HAL
open science

# Repenser l'évacuation d'une population littorale dans un contexte multi-risque par la modélisation multi-agents.

Odile Plattard

## To cite this version:

Odile Plattard. Repenser l'évacuation d'une population littorale dans un contexte multi-risque par la modélisation multi-agents.. Spatial Analysis and GEOmatics 2017, INSA de rouen, Nov 2017, Rouen, France. hal-01643371

**HAL Id: hal-01643371**

**https://hal.science/hal-01643371v1**

Submitted on 21 Nov 2017

**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.

# Repenser l'évacuation d'une population littorale dans un contexte multi-risque par la modélisation multi-agents.

**Odile Plattard** [1]

*Université Paris 1, Labex Dynamite* [1]
*UMR8504 Géographie-cités et UMR 8591 LGP, Paris, France.*
*odileplattard@gmail.com*

RÉSUMÉ. *Le tsunami de mars 2011 toucha la côte Nord-Est du Japon suite à un tremblement de terre d'une magnitude 9. Moins d'une heure avant l'arrivée de l'onde, ce dernier impacta le territoire littoral, augmentant sa vulnérabilité face à l'eau par des dommages importants. Cependant, le séisme est souvent mis de côté lors de l'élaboration de plans d'évacuation dans lesquels seule la vague est prise en compte. Un objectif de zone refuge, hors zone inondable, accessible par le plus court chemin est souvent préconisé. Néanmoins, ces itinéraires privilégiés peuvent être remis en cause par les dommages d'un séisme; et particulièrement ceux des constructions pouvant amener jusqu'à l'effondrement, rendant impraticables certains chemins. Ce travail pose la question de la prise en compte de ces deux aléas dans la mise en place d'un modèle de simulation multi-agents de simulation d'évacuation de population littorale.*

ABSTRACT. *The tsunami wave of March 2011 which hit the North-Easr coast of Japan has been generate by an earthquake of magnitude 9. His seismic impact was one hour before the tsunami reached the coast rising its vulnerability. In the case of population evacuation maps, only one hazard, the wave, is considered. The goal is mainly to reach a safe refuge, out of the flooding area, by the faster way. But the earthquake dammages can occur mainly on the building structures until they collapse. The evacuation path could become impracticable. The issue in this research is about the effect of taking care of seismic and tsunami hazards by the implementation of an agent-based model of evacuation of a coastal population.*

MOTS-CLÉS : *sma, tsunami, séisme, bâti, vulnérabilité.*

KEYWORDS: *agent-based modelisation, tsunami, earthquake, buildings, vulnerability.*

1. Ce travail a bénéficié du soutien financier du LabEx DynamiTe (ANR-11-LABX-0046) dans le cadre du programme « Investissements d'Avenir ».

## 1. Introduction

Un territoire littoral, situé en zone sismique ou non, peut être concerné par l'arrivée d'une vague tsunami sur ses côtes. L'impact de cette onde peut être important, notamment lors de la présence de population sur le front de mer, mais pas seulement puisque l'eau peut inonder jusqu'à plusieurs kilomètres dans les terres. De plus, souvent oublié dans la prise en compte de l'impact d'un tsunami, l'élément précurseur et source de la vague peut avoir un impact non négligeable sur le territoire, comme par exemple un tremblement de terre de forte magnitude [2]. En effet, les plans d'évacuation de la population des territoires littoraux en cas de catastrophe sont généralement axés sur la prise en compte d'un seul aléa (séisme ou submersion). Ce sujet de recherche, à travers la mise en place d'un modèle de simulation multi-agents questionne l'apport que peut avoir la prise en considération de l'approche multi-risque sur la mise en place de plans d'évacuation en cas d'évènement majeur.
Afin de mieux appréhender les enjeux que sollicite la prise en compte des deux aléas séisme et tsunami sur un même territoire, il est important d'en comprendre les mécanismes et impacts, d'autant plus lorsque ces derniers sont combinés. Les effets d'un séisme se faisant majoritairement ressentir sur les constructions, le diagnostic de la vulnérabilité du bâti au séisme et leur probabilité d'effondrement tiennent une place importante dans la mise en place d'une méthode de mesure de la praticabilité d'un itinéraire. Enfin, l'implémentation du modèle avec la variable de l'effondrement des structures bâties permet la mise en place de scénarios d'évacuation ne prenant pas en compte qu'un unique aléa. De plus, le modèle permet de mettre en avant l'importance de la praticabilité de l'itinéraire, rendant parfois difficile d'accès des zones refuges privilégiées dans une approche prenant en compte un seul aléa. La modélisation multi-agents permet la mise en place de plusieurs scénarios intégrant différentes variables afin de comparer les évacuations pour mettre en avant le potentiel d'une approche multi-risques.

## 2. Les aléas tsunamis et séisme face à un territoire

Beaucoup ont encore en mémoire aujourd'hui les images du tsunami du 11 mars 2011 sur la côte Nord-Est du Japon. Le séisme qui toucha l'archipel nippon, généra une série de vagues de tsunami qui purent être observées en direct lors de leur arrivée sur la côte. Bien que les destructions furent très majoritairement liées au tsunami, le séisme de magnitude 9 généra des dommages qui eurent des conséquences d'autant plus importantes lorsqu'elles furent combinés

2. Element source dans près de 90% des cas selon les données NOAA de 1840 à 2013.

à l'impact de l'arrivée de la vague.
Il est nécessaire de connaitre le fonctionnement des deux aléas séisme et tsunami, afin de mieux cerner leurs impacts sur un territoire urbanisé. Cela permettra de cerner l'apport d'une méthode basée sur la prise en compte de plusieurs aléas dans la mise en place de plans d'évacuation.

### *2.1. Comprendre les phénomènes de séismes et de tsunamis*

Ces deux aléas sont directement liés puisque dans près de 90% des cas, un tremblement de terre est à l'origine de l'onde de tsunami (IOC-UNESCO, 2013), cependant il n'est pas forcément ressenti sur le territoire côtier atteint par la vague. Comme le montre la Table 1, il y a principalement trois types d'évènements sources de tsunami. Nous prendrons en considération dans cette recherche seulement les tremblements de terre.

<table>
<tr><td>EVENEMENT SOURCE</td><td colspan="3">PART (en pourcentage)</td></tr>
<tr><td>Séisme</td><td>83</td><td rowspan="2">6</td><td></td></tr>
<tr><td>Glissement de terrain</td><td>4</td><td rowspan="2">1</td></tr>
<tr><td>Eruption volcanique</td><td>4</td><td></td></tr>
<tr><td>Indéterminé</td><td>2</td><td></td><td></td></tr>
</table>

Table *1. Part en pourcentage des trois évènements principaux à l'origine d'un tsunami. Source : évènements sources avérés de -2000 à 2011, dans le monde, données NOAA.*

#### *2.1.1. Tsunami*

Le tsunami est souvent confondu avec la houle ou la submersion marine. Or, sa spécificité est tout d'abord d'être un phénomène non-climatique. Contrairement à la houle qui résulte d'un phénomène éolien, la vague de tsunami est générée suite au déplacement vertical brutal du plancher sous marin ou littoral. Cela crée une mise en mouvement de la totalité de la profondeur de l'eau.
Toutes les étendues d'eau peuvent être concernées. Un tsunami peut concerner la totalité d'un bassin océanique, ce qui fait qu'un littoral non sismique pourra être impacté. Comme en 2011, où le séisme au large de la côte Nord-Est du Japon généra un tsunami qui impacta la côte japonaise moins d'une heure après mais également, plusieurs heures après la côte américaine ou de la Nouvelle-Calédonie.
En haute mer, la propagation de l'onde est imperceptible puisque son amplitude peut aller jusqu'à environ 2m, pour un déplacement a environ 700-900 km/h et une longueur d'onde de plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres. A l'approche de la côte, avec la remontée du fond marin, l'énergie de la vague va

être transférée. En effet, avec la perte de vitesse et la réduction de la longueur d'onde, la vague va prendre de la hauteur. Lors de l'arrivée sur la côte, l'onde se propage à quelques dizaines de kilomètres par heure pour une hauteur pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de mètres. L'énergie est conservée jusqu'au déferlement de la vague qui peut avoir lieu avant ou à l'arrivée sur le trait de côte.

#### *2.1.2. Séisme*

Le tremblement de terre est la source principale de génération de tsunami sous certaines conditions. En effet, les séismes tsunamigènes sont ceux situés en zone de subduction. La majorité des séismes mondiaux sont surfaciques, c'est à dire situés à moins de 70km de profondeur (Zacek, 1996). Or, la profondeur moyenne pour les séismes tsunamigènes se situe à 35km (NOAA/NGDC). Au delà de 40km de profondeur et pour une magnitude inférieure à 6,5, le risque de tsunami est considéré comme faible. Cependant, pour le moment, aucune corrélation n'est prouvée entre intensité de l'évènement tsunami et magnitude du séisme source (Sahal, 2011).
Un tremblement de terre survient lors du relâchement de l'énergie potentielle accumulée durant le glissement entre deux plaques. Cette énergie -mesurée en magnitude- est libérée principalement sous forme de chaleur mais également via des ondes qui progressent en suivant le chemin de moindre résistance à travers les sols. Ces ondes -P, S, Love et Rayleigh- ont des modes de propagations différents ce qui les rend plus ou moins destructrices, notamment sur les structures bâties. Les dommages sur un territoire permettent de mesurer l'intensité de l'événement. Cette dernière peut varier en fonction du site, notamment avec le type de sol. En effet, il peut y avoir des phénomène d'amplification ou effet de site, comme ce fut le cas pour le séisme de Mexico en 1985.

### *2.2. Des impacts combinés sur un territoire*

Les deux aléas sont susceptibles de venir impacter un même territoire avec dans un premier temps le tremblement de terre et en second l'arrivée du tsunami. Or ces deux aléas n'auront pas les mêmes effets dévastateurs. Plus précisément, ils n'auront pas les mêmes effets dévastateurs seuls et combinés.
Le territoire impacté par un aléa peut être vulnérable par la présence d'enjeux. Ces éléments ou systèmes menacés par un aléas peuvent être des personnes, des biens, des structures ou l'environnement susceptibles de subir des dommages (Veyret, 2003). Afin de réduire ces impacts, des systèmes de veille et d'alerte sont mis en place pour la mise en sécurité de la population et des ouvrages de protection du littoral visent à protéger les enjeux structuraux du territoire.
Les impacts d'un séisme pris en compte dans ce modèle concernent les constructions. En effet, des dommages sur les réseaux (voiries, services...) peuvent survenir mais ce qui peut potentiellement mettre en danger la vie des personnes

sera l'effondrement des structures bâties. Les ondes sismiques vont solliciter les constructions dans leur ensemble et les fragiliser. De plus, un phénomène de liquéfaction du sol peut se produire, ce qui affaiblira la structure au niveau des fondations (Zacek, 1996).
Suite au séismes, les constructions sont affaiblies et auront plus de mal à résister à la contrainte horizontale de l'arrivée du tsunami. La sollicitation de l'eau va varier en fonction de la zone d'évolution de la vague (Leone *et al.*, 2007); la zone de déferlement va avoir des mouvements très tourbillonnants et des contraintes verticales, tandis que la zone d'inondation va concerner le flux et le reflux de l'onde et donc solliciter majoritairement horizontalement les structures. L'exemple du Japon en 2011 montre bien que la quasi totalité des constructions bâties démolies le furent par le tsunami et non par le tremblement de terre (Supparsi, Mas *et al.*, 2012). Des bâtiments en béton de plusieurs étages ont été arrachés et déplacés par la vague car, suite à la liquéfaction du sol par le séisme, leurs fondations étaient plus vulnérables. Cependant, les relevés fait suite à cette catastrophe de 2011, montrent que les mesures de ralentissement de l'onde de tsunami ont été efficaces et notamment pour le délai d'arrivée de l'eau et la hauteur d'inondation, ce qui permis la mise en sécurité des personnes (Supparsi, Shuto *et al.*, 2012). Enfin, comme ce fut souligné par la mise en place d'un diagnostic des dommages suite au tsunami à Bandah Aceh (Lavigne, Paris, 2011), les constructions deviennent aussi des embâcles pouvant endommager d'autant plus les autres structures.
Les impacts des deux aléas peuvent survenir de manière indépendante mais la survenance d'un séisme puis d'un tsunami rendra plus vulnérables certains enjeux.

## 3. Mise en place d'une méthode

Dans la mise en place de plan d'évacuation aujourd'hui, il est peu commun de prendre en compte plusieurs aléas. C'est le cas, par exemple dans la commune de Syracuse (Italie) où ont été mis en place deux types de plans d'évacuation (Figure 1). Le premier fut établi par la sécurité civile et est un plan d'évacuation en cas de tremblement de terre préconisant d'aller se réfugier sur le port ou le bord de mer. Le second est un plan d'évacuation en cas de tsunami, mis en place dans le cadre du programme Astarte [3], qui préconise de se réfugier dans les terres.

Ces deux documents posent la question de la prise en compte de plusieurs aléas dans la mise en place de plans d'évacuation. En effet, par la prise en compte d'un seul risque, les deux directives se retrouvent opposées. Certes, un

3. EU program : Assessment, STrategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe

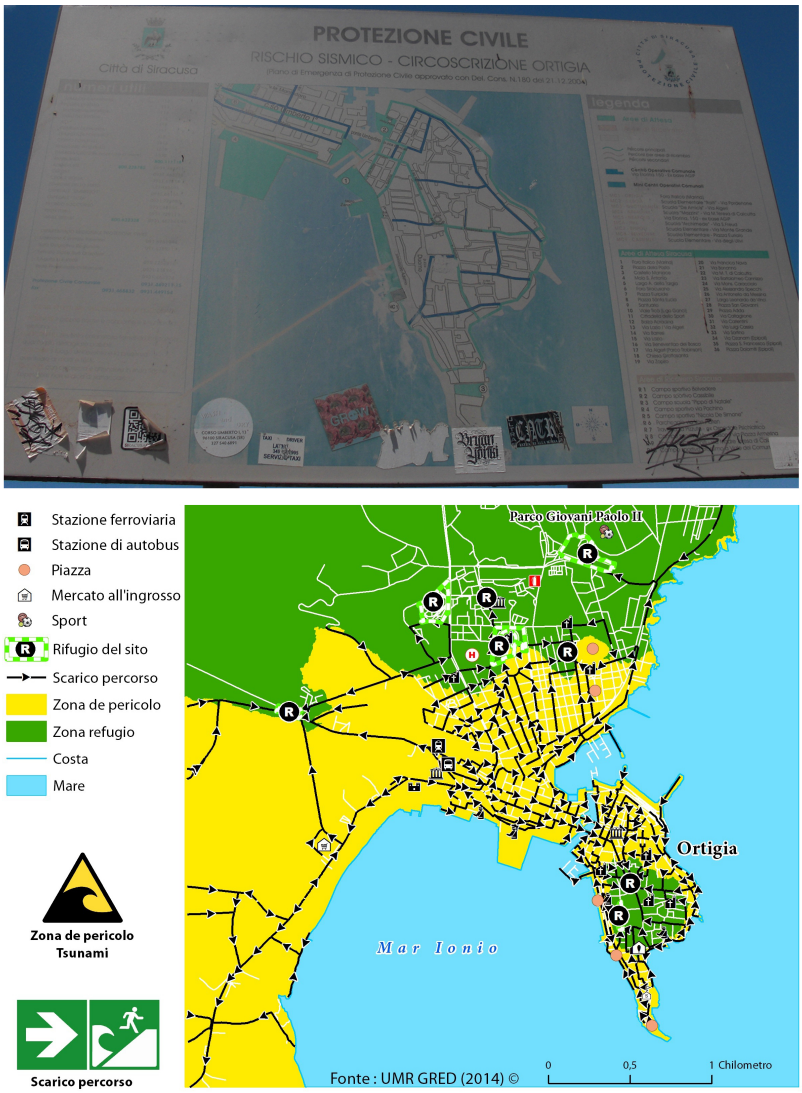


FIGURE *1. En haut : Photo du plan d'évacuation en cas de risque sismique de la sécurité civile pour la commune de Syracuse. Photo : O.Plattard, 2016. En bas : Extrait du plan d'évacuation en cas de risque tsunami pour la commune de Syracuse. GRED, 2014.*

aléa peut survenir sans l'autre mais sur ce territoire, ils ont par le passé souvent été de paire. Il semble donc important de les prendre en compte tous les

deux dans la mise en place du modèle de simulation, notamment à travers la notion de praticabilité de l'itinéraire jusqu'à la mise en sécurité. L'hypothèse ici retenue sera sur la vulnérabilité des bâtiments au séisme et leur probabilité d'effondrement sur l'itinéraire d'évacuation, rendant celui-ci impraticable ou la zone refuge inaccessible, ne garantissant donc potentiellement pas l'évacuation des personnes.

### *3.1. Une zone à évacuer*

Pour la mise en place des plans d'évacuation,la zone de danger doit être définie. Dans le cas du tsunami, il s'agit de la zone d'inondation basée sur le scénario de référence, pour Syracuse il s'agit du séisme et tsunami de 1693 qui ravagea la ville avec une magnitude de 6,7 et une vague allant jusqu'à 6m. A cette zone d'inondation est rajouté une marge de sécurité afin de définir une zone refuge. Cette dernière permet la mise en sécurité des personnes dans le cas d'une évacuation horizontale. Un autre type d'évacuation existe, il s'agit de l'évacuation verticale qui défini des zones refuges dans des construction diagnostiquées au préalable (Imamura *et al.*, 2012). La mise en sécurité lors d'une évacuation horizontale nécessite souvent de parcourir une plus longue distance et est préconisée en fonction du relief. L'évacuation horizontale est celle privilégiée par la ville de Wellington [4] (Nouvelle-Zélande) qui dispose d'un relief permettant une mise en sécurité rapide de la population. Cependant elle est couplée par endroit avec des refuges verticaux lorsque cela est nécessaire. L'évacuation verticale qui est généralement mise en avant au Japon, pays avec un littoral en plaine.
La définition de la zone à évacuer effectuée et la stratégie d'évacuation privilégiée choisie vont permettre de mettre en avant des zones refuges, buts à atteindre par les individus pour leur mise en sécurité. Des itinéraires vont donc se dessiner. Dans le cas du plan d'évacuation en cas de tsunami en Figure 1, une accessibilité par un temps de parcours et une distance à parcourir a été définie. Des enquêtes ont été réalisées dans le cadre du programme Astarte avec une question sur l'itinéraire envisagé par la personne pour se mettre en sécurité. Les résultats mettent en avant qu'elle ne va pas par le plus court chemin et vers la zone refuge la plus proche mais plutôt vers un lieu qu'il a repéré ou dont il se souvient et qui peut être situé à proximité d'un élément marqueur de l'espace urbain (monument, perspective de rue..) (Lynch, 1960). De plus, cette idée se trouve renforcée par l'idée que le cheminement le plus court ne sera pas forcément praticable lors de l'évènement en cas de séisme précurseur.

4. Blue Line Project.

### *3.2. Accessibilité du parcours*

C'est dans cette démarche de prendre en compte l'itinéraire vers une zone refuge avec une accessibilité garantie en cas de séisme précurseur qu'une méthode a été mise en place pour diagnostiquer la probabilité d'effondrement d'une construction. Les résultats de ce diagnostic permettront d'intégrer une variable de praticabilité de l'itinéraire dans le modèle de simulation multi-agents.

#### *3.2.1. Diagnostic de vulnérabilité sismique*

La vulnérabilité sismique d'une construction correspond à la résistance de celle-ci en cas de secousse sismique. Elle est dépendante entre autres de la morphologie du bâtiment, des matériaux mis en œuvre et de leur mise en œuvre, mais également de l'état de la construction et des constructions mitoyennes ainsi que de la nature du sol.
La méthode de diagnostic des bâtiments mise en œuvre dans le cas de cette recherche est celle développée par Milan Zacek (Zacek, 2004). Elle permet l'évaluation d'un bâtiment existant avec les critères énoncés précédemment. Ce diagnostic permet de donner à chaque construction une classe de vulnérabilité. Ces dernières sont signifiées par les lettres de A à F, respectivement du plus vulnérable au moins vulnérable. De plus, dans le cadre de l'EMS98 [5], il existe des classes de dégâts, s'échelonnant de 1 à 5, respectivement du moindre dégât à l'effondrement total de la structure bâtie. Les dégâts des classes 4 et 5 qui sont l'effondrement partiel ou total d'une construction, pouvant obstruer un axe de circulation, seront ceux pris en compte dans le modèle. Le degré 3 concerne des effondrements ponctuels, pouvant conduire à une mise en danger des personnes mais pas obligatoirement à une obstruction de voie.
Dans un second temps, en fonction de sa classe en vulnérabilité et de la magnitude du séisme, seront définies les probabilités d'une construction de subir des dégâts d'une classe. Cela permettra de mettre en évidence les constructions plus vulnérables et susceptibles, par leur effondrement d'empêcher le passage sur un itinéraire en cas d'évacuation. En effet, un bâtiment subissant un effondrement partiel ou total, aura des gravats se répandant à son pied sur une zone périphérique correspondant à environ un tiers de sa hauteur (Zacek, 1996).

#### *3.2.2. Application et résultat du diagnostic*

Dans le cas de cette recherche, le diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti fut mis en place sur l'ile d'Ortigia à Syracuse. Cette évaluation se base sur les zones refuges isolées en cas de tsunami dans le plan d'évacuation (Figure 1) :

5. Echelle macro-sismique européenne.

la Piazza Archimede et la Piazza Duomo. Plus spécifiquement, les bâtiments diagnostiqués seront ceux au niveau du départ (ou arrivée) des rues débouchant sur les places. Ces rues étant donc considérées dans le plan d'évacuation comme les itinéraires permettant la mise en sécurité sur la place/zone refuge.
Ce qui ressort de la classification par vulnérabilité, c'est que la plupart des bâtiments sont anciens, souvent modifiés et en maçonnerie (type moellons et mortier) ce qui ne leur assure pas une résistance importante en cas de séisme. Ces constructions sont similaires à celles qui ont été détruites lors du séisme d'octobre 2016 en Italie, la magnitude de 6,5 étant quasiment identique à celle de séisme de référence de Syracuse de 1693. Les classes de vulnérabilité des bâtiments étant fixées, les probabilités d'effondrement (dommages de degrés 4 et 5) pour un tremblement de terre de référence de 1693 seront de 48.3% pour la Piazza Archimede et de 59.6% pour la Piazza Duomo, amenant une obstruction de la voirie (Figure 2).
Les deux zones refuges ont au moins 50% de chance de ne plus être accessibles [6] en cas d'évacuation pour un tsunami résultant d'un tremblement de terre précurseur, comme ce fut le cas en 1693. Cette variable de l'effondrement et de l'obstruction de voirie peut remettre en cause des itinéraires d'évacuation choisis si la mise en sécurité de la population n'est pas garantie. Inclure cette probabilité au modèle de simulation multi-agents devrait permettre de révéler de nouveau scénarios d'évacuation.

## 4. La mise en place du modèle multi-agents

La formalisation des paramètres énoncés précédemment a trouvé son sens sous une modélisation multi-agents. Cette méthode a déjà permis de simuler des évènements catastrophiques (Mas, Adriano, Koshimura, 2012) comme le 11 mars 2011 au Japon. Des chercheurs avaient modélisé des évacuations avant 2011 et ont pu affiner leur modèle suite à l'évènement (Mas, Suppasri *et al.*, 2012; Mas *et al.*, 2015). La mise en place d'un modèle permet l'implémentation d'un environnement avec les données SIG, de l'événement dynamique de l'eau ainsi que des individus sous forme d'agents. De plus, les variables de vitesse, de structure de la population, d'itinéraire et de praticabilité de l'espace urbain ont été intégrés dans cet environnement réactif et adaptatif. Les SMA permettent, par la définition de ces variables, la génération d'une multitude de scénarios d'évacuation.

6. La Piazza Archimede dispose d'une voie qui ne sera pas totalement encombrée, due à sa largeur et à la hauteur de son bati.

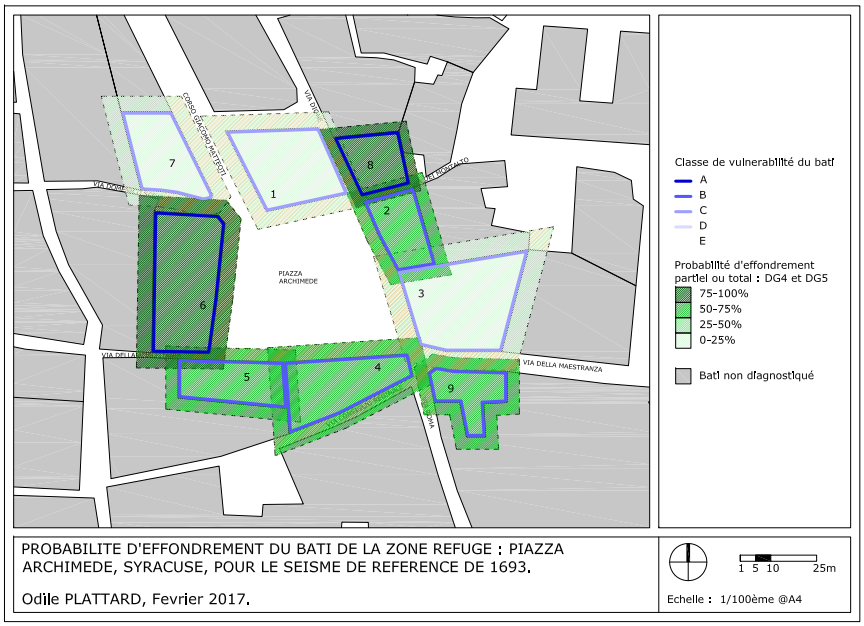


FIGURE *2. Plan de probabilité d'effondrement du bati pour le séisme de référence de 1693, Piazza Archimede, Syracuse. O. Plattard, septembre 2016.*

### *4.1. Les choix d'implémentation*

Le choix s'est porté sur Netlogo pour l'implémentation du modèle avec l'utilisation de l'extension GIS. Dans un premier temps, l'environnement a été implémenté avec le MNT afin d'obtenir les données d'altimétrie qui seront utiles pour l'évacuation vers un point plus élevé. Les autres données intégrées sont celles concernant les bâtiments; pour ces derniers, la hauteur des bâtiments est l'information principale pour déterminer les obstacles sur le chemin de l'évacuation ainsi que la zone d'encombrement en cas d'effondrement (Figure 3). Enfin, la voirie en tant que réseau n'est utilisée qu'en opposition avec les obstacles que sont les constructions. L'espace de voirie est donc de l'espace "libre" pour la circulation de l'évacuation avec ses contraintes de largeur, de visibilité et d'encombrement.

Le second élément indispensable dans cette modélisation est l'eau. Les données de vitesse et de hauteur d'inondation sont tirées de la modélisation du

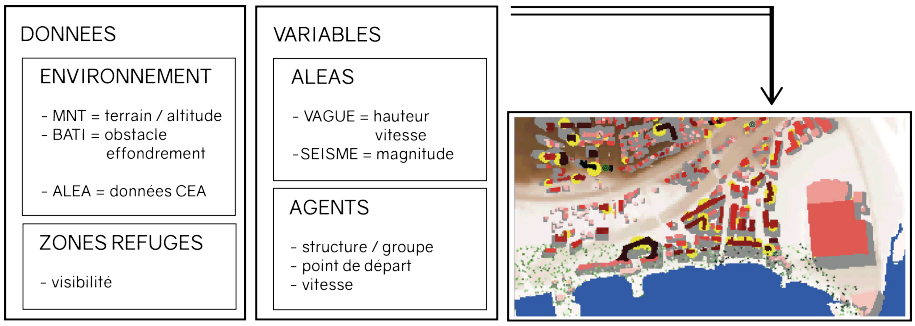


FIGURE *3. Données implementées à l'initialisation du modèle O. Plattard, avril 2017.*

CEA [7]. Elle est initialisée au niveau 0 avec comme paramètres initiaux le choix de la hauteur d'inondation et la vitesse de propagation.
En ce qui concerne les aléas, le risque sismique est intégré au modèle. Il peut toujours être choisi un scénario de tsunami sans séisme précurseur. Dans le cas d'un tremblement de terre, la magnitude sera définie. Il lui correspond une probabilité d'effondrement du bâti en fonction de la vulnérabilité expliquée précédemment. L'effondrement tient compte de la hauteur des bâtiments et pourra donc obstruer certaines rues.
Des zones refuges sont définies avec un élément marqueur qui permet de les voir de loin. Elles sont positionnées au départ. Les agents seront attirés vers la zone refuge la plus proche dès qu'elle se trouve dans leur champ de vision. Si la vision de la zone refuge leur est caché par un obstacle (bâtiment), l'agent cherchera son chemin jusqu'à savoir vers où fuir.
Enfin, les agents sont implémentés avec une localisation de départ située sur le front de mer, dans la zone à évacuer. Leur structure se base sur les données recueillies (vitesse, itinéraire, groupe...) dans les questionnaires réalisés sur place dans le cadre du programme Astarte. La population fuit à pied, une vitesse est définie au départ. Des groupes peuvent composer cette population; ils auront comme caractéristique de s'attendre les uns les autres et d'être liés dans l'incertitude. Le nombre d'individus et le nombre de groupes peuvent être choisi au départ. Les agents sont attirés par la zone refuge la plus proche d'eux à partir du moment qu'ils ne se trouvent pas derrière un obstacle et donc dans une zone

7. Modélisation des scénarios de vagues de tsunami dans le cadre du programme Astarte.Plusieurs scénarios sont modélisés basés sur les évènements passés comme les tsunamis de Boumerdès 2003 et Ligure 1887. La vague modélisée à des caractéristiques hydrodynamiques (vitesse, hauteur, déplacement) mais ne prend pas en compte l'inondation du territoire littoral.

d'incertitude. Ils fuient vers la zone refuge dès l'arrivée de la vague mais tentent également de fuir la vague si elle est proche d'eux. Les agents ne peuvent pas franchir les obstacles, propriétés ou bâtiments et les gravas obstruant une rue.

### *4.2. Le fonctionnement du modèle*

L'initialisation du modèle se fait par la mise en place de l'environnement, c'est à dire le relief par le MNT, les bâtiments et leur hauteur et l'eau. Vient ensuite la mise en place des zones refuges avec leurs hauteur et nombre, puis des agents, avec leurs nombre, vitesse et structure définie au préalable, qui identifient la zone refuge la plus proche d'eux.
Ensuite les choix pour les variables pour le scénarios sont effectués en définissant la vitesse et la hauteur de l'inondation pour le tsunami, la survenance d'un séisme précurseur ou non avec sa magnitude (l'effondrement étant une probabilité en fonction de la magnitude); l'effondrement des constructions et donc l'obstruction de certains itinéraires va survenir avant la mise en route de l'évacuation des agents.

La simulation va fonctionner sous forme de pas de temps. Lors d'un pas de simulation (Figure 4) :

- l'eau se propage par percolation en fonction de la vitesse choisie. La diffusion de proche en proche ne tient pas compte de la nature du sol et d'hydrodynamique liée à la topographie et aux obstacles. La vitesse initialisée au départ permettra la diffusion, un pas de distance étant de 5m,pour une vague arrivant à une vitesse de 5m/s (18km/h), une unité de distance sera contaminée par l'eau en un pas de temps.

- les agents vont se mettre en mouvement. Tout comme l'eau ils ont une vitesse de fuite définie au départ et vont se déplacer de l'unité de distance (5m) par pas de temps auquel correspond leur vitesse. Leurs déplacements suivent des règles de bons sens déjà utilisées dans d'autres travaux de déplacements piétons (Thalmann, Raupp Musse (2007) et Banos (2009)). Tous les agents ne vont pas se déplacer de la même manière en fonction de leur situation :

  - Ceux qui ont une visibilité de la zone refuge vont aller vers elle, en évitant les obstacles et rues obstruées, et s'y arrêteront une fois cet objectif atteint. Un agent qui atteint la zone refuge est considéré comme sauvé.

  - Ceux qui n'ont pas de visibilité de la zone refuge, errent en cherchant leur chemin. Une fois l'objectif visible ils y vont de la même manière que les autres agents.

  - Si un agent se fait rattraper par l'eau, lorsque celle-ci se trouve à une certaine distance, la priorité de l'agent devient celle d'échapper à l'eau (qui arrive plus vite que l'agent ne fuit) en essayant de rejoindre un point plus élevé que celui où il se trouve.

- Si un agent se trouve face à un obstacle ou une rue obstruée, il va chercher à contourner cet obstacle.

- Si un agent se fait rattraper par l'eau, il est considéré comme victime.

La simulation s'arrête lorsque plus aucun agent n'est en mouvement, c'est-à-dire qu'il est soit devenu victime, soit qu'il est parvenu à la zone refuge, et que l'eau a atteint son maximum d'inondation.

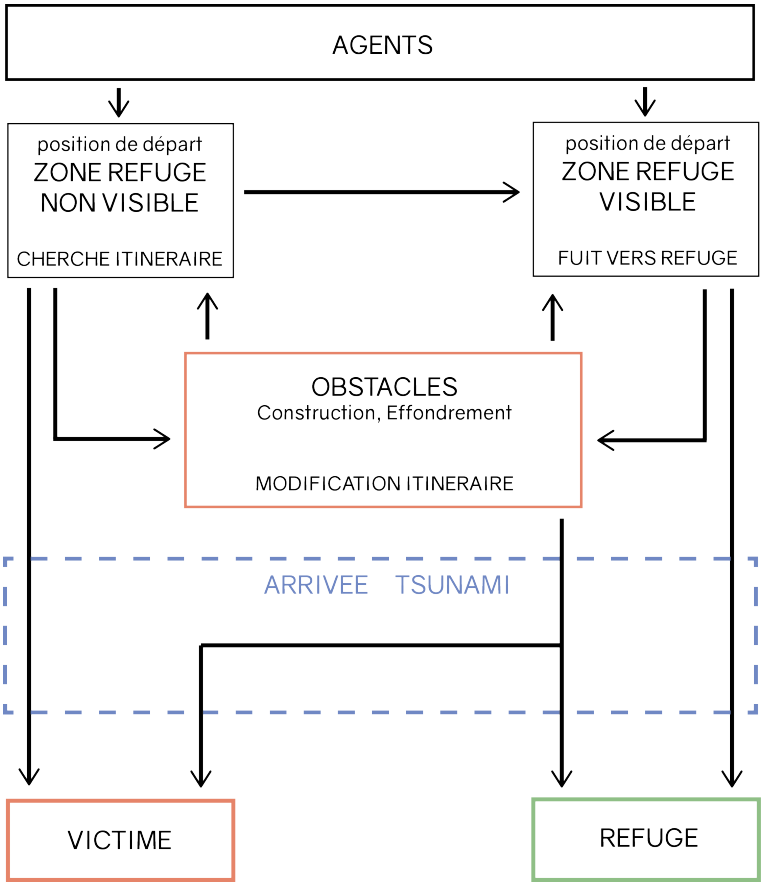


FIGURE *4. Processus d'un pas de temps du modèle. O. Plattard, avril 2017.*

### *4.3. Mise en place d'un protocole de scénarios*

Afin de mettre en avant l'apport d'une prise en compte du risque sismique dans le cas d'une modélisation d'évacuation de la population en cas de tsunami, un protocole mettant en avant différents scénarios et permettant de les comparer est mis en œuvre.

Les trois scénarios incluent des informations résultants des enquêtes effectuées sur le terrain pour permettre de mieux comprendre la structure de la population. De plus, les trois scénarios ont une population qui part en amont de l'arrivée de la vague, symbolisant une fuite avec alerte rapide ou vue des signes précurseurs de l'arrivée de la vague.

Le premier scénario se situe dans un modèle d'évacuation intégrant les variables concernant la population et la vague de tsunami (Figure 5. Scénario 1.). Il s'agira de la hauteur et vitesse de l'eau ainsi que de la vitesse et la structure de la population. La population fuit lors de l'approche de la vague en direction d'un point plus haut que celui où elle se trouve. Ce scénario correspond à une évacuation horizontale visant à sortir de la zone inondable avant d'être rattrapé par l'eau.

Le second scénario envisagé inclut des zones refuges (Figure 5. Scénario 2.). Il y aura les même variables que dans le premier scénario pour la vague et la population auxquelles s'ajouteront celles pour les zones refuges, c'est-à-dire leur nombre, situation et hauteur (signalétique). La présence de zones refuges amène la notion de visibilité de l'itinéraire durant l'évacuation. La position de départ de l'agent devient alors plus déterminante que dans le scénario précédent avec des zones de non-visibilité de l'itinéraire pour la mise en sécurité, ce qui amène l'agent a chercher son chemin. Les agents connaissant l'itinéraire ou ayant la visibilité de la zone refuge, sont attirés jusqu'à cet objectif.

Le troisième scénario reprend les mêmes variables que les deux précédents mais en incluant un aléa sismique précurseur de la vague (Figure 5. Scénario 3.). Les variables ajoutées sont donc celles de la survenance d'un tremblement de terre et sa magnitude. De cette dernière dépendra un effondrement du bati, probabilité construite sur une méthode d'analyse en vulnérabilité des bâtiments. Cette probabilité amènera l'obstruction de certaines voies obligeant donc l'individu à modifier son itinéraire. Il est cependant toujours attiré vers la zone refuge la plus proche dès qu'il en a la visibilité.

## 5. Les résultats envisagés et perspectives

Les premiers résultats tirés des scénarios précédemment cités permettent de mettre en avant l'importance de la multiplication des zones refuges afin de garantir une mise à l'abri de la majorité de personnes. Sur la zne concernée par le modèle, le passage de 2 zones refuges à 3 permet de réduire le nombre de victimes de plus de 15%. De plus, La visibilité de la zone refuge réduit d'autant plus le nombre de victime. Cependant, sur Saint Laurent du Var, la forte

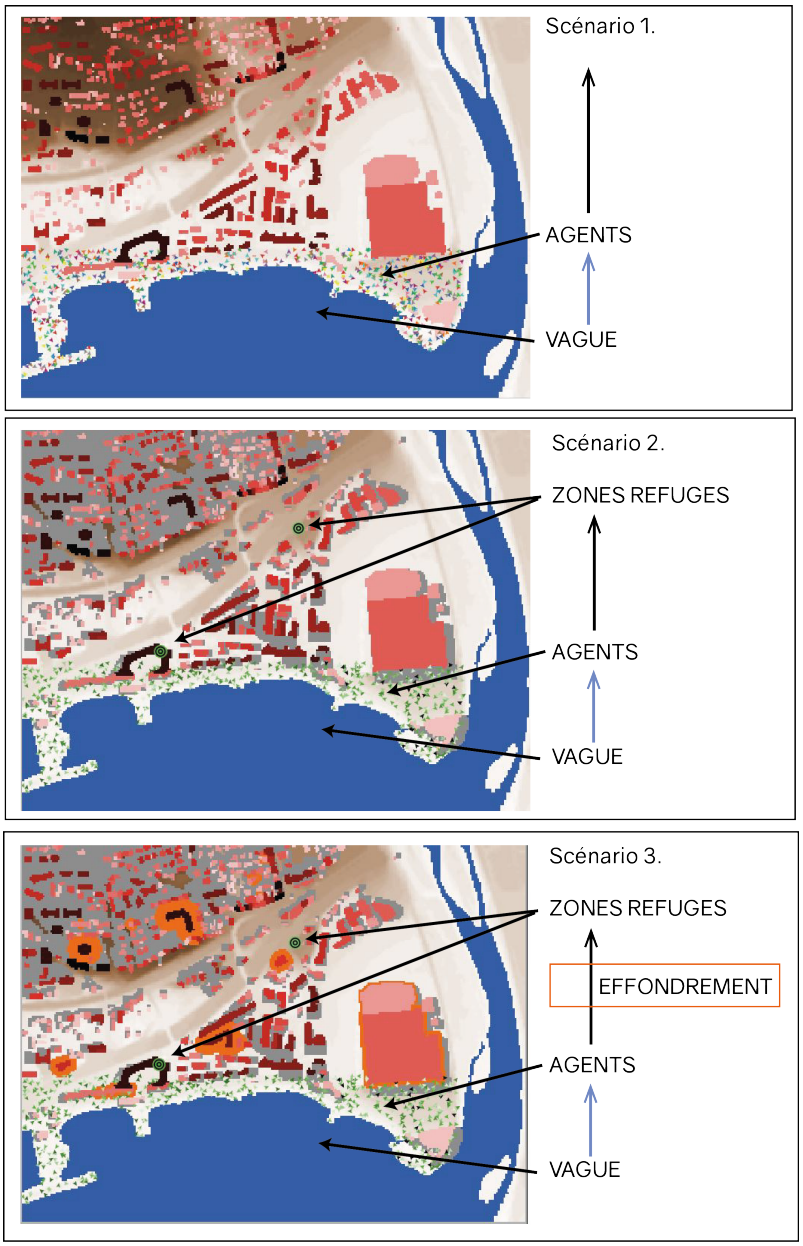


FIGURE 5. *Les 3 scénarios d'évacuation. O. Plattard, avril 2017.*

présence de propriétés privées le long de la plage ne permet pas une évacuation rapide et les agents se font rapidement rattrapés par la vague. Il n'y a donc pas de gêne supplémentaire marquée lors de l'effondrement de structures avec un séisme précurseur, les voies de circulation étant réduites et le manque de visibilité déjà importante.
A travers la prise en compte du risque sismique dans des scénarios d'évacuation en cas de tsunami, de nouvelles contraintes s'appliquent aux individus. Le choix de l'itinéraire d'évacuation devient plus complexe. En effet, le chemin le plus court n'est pas forcément le plus emprunté (par manque de visibilité) et franchissable (par potentielle obstruction). L'efficacité de la mise en sécurité des personnes et la méthode d'élaboration de plan d'évacuation par la mise en avant d'itinéraires de plus court chemin peut être remise en cause par les résultats de la modélisation; comme par exemple dans le cas énoncé de séisme de référence à Syracuse, une zone refuge étant accessible dans moins de 50% des cas devra peut-être être reconsidérée.
Les perspectives que peuvent ouvrir ces résultats remettant en cause les plans d'évacuations actuels n'incluant qu'un seul aléa. Les scénarios incluant le facteur de séisme précurseur du tsunami peuvent amener à repenser l'évacuation comme non plus seulement une fuite en avant face à l'eau qui inonde rapidement et violemment les terre; mais également comme une mise en sécurité verticale ou horizontale prenant en compte l'importance des constructions dans la mise en sécurité des personnes. La modélisation multi-agents se place donc comme outil privilégié pour repenser l'évacuation en milieu urbain. A travers la considération des constructions existantes, l'élaboration des plans d'évacuation pourra viser à combiner une proximité, visibilité et accessibilité d'une zone refuge.

## Bibliographie

Banos A., Arnaud et Paré. (2009). Simuler les déplacements de piétons dans une station de métro. une approche à base d'agents. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 19, n° 3, p. 277–302.

Imamura F., Muhari A., Mas E., Pradono M. H., Post J., Sugimoto M. (2012). Tsunami disaster mitigation by integrating comprehensive countermeasures in Padang City, Indonesia. *Journal of Disaster Research*, vol. 7, n° 1, p. 48–64.

IOC-UNESCO. (2013). *Glossaire sur les tsunamis* (UNESCO éd.) n° 85. Paris.

Lavigne F., Paris R. (2011). *Tsunarisque le tsunami du 26 décembre 2004 à aceh, indonesie*. Paris, Publications de la Sorbonne.

Leone F., Vinet F., Demain J.-C., 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, p. 77–90. (doi : 10.4000/geocarrefour.1501)

Lynch K. (1960). *The image of the city.* USA, The M.I.T. Press.

Mas E., Adriano B., Koshimura S. (2012). *An integrated simulation of tsunami hazard and human evacuation in La Punta, Peru.*

Mas E., Koshimura S., Imamura F., Supparsi A., Muhari A., 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, n° 12, p. 3409–3424. (doi : 10.1007/s00024-015-1105-y)

Mas E., Suppasri A., Imamura F., Koshimura S. (2012). 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, n° 1, p. 41–57.

Sahal A. (2011). *Le risque tsunami en france : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque.* Geography, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, Paris.

Supparsi A., Mas E., Charvet I., Gunasekera R., Imai K., Fukutani Y. *et al.* (2012). Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 great east japan tsunami. *Natural Hazards*, n° 66, p. 319–341. (doi : 10.1007/s11069-012-0487-8)

Supparsi A., Shuto N., Imamura F., Koshimura S., Mas E., Yalciner A. (2012). 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, p. 993–1018.

Thalmann D., Raupp Musse S. (2007). *Crowd simulation.* Paris, Springer.

Veyret Y. (2003). *Les risques.* Paris, Sedes.

Zacek M. (1996). *Construire parasismique. Risque sismique, conception parasismique des bâtiments, réglementation.* Marseille, Parenthèses.

Zacek M. (2004). *Évaluation de la présomption de vulnérabilité aux séismes des bâtiments existants.* les Grands ateliers de L'Isle-d'Abeau.