faut cependant souligner l'hétérogénéité de courbes pour les scénarios avec séisme qui accentue également les résultats liés à la localisation.

Au chapitre 7, nous avons vu que pour des scénarios sans séisme, les zones refuge ne sont pas toujours atteintes par beaucoup d'agents. La localisation des zones refuge prend donc d'autant plus d'importance en cas de séisme et d'effondrement des bâtiments. Le choix de ces zones refuge a été volontairement conservé sans modification entre les scénarios multi-risques – STEP 3 – ou non – STEP 2 –, afin de mettre en avant l'importance de la prise en compte des conséquences de plusieurs risques dans le choix et l'accès des zones refuge. La carte de trafic d'une simulation d'un scénario avec séisme (Figure 8.10) illustre une configuration dans laquelle les agents n'arrivent pas à rejoindre les zones refuge en ZR2, hormis celle située près du centre commercial Cap 3000 qui est à proximité de la plage. Une des raisons de cette difficulté à rejoindre les zones refuge est due au séisme et à l'effondrement des structures bâties. Les débris n'apparaissent pas sur la carte de trafic<sup>1</sup>, néanmoins, le dessin du trafic permet de mettre en avant les constructions effondrées. Durant cette simulation, il semble que la plupart des effondrements aient eu lieu sur le front de mer et concernent (Figure 8.10) :

---

1. Manquement dû à une erreur dans l'exportation du visuel de l'interface du modèle durant la phase de simulation.



## CHAPITRE 8. LA PRATICABILITÉ DES ITINÉRAIRES DANS STEP

- le grand et haut bâtiment en arc de cercle (à l'est), qui, par sa hauteur, obstrue la rue perpendiculaire à la plage qui permet un accès direct vers l'intérieur des terres,
- le bâtiment en longueur (à l'ouest) qui obstrue deux rues permettant un accès vers la zone refuge de la gare,
- très probablement des constructions n'étant pas situées directement sur la plage, mais remettant en cause la suite du parcours pour les agents ayant réussi à quitter le front de mer.

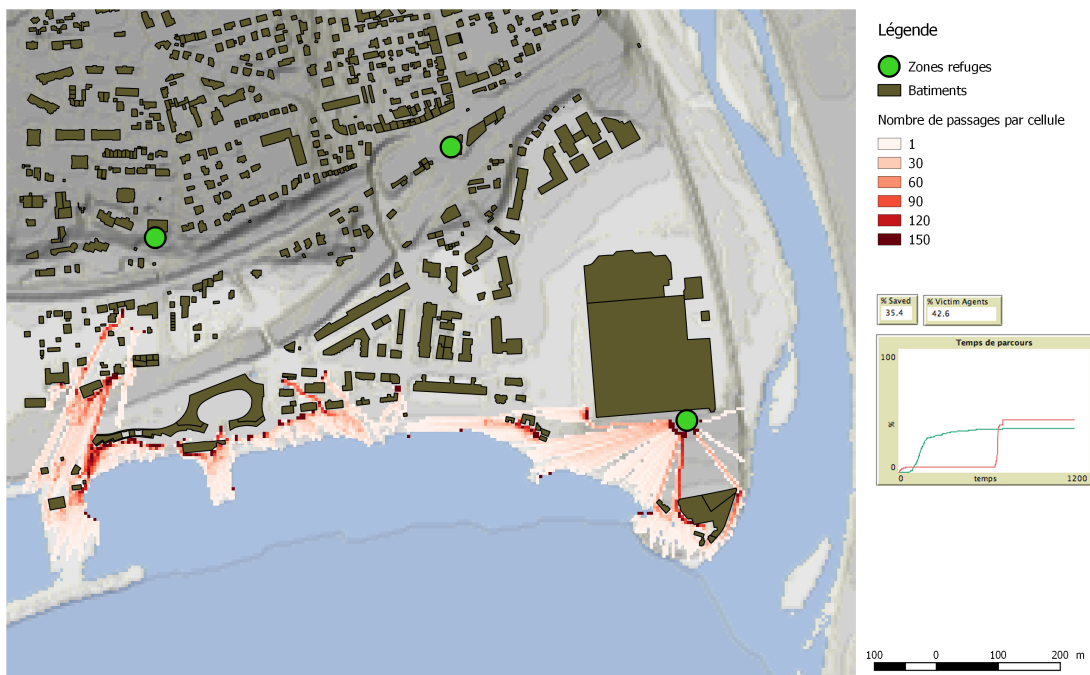


FIGURE 8.10 – Carte de trafic pour une simulation d'un scénario avec séisme, en vision 2, localisation ZR2 et imitation 20%.

Réalisation : Chalonge, L., et Plattard, O., 2019

La carte de trafic (Figure 8.10) permet donc de visualiser la praticabilité quasi nulle de certains itinéraires, constat confirmé par les résultats affichés sur les moniteurs de la simulation qui mettent en avant un pourcentage d'agents "victimes" supérieur à celui des "sauvés". L'effondrement des constructions pouvant obstruer des rues, l'accès aux zones refuge est donc parfois compromis ; les agents doivent chercher un nouvel itinéraire, rallongeant la durée de parcours et pouvant engendrer plus d'agents touchés par l'eau.

Les différentes variables prises en compte dans les simulations ont donc une influence similaire sur les résultats avec et sans séisme. En effet, il est possible de retrouver les effets globaux avec une variable d'imitation et de recherche de chemin ayant une faible influence hormis ponctuellement en effet combiné ; puis, la variation de la vision a également un effet modéré mais significatif dû à la possibilité qu'elle donne à un agent d'évaluer davantage de cellules autour de lui, lui permettant ainsi de trouver son chemin jusqu'à la zone refuge malgré les effondrements. Enfin, la localisation des zones refuge reste le paramètre ayant la plus grande influence sur les résultats du nombre d'agents ayant rejoint les zones refuge ou ayant été rattrapé par l'eau et de la temporalité de cette évacuation.

Analyser l'effet du séisme et de ces impacts sur l'évacuation plus en détail permet de comprendre l'importance de la prise en compte de ce contexte multi-risques dans l'évacuation.

## 8.4 Influence du risque sismique

La prise en compte d'un séisme dans la simulation de l'évacuation ne semble pas modifier les effets des différentes variables ; cependant, l'effet de la prise en compte de ce contexte multi-risques a un impact fort qu'aucune variable ne semble arriver à compenser ou atténuer.

La comparaison des résultats sous forme de boîtes à moustaches du pourcentage d'agents *person* "sauvés" et "victimes" pour les scénarios STEP 2 et STEP 3 met en avant l'effet de la prise en compte du séisme (Figures 8.7 et 8.8). Deux principaux effets sont observables :

- le pourcentage et plus spécifiquement la médiane des résultats d'agents "sauvés" est plus basse et le pourcentage d'agents "victimes" est plus élevé lorsqu'il y a un séisme (Figures 8.7 et 8.8) ;
- les boîtes à moustaches ont une étendue plus importante lorsqu'il y a un séisme que pour les scénarios sans séisme (Figure 8.8).

Cette étendue se retrouve sur les courbes d'évolution du nombre de "sauvés" et "victimes" en fonction du temps de la simulation (Figures 8.9) et est d'autant plus importante en comparaison des courbes des scénarios sans séisme (Figures 7.14). Les courbes des scénarios STEP 2 (Figures 7.14) présentent une évolution homogène pour l'ensemble des simulations d'un même scénario, notamment en ZR1. En revanche, les courbes pour les scénarios STEP 3 (Figures 8.9) montrent une grande hétérogénéité pour les 100 simulations. En effet, on observe jusqu'à 30% d'écart de résultats sur certains scénarios comme celui de configuration vision 3, ZR2 et 10% d'imitation et de recherche de chemin.

Cette hétérogénéité s'explique par l'effondrement aléatoire des constructions. En fonction des simulations d'un même scénario, ce ne sont pas les mêmes bâtiments qui vont s'effondrer et répandre leurs débris. Les figures 8.11 et 8.12 illustrent le caractère aléatoire de la variable d'effondrement et de son impact sur les résultats. Les deux cartes de trafic de la figure 8.11 correspondent à deux simulations pour un scénario de configuration : localisation des zones refuge ZR1, vision 3, probabilité de chercher son chemin dans les zones d'ombre et imitation 20%, hauteur de zones refuge 60 mètres et séisme ; et les deux cartes de trafic de la figure 8.12 correspondent à deux simulations pour un scénario de configuration : localisation des zones refuge ZR2, vision 3, probabilité de chercher son chemin dans les zones d'ombre et imitation 20%, hauteur de zones refuge 60 mètres et séisme. Seule la localisation des zones refuge varie entre ces deux scénarios. Chacune des deux simulations de chaque scénario a donc les mêmes paramètres lors de l'initialisation. Elles sont donc semblables dans les paramètres, seulement, deux variables sont aléatoires :

- la localisation des agents *person* lors de l'initialisation se fait aléatoirement en zone inondable, hors cellules d'eau, bâties et de débris,
- l'effondrement des constructions qui est une probabilité qui s'applique à l'ensemble des cellules bâties, faisant varier le choix des cellules bâties qui s'effondrent.



FIGURE 8.11 – Cartes de trafic pour les configurations en localisation ZR1, vision 3, imitateurs et probabilité de chercher son chemin 20%, hauteur de zones refuge à 60 mètres, avec séisme.

Réalisation : Chalonge, L., et Plattard, O., 2019

## CHAPITRE 8. LA PRATICABILITÉ DES ITINÉRAIRES DANS STEP



FIGURE 8.12 – Cartes de trafic pour les configurations en localisation ZR2, vision 3, imitateurs et probabilité de chercher son chemin 20%, hauteur de zones refuge à 60 mètres, avec séisme.

Réalisation : Chalonge, L., et Plattard, O., 2019

L'observation des cartes de trafic permet d'observer les effets de l'effondrement des constructions. En effet, le dessin du déplacement piéton met en avant des cellules sans passage (en couleur claire), avec souvent des cellules avec beaucoup de passages (en rouge) en périphérie permettant de dessiner les zones où des débris ont obstrué la voirie, bloquant ainsi le cheminement piéton.

La carte de trafic (Figure 8.11, en haut) met en avant l'effondrement des bâtiments du front de mer bloquant ainsi plusieurs voies perpendiculaires à la plage. Les agents arrivent cependant à se frayer un chemin jusqu'à la zone refuge centrale à travers les immeubles. Dans le cas de la carte de trafic (Figure 8.11, en bas), certains effondrements d'immeubles du front de mer se dessinent, bloquant le cheminement des agents. De plus, la zone refuge centrale ne semble avoir été rejointe par aucun agent ; ils ont tous été bloqués, dans leur itinéraire avant d'atteindre la zone refuge, par des débris. Ce constat est visible sur les résultats de sorties de la simulation, à droite des cartes de trafic, montrant les pourcentages d'agents ayant rejoint les zones refuge et ceux ayant été touchés par l'eau. En effet, la simulation du bas montre un taux de "sauvés" plus faible que la simulation du haut pour laquelle les trois zones refuge ont été rejointes par des agents. Néanmoins, la localisation est en ZR1 et offre une proximité de mise à l'abri, les deux simulations présentent des dynamiques d'évacuation proches.

Les cartes de trafic pour des simulations avec une localisation ZR2, permettent également de rendre visibles différentes typologies d'effondrement des constructions via les dynamiques de déplacement observables (Figure 8.12). Dans les deux simulations, il n'y a pas de problème d'accès à la zone refuge située à l'est, aux abords du centre commercial Cap 3000 ; il n'en est cependant pas de même pour les deux autres zones refuge plus éloignées du front de mer. La carte de trafic (Figure 8.12, en haut) montre que la totalité de la barre d'immeuble située sur la partie ouest du front de mer s'est effondrée, empêchant le passage des agents et générant une zone de fort trafic (en rouge) sur les cellules aux abords de cet immeuble. De plus, un trafic important (en rouge) est visible à l'ouest qui symbolise des agents qui n'arrivent pas à atteindre la zone refuge avant la fin de la simulation, peut être bloqués par des effondrements. La carte de trafic (Figure 8.12, en bas) a une configuration d'effondrement différente permettant à davantage d'agents de rejoindre les zones refuge. Les deux cartes ont plusieurs immeubles effondrés en commun sur le front de mer, mais les effondrements à l'intérieur des terres jouent aussi un rôle sur la mise à l'abri. Les résultats de sortie de simulation (à droite des cartes) appuient les tendances de mises à l'abri visibles sur les cartes de trafic. La simulation du haut montre peu d'agents "sauvés" (41,2%) et une grande part de "victimes" (35,2%) ; il est important de préciser que pour cette simulation, 23,6% des agents ne sont ni "sauvés" ni "victimes". Il s'agit ici d'agents qui n'ont pas réussi à rejoindre une zone refuge dans le temps de la simulation, mais qui sont cependant sortis de la zone inondable et n'ont donc pas été rattrapés par l'eau. Cette situation ne concerne que peu d'agents dans la majorité des simulations effectuées pour l'ensemble des scénarios, mais est accentuée en ZR2 – une longue distance à parcourir – et avec un séisme – ralentissement du cheminement –. Enfin, les résultats issus de la simula-

tion (en bas) montrent la progression lente du nombre de "sauvés" mise en valeur par le dessin des cheminements sur la carte de trafic.

Ces quatre cartes de trafic illustrent l'impact important d'un effondrement de constructions lié à un séisme sur le cheminement piéton et la praticabilité des itinéraires jusqu'aux zones refuge. Chaque simulation avec séisme apporte des éléments nouveaux et illustrant de manière intéressante les effets d'un séisme précurseur à l'inondation du tsunami sur un territoire urbain. Il n'est cependant pas possible de toutes les traiter individuellement dans cette thèse.

Pour certaines simulations, les débris vont obstruer certaines voiries qui remettront en cause l'itinéraire des agents de manière plus importante que pour d'autres simulations d'un même scénario, dans lesquelles les débris ne rendront pas impraticables le chemin jusqu'aux zones refuge. Il serait cependant intéressant de tester des scénarios avec un séisme et un effondrement déterminé sur un territoire afin de voir l'impact de ce séisme sur la stratégie d'évacuation envisagée.

## Influences principales et conclusion

Les résultats issus des simulations des scénarios avec la prise en compte d'un séisme précurseur montrent que ce dernier a une influence non négligeable sur l'évacuation de la population jusqu'aux zones refuge.

Pour les scénarios avec séisme, les différentes variables de vision, imitation et recherche de chemin et de localisation des zones refuge n'ont pas d'influence différente que pour les scénarios sans séisme (Figure 8.4). Néanmoins, sur l'ensemble des paramètres, l'étendue des résultats entre les valeurs minimum et maximum est plus importante pour les résultats des scénarios avec séisme que sans séisme, avec respectivement en moyenne 70 points pour le nombre de "sauvés" et 40 points pour le nombre de "victimes" quand il y a un séisme, contre 20 à 50 points pour les "sauvés" et en moyenne 30 points pour les "victimes" pour les scénarios sans séisme. Les valeurs minimums pour les agents "sauvés" sont plus basses avec séisme – autour de 23% en majorité –, tandis que les valeurs maximum du nombre d'agents "victimes" sont plus élevées avec des valeurs autour de 55-57% en majorité.

La figure 8.13 nous présente les valeurs d'écart entre les médianes des résultats du nombre de "sauvés" et de "victimes" pour les scénarios STEP 2 et STEP 3. La représentation sous forme de diagramme polaire permet la mise en valeur des variables avec une différence significative entre les valeurs des médianes des résultats. Cela confirme que les trois variables avec un écart significatif évoquées au long de ce chapitre (Figure 8.4) sont la localisation des zones refuge, la présence d'un séisme ainsi que la vision des agents.

De plus, tout comme pour les scénarios sans séisme, la variation de la vision a une influence importante sur le nombre d'agents ayant rejoint des zones refuge et ceux rattrapés par l'eau. La vision 3 apporte en moyenne 15% de "sauvés" en plus que pour les scénarios en vision 2 lorsqu'il y a un séisme. La présence de ce dernier n'a donc pas d'effet sur l'influence positive de la variation de la vision. Enfin, la proportion d'imitateurs et d'agents cherchant leur chemin dans les zones d'ombre a un effet présentant des variations de moins de 5 points.

Cependant, les zones d'ombre n'ont pas varié dans ces scénarios qui centrent la question sur la praticabilité des itinéraires et non la lisibilité de l'espace urbain ; des simulations avec séisme à d'autres hauteurs de zones refuge et donc des zones refuge générant une zone d'ombre plus ou moins importante pourraient être testées afin de voir des effets combinés de la variable. Enfin, la localisation des zones refuge a un impact d'autant plus fort avec un séisme précurseur. En effet, la localisation ZR2 peut, dans certaines configurations d'effondrement, combiner l'effet de la distance à parcourir avec celui d'itinéraires obstrués par les débris liés au séisme.

La prise en compte du risque sismique a donc son importance. En effet, les écarts notables, la grande étendue et l'hétérogénéité des résultats issus des simulations des scénarios avec séisme montrent donc la forte influence de l'effondrement sur le cheminement piéton et



la mise à l'abri des agents. La comparaison du total des résultats pour les scénarios STEP 2 et STEP 3 (Figure 8.13), permet d'apprécier les effets de la présence du séisme précurseur à travers l'étendue et les écarts de résultats, mais principalement par un maximum de "victimes" au-delà de 50% lorsqu'il y a un séisme et, pour les valeurs pour les "sauvés" un minimum à 23% et un premier quantile à 40%. En fonction des simulations et de la configuration de l'effondrement des constructions, le séisme a des effets non négligeables visibles à travers les résultats.

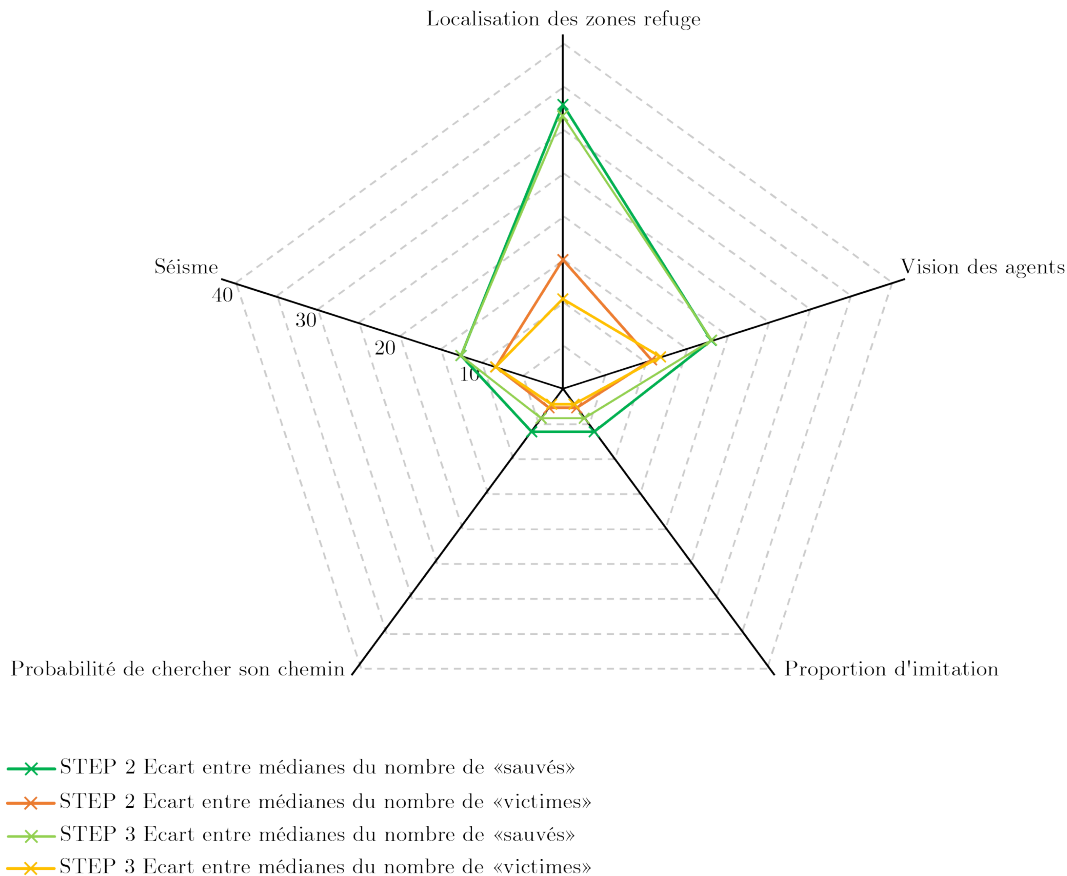


FIGURE 8.13 – Diagramme polaire des effets des variables par valeurs d'écart entre les médianes des résultats pour les "sauvés" et "victimes" des scénarios STEP 2 et STEP 3.

Réalisation : Plattard, O., 2019.

A travers ces résultats, la praticabilité de l'espace urbain est questionnée. La mise en place de stratégies d'évacuation face à un tsunami sans la prise en compte d'un séisme provoquant des effondrements semble remise en cause : Comment garantir la praticabilité jusqu'à une zone refuge ? Les résultats issus des scénarios avec séismes montrent bien l'effet dommageable sur le nombre d'agents "sauvés" que peut générer la non-anticipation d'effondrements sur l'espace de voirie.

Les résultats du modèle STEP confirment donc que la prise en compte du risque sismique est primordial dans la mise en place de stratégies d'évacuation en cas de tsunami. Néanmoins, deux perspectives sont à envisager afin d'explorer davantage l'influence du

risque sismique sur l'évacuation.

La première est de tester des scénarios avec un effondrement fixe et non aléatoire. Dans l'idéal, cette perspective nécessite un travail de terrain afin d'isoler les bâtiments vulnérables sismiquement et ayant une probabilité d'effondrement ; cependant, dans un premier temps, plusieurs configurations d'effondrements fixes peuvent être déterminées, indépendamment de la réalité du terrain, afin d'observer leur effet.

La seconde est d'implémenter le modèle STEP sur un autre terrain que celui de Saint-Laurent-du-Var (comme évoqué au chapitre 7), afin de pouvoir mettre en avant d'éventuels effets de sites et de voir l'influence de la prise en compte du risque sismique dans un milieu urbain présentant des caractéristiques différentes.

## Conclusion de la troisième partie

Cette dernière partie traite donc les résultats issus du modèle STEP. Ces résultats sont analysés et discutés au travers des deux problématiques principales que sont :

- l’influence de la lisibilité de l’espace urbain sur l’évacuation piétonne (voir chapitre 7),
- l’influence de la prise en compte du contexte multi-risques, avec un séisme précurseur à l’inondation, sur la praticabilité de l’espace urbain durant une évacuation piétonne (voir chapitre 8).

La prise en compte des deux problématiques est faite de manière isolée – une par chapitre – afin de mettre en valeur les influences des différentes variables au prisme de l’une ou de l’autre.

Le chapitre 7 prend en compte la question de la visibilité en milieu urbain à travers les scénarios STEP 1 et STEP 2 qui font varier la variable de hauteur des zones refuge, générant les zones de non-visibilité dans le modèle. Les autres variables de vision, localisation de zones refuge, imitation et probabilité de chercher son chemin varient également au sein de ces deux scénarios. Les variations de la hauteur des zones refuge semblent avoir un effet plus restreint qu’envisagé au préalable ; cette variable a néanmoins un rôle important puisqu’elle génère les zones d’ombre qui influencent les autres variables de vision des agents comme l’imitation ou la recherche de chemin. Ces dernières ont également un effet restreint comparé à celui d’autres variables ; cependant, des effets de seuil et des effets combinés avec d’autres variables montrent leur effet sur les résultats du modèle.

En revanche, l’analyse des résultats sous leurs différentes formes présente une influence forte de la variable de vision des agents ainsi que l’importance de la localisation des zones refuge. L’effet des deux configurations de cette dernière est prédominant dans les résultats. De manière globale, les agents ont plus de difficultés à rejoindre les zones refuge en configuration ZR2.

Le chapitre 8 traite de la praticabilité de l’espace urbain à travers la prise en compte d’un séisme précurseur générant un effondrement aléatoire des constructions. Une analyse globale des résultats issus des scénarios STEP 2 et STEP 3 montre l’effet important du séisme sur l’évacuation. Ce constat est confirmé par une analyse plus détaillée par variable.

La prise en compte d’un tremblement de terre avant l’inondation apporte une forte hétérogénéité des résultats. Ceci est dû à l’aspect aléatoire de la variable d’effondrement ; en effet, en fonction des constructions effondrées et de l’obstruction de voiries qu’elles entraînent, certaines configurations de simulation rendent plus ou moins difficile l’accès aux zones refuge.

Le choix de la localisation des zones refuge est donc un élément important dans les résultats issus de l’évacuation. De plus, la fluctuation des résultats lorsqu’il y a un séisme précurseur met en avant l’importance de la prise en compte du contexte multi-risques dans

la mise en place de stratégies d'évacuation sur un territoire.

Cependant plusieurs aspects ressortent de ces simulations. Tout d'abord, le choix des zones refuge pour les scénarios STEP comporte une redondance. En effet, la zone refuge proche du centre commercial et donc de la plage est présente dans les deux configurations ZR1 et ZR2. Ce choix a été fait pour sa proximité avec la plage mais hors zone inondable en ZR1 et parce que ce lieu a été cité dans les cartes mentales issues des questionnaires effectués sur le terrain ce qui est la caractéristique de la configuration ZR2. Or, la répétition de la même localisation apporte une part de similarité dans les résultats, puisqu'une zone refuge à le même rapport d'accessibilité dans les deux configurations. C'est pourquoi, il est à envisager d'autres scénarios avec une localisation différente pour l'ensemble des zones refuge.

De plus, les résultats sont issus du modèle STEP pour le front de mer de Saint-Laurent-du-Var. Chaque site a une morphologie et topographie propre, dans le cas de cette commune, le front de mer est très bâti. Or, ces particularités ont une influence sur les résultats issus des simulations, des effets de site. La mise en place du modèle STEP sur un autre site pourrait donc amener des résultats différents avec les mêmes variables du modèle. En effet, en fonction des sites, la visibilité ou la praticabilité de l'espace urbain sont soumises à des contraintes différentes et l'influence des variables visible dans les résultats peut varier de celle du modèle STEP pour Saint-Laurent-du-Var.

Enfin, afin d'affiner les résultats issus des scénarios avec séisme, des scénarios avec une variable d'effondrement peut être proposée. Cette démarche est envisageable de manière plus concrète avec des bâtiments vulnérables diagnostiqués sur le terrain ou non. Supprimer l'aspect aléatoire de la variable mettrait en valeur des dysfonctionnements pour le cheminement urbain et permet de placer des zones refuge de manière plus pertinente. Se rapprocher du terrain ou simplement enlever les côtés aléatoires de la variable permet d'ajuster des stratégies d'évacuation, rapprochant le modèle STEP d'un modèle d'aide à la décision auprès d'acteurs locaux, notamment en prévention ou gestion des risques majeurs.

CONCLUSION GENERALE

---

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Afin de revenir à l'origine de ce travail de thèse, je vous invite à vous imaginer visitant l'île d'Ortigia et son marché situé à côté du temple d'Apollon, non loin de la jonction avec la partie sicilienne. Soudain, vous ressentez des secousses, vous avez du mal à vous tenir debout. Après un temps de surprise, vous réalisez que c'est un tremblement de terre. Heureusement, la place sur laquelle se déroule le marché vous a permis de vous situer loin des bâtiments. En effet, en reprenant vos esprits, vous découvrez beaucoup de constructions en partie ou totalement détruites autour de vous. Craignant pour votre sécurité, vous suivez les personnes qui décident de se rendre sur le port, zone indiquée comme refuge sur les plans d'évacuation de la Sécurité Civile présents dans la ville.

Ce qui suit se déroule très rapidement, en moins de 10 minutes<sup>2</sup>. Vous êtes encore étourdi par ces secousses quand vous voyez le niveau de l'eau du port baisser. Des bruits courent qu'un tsunami approche. Aucune alerte n'est donnée dans ce délai très court. Vous décidez donc de vous éloigner de cette zone du port en voyant l'inondation arriver. Vous avez une bonne intuition et remontez le Corso Matteotti en slalomant entre les débris pour arriver avec difficulté jusqu'à la Piazza Archimede. Autour de cette place, la majorité des bâtiments se sont effondrés rendant son accès par d'autres rues impossible. D'autres personnes, se trouvant par exemple sur la promenade de bord de mer qui fait le tour de l'île, n'ont pas pu franchir les débris obstruant les autres rues et n'ont donc pas eu la même chance que vous de pouvoir trouver refuge sur cette place.

Ce récit permet de recontextualiser le questionnement central de cette thèse : l'évacuation d'une population présente sur un territoire urbain littoral et exposée à un évènement majeur combinant plusieurs aléas. De nombreux travaux ont déjà traité de l'évacuation d'une population sur un territoire à travers des simulations et la mise en place de stratégies ou de plans d'évacuation. Très majoritairement, ces travaux prennent en considération

---

2. Pour rappel, à Syracuse, un évènement de référence de 1693 comprend un séisme d'une magnitude estimée entre 7,2 et 7,4 ainsi que d'un tsunami d'une hauteur de 4 à 5 mètres avec une arrivée sur la côte dans un délai de 5 à 10 minutes après l'évènement déclencheur.

des problématiques liées à une évacuation face à un seul aléa, ainsi que des questions de plus court chemin en distance/temps d'évacuation jusqu'à une zone refuge. Guidant souvent l'élaboration des plans d'évacuation, cette approche introduit des contradictions dont l'exemple de Syracuse est à la fois démonstratif et édificateur dans la réflexion de cette thèse (chapitre 3). En effet, les plans d'évacuation existants à Syracuse révèlent une forte contradiction des consignes entre le plan prenant en compte un séisme – préconisant un refuge sur le bord de mer – et celui prenant en compte un tsunami – préconisant un refuge dans les terres –. Ce travail de thèse vise donc à donner des éléments pour repenser une évacuation à travers la prise en compte de son environnement urbain et de la combinaison de plusieurs risques.

L'environnement urbain est ici considéré comme un élément central dans l'évacuation d'une population puisqu'il interroge les choix des itinéraires d'évacuation en fonction de l'espace urbain, ainsi que l'influence de la visibilité des piétons durant leur cheminement (chapitre 4). De plus, la prise en compte du risque sismique, par l'effondrement des bâtiments avant l'arrivée de l'inondation du tsunami, a mis en avant, à travers une potentielle obstruction de l'espace de voirie, une remise en cause des itinéraires d'évacuation privilégiés (chapitre 5). Une démarche par modélisation permet d'interroger ces deux aspects dans le contexte d'une évacuation de population, à travers la construction du modèle STEP (Seisme Tsunami Evacuation Population).

### **L'évacuation : au croisement d'approches multiples**

L'un des apports de ce travail de thèse est qu'il combine des approches géographique, architecturale et modélisatrice. Ces approches multi-dimensionnelles et systémiques se basent sur mon expérience, sur le travail de terrain et sur les décisions méthodologiques faites au long de cette thèse. Ces approches se combinent autour de trois axes principaux : une approche comparative des terrains d'étude, une approche multi-risques ainsi qu'une approche multi-dimensionnelle de l'environnement urbain (Figure 8.4).

Tout d'abord, ce travail de thèse considère deux terrains. Le choix des sites d'étude est déterminant et, à travers le premier site de Saint-Laurent-du-Var les questions liées à l'aménagement urbain et à l'environnement bâti ont émergées. C'est à ce moment là que l'idée d'une incidence de cet environnement urbanisé sur l'évacuation est posée. Le choix d'un second terrain vise à affiner cette hypothèse liée à l'espace urbain à travers Syracuse, dont l'espace bâti est dense et fortement impacté en cas de tsunami (chapitre 2).

Les recherches concernant les sites d'étude et leur exposition aux risques mènent à l'idée d'une incidence des évènements précurseurs tel que le séisme. La composante multi-risques est interrogée en considérant conjointement le tremblement de terre et le tsunami dans la problématique de l'évacuation. C'est ici que mon expérience en architecture parasismique m'a amené à envisager l'environnement bâti comme un danger potentiel pour la population en cas d'évacuation. Cette hypothèse a été consolidée par un terrain à Syracuse, où

le diagnostic des constructions révèle une très forte vulnérabilité sismique des bâtiments (chapitre 5). Ce séjour sur le terrain m'a également permis de vérifier les mesures existantes et de mettre en avant l'incohérence des préconisations des plans d'évacuation qui ne prennent en compte qu'un seul aléa sur un territoire exposé à plusieurs. A la question de l'influence de l'environnement urbain vient s'ajouter la prise en compte du multi-risques par la considération du séisme et du tsunami.

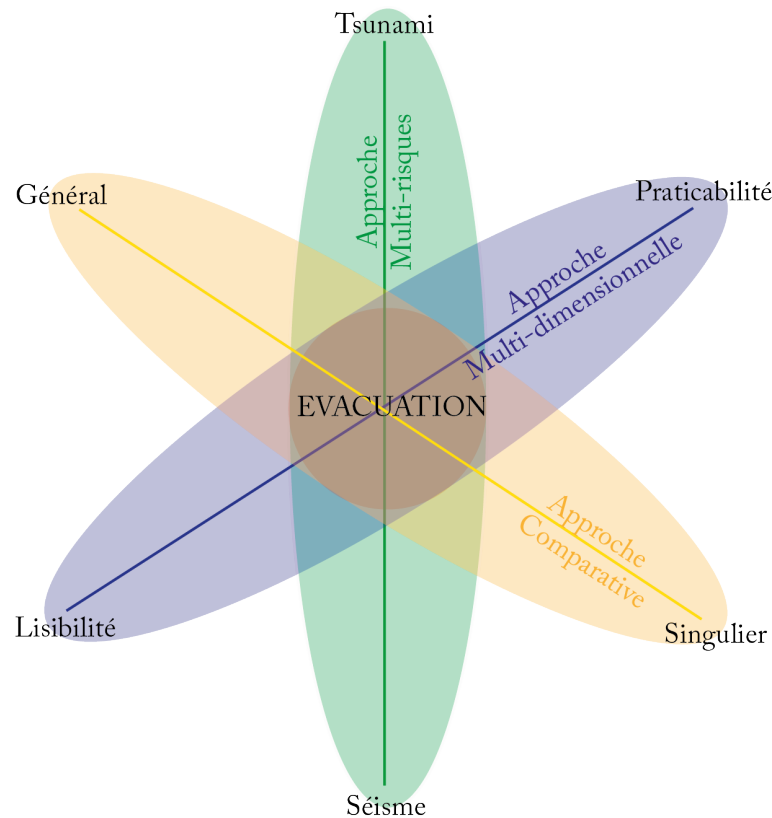


FIGURE 8.14 – Une approche multi-axiale de l'évacuation.  
Réalisation : Plattard, O., 2019.

Enfin, l'approche de cette thèse relève d'une réflexion sur les effets de l'environnement urbain sur l'évacuation des populations. Dans cette perspective, une première problématique porte sur l'influence de la lisibilité de l'espace urbain sur l'évacuation. Elle été appréhendée à travers l'analyse des données issues des enquêtes de terrain Astarte, puis les résultats des simulations STEP. Les analyses des enquêtes, et notamment des cartes mentales, ont permis de valider l'hypothèse que les personnes n'ont pas forcément l'intention de fuir selon le plus court chemin en distance/temps comme cela est préconisé dans les plans d'évacuation existants. Des variables ont été implémentées dans le modèle pour permettre de mesurer l'influence sur l'évacuation. Les résultats issus du modèle mettent également en avant une influence de la lisibilité sur la dynamique de déplacement piéton en fonction des paramètres choisis.

La seconde problématique pose la question de la praticabilité de l'espace urbain lors de l'évacuation en cas de séisme précurseur. Elle a fait l'objet d'un travail de terrain de diag-



nostic des constructions remettant en cause l'accès aux zones refuge des plans d'évacuation existants, et donc validant l'importance de la prise en compte du contexte multi-risques dans l'évacuation. Une variable de probabilité d'effondrement a été implémentée au modèle STEP qui a une forte influence sur les résultats issus des simulations des différents scénarios.

### **Le modèle STEP : un modèle hybride**

Ce travail de thèse développe des approches multi-disciplinaires combinées entre architecture et géographie ; au travail de terrain, de la prise en compte des différents environnements urbains et de l'approche multi-risques, s'ajoute la mise en place d'un modèle. L'approche par la modélisation est une méthode adaptative au contexte et à la problématique posée (chapitre 6). L'implémentation d'un modèle de simulation d'évacuation d'une population littorale en milieu urbain face à un tsunami, a donc pu être effectuée avec, comme élément central, la prise en compte de l'espace urbain et du contexte multi-risques. Cette thèse abouti donc au développement du modèle STEP (Séisme Tsunami Evacuation Population), modèle hybride à plusieurs niveaux (chapitre 6), dans le but d'éclairer ces deux problématiques.

Premièrement, l'implémentation des données SIG, à travers le Modèle Numérique de Terrain et le bâti de Saint-Laurent-du-Var constitue la base de l'environnement du modèle. A cela s'ajoute une implémentation d'automates cellulaires pour la dynamique d'inondation du tsunami – variations possibles de la vitesse et de la hauteur de l'inondation – et d'effondrement des constructions – variation de la présence du séisme et de sa magnitude qui engendre une probabilité aléatoire d'effondrement des bâtiments –. Enfin, des systèmes multi-agents ont été implémentés pour les dynamiques liées aux zones refuge – positionnement défini ou manuel, variations de la hauteur et du nombre, générant les zones de non-visibilité des zones refuge en fonction de leur environnement bâti – et au déplacement de la population – variation du nombre de personnes, de leur vitesse, de la vision, de la proportion d'imitation et de probabilité de chercher son chemin en zone de non-visibilité – (chapitre 6).

Deuxièmement, le modèle STEP articule différentes temporalités dans un environnement distribué : le délai d'arrivée du tsunami sur le front de mer, la vitesse de déplacement piéton et la vitesse d'inondation du tsunami. Le modèle permet également la représentation de l'inondation et de l'évacuation des personnes tout au long des simulations.

De plus, l'un des premiers objectifs de la démarche de thèse était de mettre en œuvre le modèle STEP sur les deux sites d'étude. Or, il a été implémenté uniquement pour la zone du front de mer de Saint-Laurent-du-Var, tout en intégrant des principes expérimentés à partir d'autres sites : notamment en intégrant les données de diagnostics des constructions collectées sur le site de Syracuse dans le paramétrage de l'effondrement du bâti dans le modèle STEP. Ce travail de thèse a donc permis l'implémentation des variables et paramètres de manière à ce que STEP soit facilement adaptable sur d'autres sites d'étude. .

## Evacuer un espace urbain littoral : des logiques complexes

Enfin, cette thèse, à travers les résultats issus des scénarios du modèle STEP, met en avant la complexité des éléments entrant en compte dans une évacuation d'une population littorale dans un environnement urbain en contexte multi-risques. Les résultats sont analysés de manière isolée afin de mieux percevoir les mécanismes reliés à chacune des problématiques (chapitres 7 et 8).

La variation de la localisation des zones refuge selon deux configurations – proche de la zone de danger et plus loin, en conformité avec les résultats issus des cartes mentales des enquêtes de terrain – est la variable qui a la plus forte influence sur les résultats issus des différents scénarios. Lors des simulations avec les zones refuge éloignées, il est comptabilisé un plus grand nombre d'agents "victimes". Ces résultats mettent en avant la complexité et l'importance du choix de la localisation des zones refuge dès lors que l'on ne considère pas un itinéraire par le plus court chemin en distance/temps. En fonction de la configuration des sites modélisés, le modèle STEP peut permettre d'optimiser la localisation de zones refuge au fur et à mesure des simulations.

La lisibilité de l'espace urbain a été implémentée dans le modèle sous la forme d'une variable principale constituée de zone d'ombre de non-visibilité des zones refuge ainsi que d'autres paramètres qui ont un rôle sur la visibilité des agents comme la vision. La hauteur des zones refuge, qui permet de construire l'étendue des zones de non-visibilité des zones refuge, se révèle avoir une influence réduite – avec notamment peu de variations du nombre d'agents "sauvés" et "victimes" – sur les résultats issus du modèle. La variation de la vision des agents a une influence sur les résultats du modèle puisqu'elle permet une considération plus large de son environnement par l'agent. L'imitation et la probabilité de recherche de chemin en effets combinés ont un peu d'effet sur le nombre d'agents "sauvés" et "victimes"(chapitre 7).

De plus, la présence du séisme a eu l'effet escompté sur les résultats du modèle STEP. La variable d'effondrement est aléatoire et la configuration des bâtiments effondrés et des rues obstruées varie en fonction des simulations. Lorsque des voiries menant directement à une zone refuge sont obstruées, les résultats du nombre de "sauvés" et de "victimes" varient énormément par rapport à une configuration sans effondrement. En effets combinés à la localisation des zones refuge, la présence d'un séisme accroît d'autant plus le nombre de "victimes". Ces résultats soulignent donc l'importance de la prise en compte du contexte multi-risques dans la mise en place d'itinéraires d'évacuation.

Cependant, ces résultats sont uniquement liés au site de Saint-Laurent-du-Var et plusieurs remarques viennent nuancer ces résultats. Des effets de sites, notamment issus de la particularité du front de mer privatisé et construit, peuvent influencer ces résultats car cela contraint le cheminement piéton. La comparaison de l'effet des variables gagnerait à être effectuée, non plus seulement entre les scénarios du modèle, mais également inter-sites d'étude afin de mettre en avant leur influence non pas sur un site mais dans le modèle de façon plus globale.

## Une approche à développer

Ce travail de thèse me permet d'envisager trois principales perspectives d'évolution. Elles concernent le modèle STEP actuel et son enrichissement, son élargissement à d'autres sites et aléas afin de développer une approche comparative, et enfin son développement comme outil de recherche -action, dans la continuité de ma démarche scientifique.

Premièrement, une des évolutions possibles de ce travail de thèse est de développer le modèle STEP à différents niveaux. Les résultats ont mis en avant une nécessité d'affiner certains paramètres, comme l'imitation ou la vision des agents. Une amélioration de la variable de visibilité des zones refuge est aussi un point à développer avec l'apport de signalétique d'évacuation disposée le long des espaces de voirie. Cet aspect informatif, souvent présent sur des sites littoraux exposés au risque de tsunami, enrichirait la variable de visibilité à travers un paramètre important dans la mise en place de stratégies d'évacuation.

De plus, un approfondissement des questions posées durant cette thèse sous des approches différentes est également un apport possible. Cela permettrait d'affiner et d'enrichir les paramètres et variables du modèle STEP.

Deuxièmement, il est important d'implémenter le modèle STEP sur d'autres sites dans le cadre d'une véritable démarche comparative. Cela permettrait de consolider les résultats en identifiant des logiques structurantes générales au-delà de Saint-Laurent-du-Var, ainsi qu'en spécifiant les effets de site sur l'influence locale d'un ou plusieurs paramètres. La mise en place de STEP sur d'autres territoires permettrait également d'implémenter une variable d'effondrement qui soit basée sur les données d'évènements de référence. En fonction du site d'étude, il peut être proposé d'implémenter la classe de vulnérabilité de chaque bâtiment diagnostiqué – comme à Syracuse – dans le but d'affiner la probabilité d'effondrement en fonction de la vulnérabilité du bâti.

Plus largement, d'autres sites d'étude peuvent également être considérés tels que le Japon, pays ayant investi dans la prévention des risques, ou Haïti, pays disposant de moins de moyens pour la construction ou la prévention des risques. Ces terrains d'étude apportent d'autres problématiques au modèle STEP, liées au développement d'une prévention des risques et aux moyens disponibles sur le terrain pour définir des stratégies d'évacuation adaptées.

Dans la continuité d'adapter le modèle STEP à d'autres territoires, il peut également concerner d'autres risques que le séisme et le tsunami. En effet, l'évacuation d'une population est une problématique présente sur tout territoire urbanisé exposé à d'autres aléas, comme, par exemple, les inondations.

Troisièmement, le modèle STEP peut devenir un outil de prévention des risques. Tout d'abord, le modèle STEP a déjà pu être présenté au grand public – lors de la Nuit de la Géographie en 2018 – et a reçu un bon accueil. Il semble donc important de faire évoluer ce modèle vers une approche participative et de jeu sérieux ayant un rôle d'information et de

pédagogie dans le domaine des risques majeurs. De plus, le modèle STEP peut également évoluer vers un outil d'aide à la décision auprès d'acteurs locaux de la prévention des risques.

Enfin, la connaissance de l'approche par modélisation que j'ai pu acquérir durant cette thèse me semble déterminante pour la suite de mon parcours de chercheuse. La mise en place d'un modèle dans le domaine de la prévention des risques majeurs est un outil privilégié, à la fois précis, pédagogique et accessible pour mettre en avant des dynamiques de systèmes et également mettre en place de la recherche-action avec une interaction étroite entre le terrain, sa population, ses acteurs locaux et la recherche scientifique.



---

## ANNEXES

---



---

## ECHELLE MACROSISMIQUE EUROPÉENNE. EMS-98

---

### *Définition des degrés d'intensité sismique (Grünthal, 2001)*

Disposition de l'échelle :

- a. effets sur les humains
- b. effets sur les objets et sur la nature
- c. dégâts sur les bâtiments

Remarque : les différents degrés d'intensité sismique peuvent également comprendre les effets de degré(s) respectif(s) d'intensité plus faible, lorsque ces effets ne sont pas mentionnés explicitement.

I. Secousse imperceptible :

- a. Non ressentie, même dans les circonstances les plus favorables.
- b. Sans effet.
- c. Aucun dégât.

II. Rarement perceptible :

- a. La secousse n'est ressentie que dans des cas isolés (<1%) par des personnes au repos dans des positions particulièrement réceptives, à l'intérieur des habitations.
- b. Sans effet.
- c. Aucun dégât.

III. Faible :

- a. La secousse est ressentie à l'intérieur des habitations par quelques personnes. Les personnes au repos ressentent une oscillation ou un léger tremblement.
- b. Les objets suspendus oscillent légèrement.
- c. Aucun dégât.



IV. Largement observée :

- a. La secousse est ressentie à l'intérieur des habitations par de nombreuses personnes et n'est ressentie à l'extérieur que par un petit nombre. Quelques dormeurs sont réveillés. le niveau des vibrations n'est pas effrayant. les vibrations sont modérées. Les observateurs ressentent un léger tremblement ou une légère oscillation du bâtiment, de la pièce ou du lit, de la chaise, etc.
- b. La porcelaine, les verres, les fenêtres et les portes vibrent. Balancement des objets suspendus. Dans quelques cas, secousses visibles du mobilier léger. les menuiseries craquent dans quelques cas.
- c. Aucun dégât.

V. Forts :

- a. La secousse est ressentie à l'intérieur des habitations par la plupart des personnes et à l'extérieur par quelques personnes. Quelques personnes effrayées se précipitent dehors. Réveil de la plupart des dormeurs. Les observateurs ressentent une forte secousse ou une forte oscillation de l'ensemble du bâtiment, de la pièce ou du mobilier.
- b. Balancement important des objets suspendus. La porcelaine et les verres s'entrechoquent. De petits objets, des objets dont le centre de gravité est élevé et/ou qui sont mal posés peuvent se déplacer ou tomber. des portes ou des fenêtres s'ouvrent ou se ferment. Dans quelques cas, des vitres se brisent. Les liquides oscillent et peuvent être projetés hors des récipients pleins. Les animaux deviennent nerveux à l'intérieur.
- c. Dégâts de degré 1 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité A et B.

VI. Dégâts légers :

- a. Secousse ressentie par la plupart des personnes à l'intérieur des habitations et par de nombreuses personnes à l'extérieur. Quelques personnes perdent leur sang-froid. De nombreuses personnes effrayées se précipitent dehors.
- b. De petits objets de stabilité moyenne peuvent tomber et le mobilier peut être déplacé. Dans certains cas, bris de vaisselles et de verres. Les animaux d'élevage (même à l'extérieur) peuvent s'affoler.
- c. De nombreux bâtiments des classes de vulnérabilité A et B subissent des dégâts de degré 1, quelques uns subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de classe C subissent des dégâts de degré 1.

VII. Dégâts :

- a. La plupart des personnes sont effrayées et essaient de se précipiter dehors. De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout, en particulier aux étages supérieurs.

- b. Les meubles sont déplacés et les meubles dont le centre de gravité est élevé peuvent se retourner. Les objets tombent des étagères en grand nombre. Les récipients, les réservoirs et les piscines débordent.
- c. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 3, quelques un de degré 4.  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 2, quelques un de degré 3.  
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2.  
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 1.

#### VIII. Dégâts importants :

- a. La plupart des personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout, même dehors.
- b. Les meubles peuvent se renverser. Des objets comme les téléviseurs tombent par terre. Possibilité de déplacement, de rotation ou de renversement des pierres tombales. On peut observer des vagues sur un terrain très mou.
- c. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 4, quelques un de degré 5.  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 3, quelques un de degré 4.  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2, quelques un de degré 3.  
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2.

#### IX. Destructures :

- a. Panique générale. Des personnes peuvent être projetées au sol.
- b. De nombreux monuments et colonnes tombent ou sont vrillés. On peut observer des vagues sur un terrain mou.
- c. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 5.  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 4, quelques un de degré 5.  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 3, quelques un de degré 4.  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2, quelques un de degré 3.  
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2.

#### X. Destructures importantes :

- c. La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 5.  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré

5.

De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 4, quelques un de degré 5.

De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 3, quelques un de degré 4.

De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2, quelques un de degré 3.

Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2.

XI. Catastrophe :

c. La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 5.

La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré A, beaucoup de degré 5.

De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 4, quelques un de degré 5.

De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 3, quelques un de degré 4.

De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2, quelques un de degré 3.

XII. Catastrophe généralisée :

c. Tous les bâtiments des classes de vulnérabilité A, B et pratiquement tous ceux de la classe de vulnérabilité C sont détruits. La plupart des bâtiments des classes de vulnérabilité D, E et F sont détruits. Les effets du tremblement de terre ont atteint le maximum concevable.

---

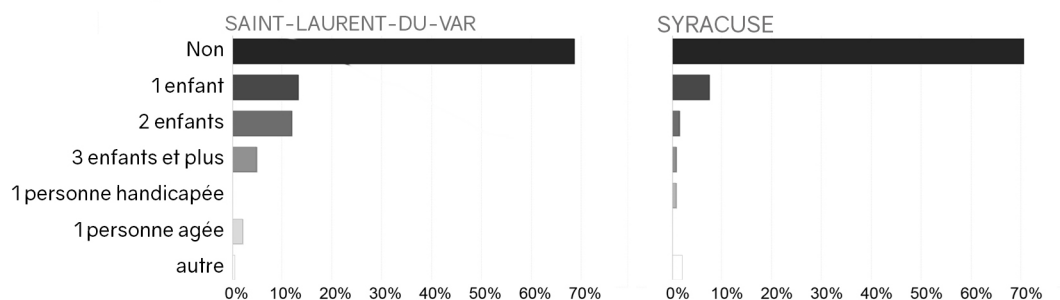
## SÉLECTION DE RÉSULTATS ISSUS DES ENQUÊTES EFFECTUÉES À SAINT-LAURENT-DU-VAR ET SYRACUSE

---

Enquêtes de terrain réalisées dans le cadre du programme Astarte (Assessment, STra-  
tegy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe, 2013-2016) par ses membres sur les neuf  
sites d'étude. Sélection des résultats issus des 400 questionnaires réalisés dans la région  
niçaise (172 à Nice, 146 à Saint-Laurent-du-Var et 82 à Villefranche-sur-Mer) et des 148  
questionnaires réalisés à Syracuse.

## ANNEXE . RÉSULTATS ENQUÊTES

Avez-vous des personnes dépendantes avec vous ?



Principaux risques qui peuvent affecter le territoire en fonction de l'origine des personnes

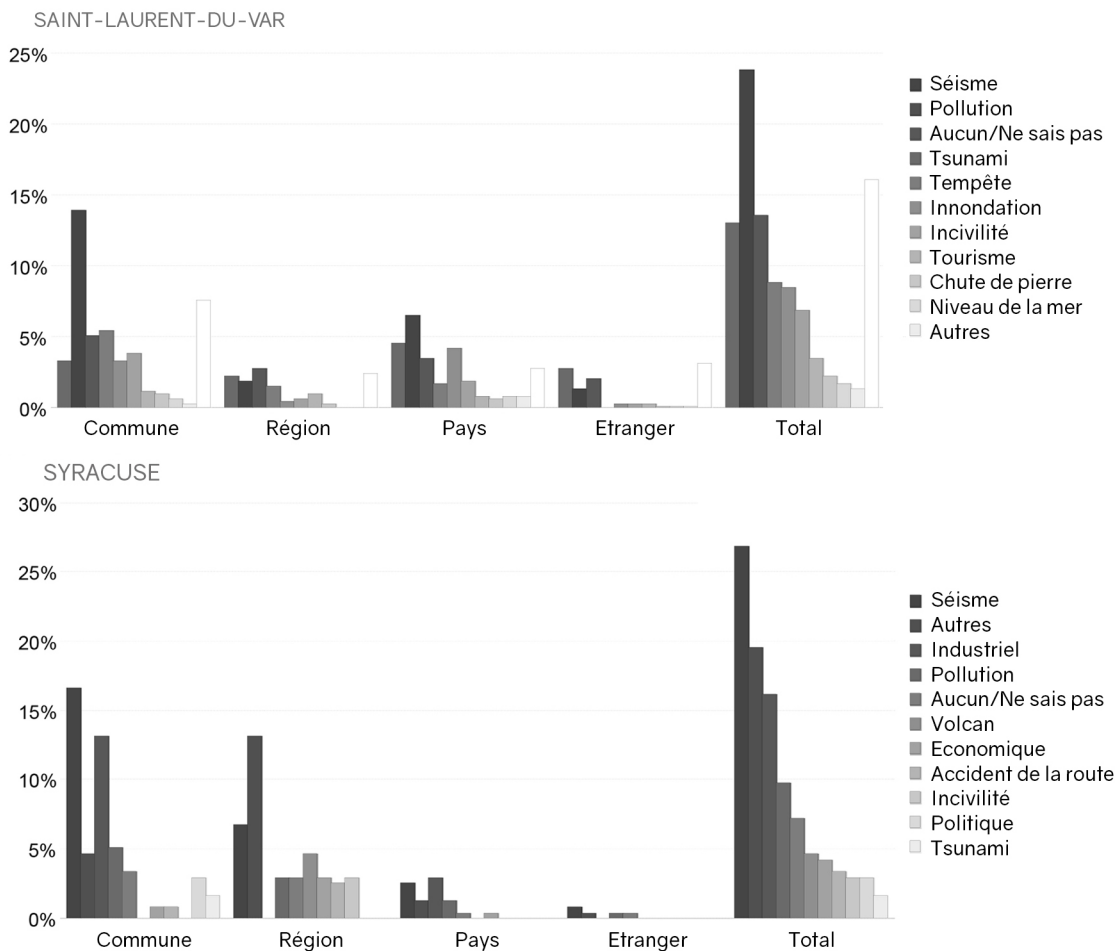


FIGURE 15 - Résultats des 400 enquêtes réalisées à Saint-Laurent-du-Var/Nice/Villefranche-sur-mer et des 148 enquêtes réalisées à Syracuse (1/3).

Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

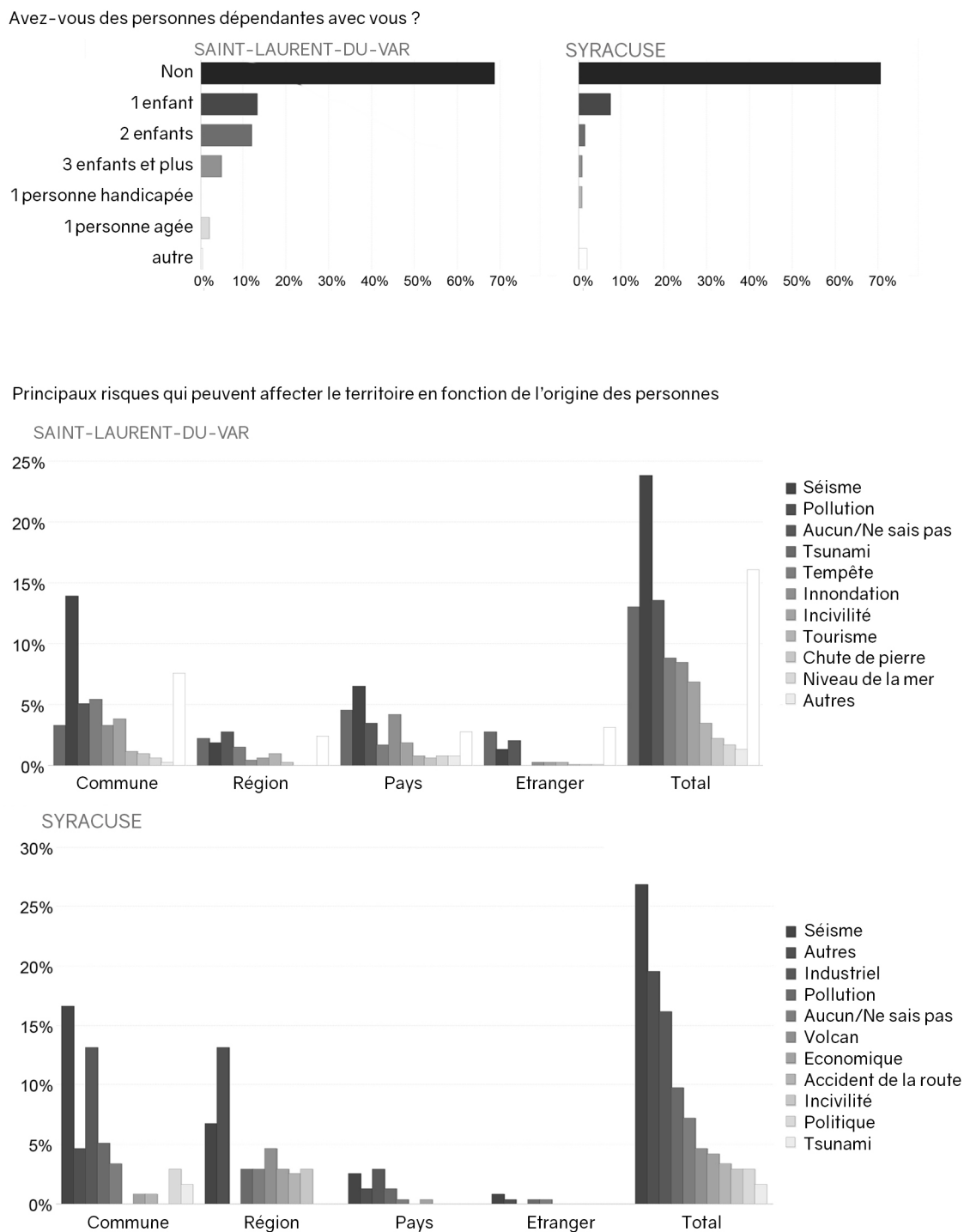
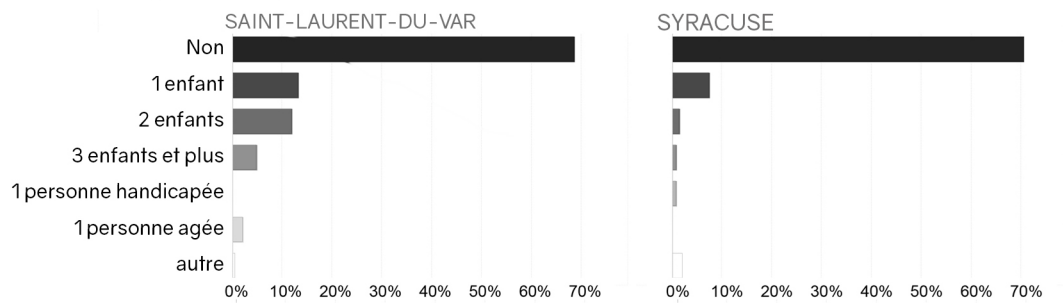


FIGURE 16 – Résultats des 400 enquêtes réalisées à Saint-Laurent-du-Var/Nice/Villefranche-sur-mer et des 148 enquêtes réalisées à Syracuse (2/3).  
Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

## ANNEXE . RÉSULTATS ENQUÊTES

Avez-vous des personnes dépendantes avec vous ?



Principaux risques qui peuvent affecter le territoire en fonction de l'origine des personnes

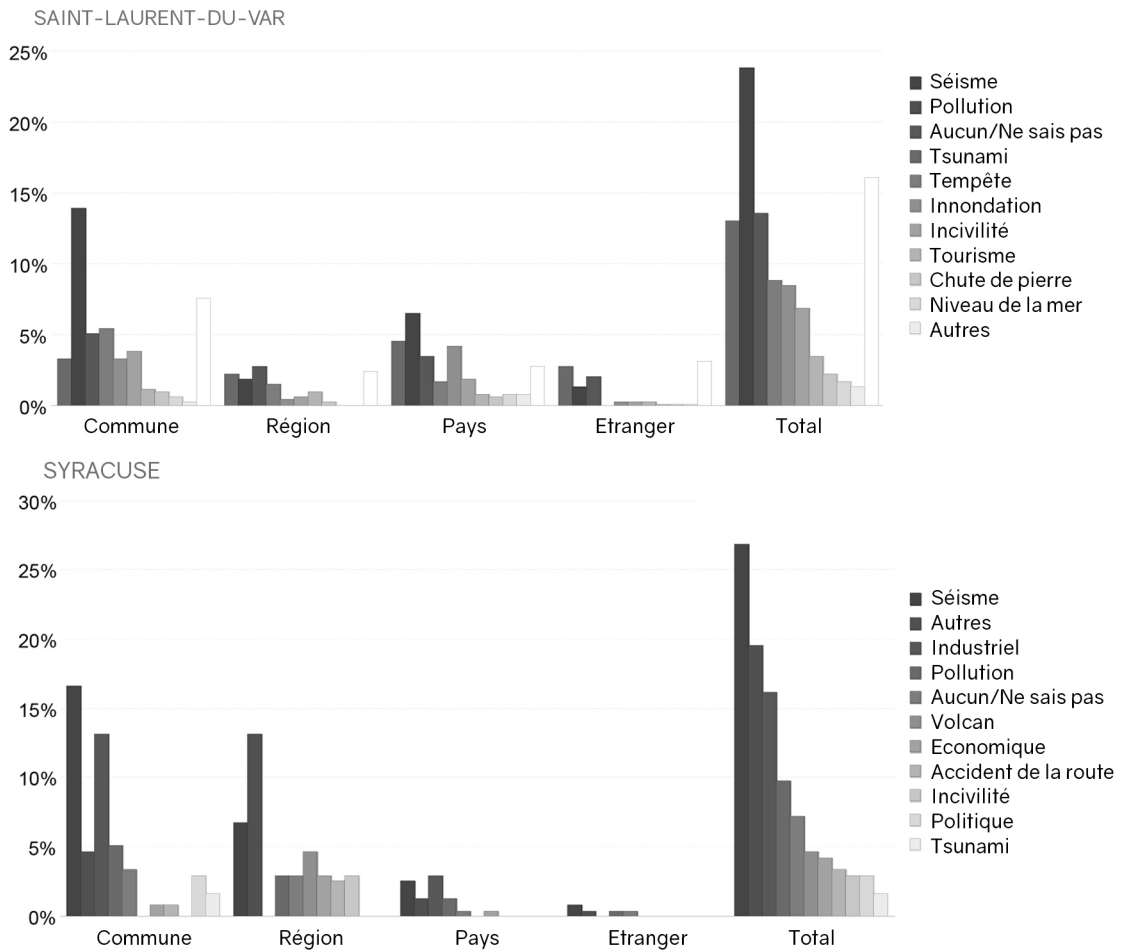


FIGURE 17 - Résultats des 400 enquêtes réalisées à Saint-Laurent-du-Var/Nice/Villefranche-sur-mer et des 148 enquêtes réalisées à Syracuse (3/3).

Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

---

CARTES MENTALES DES INTENTIONS D'ITINÉRAIRES DES  
ENQUÊTÉS À SYRACUSE

---



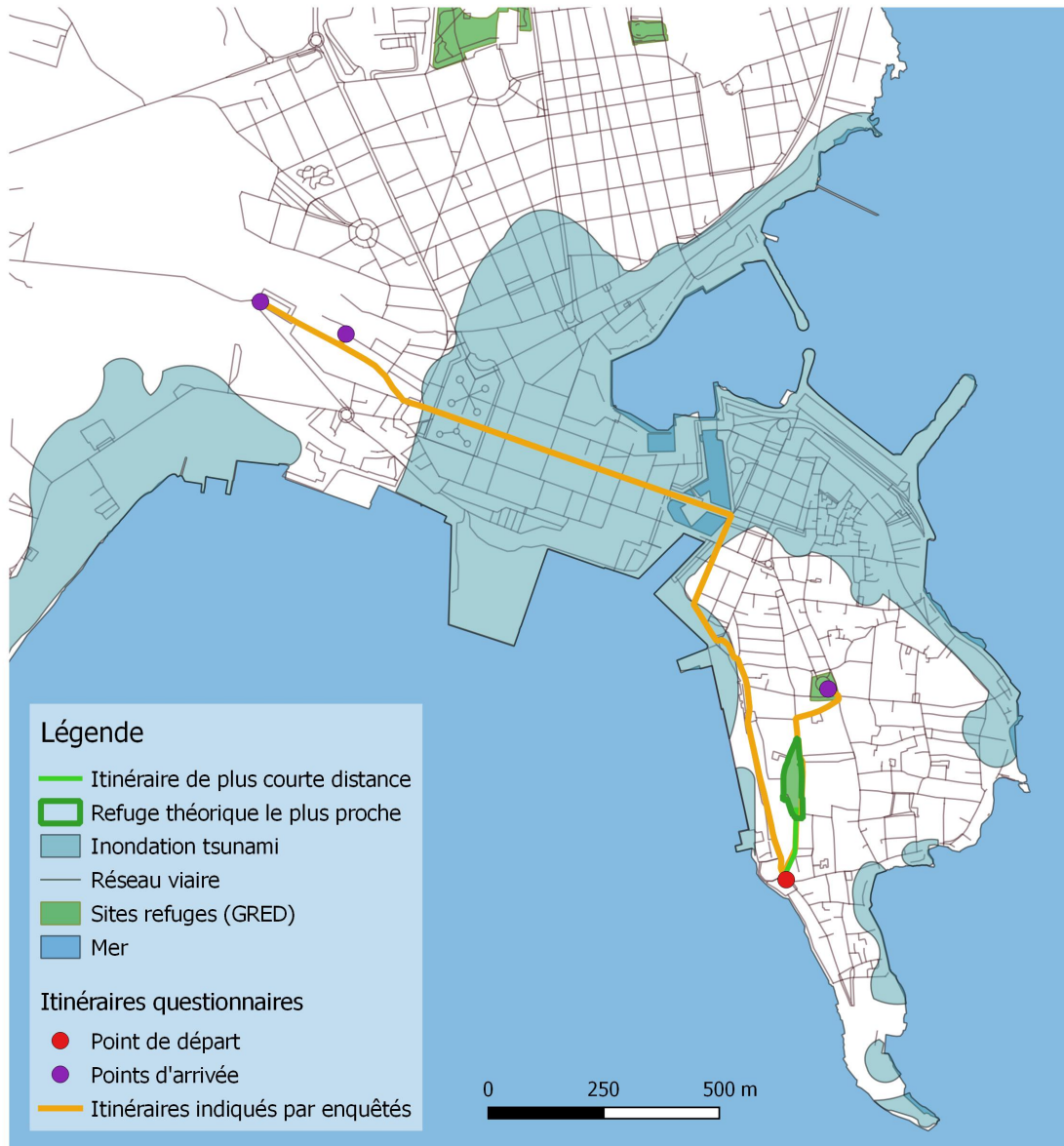


FIGURE 18 – Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des trois personnes enquêtées au point de départ 2, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.  
Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

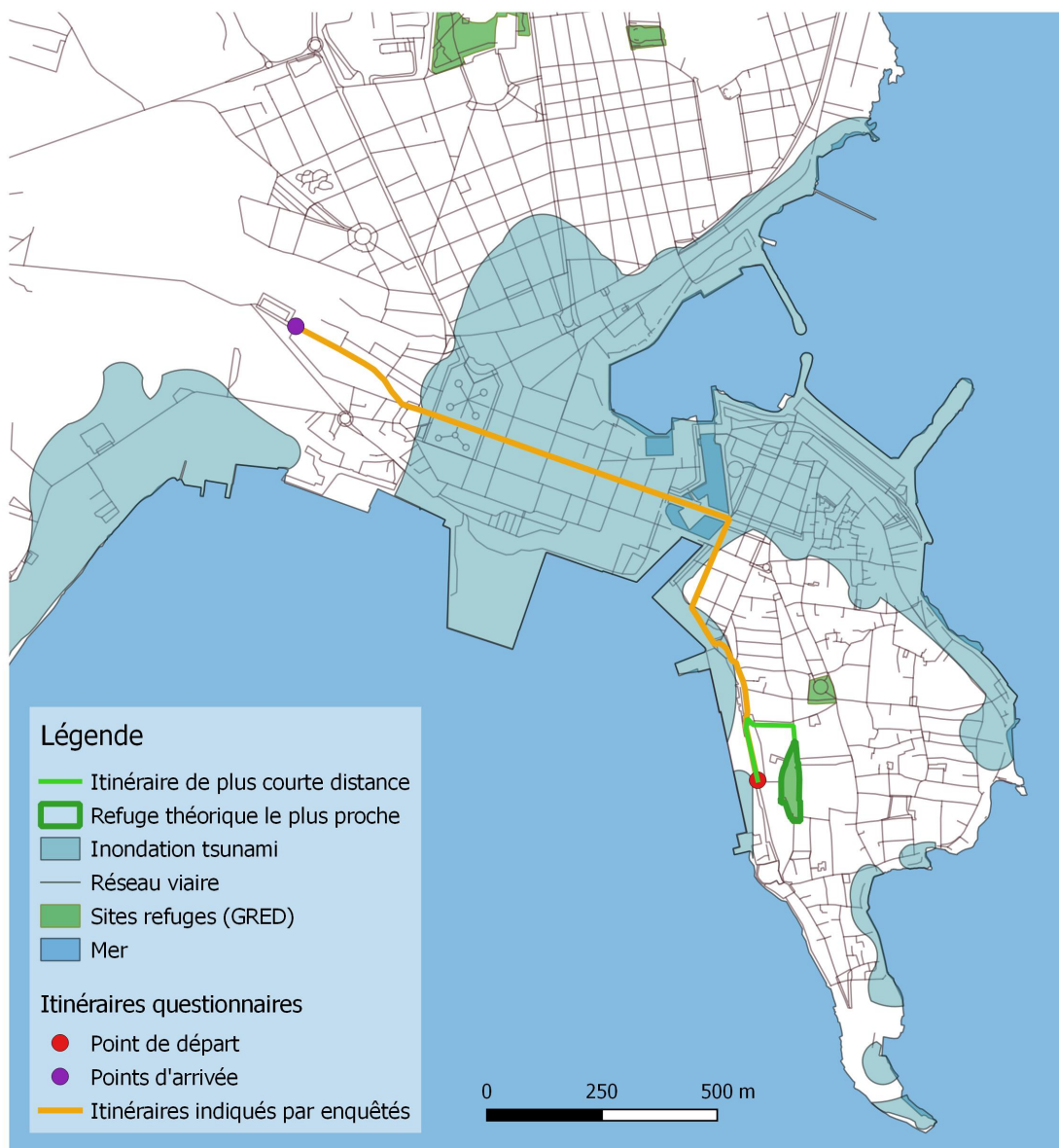


FIGURE 19 – Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation de la personne enquêtée au point de départ 3, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.

Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

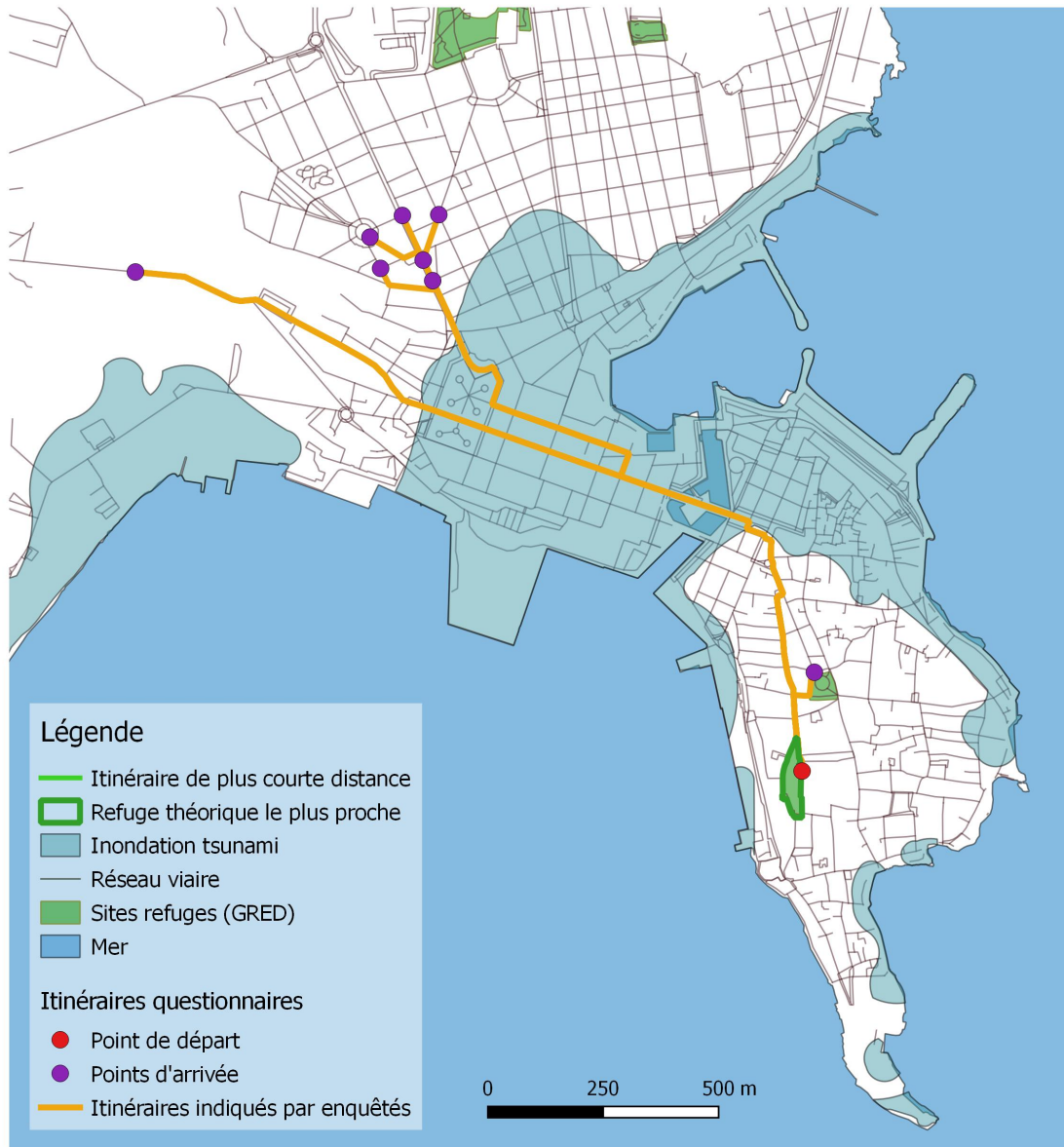


FIGURE 20 – Carte agrégeant les intentions d’itinéraires d’évacuation des douze personnes enquêtées au point de départ 4, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.  
Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

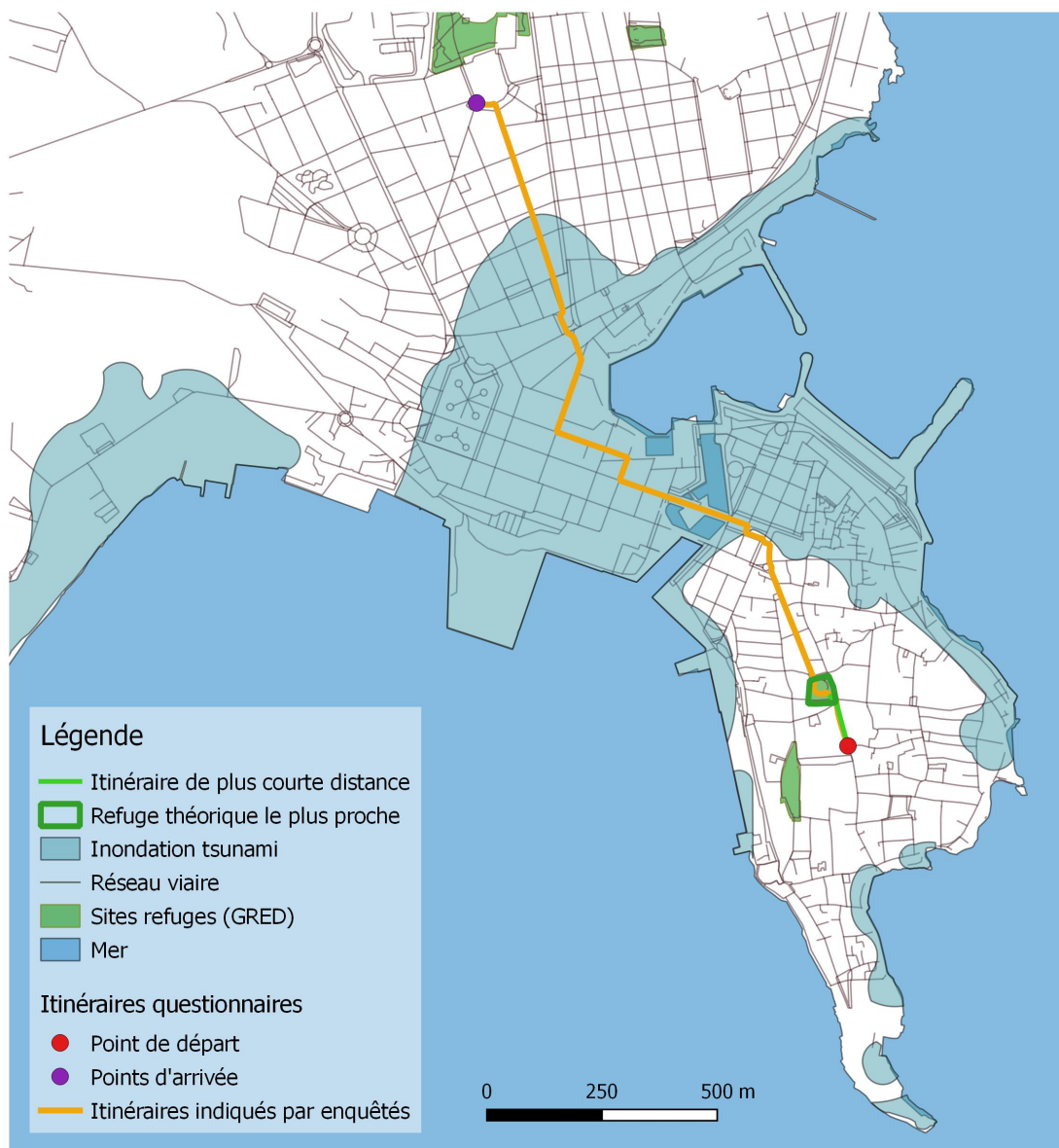


FIGURE 21 – Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation de la personne enquêtée au point de départ 5, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.

Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).



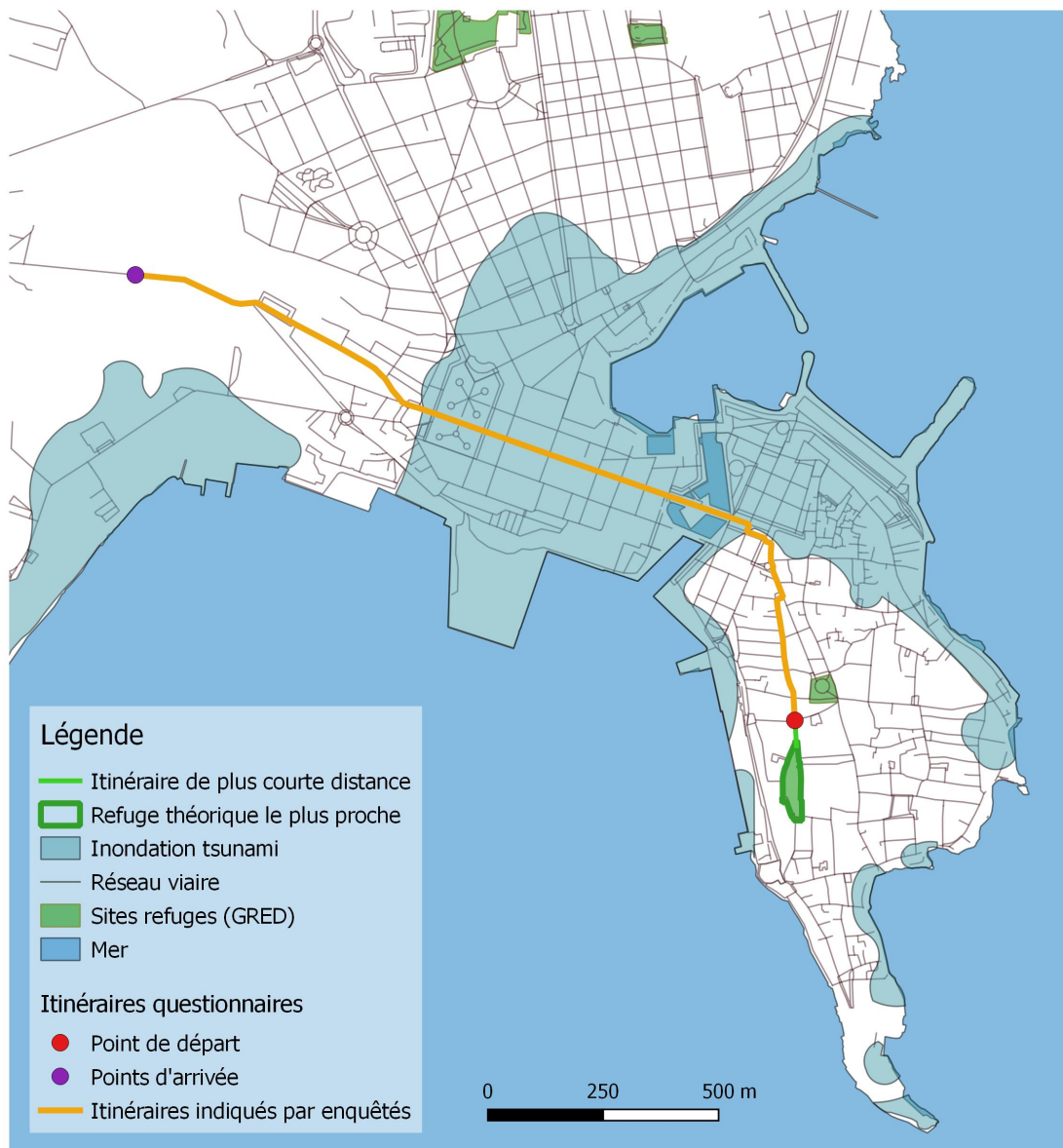


FIGURE 22 – Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation de la personne enquêtée au point de départ 7, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.  
Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

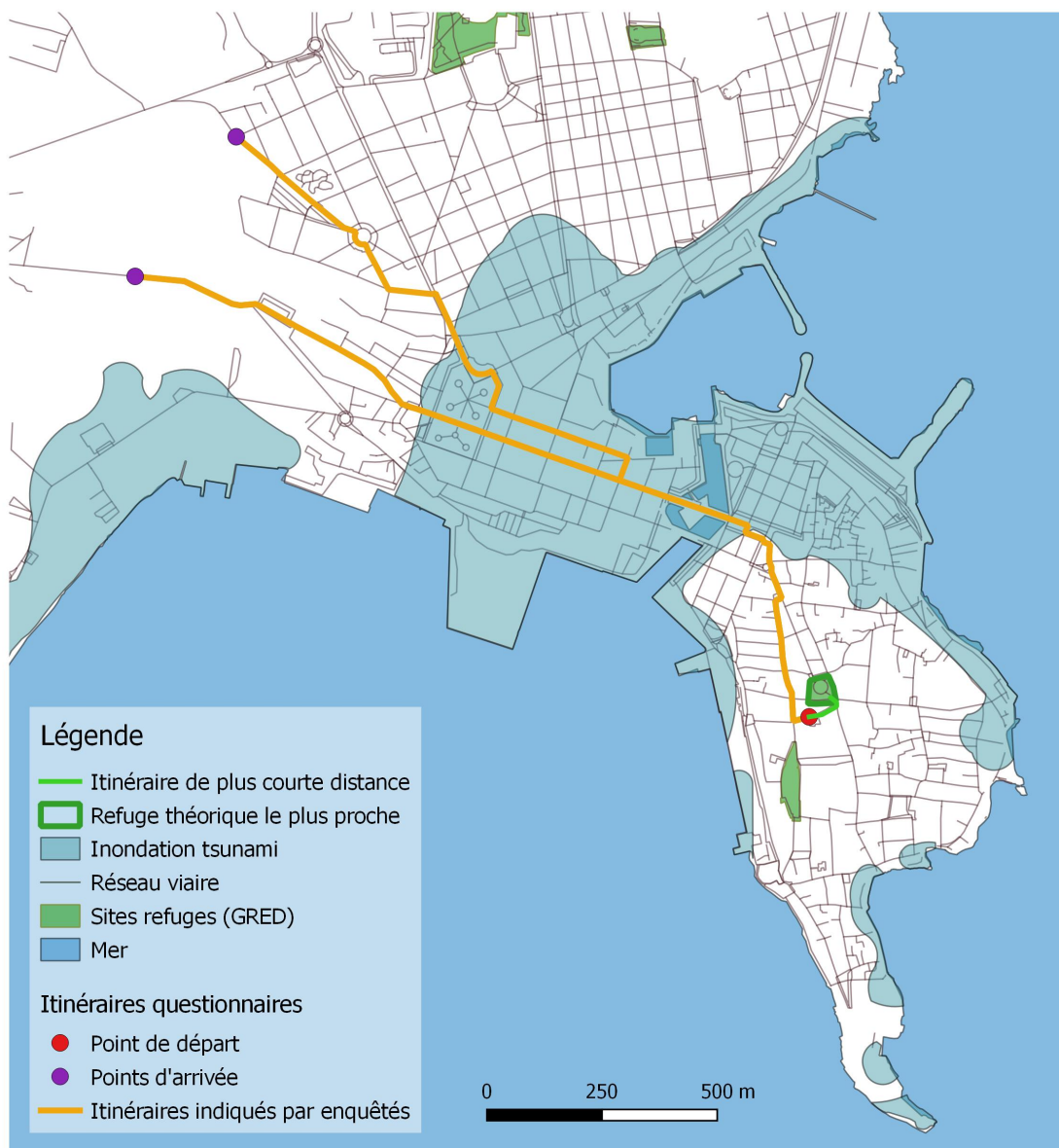


FIGURE 23 – Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des trois personnes enquêtées au point de départ 8, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.  
Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

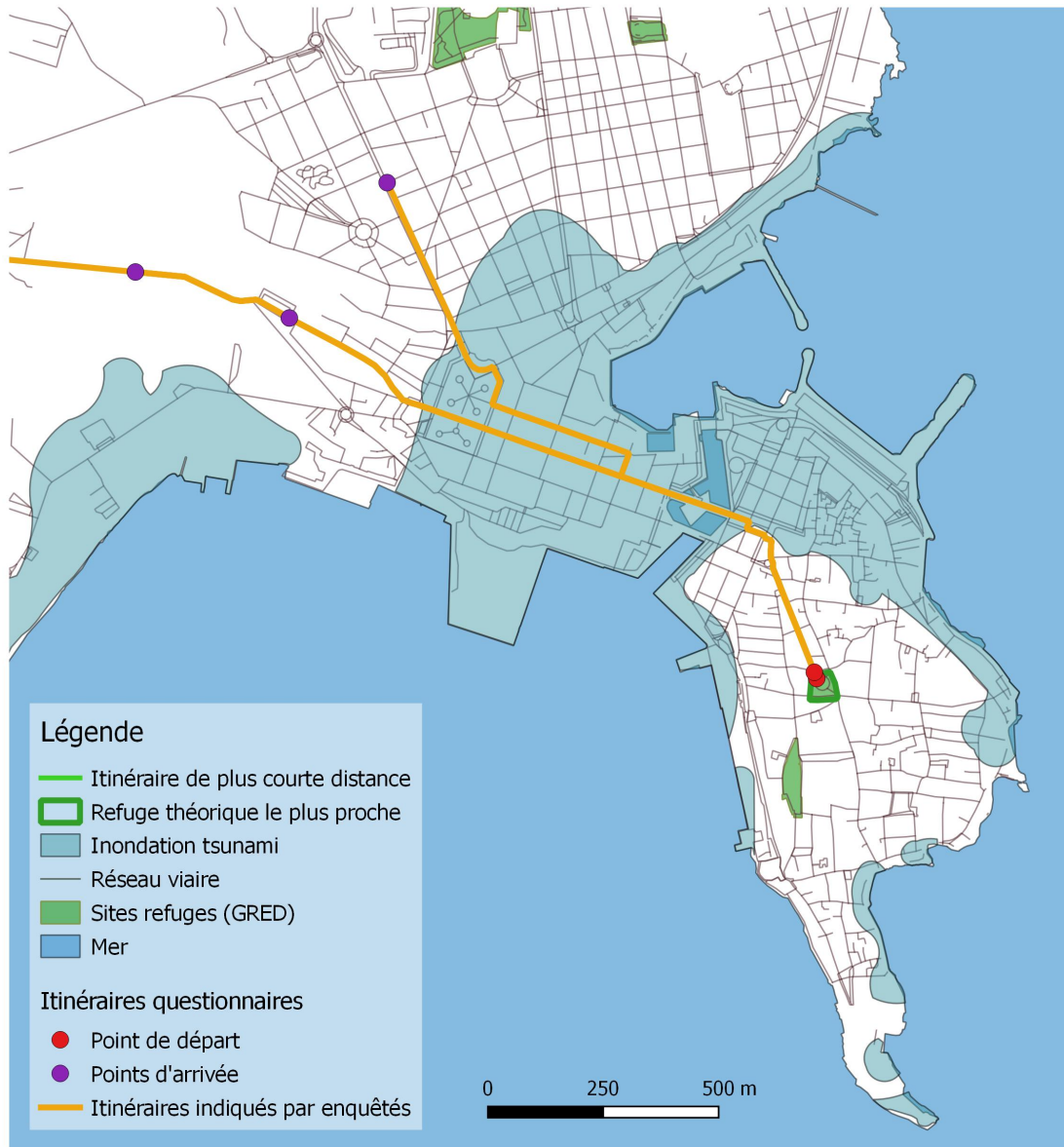


FIGURE 24 – Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des six personnes enquêtées au point de départ 9, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.  
Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

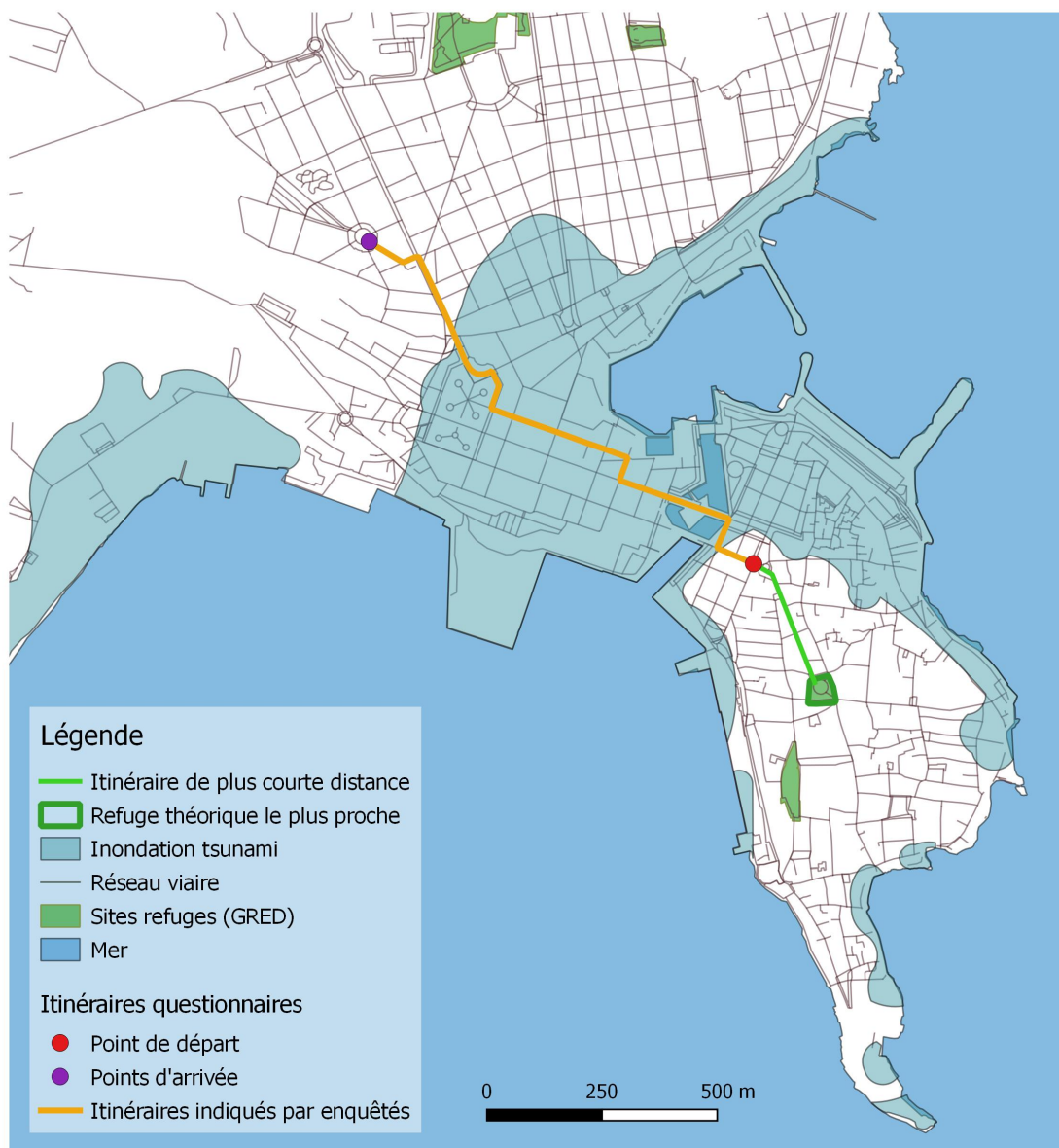


FIGURE 25 – Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation de la personne enquêtée au point de départ 10, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.

Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).



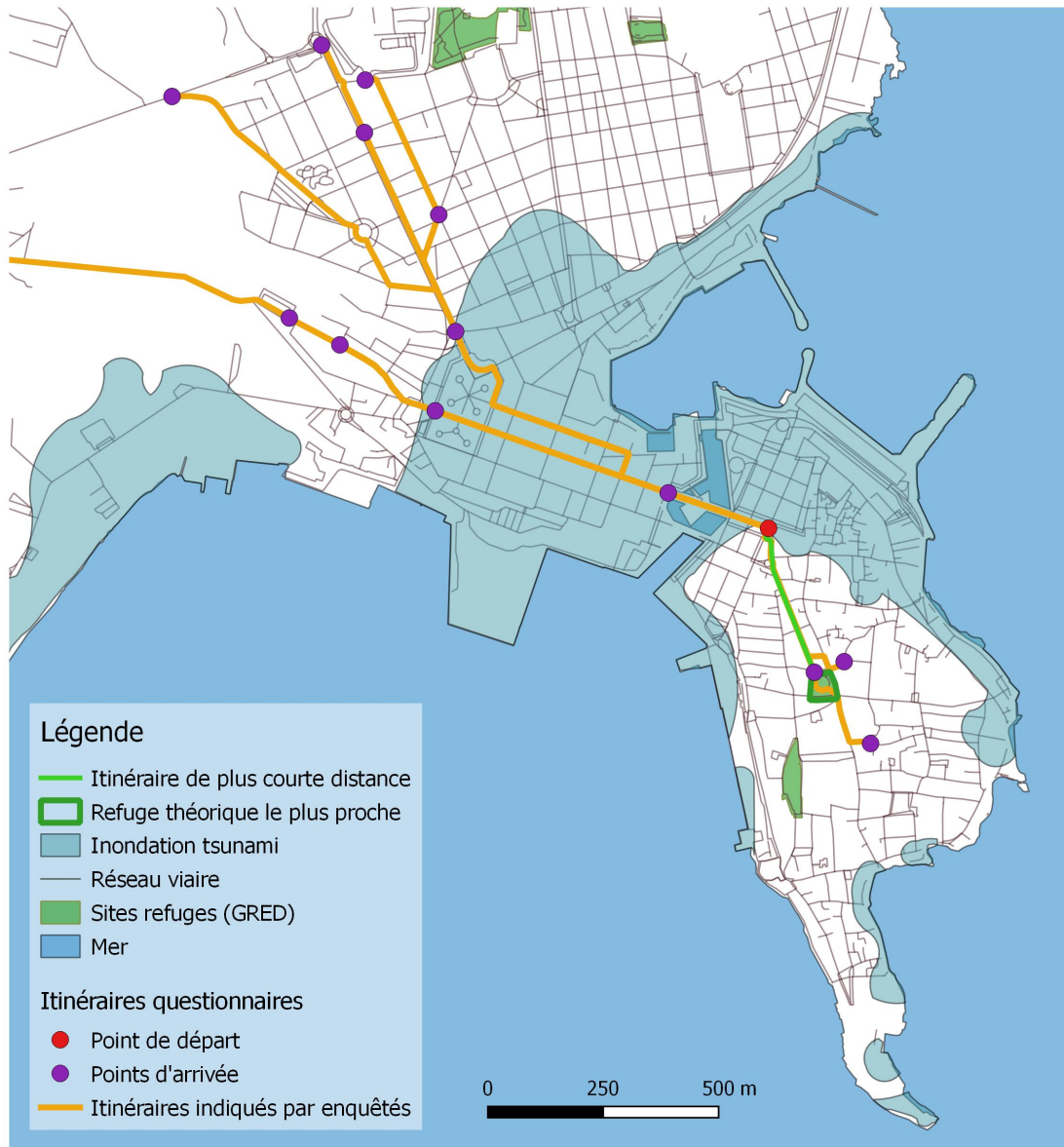


FIGURE 26 – Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des dix-neuf personnes enquêtées au point de départ 11, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.  
Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

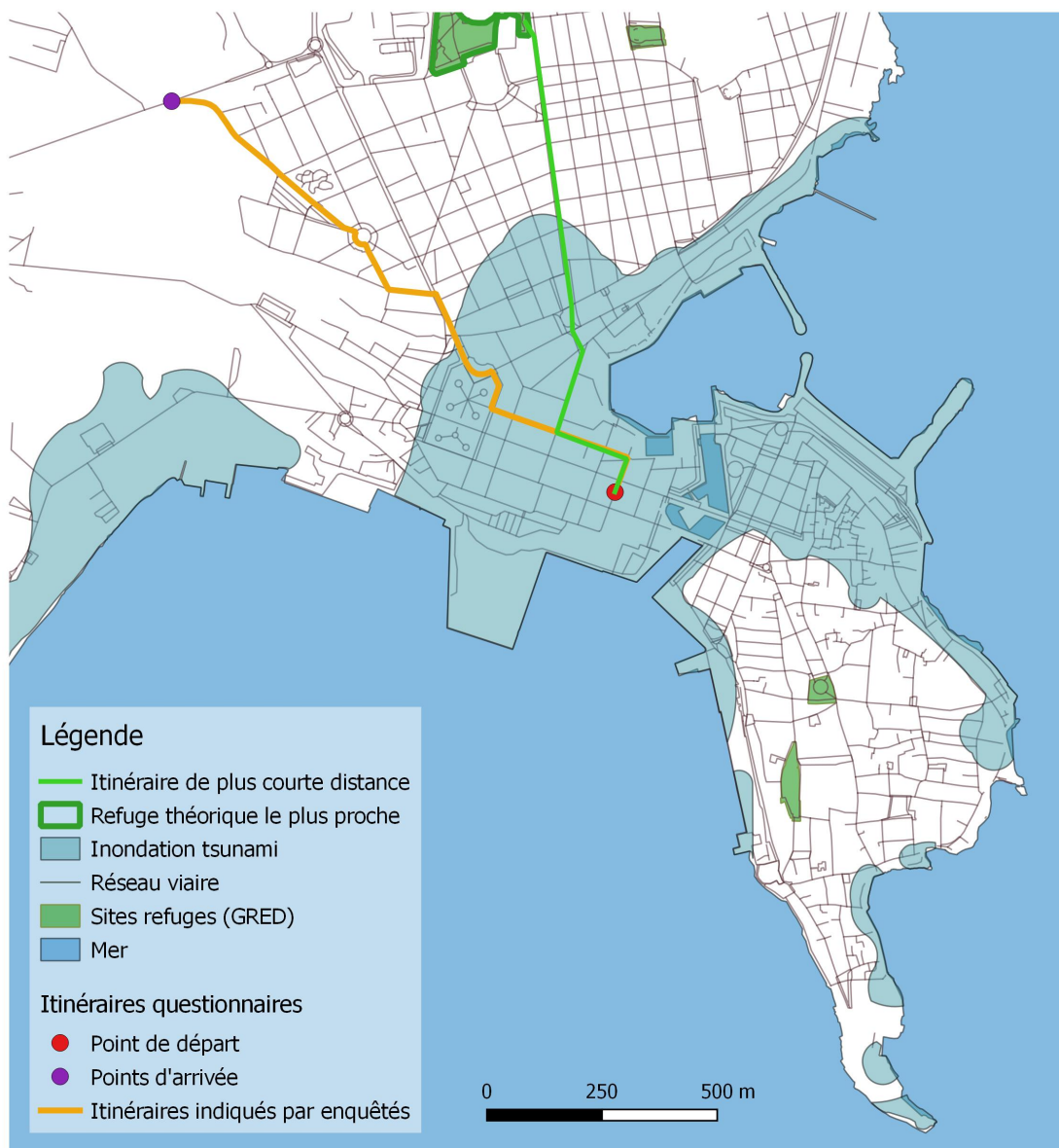


FIGURE 27 – Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation de la personne enquêtée au point de départ 12, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.

Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

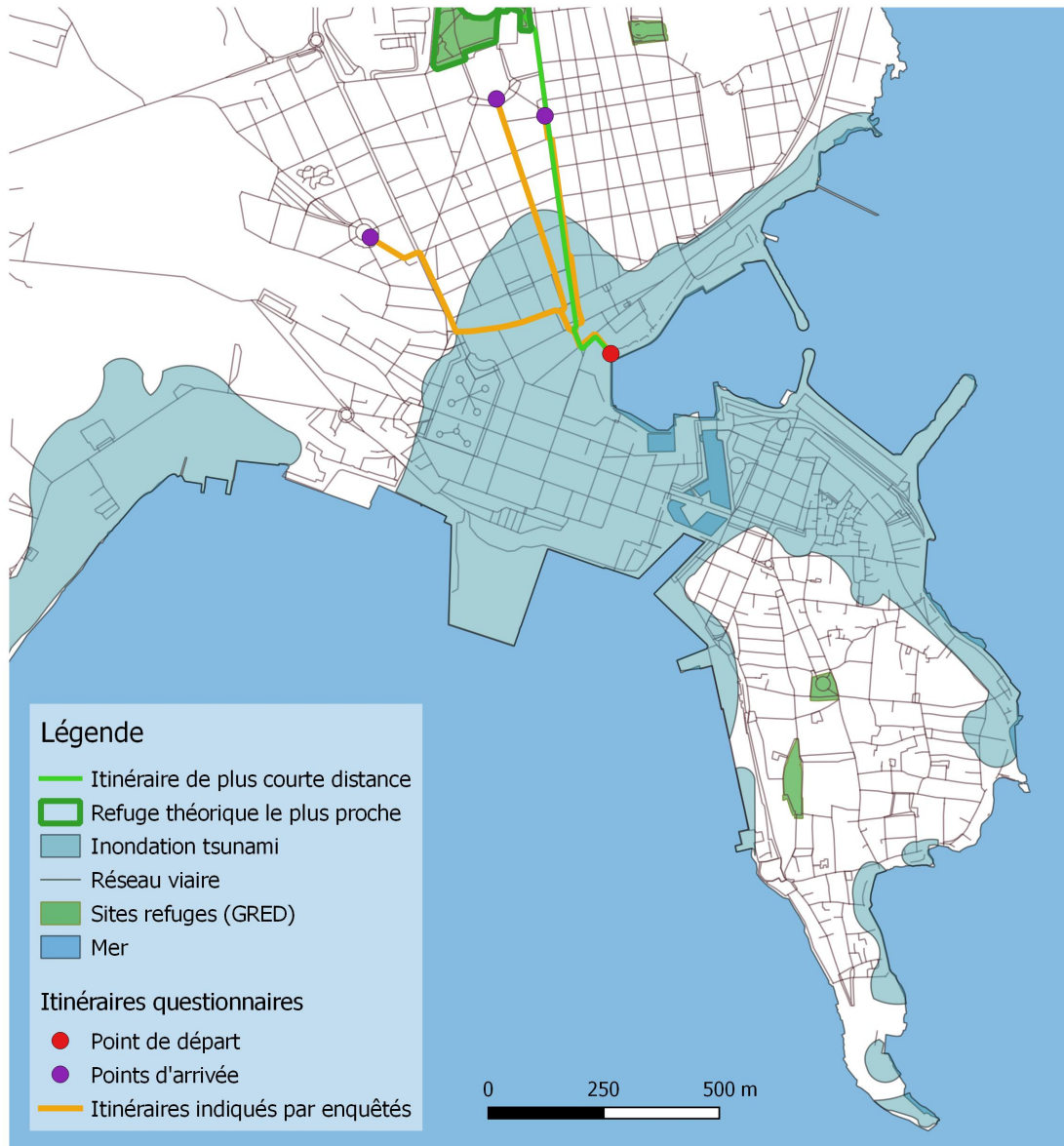


FIGURE 28 – Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des trois personnes enquêtées au point de départ 13, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.  
Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

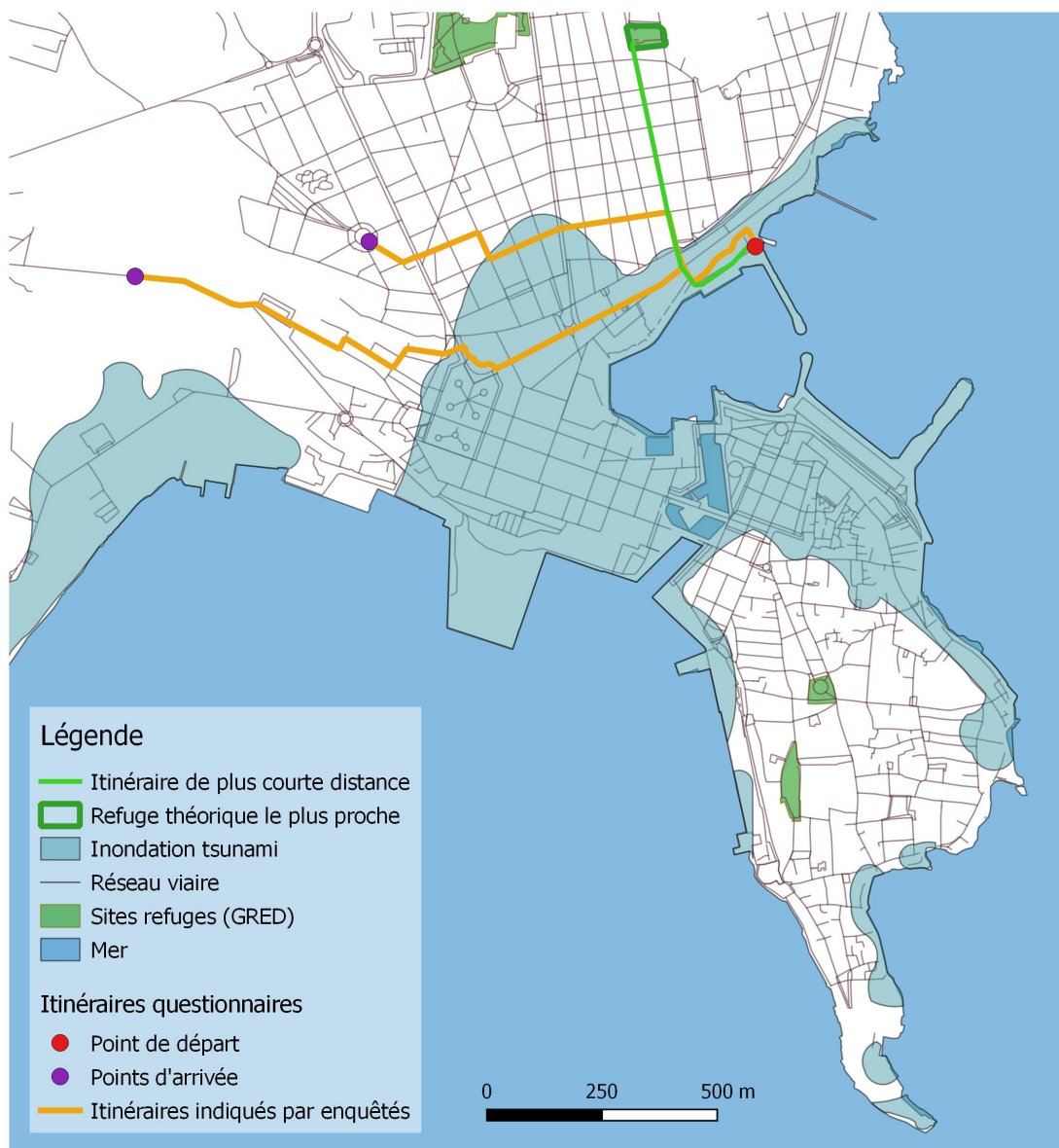


FIGURE 29 – Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des deux personnes enquêtées au point de départ 14, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.  
Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).



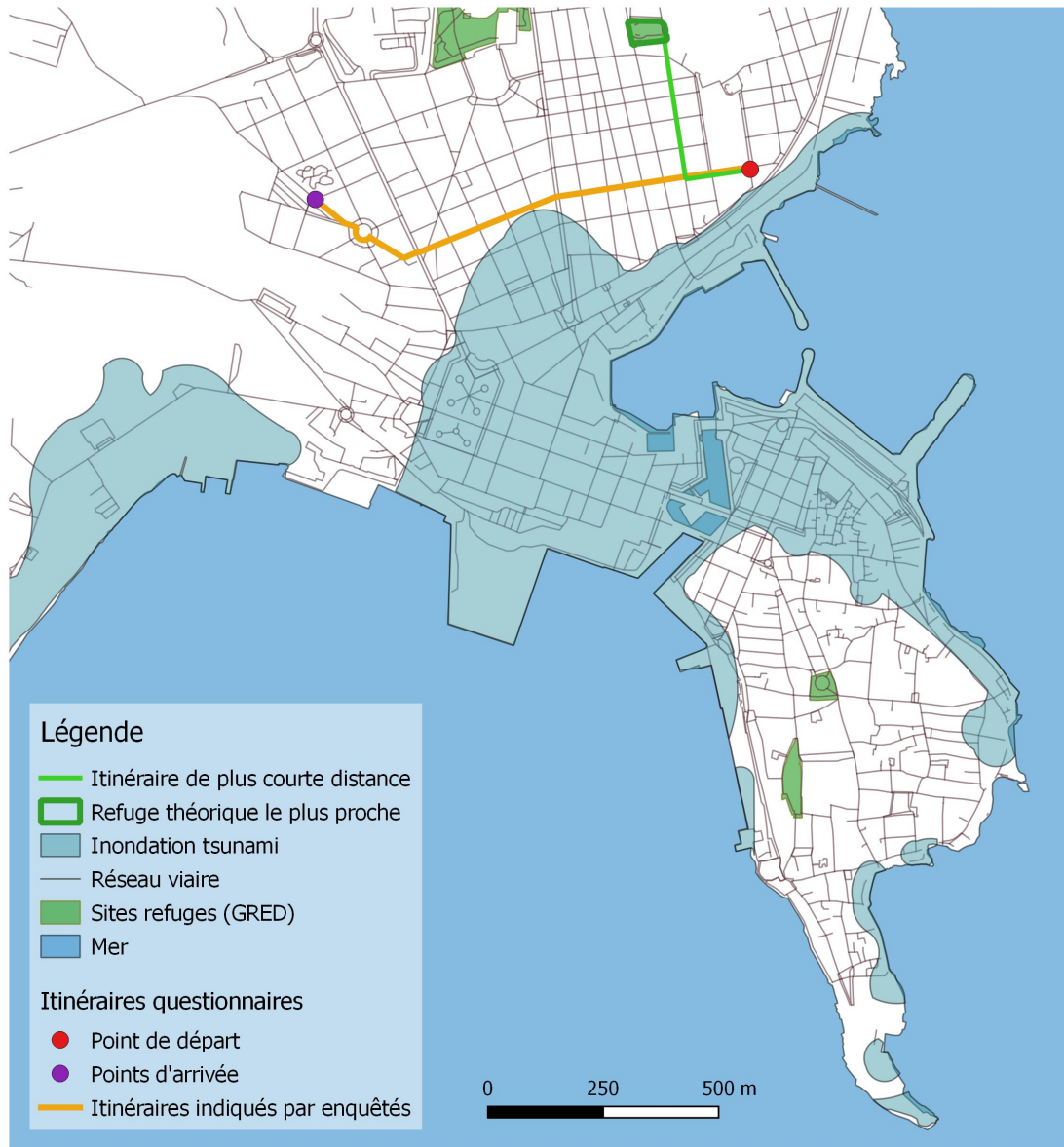


FIGURE 30 – Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des deux personnes enquêtées au point de départ 15, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.  
Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

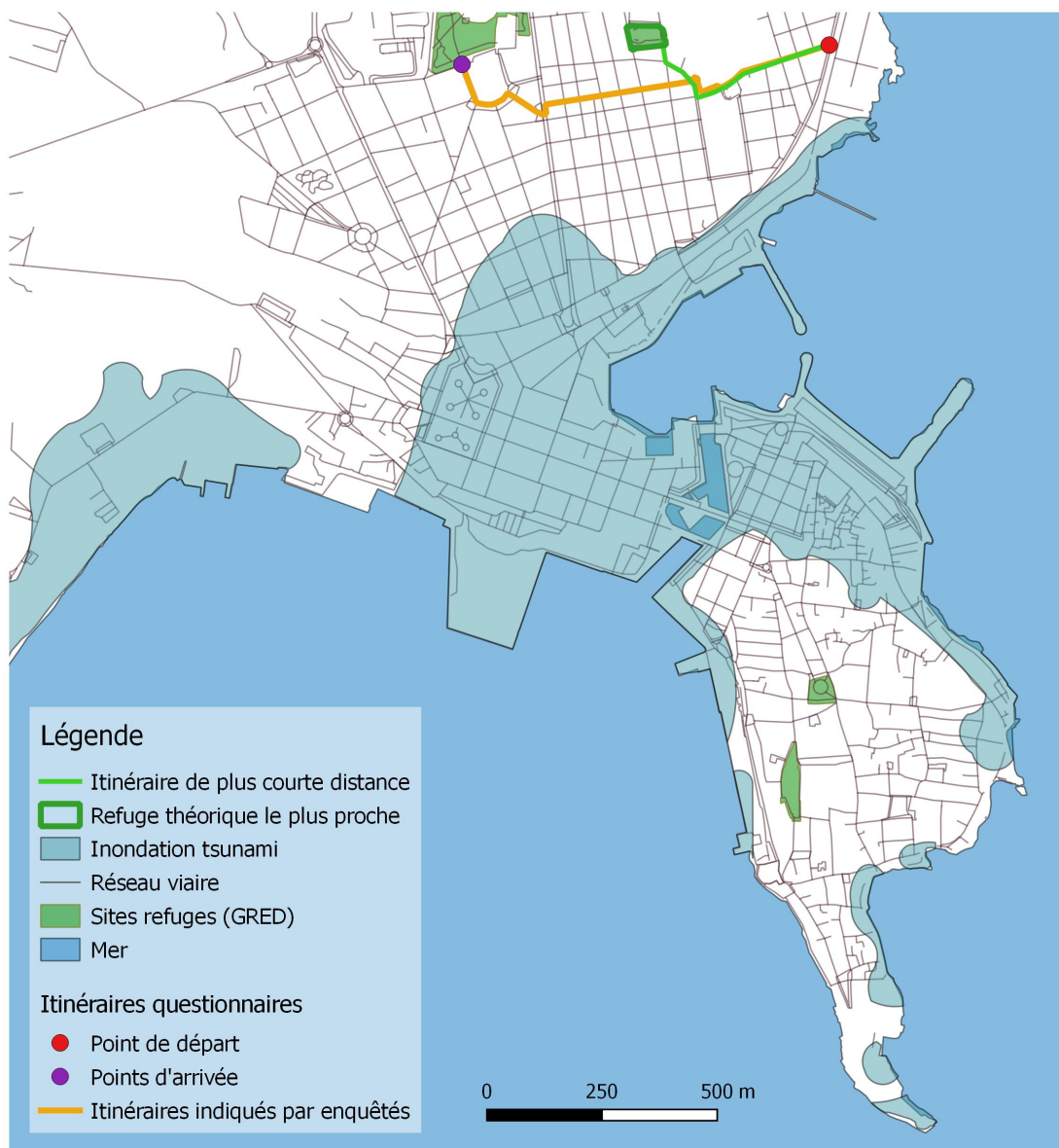


FIGURE 31 – Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des deux personnes enquêtées au point de départ 16, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse.  
Réalisation : Plattard, O., 2018. Données : (Lavigne, 2016).

ANNEXE . CARTES MENTALES SYRACUSE

---

**DIAGNOSTIC DE VULNÉRABILITÉ DES BÂTIMENTS SUR  
LES PIAZZA ARCHIMEDE ET PIAZZA DUOMO, SYRACUSE.**

---

Diagnostic de terrain réalisé en juillet 2016 sur neuf bâtiments de la Piazza Archimede et treize bâtiments de la Piazza Duomo.



①

Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016			
<b>LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?</b> <u>PIAZZA ARCHIMEDE</u>			
Rue :	Bâtiment : <u>Entre cours Matteotti et via Dione .</u>		
<b>CARACTERISTIQUES GENERALES :</b>			
Nature de l'occupation :	<u>Banque de Sicile</u>	<u>- Post 1693 - ± XIX°</u>	
Surface au sol (m²) :	<u>2700 m²</u>	Surface habitable (m²) :	<u>-</u>
Nombre de niveaux :	<u>3</u>	Hauteur (m) :	<u>16 m</u>
Type de toiture du dernier niveau :	<u>dalle béton charpente bois charpente acier</u>		
Type de construction :	<u>Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / moellons + mortier Autre :</u>		
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) :	<u>moellons ou briques .</u>		
<b>PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :</b>			
RdC	R + 1 2 3	Façade rue	Autre élévation
		<u>FAÇADE PIAZZA ARCHIMEDE</u>	<u>FAÇADE CORSO MATTEOTTI</u>
Références des photos :			
<b>FACTEURS DE VULNERABILITE :</b>			
<b>1 Construction</b>			
Forme en plan :	sym. 2 axes	sym. 1 axe	pas de sym. régulière <del>irrégulière</del> élancement : <del>X</del>
Forme en élévation :	<u>régulière</u>	<del>irrégulière</del>	<del>très irrégulière</del> niveaux en retrait (X) niveaux en saillie (X)
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies :	oui	non	<u>?</u> <u>COURS CENTRALE</u>
Niveaux non contreventés ( )	Niveaux souples modérés ( )	importants ( )	
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) :	oui	non	
Absence d'encadrement des trumeaux :	oui	non	<u>?</u>
Absence d'encadrement des baies :	oui	non	<u>?</u>
Poteau court :	oui	non	
Poteau élancé :	oui	non	
Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes :	oui	non	
Porte-à faux importants :	oui	non	
Edicules élancés :	oui	non	
Masses importantes en hauteur :	oui	non	
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm :	oui	non	
Etat de conservation de la structure :	<u>bon</u>	normal	<u>mauvais</u>
Surélévations prévisibles :	oui	non	
Divers :	<u>BALCONS ,</u>		
<b>2 Nature du sol /orographie + rue</b>			
Période propre du sol :	<u>0,15</u>	Période propre du bâtiment :	<u>0,1 - 0,15</u> Risque de résonance : faible modéré <u>élevé</u>
Pente en % :	<u>± 5%</u>		
Sommet de colline :	oui	non	
Proximité d'un changement de pente :	oui	non	
Divers :			
Largeur de rue :	<u>MATTEOTTI : ± 15m</u>	<u>DIONE : ± 3m .</u>	
<b>EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE :</b> A B C D E F			

FIGURE 32 – Fiche 1 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. Sources : Plattard, O., 2016.

②

Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016	
LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ? <b>PIAZZA ARCHIMEDE .</b>	
Rue : <b>PIAZZA + Bâtiment : VIA DEL MONTALTO .</b>	
CARACTERISTIQUES GENERALES :	
Nature de l'occupation : <b>bureaux ?</b>	- POST 1693 -
Surface au sol (m <sup>2</sup> ) : <b>± 300 m<sup>2</sup></b>	Surface habitable (m <sup>2</sup> ) : <b>—</b>
Nombre de niveaux : <b>3</b>	Hauteur (m) : <b>14 m</b>
Type de toiture du dernier niveau : <b>dalle béton</b> charpente bois charpente acier	selon vue aérienne + 2 charpentes !
Type de construction : <b>Ossature BA avec remplissage</b> / Maçonnerie chaînée / moellons + mortier Autre :	
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) : <b>moellons ou briques .</b>	
PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :	
RdC	R + 1 2 3
Références des photos :	
FACTEURS DE VULNERABILITE :	
<b>1 Construction</b>	
Forme en plan : sym. 2 axes sym. 1 axe pas de sym. régulière irrégulière élancement : <b>1/2</b>	
Forme en élévation : régulière irrégulière très irrégulière niveaux en retrait (X) niveaux en saillie (X)	
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non (?)	
Niveaux non contreventés ( ) Niveaux souples modérés ( ) importants ( )	
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : oui non	
Absence d'encadrement des trumeaux : oui non (?) Absence d'encadrement des baies : oui non (?)	
Poteau court : oui non Poteau élancé : oui non Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui non	
Porte-à faux importants : oui non Edicules élancés : oui non Masses importantes en hauteur : oui non	
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : oui non	
Etat de conservation de la structure : bon normal mauvais	
Surélévations prévisibles : oui non	
Divers :	
<b>2 Nature du sol / orographie + rue</b>	
Période propre du sol : <b>0,15</b> Période propre du bâtiment : <b>0,1</b> Risque de résonance : faible modéré <b>élevé</b>	
Pente en % : <b>—</b>	
Sommet de colline : oui non Proximité d'un changement de pente : oui non	
Divers :	
Largeur de rue : <b>VIA DEL MONTALTO : 3M .</b>	
EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE : A B C D E F	

FIGURE 33 – Fiche 2 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede.  
Sources : Plattard, O., 2016.

- CORRIGÉ D'APRES GOOGLE MAPS -

3

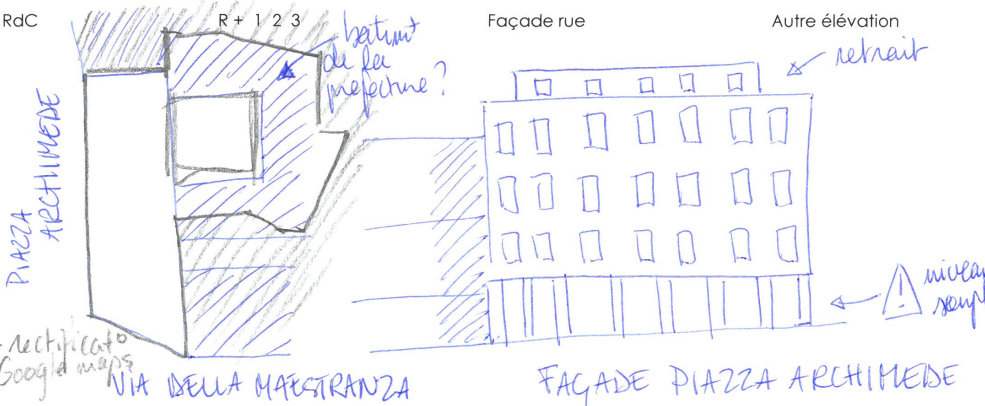
Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016	
<b>LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?</b> <u>PIAZZA ARCHIMEDE</u> Rue : <u>Piazza Archimede</u> Bâtiment : <u>&amp; Via della Maestranza</u>	
<b>CARACTERISTIQUES GENERALES :</b> Nature de l'occupation : <u>Préfectura</u> <span style="float: right;">XX<sup>o</sup>s</span> Surface au sol (m²) : <u>± 300 m²</u> Surface habitable (m²) : Nombre de niveaux : <u>5</u> Hauteur (m) : <u>18 m</u> Type de toiture du dernier niveau : dalle béton charpente bois charpente acier Type de construction : Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / Autre : Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) :	
<b>PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :</b> Rdc R+1 2 3 Façade rue Autre élévation  Références des photos :	
<b>FACTEURS DE VULNERABILITE :</b> <b>1 Construction</b> Forme en plan : sym. 2 axes <u>sym. 1 axe</u> <u>pas de sym.</u> <u>régulière</u> <u>irrégulière</u> élancement : <u>1/2</u> Forme en élévation : <u>régulière</u> irrégulière très irrégulière niveaux en retrait ( ) niveaux en saillie ( ) Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non <u>?</u> Niveaux non contreventés ( ) Niveaux souples modérés <u>(X)</u> importants ( ) Asymétrie marquée du contreventement (torsion) <u>oui</u> non <u>?</u> Absence d'encadrement des trumeaux : oui non <u>?</u> Absence d'encadrement des baies : <u>oui</u> non <u>?</u> Poteau court : oui <u>non</u> Poteau élancé : oui <u>non</u> Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui <u>non</u> Porte-à faux importants : oui <u>non</u> Edicules élancés : oui <u>non</u> Masses importantes en hauteur : oui <u>non</u> Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : <u>oui</u> non Etat de conservation de la structure : bon <u>normal</u> mauvais Surélévations prévisibles : oui <u>non</u> Divers :	
<b>2 Nature du sol /orographie + rue</b> Période propre du sol : <u>0,15</u> Période propre du bâtiment : <u>0,25</u> Risque de résonance : faible <u>modéré</u> élevé Pente en % : <u>✓</u> Sommet de colline : oui <u>non</u> Proximité d'un changement de pente : oui <u>non</u> Divers : Largeur de rue : <u>PIAZZA + ± 6M</u>	
<b>EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE :</b> A B <u>C</u> D E F	

FIGURE 34 – Fiche 3 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. Sources : Plattard, O., 2016.

④

Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016			
<b>LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?</b> PIAZZA ARCHIMEDE			
Rue :	Bâtiment : <i>Entre Piazza et Via Roma et via Consiglio Regimale</i>		
<b>CARACTERISTIQUES GENERALES :</b>			
Nature de l'occupation :	<i>restaurant RDC + ? - Post 1693 - Regimale</i>		
Surface au sol (m <sup>2</sup> ) :	<i>± 700 M<sup>2</sup></i>	Surface habitable (m <sup>2</sup> ) :	
Nombre de niveaux :	<i>3</i>	Hauteur (m) :	<i>15 m</i>
Type de toiture du dernier niveau :	<i>dalle béton charpente bois charpente acier</i>		
Type de construction :	<i>Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / Autre : moellons + mortier</i>		
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) :	<i>moellons .</i>		
<b>PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :</b>			
RdC	R + 1 2 3	Façade rue	Autre élévation
<p>PIAZZA ARCHIMEDE VIA CONSIGLIO REGIMALE VIA ROMA</p>		<p>FAÇADE PIAZZA ARCHIMEDE .</p>	
<p>À quelles limites du bâti ? Références des photos : <i>considération de l'édifice .</i></p>			
<b>FACTEURS DE VULNERABILITE :</b>			
<b>1 Construction</b>			
Forme en plan :	sym. 2 axes sym. 1 axe <u>pas de sym.</u>		régulière <u>irrégulière</u> élancement :
Forme en élévation :	<u>régulière</u> irrégulière très irrégulière	niveaux en retrait (X)	niveaux en saillie (X)
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies :	oui non ?		
Niveaux non contreventés ( )	Niveaux souples modérés (X) importants ( )		
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) :	oui non		
Absence d'encadrement des trumeaux :	oui non ?	Absence d'encadrement des baies : oui <u>non</u> ?	
Poteau court :	oui <u>non</u>	Poteau élancé : oui <u>non</u>	Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui <u>non</u>
Porte-à faux importants :	oui <u>non</u>	Edicules élancés : oui <u>non</u>	Masses importantes en hauteur : oui <u>non</u>
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm :	oui <u>non</u>		
Etat de conservation de la structure :	bon <u>normal</u> mauvais		
Surélévations prévisibles :	oui <u>non</u>		
Divers :	<i>COUR</i>		
<b>2 Nature du sol /orographie + rue</b>			
Période propre du sol :	<i>0,15</i>	Période propre du bâtiment :	<i>0,15</i> Risque de résonance : faible modéré <u>élevé</u>
Pente en % :	<i>/</i>		
Sommet de colline :	oui <u>non</u>	Proximité d'un changement de pente : oui <u>non</u>	
Divers :			
Largeur de rue :	<i>PIAZZA + ± 4m = via Consiglio Regimale</i>		
<b>EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE :</b> A B C D E F			

FIGURE 35 – Fiche 4 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede.  
Sources : Plattard, O., 2016.



5

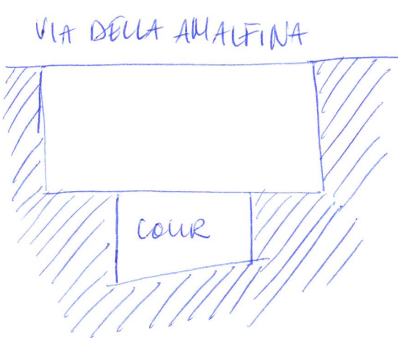
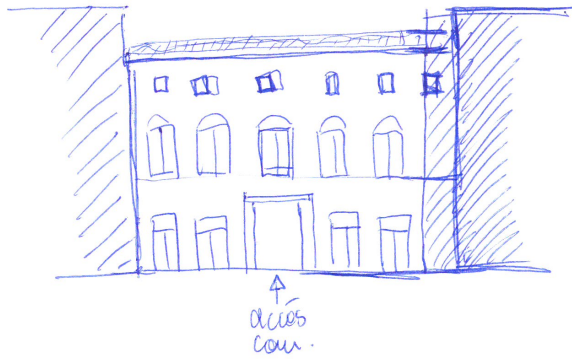
Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016	
LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ? <u>PIAZZA ARCHIMEDE</u>	
Rue :	Bâtiment : <u>Entre Piazza et Via della Amalfitania -</u>
CARACTERISTIQUES GENERALES :	
Nature de l'occupation : <u>? + magasin RDC</u>	- Post 1893 -
Surface au sol (m²) : <u>± 300 M<sup>2</sup></u>	Surface habitable (m²) :
Nombre de niveaux : <u>3 (2+1)</u>	Hauteur (m) : <u>13 M</u>
Type de toiture du dernier niveau : dalle béton charpente bois charpente acier	
Type de construction : Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / Autre :	
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) :	
PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :	
RdC	R + 1 2 3
	
Références des photos :	
PIAZZA ARCHIMEDE	
FACTEURS DE VULNERABILITE :	
<b>1 Construction</b>	
Forme en plan : <u>sym. 2 axes</u> sym. 1 axe pas de sym. <u>régulière</u> irrégulière élancement : <u>1/2</u>	
Forme en élévation : régulière irrégulière très irrégulière niveaux en retrait ( ) niveaux en saillie ( )	
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non <u>?</u>	
Niveaux non contreventés ( ) Niveaux souples modérés ( ) importants ( )	
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : oui <u>non</u>	
Absence d'encadrement des trumeaux : oui non <u>?</u> Absence d'encadrement des baies : oui <u>non</u> <u>NON AUGMENT FENETRES</u>	
Poteau court : oui <u>non</u> Poteau élancé : oui <u>non</u> Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui <u>non</u>	
Porte-à faux importants : oui <u>non</u> Edicules élancés : oui <u>non</u> Masses importantes en hauteur : oui <u>non</u>	
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : oui <u>non</u>	
Etat de conservation de la structure : bon <u>normal</u> mauvais	
Surélévations prévisibles : oui <u>non</u>	
Divers : <u>batiment apparemment plusieurs fois modifié</u>	
<b>2 Nature du sol /orographie + rue</b>	
Période propre du sol : <u>0,15</u> Période propre du bâtiment : <u>0,15</u> Risque de résonance : faible modéré <u>élevé</u>	
Pente en % :	
Sommet de colline : oui <u>non</u> Proximité d'un changement de pente : oui <u>non</u>	
Divers :	
Largeur de rue : <u>PIAZZA + via della Amalfitania ± 2m</u>	
EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE : A B C D E F	

FIGURE 36 – Fiche 5 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. Sources : Plattard, O., 2016.

⑥

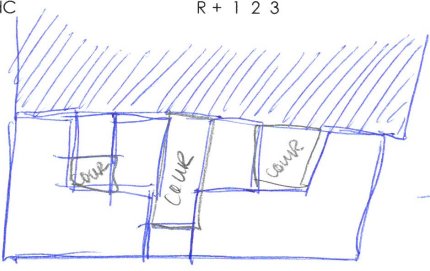
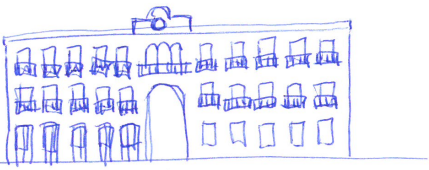
Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016			
<b>LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?</b> PIAZZA ARCHIMEDE			
Rue :	Bâtiment: PIAZZA + VIA della Amalfitanina Via Domenico Scina Post 1693		
<b>CARACTERISTIQUES GENERALES :</b>			
Nature de l'occupation : ? commerce RDC gauche .			
Surface au sol (m <sup>2</sup> ) : ± 900 m <sup>2</sup>	Surface habitable (m <sup>2</sup> ) :		
Nombre de niveaux : 3	Hauteur (m) : 15 M		
Type de toiture du dernier niveau : dalle béton charpente bois charpente acier			
Type de construction : Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / Autre :			
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) :			
<b>PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :</b>			
RdC	R + 1 2 3	Façade rue	Autre élévation
			
<p>PIAZZA ARCHIMEDE</p> <p>▲ bâtiment avec beaucoup de rejoint sur cour</p>		<p>↑ ACCESS COUR</p> <p>BATIMENT DIVISE EN 2.</p>	
Références des photos : de rejoint sur cour			
<b>FACTEURS DE VULNERABILITE :</b>			
<b>1 Construction</b>			
Forme en plan : sym. 2 axes sym. 1 axe pas de sym. régulière irrégulière élancement :			
Forme en élévation : régulière irrégulière très irrégulière niveaux en retrait ( ) niveaux en saillie ( )			
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non ? PORCHE POUR COUR			
Niveaux non contreventés ( ) Niveaux souples modérés (X) importants ( )			
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : oui non Pour bâti en L			
Absence d'encadrement des trumeaux : oui non ? Absence d'encadrement des baies : oui non ?			
Poteau court : oui non Poteau élancé : oui non Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui non			
Porte-à faux importants : oui non Edicules élancés : oui non Masses importantes en hauteur : oui non			
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : oui non Bâti en 2 + cour			
Etat de conservation de la structure : bon normal mauvais			
Surélévations prévisibles : oui non			
Divers : Bâtiment plusieurs fois modifié sur cour ▲			
<b>2 Nature du sol / orographie + rue</b>			
Période propre du sol : 0,15 Période propre du bâtiment : 0,15 Risque de résonance : faible modéré élevé			
Pente en % :			
Sommet de colline : oui non Proximité d'un changement de pente : oui non			
Divers :			
Largeur de rue : via Amalfitana ± 2m + Via Domenico Scina ± 4m.			
<b>EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE :</b> A B C D E F			

FIGURE 37 – Fiche 6 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede.  
Sources : Plattard, O., 2016.

7

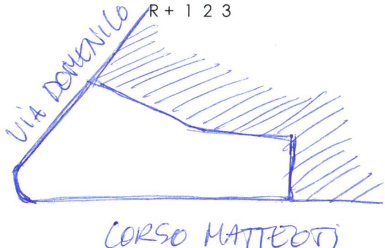

Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016	
<b>LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?</b> <u>PIAZZA ARCHIMEDE</u>	
Rue : <u>Via Domenico Scina</u> Bâtiment : <u>+ cours Matteoti.</u>	
<b>CARACTERISTIQUES GENERALES :</b>	
Nature de l'occupation : <u>habitat + magasin RDC.</u>	- Post 1693 -
Surface au sol (m²) : <u>± 200 m²</u>	Surface habitable (m²) :
Nombre de niveaux : <u>4</u>	Hauteur (m) : <u>16 M</u>
Type de toiture du dernier niveau : dalle béton charpente bois charpente acier	<u>toiture terrasse</u>
Type de construction : Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / Autre :	
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) : <u>moellans ?</u>	
<b>PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :</b>	
RdC	R + 1 2 3
	
Références des photos :	
<b>FACTEURS DE VULNERABILITE :</b>	
<b>1 Construction</b>	
Forme en plan : sym. 2 axes sym. 1 axe <u>pas de sym.</u> régulière <u>irrégulière</u> élancement : <u>± 1/2</u>	
Forme en élévation : <u>régulière</u> irrégulière très irrégulière niveaux en retrait ( ) niveaux en saillie ( )	
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non <u>?</u>	
Niveaux non contreventés ( ) Niveaux souples modérés ( ) importants ( )	
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : oui <u>non</u>	
Absence d'encadrement des trumeaux : oui <u>non ?</u> Absence d'encadrement des baies : <u>oui</u> non ?	
Poteau court : oui <u>non</u> Poteau élancé : oui <u>non</u> Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui <u>non</u>	
Porte-à faux importants : oui <u>non</u> Edicules élancés : oui <u>non</u> Masses importantes en hauteur : oui <u>non</u>	
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : <u>oui</u> non	
Etat de conservation de la structure : bon <u>normal</u> mauvais	
Surélévations prévisibles : oui <u>non</u>	
Divers :	
<b>2 Nature du sol /orographie + rue</b>	
Période propre du sol : <u>0,13</u> Période propre du bâtiment : <u>0,15</u> Risque de résonance : faible modéré <u>élevé</u>	
Pente en % : <u>± 5%</u> <u>cours Matteoti</u>	
Sommet de colline : oui <u>non</u> Proximité d'un changement de pente : <u>oui</u> non	
Divers :	
Largeur de rue : <u>matteoti ± 15 m . Via Domenico Scina ± 4 m</u>	
<b>EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE :</b> A <u>B</u> C D E F	

FIGURE 38 – Fiche 7 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. Sources : Plattard, O., 2016.

8

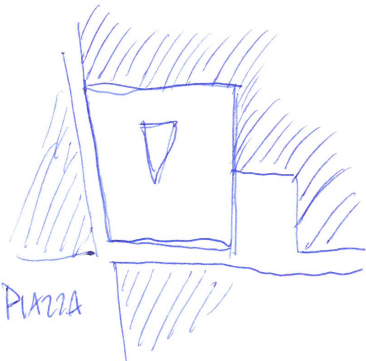

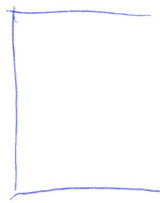
Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016				
<b>LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?</b> PIAZZA ARCHIMEDE				
Rue :	Bâtiment: Via Dione + Via Dei Montalto.			
<b>CARACTERISTIQUES GENERALES :</b>				
Nature de l'occupation :	habitat	- post 1693 -		
Surface au sol (m <sup>2</sup> ) :	± 300 m <sup>2</sup> .	Surface habitable (m <sup>2</sup> ) :		
Nombre de niveaux :	3	Hauteur (m) :	10 M	
Type de toiture du dernier niveau :	dalle béton	charpente bois	charpente acier	
Type de construction :	Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / Autre : non chaînée			
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) :	moellons + mortier			
<b>PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :</b>				
RdC	R + 1 2 3	Façade rue	Autre élévation	
		<p>PAS DE REcul POUR LA FAçADE !</p> 		
Références des photos :				
<b>FACTEURS DE VULNERABILITE :</b>				
<b>1 Construction</b>				
Forme en plan :	sym. 2 axes	sym. 1 axe	pas de sym. régulière irrégulière élancement :	
Forme en élévation :	régulière	irrégulière	très irrégulière niveaux en retrait ( ) niveaux en saillie ( )	
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies :	oui non ?			
Niveaux non contreventés ( )	Niveaux souples modérés ( ) importants ( )			
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) :	oui non			
Absence d'encadrement des trumeaux :	oui non ?	Absence d'encadrement des baies : oui non ? <i>seulement</i>		
Poteau court :	oui non	Poteau élancé :	oui non Liens précaires entre éléments ou baïonnettes : oui non	
Porte-à faux importants :	oui non	Edicules élancés :	oui non Masses importantes en hauteur : oui non	
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm :	oui non			
Etat de conservation de la structure :	bon normal mauvais			
Surélévations prévisibles :	oui non			
Divers :	<i>Bâtiment plusieurs fois modifié</i>			
<b>2 Nature du sol / orographie + rue</b>				
Période propre du sol :	0,15	Période propre du bâtiment :	0,14 Risque de résonance : faible modéré élevé	
Pente en % :				
Sommet de colline :	oui non	Proximité d'un changement de pente : oui non		
Divers :				
Largeur de rue :	<i>VIA DIONE ± 3,5m et VIA MONTALTO ± 1,5M.</i>			
<b>EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE :</b> A B C D E F				

FIGURE 39 – Fiche 8 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede.  
Sources : Plattard, O., 2016.



9


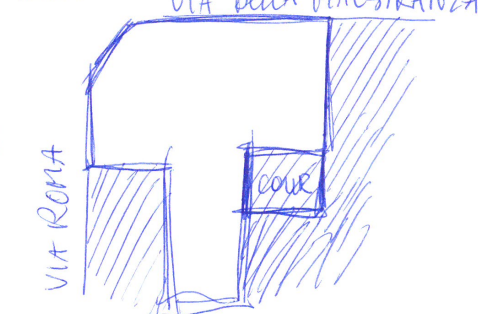
Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016			
<b>LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?</b> <i>PIAZZA ARCHIMEDE</i>			
Rue :	Bâtiment : <i>Via Roma + Via della Maestranza.</i>		
<b>CARACTERISTIQUES GENERALES :</b>			
Nature de l'occupation :	<i>Commerces REX + habitat ? - POST 1693 -</i>		
Surface au sol (m²) :	Surface habitable (m²) :		
Nombre de niveaux : <i>3</i>	Hauteur (m) : <i>14m</i>		
Type de toiture du dernier niveau : <i>dalle béton</i> charpente bois charpente acier			
Type de construction : Ossature <i>BA</i> avec remplissage / Maçonnerie chaînée / Autre :			
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) :			
<b>PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :</b>			
RdC	R + 1 2 3	Façade rue	Autre élévation
<i>PIAZZA</i>	<i>VIA DELLA MAESTRANZA</i>		
<i>VIA ROMA</i>	<i>COUR</i>	<i>VIA DELLA MAESTRANZA</i> <i>desaxe parche</i> <i>balcon principaux</i>	
Références des photos :			
<b>FACTEURS DE VULNERABILITE :</b>			
<b>1 Construction</b>			
Forme en plan : sym. 2 axes sym. 1 axe <u>pas de sym.</u> régulière <u>irrégulière</u> élancement :			
Forme en élévation : <u>régulière</u> irrégulière très irrégulière niveaux en retrait ( ) niveaux en saillie ( )			
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui <u>non</u> ?			
Niveaux non contreventés ( ) Niveaux souples modérés ( ) importants ( )			
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : oui <u>non</u>			
Absence d'encadrement des trumeaux : oui <u>non</u> ? Absence d'encadrement des baies : oui <u>non</u> ?			
Poteau court : oui <u>non</u> Poteau élancé : oui <u>non</u> Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui <u>non</u>			
Porte-à faux importants : oui <u>non</u> Edicules élancés : oui <u>non</u> Masses importantes en hauteur : oui <u>non</u>			
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : oui <u>non</u>			
Etat de conservation de la structure : <u>bon normal</u> mauvais			
Surélévations prévisibles : oui <u>non</u>			
Divers :			
<b>2 Nature du sol /orographie + rue</b>			
Période propre du sol : <i>0,15</i> Période propre du bâtiment : <i>0,15</i> Risque de résonance : faible modéré <u>élevé</u>			
Pente en % : <i>-</i>			
Sommet de colline : oui <u>non</u> Proximité d'un changement de pente : oui <u>non</u>			
Divers :			
Largeur de rue : <i>VIA DELLA MAESTRANZA ± 6M + VIA ROMA ± 5M.</i>			
<b>EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE :</b> A B <u>C</u> D E F			

FIGURE 40 – Fiche 9 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. Sources : Plattard, O., 2016.

⑨

Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016	
LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ? <u>PIAZZA DUOMO</u>	
Rue :	Bâtiment : <u>DUOMO DI SIRACUSA - CATHEDRALE</u> <span style="float: right;">≈ 1750 ?</span>
CARACTERISTIQUES GENERALES : <u>RECONSTRUITE SUR RUINES APRES 1693 -- POST 1693 --</u>	
Nature de l'occupation : <u>Cathédrale</u>	Surface habitable (m <sup>2</sup> ) : <input checked="" type="checkbox"/>
Surface au sol (m <sup>2</sup> ) : <u>± 2400 m<sup>2</sup> (100 x 24 m)</u>	Hauteur (m) : <u>BATI = 20-22</u> <u>FACADE = +25 ?</u>
Nombre de niveaux : <input checked="" type="checkbox"/>	Type de toiture du dernier niveau : <u>dalle béton</u> charpente bois charpente acier
Type de construction : <u>Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / moellons + mortier / Autre : PIERRE</u>	Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) : <u>piéres du temple + moellons pour reconstruit.</u>
PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :	
<p>RdC R+ 1 2 3</p> <p>colonne grecques .</p> <p>PIAZZA MINERVA</p> <p>PARVIS PLACE DUOMO</p>	<p>Autre élévation</p> <p>TOITURE</p> <p>FACADE</p> <p>colonne temple Minerva. mur piéres</p>
Références des photos :	
FACTEURS DE VULNERABILITE :	
<b>1 Construction</b>	
Forme en plan : <u>sym. 2 axes</u> sym. 1 axe pas de sym. régulière irrégulière élancement : <u>1/3</u>	
Forme en élévation : <u>irrégulière</u> très irrégulière niveaux en retrait (X) niveaux en saillie (X)	
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : <u>oui</u> non ? <u>EGLISE = DOME + VOUTES.</u>	
Niveaux non contreventés ( ) Niveaux souples modérés (X) importants (X)	
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : <u>oui</u> non	
Absence d'encadrement des trumeaux : <u>oui</u> non ? Absence d'encadrement des baies (oui) non ?	
Poteau court : <u>oui</u> non Poteau élancé : <u>oui</u> non Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes (oui) non	
Porte-à faux importants : <u>oui</u> non Edicules élancés : <u>oui</u> non Masses importantes en hauteur (oui) non	
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm (oui) non <u>haute façade</u>	
Etat de conservation de la structure : <u>bon normal</u> mauvais	
Surélévations prévisibles : <u>oui</u> non	
Divers : <u>≠ époques construction - + église donc vente sans diaphragme.</u>	
<b>2 Nature du sol /orographie + rue</b>	
Période propre du sol : <u>0,15</u> Période propre du bâtiment : ? Risque de résonance : faible <u>modéré</u> élevé	
Pente en % : <input checked="" type="checkbox"/>	
Sommet de colline : <u>oui</u> non Proximité d'un changement de pente : <u>oui</u> non	
Divers :	
Largeur de rue : <u>PIAZZA DUOMO ± 43 m</u> <u>PIAZZA MINERVA ± 14 m.</u>	
EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE : A B C D E F	

FIGURE 41 – Fiche 1 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo.  
Sources : Plattard, O., 2016.

②

Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016	
<b>LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?</b> <u>PIAZZA DUOMO</u> Rue : <u>PIAZZA DUOMO</u> Bâtiment : <u>Palazzo ARCEVESCOVILE</u> <i>Prise en compte du bâti sur place -</i>	
<b>CARACTERISTIQUES GENERALES :</b> Nature de l'occupation : <u>Bâtiment archidiocèse (rattaché Cathédrale)</u> - <u>POST 1693</u> Surface au sol (m²) : <u>± 1000 u²</u> Surface habitable (m²) : <u>-</u> Nombre de niveaux : <u>3</u> Hauteur (m) : <u>17M</u> Type de toiture du dernier niveau : <u>dalle béton charpente bois charpente acier + tuiles romaines</u> Type de construction : <u>Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / moellons + mortier / Autre :</u> Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) : <u>grès</u>	
<b>PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :</b> RdC R + 1 2 3 Façade rue Autre élévation 	
Références des photos :	
<b>FACTEURS DE VULNERABILITE :</b> <b>1 Construction</b> Forme en plan : sym. 2 axes sym. 1 axe <u>pas de sym.</u> régulière <del>irrégulière</del> élancement : <u>1/2</u> Forme en élévation : <u>régulière</u> irrégulière très irrégulière niveaux en retrait (X) niveaux en saillie (X) Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non (?) Niveaux non contreventés (?) Niveaux souples modérés ( ) importants ( ) Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : oui non <u>probable</u> Absence d'encadrement des trumeaux : oui non (?) Absence d'encadrement des baies : oui non (?) Poteau court : oui <u>non</u> Poteau élancé : oui <u>non</u> Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui <u>non</u> Porte-à faux importants : oui <u>non</u> Edicules élancés : oui <u>non</u> Masses importantes en hauteur : oui <u>non</u> Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : oui non <u>cathédrale</u> Etat de conservation de la structure : bon <u>normal</u> mauvais Surélévations prévisibles : oui <u>non</u> Divers :	
<b>2 Nature du sol / orographie + rue</b> Période propre du sol : <u>0,15</u> Période propre du bâtiment : <u>0,15</u> Risque de résonance : faible modéré <u>élevé</u> Pente en % : <u>2%</u> Sommet de colline : oui <u>non</u> Proximité d'un changement de pente : oui non Divers : Largeur de rue : <u>PIAZZA DUOMO ± 45m.</u>	
<b>EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE : A B C D E F</b>	

FIGURE 42 – Fiche 2 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. Sources : Plattard, O., 2016.



③

**Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016**

**LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?** PIAZZA DUOMO  
 Rue : EGLISE STE - Bâtiment : LUCIE ~~PIAZZA DUOMO~~ (+ temple grec.)

**CARACTERISTIQUES GENERALES :**

Nature de l'occupation : EGLISE - POST 1693 -  
 Surface au sol (m<sup>2</sup>) : ± 500M<sup>2</sup>  
 Surface habitable (m<sup>2</sup>) : /  
 Nombre de niveaux : 1 EGLISE (2)  
 Hauteur (m) : FAÇADE 25M  
 MUR ± 18M  
 Type de toiture du dernier niveau : dalle béton charpente bois charpente acier  
 Type de construction : Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / moellons + mortier / Autre :  
 Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) : Pierre + base ruines seisme 1693

**PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEEVE) :**

RdC R+ 1 2 3 Façade rue Autre élévation

adjacent petit temple grec. H. 12m.  
 niveau vide avec portine  
 Via Picherali  
 Façade avec fausses colonnes

Références des photos :

**FACTEURS DE VULNERABILITE :**

**1 Construction**

Forme en plan : sym. 2 axes sym. 1 axe pas de sym. régulière irrégulière élancement : 1/2  
 Forme en élévation : régulière irrégulière très irrégulière niveaux en retrait (X) niveaux en saillie (X)  
 Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non ? Eglise (vente...)  
 Niveaux non contreventés ( ) Niveaux souples modérés ( ) importants (✓)  
 Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : oui non  
 Absence d'encadrement des trumeaux : oui non ? Absence d'encadrement des baies : oui non ?  
 Poteau court : oui non Poteau élancé : oui non Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui non  
 Porte-à faux importants : oui non Edicules élancés : oui non Masses importantes en hauteur : oui non  
 Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : oui non FAÇADE  
 Etat de conservation de la structure : bon normal mauvais  
 Surélévations prévisibles : oui non  
 Divers : ≠ époques de construction + reconstruction.

**2 Nature du sol /orographie + rue**

Période propre du sol : 0,15 Période propre du bâtiment : ? Risque de résonance : faible modéré élevé  
 Pente en % :  
 Sommet de colline : oui non Proximité d'un changement de pente : oui non  
 Divers :  
 Largeur de rue : Via Tompeo Picherali ± 5,5m

**EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE :** A B C D E F

FIGURE 43 – Fiche 3 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo.  
 Sources : Plattard, O., 2016.

④

Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016			
LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ? <u>PIAZZA DUOMO</u>			
Rue : <u>VIA POMPERO</u> Bâtiment : <u>PICHERALI</u>			
CARACTERISTIQUES GENERALES :			
Nature de l'occupation : <u>restaurant + hébergement</u>		- POST 1693 -	
Surface au sol (m²) : <u>± 450 m²</u>		Surface habitable (m²) : <u>1000 m²</u>	
Nombre de niveaux : <u>3</u>		Hauteur (m) : <u>± 18-20 m</u>	
Type de toiture du dernier niveau : <u>dalle béton</u> charpente bois charpente acier			
Type de construction : <u>Ossature BA avec remplissage</u> / Maçonnerie chaînée / moellons + mortier / Autre : <u>revetement crepus</u>			
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) :			
PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :			
RdC	R + 1 2 3	Façade rue	Autre élévation
Références des photos :	<u>très haute hauteur d'étage - Δ</u>	<u>renforcement</u>	
FACTEURS DE VULNERABILITE :			
<b>1 Construction</b>			
Forme en plan : sym. 2 axes sym. 1 axe <u>pas de sym.</u> régulière <u>irrégulière</u> élancement : <u>1/2</u>			
Forme en élévation : régulière <u>irrégulière</u> très irrégulière niveaux en retrait (X) niveaux en saillie (X)			
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non (?)			
Niveaux non contreventés ( ? ) Niveaux souples modérés (✓) importants ( )			
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) <u>oui</u> non <u>étage 1 ?</u>			
Absence d'encadrement des trumeaux : oui non (?) Absence d'encadrement des baies : oui <u>non ?</u>			
Poteau court : oui <u>non</u> Poteau élancé : oui <u>non</u> Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes <u>oui</u> non			
Porte-à faux importants : oui <u>non</u> Edicules élancés : oui <u>non</u> Masses importantes en hauteur : oui <u>non</u>			
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm <u>oui</u> non			
Etat de conservation de la structure : bon <u>normal</u> mauvais			
Surélévations prévisibles : oui <u>non</u>			
Divers :			
<b>2 Nature du sol / orographie + rue</b>			
Période propre du sol : <u>0,15</u> Période propre du bâtiment : <u>0,1-0,15</u> Risque de résonance : faible modéré <u>élevé</u>			
Pente en % :			
Sommet de colline : oui <u>non</u> Proximité d'un changement de pente : oui <u>non</u>			
Divers :			
Largeur de rue : <u>Via Pompero Pichevali ± 5,5 m</u>			
EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE : <u>A</u> B C D E F			

FIGURE 44 – Fiche 4 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. Sources : Plattard, O., 2016.

MITOYENNE  
FAÇADE MITOYENNE  
SURTÈLE au ⑥ ⑤

**Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016**

**LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?** PIAZZA DUOMO  
Rue : Piazza Duomo Bâtiment :

**CARACTERISTIQUES GENERALES :**

Nature de l'occupation : Logement - POST 7693 -  
Surface au sol (m<sup>2</sup>) : ± 300 m<sup>2</sup> (ajouts sur cour + avec bâti ④) Surface habitable (m<sup>2</sup>) : 800 m<sup>2</sup>  
Nombre de niveaux : 3 + 1 Hauteur (m) : ± 15M façade  
Type de toiture du dernier niveau : dalle béton charpente bois charpente acier  
Type de construction : Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / moellons + mortier / Autre :  
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) : pierres .

**PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :**

RdC R + 1 2 3

PIAZZA zone ajoutée  
↓ al cunble  
pau  
nat ⑤

mitoyen

ajout sur cour

COUR

surélévation

Façade rue Autre élévation

PIAZZA DUOMO côté mitoyen.

Références des photos :

**FACTEURS DE VULNERABILITE :**

**1 Construction**

Forme en plan : sym. 2 axes sym. 1 axe pas de sym. régulière irrégulière élancement : X  
Forme en élévation : régulière irrégulière très irrégulière niveaux en retrait (X) niveaux en saillie (X)  
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non ?  
Niveaux non contreventés ( ) Niveaux souples modérés (X) importants (X)  
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : oui non  
Absence d'encadrement des trumeaux : oui non ? Absence d'encadrement des boies : oui non ?  
Poteau court : oui non Poteau élancé : oui non Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui non  
Porte-à faux importants : oui non Edicules élancés : oui non Masses importantes en hauteur : oui non  
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : oui non  
Etat de conservation de la structure : bon normal mauvais  
Surélévations prévisibles : oui non  
Divers : beaucoup d'ajout sur cour et sur mitoyenneté

**2 Nature du sol /orographie + rue**

Période propre du sol : 0,14 Période propre du bâtiment : 0,15 Risque de résonance : faible modéré élevé  
Pente en % :  
Sommet de colline : oui non Proximité d'un changement de pente : oui non  
Divers :  
Largeur de rue : Piazza Duomo ± 40M

**EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE :** A B C D E F

FIGURE 45 – Fiche 5 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo.  
Sources : Plattard, O., 2016.



ANNEXE . FICHES DE DIAGNOSTIC

FACADE MITOYENNE SURVEILLEE d'⑤ ⑥

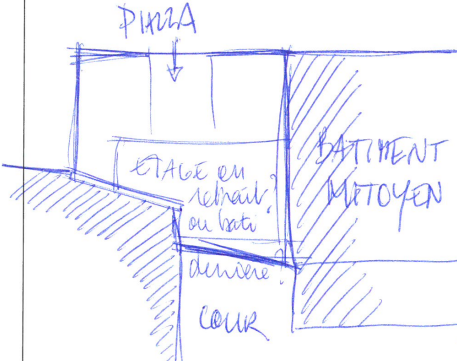
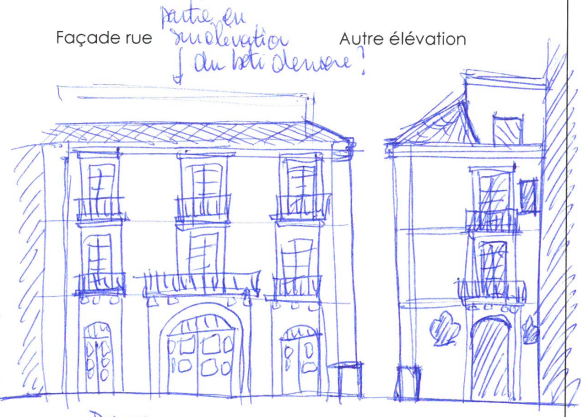
Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016	
LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ? <b>PIAZZA DUOMO</b>	
Rue : <b>Piazza Duomo</b> Bâtiment :	
CARACTERISTIQUES GENERALES :	
Nature de l'occupation : <b>logement</b>	POST <b>1693</b>
Surface au sol (m <sup>2</sup> ) : <b>± 2000 m<sup>2</sup></b>	Surface habitable (m <sup>2</sup> ) : <b>500 m<sup>2</sup></b>
Nombre de niveaux : <b>3</b>	Hauteur (m) : <b>± 15 m</b> <i>Passade</i>
Type de toiture du dernier niveau : dalle béton charpente bois charpente acier	
Type de construction : Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / moellons + mortier / Autre :	
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) : <b>Pienes</b>	
PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :	
RdC	R + 1 2 3
	
Références des photos :	
FACTEURS DE VULNERABILITE :	
<b>1 Construction</b>	
Forme en plan : sym. 2 axes sym. 1 axe <u>pas de sym.</u> <u>régulière</u> irrégulière élancement : <input checked="" type="checkbox"/>	
Forme en élévation : <u>régulière</u> irrégulière très irrégulière niveaux en retrait <input checked="" type="checkbox"/> niveaux en saillie <input checked="" type="checkbox"/>	
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non <input checked="" type="checkbox"/>	
Niveaux non contreventés <input checked="" type="checkbox"/> Niveaux souples modérés <input checked="" type="checkbox"/> importants <input checked="" type="checkbox"/>	
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : oui <u>non</u>	
Absence d'encadrement des trumeaux : oui non <input checked="" type="checkbox"/> Absence d'encadrement des baies : oui <u>non</u> ?	
Poteau court : oui <u>non</u> Poteau élancé : oui <u>non</u> Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui <u>non</u>	
Porte-à faux importants : oui <u>non</u> Edicules élancés : oui <u>non</u> Masses importantes en hauteur : oui <u>non</u>	
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : oui <u>non</u>	
Etat de conservation de la structure : bon <u>normal</u> mauvais	
Surélévations prévisibles : oui <u>non</u>	
Divers : <u>probablement levé par la cour au bâtiment ⑦ !</u>	
<b>2 Nature du sol / orographie + rue</b>	
Période propre du sol : <b>0,15</b> Période propre du bâtiment : <b>0,15</b> Risque de résonance : faible modéré <u>élevé</u>	
Pente en % :	
Sommet de colline : oui <u>non</u> Proximité d'un changement de pente : oui <u>non</u>	
Divers :	
Largeur de rue : <b>Piazza Duomo ± 40 m</b>	
EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE : <b>A B C D E F</b>	

FIGURE 46 – Fiche 6 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. Sources : Plattard, O., 2016.

△ BÂTIMENT LIÉ AU ⑥? + LIÉ A L'ARRIÈRE COUR? BÂTI EN LI? ⑦

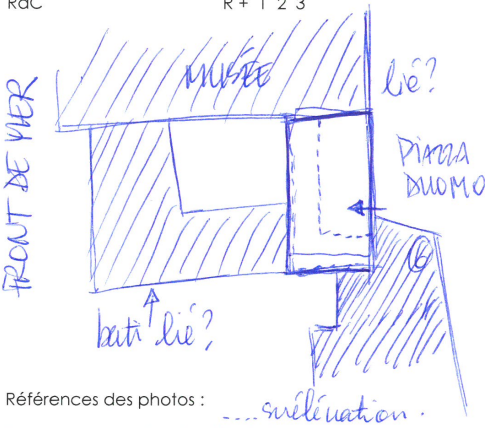
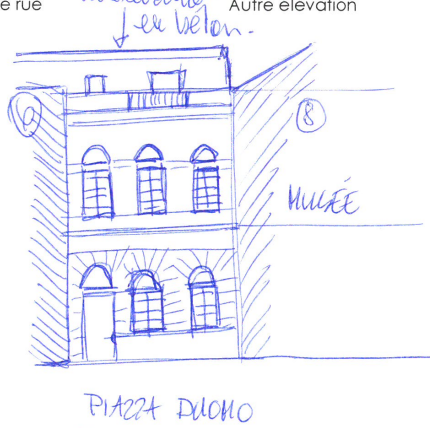
Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016	
LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ? <u>PIAZZA DUOMO</u>	
Rue : <u>Piazza Duomo</u> Bâtiment :	→ PRISE EN COMPTE DE LA PARTIE AVANT - POST 1693 -
<b>CARACTERISTIQUES GENERALES :</b>	
Nature de l'occupation : <u>Habitation?</u>	
Surface au sol (m <sup>2</sup> ) : <u>±150 m<sup>2</sup> (partie avant)</u>	Surface habitable (m <sup>2</sup> ) : <u>±300 m<sup>2</sup> / 400</u>
Nombre de niveaux : <u>2 sur Piazza - 3 ou 4 sur cour?</u>	Hauteur (m) : <u>±18 m + surélévation?</u>
Type de toiture du dernier niveau : <u>dalle béton charpente bois charpente acier</u>	
Type de construction : <u>Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / moellons + mortier / Autre :</u>	
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) : <u>moellons + surélévation béton.</u>	
<b>PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :</b>	
RdC	R + 1 2 3
FRONT DE MER	FAÇADE RUE
	
Références des photos : <u>... surélévation.</u>	
<b>FACTEURS DE VULNERABILITE :</b>	
<b>1 Construction</b>	
Forme en plan : <u>sym. 2 axes</u> <u>sym. 1 axe</u> <u>pas de sym.</u>	<u>régulière</u> <u>irrégulière</u> élancement : <u>1/2</u>
Forme en élévation : <u>régulière</u> <u>irrégulière</u> <u>très irrégulière</u>	niveaux en retrait (1) <u>niveaux en saillie</u> <input checked="" type="checkbox"/>
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non <input checked="" type="checkbox"/>	Toiture
Niveaux non contreventés (?) Niveaux souples modérés (?) importants <input checked="" type="checkbox"/>	
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : oui <u>non</u>	
Absence d'encadrement des trumeaux : oui non <input checked="" type="checkbox"/>	Absence d'encadrement des baies : oui non <input checked="" type="checkbox"/>
Poteau court : oui <u>non</u> Poteau élancé : oui <u>non</u>	Liaisons précaires entre éléments ou baionnettes <u>oui</u> non
Porte-à faux importants : oui <u>non</u> Edicules élancés : oui <u>non</u>	Masses importantes en hauteur <u>oui</u> non
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : <u>oui</u> non	<u>remplissage béton</u> <u>ajustée-</u>
Etat de conservation de la structure : <u>bon</u> <u>normal</u> mauvais	
Surélévations prévisibles : oui <u>non</u>	
Divers : <u>△ + matériaux - + difficulté de déterminer liaison avec bâti sur cour!</u>	
<b>2 Nature du sol / orographie + rue</b>	
Période propre du sol : <u>0,15</u> Période propre du bâtiment : <u>0,15</u>	Risque de résonance : faible modéré <u>élevé</u>
Pente en % :	
Sommet de colline : oui <u>non</u> Proximité d'un changement de pente : <u>oui</u> non	
Divers :	<u>entre front de mer et place.</u>
Largeur de rue : <u>PIAZZA DUOMO ± 40 m.</u>	
EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE : <u>A</u> B C D E F	

FIGURE 47 – Fiche 7 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo.  
Sources : Plattard, O., 2016.



△ même bâti que ⑦ ??

⑧

Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016	
LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ? <b>PIAZZA DUOMO</b>	
Rue :	Bâtiment : <b>Palais</b> <span style="margin-left: 20px;">△ demeure sur Passaggio Aretusa</span>
CARACTERISTIQUES GENERALES :	
Nature de l'occupation :	<b>Palazzo della Sovrintendenza ai Beni Culturali - MUSÉE -</b>
Surface au sol (m <sup>2</sup> ) :	<b>±800 M<sup>2</sup></b> <span style="margin-left: 20px;">1800 - Post 1693 -</span>
Nombre de niveaux :	<b>2 sur PIAZZA - 3 sur Front de mer.</b> <span style="margin-left: 20px;">Passaggio Aretusa.</span> <span style="margin-left: 20px;">Surface habitable (m<sup>2</sup>) : 2000 M<sup>2</sup></span>
Type de toiture du dernier niveau :	<b>dalle béton charpente bois charpente acier</b> <span style="margin-left: 20px;">Hauteur (m) : 18 M</span>
Type de construction :	<b>Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / moellons + mortier / Autre :</b> <span style="margin-left: 20px;">Front de mer : +30 M.</span>
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) :	
PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :	
RdC	R + 1 2 3
Autre élévation	
Références des photos :	
FACTEURS DE VULNERABILITE :	
<b>1 Construction</b>	
Forme en plan :	sym. 2 axes <input checked="" type="checkbox"/> sym. 1 axe <input checked="" type="checkbox"/> pas de sym. <input type="checkbox"/> régulière <input type="checkbox"/> irrégulière <input checked="" type="checkbox"/> élancement : <input checked="" type="checkbox"/>
Forme en élévation :	régulière <input checked="" type="checkbox"/> irrégulière <input type="checkbox"/> très irrégulière <input type="checkbox"/> niveaux en retrait ( <input checked="" type="checkbox"/> ) niveaux en saillie ( <input checked="" type="checkbox"/> )
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies :	oui <input type="checkbox"/> non <input checked="" type="checkbox"/>
Niveaux non contreventés (?) Niveaux souples modérés (?) importants ( )	
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) :	oui <input type="checkbox"/> non <input checked="" type="checkbox"/>
Absence d'encadrement des trumeaux :	oui <input type="checkbox"/> non <input checked="" type="checkbox"/> Absence d'encadrement des baies : oui <input type="checkbox"/> non <input checked="" type="checkbox"/>
Poteau court :	oui <input checked="" type="checkbox"/> non <input type="checkbox"/> Poteau élancé : oui <input type="checkbox"/> non <input checked="" type="checkbox"/> Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui <input type="checkbox"/> non <input checked="" type="checkbox"/>
Porte-à faux importants :	oui <input checked="" type="checkbox"/> non <input type="checkbox"/> Edicules élancés : oui <input type="checkbox"/> non <input checked="" type="checkbox"/> Masses importantes en hauteur : oui <input type="checkbox"/> non <input checked="" type="checkbox"/>
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm :	oui <input type="checkbox"/> non <input checked="" type="checkbox"/>
État de conservation de la structure :	bon <input checked="" type="checkbox"/> normal <input type="checkbox"/> mauvais <input type="checkbox"/>
Surélévations prévisibles :	oui <input type="checkbox"/> non <input checked="" type="checkbox"/>
Divers :	<b>difficile de déterminer si lié au bâti ⑦.</b>
<b>2 Nature du sol / orographie + rue</b>	
Période propre du sol :	<b>0,15</b> Période propre du bâtiment : <b>0,14</b> Risque de résonance : faible modéré <b>élevé</b>
Pente en % :	
Sommet de colline :	oui <input checked="" type="checkbox"/> non <input type="checkbox"/> Proximité d'un changement de pente : oui <input type="checkbox"/> non <input checked="" type="checkbox"/> <span style="margin-left: 20px;">≠ niveau front de mer piazza.</span>
Divers :	
Largeur de rue : <b>Piazza ±40 M + Front de Mer. Passaggio Aretusa ± 8 M.</b>	
EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE : A B C D E F	

FIGURE 48 – Fiche 8 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. Sources : Plattard, O., 2016.

▲ UNE FAÇADE MAIS PLUSIEURS BATI AUTOUR COUR? ⑨

Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016			
<b>LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?</b> PIAZZA DUOMO			
Rue : PIAZZA DUOMO Bâtiment : Edifice sur cour intérieure avec façade commune			
<b>CARACTERISTIQUES GENERALES :</b>			
Nature de l'occupation : Halimations + café RDC		- POST 1693 -	
Surface au sol (m²) : Edifice en façade : ± 500 m²		Surface habitable (m²) : ?	
Nombre de niveaux : variable 2 à 4 - surélévation ponctuelle		Hauteur (m) : façade ± 15 m	
Type de toiture du dernier niveau : dalle béton / charpente bois / charpente acier			
Type de construction : Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / moellons + mortier / Autre :			
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) : matériaux variables			
<b>PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :</b>			
RdC	R + 1 2 3	Façade rue	Autre élévation
Références des photos : ⑧			
<b>FACTEURS DE VULNERABILITE :</b>			
<b>1 Construction</b>			
Forme en plan : sym. 2 axes / sym. 1 axe / pas de sym.		régulière / irrégulière / très irrégulière	
Forme en élévation : régulière / irrégulière / très irrégulière		niveau en retrait (✓) / niveau en saillie (✓)	
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non (✓)			
Niveaux non contreventés (✓) / Niveaux souples modérés (X) importants (X)			
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : oui non ?			
Absence d'encadrement des trumeaux : oui non ?		Absence d'encadrement des baies : oui non ?	
Poteau court : oui non		Poteau élancé : oui non	
Porte-à faux importants : oui non		Liaisons précaires entre éléments ou balconnettes : oui non	
Edicules élancés : oui non		Masses importantes en hauteur : oui non	
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : oui non			
Etat de conservation de la structure : bon normal mauvais			
Surélévations prévisibles : oui non			
Divers : façade renouée pour place touristique ms mauvais état derrière			
<b>2 Nature du sol / orographie + rue</b>			
Période propre du sol : 0,15		Période propre du bâtiment : 0,16	
Risque de résonance : faible / modéré / élevé			
Pente en % :			
Sommet de colline : oui non		Proximité d'un changement de pente : oui non	
Divers : Centre place et front de mer			
Largeur de rue : Piazza ± 40 - Via delle Carceri Vecchie ± 5m			
<b>EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE :</b> A B C D E F			

FIGURE 49 – Fiche 9 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo.  
Sources : Plattard, O., 2016.

10

Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016	
LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ? <u>PIAZZA DUOMO</u>	
Rue :	Bâtiment : <u>"Case del Fondo"</u>
CARACTERISTIQUES GENERALES :	
Nature de l'occupation : <u>Hotel + Restaurant Rdc .</u>	- POST 1693 -
Surface au sol (m <sup>2</sup> ) : <u>± 1000m<sup>2</sup></u>	Surface habitable (m <sup>2</sup> ) : <u>± 300m<sup>2</sup></u>
Nombre de niveaux : <u>variable 3 sur Piazza 4 sur cour ?</u>	Hauteur (m) : <u>façade ± 18M</u>
Type de toiture du dernier niveau : <u>dalle béton charpente bois charpente acier</u>	
Type de construction : Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / <u>moellons + mortier</u> / Autre :	
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) : <u>+ matériaux .</u>	
PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :	
RdC	R + 1/2/3
	
Références des photos :	
FACTEURS DE VULNERABILITE :	
<b>1 Construction</b>	
Forme en plan : sym. 2 axes sym. 1 axe <u>pas de sym.</u> régulière <u>irrégulière</u> élancement : <input checked="" type="checkbox"/>	
Forme en élévation : <u>sur Piazza</u> régulière <u>irrégulière</u> <u>très irrégulière</u> niveaux en retrait <input checked="" type="checkbox"/> niveaux en saillie <input checked="" type="checkbox"/>	
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non <input checked="" type="checkbox"/>	
Niveaux non contreventés <input checked="" type="checkbox"/> Niveaux souples modérés <input checked="" type="checkbox"/> importants <input checked="" type="checkbox"/>	
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : oui non <input checked="" type="checkbox"/>	
Absence d'encadrement des trumeaux : oui non ? Absence d'encadrement des baies : oui non ?	
Poteau court : oui non <input checked="" type="checkbox"/> Poteau élancé : oui non <input checked="" type="checkbox"/> Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui non <input checked="" type="checkbox"/>	
Porte-à faux importants : oui non <input checked="" type="checkbox"/> Edicules élancés : oui non <input checked="" type="checkbox"/> Masses importantes en hauteur : oui non <input checked="" type="checkbox"/>	
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : oui non <input checked="" type="checkbox"/>	
Etat de conservation de la structure : <u>bon normal mauvais</u>	
Surélévations prévisibles : oui non ?	
Divers : <u>façade entretenue ms mauvais chat sur cour + ajouts .</u>	
<b>2 Nature du sol / orographie + rue</b>	
Période propre du sol : <u>0,1s</u> Période propre du bâtiment : <u>0,15s</u> Risque de résonance : faible modéré <u>élevé</u>	
Pente en % :	
Sommet de colline : oui non <input checked="" type="checkbox"/> Proximité d'un changement de pente : oui non <input checked="" type="checkbox"/>	
Divers :	
Largeur de rue : <u>Piazza ± 25M .</u>	
EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE : <u>A</u> B C D E F	

FIGURE 50 – Fiche 10 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. Sources : Plattard, O., 2016.



11

Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016	
<b>LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?</b> PIAZZA DUOMO Rue : <i>Piazza Duomo</i> Bâtiment : <i>Via Scarpino Landola</i>	
<b>CARACTERISTIQUES GENERALES :</b> Nature de l'occupation : <i>Magasin Rdc + Habitation</i> Surface au sol (m <sup>2</sup> ) : <i>± 140 m<sup>2</sup></i> Nombre de niveaux : <i>3</i> Type de toiture du dernier niveau : <i>dalle béton charpente bois charpente acier</i> Type de construction : <i>Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / moellons + mortier</i> / Autre : Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) : <i>≠ MATERIAUX et date de construction!</i>	
<b>PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEEVEE) :</b> RdC R + 1 2 3 	
<b>FACTEURS DE VULNERABILITE :</b> <b>1 Construction</b> Forme en plan : sym. 2 axes sym. 1 axe <u>pas de sym.</u> régulière <u>irrégulière</u> élancement : <input checked="" type="checkbox"/> Forme en élévation : régulière <u>irrégulière</u> très irrégulière niveaux en retrait <input checked="" type="checkbox"/> niveaux en saillie <input checked="" type="checkbox"/> Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non <input checked="" type="checkbox"/> Niveaux non contreventés (?) Niveaux souples modérés (?) importants ( ) Asymétrie marquée du contreventement (torsion) <u>oui</u> non Absence d'encadrement des trumeaux : <u>oui</u> non ? Absence d'encadrement des baies : oui non ? Poteau court : oui non ? Poteau élancé : oui non Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : <u>oui</u> non Porte-à faux importants : oui non Edicules élancés : <u>oui</u> non Masses importantes en hauteur : oui non Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm <u>oui</u> non Etat de conservation de la structure : bon normal <u>mauvais</u> Surélévations prévisibles : <u>oui</u> non Divers : <i>Bâtiment semble fait de ≠ matériaux, époque...</i>	
<b>2 Nature du sol / orographie + rue</b> Période propre du sol : <i>0,15</i> Période propre du bâtiment : <i>0,15</i> Risque de résonance : faible modéré <u>élevé</u> Pente en % : Sommet de colline : oui <u>non</u> Proximité d'un changement de pente : oui <u>non</u> Divers : Largeur de rue : <i>début Piazza Duomo ± 5,6 M.</i>	
<b>EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE :</b> A B C D E F	

FIGURE 51 – Fiche 11 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo.  
 Sources : Plattard, O., 2016.

12

Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016			
LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ? <b>PIAZZA DUOMO</b>			
Rue : <b>Piazza Duomo</b> Bâtiment : <b>&amp; Via Saavepro Landela .</b>			
CARACTERISTIQUES GENERALES :			
Nature de l'occupation : <b>Magasin + Habitation</b>		- <b>POST 1693</b> -	
Surface au sol (m²) : <b>±300m²</b>	Surface habitable (m²) <b>±1000m²</b>		
Nombre de niveaux : <b>3/4</b>	Hauteur (m) : <b>±16M</b>		
Type de toiture du dernier niveau : dalle béton / <u>charpente bois</u> / charpente acier			
Type de construction : Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / <u>moellons + mortier</u> / Autre :			
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) : <b>FAÇADE péno avec + matériaux dernière .</b>			
PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :			
RdC	R + 1 2 3	Façade rue	Autre élévation
Références des photos :			
FACTEURS DE VULNERABILITE :			
<b>1 Construction</b>			
Forme en plan : sym. 2 axes / sym. 1 axe / <u>pas de sym.</u> / régulière / <u>irrégulière</u> / élancement : <input checked="" type="checkbox"/>			
Forme en élévation : <u>régulière</u> / irrégulière / <u>très irrégulière</u> / niveaux en retrait <input checked="" type="checkbox"/> / niveaux en saillie <input checked="" type="checkbox"/>			
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui / non <input checked="" type="checkbox"/>			
Niveaux non contreventés <input checked="" type="checkbox"/> / Niveaux souples modérés <input checked="" type="checkbox"/> / importants <input checked="" type="checkbox"/>			
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : <u>oui</u> / non			
Absence d'encadrement des trumeaux : oui / non <input checked="" type="checkbox"/> / Absence d'encadrement des baies : <u>oui</u> / non ?			
Poteau court : <u>oui</u> / non / Poteau élancé : oui / non <input checked="" type="checkbox"/> / Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : <u>oui</u> / non			
Porte-à faux importants : oui / non <input checked="" type="checkbox"/> / Edicules élancés : oui / non <input checked="" type="checkbox"/> / Masses importantes en hauteur : oui / non <input checked="" type="checkbox"/>			
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : <u>oui</u> / non			
Etat de conservation de la structure : bon / normal / <u>mauvais</u>			
Surélévations prévisibles : oui / non <input checked="" type="checkbox"/>			
Divers : <b>Façade entretenu mais + constructions sur cour dont des mal entretenues</b>			
<b>2 Nature du sol / orographie + rue</b>			
Période propre du sol : <b>0,15</b> / Période propre du bâtiment : <b>0,15s</b> / Risque de résonance : faible / modéré / <u>élevé</u>			
Pente en % :			
Sommet de colline : oui / non <input checked="" type="checkbox"/> / Proximité d'un changement de pente : oui / non <input checked="" type="checkbox"/>			
Divers :			
Largeur de rue : <b>Via Saavepro Landela ±5m .</b>			
EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE : A B C D E F			

FIGURE 52 – Fiche 12 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. Sources : Plattard, O., 2016.

13

**Fiche de diagnostic – Syracuse – Juillet 2016**

**LOCALISATION : QUELLE ZONE REFUGE ?** *PIAZZA DUOMO*  
Rue : *Piazza Duomo* Bâtiment : *Piazza Minerva*

**CARACTERISTIQUES GENERALES :**

Nature de l'occupation : *Hotel de ville* *1780 - POST 1693 - + XIX<sup>e</sup>?*  
Surface au sol (m<sup>2</sup>) : *± 500 m<sup>2</sup>* Surface habitable (m<sup>2</sup>) : *± 1500 m<sup>2</sup>*  
Nombre de niveaux : *3 en façade - 4/5m cour* Hauteur (m) : *± 21 m*  
Type de toiture du dernier niveau : *dalle béton / charpente bois / charpente acier* *terrasse + charpente*  
Type de construction : *Ossature BA avec remplissage / Maçonnerie chaînée / moellons + mortier / Autre : BA*  
Type des blocs de maçonnerie (nature, dimensions) : *façade ancienne en pierre + extension en BA.*

**PLANS ET ELEVATIONS (CROQUIS A MAIN LEVEE) :**

RdC                      R + 1 2 3                      Façade rue                      Autre élévation

*PIAZZA DUOMO*

*PIAZZA MINERVA*

Références des photos : *Diomo*

**FACTEURS DE VULNERABILITE :**

**1 Construction**

Forme en plan : sym. 2 axes    sym. 1 axe    pas de sym.    régulière irrégulière    élancement : *1/2?*  
Forme en élévation : régulière *façade* irrégulière *cour* très irrégulière    niveaux en retrait (X)    niveaux en saillie (X)  
Diaphragmes endommagés ou affaiblis par grandes trémies : oui non (?)  
Niveaux non contreventés (X)    Niveaux souples modérés (?) importants (X)  
Asymétrie marquée du contreventement (torsion) : oui non ?  
Absence d'encadrement des trumeaux : oui non (?)    Absence d'encadrement des baies : oui non (?)  
Poteau court : oui non    Poteau élancé : oui non    Liaisons précaires entre éléments ou baïonnettes : oui non  
Porte-à faux importants : oui non    Edicules élancés : oui non    Masses importantes en hauteur : oui non  
Bâtiment mitoyen sans joint vide ou avec joint vide < 4 cm : oui non  
Etat de conservation de la structure : bon normal mauvais  
Surélévations prévisibles : oui non ?  
Divers : *≠ époque construction - Pierre + BA + terrasse sur partie ancienne*

**2 Nature du sol / orographie + rue**

Période propre du sol : *0,15*    Période propre du bâtiment : *0,25*    Risque de résonance : faible modéré élevé  
Pente en % :  
Sommet de colline : oui non    Proximité d'un changement de pente : oui non  
Divers :  
Largeur de rue : *Piazza Duomo ± 23m Piazza Minerva ± 13m*

**EVALUATION DE LA CLASSE DE VULNERABILITE : A B C D E F**

FIGURE 53 – Fiche 13 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo.  
Sources : Plattard, O., 2016.



---

## RÉSULTATS DES SIMULATIONS DU MODÈLE STEP

---



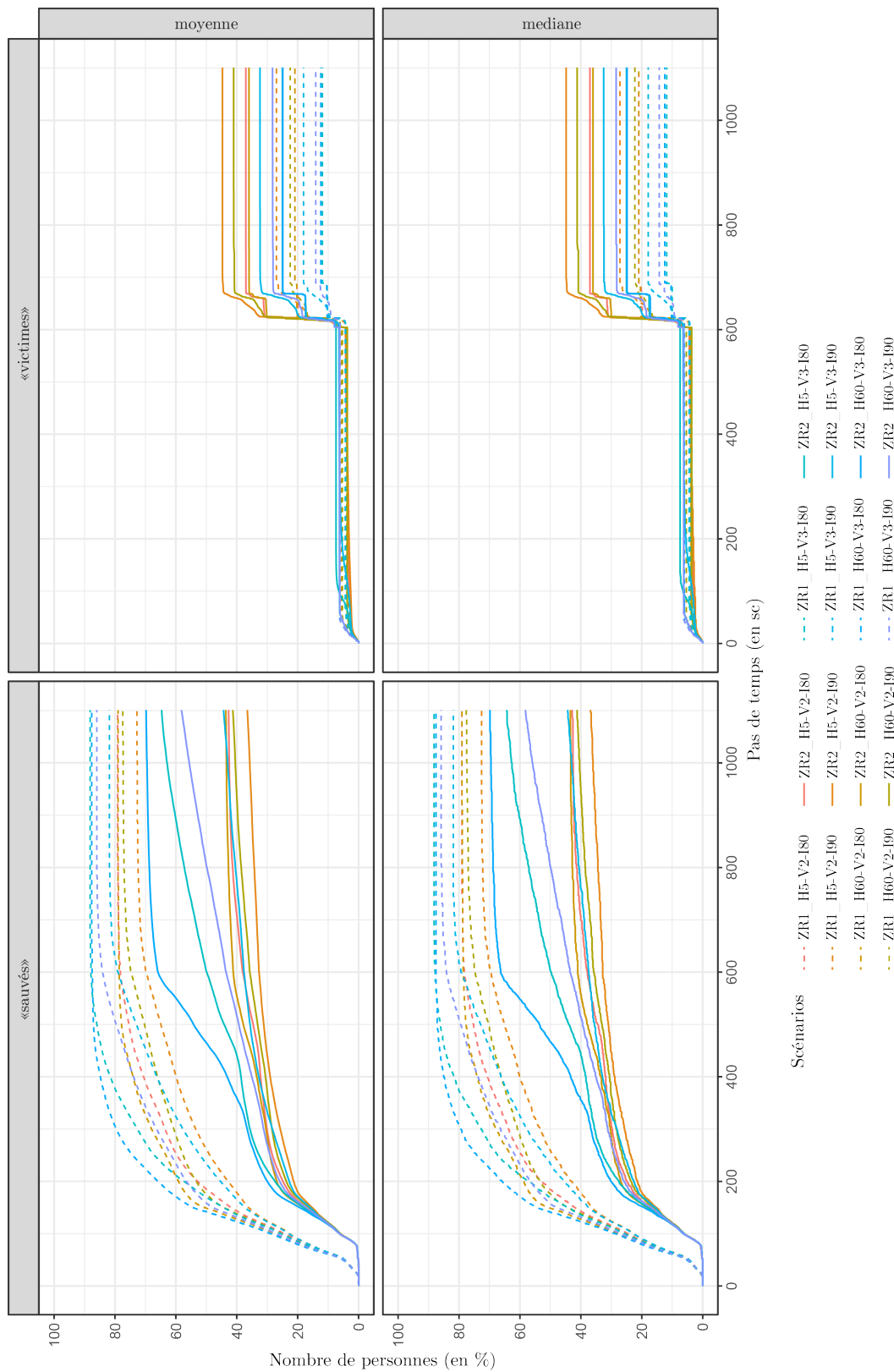


FIGURE 54 – Evolution des moyennes et médianes du nombre de "sauvés" et de "victimes" en fonction du pas de temps pour chaque scénario.

Réalisation : Plattard, O., 2019.

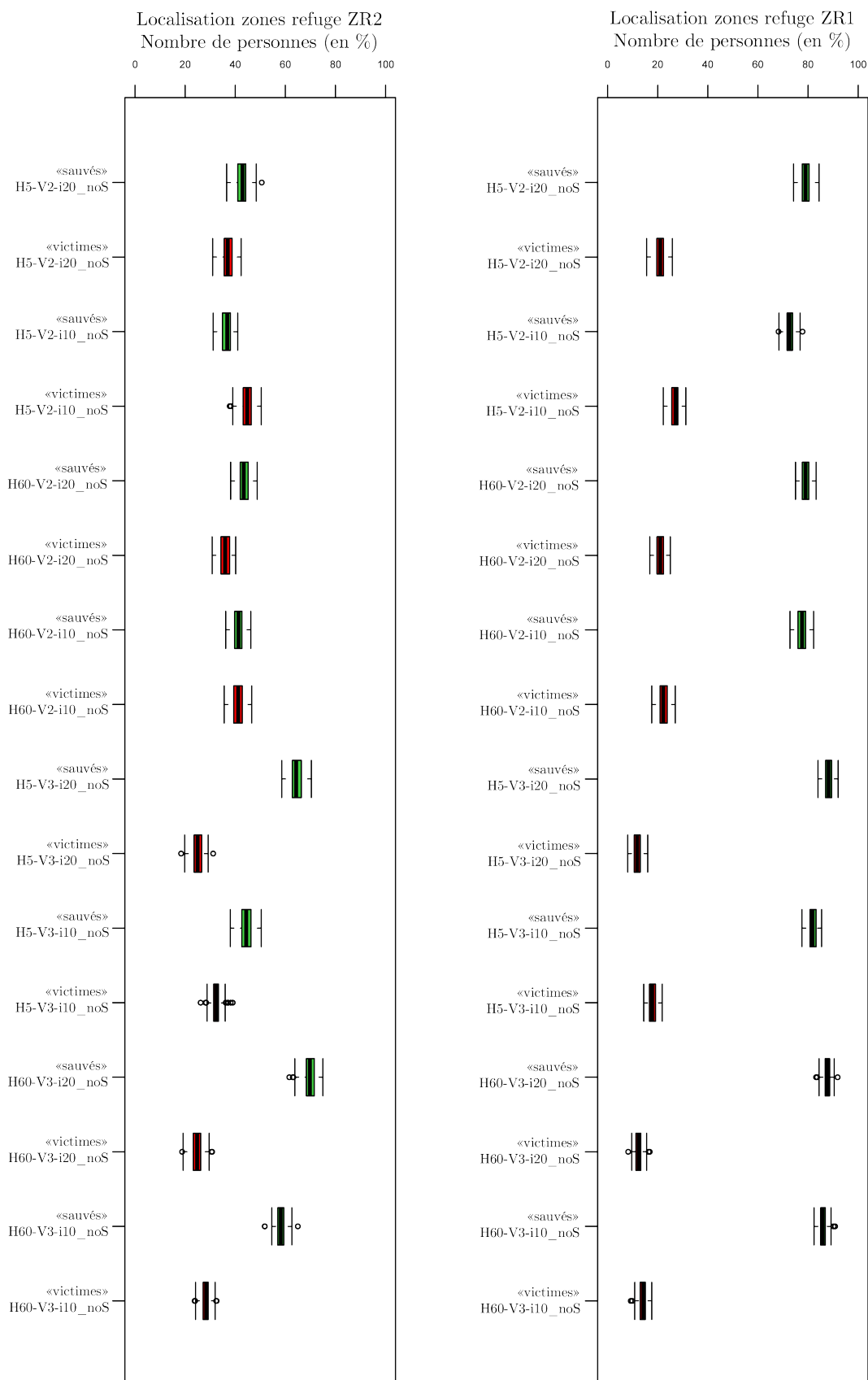


FIGURE 55 – Distributions des "victimes" et des "sauvés" selon l'ensemble des scénarios par localisation des zones refuge.

Réalisation : Plattard, O., 2019.

ANNEXE . FICHES DE DIAGNOSTIC

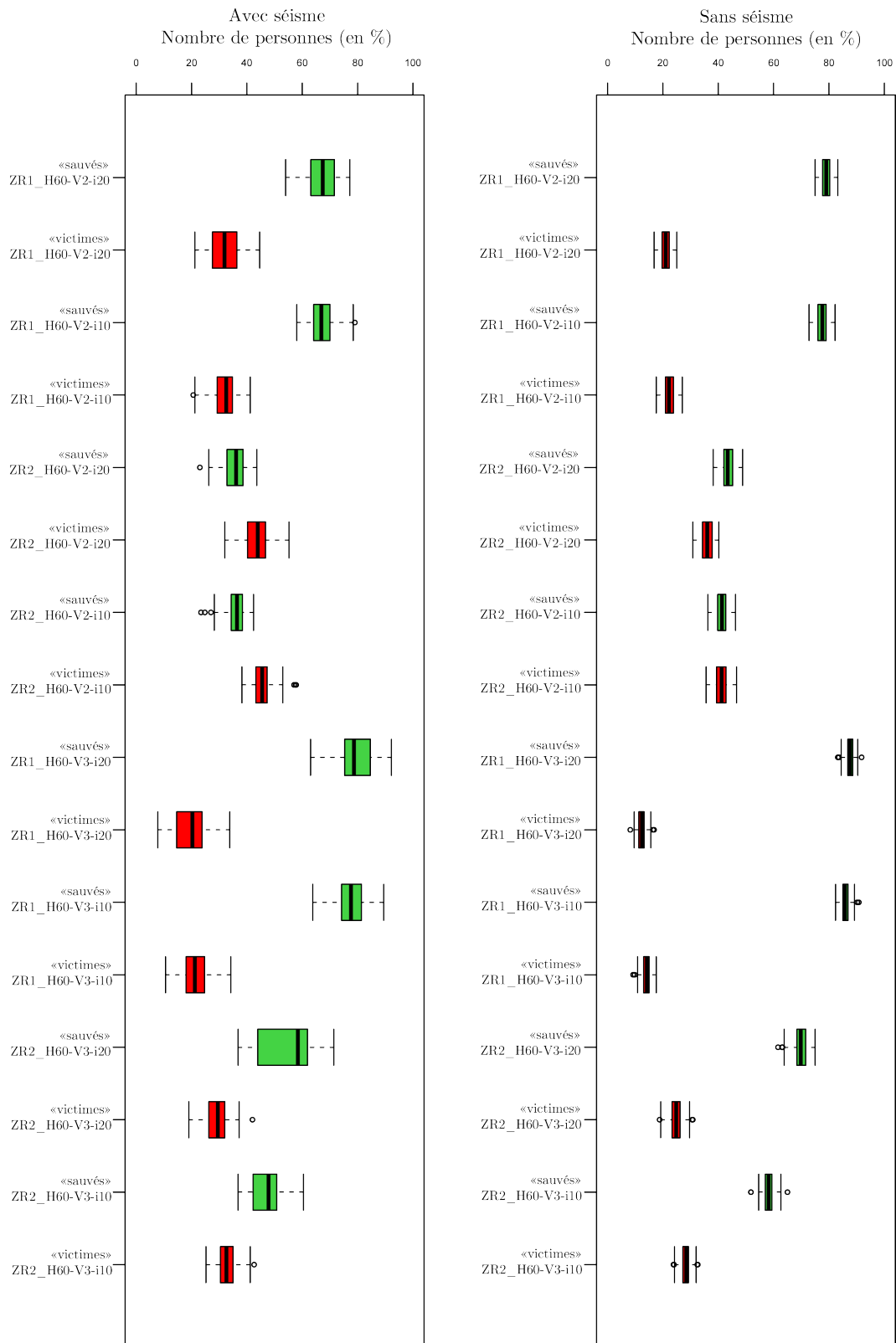


FIGURE 56 – Distributions des "victimes" et des "sauvés" selon l'ensemble des scénarios avec ou sans séisme.

Réalisation : Plattard, O., 2019.



FIGURE 57 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Vision 2, ZR1, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 20%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



FIGURE 58 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Vision 2, ZR1, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 10%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



FIGURE 59 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Vision 2, ZR1, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 10%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



FIGURE 60 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Séisme, vision 2, ZR1, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 20%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



FIGURE 61 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Séisme, vision 2, ZR1, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 10%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



FIGURE 62 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Vision 2, ZR2, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 20%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



FIGURE 63 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Vision 2, ZR2, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 10%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



FIGURE 64 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Séisme, vision 2, ZR2, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 20%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.





FIGURE 65 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Vision 3, ZR1, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 20%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



FIGURE 66 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Vision 3, ZR1, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 10%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.





FIGURE 67 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Séisme, vision 3, ZR1, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 20%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



FIGURE 68 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Séisme, vision 3, ZR1, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 10%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



FIGURE 69 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Vision 3, ZR2, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 20%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



FIGURE 70 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Vision 3, ZR2, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 20%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



FIGURE 71 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Séisme, vision 3, ZR2, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 20%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.



FIGURE 72 – Carte du nombre de passages d’agents par cellule. Séisme, vision 3, ZR2, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 10%.

Réalisation : Chalonge, L. et Plattard, O., 2019.

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

- ADAM C., TAILLANDIER F., DELAY E., PLATTARD O. et TOUMI M. (2016). SPRITE - Participatory simulation for raising awareness about coastal flood risk on the Oleron island. *Information systems for crisis response and management in Mediterranean Countries, ISCRAM-Med 2016, Lecture Notes in Business Information Processing*, vol.265, pp. 33–46.
- ALASSET P.-J., HEBERT H., MAOUCHE S., CALBINI V. et MEGHRAOUI M. (2006). The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake (Mw = 6.9, Algeria) : modelling and results. *Geophysical Journal International*, vol.166, pp. 213–226.
- ARGNANI A., ARMIGLIATO A., PAGNONI G., ZANIBONI F., TINTI S. et BONAZZI C. (2012). Active tectonics along the submarine slope of south-eastern Sicily and the source of the 11 January 1693 earthquake and tsunami. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol.12, pp. 1311–1319.
- ARIKAWA T. (2009). Structural behavior under impulsive tsunami loading. *Journal of disaster research*, vol.4, no.6, pp. 377–381.
- BALANDIER P. (2004). *Sismologie appliquée, à l'usage des architectes et ingénieurs, cahier 4*. Conception parasismique, Conception, vulnérabilité, urbanisme et sismologie. les Grands ateliers de L'Isle-d'Abeau, Villefontaine.
- BANOS A., LANG C. et MARILLEAU N. (2015). *Simulation spatiale à base d'agents avec Netlogo 1. Introduction et bases*. ISTE Editions.
- BANOS A. et SANDERS L. (2013). *Modéliser et simuler. Epistémologies et pratique de la modélisation et de la simulation. dir. Varenne, F. and Silberstein, M.*, volume 1, chapitre Modéliser et simuler les systèmes spatiaux en géographie., pp. 833–863. Matériologiques.

## BIBLIOGRAPHIE

- BANTEGNIE M. (2015). Le risque de tsunami sur le littoral azuréen : Contribution méthodologique pour la détermination de sites refuges en cas de submersion marine par tsunami d'origine sismique. Mémoire de D.E.A., Institut de Géographie Alpine – Grenoble.
- BARD P.-Y. (2002). Les effet de site de la cuvette grenobloise. *Risques info Institut des Risques Majeurs (IRMa)*, no.13.
- BÉCU N., AMBLARD F., BRAX N., GAUDOU B. et MARILLEAU N. (2015). *Simulation spatiale à base d'agents avec Netlogo 1. Introduction et bases*, dir. Banos, A. and Lang, Ch. and Marilleau, N., chapitre Vers des modèles multi-acteurs, pp. 201–225. ISTE Editions.
- BETHOUX N., FRÉCHET J., GUYOTON F., THOUVENOT F., CATTANEO M., EVA C., NICOLAS M. et M. G. (1992). A closing Ligurian Sea? *Pure and Applied Geophysics*, vol.139, no.2, pp. 179–194.
- BOLTON P. A. (2007). Managing pedestrians during evacuation of metropolitan areas. *Federal Highway Administration*.
- BOUQUET F., CHIPEAUX S., LANG C., MARILLEAU N., NICOD J.-M. et TAILLANDIER P. (2015). *Simulation spatiale à base d'agents avec Netlogo 1. Introduction et bases*, dir. Banos, A. and Lang, Ch. and Marilleau, N., chapitre Introduction à l'approche agent, pp. 16–36. ISTE Editions.
- BRYANT E. (2008). *Tsunami : the underrated hazard*. Springer, 2nd Édition.
- CARRASCO T. et CIREAU B. (2014). *Contribution à la planification des évacuations en cas d'alerte tsunami sur les villes de Tanger et Syracuse*. Mémoire Master, Montpellier 3.
- CETE MÉDITERRANÉE (DREC/SVGC-SIG) (2008). Comparaison de méthodes qualitatives d'évaluation de la vulnérabilité des constructions aux séismes - Plan séisme - Action 2.4.7. guide des méthodes de diagnostics de la résistance des bâtiments aux séismes. p. 164.
- CLERVEAUX V. I., KATADA T. et HOSOI K. (2008). Tsunami scenario simulator : A tool for ensuring effective disaster management and coastal evacuation in a multilanguage society. *Science of Tsunami Hazards*, vol.27, no.3, pp. 48–71.
- COMITÉ RÉGIONAL DU TOURISME CÔTE D'AZUR (2014). Rapport d'activités 2014.
- COMMUNE DE SAINT-LAURENT-DU-VAR (2011). DICRIM, Document d'Information Communale sur les Risques Majeurs.
- COMMUNE DE SAINT-LAURENT-DU-VAR (21 juin 2013). Plan Local d'Urbanisme.
- CORSON N. et OLIVIER D. (2015). *Simulation spatiale à base d'agents avec Netlogo 1. Introduction et bases*, dir. Banos, A. and Lang, Ch. and Marilleau, N., chapitre Systèmes dynamiques avec Netlogo, pp. 164–199. ISTE Editions.

- CRISTOFOL A. et BORDIN P. (2013). Measuring the geographical isolation of urban areas : definition and application of an indicator of confinement by surfaces ratio (CSR). *European Colloquium of Theoretical and Quantitative Geography*.
- CZURA G., TAILLANDIER P., TRANOUEZ P. et DAUDÉ . (2015). *Proceedings of the International Conference on Social Modeling and Simulation, plus Econophysics Colloquium 2014. dir. Takayasu, H. and Ito, N. and Noda, I. and Takayasu, M.*, chapitre MOSAIIC : City-Level Agent-Based Traffic Simulation Adapted to Emergency Situations, pp. 265–274. Springer.
- DALTON R. (2003). The secret is to follow your nose : Route path selection and angularity. *Environment and Behavior*, vol.35, no.1, pp. 107–131.
- DAUDÉ E. (2013). *Systèmes multi-agents pour la simulation en géographie : vers une Géographie Artificielle*. Modélisation en Géographie : déterminismes et complexités. Hermès Édition.
- DAUPHINÉ A. et PROVITOLO D. (2013). *Risques et Catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Collection U, Géographie. Paris, Armand Colin Édition.
- DÉCRET NO 2010-1254 (24 octobre 2010). *du 22 octobre 2010 relatif à la prévention du risque sismique, Journal Officiel de la République Française No 0248*.
- DE MARTINI P. M., BARBANO M., SMEDILE A., GERARDI F., PANTOSTI D., DEL CARLO P. et PIRROTTA C. (2010). Active tectonics along the submarine slope of south-eastern Sicily and the source of the 11 January 1693 earthquake and tsunami. *Marine Geology*, vol.276, pp. 42–57.
- DELAHAYE D. (2005). Modelling the watershed as a complex spatial system : A review. *The Modeling Process in Geography. From Determinism to Complexity*, pp. 191–213.
- D'ERCOLE R. (1994). Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologies, modes d'analyse. *Revue de Géographie Alpine*, vol.LXXXII, no.4.
- DEWI R. S. (2012). A GIS Based Approach of an Evacuation Model for Tsunami Risk Reduction. *Journal of Integrated Disaster Risk Management*, vol.2, no.2, pp. 1–32.
- DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SÉCURITÉ CIVILE ET DE LA GESTION DES CRISES (2013). Alerte et Inofrmation des populations, guide ORSEC. *Ministère de l'intérieur, Tome G4*.
- DJAMENT-TRAN G. et REGHEZZA-ZITT M. (2012). *Résilience urbaines. Les villes face aux catastrophes*. Fronts pionniers. Paris, le manuscrit Édition.
- DOGULU N., KARANCI N. et LAVIGNE F. (2014). Deliverable D9.2 - Review of the existing work on tsunami resilient communities and identification of key indicators and gaps. *Assessment, STrategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe (ASTARTE) - METU*.

## BIBLIOGRAPHIE

- DOUVINET J. (2008). *Les bassins versants sensibles aux « crues rapides » dans le Bassin Parisien – Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes*. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie. 381 P.
- DROGOUL A., TREUIL J.-P. et ZUCKER J.-D. (2008). *Modélisation et simulation à base d'agents. Exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Sciences sup informatique. Dunod.
- DUBOS-PAILLARD E., GUERMOND Y. et LANGLOIS P. (2003). Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire. le modèle spacelle. *Espace géographique*, vol.32, no.4, pp. 357–378.
- EUROCODE 8 (mars 2003). Conception et dimensionnement des structures pour la résistance aux séismes et document d'application nationale. *Normalisation Française - AFNOR*, no.XP ENV 1998-1-3.
- EVA C. et RABINOVICH A. (1997). The february 23, 1887 tsunami recorded on the Ligurian coast, western Mediterranean. *Geophysical Research Letters*, vol.24, no.17, pp. 2211–2214.
- EWING R. et HANDY S. (2009). Measuring the unmeasurable : urban design qualities related to walkability. *Journal of Urban Design*, vol.14, no.1, pp. 65–84.
- FERBER J. (1995). *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. InterEditions, coll. Informatique, Intelligence Artificielle. 513 P.
- FOLTETE J.-C. et PIOMBINI A. (2007). Urban layout, landscape features and pedestrian usage. *Landscape and Urban Planning*, vol.81, no.3, pp. 225–234.
- FRASER S. A., WOOD N. J., JOHNSTON D., LEONARD G. S., GREENING P. D. et ROSSETTO T. (2014). Variable population exposure and distributed travel speeds in least-cost tsunami evacuation modelling. *Natural Hazards and Earth System Science*, vol.14.
- FRITZ H., MOHAMMED F. et YOO J. (2009). Lituya Bay landslide impact generated mega-tsunami 50th anniversary. In P.R. CUMMINS, K. SATAKE et L.S.L. KONG. *Tsunami Science Four Years after the 2004 Indian Ocean Tsunami*. Birkhäuser Basel, pp. 153–175.
- FRITZ H., PHILLIPS D. A., OKAYASU A., T. S., LIU H., MOHAMMED F., SKANAVIS V., SYNOLAKIS C. E. et TAKAHASHI T. (2012). The 2011 Japan tsunami current velocity measurements from survivor videos at Kesennuma Bay using LiDAR. *Geophysical Research Letters*, vol.39.
- FUJIOKA M., ISHIBASHI K., KAJI H. et TSUKAGOSHI I. (2002). Multi agent simulation model for evaluating evacuation management system against tsunami disaster. *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering*, vol.562, pp. 231–236.

- GAILLER A., HÉBERT H., LOEVENBRUCK A. et HERNANDEZ B. (2013). Simulation systems for tsunami wave propagation forecasting within the French tsunami warning center. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol.13, pp. 2465–2482.
- GAILLER A., MONNIER A., FONTAINE A., LOEVENBRUCK A. et LAVIGNE F. (2016). Deliverable D10.48 - Lessons learned on the Astarte test sites. *Assessment, Strategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe (ASTARTE)*.
- GALLAIS F., GRAINDORGE D. et GUTSCHER M. A. (2014). Propagation of a lithospheric tear fault (STEP) through the western boundary of the Calabrian accretionary wedge offshore eastern Sicily (southern Italy). *Technophysics*, vol.610, pp. 200–203.
- GALLAIS F., GRAINDORGE D., GUTSCHER M. A. et KLAESCHEN D. (2013). Propagation of a lithospheric tear fault (STEP) through the western boundary of the Calabrian accretionary wedge offshore eastern Sicily (southern Italy). *Technophysics*, vol.602, pp. 141–152.
- GARDNER M. (1970). Mathematical games. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". *Scientific American*, vol.223, pp. 120–123.
- GEHL J. et GEMZØE L. (1996). *Public spaces, public life*. Danish Architectural Press and the Royal Danish Academy of Fine Arts, School of Architecture, Copenhagen.
- GENRE-GRANDPIERRE C. et FOLFÊTE J.-C. (2003). Morphologie urbaine et mobilité en marche à pied. *Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, pp. 1–22.
- GOELDNER-GIANELLA L., GRANCHER D., ANSELME B., ROBERTSEN O., LAVIGNE F., BONNEVIE HARBITZ C. et GRONAS H. (2017). Perceptions and behaviours towards the risk of tsunami in a context of high-level risk assessment and management : the case of the Lyngen fjord in Norway. *Journal of environmental disasters*, vol.4, no.7.
- GOLLEDGE R. G. (1997). *Spatial behavior : A geographic perspective*. Guilford Press, New York.
- GOLLEDGE R. G. (1999). *Human wayfinding and cognitive maps. Wayfinding behavior : Cognitive mapping and other spatial processes*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- GONZALEZ F. (1999). Tsunami! *Scientific American*, vol.280, no.5, pp. 44–55.
- GONZALEZ-RIANCHO P., AGUIRRE-AYERBE I., ANIEL-QUIROGA I., ABAD S., GONZALEZ M., LARREYNAGA J., GAVIDIA F., GUTIERREZ O., ALVAREZ-GOMEZ J. et MEDINA R. (2013). Tsunami evacuation modelling as a tool for risk reduction : application to the coastal area of El Salvador. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, no.13, pp. 3249–3270.



## BIBLIOGRAPHIE

- GRÜNTAL G. (2001). *L'Echelle Macrosismique Européenne 1998*, volume 19 de *Cahier du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*. Conseil de l'Europe, Luxembourg.
- GUEGUEN P. et COLOMBI A. (2016). Experimental and numerical evidence of the clustering effect of structures on their response during an earthquake : A case study of three identical towers in the city of Grenoble, France. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.106, no.6.
- HAGGETT P. (1965). *Locational Analysis in Human Geography*. Arnold, Londres.
- HANKA W., SAUL J., WEBER B., BECKER J. et HARJADI P. (2010). Real-time earthquake monitoring for tsunami warning in the Indian Ocean and beyond. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol.26, no.10, pp. 11–22.
- HELBING D. et BALIETTI S. (2011). How to do agent-based simulations in the future : From modeling social mechanisms to emergent phenomena and interactive systems design. *Chapter "Agent-Based Modeling" of the book "Social Self-Organization"*, pp. 25–70.
- HELBING D., BUZNA L., JOHANSSON A. et WERNER T. (2005). Self-organized pedestrian crowd dynamics : Experiments, simulations, and design solutions. *Transportation Science*, vol.39, no.1, pp. 1–24.
- HILLIER B. (1996, 2007). *Space is the machine : a configurational theory of architecture*. Space Syntax, Londres.
- HILLIER B. et HANSON J. (1984). *The social logic of space*. Space Syntax, Londres.
- HILLIER B. et IIDA S. (2005). Network and psychological effects in urban movement. *Spatial information theory*, pp. 475–490.
- HILLIER B., LEAMAN A., STANSALL P. et BEDFORD M. (1976). Space syntax. *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol.2, no.3, pp. 147–185.
- HILLIER B., PENN A., HANSON J., GRAJEWSKI T. et XU J. (1993). Natural movement-or, configuration and attraction in urban pedestrian movement. *Environ Plann B*, vol.1, no.20, pp. 29–66.
- HILLIER B. et VAUGHAN L. (2007). The city as one thing. *Progress in Planning*, vol.3, no.67, pp. 205–230.
- IMAMURA F. (2009). Dissemination of information and evacuation procedures in the 2004–2007 tsunamis, including the 2004 Indian Ocean. *Journal of Earthquake and Tsunami*, vol.3, no.2, pp. 59–65.
- IMAMURA F., MUHARI A., MAS E., PRADONO M. H., POST J. et SUGIMOTO M. (2012). Tsunami disaster mitigation by integrating comprehensive countermeasures in Padang City, Indonesia. *Journal of Disaster Research*, vol.7, no.1, pp. 48–64.

- IMAMURA F., SUZUKI T. et TANIGUCHI M. (2001). Development of a simulation method for the evacuation from the tsunami and its application to Aonae, Okushiri Is., Hokkaido. *Journal of Japan Society for Natural Disaster Science*, vol.20, no.2, pp. 183–195.
- IMAMURA F., YALCINER A. et OZYURT G. (2006). Tsunami modelling manual (TUNAMI model).
- IOC-UNESCO (2008). *Commission océanographique intergouvernementale, Guide d'information à l'intention des responsables de la planification en cas de catastrophe*. No.s 49 de Manuels et guides. Paris, UNESCO Édition.
- IOC-UNESCO (2013). *Commission océanographique intergouvernementale, Glossaire sur les tsunamis*. No.s 85 de Série technique. Paris, UNESCO Édition.
- IOC-UNESCO (2014). *Commission océanographique intergouvernementale, International Tsunami Survey Team Post-Tsunami Survey Field Guide*, volume 37 de *Manuals and guides*. Paris, UNESCO Édition.
- IOUALALEN M., LARROQUE C. et SCOTTI O. (2013). Reappraisal of the 1887 Ligurian earthquake (western Mediterranean) from macroseismicity, active tectonics and tsunami modelling. *Geophysical Journal International*, vol.190, pp. 87–104.
- IOUALALEN M., LARROQUE C., SCOTTI O. et DAUBORD C. (2014). Tsunami mapping related to local earthquakes on the French-Italian Riviera (Western Mediterranean). *Pure and Applied Geophysics*, vol.171, pp. 1423–1443.
- JAKLE J., BRUNN S. et ROSEMAN C. (1985). *Human spatial behavior. A social geography*. Prospect Heights, Illinois, waveland press inc. Édition.
- JMA (2013). Japan Meteorological Agency, Lessons learned from the tsunami disaster caused by the 2011 Great East Japan Earthquake and improvements in JMA's tsunami warning system .
- KANELLOPOULOU D. (2015). *La marche plurielle. Aménagements, pratiques et expériences des espaces publics au centre d'Athènes*. Thèse de doctorat, Géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- KANSKY K. J. (1963). *Structure of transportation networks : relationships between network geometry and regional characteristics*. Thèse de doctorat, University of Chicago.
- KOSHIMURA S., OIE T., YANAGISAWA H. et IMAMURA F. (2009). Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia. *Coastal Engineering Journal*, vol.51, no.3, pp. 243–273.
- KREMER K., SIMPSON G. et GIRARDCLOS S. (2012). Giant Lake Geneva tsunami in AD563. *Nature Geosciences*, vol.5, pp. 756–757.

## BIBLIOGRAPHIE

- LABBÉ M., DONNADIEU C., DAUBORD C. et HÉBERT H. (2010). Refined numerical modeling of the 1979 tsunami in Nice (French Riviera) : comparison with coastal data (tide gages, inundation). *Journal of Geophysical Research*, pp. 1–15.
- LAGESSE C. (2015). *Lire les lignes de la ville. Méthodologie de caractérisation des graphes spatiaux*. Thèse de doctorat en géomatique - Physique, Paris 7 Diderot.
- LAMBERT J., TERRIER M. et PEDREROS R. (2013). L'évaluation du risque de tsunamis sur le littoral français. *Geosciences*, vol.17, pp. 54–63.
- LANGLOIS P. (2007). Fondements théoriques pour la simulation de systèmes complexes en géographie. Habilitation à diriger les recherches. Université de Rouen.
- LANGLOIS P. (2010). *Simulation des systèmes complexes en géographie. Fondements théoriques et applications*. Lavoisier.
- LANGLOIS P. et DELAHAYE D. (2002). Ruicells : automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface. *Revue Internationale de Géomatique*, vol.12, no.4, pp. 461–487.
- LARROQUE C., SCOTTI O. et IOUALALEN M. (2012). Reappraisal of the 1887 Ligurian earthquake (western Mediterranean) from macroseismicity, active tectonics and tsunami modelling. *Geophysical Journal International*, vol.190, no.1, pp. 87–104.
- LAVIGNE F. (2014). Deliverable D9.7 - Report on preparedness skills, resources and attitudes within the communities. *Assessment, Strategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe (ASTARTE) - CNRS*.
- LAVIGNE F. (2016). Deliverable D9.36 - Large scale accessibility mapping and evacuation simulations using GIS tools and Multi-Agent Systems. *Assessment, Strategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe (ASTARTE)*.
- LAVIGNE F. et PARIS R. (2011). *Tsunarisque. le tsunami du 26 décembre 2004 à Aceh, Indonésie*. Publications de la Sorbonne, Paris.
- 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. et FACHRIZAL (2009). Reconstruction of tsunami inland propagation on December 26, 2004 in Banda Aceh, through field investigations. *Pure and Applied Geophysics*, vol.166, no.13, pp. 259–281.
- LAVIGNE F. et SAHAL A. (2012). PREPARTOI. *Fondation MAIF*.
- LE CORBUSIER (2011). *Urbanisme*. Flammarion, Paris. 1ère Ed. 1924.
- LE ROY S., MONFORT D. et PEDREROS R. (2012). Projet ALDES : Simulations numériques de tsunamis en Méditerranée Occidentale - rapport BRGM-RP-61473-FR.

- LEON J. et MARCH A. (2014). Urban morphology as a tool for supporting tsunامي rapid resilience : A case study of Talcahuano, Chile. *Habitat International*, vol.43, pp. 250–262.
- LEONE F., PEROCHÉ M., LAGAHE E., GHERARDI M., SAHAL A., VINET F., HACHIM S. et LAVIGNE F. (2013). Modélisation de l'accessibilité territoriale pour l'aide à la gestion de crise tsunami (Mayotte, France). *Annales de géographie*, vol.5, no.693, pp. 502–524.
- LEONE F., PÉROCHÉ M. et GUTTON R. (2014). Le risque tsunami en Martinique : planifier une évacuation préventive en optimisant l'accessibilité de sites refuges. *Vertigo - la revue électronique en science de l'environnement*, vol.14, no.2. doi : 10.4000/vertigo.15046.
- LEONE F., VINET F., DEMAIN J.-C. et BACHRI S. (2007). Développement d'une méthodologie d'analyse spatiale des destructions consécutives au tsunami du 26 décembre 2004 (Banda Aceh, Indonésie). *Geocarrefour*, vol.82/1-2, pp. 77–90. doi : 10.4000/geocarrefour.1501.
- LÄMMEL G., RIESER M., NAGEL K., TAUBENBÖCK H., STRUNZ G., GOSEBERG N., SCHLURMANN T., KLÜPFEL H., SETIADI N. et BIRKMANN J. (2010). Emergency preparedness in the case of a tsunami - evacuation analysis and traffic optimization for the Indonesian city of Padang. In W. W. F. KLINGSCH, C. ROGSCHE, A. SCHADSCHNEIDER, and M. SCHRECKENBERG (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer, pp. 171–182.
- LOCATI M., CAMASSI R., ROVIDA A., ERCOLANI E., BERNARDINI F., CASTELLI V., CARRACCIOLLO C., TERTULLIANI A., ROSSI A., AZZARO R., D'AMICO S., CONTE S. et ROCCHETTI E. (2016). DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- LORITO S., TIBERTI M. M., BASILI R., PIATANESI A. et VALENSISE G. (2008). Earthquake-generated tsunamis in the Mediterranean Sea : Scenarios of potential threats to Southern Italy. *Journal of geophysical research*, vol.113, pp. B01301,.
- LYNCH K. (1959). A walk around the block. *Landscape*, vol.8, no.3, pp. 24–34.
- LYNCH K. (1960). *The Image of the city*. The M.I.T. Press, USA.
- MARCHAND B. (1974). Pedestrian traffic planning and the perception of the urban environment : a french example. *Environment and Planning A*, vol.6, no.5, pp. 491–507.
- MAS E., ADRIANO B. et KOSHIMURA S. (2012a). An integrated simulation of tsunami hazard and human evacuation in La Punta, Peru.
- MAS E., IMAMURA F. et KOSHIMURA S. (2012b). An agent-based model for the tsunami evacuation simulation. a case study of the 2011 Great East Japan tsunami in Arahama town. Tokyo, Japan.

## BIBLIOGRAPHIE

- MAS E., KOSHIMURA S., IMAMURA F., SUPPARSI A., MUHARI A. et ADRIANO B. (2015). Recent advances in agent-based tsunami evacuation simulations : case studies in Indonesia, Thailand, Japan and Peru. *Pure and Applied Geophysics*, vol.172, no.12, pp. 3409–3424. doi : 10.1007/s00024-015-1105-y.
- MAS E., SUPPASRI A., IMAMURA F. et KOSHIMURA S. (2012c). Agent-based simulation of the 2011 Great East Japan earthquake/tsunami evacuation : An integrated model of tsunami inundation and evacuation. *Journal of Natural Disaster Science*, vol.34, no.1, pp. 41–57.
- MATEO-BABIANO I. B., HITOSHI I. et ENG D. (2010). Sidewalk sustainability through need-assessment of street users in asian cities. *12th World Conference on Transport Research (WCTR 2010)*, pp. 1–19.
- MATEO-BABIANO I. et IEDA H. (2005). Street space renaissance : A spatio-historical survey of two asian cities. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol.6, pp. 4317–4332.
- MATHIAN H. et SANDERS L. (2014). *Objets géographiques et processus de changement. approches spatio-temporelles*. ISTE Editions.
- MAYAGUEZZ H. (2015). *Exposition humaine, analyse et renforcement des capacités d'évacuation face aux tsunamis à Padang (Indonésie)*. Thèse de doctorat en géographie, Université de La Rochelle.
- MILLER D. (1960). Giant waves in Lituya Bay, Alaska. *U.S. Geological Survey Publication*, vol.354-C, pp. 51–86.
- MINISTRY OF THE INTERIOR FINLAND (2002). L'information du public – systèmes d'alerte et d'alarme - rapport. *European Commission*.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT (janvier 2011). La nouvelle réglementation parasismique applicable aux bâtiments.
- MOFJELD H., SYMONS C., LONSDALE P., GONZÁLEZ F. et TITOV V. (2004). Tsunami scattering and earthquake faults in the deep Pacific Ocean. *Oceanography*, vol.17, no.1, pp. 38–46.
- MURAKAMI H., TAKIMOTO K. et POMONIS A. (2012). Tsunami evacuation process and human loss distribution in the 2011 Great East Japan earthquake—a case study of Natori city, Miyagi prefecture. *15th World Conference on Earthquake Engineering*.
- MURAKAMI H., YANAGIHARA S., GOTO Y., MIKAMI T., SATO S. et WAKIHAMA T. (2014). Study on casualty and tsunami evacuation behavior in Ishinomaki city - Questionnaire survey for the 2011 Great East Japan earthquake -. *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*.

- (NGDC/WDS)/NOAA (2016a). National Geophysical Data Center / World Data Service, Global Historical Tsunami Database. doi :10.7289/V5PN93H7.
- (NGDC/WDS)/NOAA (2016b). National Geophysical Data Center / World Data Service, Significant Earthquake Database. doi :10.7289/V5TD9V7K.
- NGUYEN T., ZUCKER J., NGUYEN M., DROGOUL A. et NGUYEN H. (2012). Simulation of emergency evacuation of pedestrians along the road networks in Nhatrang city. *IEEE*, pp. 1–6.
- OCCELLO M., KONING J.-L. et BAEIJIS C. (2001). Conception des systèmes multi-agents : quelques éléments de réflexion méthodologique. *Techniques et sciences informatiques*, vol.20, no.2, pp. 233–263.
- PAPARO M. A., ARMIGLIATO A., PAGNONI G., ZANIBONI F. et STEFANO T. (2017). Earthquake-triggered landslides along the Hyblean-Malta Escarpment (off Augusta, eastern Sicily, Italy) – assessment of the related tsunamigenic potential. *Advances in Geosciences*, vol.44, pp. 1–8.
- PEROCHE M. (2016). *La gestion de crise tsunami dans la Caraïbe : contribution géographique aux dispositifs d’alerte et d’évacuation des populations*. Thèse de doctorat en géographie, Université Montpellier 3 - Paul-Valéry.
- PIOMBINI A. (2006). *Modélisation des choix d’itinéraires pédestres en milieu urbain. Approche géographique et paysagère*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Franche-Comté.
- PORTA S., CRUCITTI P. et LATORA V. (2006). The network analysis of urban streets : a dual approach. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, vol.369, no.2, pp. 853–866.
- PROVITOLLO D., DUBOS-PAILLARD E., VERDIÈRE N., LANZA V., CHARRIER R., BERTELLE C. et AZIZ-ALAOUI M. (2015). Les comportements humains en situation de catastrophe : de l’observation à la modélisation conceptuelle et mathématique. *Cybergeo : European Journal of Geography*, pp. 853–866.
- REULIER R. (2015). *Structure paysagère et dynamiques spatiales des transferts hydro-sédimentaires Approche par simulation multi-agents*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Caen - Normandie, Caen.
- ROBERT S., SILLÈRE G. et LIZIARD S. (2008). Evaluer et représenter le nombre d’usagers sur une plage urbaine (Les Ponchettes, Nice). *M@ppemonde*, vol.91, no.08305.
- ROGER J. (2012). *Tsunamis générés par des séismes au niveau de la zone de collision entre les plaques africaine et eurasiennne : Etudes de cas pour l’évaluation du risque tsunami en Méditerranée occidentale et Atlantique nord*. Géophysique, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.

## BIBLIOGRAPHIE

- RUELLAN E., MANGIN A., MIGEON S., BETHOUX N., BUFFET G., DESCHAMPS A., DUBAR M., GARZIGLIA S., IOUALALAEN M., LANGLOIS R., LEGONIDEC Y., LEBOURG T., MASCLE J., MARECHAL M., NAULT L., RIBODETTI A., SAGE F., TREVISAN J., TRIC E., BONGIOVANNI E., DESTÉ J., LEFUR H., RIGAUD V. et OPDERBECKE J. (2006). GIS CURARE 2005-2007, Axe III – Mouvements du sol et instabilités gravitaires en mer. *CNRS, Rapport scientifique 2006*.
- SAADATSERESHT M., MANSOURIAN A. et TALEAI M. (2009). Evacuation planning using multi-objective evolutionary optimization approach. *European Journal of Operational Research*, vol.198, no.1, pp. 305–314.
- SAHAL A. (2011). *Le risque tsunami en France : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque*. Thèse de doctorat en géographie, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, Paris.
- SAHAL A. et LEMAHIEU A. (2011). The 1979 Nice airport tsunami : mapping of the flood in Antibes. *Natural Hazards : Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, vol.56, no.3, pp. 833–840.
- SAHAL A., LEONE F. et MATTHIEU P. (2013). Complementary methods to plan pedestrian evacuation of the French Riviera's beaches in case of tsunami threat : graph- and multi-agent-based modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol.13, pp. 1735–1743.
- SAHAL A., ROGER J., ALLGEYER S., LEMAIRE B., HÉBERT H., SCHINDELÉ F. et 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. *Natural Hazards Earth System Sciences*, vol.9, pp. 1823–1834.
- SALZE P., BECK E., DOUVINET J., AMALRIC M., BONNET E., DAUDÉ E., DURAFFOUR F. et SHEEREN D. (2014). TOXI-CITY : an agent-based model for exploring the effects of risk awareness and spatial configuration on the survival rate in the case of industrial accidents. *Cybergeo : European Journal of Geography*, no.692.
- SCHEER S., GARDI A., GUILLANDE R., EFTICHIDIS G., VARELA V., de VANSAY B. et COLBEAU-JUSTIN L. (2011). Handbook of Tsunami Evacuation Planning. no.EUR 24707 EN - 2011, p. 54.
- SCHINDELÉ F., GAILLER A., HÉBERT H., LOEVENBRUCK A., GUTIERREZ E., MONNIER A., ROUDIL P., REYMOND D. et RIVERA L. (2015). Implementation and challenges of the tsunami warning system in the western Mediterranean. *Pur and Applied Geophysics*, vol.172, no.3-4, pp. 821–833.
- SHAW B., AMBRASEYS N. N., ENGLAND P. C., FLOYD M. A., GORMAN G. J., HIGHAM, T. F. G. and JACKSON J. A., NOCQUET J. M., PAIN C. C. et PIGGOT M. (2008). Eastern

- Mediterranean tectonics and tsunami hazard inferred from the ad 365 earthquake. *Nature Geoscience*, vol.1, pp. 268–276.
- SHUTO N. (1993). *Tsunami intensity and disasters*.
- STIROS S. (2010). The 8.5+ magnitude, AD 365 earthquake in Crete : coastal uplift, topography changes, archaeological and historical signature. *Quaternary International*, vol.216, no.1-2, pp. 54–63.
- STONOR T. (2011). From the city to the bedside, multi-modal, multi-scale and multi-active spatial environments. *White Tengbom Team AB, Stockholm, Space Syntax, UCL*.
- STRUNZ G., POST J., ZOSSEDER K., WEGSCHEIDER S., MÜCK M., RIEDLINGER T. et MEHL H. (2011). Tsunami risk assessment in Indonesia. *Natural Hazards and Earth System Science*, vol.11, no.1, pp. 67–82.
- STUCCHI M., CAMASSI R., ROVIDA A., LOCATI M., ERCOLANI E., MELETTI C., MIGLIAVACCA P., BERNARDINI F. et AZZARO R. (2007). DBMI04 - Il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04.
- SUGIMOTO T., MURAKAMI H., KOZUKI Y., NISHIKAWA K. et SHIMADA T. (2003). A human damage prediction method for tsunami disasters incorporating evacuation activities. *Natural Hazards*, vol.29, pp. 585–600.
- SUPPARSI A., MAS E., CHARVET I., GUNASEKERA R., IMAI K., FUKUTANI Y., ABE Y. et IMAMURA F. (2012a). Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami. *Natural Hazards*, no.66, pp. 319–341. doi : 10.1007/s11069-012-0487-8.
- SUPPARSI A., SHUTO N., IMAMURA F., KOSHIMURA S., MAS E. et YALCINER A. (2012b). Lessons learned from the 2011 Great East Japan Tsunami : Performance of Tsunami Countermeasures, coastal Buildings and Tsunami Evacuation in Japan. *Pure and Applied Geophysics*, vol.170, pp. 993–1018. doi : 10.1007/s00024-012-0511-7.
- TAILLANDIER F., ADAM C., DELAY E., PLATTARD O. et TOUMI M. (2017). SPRITE – un modèle de simulation participative pour la sensibilisation au risque de submersion marine sur l’île d’Oléron. *Annales du Bâtiment et des travaux Publics*, vol.68, pp. 38–47.
- TAKAGI H., MAS E. et KOSHIMURA S. (2014). Analysis of the evacuation behavior in Natori, Yuriage during the Great East Japan Earthquake Tsunami. *In Annual Meeting of the Tohoku Branch Technology Research Conference, Japan Society of Civil Engineers*, vol.3, pp. 2011–2013.
- TERRIER M. (2006, 2009). Classeur « Le risque sismique en PACA ». *Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), co-édition Région PACA, BRGM, DREAL PACA avec la collaboration du CETE Méditerranée*.



## BIBLIOGRAPHIE

- TERRIER M. (2006). Document d'information sur le risque sismique à destination des médias - rapport BRGM/RP-55012-FR. *Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)*.
- TINTI S. (2015). Deliverable D8.8 - Tsunami Hazard Assessment Methods : application in the NEAM region and in the ASTARTE test sites. *Assessment, Strategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe (ASTARTE) - Alma Mater Studiorum - Università di Bologna*.
- TINTI S., ARMIGLIATO A. et BORTOLUCCI E. (2001). Contribution of tsunami data analysis to constrain the seismic source : the case of the 1693 eastern Sicily earthquake. *Journal of Seismology*, vol.5, pp. 41-61.
- TINTI S. et MARAMAI A. (1996). Catalogue of tsunamis generated in Italy and in Côte d'Azur, France : a step towards a unified catalogue of tsunamis in Europe . *Annals of Geophysics*, vol.39, no.6.
- TINTI S., MARAMAI A. et GRAZIANI L. (2007). The Italian Tsunami Catalogue (ITC). *Version 2*.
- TURNER A. (2001). Angular analysis. *Proceedings of the 3rd international symposium on space syntax*.
- USUZAWA H., IMAMURA F. et SHUTO N. (1997). Development of the method for evacuation numerical simulation for tsunami events. *Proceedings of the Annual Meeting of the Tohoku Branch Technology Research Conference, Japan Society of Civil Engineers*, pp. 430-432.
- VEYRET Y. (2003). *Les risques*. Sedes, Paris.
- WOOD N. J. et SCHMIDTLEIN M. C. (2012). Community variations in population exposure to near-field tsunami hazards as a function of pedestrian travel time to safety. *Natural Hazards*.
- WOOLDRIDGE M. (1997). Agent-based software engineering. *Software engineering*, vol.144, pp. 26-37.
- YUN N. et HAMADA M. (2012). A study on evacuation behaviors in the 2011 Great Japan Earthquake. *15 WCEE, Lisboa 2012*.
- ZACEK M. (1996). *Construire parasismique. Risque sismique, conception parasismique des bâtiments, réglementation*. Encyclopédie de la construction en terre. Parenthèses, Marseille.
- ZACEK M. (2004). *Évaluation de la présomption de vulnérabilité aux séismes des bâtiments existants, cahier 2-a*. Conception parasismique, Conception, vulnérabilité, urbanisme et sismologie. les Grands ateliers de L'Isle-d'Abeau, Villefontaine.

---

## TABLE DES FIGURES

---

1	Strip Calvin et Hobbes. Traduction : – <i>Voici une belle ville, pleine d'heureux habitants prospères. – Ils s'occupent de leurs affaires, <b>inconscients</b> que la Lune se soit mystérieusement rapprochée de quelques miles de la Terre. – Inconscients de ça, jusqu'à ce que la marée arrive.</i> . . . . .	13
2	Un territoire urbanisé face au risque tsunami. . . . .	15
1.1	<i>Layouts</i> du studio Ghibli -Hayao Miyazaki- mettant en scène un tsunami et un tremblement de terre. . . . .	22
1.2	Processus de génération d'un tsunami suite à une modification brutale du plancher sous-marin (séisme sous-marin en zone de subduction.) 1. Séisme sous-marin en zone de subduction, modification verticale brutale du plancher sous-marin et libération de l'énergie sismique. 2. Mouvement vertical de la masse d'eau. 3. Diffusion horizontale de l'onde de tsunami sur la totalité de la profondeur de l'eau. . . . .	26
1.3	Propagation de l'onde de tsunami. Décroissance de l'amplitude de l'onde et de la profondeur de l'eau et augmentation de la hauteur des vagues. . . . .	27
1.4	Transfert de l'énergie totale de l'onde avant le déferlement. 1. En haute mer : Energie cinétique $E_c$ importante, Energie potentielle $E_p$ faible. 2. A l'approche du littoral : Energie cinétique $E_c$ diminue et Energie potentielle $E_p$ augmente. . . . .	28
1.5	Sources de tsunamis dans le monde, séisme, éruption volcanique, glissement de terrain et autres causes, de -1610 à 2014. . . . .	30
1.6	Rapport entre magnitude du séisme tsunamigène (en abscisse) et hauteurs d'eau mesurées à la côte (en ordonnée). . . . .	30
1.7	Sources de tsunamis en Europe et bassin méditerranéen, de séisme, éruption volcanique, glissement de terrain et autres causes, de -1610 à 2014. . . . .	31
1.8	Epicentres des séismes dans le monde, de -2150 à 2013. . . . .	33

## TABLE DES FIGURES

1.9	Les trois différents types de fonctionnement de faille sismique. . . . .	34
1.10	Hypocentre et propagation des ondes longitudinales (P) et transversales (S) jusqu'à la surface du sol. . . . .	35
1.11	Ondes de volume : longitudinale (P) et transversale (S). . . . .	36
1.12	Ondes de surface : Love (L) et Rayleigh (R). . . . .	36
1.13	Identification des ondes sismiques sur un sismogramme. . . . .	37
1.14	Schéma de l'influence de la topographie sur l'intensité des secousses. . . . .	42
1.15	Enregistrements sismiques obtenus lors du séisme de Laffrey du 11/01/1999 : on constate un contraste majeur entre l'amplitude et la durée des mouvements à l'intérieur de la cuvette, et des mouvements sur le rocher. . . . .	43
1.16	Photographies des effets de la liquéfaction due à un séisme. . . . .	43
1.17	Modèle de transport et sédimentation au cours d'un grand tsunami (amplitude de 15-30 m à la côte) avec identification des trois zones du tsunami. . . . .	45
1.18	Phénomène d'érosion : Avant/Après le tsunami du 26 décembre 2004 à Banda Aceh, Indonésie. . . . .	46
1.19	Affaissment – ou subsidence – et tassement des sols : Kensennuma, Japon, tsunami du 11 mars 2011. . . . .	46
1.20	Destruction de la végétation littorale : Aéroport de Sendai, Japon, tsunami du 11 mars 2011. . . . .	47
1.21	Inondation et pollution du territoire littoral : (à gauche) Kensennuma, Japon, avril 2011. (à droite) Indonésie, 2006. . . . .	47
1.22	Sites à effets directs amplifiés et sites menacés par les effets induits par les séismes. . . . .	48
1.23	Oscillations des constructions induites par les vibrations du sol. . . . .	49
1.24	Processus et modes d'endommagement dominants à terre associés aux zones de dynamique de la vague de tsunami. . . . .	51
1.25	Courbes de fragilité pour le tsunami pour la région de Chiba à Aomori par matériau. (a) Béton armé, (b) Acier, (c) Bois, (d) Maçonnerie. 1. Dommages mineurs, 2. Dommages modérés, 3. Dommages majeurs, 4. Dommages complets, 5. Effondrement, 6. Balayé. . . . .	53
1.26	Immeuble en béton armé de 4 étages arraché dans la ville d'Onagawa (photo du 29/03/2011) et schéma du mécanisme d'arrachement. . . . .	53
2.1	Les neuf sites d'étude du programme européen Astarte. . . . .	58
2.2	Situation de la commune de Saint-Laurent-du-Var. . . . .	62
2.3	Situation de la commune de Syracuse . . . . .	63
2.4	Résultats à la question "D'où venez vous?". . . . .	67
2.5	Résultats à la question "Depuis combien de temps êtes-vous ici?". . . . .	67
2.6	Résultats à la question "Venez vous souvent ici?". . . . .	67
2.7	Résultats à la question "Pensez vous qu'il y a déjà eu un tsunami ici?". . . . .	68

2.8	Résultats à la question "Selon vous, quelle sera la hauteur maximum d'un tsunami ici?". . . . .	70
2.9	Résultats à la question "Quels sont les indicateurs qu'un tsunami va survenir bientôt (signes précurseurs) ?". . . . .	70
2.10	Résultats à la question "Vous ressentez un tremblement de terre tandis que vous êtes sur le bord de mer/la plage...". . . . .	71
2.11	Résultats à la question "Le niveau de la mer est descendu rapidement, ce qui est surprenant en Méditerranée, puis vous voyez une vague blanche (photo), que faites-vous?". . . . .	72
2.12	Résultats à la question "Selon vous, combien de temps y a-t-il entre l'alerte de tsunami et l'arrivée de la première vague ?". . . . .	73
2.13	Résultats à la question "Vous recevez un SMS qui indique "Attention : Tsunami! Eloignez-vous du bord de mer!", que faites-vous?". . . . .	74
2.14	Localisation des failles sismiques au Nord de l'Algérie pouvant engendrer des tsunamis impactant la côte niçoise. . . . .	77
2.15	Localisation des failles sismiques Ligures pouvant engendrer des tsunamis impactant la côte niçoise. . . . .	77
2.16	Bathymétrie et sources d'exposition au risque sismique de Syracuse. Les différentes zones : HM – Hyblaean-Malta escarpment ; MS – Messina Straits ; IS – Ionian Subduction zone ; CO – Calabria Offshore ; WH – Western Hellenic Trench. . . . .	79
2.17	Bathymétrie du littoral azuréen avec indication des zones de glissement de terrain. . . . .	79
2.18	Sources d'exposition aux glissements de terrain sous-marins de Syracuse . . . . .	80
2.19	Frise chronologique des événements majeurs de tsunami à Saint-Laurent-du-Var et Syracuse de 1693 à nos jours. . . . .	82
2.20	Propagation de l'onde tsunami dans le cas des scénarios de type séisme de Boumerdès-Zemmouri (en rouge) et de la faille Ligure (en vert) . . . . .	85
2.21	Hauteur (à droite) et vitesse (à gauche) issues de la simulation du tsunami du scénario 1 pour Saint Laurent du Var. . . . .	85
2.22	Hauteur d'inondation de Syracuse dans le cas d'une simulation du scénario 1. . . . .	87
2.23	Récapitulatif des scénarios de <i>worst-case</i> pour les sites de Saint Laurent du Var et de Syracuse. . . . .	88
3.1	Panneau d'indication de zone refuge en cas de tsunami, Cap Haïtien (Haïti). Traduction : <i>Campe là en cas de tsunami. Reste jusqu'à ce que les autorités soient là.</i> . . . . .	91
3.2	Groupes intergouvernementaux de coordination de veille tsunami par bassin océanique. . . . .	95
3.3	Réduction de l'impact du tsunami du 11 mars 2011 sur la commune de Kamaishi (Japon) par la présence de brise-lames. . . . .	97

## TABLE DES FIGURES

3.4	Brise-lames au large du front de mer à Nobeaka, Japon. Situés aux embouchures des ports ou des zones à enjeux, afin de provoquer le déferlement et donc la perte d'énergie du tsunami. . . . .	98
3.5	Tétrapodes (blocs de béton) sur le littoral et en contrefort d'une digue à Kurobe, Japon. . . . .	98
3.6	Digue après le passage du tsunami du 11 mars 2011 à Miyako, Japon. Le tsunami a franchi la digue dévastant les bâtiments protégés, à l'arrière de la digue. . . . .	99
3.7	Porte anti-tsunami à l'embouchure d'une rivière à Fudai, Japon, permet de faire la jonction des digues et évite la remontée rapide du tsunami par les cours d'eau. . . . .	99
3.8	Panneau d'indication d'altitude en prévision d'une alerte tsunami, à Hamamatsu, Japon. . . . .	102
3.9	Panneau d'indication de route d'évacuation vers une zone refuge, à Lima, Pérou. . . . .	102
3.10	Zones exposées au risque inondation, extrait du DICRIM de Saint-Laurent-du-Var. . . . .	104
3.11	Définition de la zone refuge et de la zone à évacuer en fonction de la zone de danger avec une marge de sécurité. . . . .	107
3.12	Plateforme d'une tour d'évacuation pour tsunami avec une cantine contenant des objets de première nécessité et premiers soins ainsi qu'un téléphone avec panneau solaire, à Hamamatsu, Japon. . . . .	109
3.13	Zone refuge de regroupement post-catastrophe / large site d'évacuation, Château d'Hamamatsu, Japon. . . . .	109
3.14	Signalétique du projet Blue Line, à Wellington, Nouvelle-Zélande. . . . .	110
3.15	Tour d'évacuation pour tsunami, à Hamamatsu, Japon. . . . .	110
3.16	Panneau d'évacuation montrant les différentes zones refuge hiérarchisées selon leur diagnostic : Tours et bâtiments diagnostiqués pour l'évacuation de tsunami et bâtiments permettant d'évacuer mais non aménagés. Plage d'Hamamatsu, Japon. . . . .	112
3.17	Bâtiment de logement diagnostiqué et aménagé pour l'évacuation face à un tsunami, plage d'Hamamatsu, Japon. . . . .	112
3.18	Panneau d'information du comportement à adopter en cas de tremblement de terre lors du festival des cerfs-volants, à Hamamatsu, Japon. . . . .	115
3.19	Carte mentale d'indication des souhaits d'évacuation des personnes enquêtées à Saint-Laurent-du-Var. . . . .	117
3.20	Carte mentale d'indication des souhaits d'évacuation des personnes enquêtées à Syracuse. . . . .	117
3.21	Plan d'évacuation en cas de séisme par la Protection Civile, au dessus de la marina à Ortigia. . . . .	120

3.22	Plan d'évacuation en cas de séisme par la Protection Civile, au Parc Archéologique, Syracuse. . . . .	120
3.23	Plan d'évacuation en cas de tsunami réalisé dans le cadre du programme Astarte. . . . .	121
3.24	Composants du modèle STEP . . . . .	131
4.1	En haut : Vue de Syracuse depuis Ortigia vers la Sicile. En bas : Vue aérienne de Santa Barbara, USA. . . . .	133
4.2	Échelles urbaines du réseau viaire, et leur prise en compte dans le modèle. . . . .	136
4.3	Pyramide de hiérarchisation des besoins de l'utilisateur du réseau viaire. . . . .	138
4.4	Schéma de typologie d'îlots et perspectives associées. . . . .	140
4.5	Comparaison de la morphologie de deux rues d'Ortigia, Syracuse. . . . .	140
4.6	Éléments marqueurs, Saint-Laurent-du-Var. . . . .	142
4.7	Éléments marqueurs, Syracuse. . . . .	143
4.8	Comparaison de choix d'itinéraires piéton en milieu urbain : 1. Quel est le chemin le plus simple pour relier A à B ? 2. Le chemin le plus court en distance. 3. Le chemin le plus continu en perspective. . . . .	146
4.9	Carte agrégeant les intentions d'évacuation des personnes enquêtées, issues des cartes mentales des enquêtes à Saint-Laurent-du-Var. . . . .	149
4.10	Carte agrégeant les intentions d'évacuation des personnes enquêtées, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	150
4.11	Carte agrégeant les intentions d'itinéraire d'évacuation des sept personnes enquêtées au point de départ 1, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	153
4.12	Carte agrégeant les intentions d'itinéraire d'évacuation des douze personnes enquêtées au point de départ 6, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	154
4.13	Vues depuis le point de départ numéro 1, à Ortigia, Syracuse. . . . .	155
4.14	Vues Via Saverio Landolina depuis le point de départ numéro 6, à Ortigia, Syracuse. . . . .	155
5.1	Photographie de dommages suite au tremblement de terre de l'Aquila (Italie) en 2009. . . . .	161
5.2	Zoom sur le plan d'évacuation dans le cas d'un tsunami de Syracuse avec localisation des deux zones refuge d'étude : Piazza Archimede et Piazza Duomo. . . . .	164
5.3	Vues de la Piazza Archimede, Syracuse. . . . .	165
5.4	Vues de la Piazza Duomo, Syracuse. . . . .	165
5.5	Carte de situation des Piazza Archimede et Piazza Duomo et de leurs rues adjacentes. . . . .	166

## TABLE DES FIGURES

5.6	Fiche de diagnostic de la vulnérabilité sismique du bâtiment de la préfecture, Piazza Archimede. Version terrain corrigée via Google maps pour la vue satellite. . . . .	168
5.7	Tableau de vulnérabilité : différenciation des structures en classes de vulnérabilités de A à F. . . . .	172
5.8	Tableau de classification sous 5 degrés (1 à 5) des dégâts aux bâtiments en maçonnerie. . . . .	175
5.9	Plan des bâtiments diagnostiqués avec indication de leur classe de vulnérabilité, hauteur et emprise de leur effondrement, Piazza Archimede. . . . .	177
5.10	Plan des bâtiments diagnostiqués avec indication de leur classe de vulnérabilité, hauteur et emprise de leur effondrement, Piazza Duomo. . . . .	178
5.11	Indication de fourchette de valeur pour la terminologie employée dans la définition des niveaux d'intensité de l'EMS-98. . . . .	180
5.12	Indication du pourcentage de bâtiments endommagés pour chaque degré de dégâts en fonction de l'intensité sismique EMS-98, pour l'ensemble des bâtiments de la Piazza Archimede. . . . .	181
5.13	Indication du pourcentage de bâtiments endommagés pour chaque degré de dégâts en fonction de l'intensité sismique EMS-98, pour l'ensemble des bâtiments de la Piazza Duomo. . . . .	182
5.14	Plan des bâtiments diagnostiqués avec indication de leur classe de vulnérabilité et de leur probabilité d'effondrement partiel ou total (DG4 et DG5) dans le cas du séisme de référence de 1693, Piazza Archimede. . . . .	184
5.15	Plan des bâtiments diagnostiqués avec indication de leur classe de vulnérabilité et de leur probabilité d'effondrement partiel ou total (DG4 et DG5) dans le cas du séisme de référence de 1693, Piazza Duomo. . . . .	185
6.1	Limites de la submersion marine consécutive à l'effondrement du terre-plein de chantier de l'aéroport de Nice du 16 octobre 1979 et hauteurs de l'inondation correspondantes dans les quartiers de La Salis et du Ponteil, à Antibes, France. . . . .	192
6.2	Extrait du référentiel national proposé pour les plans d'évacuation en cas d'alerte tsunami après validation par les autorités locales, bourg de Sainte-Anne, Guadeloupe, France. . . . .	192
6.3	Exemple d'initialisation et propagation de l'eau selon le modèle TUNAMI, paramètres AVINAMI. . . . .	194
6.4	Exemple de modélisation des hauteurs maximum de vagues de tsunami obtenues à partir de trois scénarios pour un même événement, en prenant en compte une magnitude approximative de +/- 0.2 (après trois heures de propagation). . . . .	194
6.5	Accessibilité de la zone refuge et exemples de voies d'évacuation optimales selon le macro-simulateur Evacuation Route Tools dans le quartier de La Salis, à Antibes, France. . . . .	195

6.6	Vue générale et zoom de SpaCelle pour comparaison de l'évolution entre le cas simulé et les données d'évolution réelle de l'agglomération rouennaise. . . . .	196
6.7	Construction du maillage de cellules triangulaires de l'automate RuiCells. . . . .	197
6.8	Vue de l'interface du modèle Toxi-city pour un scénario avec une grille spatiale régulière. . . . .	199
6.9	Vue de l'interface du modèle GUI of TUNAMI-EVAC1 d'évacuation en cas du tsunami. . . . .	201
6.10	Vues de la simulation avec, à gauche, le réseau de voirie et les indications d'évacuation et, à droite, répartition de la population en agents meneurs (en rouge) et en agents suiveurs (en vert). . . . .	201
6.11	Vues de la submersion lors de Xynthia sur l'île d'Oléron, à gauche : carte réelle et à droite : simulation SPRITE. . . . .	202
6.12	Cartographie des modèles présentés chapitre 6 en fonction de leur degré de granularité et positionnement du modèle STEP. . . . .	203
6.13	Positionnement du modèle STEP dans le fer à cheval KISS/KIDS. . . . .	204
6.14	Comparaison de granularité de 25 mètres et 5 mètres du modèle de tsunami sur le front de mer niçois (ici, le port de Nice), pour un évènement de référence du type du séisme de Boumerdès en 2003 (Mw 7.5). . . . .	206
6.15	Processus de propagation de l'eau. . . . .	208
6.16	Représentation du terrain dans le modèle STEP, cadrage de Saint-Laurent-du-Var. . . . .	210
6.17	Représentation du bâti dans le modèle STEP : le fichier SIG (1), sous forme vectorielle dans le modèle (2), en cellules par altitude dans le modèle (3) et dans le modèle avec l'effondrement du bâti (4), pour le site de Saint-Laurent-du-Var. . . . .	211
6.18	Processus d'effondrement du bâti dans le modèle STEP. . . . .	213
6.19	Vues du modèle STEP avec une zone refuge à deux hauteurs différentes et influence sur les zones d'ombre des bâtiments. . . . .	214
6.20	Construction de la variable de visibilité : création de zones d'ombre de non-visibilité des zones refuge en fonction de sa hauteur et de la hauteur des bâtiments. . . . .	215
6.21	Vues du modèle STEP : initialisation de la population et mécanismes de déplacement. . . . .	217
6.22	Modèle STEP : relations entre composants et sous-modèles. . . . .	220
6.23	Schéma de construction du modèle STEP. . . . .	223
6.24	Trois scénarios de simulation du modèle STEP. . . . .	226
7.1	Liens QR codes vers les vidéos de simulation du modèle STEP pour les scénarios indiqués. . . . .	229
7.2	Vues de l'interface du modèle STEP pour les localisations des zones refuge ZR1 et ZR2. . . . .	235



## TABLE DES FIGURES

7.3	Scénarios STEP 1 et STEP 2 et valeurs des variables simulées et analysées dans ce chapitre. . . . .	236
7.4	Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes", en rouge) pour les différentes variables. . . . .	240
7.5	Valeurs du nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ou ayant été rattrapées par l'eau par variable, pour les scénarios STEP 1 et STEP 2 et valeur d'égalité des médianes selon le test de Willcoxon. . . . .	241
7.6	Moyennes du nombre de personnes ayant atteint les zones refuge "sauvés", ou ayant été rattrapées par l'eau "victimes", en fonction du temps pour les différents scénarios simulés STEP 1 et STEP 2. . . . .	243
7.7	Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes", en rouge) selon les paramètres de vision (2 ou 3), la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR), la hauteur des zones refuge (5 ou 60 m) et le nombre d'imitateurs et de probabilité de chercher son chemin (10 ou 20%). . . . .	246
7.8	Cartes de trafic pour les configurations en localisation ZR2, vision 3, imitateurs et probabilité de chercher son chemin 10%, hauteur de zones refuge à 5 mètres (en haut) et à 60 mètres (en bas). . . . .	248
7.9	Vues du modèle STEP à l'initialisation pour les localisation de zones refuge ZR1 et ZR2 (ligne) et pour des hauteurs de 5 mètres et 60 mètres (colonne). . . . .	250
7.10	Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes", en rouge), effets croisés selon la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR2) et la vision (2 ou 3), la proportion d'imitateurs (10 ou 50%) et la probabilité de recherche (0.8 ou 0.6) pour une hauteur de zones refuge de 5 mètres. . . . .	252
7.11	Cartes de trafic pour les configurations en localisation ZR1, vision 3, hauteur de zones refuge à 60 mètres avec une variation de la proportion d'imitateurs et probabilité de chercher son chemin, respectivement 20% et 0.8 en haut et 10% et 0.9 en bas. . . . .	253
7.12	Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes", en rouge), effets croisés selon la vision (2 ou 3) et la hauteur des zones refuge (5 ou 60 mètres), la proportion d'imitateurs et de recherche de chemin (10 et 20%) et la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR2). . . . .	255
7.13	Evolution du nombre d'agents ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapés par l'eau ("victimes", en rouge), en fonction du temps en ticks pour toutes les simulations par scénario STEP 1 (H.5m sans séisme). . . . .	256

7.14 Evolution du nombre d'agents ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapés par l'eau ("victimes", en rouge), en fonction du temps en ticks pour toutes les simulations par scénario STEP 2 (H.60m sans séisme). . . . . 257

7.15 Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés" en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes" en rouge), effets croisés selon la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR2) et la hauteur des zones refuge (5 ou 60 mètres), la proportion d'imitateurs et de recherche de chemin (10 et 20%) et la vision (2 ou 3). . . . . 262

7.16 Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés" en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes" en rouge), effets croisés selon la vision (2 ou 3) et la hauteur des zones refuge (5 ou 60 mètres), la proportion d'imitateurs et de recherche de chemin (10 et 20%) et la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR2). . . . . 263

7.17 Cartes de trafic pour les configurations en vision 2, hauteur de zones refuge à 60 mètres, proportion d'imitateurs à 20% et probabilité de chercher son chemin à 0.8, pour une localisation ZR1 en haut et ZR2 en bas. . . . . 265

7.18 Diagramme polaire des effets des variables par valeur d'écart entre les médianes des résultats pour les "sauvés" et "victimes" des scénarios STEP 1 et STEP 2. . . . . 269

8.1 Liens QR codes vers les vidéos de simulation du modèle STEP. . . . . 272

8.2 Scénarios STEP 2 et STEP 3 et valeurs des variables simulées et analysées dans ce chapitre. . . . . 276

8.3 Nombre de personnes ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapées par l'eau ("victimes", en rouge), par variable de vision, localisation des zones refuge, imitation et séisme toutes choses égales par ailleurs. . . . . 278

8.4 Valeurs du nombre de personnes ayant atteint les zones refuge "sauvés", ou ayant été rattrapées par l'eau "victimes", par variable, pour les scénarios STEP 2 et STEP 3 et valeur d'égalité des médianes selon le test de Willcoxon. . . . . 279

8.5 Médianes des résultats des scénarios pour une hauteur de zones refuge de 60 mètres sans ou avec séisme, en fonction du temps. . . . . 281

8.6 Cartes de trafic pour les configurations en localisation ZR2, vision 2, imitateurs et probabilité de chercher son chemin 10%, hauteur de zones refuge à 60 mètres, sans séisme (en haut) et avec séisme (en bas). . . . . 283

8.7 Nombre d'agents ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapés par l'eau ("victimes", en rouge), effets croisés selon la présence d'un séisme (oui/non), la vision (2 ou 3), la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR2) et le pourcentage d'imitation (10 ou 20%). . . . . 286

## TABLE DES FIGURES

8.8	Nombre d'agents ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapés par l'eau ("victimes", en rouge), selon la présence d'un séisme (oui/non), la localisation des zones refuge (ZR1 ou ZR2), le pourcentage d'imitation (10 ou 20%) et la vision (2 ou 3). . . . .	287
8.9	Evolution du nombre d'agents ayant atteint les zones refuge ("sauvés", en vert) ou ayant été rattrapés par l'eau ("victimes", en rouge) en fonction du temps de la simulation pour toutes les simulations par scénario avec séisme.	290
8.10	Carte de trafic pour une simulation d'un scénario avec séisme, en vision 2, localisation ZR2 et imitation 20%. . . . .	292
8.11	Cartes de trafic pour les configurations en localisation ZR1, vision 3, imitateurs et probabilité de chercher son chemin 20%, hauteur de zones refuge à 60 mètres, avec séisme. . . . .	295
8.12	Cartes de trafic pour les configurations en localisation ZR2, vision 3, imitateurs et probabilité de chercher son chemin 20%, hauteur de zones refuge à 60 mètres, avec séisme. . . . .	296
8.13	Diagramme polaire des effets des variables par valeurs d'écart entre les médianes des résultats pour les "sauvés" et "victimes" des scénarios STEP 2 et STEP 3. . . . .	300
8.14	Une approche multi-axiale de l'évacuation. . . . .	307
15	Résultats des 400 enquêtes réalisées à Saint-Laurent-du-Var/Nice/Villefranche-sur-mer et des 148 enquêtes réalisées à Syracuse (1/3). . . . .	320
16	Résultats des 400 enquêtes réalisées à Saint-Laurent-du-Var/Nice/Villefranche-sur-mer et des 148 enquêtes réalisées à Syracuse (2/3). . . . .	321
17	Résultats des 400 enquêtes réalisées à Saint-Laurent-du-Var/Nice/Villefranche-sur-mer et des 148 enquêtes réalisées à Syracuse (3/3). . . . .	322
18	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des trois personnes enquêtées au point de départ 2, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	324
19	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation de la personne enquêtée au point de départ 3, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	325
20	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des douze personnes enquêtées au point de départ 4, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	326
21	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation de la personne enquêtée au point de départ 5, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	327
22	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation de la personne enquêtée au point de départ 7, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	328

23	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des trois personnes enquêtées au point de départ 8, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	329
24	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des six personnes enquêtées au point de départ 9, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	330
25	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation de la personne enquêtée au point de départ 10, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	331
26	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des dix-neuf personnes enquêtées au point de départ 11, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	332
27	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation de la personne enquêtée au point de départ 12, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	333
28	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des trois personnes enquêtées au point de départ 13, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	334
29	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des deux personnes enquêtées au point de départ 14, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	335
30	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des deux personnes enquêtées au point de départ 15, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	336
31	Carte agrégeant les intentions d'itinéraires d'évacuation des deux personnes enquêtées au point de départ 16, issues des cartes mentales des enquêtes à Syracuse. . . . .	337
32	Fiche 1 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. . . . .	340
33	Fiche 2 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. . . . .	341
34	Fiche 3 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. . . . .	342
35	Fiche 4 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. . . . .	343
36	Fiche 5 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. . . . .	344
37	Fiche 6 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. . . . .	345
38	Fiche 7 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. . . . .	346
39	Fiche 8 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. . . . .	347
40	Fiche 9 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Archimede. . . . .	348
41	Fiche 1 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. . . . .	349
42	Fiche 2 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. . . . .	350
43	Fiche 3 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. . . . .	351
44	Fiche 4 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. . . . .	352
45	Fiche 5 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. . . . .	353

## TABLE DES FIGURES

46	Fiche 6 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. . . . .	354
47	Fiche 7 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. . . . .	355
48	Fiche 8 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. . . . .	356
49	Fiche 9 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. . . . .	357
50	Fiche 10 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. . . . .	358
51	Fiche 11 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. . . . .	359
52	Fiche 12 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. . . . .	360
53	Fiche 13 de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti, Piazza Duomo. . . . .	361
54	Evolution des moyennes et médianes du nombre de "sauvés" et de "victimes" en fonction du pas de temps pour chaque scénario. . . . .	364
55	Distributions des "victimes" et des "sauvés" selon l'ensemble des scénarios par localisation des zones refuge. . . . .	365
56	Distributions des "victimes" et des "sauvés" selon l'ensemble des scénarios avec ou sans séisme. . . . .	366
57	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Vision 2, ZR1, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 20%. . . . .	367
58	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Vision 2, ZR1, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 10%. . . . .	367
59	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Vision 2, ZR1, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 10%. . . . .	368
60	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Séisme, vision 2, ZR1, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 20%. . . . .	368
61	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Séisme, vision 2, ZR1, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 10%. . . . .	369
62	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Vision 2, ZR2, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 20%. . . . .	369
63	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Vision 2, ZR2, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 10%. . . . .	370
64	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Séisme, vision 2, ZR2, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 20%. . . . .	370
65	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Vision 3, ZR1, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 20%. . . . .	371
66	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Vision 3, ZR1, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 10%. . . . .	371
67	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Séisme, vision 3, ZR1, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 20%. . . . .	372
68	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Séisme, vision 3, ZR1, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 10%. . . . .	372
69	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Vision 3, ZR2, hauteur 5 m, recherche de chemin et imitation 20%. . . . .	373

## TABLE DES FIGURES

70	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Vision 3, ZR2, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 20%. . . . .	373
71	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Séisme, vision 3, ZR2, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 20%. . . . .	374
72	Carte du nombre de passages d'agents par cellule. Séisme, vision 3, ZR2, hauteur 60 m, recherche de chemin et imitation 10%. . . . .	374

## TABLE DES FIGURES

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

1.1	Part en pourcentage des trois évènements sources principaux à l'origine d'un tsunami (de manière isolée ou combinée). . . . .	25
1.2	Evolution des propriétés d'un tsunami en fonction de la profondeur d'eau. . . . .	26
1.3	Corrélation théorique entre les ordres de grandeur de la rupture sismogène et la magnitude du séisme. . . . .	38
1.4	Version abrégée de l'échelle macrosismique européenne EMS-98. Version longue en Annexe 8.4 . . . . .	39
2.1	Failles sismiques prises en compte, par zone, pour Syracuse, correspondance avec la Figure 2.16 . . . . .	78
3.1	Récapitulatif des deux types d'évacuations horizontale et verticale avec leurs contraintes et avantages. . . . .	111
5.1	Classes de vulnérabilité des bâtiments diagnostiqués sur les Piazza Archimede et Piazza Duomo. . . . .	176
5.2	Pourcentage d'endommagement pour chaque degré de dégâts en fonction du niveau d'intensité sismique, Piazza Archimede. . . . .	181
5.3	Pourcentage d'endommagement pour chaque degré de dégâts en fonction du niveau d'intensité sismique, Piazza Duomo. . . . .	182



## LISTE DES TABLEAUX

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>Introduction générale</b>	<b>5</b>
<b>Partie 1. Un territoire face aux risques</b>	<b>15</b>
<b>1 Séisme et tsunami : un système d'aléas</b>	<b>21</b>
1.1 Le tsunami . . . . .	24
1.1.1 L'aléa et ses caractéristiques . . . . .	24
1.1.2 Modes de déclenchement et de propagation . . . . .	25
1.1.3 Les tsunamis dans le monde . . . . .	29
1.2 Le séisme comme évènement générateur du tsunami . . . . .	33
1.2.1 Les séismes et leur occurrence . . . . .	33
1.2.2 Le phénomène sismique . . . . .	35
1.2.3 Quelles échelles de mesure ? . . . . .	37
La magnitude sismique . . . . .	37
L'intensité sismique . . . . .	38
1.3 La conjonction des deux aléas et leurs conséquences sur le territoire littoral	41
1.3.1 Les effets géomorphologiques . . . . .	41
Les impacts du séisme . . . . .	41
Les impacts du tsunami . . . . .	44
1.3.2 Les endommagements des infrastructures et du bâti . . . . .	48
Les effets du séisme . . . . .	49
Les effets dominos de l'arrivée du tsunami . . . . .	51
1.3.3 Une population exposée . . . . .	54
<b>2 Les sites d'étude</b>	<b>57</b>
2.1 Des territoires urbains à enjeux . . . . .	60
2.1.1 Présentation des sites d'étude . . . . .	60

## TABLE DES MATIÈRES

Saint-Laurent-du-Var . . . . .	60
Syracuse . . . . .	61
2.1.2 Quels enjeux urbains sur ces sites d'étude ? . . . . .	64
2.2 Quelle population concernée sur les sites d'étude ? . . . . .	66
2.2.1 La population et sa connaissance des risques . . . . .	66
2.2.2 Réaction et comportement d'évacuation . . . . .	71
2.3 Des territoires à l'histoire ponctuée d'évènements . . . . .	76
2.3.1 Quelle exposition aux aléas pour ces sites ? . . . . .	76
2.3.2 Les évènements passés . . . . .	80
Les évènements de référence pour Saint-Laurent-du-Var . . . . .	81
Les évènements de référence pour Syracuse . . . . .	81
2.3.3 Scénarios et "worst case" . . . . .	83
<b>3 Le temps de l'évènement</b>	<b>91</b>
3.1 Se protéger : Veille, alerte, protection et information . . . . .	94
3.1.1 Systèmes de veille et d'alerte . . . . .	94
3.1.2 La protection du littoral . . . . .	96
3.1.3 Information de la population . . . . .	100
3.2 Évacuer : Où ? Quand ? Comment ? Qui ? . . . . .	106
3.2.1 Quelle évacuation pour quelles zones refuge ? . . . . .	106
3.2.2 Évacuer qui ? Quelle population ? . . . . .	113
3.2.3 Vers une mise en sécurité . . . . .	118
<b>Conclusion de la première partie</b>	<b>125</b>
<b>Partie 2. Un système réactif face aux catastrophes</b>	<b>129</b>
<b>4 Un dessin de ville déterminant</b>	<b>133</b>
4.1 L'espace de la rue comme réseau pour l'évacuation . . . . .	135
4.2 Quelle influence du tissu urbain dans le choix de l'individu ? . . . . .	137
4.2.1 Connaissance et but de l'itinéraire du piéton . . . . .	137
4.2.2 Environnement urbain comme élément émotionnel du comportement piéton . . . . .	138
4.2.3 Des éléments marqueurs structurant l'espace urbain . . . . .	141
4.2.4 Continuité et perspectives dans l'espace urbain . . . . .	145
4.2.5 Un nouveau mode de déplacement connecté . . . . .	147
4.3 Depuis les cartes mentales réalisées sur les sites d'étude jusqu'au modèle STEP	148
4.3.1 Réalisation de cartes mentales sur les sites d'étude . . . . .	148
4.3.2 Analyse des résultats issus des cartes mentales réalisées à Syracuse .	151
4.3.3 Vers l'implémentation de la visibilité dans le modèle STEP . . . . .	157

<b>5</b>	<b>La ville comme espace praticable</b>	<b>161</b>
5.1	Mise en place d'une méthode de diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti à Syracuse . . . . .	163
5.1.1	Le choix de Syracuse . . . . .	163
5.1.2	La méthode de diagnostic de vulnérabilité sismique des bâtiments . . . . .	166
5.2	La vulnérabilité sismique des constructions . . . . .	171
5.2.1	Définition réglementaire des classes de vulnérabilité sismique des bâtiments . . . . .	171
5.2.2	Des premiers résultats issus du diagnostic de terrain . . . . .	174
5.3	Quelle praticabilité de l'espace urbain au cours de l'évacuation en fonction de la probabilité d'effondrement du bâti? . . . . .	180
5.3.1	Conclusion quant à la praticabilité des itinéraires et à l'accessibilité des zones refuge à Syracuse . . . . .	183
5.3.2	Vers l'intégration d'une probabilité d'effondrement des constructions dans le modèle STEP . . . . .	186
<b>6</b>	<b>La construction du modèle STEP</b>	<b>189</b>
6.1	La mise en place d'un modèle . . . . .	191
6.1.1	Modèles statiques . . . . .	191
6.1.2	Modèles dynamiques . . . . .	193
	Modèles macroscopiques . . . . .	193
	Automates cellulaires . . . . .	195
	Systèmes multi-agents . . . . .	198
6.1.3	Positionnement du modèle STEP . . . . .	202
6.2	Construction d'un modèle de référence . . . . .	205
6.2.1	Modélisation du tsunami . . . . .	205
	Modèle de tsunami du CEA . . . . .	205
	Implémentation et inondation du rivage . . . . .	207
6.2.2	Construction du terrain . . . . .	209
6.2.3	Implémentation des constructions . . . . .	210
6.2.4	Intégration des zones refuge . . . . .	213
6.2.5	Implémentation de la population . . . . .	216
	<b>Conclusion de la seconde partie</b>	<b>222</b>
	<b>Partie 3. Influence de l'environnement urbain et du contexte multi-risques dans les résultats issus des scénarios STEP</b>	<b>225</b>
<b>7</b>	<b>La lisibilité du milieu urbain dans le modèle STEP</b>	<b>229</b>
7.1	Les scénarios et paramètres pris en compte dans les simulations du modèle STEP concernant la lisibilité . . . . .	231
7.1.1	Initialisation des paramètres des aléas . . . . .	231

## TABLE DES MATIÈRES

Séisme . . . . .	231
Tsunami . . . . .	231
7.1.2 Initialisation des paramètres de la population . . . . .	232
Taille de la population . . . . .	232
Vitesse de déplacement . . . . .	232
Angle de déplacement . . . . .	232
Proportion d'imitateurs . . . . .	233
Probabilité de chercher son chemin . . . . .	233
Vision . . . . .	233
7.1.3 Initialisation des paramètres des zones refuge . . . . .	234
Nombre . . . . .	234
Hauteur . . . . .	234
Localisation . . . . .	234
7.1.4 Protocole de simulation . . . . .	236
7.2 Analyse générale des résultats et influence des différents paramètres . . . . .	238
7.3 Quelle visibilité pour les personnes ? . . . . .	245
7.3.1 Influence du paramètre de la hauteur des zones refuge sur l'évacuation	245
7.3.2 Influence du nombre d'imitateurs et de la probabilité de chercher son chemin ? . . . . .	250
7.3.3 Influence du paramètre de vision ? . . . . .	254
7.4 Effet de la localisation des zones refuge ? . . . . .	260
7.4.1 Influence de la localisation . . . . .	260
7.4.2 Le modèle STEP et le choix des zones refuge . . . . .	266
<b>8 La praticabilité des itinéraires d'évacuation en contexte multi-risques dans le modèle STEP</b>	<b>271</b>
8.1 Les scénarios et paramètres pris en compte . . . . .	273
8.1.1 Initialisation des paramètres des aléas . . . . .	273
Séisme . . . . .	273
Tsunami . . . . .	273
8.1.2 Initialisation des paramètres de la population . . . . .	274
Nombre . . . . .	274
Vitesse de déplacement . . . . .	274
Noise . . . . .	274
Proportion d'imitateurs . . . . .	274
Probabilité de chercher son chemin . . . . .	274
Vision . . . . .	274
8.1.3 Initialisation des paramètres des zones refuge . . . . .	274
Nombre . . . . .	275
Hauteur . . . . .	275
Localisation . . . . .	275

8.1.4	Protocole de simulation . . . . .	275
8.2	Analyse générale des résultats et influence des différents paramètres . . . . .	277
8.3	La prise en compte du risque sismique dans les résultats . . . . .	285
8.3.1	Influence du paramètre de vision . . . . .	285
8.3.2	Influence du nombre d'imitateurs et de la probabilité de chercher son chemin . . . . .	288
8.3.3	Influence du choix de la localisation des zones refuge . . . . .	289
8.4	Influence du risque sismique . . . . .	294
<b>Conclusion de la troisième partie</b>		<b>302</b>
<b>Conclusion générale</b>		<b>305</b>
<b>Annexes</b>		<b>313</b>
<b>Références bibliographiques</b>		<b>375</b>
<b>Table des figures</b>		<b>388</b>
<b>Liste des tableaux</b>		<b>401</b>
<b>Table des matières</b>		<b>409</b>



# REPENSER L'ÉVACUATION D'UNE POPULATION LITTORALE EN MILIEU URBAIN DANS UN CONTEXTE MULTI-RISQUES : LE MODÈLE STEP (SÉISME TSUNAMI ÉVACUATION POPULATION)

## RÉSUMÉ

Cette thèse questionne l'évacuation piétonne d'une population littorale en milieu urbain en cas de tsunami et séisme, à travers la mise en place du modèle STEP. Deux sites d'étude ont été considérés : Saint-Laurent-du-Var (France) et Syracuse (Italie), qui présentent des configurations d'exposition aux risques et des stratégies d'évacuation de la population différentes.

L'espace urbain est au cœur du questionnement de cette thèse. Premièrement, à travers l'influence que la lisibilité du milieu urbain peut avoir sur une évacuation piétonne. Deuxièmement, par la prise en compte du contexte multi-risques et des dommages d'un séisme précurseur sur les constructions, en questionnant la praticabilité des itinéraires d'évacuation en milieu urbain.

STEP est un modèle hybride alliant le multi-agents et les automates cellulaires et implémenté sur la commune de Saint-Laurent-du-Var. Son environnement est construit à partir des données géographiques de terrain (topographie, bâtiments). Le tsunami est implémenté à partir des données issues de simulations d'évènements de référence. La lisibilité de l'espace urbain est construite à travers la mise en place de zones de non-visibilité des zones refuge générées en fonction de leur hauteur et de celle des bâtiments. La praticabilité de l'espace urbain se traduit par la mise en place d'une probabilité d'effondrement des constructions en fonction de l'intensité sismique, pouvant obliger les individus à trouver un autre itinéraire jusqu'aux zones refuge. Trois scénarios principaux ont été mis en place, se basant sur des évènements de références et explorés par variation des paramètres liés aux agents et zones refuge; ces trois scénarios principaux font varier la lisibilité et la praticabilité de manière indépendante afin de mieux en percevoir les effets sur les résultats.

Au final, la variation de la localisation des zones refuge, ainsi que la prise en compte du contexte multi-risques en milieu urbain ont une influence importante sur les résultats issus des simulations de STEP. Cette thèse met donc en avant l'importance de la considération de la spécificité d'une évacuation en milieu urbain ainsi que du contexte multi-risques pour la mise en place de stratégies d'évacuation de population sur un territoire.

## MOTS-CLEFS :

évacuation, population, tsunami, séisme, espace urbain, modélisation, Saint-Laurent-du-Var, Syracuse

## RETHINKING EVACUATION OF COASTAL URBAN POPULATION IN A MULTI-HAZARDS CONTEXT : STEP MODELISATION (SEISM TSUNAMI EVACUATION POPULATION)

## ABSTRACT

This thesis explore the issue of a pedestrian evacuation of coastal population in an urban environment in case of tsunami and seism, through the implementation of the model STEP. Studies examine two fields : Saint-Laurent-du-Var (France) and Siracusa (Italy). They provide varied configurations of disaster risk exposure and different evacuation strategies for a coastal urban population.

Urban environment is the central point of this thesis. First, visibility in an urban context is evaluated through its effect on pedestrian evacuation. Second, by taking into account multi-hazard context through the impacts on buildings from a precursor earthquake and questioning the walkability of evacuation routes to safe areas. The STEP model is a hybrid modelisation combining agent-based and cellular automatons. It is implemented on Saint-Laurent-du-Var based on geographical data (topography, buildings). The tsunami is based on worst-case simulation data. Visibility in an urban context is determined by the height of safe areas and surrounding buildings; it creates "shadow-zones" where people have no line-of-sight to safe areas around them. Walkability of the urban environment is based on the probability of a building collapse according to seismic intensity. Debris may obstruct streets and force people to seek alternative routes to safe areas.

According to the worst-case simulation data, three main evacuation scenarios were implemented and explored through parameters related to agents and safe areas. These three scenarios vary the visibility and walkability independently in order to better evaluate the effects of the results.

The greatest impact seen within STEP simulations is determined by the location of safe areas and paying attention to seismic activity in an urban environment. This thesis shows the importance of considering specific evacuation requirements for coastal urban environments. It also demonstrates that multi-hazards should be a central concern when defining evacuation strategies for populations.

## KEYWORDS :

evacuation, population, tsunami, seism, urban environment, modelisation, Saint-Laurent-du-Var, Siracusa