



HAL
open science

Exposition humaine, analyse et renforcement des capacités d'évacuation face aux tsunamis à Padang (Indonésie)

Henky Mayaguezz

► **To cite this version:**

Henky Mayaguezz. Exposition humaine, analyse et renforcement des capacités d'évacuation face aux tsunamis à Padang (Indonésie). Géographie. Université de La Rochelle, 2015. Français. NNT : 2015LAROS020 . tel-01373453

HAL Id: tel-01373453

<https://theses.hal.science/tel-01373453>

Submitted on 28 Sep 2016

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.



UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE

ÉCOLE DOCTORALE
GAY LUSSAC

Laboratoire LIENSs

THÈSE

présentée par :

Henky MAYAGUEZZ

soutenue le 10 décembre 2015
pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de La Rochelle
Discipline : GEOGRAPHIE

**EXPOSITION HUMAINE, ANALYSE ET RENFORCEMENT DES
CAPACITES D'EVACUATION FACE AUX TSUNAMIS A PADANG
(INDONESIE)**

JURY :

Virginie DUVAT-MAGNAN

Franck LAVIGNE

Laurent CHAPELON

Frédéric LEONE

Frédéric POUGET

Hélène HEBERT

Christine PLUMEJEAUD-PERREAU

Professeure, Université de La Rochelle, Présidente du jury

Professeur, Université Paris 1, Rapporteur

Professeur, Université Montpellier3, Rapporteur

Professeur, Université Montpellier3, Directeur de thèse

Maître de conférences, Université de La Rochelle, Directeur
de thèse

Ingénieure de Recherche - HDR, CEA/DASE

Ingénieure de Recherche, CNRS, Examinatrice

RESUME

Cette thèse résume une démarche intégrée visant à évaluer l'exposition humaine et ses variations spatio-temporelles en cas de tsunami dans une zone urbaine littorale en Indonésie, ainsi que la capacité d'évacuation vers des refuges. Ce travail de recherche systématise des méthodes permettant d'estimer la quantité de population présente heure par heure durant n'importe quel jour de la semaine et de l'année, à une échelle très fine, dans une zone urbaine. Il se fonde pour cela sur une hypothèse de rythme de vie contrôlant les activités et donc la distribution de la population. L'heure d'arrivée d'un tsunami étant imprévisible, ces informations sont très importantes pour améliorer les programmes de réduction du risque. Cette démarche permet ainsi de dégager des scénarios types de distribution de la population, utilisés pour ensuite évaluer la capacité d'évacuation de ces populations. Le modèle de simulation dynamique issu de cette recherche permet de mesurer l'accessibilité des zones selon certains scénarios, et de proposer des améliorations pour une meilleure préparation de la protection des civils.

MOTS-CLES : vulnérabilité, exposition humaine, capacité d'évacuation, tsunami, simulation, analyse spatio-temporelle.

ABSTRACT.

This dissertation summarizes an integrated approach whose aim is to assess the human exposure and its spatial and temporal variations in the event of a tsunami in a coastal urban zone of Indonesia, as well as the capacity to join evacuation shelters for populations under threat. This research systematizes methods to estimate the amount of people present hour by hour during any day of the week and the year, at a very fine scale, in an urban area. It uses a hypothesis about a common rhythm of life which controls the activities and therefore the distribution of the Padang inhabitants. Considering that time of a tsunami occurrence is impossible to estimate, this information is very important to improve risk reduction programs. This approach allows in particular identifying various types of scenarios for the distribution of the population that can then be used to evaluate the evacuation capacity of these populations. A dynamic simulation model resulting from this research allows for the measurement of the accessibility of shelters following these scenarios. The analysis of the results suggests improvements for a better preparation on the part of authorities to protect civilians.

KEYWORDS: vulnerability, human exposure, evacuation ability, tsunami, simulation, spatio-temporal analysis.



Thèse réalisée au Laboratoire LIENSs - UMR 7266
Bâtiment ILE
2, Rue Olympe de Gouges
17000 La Rochelle

Sous la direction de Frédéric LEONE frederic.Leone@univ-montp3.fr
Frédéric POUGET frederic.pouget@univ-lr.fr

Financement 2012 – 2013 : Erasmus Mundus Projet MOVER
2013 – 2015 : Université de La Rochelle (SRI, DREDE, IUAP)

Henky MAYAGUEZZ

henky.mayaguezz@univ-lr.fr

Septembre 2012 – Décembre 2015

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je remercie l'Erasmus Mundus Program « MOVER » pour le financement de la première année de thèse. Egalement grand merci aux trois établissements de l'Université de La Rochelle (SRI - Service des Relations Internationales ; DREDE - Direction Recherche, Études Doctorales, Europe ; IUAP – Institut Universitaire Asie Pacifique) qui ont assuré le financement de thèse jusqu'à la troisième année.

Des remerciements très appuyés aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail de thèse. Je tiens à présenter mes sincères remerciements au Professeur Virginie DUVAT-MAGNAN d'avoir accepté de présider mon jury de thèse. Je remercie les Professeurs Franck LAVIGNE et Laurent CHAPELON pour avoir accepté de rapporter sur ce manuscrit de thèse, et pour les conseils prodigués. Je tiens également à remercier les Docteurs Hélène HEBERT et Christine PLUMEJEAUD-PERREAU pour avoir accepté de participer au jury en tant qu'examinatrices.

Le remerciement suivant revient bien justement à mes directeurs de thèse, le Professeur Frédéric Leone et le Docteur Frédéric Pouget pour leur gentillesse, leurs relectures et surtout pour m'avoir permis de réaliser mon travail dans les meilleures conditions possibles. Également grand merci à Christine PLUMEJEAUD-PERREAU qui m'a guidé pour traiter de volumineuses données spatio-temporelles. Les mots me manquent pour exprimer ma gratitude.

Je souhaite également remercier la direction du LIENSs et ses équipes pour leur accueil et leur soutien pendant ces trois dernières années. Un grand merci à tous ceux que j'ai pu rencontrer au LIENSs, bâtiment ILE, durant ces trois années.

Je profite de ces remerciements pour avoir une pensée pour ceux avec qui j'ai pu travailler et échanger depuis le début cette thèse : ingénieurs de recherche, doctorants, ATER, post-docs, assistants et tous les amis. Il est difficile de tous les citer ici sans oublier quelqu'un, mais j'ai une pensée pour vous tous.

À mes parents, mes frères et mes sœurs qui m'ont toujours soutenu et apporté leur moral depuis le territoire avec la distance de milles kilomètres.

À tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenu durant cette thèse.

C'est avec émotion que je conclus ces remerciements pour ma femme (Ima) et mes trois enfants (Cahya, Rahma et Adam) qui m'ont soutenu avec un très grand d'amour et ont prié avec patience. Vous êtes tous mes énergies pour terminer cette thèse.

Table des matières

Introduction générale	21
Partie 1. Le risque tsunami en Indonésie : états des connaissances et de la prévention ...	25
Chapitre 1. Le tsunami, un aléa naturel très probable en Indonésie	27
1.1. Source et genèse d'un tsunami	27
1.1.1. Tsunamis générés par des séismes	29
1.1.2. Tsunami généré par les activités volcaniques.....	31
1.1.3. Tsunami généré par les glissements de terrains.....	31
1.2. Propagation et mesure des effets à la côte.....	32
1.3. Probabilité temporelle de déclenchement d'un tsunami	34
1.4. Synthèse de la connaissance historique de l'aléa tsunami en Indonésie (Sumatra, Padang)..	34
1.5. Risque de futurs tsunamis à Padang	40
1.6. Description de Padang	41
Chapitre 2. Comment renforcer les capacités d'évacuation face aux tsunamis	45
2.1. La gestion du risque de tsunami en Indonésie : état des lieux	45
2.1.1. <i>Le système d'alerte aux tsunamis (Tsunami Early Warning System - TEWS)</i>	45
2.1.2. <i>La prise en compte de la gestion des risques de catastrophes appropriée par la communauté.</i>	52
2.2. Préparation des évacuations	53
2.2.1. <i>Détermination la zone d'inondation du tsunami</i>	53
2.2.2. <i>Carte d'évacuation</i>	55
2.3. Planification des évacuations	56
2.3.1. <i>Principe du plan d'évacuation</i>	56
2.3.2. <i>Accessibilité des zones refuges</i>	57
2.4. Zones refuges	59
2.5. Vitesses de déplacement	62
Chapitre 3. La nécessité d'une méthode d'évaluation spatio-temporelle de l'exposition humaine 65	
3.1. Evaluation des enjeux humains	65
3.1.1. <i>La vulnérabilité humaine</i>	66
3.1.2. <i>La vulnérabilité structurelle</i>	68
3.2. Interaction entre aléa et enjeux	69
3.2.1. <i>Résistance des enjeux structuraux face à l'aléa tsunami</i>	69

3.2.2. Capacité de survie des individus à l'intérieur de bâti et nécessité de prendre en compte des niveaux de protections structurelles.	71
3.2.3. Capacité de survie des individus et l'importance de la prise en compte des débris flottants dans l'interaction aléa/enjeux.	73
3.3. Méthode de l'enquête dynamique des enjeux humains	75
3.3.1. Dynamique de la population intra urbaine et approche d'évaluation de vulnérabilité humaine.	75
3.3.2. Adaptation de la méthode Leone et al. à d'évaluation dynamique des enjeux humains à Padang.	76
3.3.3. Méthode de comptage des courbes de fréquentation humaine.....	78
Partie 2. Caractérisation spatio-temporelle de l'exposition humaine à Padang	81
Chapitre 4. Caractérisation de l'exposition humaine	83
4.1. Détermination de la zone d'étude	83
4.2. Hypothèses guidant l'enquête : rythmes de vie et fonctions des espaces	84
4.2.1. Rythmes de vie	84
4.2.2. Classification fonctionnelle des zones à enquêter	88
4.2.3. Repérage et vectorisation des zones à enquêter	92
4.3. Organisation de la collecte d'information sur le terrain	93
4.3.1. Qualification du bâti	94
4.3.2. Qualification des zones de plein air	98
Chapitre 5. Evaluation spatio-temporelle des enjeux humains	101
5.1. Capacité d'Accueil Maximale Crédible (CAMC)	101
5.1.1. CAMC des bâtiments.....	101
5.1.2. CAMC des espaces de plein air.....	104
5.1.3. CAMC des voies de communication	104
5.2. Variations du taux de fréquentation humaine	105
5.2.1. Méthode de comptage.....	106
5.2.2. Variation du nombre total de population dans la zone d'étude	111
5.2.3. Cartographie spatio-temporelle de la densité humaine	115
Chapitre 6. Cartographie multi-temporelle de l'exposition au risque	123
6.1. Principe du calcul des indices de risque	123
6.2. Cartes de probabilité de décès (pd) et répartition temporelle des personnes par niveau de pd. 124	
6.3. Construction des scénarios par l'analyse des variations des taux d'occupation.	126
6.4. Cartographie spatio-temporelle de l'indice de risque humain	128

6.4.1. Indice de risque humain durant la nuit (SC-1).....	129
6.4.2. Indice de risque humain durant 1 jour ouvrable à (10h) classique et de Ramadan (SC-2 et SC-5)	130
6.4.3. Indice de risque humain durant le vendredi midi (SC-3)	132
6.4.4. Comparaison des indices de risque humain durant le Week-end à (18h) classique et le Ramadan à (18h) (SC-4 et SC-6).....	133
6.4.5. Indice de risque humain durant le Ramadan à 20H (SC-7)	135
6.4.6. Indice de risque humain durant les vacances de l'Aïd à 18h (SC-8).....	136
Partie 3. Renforcement des capacités d'évacuation.....	139
Chapitre 7. Identification de zones refuges en cas d'évacuation.....	141
7.1. Définition d'une zone refuge	141
7.2. Les critères de sélection des zones refuges verticales	145
7.3. Hiérarchisation des zones refuges sélectionnées	148
7.3.1. Principe de hiérarchisation	148
7.3.2. Résultat	150
Chapitre 8. Mesure de l'accessibilité des zones refuges et simulation d'évacuations.....	153
8.1. Modalités d'évacuation et critères de friction	153
8.2. Mesures de vitesses de déplacement pédestre <i>in situ</i>	155
8.3. Modélisation d'évacuation pédestre et calcul de l'accessibilité au moyen de graphe.	159
8.3.1. Construction du graphe routier.....	161
8.3.2. Utilisation de Pg_routing	165
8.3.3. Utilisation de l'algorithme de Dijkstra (a-star)	167
8.4. Application à l'étude de l'accessibilité pédestre de Padang.	168
8.4.1. Création des chemins possibles et de l'évacuation résultante.....	170
8.4.2. Evacuation simultanée.....	173
8.4.3. Evacuation échelonnée.	178
Chapitre 9. Analyse de la capacité d'évacuation suivant divers scénarii.....	189
9.1 Les variables des scénarii	189
9.2 Restitution graphiques des résultats.....	190
9.3. Analyse des résultats	193
9.3.1. Problèmes posés par l'organisation d'une évacuation en conditions actuelles.....	194
9.3.2. Analyse d'accessibilité de zones refuges pour les différents scénarios.....	201

Partie 4. Discussions et recommandations	225
Chapitre 10. Recommandations générales pour renforcer la préparation face au risque tsunami à Padang	227
10.1. La mise en place de zones refuges supplémentaires.	227
10.1.1. <i>La capacité d'accueil de la zone refuge requise</i>	227
10.1.2. <i>Implantation de zones refuges supplémentaires.</i>	227
10.2. Prescription d'une priorité aux personnes les plus vulnérables.	232
10.3. Combinaison des propositions de zones refuges supplémentaires et d'évacuation différenciée	235
10.4. Plan d'évacuation	239
10.5. Route d'évacuation	245
10.6. La préparation de la mise en sûreté de la population	246
10.6.1. <i>L'alerte des populations</i>	246
10.6.2. <i>Les exercices « grandeur nature ».</i>	248
Chapitre 11. Discussion : apports, limites et perspectives d'amélioration	251
11.1. Evaluation de la répartition spatio-temporelle de l'exposition humaine	251
11.1.1. <i>Originalité de l'approche</i>	251
11.1.2. <i>Synthèse des résultats</i>	253
11.1.3. <i>Limites de l'approche</i>	254
11.2. Evaluation de la capacité d'évacuation des populations	257
11.2.1. <i>Description de la méthode</i>	257
11.2.3. <i>Limites de l'approche</i>	258
11.3. Renforcement des capacités d'évacuations	261
11.3.1. <i>Nouvelles connaissances apportées</i>	261
11.3.2. <i>Perspectives d'intégration des résultats dans un programme de réduction du risque</i> ... 262	
BIBLIOGRAPHIE	265

Table des figures

Figure 1. Sources de tsunamis avérés de -2000 à 2014 selon NOAA/NGDC.	28
Figure 2. Le tsunami sur son chemin vers la côte (UNESCO 2009).	33
Figure 3. L'impact du tsunami sur la côte et mesures caractéristiques (UNESCO, 2009).....	33
Figure 4. Section transversale à travers la frontière de la plaque de Sumatra qui montre l'accumulation et le soulèvement des pressions associées à la subduction. (a) Relation de subduction entre une plaque (à gauche) vers la plaque supérieure (à droite). Le gris foncé indique la partie de verrouillage de « megathrust » entre les deux plaques. (b) Comme le « megathrust » est bloqué dans cette partie, le bloc principal est pressé et entraîné vers le bas durant des décennies ou des siècles jusqu'à l'apparition d'un grand séisme. (c) un mouvement rapide peut libérer des énergies accumulées au fil des siècles provoque un grand séisme qui peut élever des îles et déclencher un tsunami. « Extrait de (Sieh 2007) »	35
Figure 5. Contexte structurel actif des grands séismes historiques de la frontière de plaque de Sumatra oblique convergente. Source : (Chlieh et al. 2008).	36
Figure 6. Cartes des soulèvements de fonds de mer lors du séisme de 1797 montrant que le soulèvement varie aussi élevée que d'environ 80 cm (gauche) et de 1833 montrant qu'une grande région a été soulevée entre 1 et 2 m (droite).	37
Figure 7. Cadre tectonique et sismique de la section Mentawai sur le Sunda Megathrust.	39
Figure 8. Les grands événements tectoniques à l'ouest de l'île Sumatra (Satake, et al. 2013)	40
Figure 9. Situation de Padang face à l'Océan Indien en Indonésie.	42
Figure 10. Coordination des capteurs du système GITEWS (Fleischer et al. 2010)	47
Figure 11. Emplacements de GPS GITEWS en Indonésie (Stations de référence en temps réel GPS (triangles verts), GPS à marégraphes (carrés jaunes), bouées avec GPS (cercles rouges) (Falck et al. 2010).	48
Figure 12. Architecture du système d'alerte et d'atténuation (EWMS).). Source : (Steinmetz et al. 2010)	49
Figure 13. Processus de réaction et de l'estimation du temps d'arrivée du tsunami. Source : (Strunz et al. 2011)	51
Figure 14. Carte d'inondation (issue des travaux de Schlurmann et al., 2010).	54
Figure 15. Carte d'évacuation officielle de tsunami à Padang. Adaptée de Imamura et al (2011).	56
Figure 16. Signalétique officielle « tsunami » adoptée par l'UNESCO (norme ISO 20712-12 : 2008) 59	
Figure 17. Emplacement de zones refuges verticales optimisé en fonction de la distance entre elles. Les flèches indiquent les itinéraires prévus vers les zones refuges verticales (FEMA 2008 ; 2012).....	60
Figure 18. Une zone refuge verticale de type école à Padang (Photo de Henry Mayaguezz, 15092013).	62
Figure 19. Modèle conceptuel du système vulnérable selon Leone [2007].	65
Figure 20. Classification du bâti indonésien selon 5 classes de vulnérabilité décroissante (Leone, 2007).	68
Figure 21. Typologie des dommages sur les bâtiments. Source : adapté de Leone (2007).....	70
Figure 22. Courbes de vulnérabilité de 5 classes de bâtiments (A, B, C, D, E) exprimant le niveau moyen des dommages (D0 à D5) en fonction de la hauteur de submersion d'un tsunami. Source : extrait de Leone et al. (2010).....	70

Figure 23. Rapport entre probabilité de dommage (damage probability), profondeur d'inondation (inundation depth) et vitesse de courant (current velocity). Source : extrait de Koshimura et al. (2009).	71
Figure 24. Matrice de probabilité de décès (Pd) des personnes se trouvant à l'intérieur du bâti proposé par Leone et al. (2012).	73
Figure 25. Limites de déplacements des personnes en fonction de la hauteur et de la vitesse de courant (Baladès, 2004).	74
Figure 26. Matrices de probabilité de décès (Pd) des personnes se trouvant à l'extérieur (variation en fonction des densités de débris potentiels flottants).	75
Figure 27. La zone d'étude à enquêter définie par le modèle d'inondation proposé par Taubenböck (2009).	83
Figure 28. Typologie des classes fonctionnelles principales des espaces bâtis.	90
Figure 29. Typologie des fonctions similaires de bâtis groupées.	90
Figure 30. Typologie des classes fonctionnelles des espaces de plein air.	91
Figure 31. Typologie des classes fonctionnelles des voies de communication.	92
Figure 32. La vectorisation des polygones bâtis en couleur jaune sur l'image satellite avant le travail sur le terrain (gauche). Les polygones rouges avec leur code après la validation terrain (droite).	93
Figure 33. Formation théorique et pratique en 2013 (en haut) et en 2014 (bas) du protocole d'enquête/diagnostic.	94
Figure 34. Typologie de vulnérabilité structurelle du bâti à Aceh et à Padang.	95
Figure 35. Classes de vulnérabilité structurelle du bâti.	95
Figure 36. Localisation des bâtiments ayant au moins une grande ouverture au rez-de-chaussée.	96
Figure 37. Nombre d'étages des bâtiments.	97
Figure 38. Densité de débris potentiels flottants.	98
Figure 39. Exemple de secteur à forte présence de débris potentiels flottants : sur une voie de communication et sur le port.	99
Figure 40. Phase de préparation de l'analyse de l'exposition humaine.	100
Figure 41. CAMC des espaces de la zone d'étude. Les cercles bleus sont les CAMC de bâtiments, les cercles verts sont les CAMC des espaces de plein air et les cercles oranges sont les CAMC des voies).	105
Figure 42. Le site de prise des photos sur la plage présentant une large zone de couverture. Les photos journalières durant le dimanche 07h (haut à gauche) ; 11h (haut à droite) ; 15h (bas à gauche) ; 17h (bas à droite).	106
Figure 43. Collecte des données de vulnérabilité humaine et structurelle.	108
Figure 44. Traitement des données sous Excel et PostgreSQL pour construire la modélisation spatio-temporelle de l'exposition humaine.	109
Figure 45. Diagramme de structure de la base de données sous PostgreSQL.	110
Figure 46. Exemple de courbes de fréquentation horaire pour 7 classes de jours. Sur le côté gauche sont présentés les courbes d'occupation durant la période classique (ligne bleue : du lundi au jeudi; ligne verte : vendredi; ligne rouge : week-end). Sur le côté droit sont les courbes d'occupation pendant la période du Ramadan (ligne pointillée bleue : du lundi au jeudi; vert pointillé : vendredi; ligne rouge en pointillés : Week-end). La ligne noire sur le côté droit est la courbe d'occupation durant les vacances (l'Aïd) après Ramadan.	112
Figure 47. Taux de fréquentation diurne sur le taux de fréquentation maximum en carrefour secondaire pendant le lundi et les vacances de l'Aïd	113

Figure 48. Intersection secondaire au lundi 07h (à gauche) et dans la fête de l'Aïd 18h (à droite)...	113
Figure 49. Nombre de personnes par classes temporelle sur 24 heures.	114
Figure 50. Taux de fréquentation de différentes fonctions de bâtis sur le groupe de travail.	115
Figure 51. Modélisation du nombre d'individus de chaque espace le week-end à 18h.....	116
Figure 52. Comparaison des densités humaines pour 2 moments de la journée du lundi pendant la période classique (02h au dessus ; 10h au dessous).	117
Figure 53. Comparaison des densités humaines pour 2 moments de la journée du lundi pendant la période classique (18h au dessus ; 22h au dessous).	118
Figure 54. Carte montrant la différence de densité humaine des bâtiments entre le vendredi 12h et le lundi 12h pendant la période classique pour tous les bâtiments.	120
Figure 55. Carte montrant la différence de densité humaine dans les bâtiments entre le lundi 10h pendant la période classique et le lundi 10h pendant la période du Ramadan.	121
Figure 56. Carte montrant la différence de densité humaine dans les bâtiments entre le week-end 18h pendant la période du Ramadan et le week-end 18h pendant la période classique.	122
Figure 57. Traitement automatisé des données de vulnérabilité et d'exposition conduisant au calcul d'un index spatio-temporel de risque humain.	124
Figure 58. Probabilité de décès sur la zone d'étude. Partie nord (à gauche) ; partie sud (à droite)..	124
Figure 59. Répartition temporelle des enjeux humains par niveau de probabilité de décès.....	126
Figure 60. "Box plot" comparant les variations de taux d'occupation pour les différentes activités	127
Figure 61. Répartition spatiale d'indice de risque humain au lundi 02h.	129
Figure 62. L'IRh pour la journée type à 10h pendant la période classique et Ramadan.	130
Figure 63. L'IRh le vendredi 12h pendant la période classique.	132
Figure 64. L'IRh le week-end à 18h pendant la période classique.....	133
Figure 65. L'IRh le week-end 18h pendant la période du Ramadan.	134
Figure 66. L'IRh le week-end, le soir à 20h pendant la période du Ramadan.	135
Figure 67. L'IRh pendant les vacances de l'Aïd à 18h.	136
Figure 68. La plage, une destination de loisir pendant les vacances de l'Aïd.....	137
Figure 69. Localisation des zones refuges à Padang sur la zone inondée modélisée.	142
Figure 70. Zone refuge verticale de type "école" ayant un toit destiné à accueillir les personnes évacuées.	144
Figure 71. Indice de qualité des zones refuges verticales potentielles.	151
Figure 72. Itinéraires suivis pour modéliser les vitesses pédestres pendant les heures creuses et heures pleines.	156
Figure 73. Typologie descriptive des voies de communication et les vitesses de déplacements pédestres associées (calculées et estimées) pour la modélisation.	158
Figure 74. Schéma de réseau d'évacuation (extrait de Lämmel, 2011).....	161
Figure 75. Les données voie.edge_data du graphe routier dans PostgreSQL.	164
Figure 76. Les données de voie.node et voie.relation.	164
Figure 77. Vue du graphe avec les noeuds et les arcs étiquetés avec leurs identifiants. Les rectangles correspondent à la table voie.face.	165
Figure 78. Le schéma du réseau créé en structure d'arc_noeud (extrait du manuel de <i>Pg_routing</i>).	167
Figure 79. Le chemin depuis le nœud 1206 jusqu'au 1217 en suivant les nœuds en étoile rouge.	168
Figure 80. Le processus de cheminement depuis le point de départ jusqu'au point d'arrivée.....	169
Figure 81. Couverture spatiale des refuges pour un scénario donné.....	175

Figure 82. Disposition des refuges verticaux et temps d'accès depuis chaque bâtiment.	176
Figure 83. Remplissage des refuges 1 et 2 en fonction des différents scénarios.	176
Figure 84. Les bâtiments dans la couverture des zones refuges horizontaux (à gauche) et leurs temps de parcours (à droite).	177
Figure 85. Un exemple de remplissage des refuges horizontaux 1 et 2 pour différents scénarios.	178
Figure 86. Changement de couverture des refuges en fonction de temps de départ d'évacuation.	186
Figure 87. Un exemple de courbe d'accessibilité d'évacuation échelonnée des zones refuges pour le lundi matin vers 10h.	187
Figure 88. Synthèse des étapes méthodologiques conduisant à l'élaboration de scénarios d'accessibilité des zones refuges.	190
Figure 89. Méthode de calcul de temps d'accès moyen par objet.	192
Figure 90. Comparaison des temps d'accès moyen par refuge, pour l'ensemble des scénarios.	195
Figure 91. Courbe de remplissage des refuges horizontaux, dans le cas du scénario Lundi-Jeudi, 10H.	196
Figure 92. Croisement entre quantité de population à sauver, et pertes, différenciées suivant leur cause.	198
Figure 93. Courbes de remplissage des refuges OK du scénario 2 (L-J à 10h00).	199
Figure 94. Courbes de remplissage des refuges NOK du scénario 2 (L-J à 10h00).	199
Figure 95. Carte de synthèse sur la qualité des refuges pour l'évacuation dans le cas du scénario 2 (Lundi-Jeudi 10h00).	200
Figure 96. Carte de densité de population et de position des refuges. Scénario nocturne (L-J, 02H).	202
Figure 97. Carte des temps d'accès moyen aux refuges. Scénario nocturne (L-J, 02H).	203
Figure 98. Temps d'accès moyen aux refuges. Scénario nocturne (L-J, 02H).	204
Figure 99. Couverture dynamique des zones refuges et temps d'accès nocturne 02h.	205
Figure 100. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 1.	206
Figure 101. Scénario classique du jour ouvrable (L-J, 10H).	207
Figure 102. Temps d'accès moyen aux refuges. Scénario classique du jour ouvrable (L-J, 10H).	208
Figure 103. Couverture dynamique des zones refuges et temps d'accès un jour ouvrable, L-J 10h.	209
Figure 104. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 2.	210
Figure 105. Scénario classique du Vendredi, 12H. A gauche : carte de densité de population et de position des refuges. A droite : carte des temps d'accès moyen aux refuges.	211
Figure 106. Temps d'accès moyen aux refuges. Scénario classique du moment de la prière le Vendredi, 12H.	211
Figure 107. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 3.	212
Figure 108. Scénario du week-end classique à 18H. A gauche : carte de densité de population et de position des refuges. A droite : carte des temps d'accès moyen aux refuges.	213
Figure 109. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 4.	214
Figure 110. Scénario du ramadan en semaine à 10H. A gauche : carte de densité de population et de position des refuges. A droite : carte des temps d'accès moyen aux refuges.	215
Figure 111. Temps d'accès moyen aux refuges. Scénario du Ramadan en semaine, à 10H.	215
Figure 112. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 5.	216
Figure 113. Scénario du Ramadan le week-end à 18H. A gauche : carte de densité de population et de position des refuges. A droite : carte des temps d'accès moyen aux refuges.	217
Figure 114. Temps d'accès moyen aux refuges. Scénario du Ramadan le week-end, à 18H.	217

Figure 115. Couverture dynamique des zone refuges et temps d'accès le WE durant le Ramadan à 18h.	218
Figure 116. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 6.....	219
Figure 117. Scénario du Ramadan le week-end à 20H. A gauche : carte de densité de population et de position des refuges. A droite : carte des temps d'accès moyen aux refuges.....	220
Figure 118. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 7.....	221
Figure 119. Scénario de Fête à 18H. A gauche : carte de densité de population et de position des refuges. A droite : carte des temps d'accès moyen aux refuges.	222
Figure 120. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 8.....	223
Figure 121. Différence des temps d'accès moyen entre la situation incluant deux nouveaux refuges 38 et 39 (en bleu) et la situation initiale pour le scénario 2.	229
Figure 122. Comparaison de temps d'accès moyen durant le SC2 entre la situation initiale et la situation avec la proposition de deux nouveaux refuges.	230
Figure 123. La comparaison de la courbe d'accessibilité durant le SC2 entre la situation initiale et la situation avec la proposition de deux nouveaux refuges.	231
Figure 124. Différence des temps d'accès moyen entre une évacuation différenciée suivant l'activité des personnes et une évacuation sans prescription pour le scénario 2.....	233
Figure 125. Comparaison de temps d'accès moyen par refuge durant le SC2 entre la proposition d'une évacuation différenciée et non différenciée.	234
Figure 126. Comparaison des courbes d'accessibilité durant le SC2 entre la situation initiale et la simulation proposant une évacuation différenciée suivant les activités des personnes.	235
Figure 127. Différence des temps d'accès moyen entre une évacuation incluant deux refuges 38 et 39 (en bleu cercle) et une prescription pour une évacuation différenciée, vis-à-vis d'une évacuation sans option pour le scénario 2.	236
Figure 128. Comparaison de temps d'accès moyen durant le SC2 entre la situation initiale et la situation avec la proposition de deux nouveaux refuges et d'une évacuation différenciée.....	237
Figure 129. Comparaison de la courbe d'accessibilité durant le SC2 entre la situation initiale et une simulation proposant deux nouveaux refuges et une évacuation différenciée.....	238
Figure 130. Comparaison de la courbe d'accessibilité durant le SC2 entre la situation initiale, la situation avec la proposition de deux nouveaux refuges, et la situation avec toutes les propositions.	239
Figure 131. La couverture spatiale des refuges ne correspond pas aux secteurs divisés par les voies (en haut). Carte des secteurs délimités par les voies (en bas).	240
Figure 132. Le schéma de direction d'évacuation autorisé.	241
Figure 133. Exemples de carte d'évacuation par secteur.	242
Figure 134. Les refuges choisis en fonction du temps de réaction et du nombre de personnes dirigées.....	243
Figure 135. Plan d'évacuation du secteur 13.....	243
Figure 136. Les courbes d'accessibilités avec 100 itérations pour le scénario 2 (L-J : 10h).....	245
Figure 137. Les voies les plus utilisées durant les évacuations.	246
Figure 138. Une des sirènes de tsunami à Padang située sur une des zones refuges verticales.	247
Figure 139. Un exemple des exercices d'évacuation grandeur nature à Padang (Photos de Henky Mayaguezz, 29082013).	249
Figure 140. Méthode d'évaluation de la répartition spatio-temporelle de l'exposition humaine.....	253
Figure 141. Les sources de génération possible de tsunami. (Extrait de Taubenböck et al, 2009)	255

Figure 142. Les refuges dépassent leur capacité maximale (100%) 259

Liste des tableaux

Tableau 1. Données historiques des évènements tsunamis meurtriers dans la région de l'océan Indien (y compris l'Australie occidentale et Indonésie Occidentale /Région 60), Entre 1600 et 2015.	29
Tableau 2. Tsunamis déclenchés par des glissements sous-marins sur le territoire Indonésien et ses alentours.	32
Tableau 3. La définition actuelle de niveaux d'alerte (Source : Steinmetz et al. 2010)).	50
Tableau 4. Les différentes vitesses selon la condition de déplacements (Source : <i>Japan Institut for safety and Disaster Preparadness</i> (1987), Sugimoto et al (2003)).	63
Tableau 5. Principaux facteurs de vulnérabilité humaine (individu) et critères d'évacuations associés.	66
Tableau 6. Seuils de destruction totale des bâtiments selon leur classe de vulnérabilité structurelle. Source : adapté de Leone et al. (2012) et Koshimura et al. (2009).	71
Tableau 7. Nomenclature des jours d'enquête.	88
Tableau 8. Typologie des différentes classes fonctionnelles des espaces de vie à Padang.	89
Tableau 9. Méthodes de calcul du nombre d'individu moyen par ménage et de densité humaine théorique.	102
Tableau 10. Méthode de calcul des densités humaines théoriques et des effectifs des espaces bâtis.	103
Tableau 11. Méthode de calcul des densités humaines théoriques et des effectifs des espaces de plein air.	104
Tableau 12. Méthode de calcul des densités humaines théoriques des espaces de voies de communications.	104
Tableau 13. Les taux de fréquentations humaines dans la zone d'étude selon le groupe de classe fonctionnelle, pour les 8 scénarios choisis.	128
Tableau 14. Zones refuges verticales potentielles.	143
Tableau 15. Hiérarchisation multi-critères des zones refuges verticales potentielles en fonction de leur qualité.	150
Tableau 16. Vitesses pédestres établies expérimentalement ou estimées à Padang.	156
Tableau 17. Le calcul de la vitesse de déplacement pédestre selon la largeur de voie.	159
Tableau 18. Récapitulatif du niveau de résistance des bâtiments.	194
Tableau 19. Récapitulatif du niveau de remplissage des zones refuges, en fonction des scénarios.	197
Tableau 20. Synthèse de l'accessibilité des évacuations en fonction des scénarios.	198

Introduction générale

L'Indonésie est un pays fréquemment associé à la notion de catastrophe naturelle et en particulier au phénomène de type tsunami. Bien que des tsunamis se soient produits en Indonésie plusieurs fois avant l'année 2004, cet aléa n'avait jusqu'à cette date pas attiré l'attention de manière marquée. Le tsunami du 26 décembre 2004, de par l'ampleur des dégâts et le nombre important de victimes qu'il a causé, a vraiment provoqué une véritable onde de choc auprès des populations à l'échelle de la planète entière (Lavigne et Paris 2011). De plus, les séries de séismes et de tsunamis survenues après 2004 sur les régions littorales de l'ouest de Sumatra et du sud de Java témoignent du haut niveau du risque sur ces territoires. La prise en compte de ce problème a entraîné une sensibilisation et une mobilisation notable de la communauté scientifique. De nombreux travaux de recherches internationaux ont été entrepris pour étudier les sources de génération possibles de tsunami (Borrero et al., 2006) ; (Fraser et al. 2013) ; (Sieh, 2007) ; (Chlieh et al., 2008) ; (Satake et al., 2013), la propagation de tsunami sur la mer et enfin la modélisation de tsunamis sur une ville à une échelle très fine (Taubenböck et al. 2009) ; (Imamura et al., 2011) ; (Schlurmann et al. 2010). Des progrès ont été également réalisés pour améliorer les processus d'alertes sur tous les territoires concernés (Falck et al. 2010). Ces processus permettent d'estimer l'épicentre d'un séisme, de prévoir un tsunami potentiel et de déclencher des alertes (Steinmetz et al. 2010). Ces systèmes émettent des alertes dans les 5 minutes après un séisme (Rudloff et al. 2009).

Les réelles avancées accomplies sur ces volets techniques ne se sont pas toujours accompagnées d'études sur la prise en compte des composantes humaines et sociales de ces catastrophes. L'évaluation de l'exposition humaine, ses variations spatio-temporelles et l'amélioration des processus d'évacuation pour atteindre les zones refuges sont des domaines où les progrès sont encore insuffisants. L'UNESCO recommande ainsi de bâtir une base de données pour l'évaluation de la vulnérabilité et d'effectuer une mise à jour des connaissances concernant la répartition des personnes dans les zones côtières exposées à des inondations dues aux tsunamis (UNESCO 2009). Afin d'améliorer le programme de réduction des risques, il est en effet nécessaire d'étudier l'exposition humaine et ses variations spatio-temporelles sur un territoire vulnérable aux menaces des tsunamis, et d'évaluer les capacités d'évacuation en vue de leur amélioration (Leone, Péroche, et Gutton 2014).

Comment évaluer la distribution spatio-temporelle de la population ? Quand et où se concentrent les populations ? Comment varie la quantité de population dans la zone d'étude suivant les moments de la journée et de l'année ? Quelle est la spatialisation de la probabilité de décès au moment du tsunami ? A quel moment et sur quelles zones se trouvent les plus fortes probabilités de victimes ? Comment choisir les zones refuges ? Comment évaluer l'accessibilité des refuges permettant d'évacuer les populations menacées ? Quelles sont les variations de densités humaines et ses conséquences en termes d'évacuation (engorgement du réseau et des refuges, refuges inatteignables) ? Comment améliorer l'accessibilité des refuges et pour quels scénarios d'évacuation ?

Cette thèse a pour objectif de mettre en place une démarche intégrée visant à évaluer l'exposition humaine et ses variations spatio-temporelles en cas de tsunami dans la zone d'inondation modélisée sur Padang en Indonésie. Ce travail de recherche s'intéresse aux méthodes permettant d'estimer la quantité de population présente heure par heure durant n'importe quel jour de la semaine et de l'année, à une échelle très fine. De plus, les variations dans la localisation de la population sont également analysées. En considérant que le temps de génération d'un séisme provoquant des tsunamis est impossible à estimer, ces informations sont très importantes pour améliorer les programmes de réduction du risque. Cette démarche permet ainsi de dégager des scénarios de distribution de la population types, utilisés ensuite pour évaluer la capacité d'évacuation de ces populations. Le modèle issu de cette recherche permet de mesurer l'accessibilité des zones selon certains scénarios, et de proposer des améliorations pour une meilleure préparation des autorités et des populations.

Une première partie est consacrée à un état des connaissances et des mesures de prévention connues sur le risque de tsunami en Indonésie. Elle fait le constat que le tsunami est un aléa naturel très probable en Indonésie. Le risque est présent de manière prégnante dans certaines zones littorales Indonésiennes. A l'ouest de l'île de Sumatra, le risque est particulièrement élevé du fait de l'accumulation d'énergies sismiques qui n'ont pas été libérées (Borrero et al. 2006) ; (Sieh 2007) ; (McCloskey et al. 2010). Cette première partie est également l'occasion de présenter les démarches entreprises pour renforcer les capacités d'évacuation face aux tsunamis et les différents scénarios de gestion envisagés. Cette partie montre également la nécessité d'une méthode d'évaluation spatio-temporelle de l'exposition humaine afin de pouvoir étudier les interactions entre aléa et enjeux sur différentes périodes.

Une seconde partie propose d'adapter au contexte Indonésien une méthode développée au Maroc sur la ville d'El Jadida dans le cadre de l'ANR MAREMOTI (Leone et al. 2012). Ces méthodes

présentent une évaluation de la caractérisation spatio-temporelle de l'exposition humaine à Padang. Cette partie repose sur l'hypothèse que l'exposition humaine est contrôlée par les rythmes de vie et les fonctions principales constituant l'espace (bâtiments, voies de communication et zones de plein air). Une évaluation des enjeux humains est réalisée à une échelle très fine (prise en compte du nombre d'individus présents dans les bâtiments, et aussi dans les espaces de plein air ou les voies de communication) heure par heure selon différents scénarios temporels. Enfin, les enjeux sont confrontés à l'aléa au moyen d'indice de risque humain. Nous nous appuyons sur un modèle d'inondation de la ville de Padang qui est disponible grâce aux travaux de recherche réalisés par des équipes Allemandes dans le cadre du projet « *Last-Mile* ». En confrontant les données du modèle numérique de l'inondation (hauteur et vitesse d'eau) au nombre de personnes « spatio-temporellement » localisées, les pertes humaines potentielles sont évaluées. Une cartographie multi-temporelle du risque humain est ainsi rendue possible. Elle permet également de confronter ces enjeux humains aux capacités d'évacuations.

Une troisième partie consiste à évaluer les possibilités existantes pour renforcer les capacités d'évacuation. Cette partie propose tout d'abord une identification des zones refuges potentielles, soit verticales, soit horizontales. Elle intègre également une démarche de classification et de hiérarchisation des zones refuges verticales. Cette partie détaille un nouveau modèle de simulation d'évacuations afin d'optimiser l'accessibilité de ces zones refuges. Sur la zone d'inondation modélisée, l'accessibilité intègre dans un premier temps la variation de vitesse de déplacement en tenant compte de différents paramètres comme les ralentissements provoqués par le nombre de personnes, ou l'étroitesse des voies. Ensuite, l'optimisation de l'accessibilité repose sur la recherche du plus court chemin en temps entre la zone de danger et une zone sécurisée située sur le réseau des rues traitée comme un graphe. Enfin, les évacuations sont simulées selon différents scénarios temporels. Chaque simulation est initialisée en intégrant la cartographie spatio-temporelle de la densité humaine, évaluée et extrapolée à partir d'enquêtes terrain et d'une cartographie fine des bâtiments (résultats de la deuxième partie). L'effet d'accumulation des individus sur le réseau est ainsi pris en compte au fur et à mesure de l'évacuation. Cette phase de simulation s'achève avec l'analyse de la couverture spatiale de chaque refuge, et par un bilan des différents temps d'accès sous forme de courbes d'accessibilité de ces zones refuges.

Enfin, une quatrième et dernière partie soumet un ensemble de recommandations issues de ce travail de thèse en vue de proposer une amélioration de la préparation des collectivités de Padang au risque de tsunami. Cette partie discute de l'applicabilité de la démarche employée et des

limites propres à chacune des étapes et variables utilisées. Des pistes d'amélioration de la connaissance de ces méthodes et des indicateurs développés sont proposées.

Partie 1. Le risque tsunami en Indonésie : états des connaissances et de la prévention

Cette première partie se compose de trois chapitres. Le premier présente l'aléa tsunami en Indonésie, son haut niveau de probabilité d'occurrence, ses spécificités hydrodynamiques, ses causes et la manière dont il se manifeste à la côte. Il propose un état des connaissances actuelles des effets des tsunamis sur les côtes Indonésiennes et particulièrement à Sumatra.

Le deuxième chapitre décrit comment ce risque de tsunami est actuellement géré à Padang. Il propose un état des lieux de cette gestion en Indonésie avec le système d'alerte aux tsunamis, la gestion des risques par la communauté, et la préparation de l'évacuation, ce qui nécessite la détermination de la zone d'inondation en cas de tsunami, la mise en place d'une carte d'évacuation et d'une signalisation adaptée. En particulier, il fait l'état des dernières avancées en matière de planification des évacuations, avec le concept d'accessibilité de zone refuge, tenant compte de la vitesse de déplacement des populations pour atteindre les zones refuges.

Le troisième chapitre souligne l'intérêt d'évaluer les variations spatio-temporelles de l'exposition humaine. Il montre comment l'évaluation dynamique des enjeux humains permet de fournir une évaluation des enjeux plus adaptée à la sauvegarde des vies humaines en cas de tsunami. Ce chapitre présente donc les techniques de recensement disponibles à une échelle très fine pour localiser des populations dans un espace urbain tel que celui de Padang. Il discute également de leur faisabilité dans le contexte de cette thèse.

Chapitre 1. Le tsunami, un aléa naturel très probable en Indonésie

« Tsunami » est un terme japonais qui a été adopté à l'échelle mondiale pour qualifier une série de vagues ordonnées et régulières qui sont habituellement générées par un mouvement brusque des plaques tectoniques sous la mer. Le tsunami se caractérise par des vagues de grande longueur d'onde dans des zones océaniques de forte profondeur, mais il peut être constitué de vagues à ondes courtes lors de son occurrence dans des mers peu profondes. Il peut ainsi en arrivant près de la côte devenir une très puissante onde capable de détruire tout sur son passage quand elle atteint la côte (Lavigne et Paris, 2011).

1.1. Source et genèse d'un tsunami

Globalement, les tsunamis sont distingués comme des aléas d'origine géologique (Leone et al, 2010). Ils sont provoqués par des activités sismiques provoquant les mouvements verticaux du plancher sous-marin qui modifient brutalement la surface de la mer. Les variations brutales du niveau de la mer (source tsunamigènes) peuvent être causées par *des séismes* sous la mer, *des éruptions volcaniques* sous-marines, *des glissements de terrain* sous-marins ou dans la mer, ou *des chutes de météorites* en mer. Mais ces dernières sont la cause de tsunami la plus rare en ce moment. De plus, les tsunamis peuvent également se produire à la suite d'une énorme explosion en mer. Un des régions tectoniques les plus actives dans le monde sont situées en Indonésie (Figure 1). Selon les données NOAA/NGDG, on a référencé 280 tsunamis en Indonésie et dans les pays voisins depuis l'année -2000 jusqu'à maintenant.

L'évènement tsunami n'est pas uniquement localisé dans les océans. Il est possible qu'un tsunami se propage également sur toute étendue d'eau continentale comme un lac ou bien une baie côtière. La figure 1 illustre la localisation des sources tsunamigènes identifiés entre -2000 et 2014 en Indonésie et les pays voisins.

Tableau 1. Données historiques des événements tsunamis meurtriers dans la région de l'océan Indien (y compris l'Australie occidentale et Indonésie Occidentale /Région 60), Entre 1600 et 2015.

NO	Date	Mag	Hauteur max (metres)	Pays	Site	Source	Victime(s)
1	11.10.1737			India	Calcutta	Météorologique	300000
2	10.02.1797	8.0		Indonésie	Sud-ouest Sumatra	Séisme	300
3	22.11.1815	7.0		Indonésie	Mer de Bali	Séisme et glissement de terrain	1200
4	29.12.1820	7.5	25	Indonésie	Mer de Flores	Séisme	500
5	20.10.1859			Indonésie	Sud de Java	Séisme	2
6	16.02.1861	8.5	7	Indonésie	Sud-ouest Sumatra	Séisme	1105
7	09.03.1861	7.0		Indonésie	Sud-ouest Sumatra	Séisme	950
8	.05.1874			Bangladesh	Sunderbans	Séisme	2000
9	27.08.1883		41	Indonésie	Krakatau	Volcano	34417
10	04.01.1907	7.6		Indonésie	Nord-ouest Sumatra	Séisme	400
11	04.08.1928		10	Indonésie	Mer de Flores	Séisme et glissement de terrain	128
12	09.11.1929			Indonésie	Tjalang, Nord-ouest Sumatra	inconnu	6
13	05.05.1930	7.3		Myanmar	Côte de Myanmar	Séisme	500
14	27.11.1945	8.0	17	Pakistan	Côte de Makran	Séisme et glissement de terrain	4000
15	19.08.1977	8.0	15	Indonésie	Ile de Sunda	Séisme	189
16	18.07.1979		9	Indonésie	Ile de Lomblen (Lembata)	Glissement de terrain	1239
17	06.08.1988	7.2		Bangladesh	Jamuna River, Aricha	Séisme	3
18	12.12.1992	7.8	26.2	Indonésie	Mer de Flores	Séisme	1169
19	02.06.1994	7.8	13.9	Indonésie	Sud de Java	Séisme	238
20	14.05.1995	6.9	4.0	Indonésie	Mer de Timor	Séisme et glissement de terrain	11
21	26.12.2004	9.1	50.9	Indonésie	côtes ouest de Sumatra	Séisme	226898
22	28.03.2005	8.7	4.2	Indonésie	Indonésie	Séisme	10
23	17.07.2006	7.7	20.4	Indonésie	Sud de Java	Séisme	802
24	25.10.2010	7.8	16.9	Indonésie	Sumatra	Séisme	431

Sources : données NOAA/NGDC. [doi:10.7289/V5PN93H7](https://doi.org/10.7289/V5PN93H7) au 25.02.2015.

1.1.1. Tsunamis générés par des séismes

Les séismes sont la cause la plus commune des tsunamis. La moitié des séismes destructeurs du globe prennent naissance au niveau des zones de subduction et dissipent 75% de l'énergie sismique de la planète. Ce sont dans ces zones qu'ont été mesurées les plus fortes magnitudes (9,2 en Alaska le 28 mars 1964, 9,5 au Chili le 22 mai 1960, 9,3 en Indonésie le 26 décembre 2004) (Leone et al., 2010). On peut ajouter également le tsunami le plus récent au Japon en 2011. Dans la région de l'océan Indien (ouest de l'Indonésie et Australie), environ 79,2% des tsunamis meurtriers depuis les années 1600-2015 ont été causés par des séismes sous marins (d'après les données récentes de

NGDC / NOAA). Ces séismes sont déclenchés par le mouvement vertical de la colonne d'eau, qui est ensuite propagée horizontalement pour devenir un tsunami sur des côtes.

Lors du déplacement vertical de volumes d'eau provoqué par un séisme, souvent la mer est tirée vers l'océan. C'est un signe majeur que le tsunami atteindra les côtes. Le phénomène de retrait des marées avant l'arrivée à la côte du tsunami est connue comme « polarité négative ». Cependant, le tsunami peut submerger les côtes sans qu'aucun retrait ne soit observé (« polarité positive ») (Sahal 2011).

L'intensité du tsunami dépend à la fois de la magnitude et de la profondeur du séisme : plus ce dernier est proche de la surface, plus il a des chances de générer un important tsunami. Tous les tsunamis déclenchés par des séismes sur le tableau 1 sont de magnitude supérieure à 6.9. On a listé des tsunamis meurtriers comme exemples : le tsunami du 26 Décembre 2004 ayant une magnitude de 9,1 et une profondeur de 30 km provoquant une vague de 50,9m de haut. Le tsunami du 28 Mars 2005 situé au sud du tsunami de 2004 qui a libéré une énergie de magnitude 8 et était à une profondeur de 30 km, a produit des vagues de plus faible hauteur (4,20m). Enfin, le tsunami du 25 Octobre 2010 ($M_w = 7,7$ situé à la profondeur de 26,2 km) a occasionné une vague de 16,9m de haut. Toutes les données de magnitude et de profondeur permettent de conclure que des profondeurs supérieures à 40 km et des magnitudes inférieures à $M_w = 6,5$ se traduisent par un risque de tsunami considéré comme faible (Sahal, 2011)

Un fort séisme ne déclenche pas nécessairement un tsunami. Tout dépend de la manière dont se modifie le niveau du plancher océanique aux alentours de la faille et dont la déformation est transmise à colonne d'eau (Leone, de Richemond, et Vinet 2010b). Le séisme du 30 septembre 2009 ($M_w = 7,6$ et à la profondeur de 81 km) à Padang a provoqué environ 1100 décès. Ce séisme n'a généré qu'un faible tsunami à Padang. De plus l'« *Indonesian Tsunami Warning Center* » n'avait alors émis aucune alerte au tsunami. Il s'agissait d'une évaluation correcte de la situation (Behrens et al. 2010). L'analyse des données sismiques suggère qu'il s'agissait d'un séisme intra-plaque (Lange et al. 2009).

1.1.2. *Tsunami généré par les activités volcaniques*

Les tsunamis occasionnés par ce type de phénomènes sont moins fréquents que pour les séismes. Ces tsunamis sont estimés à seulement environ 20% de tous les cas. Ce type de tsunami déclenché par l'activité volcanique est en fait dû au séisme qui suit l'éruption, aux coulées pyroclastiques et aux éruptions sous marines (Latter 1981).

Outre le séisme occasionné, une éruption volcanique peut également générer un tsunami consécutivement à l'explosion du dôme comme ce fait le cas lors de l'éruption du Krakatoa le 27 août 1883 (Choi et al. 2003), ou par l'impact des coulées pyroclastiques en mer (Watts et Waythomas 2003). Les coulées pyroclastiques marines sont susceptibles d'entraîner la formation de vagues qui peuvent ainsi affecter des espaces éloignés (Leone, de Richemond, et Vinet 2010b). Un exemple de coulées pyroclastique en mer en Indonésie s'est produit lors de l'éruption du Tambora le 10 avril 1815 sur l'île de Sumbawa. Cependant, les données scientifiques sur le tsunami résultant de l'éruption du Tambora sont très limitées. Le tsunami aurait frappé les côtes de plusieurs îles en Indonésie, occasionnant une vague de 4 m (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Tambora>) ou selon les données NOAA/NGDC de 3,5m.

1.1.3. *Tsunami généré par les glissements de terrains*

Ce type de tsunami est encore moins fréquent que ceux provoqués par les séismes et l'activité volcanique. Bien que la fréquence d'occurrence soit très faible, les glissements sous-marins sont susceptibles de conduire à des tsunamis locaux. Les volumes mis en jeu dans ce type de glissements de terrain potentiellement générateurs de tsunamis varient de quelques millions de m³ en cas de rupture d'une falaise ou de coulées de débris volcaniques ou de glissements de flammes de volcans à des milliers de km³ dans le cas de marges glaciaires (Brune et al. 2010).

Toutefois, les phénomènes de glissements sous-marins sont mal connus et difficilement prévisibles et l'étendue de leurs dommages potentiels reste difficile à déterminer (Bardet et al. 2003). En ce qui concerne la cause, ce type tsunami peut être généré par un glissement d'un massif sous-marin à la suite d'un séisme dans des zones côtières (Bardet et al. 2003). La principale cause de glissements de terrain sous-marins est l'instabilité des pentes liée au niveau d'inclinaison de la pente (Brune et al. 2010).

On peut citer 6 tsunamis déclenchés par des glissements sous-marins sur le territoire indonésien et dans ses alentours (Tableau 2) depuis l'année 1600.

Tableau 2. Tsunamis déclenchés par des glissements sous-marins sur le territoire Indonésien et ses alentours.

Date	Location	Magnitude	Vague (m)	victimes
22-11-1815	Bali	7,0	*	1200
1899	Île de Seram	7,8	*	
1979	Île de Lomblen	Non séisme	7 - 9	539 morts, 700 disparues
1982	Île de Flores	5,6	*	15
1992	Île de Flores	7,8	26,2	1169
1998	Papouasie-Nouvelle-Guinéeeen	7,0	15,03	2000

Sources : (Brune et al. 2010) ; : données NOAA/NGDC. [doi:10.7289/V5PN93H7](https://doi.org/10.7289/V5PN93H7) au 25.02.2015

* pas de donnée disponible

1.2. Propagation et mesure des effets à la côte

En cas de perturbation de l'équilibre de la colonne d'eau du fait d'un séisme sur le plateau continental ou sur la pente de la mer, le tsunami qui est généré se propage alors en mer et peut avoir un impact sur la côte, à proximité ou voir même à des distances importantes. L'amplitude du tsunami qui en résulte peut même être augmentée lorsqu'un séisme est suivi de glissements sous-marins (Mofjeld et al. 2004).

Les ondes génératrices de tsunami en plein océan se déplacent à des vitesses très importantes atteignant des centaines de kilomètres par heure. Les vagues de tsunami peuvent ainsi traverser des océans en quelques heures seulement, alors même que le tsunami sera ressenti sur les plages les plus proches dans un délai de quelques minutes (Mofjeld et al. 2004). Ces vitesses de propagation dépendent de la longueur d'onde et de la profondeur où elle se propage. La vitesse de déplacement est d'autant plus grande que la mer est profonde et que la longueur d'onde de la vague est importante (longueur d'onde : distance entre deux crêtes de vagues) (González, 1999). Ces tsunamis ne deviennent dangereux que lorsqu'ils s'approchent de la côte. Tsunamis sont donc freinés brutalement dès qu'ils atteignent la plate-forme continentale, d'où une augmentation très forte de d'amplitude de la vague au contact avec la côte (Lavigne et Paris 2011) (Figure 2).

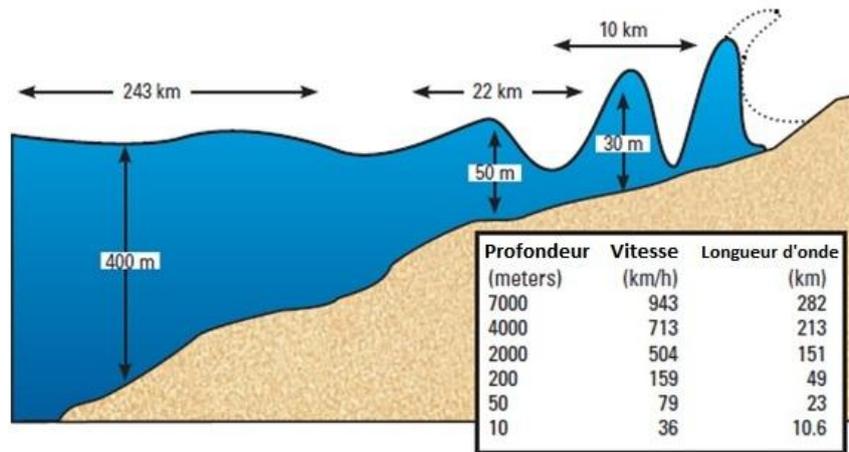


Figure 2. Le tsunami sur son chemin vers la côte (UNESCO 2009).

L'augmentation de l'amplitude des ondes suit un processus appelé « *shoaling* » se qui produit lorsque les tsunamis passent d'une zone profonde à une zone d'eau peu profonde. Ce processus revêt une importance majeure dans les régions côtières. Ce phénomène se produit en raison de la force de frottement exercée par le fond de la mer. Cela ralentit la vague : moins l'eau est profonde, plus la vague est freinée et se développe en amplitude.

Lorsque les tsunamis s'approchent du rivage, ils diminuent leur vitesse, mais également leur longueur d'onde. En compensation, cela conduit à une augmentation de l'amplitude de l'onde, donc de la hauteur de la vague. Lorsque le tsunami frappe la plage, son énergie continue à pousser de grandes quantités d'eau vers l'intérieur (phénomène de débordement). Il peut ainsi se propager vers l'intérieur des terres jusqu'à des distances très importantes. Ce phénomène dit de *runup* (Figure 3), peut causer des dommages considérables à l'intérieur. Le *runup* correspond à la hauteur maximale de vague au dessus de niveau moyen de la mer. Ce *runup* est toujours égal ou supérieur à la hauteur de la vague sur la côte (F. Lavigne et al. 2006).

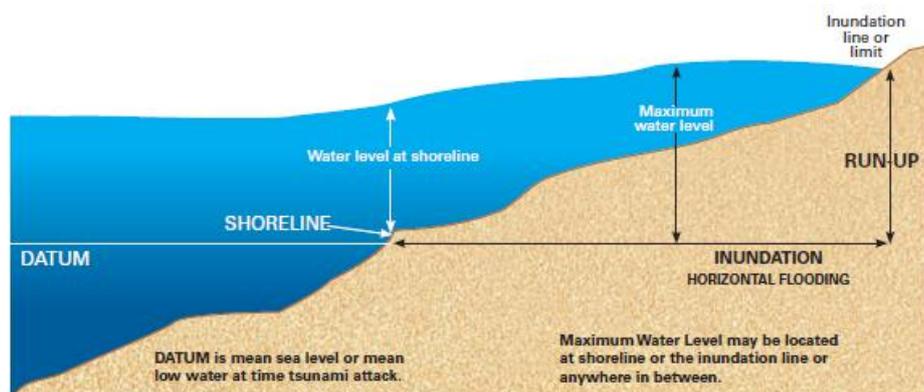


Figure 3. L'impact du tsunami sur la côte et mesures caractéristiques (UNESCO, 2009).

1.3. Probabilité temporelle de déclenchement d'un tsunami

L'évaluation de la probabilité temporelle de réalisation d'un tsunami est une étape cruciale dans l'évaluation du risque de tsunami. Si un tsunami s'est produit dans une zone, un tsunami avec la même magnitude se reproduira sur la même région dans une période déterminée (Papathoma et al. 2002). Ce moyen de prédiction est retenu pour estimer les probabilités de futurs tsunamis afin de lancer les programmes de réduction des risques. Grâce à l'analyse de données historiques de tsunamis dans la région, les chercheurs concluent à la probabilité d'occurrence d'un tsunami d'une certaine ampleur dans un certain délai. La compilation des données fournit des informations importantes à propos de la probabilité temporelle de réalisation d'un tsunami, des types potentiels de tsunami, et de la hauteur probable de *runup* de ces tsunamis. Il est ainsi possible de repérer des zones côtières plus exposées à l'impact du tsunami.

Un exemple de travail d'évaluation de la probabilité de survenance d'un tsunami à travers l'analyse de la compilation des données a été fait par Rikitake et Aida en 1988. Cela a permis d'étudier la période de retour des tsunamis au Japon, particulièrement sur la côte du Pacifique. La probabilité d'un tsunami d'une hauteur de vague de 5 m ou plus est inférieure à la probabilité d'un tsunami d'une hauteur de 1 m ou plus (Rikitake et Aida 1988).

1.4. Synthèse de la connaissance historique de l'aléa tsunami en Indonésie (Sumatra, Padang)

La NOAA/NGDC, l'institution Américaine qui produit les données géophysiques sur le monde, a effectué une synthèse historique en divisant l'Indonésie en deux régions : la région de l'océan indien (y compris la partie ouest d'Indonésie et la partie ouest de l'Australie) et la région de l'Indonésie orientale. Les événements tsunamis meurtriers sont presque équilibrés pour les deux régions entre les années 1600 et 2014. Sur la partie ouest de l'Indonésie, la zone de subduction de Sumatra est considérée comme la zone la plus active. C'est la zone où la plaque tectonique Indo-australienne glisse sous la plaque tectonique de la Sonde (Plaque Sunda). Ce phénomène se produit à des vitesses de 57 mm/an dans la direction du nord-nord-est (Sieh 2007). Elle se déplace généralement à partir du fond de l'océan et puis descend jusqu'au plateau continental (Figure 4). La position de la zone connue en anglo-saxon sous le nom de « *Sunda Megathrust* » qui se trouve au-dessous de la mer entraînerait un risque supplémentaire causé par le séisme lui-même. L'effondrement du plancher océanique pourrait déplacer un grand volume d'eau dans l'océan et déclencherait ensuite un tsunami.

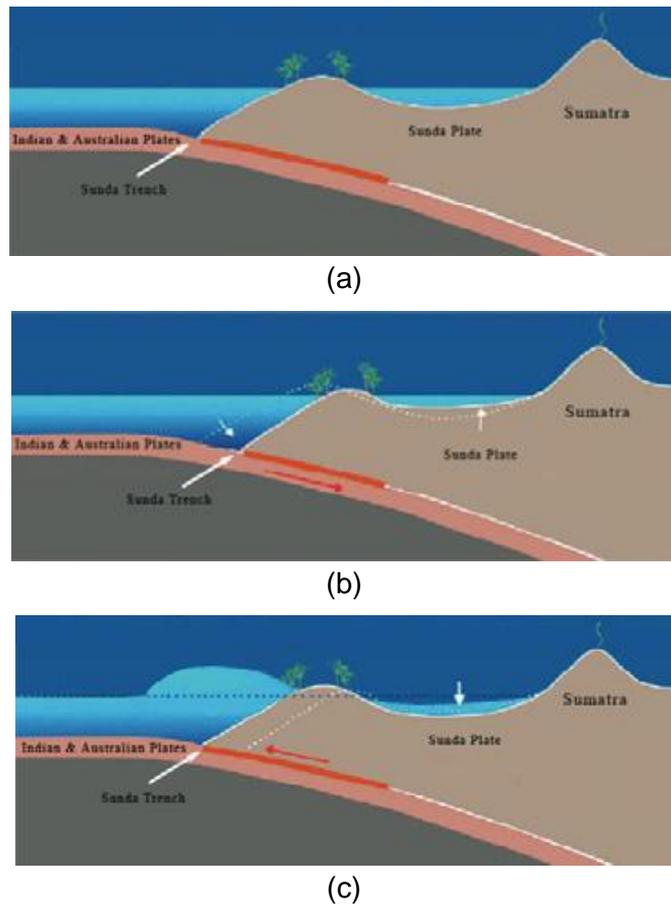


Figure 4. Section transversale à travers la frontière de la plaque de Sumatra qui montre l'accumulation et le soulagement des pressions associées à la subduction. (a) Relation de subduction entre une plaque (à gauche) vers la plaque supérieure (à droite). Le gris foncé indique la partie de verrouillage de « megathrust » entre les deux plaques. (b) Comme le « megathrust » est bloqué dans cette partie, le bloc principal est pressé et entraîné vers le bas durant des décennies ou des siècles jusqu'à l'apparition d'un grand séisme. (c) un mouvement rapide peut libérer des énergies accumulées au fil des siècles provoque un grand séisme qui peut élever des îles et déclencher un tsunami. « Extrait de (Sieh 2007) ».

Selon les données historiques, il existe des activités tectoniques qui ont déclenché des tsunamis dans cette région. Quelques événements importants à noter sont les tsunamis de 1797, 1833, 1861, 1907, 2004, 2005 et 2010 (Figure 5), (Figure 7), (Figure 8).

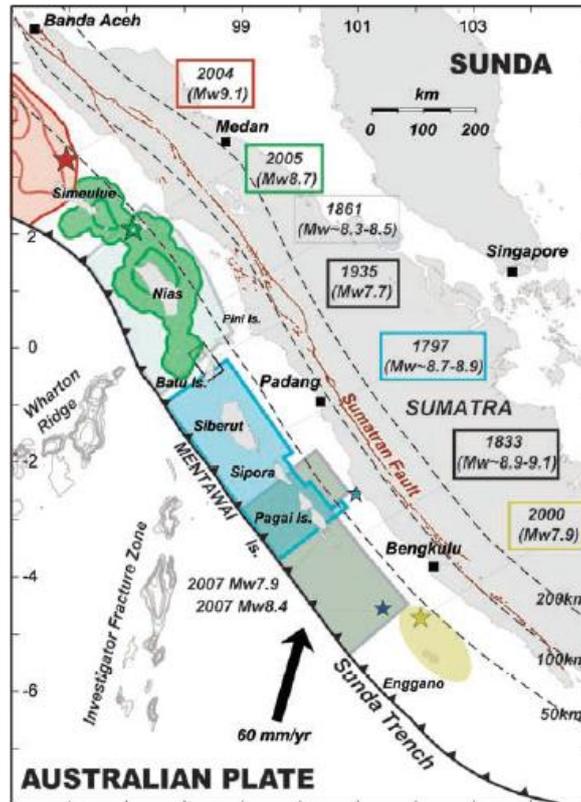


Figure 5. Contexte structurel actif des grands séismes historiques de la frontière de plaque de Sumatra oblique convergente. Source : (Chlieh et al. 2008).

Tsunamis de 1797 et 1833

Pour étudier les anciens séismes, les chercheurs ont eu recours à des approches paléo-sismiques, en utilisant les microatolls de corail comme enregistreurs historiques de déformations verticales. Toutes les informations recueillies sur la partie dangereuse de « *Sunda megathrust* » proviennent des recherches paléo-sismiques et géodésiques. La présence de microatolls sur les îles au-dessus de la rupture aident à délimiter l'étendue et l'ampleur de ces deux événements (Natawidjaja et al. 2006b). Les résultats de ces études (Figure 6) indiquent que les grands fonds des mers ont été soulevés autour de l'archipel Mentawai lors des séismes de 1797 et 1833. Le soulèvement du fond de la mer était d'environ 0,8 m en 1797 et 2,8 m en 1833. Le motif et l'ampleur du soulèvement de fond de la mer en 1797 implique une rupture *megathrust* correspondant aux grandeurs de magnitude Mw de 8.5 à 8.7, tandis que l'évènement en 1833 correspond à une Mw de 8.6 à 8.9. Ces deux événements ont entraîné des *runup* d'au moins 5 m en 1797 m et de 3 à 4 m en 1833.

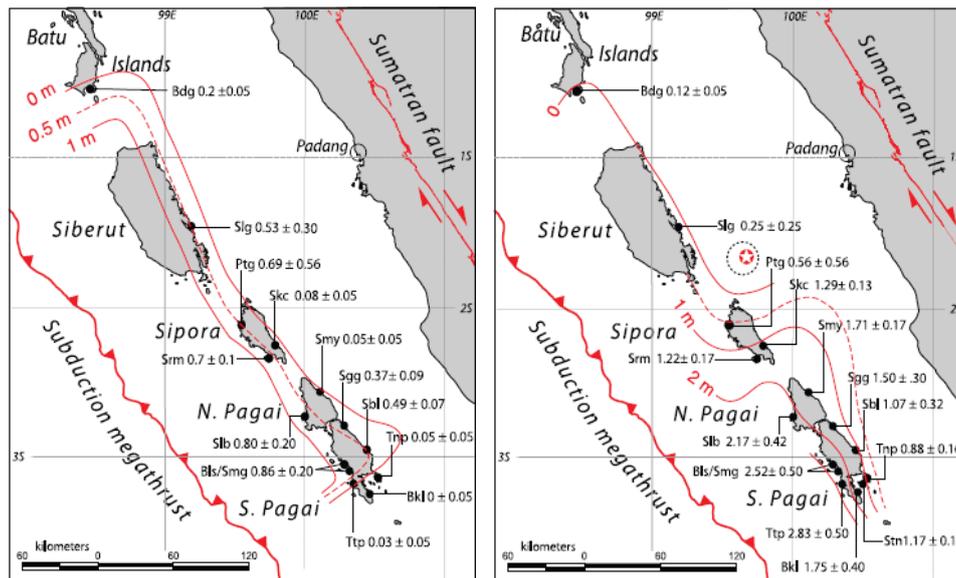


Figure 6. Cartes des soulèvements de fonds de mer lors du séisme de 1797 montrant que le soulèvement varie aussi élevée que d'environ 80 cm (gauche) et de 1833 montrant qu'une grande région a été soulevée entre 1 et 2 m (droite).

Sources : (Natawidjaja et al. 2006)

En 1797, Padang était un petit village colonial de l'empire britannique, situé à 1-2 km en amont de la plage sur les bords d'une petite rivière. Le tsunami a remonté la rivière, et selon des documents d'époque, il aurait saisi un voilier britannique de 150 tonnes, amarré près de l'embouchure de la rivière, et avait fait remonter la rivière, le déposant sur les rives du fleuve en plein centre-ville. On peut donc supposer que la hauteur de l'écoulement de l'eau à travers la terre était de plusieurs mètres (Natawidjaja et al. 2006b). En 1833 un autre tsunami destructeur a fait son apparition à Padang mais avec moins d'effets. Toutefois, il a détruit le front de mer à Bengkulu, à environ 400 km au sud de Padang.

Tsunami de 1861

Selon les données NOAA/NGDC, le tsunami de 1861 a été déclenché par le séisme du 16 février 1861 ($M_w = 8,5$). Ce tsunami a entraîné un *runup* de 7m de hauteur. Ce séisme est à associer à celui de Nias-Simeulue de 2005 qui a libéré la moitié du déficit du moment énergétique accumulé depuis sa rupture précédente en 1861 (Chlieh et al. 2008).

Tsunami de 1907

Le tsunami de 1907 a été généré par le séisme du 4 janvier 1907 ($M_w = 7,6$) sur l'océan au nord-ouest de Sumatra. Ce séisme a été étudié en utilisant les sismogrammes historiques recueillant des données de plusieurs observatoires sismologiques (Kanamori, Rivera, et Lee 2010). Les investigations suggèrent que le séisme de 1907 est un séisme de faible profondeur, d'environ 30 km.

Ce séisme est connu pour être anormal en raison de l'ampleur spatiale et disproportionnée du tsunami généré. Ce tsunami extensif a touché une zone côtière de plus de 950 km le long de la côte de Sumatra (Kanamori, Rivera, et Lee 2010). Selon les données de NOAA/NGDC, ce tsunami a provoqué environ 400 morts. L'explication la plus probable est que ce séisme est survenu sur l'interface de subduction. De plus, ce séisme a causé une rupture lente des sédiments superficiels. Bien que leur quantité et leur qualité soient limitées, les sismogrammes historiques fournissent des données quantitatives clés sur les anciens événements qui ne peuvent être obtenues autrement.

Tsunami de 2004

Le tsunami qui a été déclenché par le séisme du 26 décembre 2004 venait de la libération brutale d'énergie tectonique dans la zone de subduction de Sumatra. Cette zone selon McCaffrey (2009) s'étend de l'Himalaya vers le nord au sud du Bangladesh, le long du flanc ouest et sud de Sumatra, Java, Bali et l'Indonésie orientale au nord-ouest de l'Australie. La longueur de cette zone de subduction est d'environ 5500 km (Sieh 2007). Le séisme du 26 décembre 2004 a provoqué l'effondrement du plancher océanique sur 1600 km de longueur sur le « Sunda Megathrust » (Figure 7).

Le tsunami de 2004 a été le plus fort et le plus meurtrier jamais enregistré dans l'histoire. Il a été déclenché par un séisme exceptionnel ($M_w = 9,15$) qui s'est produit le 26 décembre 2004 à 30 km de profondeur sur l'océan Indien au large de l'île Sumatra (Lavigne et al. 2006). Ce phénomène de très grande ampleur a provoqué plus 178 000 victimes dans la province d'Aceh, dont plus de 90 000 dans l'agglomération de Banda Aceh, couplé avec des dommages massifs aux infrastructures dans les villes touchées. Selon les observations sur le terrain, le *runup* a atteint une hauteur de 51 m. C'est la vague de tsunami mesurée la plus haute jamais provoquée par un séisme.

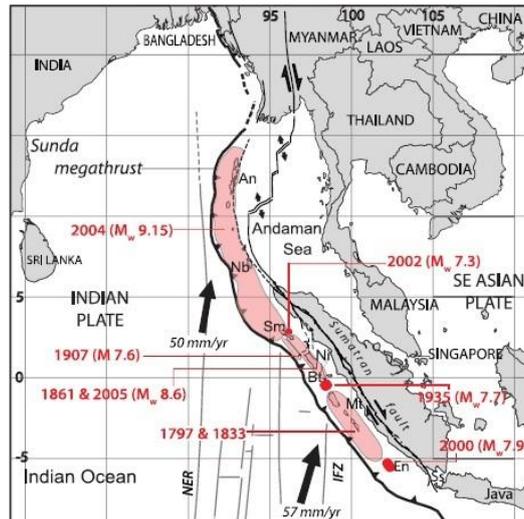


Figure 7. Cadre tectonique et sismique de la section Mentawai sur le Sunda Megathrust.
« Extrait de (Natawidjaja et al. 2006) »

Tsunami de 2005

Trois mois plus tard, précisément le 28 Mars 2005 juste vers le sud de la rupture en 2004, la zone de subduction de Sumatra a continué à libérer son énergie. Le séisme ayant une magnitude de 8,7 s'est produit au-dessous de l'île de Simeulue. Ce séisme a causé la rupture de la zone de subduction « Sunda Megathrust » prolongée vers le sud avec l'addition de 350 km (Figure 7) mesurés à partir de l'extrémité extérieure du sud, provoqués par le séisme en 2004 (Briggs et al. 2006).

Compte-tenu du fait que des contraintes tectoniques ont besoin de centaines d'années pour s'accumuler après les grands séismes, un scénario de tsunami du type de celui du séisme de 2004 et 2005 causée par des effondrements du plancher océanique ne se produira probablement pas pendant plusieurs centaines d'années. Cependant, plus au sud, au large des côtes de la province de Sumatra Ouest et de la province de Bengkulu, un tremblement de terre majeur suivi d'un tsunami sont susceptibles de se produire dans les prochaines décennies (Sieh 2007).

Tsunami de 2010

Le tsunami le plus récent autour de l'archipel Mentawai est celui de 25 octobre 2010 (Figure 8). Ce tsunami a été déclenché par le séisme de magnitude $M_w = 7,7$ et a atteint des hauteurs de *runup* de 9,3m sur les îles de Pagai (Satake et al. 2013). Il a causé plus de 500 victimes sur les îles Mentawai. Selon les enregistrements du marégraphe de Padang, le tsunami a été observé à Padang avec une amplitude de 0,4m. Ce tsunami qui n'a pas inondé les côtes de Padang s'est propagé en direction de l'océan indien. Atteignant des hauteurs de *runup* de 1,72m, il a été observé dans le port Sainte-Marie, à La Réunion, à environ 5200 km de son épicerie (Sahal et Morin 2012).

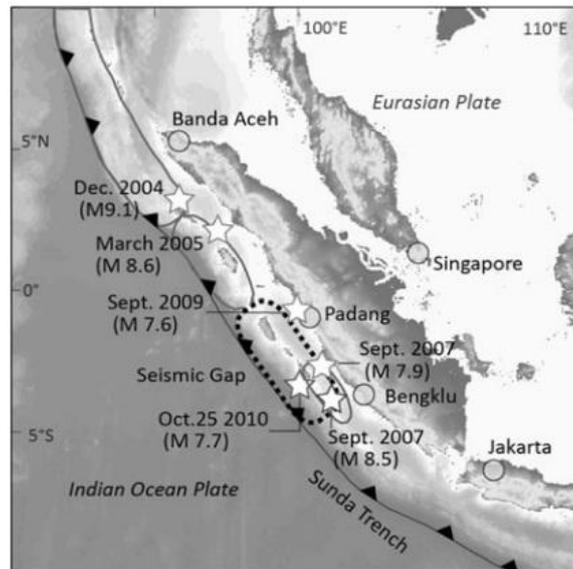


Figure 8. Les grands événements tectoniques à l'ouest de l'île Sumatra (Satake, et al. 2013)

Considérant la magnitude de séisme qui a déclenché le tsunami et les impacts résultants, ce tsunami est considéré comme un événement rare. Les résultats de la modélisation montrent que la combinaison entre le déplacement mineur de la position GPS à cause d'un séisme et d'un grand tsunami qui est produit ne peut s'expliquer que par un glissement important en mer très peu profonde, loin des îles et près de la fosse océanique. Le soulèvement des sédiments inélastiques de la fosse a probablement contribué à la puissance du tsunami (Hill et al. 2012).

1.5. Risque de futurs tsunamis à Padang

La zone de subduction de Sumatra, en particulier au nord de l'équateur, a libéré ses énergies en 2004 et 2005. Cependant, au sud de l'équateur, en particulier dans les îles Mentawai, il n'y a pas eu de grands séismes du type 1797 et 1833. Cette zone est considérée comme étant une lacune sismique (Natawidjaja et al. 2006b) et cette situation géologique interroge les experts. Ce secteur qui se trouve au sud de l'équateur a-t-il été suffisamment comprimé depuis 1797 et 1833 pour qu'il y ait à nouveau rupture dans un proche avenir ? En fait, le secteur de *megathrust* autour de l'archipel Mentawai n'était pas encore au point de rupture des séismes de 2004 ou de 2005 (Sieh 2007). Mais les ruptures de planchers sous-marins en 2004 et 2005 impliquent que les zones de ruptures de 1797 et de 1833 soient encore plus proches à leur libération d'énergie (Borrero et al. 2006).

Ces informations sont obtenues grâce à des études sur les récifs coralliens sur des îles Mentawai. Les résultats des recherches ont montré, grâce à des enregistrements basés sur la croissance des récifs coralliens, que des séismes importants tels que ceux de 1797 et 1833 ont lieu environ tous les deux siècles. Cela signifie que nous sommes actuellement dans la dernière partie de la période de

sommeil et que le prochain tremblement de terre important se produira dans un délai de quelques jours à 30 ans (Sieh 2007).

Cette hypothèse est étayée par l'activité tectonique de cette région qui est devenue plus importante au cours des dix dernières années. Plusieurs séismes de forte intensité continuent de se produire dans cette région. Deux ans après le séisme de 2005, la région plus au sud a été secouée par un autre le 12 Septembre 2007 (Mw = 8,4). Ce séisme a été suivi, environ douze heures après, par un autre séisme de magnitude de 7,9 (Konca et al. 2008). Mais ces séismes ne sont pas une répétition du séisme de 1797. Ces séismes sont issus de la rupture de seulement une fraction de la zone rompue en 1833 et se composent d'aspérités distinctes au sein d'une zone de la *megathrust* qui était restée stable durant la période intersismique. Ceci indique que la même portion d'une *megathrust* peut se rompre dans des proportions différentes selon que les aspérités cassent isolément ou se combinent pour produire une rupture plus grande (Konca et al. 2008).

Bien que deux séismes en 2007 aient causé des dommages réels à Padang, l'activité tectonique reste régulière. Deux ans après, Padang a été secouée par un séisme fort le 30 Septembre 2009 (magnitude Mw = 7,6). Ce séisme de 2009 était inférieur au séisme de 2007, mais à Padang les victimes et les dégâts matériels ont été beaucoup plus nombreux que lors du séisme de 2007. La proximité de l'épicentre du séisme de Padang explique ces impacts plus importants. Malgré sa puissance, ce séisme n'a pas engendré la rupture de « Sunda Megathrust » et n'a pas significativement libéré les 200 ans d'énergies accumulées sur le segment de Mentawai. L'énergie de « Sunda Megathrust » reste sensiblement inchangée, et la menace d'un tsunami déclenché par un grand séisme de puissance supérieure à 8.5 Mw autour de Mentawai reste bien présente (McCloskey et al. 2010). La prochaine grande rupture à laquelle on peut s'attendre devrait se produire au nord de la lacune séismique autour de Mentawai, avec une forte probabilité d'être très dévastatrice.

1.6. Description de Padang

L'évaluation de l'exposition humaine sur la zone de risque de tsunami à Padang est justifiée vis-à-vis de sa situation géographique, économique, sociale et culturelle. En effet, Padang est la plus grande ville de la côte ouest de l'île de Sumatra, et c'est également la capitale de la province Sumatra Barat. Bien que la superficie totale de Padang soit de 694,96 km², seulement 205 km² (30%) sont habitables. L'autre partie de la ville (70%) est une zone montagneuse boisée. Cette ville est peuplée par 876 678 personnes en 2013 (BPS, 2014). Ville côtière, Padang se situe face à l'Océan Indien, et est entourée par une zone de reliefs qui atteignent 1 853 m d'altitude. Elle présente donc une forte densité humaine.

PETA KOTA PADANG

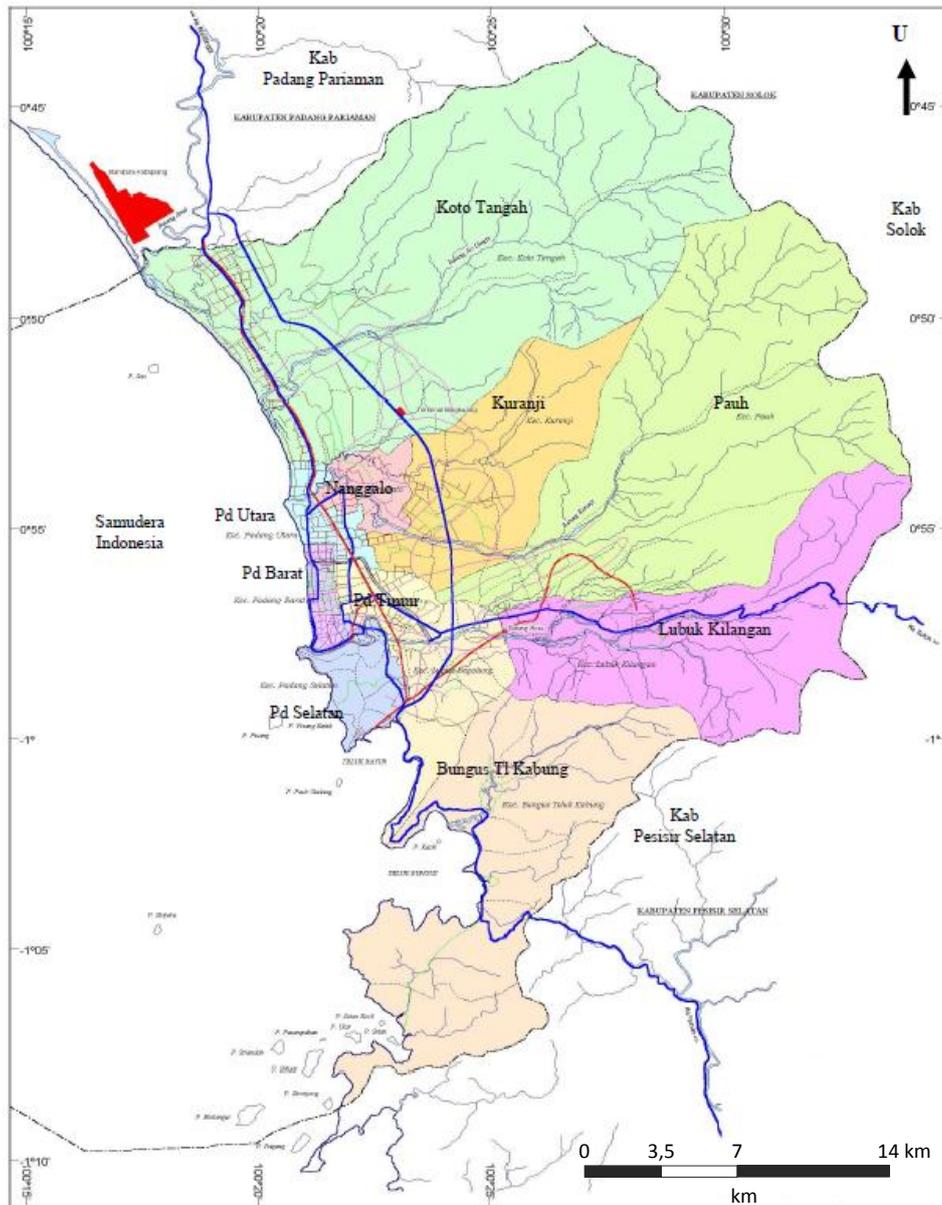


Figure 9. Situation de Padang face à l'Océan Indien en Indonésie.

Historiquement, (<http://www.padang.go.id/index.php/profil/profil>), Padang est un bassin d'emplois pour la population Minangkabau, qui provenaient au XVII^{ème} siècle du village de pêcheurs à l'embouchure de la rivière Batang Arau. Padang a ensuite développé des activités portuaires lors de l'époque coloniale, avec la présence de la compagnie néerlandaise *Vereenigde Oostindische Compagnie* (COV). Pendant l'époque coloniale néerlandaise, la ville est devenue un centre de commerce de l'or, du thé, du café et des épices. Pour soutenir leur activité commerciale, les Néerlandais amenèrent des gens de régions extérieures à Sumatra Ouest. Pendant le gouvernement

Suharto, des javanais ont également immigré à Padang dans le cadre d'un programme de transmigration pour réduire la surpopulation sur l'île de Java.

Au XX^{ème} siècle, l'économie de la ville de Padang s'est développée avec l'exportation de charbon et de ciment. Ces produits sont livrés par le port Teluk Bayur situé au sud de Padang. C'est le plus grand port de commerce de la côte ouest de Sumatra. Padang est donc un centre économique avec le plus fort revenu par habitant de l'ouest de Sumatra (<http://sumbar.bps.go.id/1300/index.php?r=publikasi/view&id=76>). Comme ville culturelle, Padang est connue par la légende du Malin Kundang et du Sitti Nurbaya, et organise chaque année un festival pour soutenir le secteur du tourisme. En effet, la beauté des plages et des îles autour de Padang contribuent à l'attractivité touristique de la ville. Des événements annuels sportifs, de niveau national ou international, tels que le *cyclisme Tour de Singkarak* et le bateau-dragon renforcent encore l'attractivité de la ville de Padang. L'augmentation de l'implantation d'infrastructures touristiques telles que les hôtels, restaurants et centres commerciaux est significative du rôle de Padang en tant que destination touristique. Padang a ainsi enregistré une augmentation des visites touristiques (66%) de 1 870 403 personnes (2009) à 3 104 926 personnes (2012). Elle s'est accompagnée d'une augmentation très significative de la capacité hôtelière, le nombre de chambres d'hôtel passant de 1 174 (2009) à 2295 (2012) (BPS Padang, 2014). En outre, la ville de Padang est également riche d'une gastronomie locale très connue et appréciée en Indonésie.

Tout ceci contribue de faire de Padang une ville exposée, de par son peuplement important, ses visiteurs touristes, et les actifs qui y travaillent sans y résider. Seulement, les chiffres que l'on a du recensement sont donnés à l'échelle des districts (zone colorée de la carte de la Figure 9), une échelle qui n'est pas représentative de la zone urbaine réellement exposée à l'aléa tsunami, et des chiffres qui ne se sont pas représentatifs des migrations quotidiennes dont la ville fait l'objet.

Conclusion du chapitre

Le tsunami est un aléa naturel qui menace fortement l'Indonésie. En effet, l'Indonésie est située sur la frontière de plaques tectoniques actives, et certaines îles Indonésiennes subissent des séismes et des éruptions volcaniques. Tous ces événements peuvent donner lieu à la naissance d'ondes générant des vagues de tsunami dévastatrices sur les côtes indonésiennes.

En Indonésie, un tsunami a de très grandes chances de naître à proximité des côtes car la zone de subduction génératrice de séisme est proche de l'île principale, et donc d'être très violent. L'analyse de données historiques de tsunamis dans la région montre que la probabilité d'occurrence d'un tsunami peut être estimée comme étant forte dans un délai proche.

En particulier, à proximité de la ville côtière de Padang situé sur l'île de Sumatra, les études sur la zone subduction montrent que la zone autour de l'archipel Mentawai peut être considérée comme une zone de lacune sismique-tectonique. Cette zone stocke des énergies depuis 1797. Même s'il y a eu quelques séismes dans cette zone, la menace d'un tsunami déclenché par un grand séisme de puissance supérieure à 8.5 Mw sur le patch de Mentawai reste bien présente.

Il y a donc une nécessité à préparer une évacuation massive de la population face à un tsunami à Padang, sur une zone qui comprend 876 678 habitants, chiffres du dernier recensement (2013).

Chapitre 2. Comment renforcer les capacités d'évacuation face aux tsunamis

2.1. La gestion du risque de tsunami en Indonésie : état des lieux

La gestion du risque d'après Leone et al (2010) dépend en grande partie des outils, méthodes et mesures prises avant une catastrophe. Par ailleurs, la gestion du risque de tsunami selon le manuel du IOC publié par l'UNESCO est une gestion orientée vers la réduction des dommages humains et matériels occasionnés par le tsunami. Pour l'Indonésie, seront décrits ici les efforts et les progrès accomplis en matière de gestion du risque de tsunami depuis l'alerte jusqu'à la planification des évacuations.

2.1.1. Le système d'alerte aux tsunamis (Tsunami Early Warning System - TEWS)

Les Systèmes d'Alertes aux tsunamis sont des systèmes conçus pour détecter et diffuser les alertes aux tsunamis afin d'éviter la perte de vies humaines et de biens. Un système d'alerte aux tsunamis est considéré comme efficace si tous les habitants des zones côtières vulnérables ont été préparés et sont en condition de réagir immédiatement quand une alerte au tsunami est annoncée.

Afin de mettre en œuvre un effort d'atténuation des dommages et une préparation aux tsunamis globale, il convient de mettre en place des actions dans trois composantes interdépendantes (UNESCO 2009):

- L'évaluation des risques de tsunami et l'identification des communautés vulnérables.
- La mise en place de systèmes de détection, d'évaluation de la menace et des systèmes d'alerte qui répondent aux besoins au niveau local, national et international.
- La mise en œuvre de mesures de préparation et d'atténuation pour réduire l'impact et la perte des vies humaines en particulier l'information préventive et l'évacuation.

Pour atteindre ces objectifs, des systèmes d'alerte aux tsunamis aient été développés à des échelles nationales et régionales. Ils favorisent la préparation et la réduction des risques de tsunami dans une approche multi-risques. En 1949 Le *Pacific Tsunami Warning Center* (PTWC) a été mis en place à Hawaii afin de fournir des alertes à l'échelle du Pacifique et sur tous les autres intérêts américains dans le Pacifique. Le système a ensuite été étendu à la Nouvelle-Zélande en 1965 à la suite du

tsunami du Chili en 1960 qui a touché la Nouvelle-Zélande sans aucun avertissement (Johnston et al. 2008).

Après le tsunami de 2004, le système d'alerte aux tsunamis s'est développé sur tous les bassins océaniques pour renforcer le PTWC. *Indian Ocean Tsunami Warning and Mitigation System* (IOTWS) installé sur l'océan indien, CARIBE-EWS dans les Caraïbes et *North-Eastern Atlantic and Mediterranean Tsunami Warning System* (NEAMTWS) installé dans le nord-est de l'Atlantique, la Méditerranée et la mer environnante (UNESCO 2009). Ce système nécessite un *Regional Tsunami Watch Provider* (RTWP) pour détecter les séismes et tsunamis. C'est un système de surveillance qui collecte ces informations sur la région. Ces informations sont ensuite envoyées au système d'avertissement national. Lorsque les résultats de la surveillance concluent à une menace de tsunami, le système diffuse immédiatement les avertissements aux centres d'alertes nationaux aux tsunamis.

En ce qui concerne l'infrastructure d'alerte, ces systèmes utilisent des données sismiques, le niveau de la mer et les autres données géophysiques afin de déterminer le potentiel tsunamigène déclenché par des séismes. Les résultats de l'évaluation sont ensuite distribués aux autorités nationales compétentes pour être transmis au public à travers divers dispositifs de communication.

2.1.1.1. TEWS en Indonésie (InaTEWS)

En considérant que le risque de tsunamis est très fort en Indonésie, l'installation d'un système d'alerte aux tsunamis est fondamentale pour réduire le risque. Ce sujet est devenu une question très importante après le violent séisme et le tsunami d'Aceh en 2004 qui a provoqué plus de 225 000 décès dans les pays autour de l'océan indien.

Initié par des scientifiques allemands et financé par le ministère de l'éducation et de la recherche allemand (BMBF), un projet pour l'installation et le développement d'un système d'alerte aux tsunamis a été signé avec le gouvernement de l'Indonésie le 14 Mars 2005. C'est ainsi que le projet *German Indonesian Tsunami Early Warning System* (GITEWS) a démarré officiellement. Le défi principal pour un système d'alerte aux tsunamis en Indonésie est de fournir des informations rapides sur la localisation, la profondeur, la taille des séismes alentours et probablement d'autres paramètres (Hanka et al. 2010). C'est un défi difficile en considérant que le temps d'arrivée des vagues de tsunami sur la côte ouest de Sumatra et sud de Java est compris entre 30 à 40 minutes après le déclenchement du séisme (Rudloff et al. 2009).

Ce système d'alerte aux tsunamis est géré par le Bureau de Météorologie, Climatologie et Géophysique Indonésien (BMKG) a commencé son activité en Septembre 2007. Ce système a immédiatement réussi à prouver sa capacité à évaluer les paramètres sismiques lors du séisme survenu à Bengkulu les 12-13 Septembre 2007 (Mw 7,9) en 4 minutes et 20 secondes après le séisme, conduisant à la première alerte aux tsunamis diffusée par le BMKG en moins de 5 minutes (Rudloff et al. 2009).

Ce progrès a été réalisé en utilisant plusieurs systèmes de capteurs intégrés sur la plate-forme *The Tsunami Service Bus* (TSB) (Figure 10). Cette plateforme comporte un système sismologique, un système de surveillance de déformation par GPS du plancher terrestre en temps quasi-réel, un système de marégraphes et des systèmes de bouées (Fleischer et al. 2010). Ensemble, ils fournissent les données nécessaires fondamentales pour que le centre d'alerte puisse assurer la prévision de la propagation d'un tsunami.

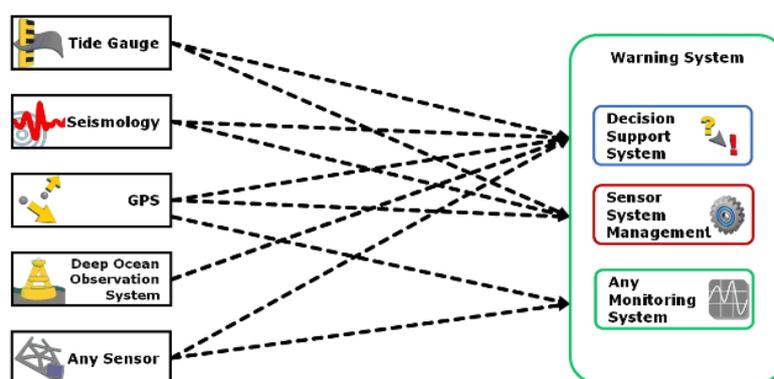


Figure 10. Coordination des capteurs du système GITEWS (Fleischer et al. 2010)

La sismologie est l'épine dorsale du système d'alerte rapide aux tsunamis dans la région de l'océan Indien (Münch, Rudloff, et Lauterjung 2011). Pour détecter les séismes tsunamigènes, le traitement sismologique, en tant que partie de GITEWS, utilise le logiciel SeisComp3 (Hanka, 2010). Ce nouveau logiciel est un dispositif qui est fiable, rapide et qui peut fournir des estimations de localisation et d'ampleur de séisme automatiquement (Hanka et al. 2010). Il n'est pas uniquement utilisé pour des alertes aux tsunamis en Indonésie, mais sert aussi à la plupart des autres centres d'alerte au tsunami des régions de l'océan Indien et pour de nombreux services sismiques du monde entier.

Les composants du système GITEWS utilisent des GPS pour vérifier le niveau de la mer (mesurée sur l'île principale et sur la mer) et détectent des déplacements des plaques tectoniques. L'objectif de la conception est de fournir les premiers résultats fiables 5 min après la détection. (Falck et al.

2010). Le système complet a donc été conçu pour accomplir ces tâches en temps quasi- réel, plutôt que pour satisfaire les besoins de la recherche scientifique.

Les systèmes GPS se composent de quatre groupes d'éléments. Le premier groupe est composé de 9 unités GPS RTR (*Real-TimeReference*) installés sur les îles principales, le deuxième groupe est le groupe des GPS marégraphes qui se compose de neuf unités installées le long de la côte, le troisième groupe est composé de 10 bouées GPS qui sont ancrées sur l'océan indien le long de la zone de subduction à l'ouest de l'île Sumatra et au sud de Java (Figure 11). Le quatrième groupe contient des stations de capteurs GPS externes, comme une partie du réseau mondial de l'IGS (International GNSS Service (Falck et al. 2010).

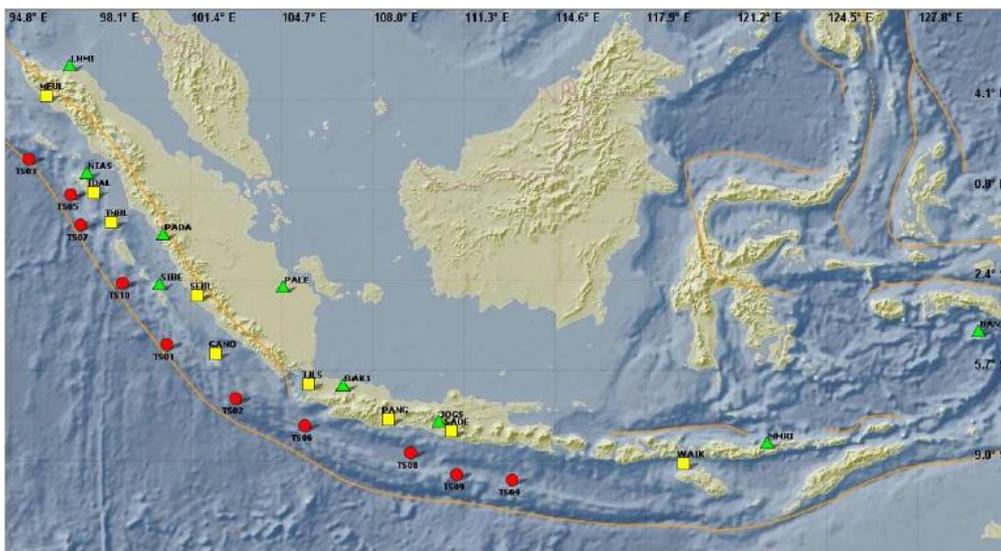


Figure 11. Emplacements de GPS GITEWS en Indonésie (Stations de référence en temps réel GPS (triangles verts), GPS à marégraphes (carrés jaunes), bouées avec GPS (cercles rouges) (Falck et al. 2010).

Les produits obtenus sont des données de mouvements d'antennes GPS (Falck et al. 2010). Ces données sont ensuite utilisées pour assurer le processus d'alerte de différentes manières. Les mesures d'instruments GPS sur bouées permettent la détection précoce ou la confirmation de vagues de tsunami sur l'océan. Des mesures GPS terrestres sont couplées avec les marégraphes ou les stations sismologiques et donnent des informations sur les mouvements des plaques tectoniques. Ces informations sur les variations de hauteur sont très importantes pour identifier les tsunamis qui seront caractérisés par des mouvements verticaux indépendamment des variations de hauteur de la surface de la mer liés aux phénomènes de marées. Cette distinction est essentielle et elle permettra d'alerter de manière précoce de la survenance d'un tsunami.

2.1.1.2. Centre d'alerte

Le cœur d'un système d'alerte aux tsunamis est le centre d'alerte. Les informations sont collectées et agrégées dans un système d'information pour l'aide à la décision (*Decision support system-DSS* en anglais) (Münch, Rudloff, et Lauterjung 2011). Le DSS donne une évaluation de la menace de tsunami - basée sur une comparaison des observations en direct avec des simulations pré-calculées - le plus tôt possible et il aide à prendre la décision de diffuser un avertissement de tsunami ou non (Steinmetz et al. 2010). Compte tenu du fait que le temps d'arrivée du tsunami sur la côte indonésienne est très court, le DSS doit émettre les résultats d'évaluation dans les cinq premières minutes après un séisme.

Les composants d'un DSS et ses interconnexions aux autres composants du système d'alerte et d'atténuation (*Early Warning and Mitigation System-EWMS*) de GITEWS sont présentés dans la Figure 12.

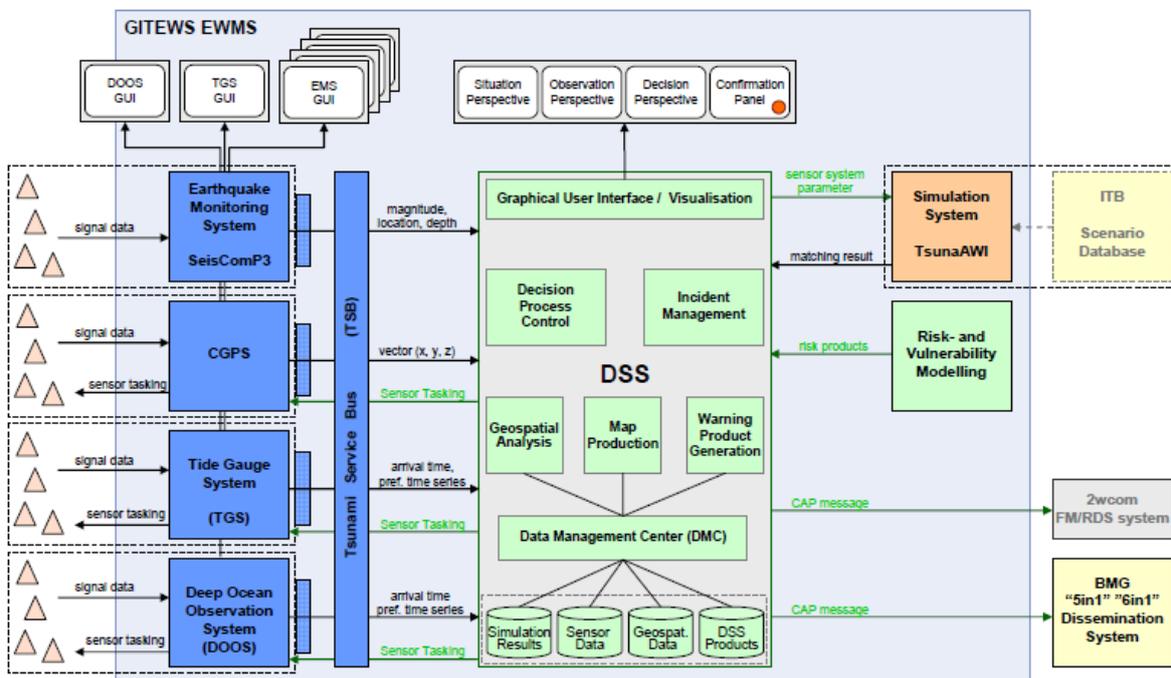


Figure 12. Architecture du système d'alerte et d'atténuation (EWMS). Source : (Steinmetz et al. 2010)

Le système s'efforce de fournir un avertissement le plus rapidement possible au bureau de météorologie, climatologie et géophysique Indonésien (BMKG) située à Jakarta, mais il n'est pas de sa propre responsabilité d'envoyer et de diffuser l'avertissement à d'autres destinataires. Le DSS délivre ses messages à un système de diffusion, qui n'est actionné qu'après une décision humaine prise sous la responsabilité du BMKG.

Afin d'être en mesure de produire une alerte spatialement différenciée, le DSS utilise une segmentation de la côte en parties plus petites, appelées le segment d'alerte. Le littoral de Sumatra, Java et Bali le long de la Sunda Arc a donc été segmenté en 125 segments d'alerte en utilisant les zones administratives (Steinmetz et al. 2010). Afin d'exprimer le niveau de menace pour un segment d'alerte, une estimation de la hauteur de vague (*estimation wave high-EWH*) à la côte est utilisée. L'EWH est ensuite cartographiée sur quatre niveaux de couleur codant le niveau d'avertissement pour chacun des segments d'alertes (Tableau 3).

Tableau 3. La définition actuelle de niveaux d'alerte (Source : Steinmetz et al. 2010)).

Catégorie de tsunami	Niveau d'alerte	Hauteur des vagues (WH) Echelle en mètres	Code couleur
Pas de tsunami	Pas d'alerte (<i>none</i>)	$0,0 \leq WH \leq 0,1$	Gris
tsunami mineur	De conseil (<i>Advisory</i>)	$0,1 \leq WH \leq 0,5$	Jaune
tsunami	Alerte (<i>Warning</i>)	$0,5 \leq WH \leq 3,0$	Orange
Tsunami majeur	Alerte majeure (<i>Major Warning</i>)	$3,0 \leq WH$	Rouge

2.1.1.3. Estimation du temps d'arrivée du tsunami

Selon l'UNESCO (2009) le temps d'arrivée du tsunami est le temps requis par la propagation de la vague de tsunami depuis l'arrêt des séismes jusqu'à ce que les premières grandes vagues du tsunami atteignent la côte. Le temps d'arrivée du tsunami dépend en effet de la distance de l'épicentre à la plage. Pour les grands tsunamis comme celui du 26 Décembre 2004, la vague se propage dans le monde entier (Titov et al. 2005). Le temps d'arrivée est donc fonction de la distance sur laquelle l'onde de tsunami se propage.

L'estimation du temps d'arrivée du tsunami est nécessaire dans la gestion du risque de tsunami, en particulier dans la planification de l'évacuation. Afin d'évacuer les habitants depuis des zones de danger de tsunami, il convient de calculer la durée de temps disponible avant que les vagues du tsunami n'atteignent la côte. Le schéma du processus de réaction à partir du moment où un séisme se produit et jusqu'à l'évacuation des personnes est décrit par Strunz et al. (2011) (Figure 13):

1. Temps de décision d'alerte. C'est le temps écoulé à partir de la détection d'un événement par les capteurs et des systèmes de surveillance jusqu'à ce que la décision d'avertissement soit prise.
2. Temps de diffusion d'alerte. C'est le temps techniquement consommé par la diffusion des avertissements aux dispositifs et institutions en transmettant un signal d'avertissement aux personnes exposées.

3. Temps de réponse anticipée. C'est le temps écoulé à partir de la réception des alertes par les populations exposées jusqu'à leur décision de réagir et d'évacuer.
4. Temps d'évacuation. C'est le temps requis pour atteindre une zone de sécurité.

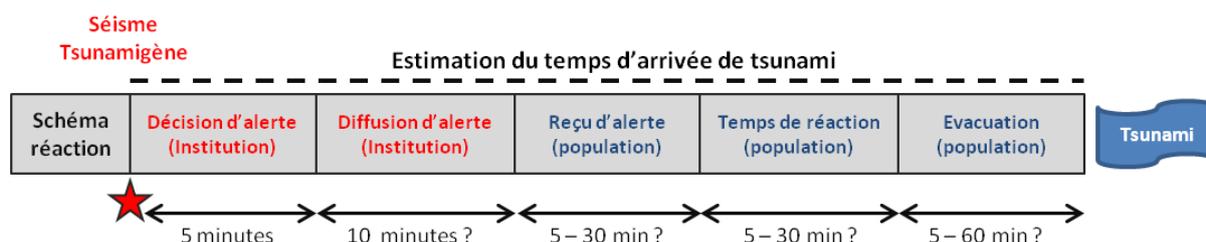


Figure 13. Processus de réaction et de l'estimation du temps d'arrivée du tsunami. Source : (Strunz et al. 2011)

De plus, Strunz et al (2011) ajoutent que tous ces temps de la chaîne de réaction ne peuvent pas être exactement quantifiés. On peut uniquement les estimer. Le « temps de décision d'alerte » est déterminé par l'efficacité des systèmes de détection et de surveillance. Les premières expériences basées sur le système GITEWS et le système sismique SeisComP3 indiquent que le temps décision d'alerte est d'environ 5 minutes, sur la base des informations de séismes et de scénarios de tsunami pré-calculées (Hanka et al. 2010). Ce temps est également influencé par la communication des données au centre d'alerte ainsi que par l'efficacité du mécanisme de décision au sein du centre d'alerte pour diffuser un avertissement.

Le « temps de diffusion d'alerte » dépend des moyens de communication techniques pour transférer un signal d'avertissement ou un message aux avertisseurs répartis le long de la côte.

Concernant le "temps de réponse anticipée", la réaction de la population lors de la réception d'un message d'avertissement doit être analysée. L'évaluation de cette composante de temps à l'échelle locale est effectuée d'une manière qualitative en interrogeant les populations concernées sur leur accessibilité aux alertes et leur réactivité lors des alertes à l'évacuation. Cette évaluation est très influencée par le niveau de préparation des populations et leurs capacités d'auto-alerte.

L'estimation du « Temps d'évacuation » est faite en utilisant une approche SIG. Le principe de base est d'évaluer le temps d'évacuation en utilisant le meilleur itinéraire d'évacuation à partir d'un point donné jusqu'à une zone d'évacuation temporaire (zone de topographie élevée ou bâtiment refuge).

L'estimation du temps d'arrivée d'un tsunami à Padang est de 23 minutes selon Taubenböck et al (2009). Cette valeur est proche de l'estimation faite par Imamura et al (2011) qui indiquait que la première vague atteindrait la côte de Padang 20 minutes après le séisme.

2.1.2. La prise en compte de la gestion des risques de catastrophes appropriée par la communauté.

Afin de construire un système d'alerte efficace, les progrès technologiques doivent s'accompagner d'un renforcement des capacités de gestion de l'alerte au niveau local et national. L'efficacité du dispositif devrait être renforcée par une bonne intégration des systèmes d'alerte et des programmes de réduction de risque. Il est important de mettre en place une coordination claire entre les dispositifs organisationnels et les institutions au niveau national et local et d'apporter un soutien intensif pour le développement des capacités de gestion du risque au niveau local, surtout en ce qui concerne le dialogue entre les acteurs (Spahn et al. 2010). A partir du tsunami de 2004, la prise en compte de la gestion des risques de catastrophes a augmenté. Après la promulgation de la loi n° 24 Année 2007 sur la gestion des catastrophes, le gouvernement a promulgué le décret présidentiel n° 8 de 2008 sur la création de l'Agence nationale de gestion des catastrophes (BNPB) (<http://www.bnpb.go.id/profil>). Le gouvernement Indonésien a établi ensuite les agences locales de gestion des catastrophes (BPBD) sur toutes les régions. L'agence locale fait le travail avec sa communauté afin d'établir le programme de réduction de risque au niveau local.

Le retour d'expérience du tsunami de 2004 est également essentiel. Les savoirs locaux des communautés ont contribué à sauver des vies pendant les catastrophes (UNESCO 2009). Environ 170.000 personnes d'Aceh et Minangkabau (\pm 4% de totale population de la province) sont mortes dans la partie nord de l'île de Sumatra. Cette même catastrophe a seulement causé 44 décès (\pm 0.05% de totale population) sur l'île de Simeulue (Gaillard et al. 2011). Les Simeulues, par leur attention aux phénomènes naturels, détectent les tsunamis plus rapidement, ce qui leur a permis de fuir immédiatement vers la montagne en 2004. En revanche, les habitants d'Aceh et de Minangkabau qui vivent à Banda Aceh et Meulaboh ne comprenaient pas les phénomènes naturels annonciateurs de l'arrivée du tsunami. Ils ont donc été largement affectés par le tsunami en raison du manque de connaissances sur la lecture des éléments naturels. Les leçons tirées de la comparaison ci-dessus montrent l'importance de la capacité des populations à mobiliser des connaissances pour détecter et surmonter le danger.

Cet apprentissage montre l'importance de l'approche centrée sur le développement des capacités de la société à réduire le risque de catastrophe (UNESCO 2009). Les communautés locales vivant

dans les zones à risques sont des victimes potentielles. Elles sont les plus concernées par l'impact des catastrophes. Ces communautés ont des connaissances locales sur la vulnérabilité de la région. De plus, ces populations ont des mécanismes traditionnels pour répondre aux changements de l'environnement. En temps de crise, les populations locales répondent immédiatement aux catastrophes et leur attachement à leur territoire fait que ces populations retournent à leur région afin de reconstruire après une catastrophe.

Cependant, la plupart des populations ne répondent pas aussi bien à l'avertissement naturel d'un événement à venir. Même si une évaluation des risques a été bien présentée à la population, il n'y a aucune garantie que la société donne une réponse appropriée au danger lorsqu'il se présente. La réaction de la communauté dépend de sa perception du risque, des avantages perçus de la gestion des risques et des méthodes locales utilisées.

Prenant en compte les éléments que nous venons de citer, il est nécessaire de développer une gestion des risques impliquant la communauté. Une démarche d'évaluation de la vulnérabilité à l'échelle locale est un outil important pour identifier la capacité des ménages et des communautés locales à gérer et à faire face aux urgences et aux catastrophes (Bollin, Hidajat, et Birkmann 2006). Cette approche offre la possibilité pour les populations locales d'évaluer la vulnérabilité de leur propre région sur la base de leur propre expérience. Grâce à cette approche, les communautés locales se trouvent en position de « décideur – planificateur ». Cependant, cette approche reste limitée à des expérimentations scientifiques d'évaluation des risques et de planification pour la réduction des risques.

2.2. Préparation des évacuations

2.2.1. Détermination la zone d'inondation du tsunami

Dans les zones à risques de tsunami, la détermination de la zone d'inondation potentielle par un tsunami est une étape préliminaire à réaliser pour optimiser les plans d'évacuation. Motivé par la situation très menacée de la ville de Padang, certains chercheurs ont tenté de développer une méthode pour déterminer les zones qui sont susceptibles d'être touchées par un tsunami à Padang. Pour déterminer la zone d'inondation, ils utilisent des modèles de propagation et d'inondation de tsunami. Le premier modèle a été développé par Borrero et al (2006). Ce modèle a tenté de reconstituer l'effet du tsunami déclenché par les séismes de 1797 et 1833 le long de la côte ouest de Sumatra, en particulier sur les villes de Padang et de Bengkulu. Bien que ce modèle ne soit pas très abouti, il a déjà permis d'avoir une première approximation de la zone de danger à Padang.

Le modèle suivant, plus complet, a été développé par Taubenböck et al (2009). Il intègre non seulement l'analyse des flux dynamiques mais aussi l'évaluation sociale et économique, et la vulnérabilité physique. Ce modèle prend en compte également l'évacuation dynamique pour améliorer la préparation de la société dans son ensemble à Padang. Cette analyse multi-disciplinaire est basée sur des ensembles de données détaillées pour la modélisation du *runup* et les inondations. La première vague arrive 23 minutes après le séisme. Des cartes d'inondation à grande échelle ont ainsi été créées pour la ville de Padang.

D'autres modèles plus détaillés ont été décrits par (Schlurmann et al. 2010). Ces modèles tiennent compte de l'existence des bâtiments dans les zones parcourues par le flux du Tsunami (Taubenböck et al., 2009). Ces modèles utilisent des données bathymétriques et topographiques plus fines (MNT raster au pas de 3 m). Ils intègrent également la valeur de subsidence statique évaluée à -1.32m ainsi que celle de marée haute de 0,8 m lorsque le tsunami survient. Pour ce scénario, le modèle génère des hauteurs de premières vagues atteignant 6,7m, de seconde vague à 2,0 m et de troisième vague à 5,0 m. L'heure d'arrivée de la première vague est de 16 minutes après le tremblement de terre. Ces résultats sont ensuite utilisés pour produire la carte d'inondation de tsunami à Padang. Basée sur la discussion menée avec les autorités à Padang, une carte d'inondation officielle au format A0 (Figure 14) a été réalisée et constitue une information de base pour le programme engagé par les autorités sur la réduction du risque (Schlurmann et al. 2010).



Figure 14. Carte d'inondation (issue des travaux de Schlurmann et al., 2010).

Cette carte montre que la hauteur d'eau varie de 1 m (bleu clair) au maximal d'inondation qui est de 9 m (bleu foncé). L'inondation sur la partie nord de cette carte est plus haute et aussi plus large que sur la partie sud. De plus, l'inondation s'étend jusqu'à 1,6 km à l'intérieur des terres dans cette partie tandis que la hauteur d'eau diminue vers la partie Est de la ville.

Une autre approche de la modélisation des inondations à Padang a été également effectuée par (Imamura et al. 2011). Ces auteurs ont développé un modèle d'inondation dans les zones résidentielles en faisant intervenir la résistance des bâtiments situés dans la région de risque de tsunami. Les hypothèses utilisées sont: (1) Aucun bâtiment ne résiste au tsunami (*Constant Roughness Model / CRM*), (2) Tous les bâtiments résistent au tsunami, et les informations du bâtiment sont intégrées dans la topographie (*Topographie Model / TM*). Ils ont constaté que la zone d'inondation du modèle CRM est presque deux fois plus étendue que dans le modèle TM. L'existence d'immeubles dans le modèle TM réduit l'énergie cinétique et réduit l'impact d'un nouveau flux de tsunami. Ils considèrent également que le tsunami se produit à marée haute (+0,8 m), et que le séisme provoque un affaissement du terrain (ce qui empire la situation). Pour ce scénario, le modèle CRM produit une hauteur d'eau maximale de 7,9 m.

2.2.2. Carte d'évacuation

Toute carte décrivant les zones d'inondation de tsunami, les voies d'évacuation et les zones de sécurité doit être conçue et fournie par le gouvernement afin de sensibiliser la population (UNESCO 2009). La carte doit être affichée dans un endroit public sur les zones de risque de tsunami (tels que des bâtiments gouvernementaux, des mosquées, des restaurants, des hôtels, des installations touristiques et dans chaque maison). Afin de faciliter le processus d'évacuation vers la zone refuge la plus proche, les cartes d'évacuation en cas de tsunami doivent être complétées par des signes indiquant les zones refuges sur toute voie d'évacuation utilisée.

Considérant l'importance des risques de tsunamis, la ville de Padang a publié une carte d'évacuation officielle en cas de tsunami (Figure 15) en Septembre 2010. La délimitation de zone d'inondation est construite selon le consensus entre la communauté scientifique locale, ONG, et également avec l'autorité locale en respectant la carte d'inondation modélisé construit par Taubenböck et al (2009). Cette carte a ensuite été distribuée dans toute la zone exposée au tsunami à Padang. Toutefois cette carte ne semble pas contenir les informations de base nécessaire à la planification de l'évacuation (Imamura et al. 2011). Il n'y a pas d'estimation de distribution de la hauteur d'eau sur la zone d'évacuation de tsunami et ni les limites des zones à évacuer. De plus la carte ne donne pas d'informations sur les zones refuges verticales, les voies d'évacuation officielles et les temps d'arrivée du tsunami sur la côte.

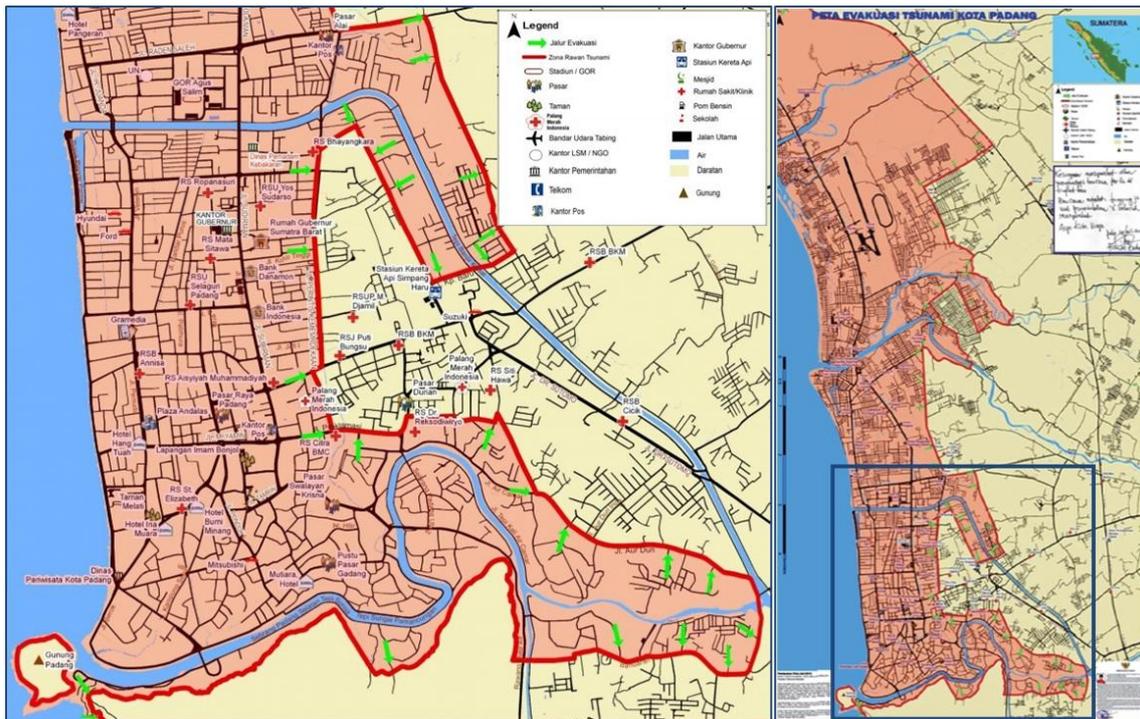


Figure 15. Carte d'évacuation officielle de tsunami à Padang. Adaptée de Imamura et al (2011).

2.3. Planification des évacuations

2.3.1. Principe du plan d'évacuation

Dans une situation d'urgence, l'évacuation est effectuée afin de déplacer les gens d'un endroit dangereux pour atteindre un endroit plus sécurisé, et elle doit généralement être faite le plus vite possible. Afin d'avoir une évacuation rapide dans cette situation, il est nécessaire de préparer des plans d'évacuations (Saadatseresht et al, 2009). Dans le cas de risque de tsunami dans une ville, (Goseberg et al. 2014) développent une approche multidisciplinaire concernant la planification de l'évacuation et la réduction des risques. Cette approche nécessite des données de référence concernant la délimitation des zones à risques de tsunami, l'évaluation des vulnérabilités physiques et sociales, et la modélisation des voies d'évacuation potentielles.

Selon Péroche et al. (2014), une évacuation planifiée et organisée de la population côtière constitue la mesure la plus efficace pour affronter la menace du risque de tsunami. Une telle évacuation nécessite un système d'alerte régional efficace, une estimation de la hauteur d'inondation maximale prévue par le tsunami, la préparation de la population à l'évacuation, et l'élaboration de plans d'urgence locaux et régionaux. Afin de produire un plan d'évacuation efficace, il est nécessaire d'évaluer le nombre de personnes à risque, les voies d'évacuation potentielles, les zones de sécurité et le temps disponible pour l'évacuation.

L'évacuation d'une zone urbaine entière ou même d'une partie d'une ville est un problème complexe dans les sociétés modernes qui comprend de nombreuses facettes de comportement et de gestion. La prégnance de ce problème a été démontrée lors de l'évacuation de vastes zones dans le nord du Japon consécutivement au séisme de magnitude 9,0 Mw suivi d'un tsunami dévastateur le 11 mars 2011 à Fukushima. Même si la société japonaise était bien sensibilisée et entraînée au processus d'évacuation, il y a eu d'importantes pertes humaines à cause du tsunami. Pour comprendre le problème, YUN et HAMADA (2012) ont mené des études sur les comportements d'évacuation après le catastrophe qui a causé 15 868 morts et 2 848 disparus. Le comportement des personnes évacuées lors de la catastrophe différait pour les survivants et les non-survivants. Une décision d'évacuer prise très rapidement améliorerait sensiblement le taux de survie.

Une autre étude réalisée par Murakami, Takimoto, et Pomonis (2012) sur les alertes et les comportements des personnes évacuées, a montré que la plupart des populations ont sous-estimé le risque de tsunami dans une zone de topographie plane, avec peu de connaissance d'événements antérieurs de type tsunamis, et que ces éléments ont retardé leur évacuation.

(Murakami, Takimoto, et Pomonis 2012) ajoute que plus de 60% des évacués ont utilisé des véhicules : ils se sentaient ainsi plus aptes à atteindre rapidement les zones de montagne éloignées. L'utilisation massive de voitures et les embouteillages qui en a résulté ont largement contribué à l'échec de l'évacuation. Le processus d'évacuation entraîne généralement un très haut niveau de congestion dans divers lieux, principalement parce que tous les véhicules essaient d'utiliser les mêmes routes en même temps. Considérant ces situations d'urgences, et afin que le plan d'évacuation soit optimal, Jha, Moore, et Pashaie (2004) soulignent l'importance d'évaluer les capacités de circulation lors de l'évacuation, y compris en réalisant des estimations de temps d'évacuation ainsi qu'une identification des obstacles. Cette estimation nécessite une évaluation et une représentation détaillée des flux du trafic de réseau. C'est ainsi que le modèle de la distribution spatiale et temporelle des congestions, y compris l'impact de *spillbacks* (blocages aux feus rouges), est très important pour une conception réaliste de scénarios d'évacuation d'urgence et pour tester les itinéraires proposés.

2.3.2. Accessibilité des zones refuges

L'accessibilité est identifiée comme un critère essentiel pour évaluer les politiques de transport, ainsi que l'utilisation des aménagements de terrain et les politiques de prestation de services urbains (Bristow et al. 2009). L'accessibilité a également été identifiée comme un indicateur de performance (Chapelon 1996). Cet aspect organisationnel du transport vers les zones refuges peut être pris en

compte dans les démarches de planification et d'aménagement du territoire et ainsi fournir une base pour des politiques intégrées plus globales qui englobent une action coordonnée dans les deux domaines à la fois (Helling 1998).

Selon Bavoux et al (2005), l'accessibilité d'un lieu est la plus ou moins grande facilité avec laquelle ce lieu peut être atteint à partir d'un ou plusieurs autres lieux. Dans le cas d'une évaluation de l'accessibilité pédestre de zones refuges, les voies de communications utilisables présentent des caractéristiques différentes d'un accès à un autre : largeur, revêtement, pente, encombrement, ... La vitesse de déplacement ne sera donc pas la même pour chaque type de voie. La distance temps évaluée en unité de durée (minutes) apparaît alors comme une distance pertinente et fiable pour mesurer l'écartement, l'éloignement entre les lieux et donc les différentiels d'accessibilité. Cette méthode de mesure de l'accessibilité rend compte du caractère anisotrope de l'espace géographique et de l'ensemble des facteurs qui influencent les conditions de déplacement : la morphologie et la topographie, les caractéristiques des espaces traversés (fonction de l'accès et revêtement du sol) et les flux de circulation qui font varier la qualité de l'accès selon le jour et l'heure du déplacement.

Concernant l'évaluation de l'accessibilité des voies d'évacuation en cas de tsunami, Péroche, Leone, et Gutton (2014) proposent un modèle basé sur les données de population à l'échelle locale, le développement de graphes de routes, l'identification de zones de sécurité potentielles et la vitesse de déplacement pédestre. Un modèle d'accessibilité comprend les éléments suivants (Leone et al. 2013) :

- la mesure du temps d'accès le long des itinéraires les plus rapides entre la zone de danger et des zones de refuge;
- l'estimation du nombre de personnes évacuées à l'aide de courbes d'accessibilité en fonction du temps, ce qui nous permet d'estimer le nombre de personnes pouvant être sauvées avant l'arrivée du tsunami ;
- la sélection automatique des sites d'évacuation et des itinéraires les plus pertinents, basés sur les meilleurs itinéraires et le nombre de personnes qui y convergent.

Pour une évacuation en cas de tsunami, l'accessibilité d'une zone refuge sera déterminée par la distance-temps du réseau le desservant. Mais, selon le moment de la journée, l'accessibilité en temps peut varier. L'accessibilité d'un ou plusieurs lieux n'est valable qu'à un seul instant t donné. L'accessibilité dépend directement du moment précis où elle a été mesurée (Leone et al. 2012). Par exemple l'accessibilité automobile d'un lieu en milieu urbain va dépendre des écarts de fréquentation entre les instants d'heures creuses et les instants d'heures pleines qui peuvent voir

survenir des bouchons. La précision des résultats est conditionnée par l'obtention de données de trafic suffisamment fines pour modéliser la variabilité de l'accessibilité au cours de la journée (Cohen, 1990). Les résultats de débits doivent être ensuite confrontés à la capacité des voies qui les supportent afin d'estimer le niveau d'utilisation de celles-ci et les vitesses de circulation permises (Appert et Chapelon, 2008).

2.4. Zones refuges

Une zone refuge est un espace de mise en sécurité des personnes assimilable à une zone de regroupement. Les zones de refuge doivent pouvoir accueillir plusieurs personnes pour un temps indéterminé. Il est préférable que la capacité d'accueil soit adaptée à la distribution géographique de la population et que la zone soit balisée, aménagée, disponible et facilement accessible aux services de secours. En cas de tsunami elle doit nécessairement être au-dessus des plus hautes eaux connues ou modélisées.

Il existe deux types de zone refuge : horizontales (topographiques) ou verticales (infrastructures). Ces zones doivent être bien connues par les populations. C'est ainsi qu'il est très important de mettre en place les signalétiques de zone refuge et les signalétiques de zone exposée aux tsunamis sur les secteurs soumis au risque de tsunami (Figure 16). Les zones refuges topographiques sont des espaces de regroupement nécessitant une évacuation horizontale. Ces espaces doivent se situer à une altitude assez élevée pour ne pas être submergés. L'avantage de ces zones est d'être des zones naturelles, avec une capacité d'accueil quasiment illimitée car la fuite vers des espaces situés encore plus haut reste souvent possible. Ces zones sont généralement mieux connectées aux voies de communication situées hors d'eau. Mais l'inconvénient majeur apparaît dans un besoin de mobilité important avec des temps d'accès généralement plus longs que pour les zones refuges verticales.



- Signalétique d'une zone exposée aux tsunamis (gauche)
- Signalétique d'une zone d'évacuation horizontale (milieu)
- Signalétique d'une zone d'évacuation verticale (droite)

Figure 16. Signalétique officielle « tsunami » adoptée par l'UNESCO (norme ISO 20712-12 : 2008)

Les zones refuges verticales (évacuation par le haut) sont généralement des bâtiments ou des monticules de terre qui ont une hauteur suffisante pour élever les évacués au dessus du niveau de l'inondation du tsunami. Ils sont de plus construits avec une solidité et une résistance suffisantes pour résister au déferlement des vagues d'un tsunami (FEMA, 2012). Ces refuges doivent être implantés dans un endroit où les populations peuvent y accéder dans les délais disponibles depuis l'alerte déclenchée indiquant l'arrivée du tsunami. De plus, il est recommandé que ces zones possèdent un accès au toit pour faciliter une évacuation par les airs. L'avantage des zones refuges verticales réside dans un temps d'accessibilité normalement plus court que pour les zones de refuges topographiques. Mais leur inconvénient majeur réside dans une capacité d'accueil limitée avec un risque de refoulement des personnes arrivant trop tard et par le fait que leur solidité peut être mise à mal par le séisme tsunamigène.

Dans les endroits présentant un risque de tsunami de source locale, la FEMA (2008) souligne que l'implantation des zones refuges verticales doit prendre en considération la distance entre ces zones afin de sauver le plus de vies possible (Figure 17). Leur emplacement doit permettre aux gens de les atteindre à pied. Par exemple, pour un temps d'arrivée de tsunami d'environ 30 minutes après un séisme, les zones refuges verticales devraient être implantées à 1 mile (1,609 km) maximum depuis tous les points de départ, ou à 2 miles (3,218 km) entre les zones. De plus il est recommandé d'installer une zone refuge verticale assez loin de dangers potentiels pouvant causer des dommages supplémentaires à la structure. Les refuges doivent donc être éloignés des grands débris flottants (exemple un terminal de conteneurs) et des sources d'explosion (comme une station d'essence, une centrale nucléaire par exemple), pouvant porter atteinte à la sécurité des occupants.

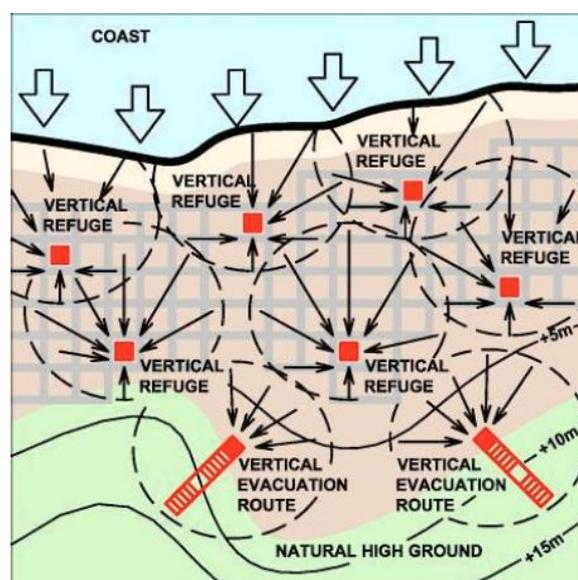


Figure 17. Emplacement de zones refuges verticales optimisé en fonction de la distance entre elles. Les flèches indiquent les itinéraires prévus vers les zones refuges verticales (FEMA 2008 ; 2012).

Les tailles des zones refuges verticales sont déterminées en fonction du nombre d'occupants prévus, le type d'occupation et la durée d'occupation. Le nombre d'occupants dépend de la population présente autour de la zone refuge et du nombre de zones refuges situées dans le voisinage. La durée d'occupation dépendra de la nature du danger et de la fonction principale de la zone refuge (FEMA 2012). De plus, la superficie requise par chaque individu dans une zone refuge est influencée par la durée du séjour dans la zone refuge. Une durée d'occupation minimale est prévue entre 8 et 12 heures dans les abris tsunami. En effet, sachant que les tsunamis peuvent inclure plusieurs cycles, il est recommandé que les réfugiés restent dans un refuge jusqu'à ce que la deuxième vague arrive. Cela peut durer jusqu'à 24 heures selon la distance à la source du tsunami. Dans le cas des séjours de courte durée, la superficie minimale par occupant recommandée pour un refuge de tsunami est de 10 pieds carrés par personne (0,92 m²) (FEMA 2012).

Afin de remplir efficacement son rôle de zone refuge verticale, il est important que les étages refuges soient bien au-dessus de l'estimation maximale de l'inondation tsunami sur le site. La hauteur des zones refuges doit tenir compte des incertitudes dans l'estimation de hauteur de tsunami. C'est pourquoi la FEMA (2008) propose une localisation des zones refuge à une altitude supérieure de 30% + 3 m au dessus des *runups* maximaux envisagés.

Selon la FEMA (2008), plusieurs types de refuge peuvent être envisagés : un monticule, des bâtiments de parking, des bâtiments publics, des bâtiments commerciaux ou des écoles. S'il n'y a pas de terrain naturellement élevé dans les zones inondables du tsunami, l'utilisation d'un bâtiment existant est le premier choix. Il est nécessaire que le bâtiment existant ait une hauteur suffisante et une résistance de structure adéquate pour résister aux effets du séisme et du tsunami : (a) système solide avec une capacité de réserve pour résister à des forces extrêmes; (b) des systèmes ouverts qui permettent à l'eau de circuler à travers avec un minimum de résistance; (c) les systèmes ductiles qui résistent à des forces extrêmes sans défaillance; (d) les systèmes redondants qui peuvent supporter une défaillance partielle sans effondrement progressif.



Figure 18. Une zone refuge verticale de type école à Padang (Photo de Henky Mayaguezz, 15092013).

2.5. Vitesses de déplacement

Le processus d'évacuation se déroule depuis l'avertissement jusqu'à l'arrivée de la première vague. Pour un tsunami de longue distance, il se peut qu'il y ait assez de temps pour déplacer toute la communauté de la zone de danger vers les endroits les plus sûrs. Dans ce cas, le déplacement est envisageable en utilisant des véhicules. Par contre, dans le cas de tsunamis de source locale, le temps d'évacuation des tsunamis est très limité. L'utilisation de véhicules peut non seulement causer une congestion des routes d'évacuation, mais représente également une menace pour les personnes situées dans les véhicules. Afin d'assurer la sécurité et l'évacuation en douceur, l'évacuation d'un tsunami local devrait être mise en œuvre sans véhicule (à pied), conformément aux recommandations de l'UNESCO (2009).

Afin de connaître les vitesses de déplacement des piétons, (Péroche, Leone, et Gutton, 2014) synthétise certaines vitesses de déplacement qui sont disponible dans la littérature. En l'absence d'interaction avec d'autres individus ou avec des obstacles présents dans l'environnement, un piéton se déplace à une vitesse, dite "de confort", de l'ordre de 1,3 m/s (Moussaïd 2010). Une autre étude menée par (Knoblauch, Pietrucha, et Nitzburg 1996) indique que la vitesse de déplacement pour les piétons les plus jeunes est de 1,22 m/s et pour les personnes âgées est de 0,91 m/s. Le niveau de déplacement est influencé par divers facteurs y compris la largeur de voie, la densité de voie, le nombre de personnes dans le groupe, etc. En cas d'escaliers, une valeur moyenne additionnelle de 0,5 m / s est présumée, suggérée par (Fruin,1971)

Une autre étude sur les vitesses de déplacement dans le cas de catastrophe propose des valeurs différentes. Le *Japan Institut for Safety and Disaster Preparedness* (1987) indique la variation des vitesses de déplacement pendant le processus d'évacuation (Sugimoto et al. 2003). Les différences de vitesses sont influencées par les conditions de déplacement (Tableau 4).

Tableau 4. Les différentes vitesses selon la condition de déplacements (Source : *Japan Institut for safety and Disaster Preparedness* (1987), Sugimoto et al (2003).

Condition de déplacement	Vitesse moyenne
Personne poussant un landau	1,070 m/s
Personne avec un enfant	1,020 m/s
Personne âgée	0,948 m/s
Groupe de personnes âgées	0,751 m/s

Cette approche est aussi appliquée par Dewi, (2010) dans la modélisation d'évacuation sur la ville Cilacap en Indonésie. La vitesse de déplacement utilisée dans le modèle est la vitesse d'un groupe âgé (0,751 m/s). Cette vitesse considère que si les personnes âgées peuvent atteindre les zones refuges, automatiquement les autres personnes ayant une vitesse plus élevée auront atteint ces zones refuges.

De plus, Dewi (2010) a pris en considération la largeur de voie d'évacuation pour déterminer la vitesse de déplacement. Pendant une situation de panique, les populations fuiront ensemble sur les voies d'évacuation. Les routes vont saturer très vite de part l'afflux de population et toutes les surfaces des routes seront utilisées pour gagner du temps. Dewi (2010) utilise la valeur de superficie de 0,625 m² par personne qui est nécessaire pour chaque personne en mouvement dans une foule compacte.

Conclusion du chapitre

La connaissance historique des tsunamis en Indonésie et à Sumatra nous permet de souligner les efforts visant à renforcer la capacité d'évacuation face aux tsunamis. Il est à noter tout d'abord que la coopération entre le gouvernement Indonésien et le gouvernement Allemand, a entraîné la mise en place d'un système d'alerte aux tsunamis. La présence de ce système est très importante pour détecter et diffuser les alertes des tsunamis dans les 5 minutes après une activité sismique tectonique. De plus, les progrès technologiques doivent s'accompagner d'un développement du renforcement de sa capacité de gestion de l'alerte au niveau local et national. Ils devraient être renforcés par une bonne intégration entre le système d'alerte et le programme de réduction de risque.

Afin de mettre en œuvre le programme de réduction de risque de tsunami à Padang, il convient de déterminer une zone d'inondation potentielle. C'est un préalable important qui sera suivi de la mise en place d'une méthode développant une approche multidisciplinaire concernant la planification de l'évacuation et la réduction des risques. Il s'agira d'évaluer les expositions et vulnérabilités physiques et humaines et de modéliser l'accessibilité des zones refuges les plus proches et évaluer la capacité d'évacuation. Cette méthode repose en partie sur la constitution d'une base de données spatio-temporelle modélisant les enjeux.

Chapitre 3. La nécessité d'une méthode d'évaluation spatio-temporelle de l'exposition humaine

3.1. Evaluation des enjeux humains

Le terme enjeu décrit les éléments potentiellement exposés à un aléa et qui sont plus ou moins sensibles à l'endommagement ou au dysfonctionnement. Cette notion recouvre celle de la valeur associée aux éléments exposés (valeur économique, environnementale, stratégique, sociale, patrimoniale, fonctionnelle, d'usage etc.). Les enjeux peuvent donc être des biens, des infrastructures, des personnes, des fonctions ou des activités (Leone et al. 2010). La notion de vulnérabilité est plus complexe. Il s'agit de la propension à l'endommagement d'un enjeu. On distingue ainsi plusieurs types de vulnérabilités qui sont ici développées. Son opposé, la résilience, décrit la capacité d'un enjeu à se remettre de l'événement (Leone et Vinet 2006).

En considérant l'importance de la valeur humaine dans nos sociétés, la sauvegarde des vies humaines devient le premier objectif des stratégies de prévention des risques. On s'intéresse à sa capacité de survie et à l'optimisation de cette dernière. Cette préoccupation (l'individu) est au centre du modèle conceptuel de vulnérabilité systémique développé par Leone (2007), où l'homme est l'« enjeu suprême à préserver », et placé à ce titre « au cœur du processus d'évaluation » des vulnérabilités (Figure 19).

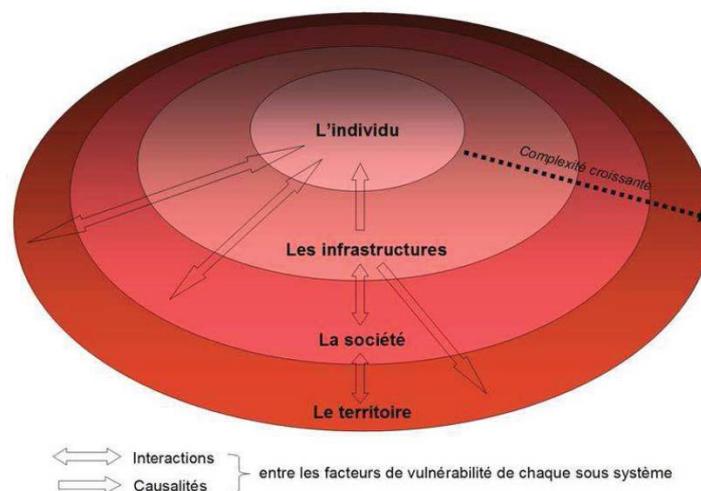


Figure 19. Modèle conceptuel du système vulnérable selon Leone [2007].

Selon Leone (2007), la vulnérabilité de l'individu (vulnérabilité humaine) est dépendante de la résistance du bâtiment où il se trouve (vulnérabilité structurelle), de facteurs intrinsèques

(psychosociologiques et physiologiques) liés à la société à laquelle il appartient. Enfin, l'homme et le milieu construit dans lequel il évolue appartiennent respectivement à des systèmes sociaux et territoriaux organisés présentant une vulnérabilité fonctionnelle, c'est-à-dire une propension à se voir désorganisés par un événement dommageable. La vulnérabilité est donc largement dépendante des vulnérabilités humaines et structurelles et d'une multitude d'autres variables (géographiques, démographiques, institutionnelles, etc.).

Dans le cadre de cette thèse, on s'intéresse aux deux éléments fondamentaux du système vulnérable. Ce sont les individus et les infrastructures dans lesquelles ils sont présents (bâtiments, mais aussi des espaces de plein air comme la rue, la plage, ...), et qui viennent conditionner directement leur vulnérabilité physique, c'est-à-dire leur propension à être affectés physiquement par un tsunami.

3.1.1. La vulnérabilité humaine

Les principaux facteurs de vulnérabilité humaine face aux tsunamis sont synthétisés par Leone et al (2012). Ces facteurs sont construits à partir des différents retours d'expérience, notamment celui sur le tsunami du 26 décembre 2004 (Tableau 5).

Tableau 5. Principaux facteurs de vulnérabilité humaine (individu) et critères d'évacuations associés.

Classification des facteurs de vulnérabilité humaine à l'échelle de l'individu	Critères associés
Classe 1 : Les facteurs physiologiques	Sexe, Age, Santé, Mobilité et Adaptabilité
Classe 2 : Les facteurs géographiques	Date et heure de la catastrophe Localisation de l'individu Proximité au risque Capacité de fuite
Classe 3 : Les facteurs psychosociologiques	Langue Connaissance du phénomène Perception du risque Mémoire du risque Acceptabilité
Classe 4 : Les facteurs socioculturels	Mode de vie : croyance, niveau d'éducation, structure familiale
Classe 5 : Les facteurs socioéconomiques	Situation socioprofessionnelle Moyens de subsistance Accès à l'information Confiance dans les autorités

L'âge, le sexe, le genre et la mobilité (facteurs physiologiques) sont autant de critères à prendre en compte lors d'un tsunami. La mobilité se trouve largement affectée par l'arrivée d'un tsunami, c'est-à-dire la capacité physique de mobilité face à une vitesse et une hauteur d'eau (Koshimura et al.

2006).

La localisation de l'individu au moment précis (facteurs géographiques) conditionne logiquement son exposition à un aléa, tout comme sa possibilité d'évitement du phénomène, par la fuite ou l'abri. Ainsi, une quantification des enjeux humains est à développer. Enfin, la physiologie de l'individu influence sa capacité de résistance. Les hommes ont généralement une taille, une force et une résistance physique plus importante que les femmes. De plus l'âge, le genre et la mobilité sont autant de critères à prendre en compte lors d'un tsunami. Il serait donc nécessaire aussi de qualifier les enjeux humains.

On constate l'importance de la perception et de la préparation au risque des individus (facteurs psychosociologiques) dans la variabilité de leur vulnérabilité : représentation, connaissance des mesures de protection. Le savoir passe par l'acquisition d'une connaissance sur le phénomène qui va modifier la représentation de l'individu vis-à-vis du risque encouru. Cette perception dépend des facteurs environnementaux dans lesquels ont évolué les groupes sociaux mais aussi de leur culture et plus individuellement de la force physique et surtout mentale de chacun.

Plusieurs retours d'expérience ont montré à quel point la mémoire du risque était un critère essentiel qui a permis de sauver bon nombres de vies. Lors du tsunami de 2004 certaines personnes ne connaissaient même pas l'existence du mot tsunami. Des dizaines de milliers de personnes sont mortes car elles n'avaient aucune connaissance du phénomène. Lorsque la mer s'est retirée de plus d'un kilomètre annonçant alors l'arrivée imminente du tsunami, des centaines de personnes se sont précipitées vers la mer pour ramasser les poissons échoués. Sur l'île de Simeulue il n'y eu que 44 morts car un vieil homme avait déjà vécu un tsunami. La mémoire du risque perpétuée par le vieil homme sur l'île de Simeulue a aidé les populations à reconnaître l'arrivée d'un tsunami (Gaillard et al. 2011). Elle est transmise de génération en génération. Grâce à cette tradition locale, les populations se sont réfugiées sur les collines lors du tsunami de 2004.

En effet, certains retours d'expérience ont montré que des civilisations interprétaient les grandes catastrophes comme une intervention divine (facteurs socioculturels). Le niveau d'éducation et la structure familiale sont aussi des facteurs importants influents sur la perception et la représentation du phénomène. On peut tirer un exemple du tsunami de décembre 2004. Une fille britannique de 11 ans s'appelle Tilly Smith, était sur la plage de Maikhao (île de Phuket) le 26 décembre 2004. Elle a remarqué que la mer se retirait au loin. Elle a prévenu sa mère de l'anomalie annonciatrice du tsunami, et la plage a été évacuée, sauvant ainsi des dizaines de personnes. La structure familiale devient alors un critère essentiel lors de l'arrivée d'un tsunami. Les enfants doivent être portés ou

attendus par les parents, ce qui influe sur la mobilité et la capacité de fuite.

Une autre grande classe de facteurs de vulnérabilité humaine regroupe les facteurs dits socio-économiques. La situation socioprofessionnelle est directement liée aux moyens de subsistance d'un individu. Cette marginalisation socioéconomique peut amener l'individu à être complètement isolé et donc ne plus accéder à l'information. A l'arrivée de la catastrophe, il faut avoir une bonne confiance envers les autorités. La confiance dans les autorités est un des facteurs sur lesquels il est possible d'agir à plus ou moins long terme par des campagnes d'information et de prévention.

3.1.2. La vulnérabilité structurelle

Le tsunami en décembre 2004 a fourni de nombreuses informations sur la mise au point d'une classification du bâti vis-à-vis des dégâts structurels occasionnés par le tsunami de forte intensité : l'étendue des dégâts a permis de développer de nombreuses approches visant à évaluer la résistance de structures bâties face à cet aléa. Il s'agit dès lors de comparer la résistance de bâtiments en fonction de ses caractéristiques structurelles.

Basée sur le retour d'expérience de cet aléa en Indonésie, Leone et al (2010) et Gauraz et al (2009) ont mis au point des courbes d'endommagement empiriques du bâti. La classification du bâti présente 5 classes de vulnérabilité décroissante (Figure 20). Ils ont fait la distinction entre les bâtiments individuels et collectifs, entre les auto-construits et les « calculés », entre les renforcés ou non. Ainsi les bâtiments de la classe A auto-construits, en matériaux légers et sans armature sont les plus vulnérables, mais aussi habités par les personnes les plus pauvres.

Classes de vulnérabilité du bâti (tsunami - Banda Aceh)						
	A	B	C	D	E	
Critères d'identification terrain	Bâtiment individuel avec structure bois, remplissage de bois ou de briques, couverture de tuiles plates rouges ou de tôles brutes, pas d'étage, parfois sur pilotis	Bâtiment individuel avec structure béton à peine renforcée (poteaux de 20 cm * 20 cm), maçonnerie de briques ou de moellons, 0 à 1 étage, couverture de tôles brutes ou peintes, ou de panneaux-tuiles rouges ou gris	Bâtiment individuel avec structure béton renforcée, maçonnerie de briques, moellons ou béton, 1 étage, couverture de panneaux-tuiles rouges, bleus, gris ou verts ou de tuiles rouges	Bâtiment collectif avec structure béton non renforcée, 1 à 3 étages, couverture de tôles ou de panneaux-tuiles	Bâtiment collectif avec structure béton renforcée, 1 à 3 étages, couvertures diverses	
Vue terrain						
Critères d'identification aérienne	Géométrie en plan simple (rectangle ou carré). Toitures rouillées et planes. Petite dimension.	Géométrie en plan simple (rectangle ou carré). Toitures planes rarement rouillées et plus souvent de couleur uniforme grise ou rouge. Dimension petite à moyenne.	Géométrie en plan plus complexe. Plusieurs niveaux de toitures. Toitures inclinées et de couleurs vives. Dimension moyenne à grande.	Géométrie en plan simple (rectangle). Toitures planes ou inclinées, rouillées le plus souvent. Grande dimension.	Géométrie en plan plus ou moins simple. Terrasses ou toitures diverses. Grande dimension.	Les mosquées présentent une géométrie simple (carré) avec un toit plat ou à quatre pans surmonté d'une coupole.
Vue aérienne (échelles variables)						
				Echelle réduite par 1,5	Echelle réduite par 2	

Figure 20. Classification du bâti indonésien selon 5 classes de vulnérabilité décroissante (Leone, 2007).

Cette typologie se base sur des critères d'identifications visuels de terrain et aériens, facilement reconnaissables, qui ne nécessitent pas des connaissances approfondies en architecture :

- Nature de la maçonnerie (bois, brique, béton) ;
- Nature de la toiture (tuile, tôle, panneau...) ;
- Nombre d'étages
- Bâtiment isolé ou collectif ;
- Nature des structures porteuses (béton renforcé ou non) ;
- Taille des structures porteuses (poteau > 20 cm ou non) ;
- Géométrie du bâtiment (en plan simple ou complexe).

Bien que cette typologie soit construite sur un pays tropical en voie de développement, elle est assez facilement transférable à d'autres pays (Leone et al. 2012). Il faut prendre en considération des méthodes de construction qui sont différentes selon la culture des pays observés. Mais cette typologie peut se réappliquer directement dans les autres régions Indonésiennes. C'est pourquoi nous allons adapter cette méthode pour évaluer la vulnérabilité des bâtiments à Padang. De plus, l'identification des classes structurelles repose sur des critères facilement repérables sur le terrain. Ces critères permettent de réaliser un diagnostic rapide et efficace d'un grand nombre de bâtiments.

3.2. Interaction entre aléa et enjeux

3.2.1. Résistance des enjeux structuraux face à l'aléa tsunami

Leone (2007) a évalué la résistance du bâti en fonction de ses caractéristiques structurelles. Les dommages ont été hiérarchisés en 6 classes suivant une gravité croissante (D0 à D5). La diversité des modes d'action du tsunami (zone de transit, d'inondation ou de déferlement) et la succession de plusieurs vagues de tsunami ont entraîné des dommages variables sur le bâti, en nature et en intensité, qui vont de la légère dégradation (D0) à l'arasement total avec déblaiement (D5).

De plus, Leone (2007) a intégré les 6 niveaux d'endommagement (D0, D1, D2, D3, D4, D5) et les classes de vulnérabilité du bâti (A, B, C, D, E) décrits précédemment (Figure 21). Ces critères qualitatifs sont clairement explicités afin de bien analyser l'endommagement à de tsunami.

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

	D3	D4	D5
	Domages aux structures pouvant affecter la stabilité du bâtiment (fracturation des piliers, effondrement partiel des planchers)	Domages lourds aux structures avec effondrement partiel du bâtiment	Destruction totale du bâtiment avec ou sans arasement
			
	B	C	B

Figure 21. Typologie des dommages sur les bâtiments. Source : adapté de Leone (2007).

Le rapport entre les classes de bâti et la hauteur de la submersion est décrit en Figure 22. Le graphique présente la position des cinq classes de bâti par rapport aux niveaux de dommage en fonction des variations de hauteur du flux du tsunami. De plus, les seuils de destruction des bâtiments sont liés également à la vitesse de flux (Tableau 6). Plus la vitesse de flux est importante plus destructeur est le tsunami (Figure 22).

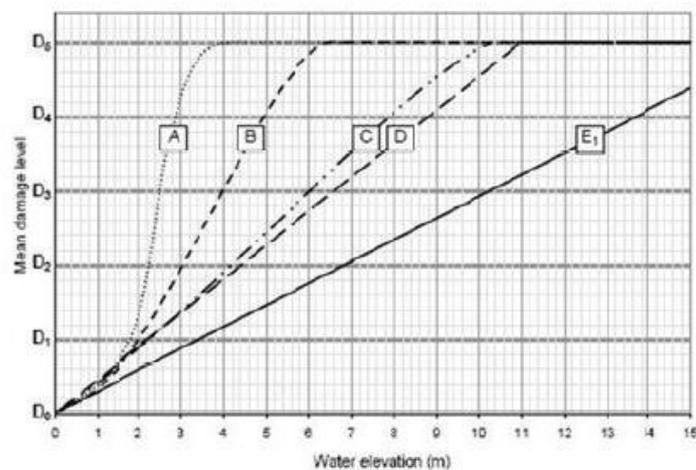


Figure 22. Courbes de vulnérabilité de 5 classes de bâtiments (A, B, C, D, E) exprimant le niveau moyen des dommages (D0 à D5) en fonction de la hauteur de submersion d'un tsunami. Source : extrait de Leone et al. (2010).

Tableau 6. Seuils de destruction totale des bâtiments selon leur classe de vulnérabilité structurelle. Source : adapté de Leone et al. (2012) et Koshimura et al. (2009).

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

A titre de comparaison, Koshimura et al. (2009) ont également établi une relation directe entre la résistance des bâtiments et les caractéristiques de l'aléa tsunami (Figure 23). Il existe en effet une très bonne corrélation entre la probabilité de dommage et les caractéristiques de l'inondation (vitesse et hauteur du flux). Par contre, ces auteurs ne distinguent pas la classe vulnérabilité structurelle, comme cela est fait dans les études réalisées par Leone, de Richmond, et Vinet (2010b); Gauraz et al.(2009). C'est une évidence qu'un bâtiment de plusieurs étages construit en béton armé et bien calculé possède un niveau de résistance supérieur à celui d'un bâtiment d'habitation individuel sans étage et sans armature.

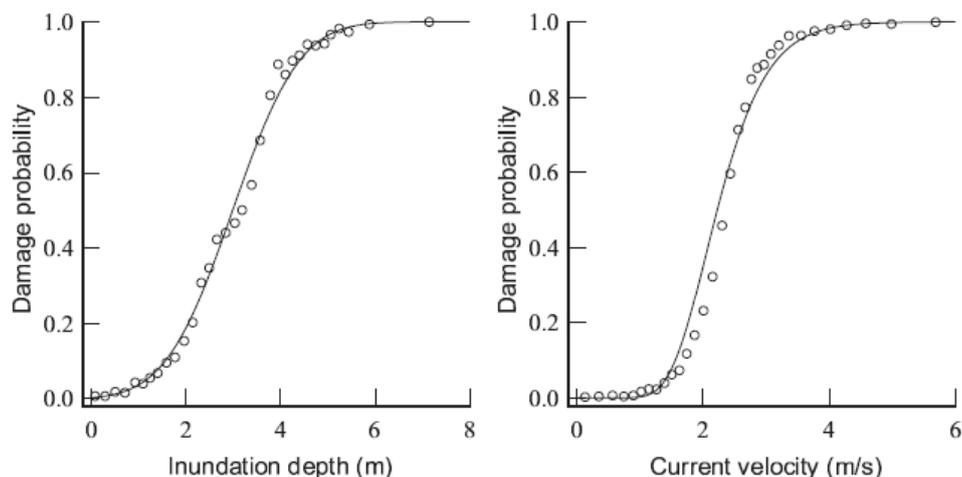
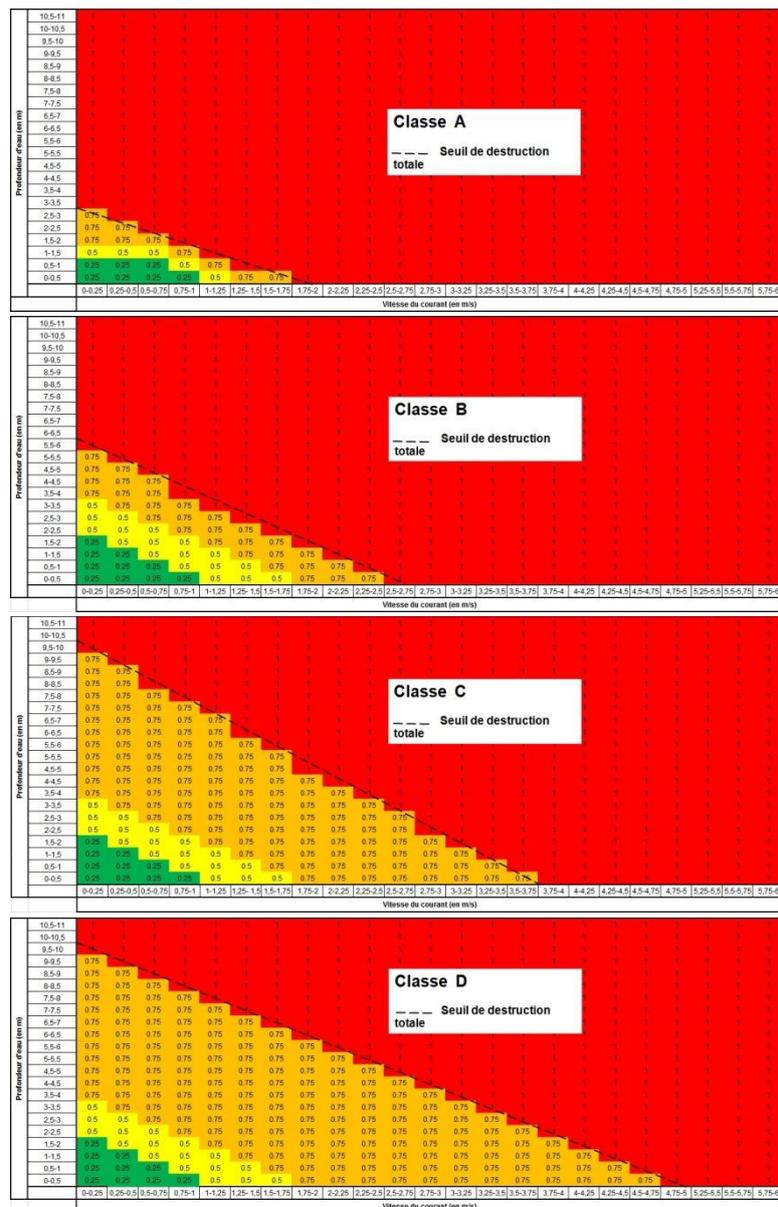


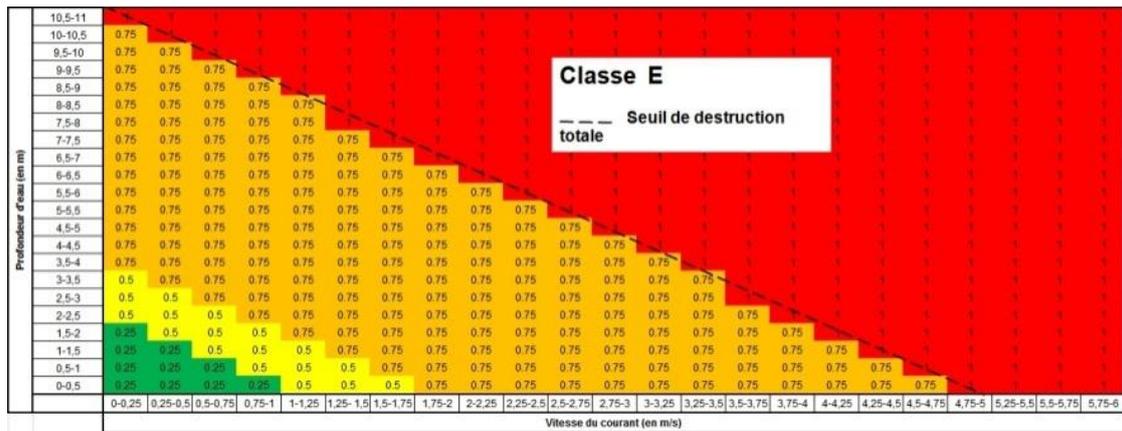
Figure 23. Rapport entre probabilité de dommage (damage probability), profondeur d'inondation (inundation depth) et vitesse de courant (current velocity). Source : extrait de Koshimura et al. (2009).

3.2.2. Capacité de survie des individus à l'intérieur de bâti et nécessité de prendre en compte des niveaux de protections structurelles.

En cas de tsunami, les personnes se trouvant à l'intérieur d'un bâtiment sont a priori davantage protégées que celles se trouvant à l'extérieur. Le niveau de protection va dépendre de la résistance du bâti, de son étanchéité, mais également des capacités des individus à se mettre à l'abri, par exemple en cherchant à gagner un espace refuge à l'étage. Afin de moduler les probabilités de décès en fonction de ces conditions « d'environnement immédiat », Leone et al. (2012) ont construit des

matrices de probabilité de décès en considérant les caractéristiques d'inondations (hauteur et vitesse de flux) par classe de vulnérabilité de bâtiment (Figure 24). Exprimées entre 0 et 1, les matrices ont été hiérarchisées en 4 classes : Très forte (1), Forte (0,75), Moyenne (0,5) et Faible (0,25). La valeur nulle est appliquée uniquement aux secteurs non inondés. Chaque matrice fait également l'hypothèse que la probabilité de décès possède un maximal (Pd = 1). Ces matrices intègrent les seuils de destruction totale (D5) donnés par les courbes de vulnérabilité empiriques construites (Leone, de Richemond, et Vinet 2010b) ou extrapolées (Gauraz et al. 2009) à partir de relevés de dommages effectués après le tsunami de 2004 à Banda Aceh (Indonésie).





----- Seuil de destruction totale du bâtiment. Sources : (Leone, de Richmond, et Vinet 2010b; Gauraz et al. 2009; Koshimura et al. 2009).

Figure 24. Matrice de probabilité de décès (Pd) des personnes se trouvant à l'intérieur du bâti proposé par Leone et al. (2012).

Ces matrices s'appliquent uniquement aux personnes se trouvant au rez-de-chaussée. De plus, ces matrices sont également modulées en fonction de l'existence ou non d'un étage refuge au-dessus de la hauteur d'inondation modélisée, et aussi en fonction de la présence ou non d'au moins une grande ouverture au rez-de-chaussée. Ces matrices sont donc ajustées selon les règles de pondération suivantes : + 0.25 (max 1) en cas de présence de grandes ouvertures, et – 0.25 en cas d'existence d'un étage refuge au dessus de la hauteur d'inondation maximale.

3.2.3. Capacité de survie des individus et l'importance de la prise en compte des débris flottants dans l'interaction aléa/enjeux.

En cas de tsunami, les personnes situées à l'extérieur des bâtiments sont plus exposées qu'à l'intérieur. Les impacts les plus déterminants pour la capacité de résistance des individus sont les effets directs d'un tsunami, du fait du courant, du manque de protection vis-à-vis des débris flottants ou de la difficulté d'atteindre un étage refuge. Afin de bien comprendre la capacité de résistance des individus face à une inondation, les services de l'Etat français ont réalisé des travaux de recherche en ajustant une lame d'eau plus ou moins haute et plus ou moins rapide. Ces travaux ont contribué au développement des matrices de résistance des individus aux submersions par des tsunamis dans les espaces de plein air.

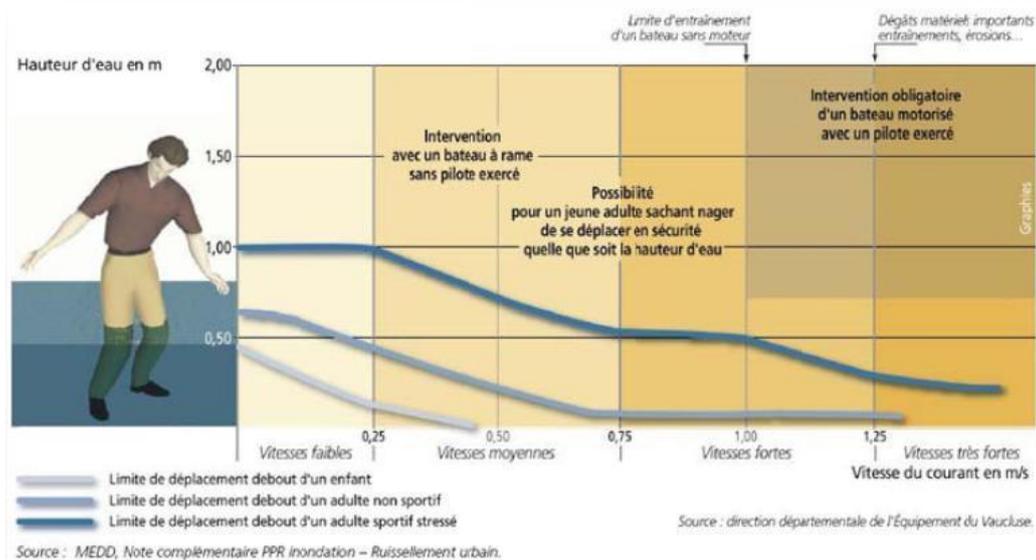


Figure 25. Limites de déplacements des personnes en fonction de la hauteur et de la vitesse de courant (Baladès, 2004).

En considérant les existences de débris potentiels flottants, (Leone et al. 2012) ont intégré ces travaux au moyen de probabilités de décès (notée P_d). Le seuil d'aléa pris en compte pour une $P_d \geq 0.5$ est donné par la courbe de limitation de déplacement debout d'un adulte sportif stressé pris dans un courant d'eau claire, construite à partir des profondeurs d'eau et des vitesses du courant. Les seuils de déplacement sont respectivement d'environ 50 cm et 0,50 m/s pour un enfant, de 0,75 cm et 1,25 m/s pour un adulte non sportif, et de 1 m à près de 1,5 m/s pour un adulte sportif stressé (Figure 25). Le principe de ces matrices est de fixer la probabilité maximale de décès ($P_d = 1$) à partir de certains seuils d'aléa et de moduler les probabilités de classes inférieures sur des critères plus arbitraires. Ces probabilités s'appliquent à des individus de corpulence normale.

Leone et al. (2012) ont également intégré un autre seuil qui correspond aux personnes situées à l'intérieur d'un véhicule. L'inondation peut faire flotter un véhicule standard de 800 kg (Baladès 2004). Les personnes à l'intérieur seront emportées avec leur véhicule ce qui provoque l'augmentation de la probabilité de décès. Par ailleurs, les véhicules flottants augmentent la probabilité de décès des personnes situées à l'extérieur.

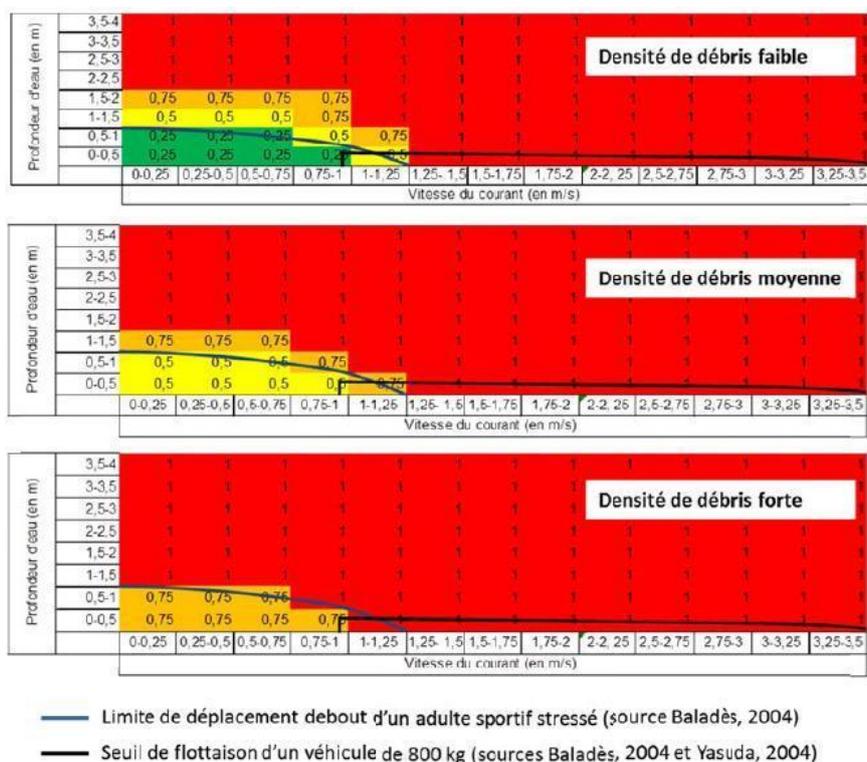


Figure 26. Matrices de probabilité de décès (Pd) des personnes se trouvant à l'extérieur (variation en fonction des densités de débris potentiels flottants).

Ces matrices sont également ajustées en fonction des classes de densités de débris potentiels selon les règles de pondération suivante : +0.25 (Max 1) si la classe de densité de débris est moyenne, et +0.50 si la densité de débris est forte.

3.3. Méthode de l'enquête dynamique des enjeux humains

3.3.1. Dynamique de la population intra urbaine et approche d'évaluation de vulnérabilité humaine.

En ce qui concerne la vulnérabilité humaine, elle est partiellement liée à la façon de vivre (ou schéma de mode de vie) des habitants, d'où découle la localisation des personnes au cours du temps. Il existe des études montrant la variabilité spatio-temporelle des populations dans la littérature. Ahas et al. (2010) affirme que la majorité des mouvements à caractère spatiaux et temporels des personnes sont liés au rythme du travail, de l'école, des services et des loisirs dans la ville. La mobilité urbaine a également été analysée en utilisant un réseau de données mobile par Sevtsuk et Ratti (2010). Les résultats ont confirmé qu'il existe une régularité significative de la mobilité urbaine à différentes heures, selon les jours et les semaines.

Les enjeux, spatialisés de manière dynamique sont ensuite confrontés à l'aléa. Leone et al. (2012) ont mis au point une méthode d'évaluation de la répartition spatiale des individus au cours de la

journée en intérieur comme en extérieur. Cette évaluation dynamique qui tient compte des activités d'un espace urbain fournit des cartographies multi-horaires de la densité de population et d'indices de risques humains. Cette méthode fait le lien avec les modes et rythmes de vie journaliers de la population dans une ville. Elle a pris en compte également la distinction du rythme saisonnier entre la période de basse saison touristique et la période estivale de forte fréquentation touristique sur la ville d'El Jadida au Maroc.

D'autres approches existent pour évaluer la dynamique de population sur la zone d'inondation de tsunami. On peut citer l'évaluation de vulnérabilité de territoire réalisée par Papathoma et Dominey-Howes (2003) ; Dominey-Howes et al. (2010). Ils conjuguent la résistance d'un bâtiment avec le nombre de personnes qu'il accueille à un instant précis. Mais cette méthode ne vise pas spécifiquement les enjeux humains, et ne prend pas en compte les personnes situées à l'extérieur des bâtiments. Dans le cas de Padang, Taubenböck et al. (2009) ont corrélé l'élément statique de la structure urbaine physique avec l'élément dynamique du comportement spatio-temporel de la population. Cette étude calcule les espaces du bâtiment utilisables à l'aide de la superficie et la hauteur des bâtiments. Ensuite, le calcul du nombre moyen de personnes par mètre carré est obtenu sur la base d'un échantillon de 500 bâtiments répartis autour de Padang. Une autre approche à Padang a été réalisée par Imamura et al. (2011). Les données démographiques utilisées proviennent de recensements de la population situés uniquement sur les bâtiments domestiques. Cependant, ces deux études sur Padang n'estiment que la répartition spatiale de la population pendant la journée et la nuit. De plus, ces études n'ont pas pris en considération la population située à l'extérieur des bâtiments (en plein air et sur les routes) contrairement aux études de Leone et al. (2012). En outre, on doit considérer que les gens se déplacent le long de la journée (pour se rendre à l'école, au travail, pour les loisirs ...) ce que ne permettent pas de faire les données du recensement qui ne tiennent pas compte de la répartition de la population locale à chaque heure.

L'approche d'évaluation spatio-temporelle des enjeux humains adaptée dans le cadre de cette thèse est le modèle proposé par Leone et al. (2012). C'est un modèle d'évaluation qui prend en compte la localisation de l'ensemble des enjeux humains et des caractéristiques propres de chaque espace.

3.3.2. Adaptation de la méthode Leone et al. à d'évaluation dynamique des enjeux humains à Padang.

La méthode utilisée dans le cadre de cette thèse est adaptée à partir de celle proposée par Leone et al. (2012). C'est la méthode de quantification des enjeux humains face aux risques de tsunamis basée sur la répartition spatio-temporelle des populations sous forme d'une cartographie dynamique à l'échelle journalière et horaire. La méthode, précédemment initiée en 2009 à El Jadida (Maroc)

permet de quantifier la répartition spatiale des individus présents dans une ville. Elle fournit une cartographie des enjeux humains pour un jour type et heure par heure, ainsi qu'une classification de la résistance des structures bâties. Cette méthode nécessite une bonne connaissance et compréhension des modes et rythmes de vie de la population. De plus, la méthode de répartition spatio-temporelle évalue également les typologies des fonctions de chaque espace qui contrôlent la densité humaine et le taux de fréquentation au cours du temps. En effet, chaque type d'espace (habitation, bureau administratif, hôpital, restaurant, plage, routes etc.) présente des courbes de fréquentation bien différentes au cours de la journée et de la semaine, puisqu'il est dédié à des activités différentes.

En ce qui concerne une submersion marine à Padang, le modèle d'inondation utilisé correspond au scénario proposé par Taubenböck et al. (2009) fournissant des données de profondeur et de vitesses de flux sur une maille de résolution de 5m de côté. Ce modèle d'inondation nous permet d'étudier la capacité de survie des individus en fonction de la profondeur et de la vitesse de flux, facilitant ainsi une quantification des pertes humaines potentielles en fonction du temps d'arrivée de l'aléa.

En considérant qu'une situation d'urgence de tsunami peut se produire n'importe quel jour de l'année, il est nécessaire d'estimer la répartition spatio-temporelle des enjeux humains pendant une année. C'est ainsi qu'on propose ici une évaluation de la répartition spatio-temporelle des enjeux humains basée sur les modes et rythme de vie de population dans la ville pendant une année. Notre hypothèse principale est que les habitants suivent globalement un schéma de vie commun, ce qui fait varier la distribution de la population dans le temps, à chaque heure et également durant les différentes périodes de la semaine et de l'année. Considérant que Padang est la capitale de la province de Sumatra Ouest et que la population est majoritairement musulmane (à 96,78%) (BPS et Bappeda 2011), nous faisons l'hypothèse que le rythme de la vie est déterminé par l'activité de la communauté urbaine et par le calendrier religieux.

Afin de bien caractériser chaque bâtiment par son type d'affectation il est nécessaire de construire une base de données géographique (SIG) qui modélise les fonctions principales et secondaires du rez-de-chaussée de chaque bâtiment et également celle des étages. Chaque bâti est renseigné par une valeur de *Capacité d'Accueil Maximale Crédible* (CAMC) qui correspond au nombre maximal de personnes susceptible d'occuper un lieu donné. Cette valeur de CAMC est déterminée par la surface utile de chaque bâti et par la *densité humaine* (dh) théorique qui varie selon la fonction principale du bâti, (confère équation 1). De plus, chaque bâti présente un taux de fréquentation humaine qui correspond à la proportion de la CAMC à un instant donné t . Le taux de fréquentation qui est compris entre 0 et 1 (ou 100%) est estimé pour chaque classe fonctionnelle au pas de temps horaire

(entre 0 et 24h) et est restitué sous forme de courbes de fréquentation. Le nombre de personnes présentes dans chaque bâti est ensuite estimé par la multiplication du taux de fréquentation et de la CAMC, (confère équation 2).

$$\text{CAMC} = dh \times \text{surface} \quad (1)$$

$$\text{Pop} (t) = \text{CAMC} \times \text{Taux} (t) \quad (2)$$

La méthode de quantification spatio-temporelle des enjeux humains sur les espaces bâtis est ensuite réappliquée sur les espaces de plein air, y compris les voies de communications. C'est ainsi qu'on peut cartographier la variation de densité humaine de chaque espace pour tous les espaces de la ville heure par heure dans la journée, et dans la semaine, et enfin durant différentes saisons ou périodes de l'année.

3.3.3. Méthode de comptage des courbes de fréquentation humaine

La méthode de capture de données de fréquentation humaine se réfère à des travaux déjà réalisés. (Robert, Sillère, et Lizard 2008) utilisent des techniques de prise de photos numériques heure par heure pour évaluer le nombre d'utilisateurs sur une plage urbaine de Nice. Cette méthode a également été appliquée par (Sahal, 2011) afin d'analyser la présence des individus sur la région vulnérable aux tsunamis à Saint-Paul (La Réunion). Cette méthode utilisée souvent sur des zones de plein air nécessite un corpus d'images de qualité couvrant la totalité du site à évaluer afin d'obtenir des résultats satisfaisants. De plus, la méthode photographique capturée heure par heure peut être combinée avec des observations utilisant des vidéos. La vidéo est également une importante source pour effectuer le comptage de véhicules sur les voies de communications. Le nombre des véhicules en déplacement sur la route correspond à un nombre de personnes sur la voie de communication.

Pour évaluer le nombre de personnes à l'intérieur des différents bâtiments, la méthode la plus précise pour l'évaluation de la fréquentation repose sur une approche sous forme d'enquêtes ou de questionnaires. Cette méthode permet d'évaluer de manière approfondie les activités et des comportements des personnes enquêtées. Cette méthode a été utilisée par Setiadi (2014) pour évaluer la dynamique et l'activité de la population sur la zone à risque de tsunami à Padang pendant 3 périodes de temps dans la journée (le matin, l'après-midi et le soir). D'autres approches plus empiriques peuvent être réalisées sur la base de témoignages et d'investigations de terrain (Leone et al. 2012). Le témoignage de personnes à responsabilité a permis d'estimer précisément les pics et les creux de fréquentation durant une journée. De plus il convient de prendre en compte les horaires d'ouverture et de fermeture d'un lieu (administrations, services privés, écoles, restaurants, commerces ...) pour optimiser les observations.

Etudier la fréquentation des individus au pas horaire dans une journée permet de mieux connaître les habitudes des usagers et de repérer les heures d'affluence. De plus, les informations sur la variation de fréquentation humaine sont les informations de base afin de déterminer les scénarios d'exposition humaine les plus pertinents et de calculer les capacités d'évacuation correspondantes.

Conclusion du chapitre

L'enjeu humain est une valeur très importante dans nos sociétés. C'est pourquoi la sauvegarde des vies humaines devient le premier objectif des stratégies de prévention des risques. En considérant que la vulnérabilité de l'individu (vulnérabilité humaine) est dépendante de la résistance du milieu où il se trouve (vulnérabilité structurelle), il est essentiel d'avoir une approche qui intègre et évalue ces deux aspects. Les personnes se trouvant à l'intérieur d'un bâtiment sont a priori davantage protégées que celles se trouvant à l'extérieur. Le niveau de protection va dépendre de la résistance du bâti, de son étanchéité, mais également des capacités des individus à se mettre à l'abri. Par contre pour les personnes à l'extérieur, les impacts les plus déterminants sont les effets directs d'un tsunami, du fait du courant, du manque de protection vis-à-vis des débris flottants ou de la difficulté d'atteindre un étage refuge.

Du point de vue de l'évaluation des enjeux (exposition) et de leurs vulnérabilités, la méthode adoptée permet une cartographie des enjeux humains et structurels selon différents scénarios temporels à l'échelle de l'individu. Ces méthodes permettent d'évaluer une composante du risque, et apparaissent compatibles, tant d'un point de vue spatial que temporel : elles peuvent être menées à une échelle fine, celle de l'agglomération ou du quartier. Elles ont toute une composante dynamique, s'inscrivant certes dans des temporalités différentes, mais qualifiables à tout instant t .

Partie 2. Caractérisation spatio-temporelle de l'exposition humaine à Padang

La méthode d'évaluation spatio-temporelle de l'exposition humaine sera développée dans les chapitres 4, 5 et 6 qui suivent.

Le chapitre 4 décrit les méthodes de caractérisation des expositions humaines sur la zone à risque de tsunami. L'aspect temporel de l'exposition humaine est fondé sur l'hypothèse que les rythmes de vie et les fonctions principales de l'espace contrôlent la localisation des personnes au cours du temps. L'évaluation de l'évolution temporelle de l'exposition humaine repose donc sur des étapes de collecte des informations sur le terrain afin de pouvoir identifier les fonctions et les critères de la vulnérabilité humaine des espaces bâtis, de plein air et des voies de communication.

Le chapitre 5 présente des méthodes de calcul et des résultats concernant l'évaluation de la *Capacité d'Accueil Maximale Crédible (CAMC)* pour chaque entité polygone unitaire représentant le bâti ou une zone de plein air, ou une voie de communication au sein d'un SIG. Il propose également des méthodes de comptage et des résultats de taux de fréquentation humaine heure par heure pour chaque fonction des différents espaces. Finalement cette partie aboutit à la détermination du nombre de personnes pour chaque entité polygone bâti, heure par heure, ce qui permet de construire des cartes spatio-temporelle de population selon le rythme de vie journalier ou bien saisonnier.

Le résultat de la distribution spatio-temporelle de la population est ensuite utilisé dans le chapitre 6 pour construire la cartographie multi-risques des enjeux humains. Ce chapitre propose une méthode de calcul des indices de risques humains basée sur la valeur de probabilité de décès liée à chaque espace et selon le nombre d'individus présents sur cet espace heure par heure. En particulier il propose des scénarios pour décrire les variations spatio-temporelles des enjeux humains, et construit les cartes de l'indice de risque humain afférentes. Enfin, il analyse le risque humain selon les scénarios choisis.

Chapitre 4. Caractérisation de l'exposition humaine

4.1. Détermination de la zone d'étude

Avant d'évaluer la distribution spatio-temporelle de l'exposition humaine, il est nécessaire de déterminer la zone à étudier à Padang. Nous avons choisi de nous baser sur des études existantes pour déterminer la zone la plus dangereuse en cas de tsunami. La zone choisie est celle mise en évidence par le modèle d'inondation de tsunami à Padang construit par Taubenböck (2009) (Figure 27). Nous avons pris en compte la partie considérée comme zone maximale de danger, à savoir celle qui est identifiée par la couleur bleue (du bleu clair au bleu foncé en fonction de la hauteur de l'inondation).

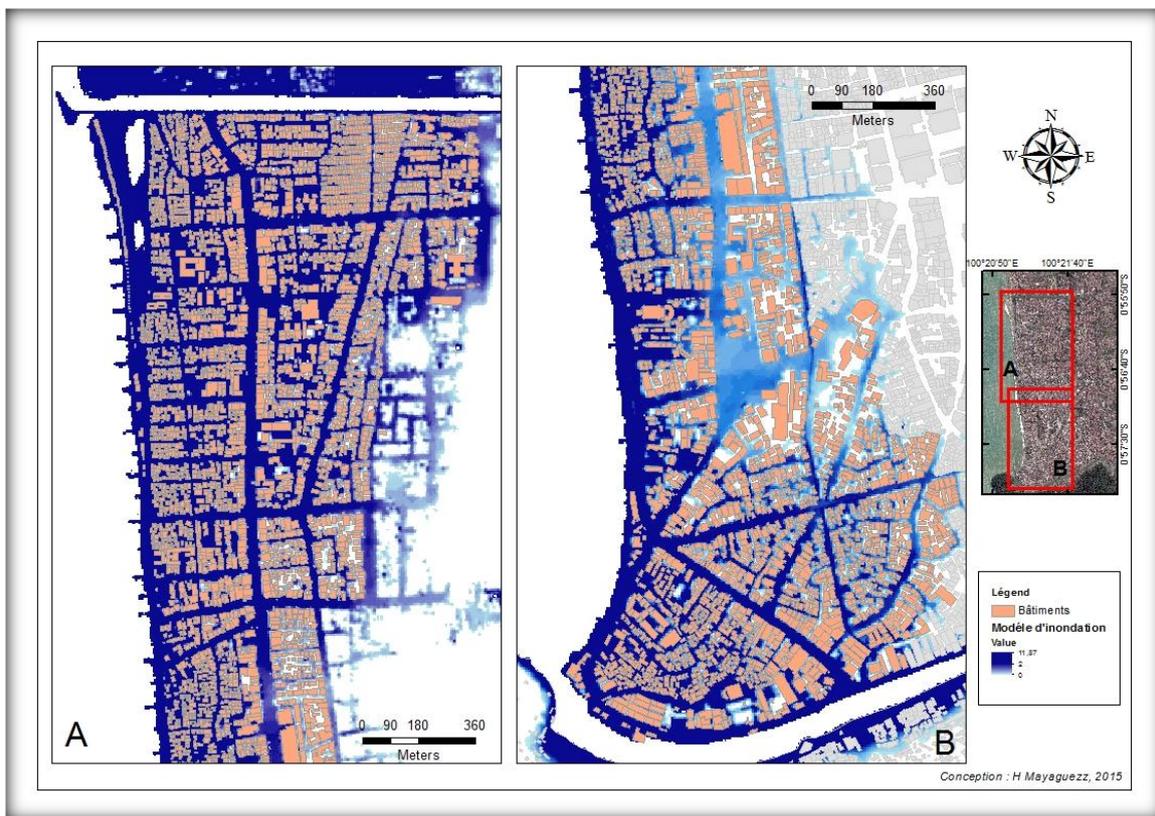


Figure 27. La zone d'étude à enquêter définie par le modèle d'inondation proposé par Taubenböck (2009).

En considérant que la distribution humaine n'est pas exclusivement répartie sur les bâtiments, la zone a été ensuite divisée en trois classes distinctes suivant les types d'espaces urbains étudiés. Les trois classes sont les surfaces bâties, les espaces de plein air et les voies de communication. Ces classes ont été détournées et structurées au format SIG sous forme de trois couches d'informations : Une couche pour les surfaces bâties, une pour les espaces de plein air, une pour les voies de

communication. Chaque couche possède plusieurs versions, pour prendre en compte les différents rythmes de vie de la population tel qu'expliqué dans le sous chapitre suivant.

Techniquement, nous utilisons une base de données sous *PostgreSQL 9.3* avec cartouche spatiale *Postgis 2.1*, et à ce niveau, les couches ne sont pas versionnées. Chaque classe (les surfaces bâties, les espaces de plein air, et les voies de communication) n'est enregistrée qu'une fois dans une relation ayant une composante spatiale enregistrant la géométrie de ces classes. Ensuite les informations de remplissage et d'occupation puis de vulnérabilité associées en fonction de l'heure et la période, ainsi qu'en fonction de la situation vis-à-vis des profondeurs et vitesses d'eau sont enregistrées dans des relations à part, qui référencent une seule fois les relations enregistrant la géométries des classes.

4.2. Hypothèses guidant l'enquête : rythmes de vie et fonctions des espaces

4.2.1. Rythmes de vie

Comme nous l'avons expliqué dans la partie 3.3.1, le rythme de vie contrôle la localisation des individus dans un espace donné au cours du temps. C'est ainsi que nous avons avancé notre hypothèse principale qui est que les habitants suivent globalement un schéma de vie commun. Ce rythme implique une variation de la répartition de la population dans le temps, en fonction des heures de la journée mais aussi en fonction des jours de la semaine et des périodes de l'année. Considérant que Padang est la capitale de la province de Sumatra Ouest et que la population est majoritairement musulmane (à 96,78%) (BPS et Bappeda 2011), nous faisons l'hypothèse que le rythme de la vie est largement déterminé par l'activité de la communauté urbaine et par le calendrier religieux musulmans.

4.2.1.1. Des rythmes guidés par la mobilité urbaine.

Afin de bien évaluer les variations spatio-temporelles de la population à Padang, il est nécessaire de décrire les principales activités qui rythment la vie de population. La zone urbaine présente des fonctions correspondant à l'utilisation des espaces pour les habitations, les loisirs, les activités de travail et les autres services disponibles. La qualité de chaque espace urbain a des répercussions sur le nombre de personnes qui utilise ses fonctions (Ahas et al. 2010). Si l'espace urbain est attractif et multifonctionnel, il est utilisé activement par divers groupes sociaux dans un créneau temporel maximal. Par contre pour les espaces urbains à caractère *mono-fonctionnel* comme par exemple pour les secteurs strictement à fonction de couchage (résidentiel) ou pour les secteurs à vocation

exclusivement industrielle, dans ces cas là le spectre social et l'utilisation temporelle sont plus limités.

La vie urbaine et sa variabilité temporelle dépendent des jours de la semaine. La principale distinction peut être établie entre les jours de travail et les jours de week-end (Ahas et al. 2010). De plus, une variation temporelle peut être observée au cours des moments de la journée (Bromley, Tallon, et Thomas 2003). Ces auteurs ont montré que la variation de la répartition temporelle de la fréquentation humaine peut être multipliée par un facteur deux dans la journée sur le centre ville. La fréquentation humaine est bien moindre pendant la soirée et la nuit. Terrier (2009) expose que la population présente dans une ville peut fluctuer fortement entre la nuit et les heures ouvrables. De plus, il souligne la nécessité de séparer la population présente de la population résidente.

La ville de Padang, de par sa position administrative de capitale de la province, se caractérise par une intense activité de services publics, économiques, de loisirs et sociaux. Selon les données statistiques, le taux d'emploi dans la province était de 66,36% en Août 2010 (<http://www.bps.go.id/linkTabelStatis/view/id/982>). Les secteurs d'emploi les plus fréquentés à Padang sont : le service public et privé (32,76%) ; le commerce, hôtellerie et restauration (27,95%) ; la communication et le transport (10,77%) ; et la construction (10,37%) (BPS et Bappeda 2011). Ces activités déterminent en grande partie la répartition spatio-temporelle de la population. La population qui habite aux alentours de Padang vient travailler au centre ville pendant la journée. Elle profite également des services disponibles pendant le séjour sur le centre ville (exemple pour faire des courses). Les étudiants sont également nombreux pendant la journée en raison de la présence d'établissements scolaires à proximité du centre ville.

Le matin, c'est le temps de démarrer la journée. Les commerces de type café du matin ouvrent de 06h – 10h et accueillent des clients pour le petit-déjeuner. Les voies de communications ont une activité importante à partir de 07h au moment où les étudiants et les salariés commencent leurs activités. Le flux de circulation s'intensifie et la fréquentation humaine augmente alors rapidement.

Le midi, entre 12h et 14h, c'est le temps de prendre le déjeuner, soit à leur domicile soit dans un des restaurants. C'est aussi le moment où les élèves rentrent chez eux. Certains élèves prennent les navettes et les autres sont recueillis par les parents devant les établissements scolaires en utilisant les motos ou bien les voitures. Vers 14h, la plupart des écoles sont fermées sauf certaines écoles primaires qui divisent les activités pédagogiques en deux fois dans la journée. Normalement, la ville se trouve plus calme jusqu'à 16h.

A la fin de l'après midi vers 16h – 18h, le rythme de la ville s'accélère. Les fonctionnaires et les salariés quittent leur lieu de travail. Les écoles ayant deux temps pédagogiques finissent les activités vers 17h. Certains élèves qui suivent les formations supplémentaires après l'école rentrent chez eux vers 18h. Les activités dans les magasins et les supermarchés augmentent dans ces moments où les habitants rentrent chez eux.

Vers 20h, la plupart des petits magasins arrêtent leur service et laissent les grands magasins continuer leur activité jusqu'à 22h. Les cafés situées autour de la plage ferment petit à petit vers 22h et les rues se vident.

Ce rythme de vie est observé pendant les journées de semaine du Lundi au Jeudi. Le rythme est différent le vendredi et durant les week-ends. Le vendredi midi est le moment où les hommes se réunissent dans les mosquées pour faire la prière. Le rythme de la ville ralentit donc à ce moment. Toutefois, les mosquées sont alors les bâtiments les plus denses de la ville. En ce qui concerne le week-end, ce sont les journées les plus dynamiques de la semaine. Les services publics et privés sont fermés. Les familles font du sport pendant le matin autour de la plage. Les commerces et le centre commercial restent ouverts plus longtemps que durant la journée type.

Ce rythme de vie hebdomadaire peut être perturbé par le facteur climatique. Les gens limitent leurs déplacements à l'extérieur pendant le mauvais temps quand il y a beaucoup de pluies. Ce facteur impacte donc fortement le changement de la distribution spatio-temporelle de la population sur la zone urbaine. Toutefois, on ne considère pas ce paramètre climatique dans le cadre de cette thèse.

4.2.1.2. Des rythmes guidés par la religion.

Dans de nombreuses cultures ou groupes sociaux, une activité spécifique se révèle avoir une importance majeure. Des caractéristiques de déplacements spécifiques sont alors liées à chaque jour ou bien à la saison. Comme la majorité des habitants de Padang sont musulmans, la population est fortement attachée aux traditions et surtout à la religion. La pratique de la prière est faite 5 fois par jour du matin jusqu'au soir. Elle est déterminée par le mouvement du soleil. Les horaires de la prière sont presque semblables tous les jours pour les pays tropicaux. A Padang, ces prières sont effectuées vers 5h, 12h, 15h30, 18h et 19h30. Normalement on a besoin de 30 minutes pour faire la prière à la mosquée, sauf pour la prière de vendredi midi qui prend environ 90 minutes depuis 12h à 13h30.

Le rythme de vie annuel est influencé par les grands événements religieux comme le Ramadan et la fête de l'aïd. La population de Padang est très attachée au suivi de ces événements religieux comme

au suivi de la tradition en général. Les habitants pratiquent un islam populaire et souvent festif. La célébration de ces fêtes religieuses varie en fonction du calendrier musulman. Le Ramadan est le mois sacré chez tous les musulmans. Ce mois correspond à la pratique du jeûne, du lever au coucher du soleil. Cela implique les changements au niveau des habitudes et des horaires. Les administrations, les services publics, les banques et mêmes les entreprises privées adoptent l'horaire continu, qui est généralement de 8h à 15h. A la fin de l'après-midi jusqu'au coucher du soleil, la ville devient très animée notamment par des activités de commerce et de restauration qui sont plus nombreuses pendant le Ramadan. Les habitants sortent pour aller chercher de la nourriture à manger après le coucher du soleil. Certaines familles en profitent pour sortir ensemble et manger dans un restaurant. C'est le moment où les restaurants atteignent la fréquentation maximale de clientèle dans l'année. Le soir, les activités quotidiennes se déplacent à la mosquée. Les populations se réunissent pour faire la prière à la mosquée depuis 19h jusqu'à vers 21h. C'est une prière qui est uniquement faite pendant le mois du Ramadan.

A la fin du Ramadan, l'activité des commerces augmente. La ville est beaucoup plus animée. L'ambiance de la célébration peut être observée partout. Le centre commercial attire beaucoup de gens en offrant des biens pour la célébration de la fête. Normalement le gouvernement déclare des jours fériés pendant une semaine pour la fête. Les familles qui habitent dans d'autres villes sur l'île de Java (jusqu'à environ 1000 km de Padang) viennent à Padang pour célébrer la fête. Pendant la fête d'après le Ramadan, les plages et les centres commerciaux sont remplis par les visiteurs.

4.2.1.3. Mettre en évidence des rythmes pour diriger le protocole d'enquête.

Afin d'obtenir des résultats précis sur les rythmes de la population dans les différents espaces fonctionnels de la ville nous avons réalisé des enquêtes. La détermination des rythmes de vies hebdomadaires et saisonnières ont conduit le protocole d'enquête. Nous avons donc déterminé trois types de jours pour l'enquête, et selon trois périodes différentes (Tableau 7), ce qui donne 7 classes typiques de la journée à étudier.

- Lundi à jeudi : les jours de travail
- Vendredi : Les heures de travail pendant le matin, l'heure de prière à midi.
- Week-end : Sans activité de travail. Mais les écoles sont ouvertes le samedi.

De plus on a distingué chaque jour pour chaque différente saison :

- La période classique, la période de Ramadan déterminée par le calendrier islamique ;
- Le jour férié de l'Aïd

Tableau 7. Nomenclature des jours d'enquête.

Période classique			Période Ramadan			Fête
Lundi à jeudi (L-J)	Vendredi (V)	Samedi et dimanche (WE)	Lundi à jeudi (RLJ)	Vendredi (RV)	Samedi et dimanche (RWE)	Fête de l'Aïd (FET)

4.2.2. Classification fonctionnelle des zones à enquêter

Notre modèle de mobilité urbaine repose sur une typologie des fonctions attribuables à chaque espace de la ville. Nous faisons l'hypothèse que chaque lieu aura le même taux d'occupation selon sa fonction (qui est définie comme le type d'activités pouvant se produire à l'intérieur). Chaque classe fonctionnelle tend aussi à avoir un rythme différent de fréquentation pendant la journée. Ainsi, nous proposons un ensemble de classes fonctionnelles pour les bâtiments, les rues et les espaces ouverts, selon celles définies par Leone et al. (2012). Ces classes (fournies dans les tableaux suivants) ont un haut niveau de précision, et reflètent la nature des activités qui pourraient s'y tenir à différentes heures du jour et de la semaine.

Par extrapolation des classes fonctionnelles, il est possible d'affecter à chaque espace une densité humaine et un taux de fréquentation à un moment donné. Ces classes sont distinguées par les différents codes sur la base de données (Tableau 8).

Afin de préciser la fréquentation humaine, certaines classes de la même fonction peuvent être classées séparément. Nous avons distingué deux classes d'hôtel. Un hôtel ayant le code « HOT » est un hôtel de niveau moyen à grand. Ce type d'hôtel possède des grands espaces pour certaines activités (par exemple pour des séminaires, des fêtes de mariage, etc.). En outre, l'hôtel ayant le code « HOT_PTT » est un hôtel de niveau petit à moyen sans les grands espaces. De plus nous avons également distingué les classifications d'écoles selon leurs niveaux. Les variations de ce type sont influencées par les niveaux, les heures et la durée d'activité pédagogique qui diffèrent entre elles. Pour les espaces de plein air, nous avons différencié la classe plage (4 classes), de digue (4 classes). Notre première observation sur la plage et la digue montre la variation de fréquentation humaine. Certaines plages et digues sont en effet plus remplies que d'autres.

Tableau 8. Typologie des différentes classes fonctionnelles des espaces de vie à Padang.

Nomenclature pour la table bâti				
No	CODE	MAIN FUNCTION	CARACTERISTIQUE DES BÂTIMENTS	TOTAL
1	HINDIV	HABITATION	Maison indonésienne moderne	2994
2	HTRAD	HABITATION	Maison indonésienne traditionnelle	1031
3	HCOL	HABITATION	Habitat collectif	585
4	ADMI	WORKING	Service public	87
5	BANK	WORKING	Banque	16
6	ASURAN	WORKING	assurance, service privé type concessionnaire	202
7	MOL	LEISURE	Mall (Centre commerciale), grande surface	2
8	S_MARC	LEISURE	Super marché	3
9	MAGASIN	LEISURE	Magasin	179
10	BTIQUE_MSN	LEISURE	Boutique maison (magasin au rdc et habitat à l'étage)	321
11	HOT	LEISURE	Hôtel	15
12	HOT_PTT	LEISURE	Hôtel petit	26
13	RESTO	LEISURE	Restaurant	58
14	CAFE	LEISURE	Café	101
15	CARAO	LEISURE	Karaoké	3
16	CAFE_MATIN	LEISURE	Café uniquement sur le matin	14
17	CAFE_PLAGE	LEISURE	Café sur la plage	80
18	EPICERIE	LEISURE	Epicerie	248
19	INDUS	WORKING	Local industriel, usine,	149
20	ENTREPOT	WORKING	Entrepôt	47
21	CAMPUS_2	EDUCATION	Campus au niveau de master dégrée	7
22	CAMPUS_1	EDUCATION	Campus	11
23	LYCEE	EDUCATION	Lycée	18
24	COLLEGE	EDUCATION	Collège	16
25	ECOLE_P	EDUCATION	Ecole primaire	32
26	ECOLE_M	EDUCATION	Ecole maternelle	24
27	ECOLE_Q	EDUCATION	Ecole religieuse pour les enfants	7
28	COURS	EDUCATION	Etablissement de formation professionnelle	17
29	SECU	WORKING	Poste de police, de sécurité, caserne de pompier	39
30	SECU_IN	WORKING	Sécurité intérieur d'établissement	53
31	MOSQUE	PRAYING	Mosquée	50
32	EGLIS	PRAYING	Eglise	4
33	VIHR	PRAYING	Temple	2
34	SANTE_H	LEISURE	Hôpital	15
35	SANTE	LEISURE	Centre médical, pharmacie	13
36	EVENT	LEISURE	Etablissement recevant ponctuellement du public, salle de réception, salle de spectacle, théâtre, gymnase, salle de sport	30
37	EXPO	LEISURE	Salle d'exposition, musée, lieu touristique	6
38	PRISON	HABITATION	Prison	8
39	LOISIR	LEISURE	Local de jeu pour les enfants	3
40	SPORT	LEISURE	Local de sport	10
41	INAB	UNOCCUPIED	Habitation abandonnée, inhabitée	256
Total bâtiments				6782

Nomenclature pour la table plein air			
NO	CODE	CARACTERISTIQUE DES LIEUX	TOTAL
1	PLAGE_A	Plage préférée située sur le nord	1
2	PLAGE_B	Plage située sur le nord	6
3	PLAGE_C	Plage située sur le sud	9
4	PLAGE_D	Plage préférée située sur le sud	1
5	DIGUE_A	Digue préférée située sur le nord	1
6	DIGUE_B	Digue préférée conçu pour le touriste	6
7	DIGUE_C	Digue de pierre perpendiculaire à la plage	31
8	DIGUE_D	Digue de pierre le long de la plage	6
9	COUR	Cour intérieur, jardin	276
10	COUR_INDUS	Cour industrielle	15
11	COUR_EDUC	Cour d'école	19
12	COUR_PRISON	Cour de prison	1
13	COUR_SPORT	Cour de sport	5
14	COUR_CAFE_PLAGE	Cour de café à la plage	9
15	LOISIR	Parc, terrain de jeu	2
16	RUELLE	Ruelle < 3 m de large	99
17	TVAG	Terrain vague	73
18	PORT_MUARO	Port de commerce traditionnel	1
19	EVENT	Espace recevant ponctuellement du public	1
20	COURS_EAU	Cours d'eau	34
Total plein air			596

Nomenclature pour la table voie de communication			
NO	CODE	CARACTERISTIQUE DES VOIES	TOTAL
1	ROUT_1	Route principale	15
2	ROUT_2	Route secondaire	44
3	ROUT_3	Route résidentielle	61
4	CROUF_1	Carrefour principal	7
5	CROUF_2	Carrefour secondaire	10
6	ESSO	Station essence	2
7	PARK	Parking, lieu de stationnement	4
8	PARK_PLAGE	Parking sur la plage	7
Total voies			150

Globalement, on a découpé l'espace étudié en 6782 îlots de bâtiments répartis en 41 catégories fonctionnelles (Figure 28). Afin de faciliter la compréhension de la distribution de la fonction des bâtiments à travers la ville, nous reclassons la fonction des bâtiments en six fonctions principales : éducation, habitation, lieu de prière, lieu de travail, loisir et inoccupé (Figure 29). L'enquête de terrain a ensuite fourni 596 polygones de zones de plein air qui sont classés en 20 catégories

fonctionnelles (Figure 30) et 150 polygones de voies de communications classées en 8 catégories fonctionnelles (Figure 31).



Figure 28. Typologie des classes fonctionnelles principales des espaces bâtis.

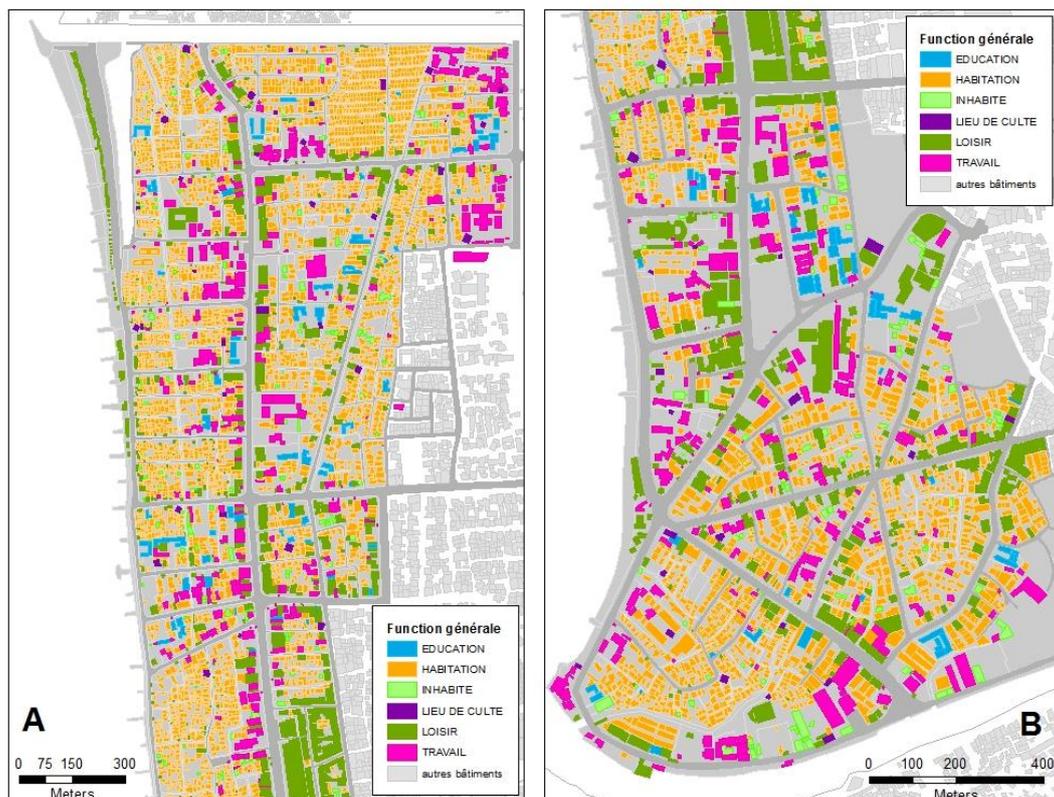


Figure 29. Typologie des fonctions similaires de bâtis groupées.

Nous avons constaté que la plupart des bâtiments situés près de la mer sont constitués d'habitations (Figure 29). Les bâtiments ayant une fonction de loisirs (shopping, restaurants, hôtels, etc) sont dispersés le long de la direction nord-sud, le long de la route principale. Leur concentration est plus importante dans le sud. Les zones de travail (des deux secteurs public et privé) sont généralement situées dans la partie nord. Les bâtiments scolaires sont également répartis dans la partie nord, mais nous pouvons observer quelques bâtiments scolaires regroupés dans la partie sud de la ville.

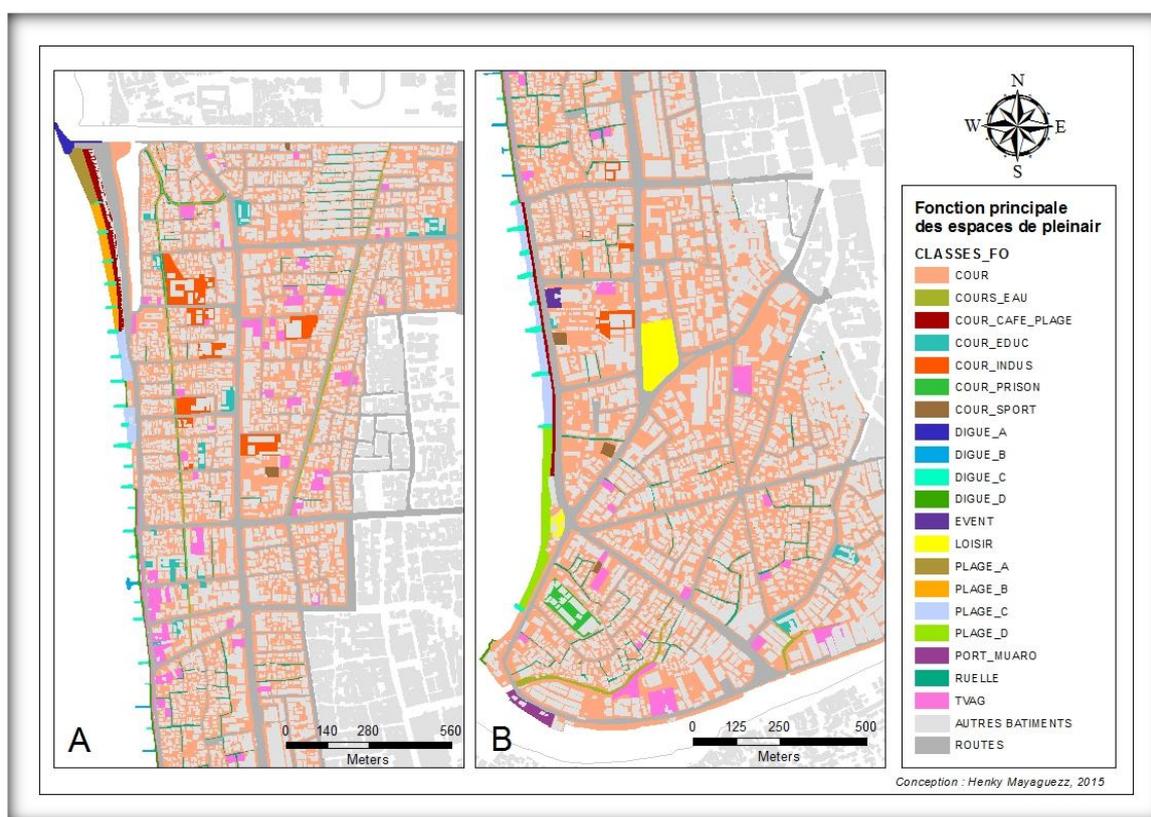


Figure 30. Typologie des classes fonctionnelles des espaces de plein air.

Une variation de la fonction de la zone de plein air a été constatée le long du rivage (Figure 30). Nous avons distingué quatre fonctions de la plage et quatre fonctions de la digue. Il existe la fonction de cour_cafe_plage sur la partie nord (A) et la partie sud (B). Cette fonction commence ses activités à midi et s'étend jusqu'au soir. Elle est caractérisée par les parasols sur la plage. Les espaces de type « cour » sont des zones de plein air situées autour de bâtiments. Ils sont souvent la cour ou le jardin d'une habitation. Ces espaces se dispersent sur toute la zone d'étude. On observe également la classe terrain vague (TVAG) qui est dispersée du nord au sud.

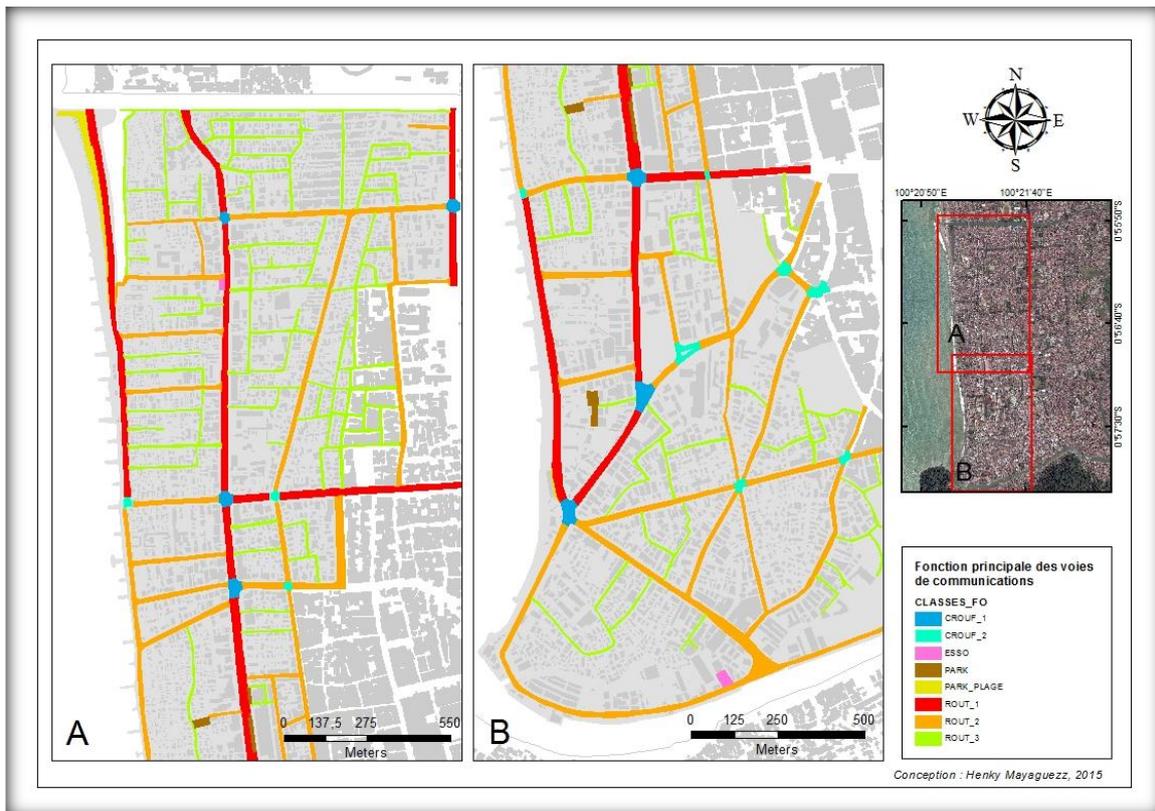


Figure 31. Typologie des classes fonctionnelles des voies de communication.

4.2.3. Repérage et vectorisation des zones à enquêter

Avant de procéder au travail sur le terrain, nous avons numérisé chaque entité homogène de bâtiments existants sous forme de polygone, sur une image satellite de Padang (Figure 32 à gauche). C'est une image satellite Ikonos obtenue le 12 avril 2005 avec une résolution de 1m x 1m par pixel et trois bandes. Nous avons également utilisé l'image satellite la plus récente disponible sur l'interface Bing Map, datant du 8 août 2011 avec une résolution de 1,20 m x 1,20 m par pixel, en trois bandes de longueur d'onde. Limité par les moyens financiers, nous avons ainsi choisi d'utiliser ces images satellite gratuites disponibles sur l'internet. Cette démarche est ensuite complétée par le travail de terrain pour valider les formes des polygones bâtiments. Pendant la validation sur le terrain, nous avons pu estimer les hauteurs de bâti qui sont impossibles à déterminer en utilisant les images satellites qui étaient à notre disposition.

Le travail sur terrain a été réalisé en s'aidant de dalles du terrain de 200 x 400 m. Ces images ont été imprimées sur papier A4 (Figure 32 à gauche). Afin d'éviter des erreurs lors de la phase de l'enquête sur le terrain, tous les polygones de bâtiments ont été marqués avec un code correspondant à sa position géographique. Le changement de forme des polygones bâtis, l'implantation de nouveaux bâtis et la démolition de bâtis ont été corrigées directement sur le papier (Figure 32 à droite). Nous

avons pris également des photos de chaque bâtiment afin de contrôler les enquêtes. Même si cette méthode prend beaucoup de temps, elle donne un meilleur résultat en termes de classification des polygones. Considérant que la propagation des individus est également à l'extérieur des bâtiments, les espaces de plein air et les voies de communication ont également été numérisés.



Figure 32. La vectorisation des polygones bâtis en couleur jaune sur l'image satellite avant le travail sur le terrain (gauche). Les polygones rouges avec leur code après la validation terrain (droite).

4.3. Organisation de la collecte d'information sur le terrain

L'enquête/diagnostique a été menée pendant quatre mois (juillet à octobre) en 2013 et trois mois (avril à juin) en 2014. Afin de réaliser cette recherche, l'observation a été réalisée par une équipe d'enquêteurs sur terrain, composée de deux coordinateurs et de 14 étudiants. Les coordinateurs sont des employés de *Jemari Sakato*. C'est une ONG locale de Padang qui travaille souvent sur le renforcement de capacités des populations et du gouvernement face aux risques naturels.

Ensemble avec les coordinateurs, nous avons recruté des étudiants pour soutenir ce travail. Ce sont des étudiants en master qui ont donc fait un stage à l'ONG ainsi que des étudiants de Licence de Géographie de l'Université Negeri Padang (UNP). Les membres de l'équipe devaient avoir la même connaissance sur le protocole d'enquête. Dans ce but, des formations théorique et pratique ont été réalisées afin de partager les connaissances (Figure 33).

Les coordinateurs ont distribué le travail aux enquêteurs selon le planning de recherche. Ils nous ont rapporté les résultats de la collecte de données et les difficultés rencontrées sur le terrain. Nous avons également contrôlé le travail des enquêteurs afin de bien cadrer et valider le protocole d'enquête.



Figure 33. Formation théorique et pratique en 2013 (en haut) et en 2014 (bas) du protocole d'enquête/diagnostic.

4.3.1. Qualification du bâti

La qualification du bâti passe par le relevé des critères de vulnérabilité humaine à l'intérieur du bâtiment. La qualification de bâti selon ces critères est nécessaire pour obtenir une phase de diagnostic terrain la plus fiable et pertinente que possible. Pour les personnes situées à l'intérieur des bâtiments, il est nécessaire de prendre en considération le niveau de la résistance structurelle contre des tsunamis (5 classes de vulnérabilité), la présence ou non d'une grande ouverture qui facilite l'entrée d'eau à l'intérieur du bâti, et le nombre d'étages qui favorise la fuite verticale.

Chaque bâtiment est caractérisé par le niveau de sa classe de vulnérabilité structurelle à un tsunami selon la méthode définie précédemment (Chapitre 3.1.2). La comparaison avec les bâtiments de Aceh est facilitée grâce à la similarité culturelle, il est donc facile de distinguer le niveau de vulnérabilité des bâtiments à Padang (Figure 34).

Type de bâtiment	Bâtiment individuel			Bâtiment Collectif	
	A	B	C	D	E
Classes d'identification sur le terrain à Banda Aceh	Bâtiment individuel avec structure bois, remplissage de bois ou de briques, couverture de tuiles plates rouges ou de tôles brutes, pas d'étage, parfois sur pilotis	Bâtiment individuel avec structure béton à peine renforcée (poteaux de 20cm * 20cm), maçonnerie de briques ou de moellons, 0 à 1 étage, couverture de tôle brute ou peine, ou de panneaux -tuiles rouges gris	Bâtiment individuel avec structure béton renforcée, maçonnerie de briques, moellons ou béton, 1 étage. Couverture de panneaux-tuiles rouges, bleus, gris ou verts ou de tuiles rouges	Bâtiment collectif avec structure béton non renforcée, 1 à 3 étages. Couverture de tôles ou de panneaux tuiles	Bâtiment collectif avec structure béton renforcée, 1 à 3 étages, couverture diverses
vue terrain de bâtiment à Banda Aceh					
Exemple de bâtiment (typologie de bâtiment à Padang)					

Figure 34. Typologie de vulnérabilité structurelle du bâti à Aceh et à Padang.

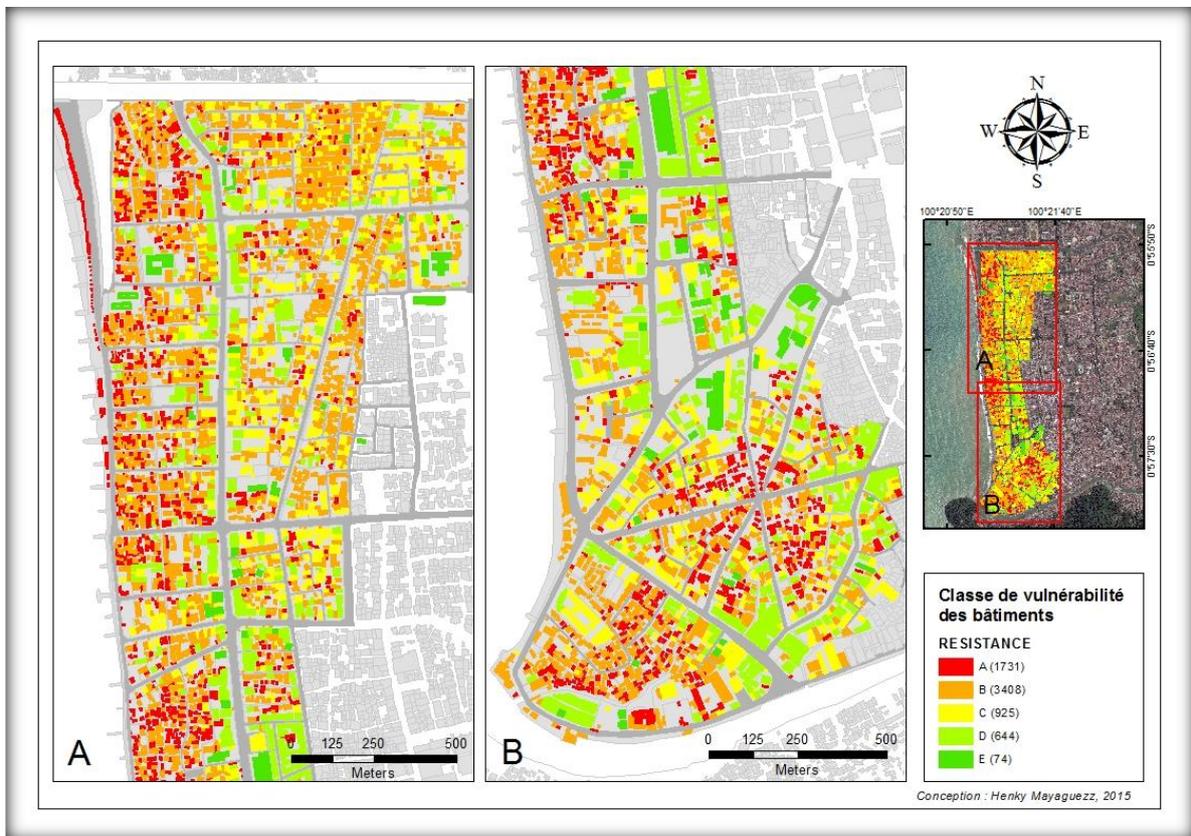


Figure 35. Classes de vulnérabilité structurelle du bâti.

Les niveaux de la résistance des bâtiments sont cartographiés sur la Figure 35. Les bâtiments les moins vulnérables fournissent une meilleure protection aux personnes situées à l'intérieur. Ces

bâtiments appartiennent aux classes D et E. Il existe environ 644 bâtiments de classe D et 74 bâtiments de classe E dans la zone d'étude. Leur localisation se répartit de façon homogène entre le nord et le sud de la zone d'étude. Toutefois, la majorité des bâtiments de Padang sont des bâtiments de classe B (3 408 bâtis) et de classe A (1 731 bâtis). Par ailleurs, la plupart des bâtis de classe A sont proches de la mer. Souvent, ce sont des bâtiments traditionnels situés dans le quartier ancien de Padang. Ce type de bâtiment augmente fortement le risque pour les personnes s'y trouvant lors de l'arrivée du tsunami.

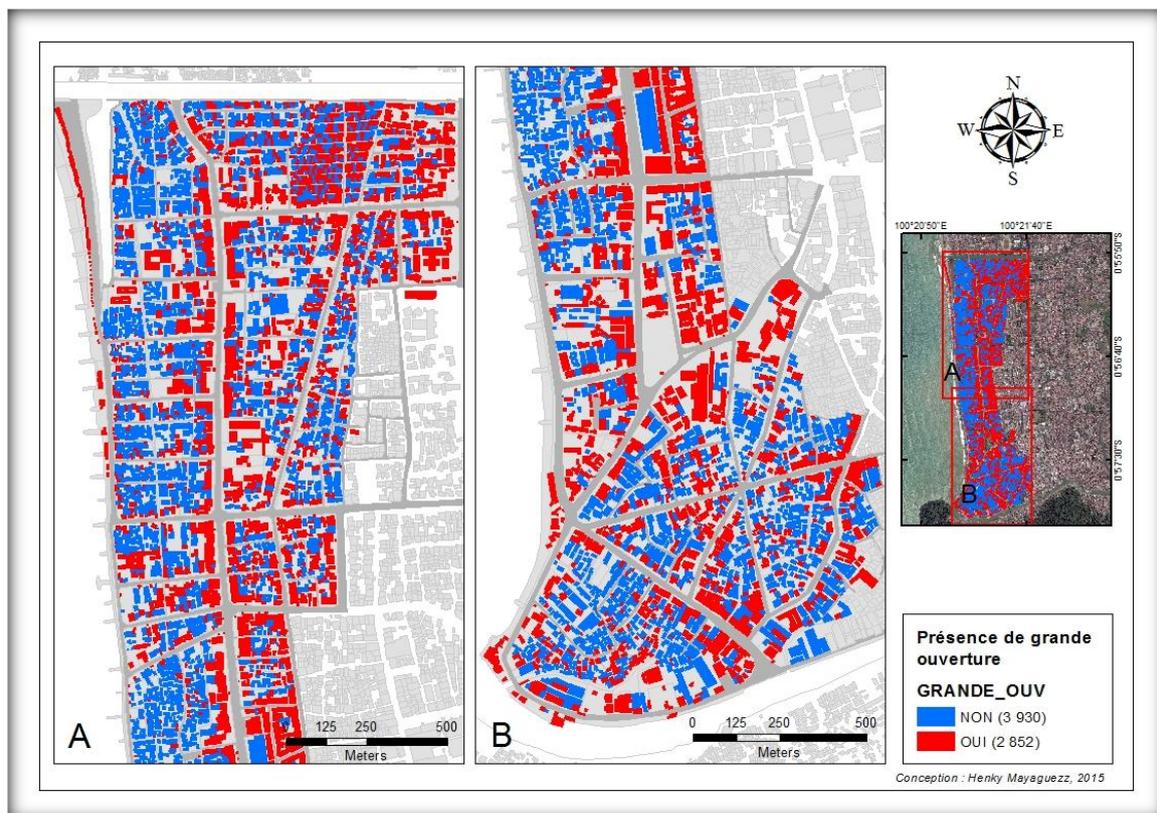


Figure 36. Localisation des bâtiments ayant au moins une grande ouverture au rez-de-chaussée.

Le critère « grande ouverture » est appliqué pour le rez-de-chaussée du bâtiment (Figure 36). On considère que le rez-de-chaussée est la partie la plus exposée lors de l'arrivée d'un tsunami de faible intensité. Les bâtiments ayant une grande ouverture (OUI) correspondent à la présence d'une porte ou d'une fenêtre d'au moins 4 m². Souvent ces bâtiments ont la fonction de magasin, de boutique maison, de restaurant, de service privé ou public, d'écoles, etc. Ces types de bâtiments ne sont souvent protégés que par des grandes fenêtres vitrées sur la partie entrée. On peut observer que ces bâtiments ayant la fonction comme le commerçant sont distribués souvent sur le long de grandes routes communicantes.

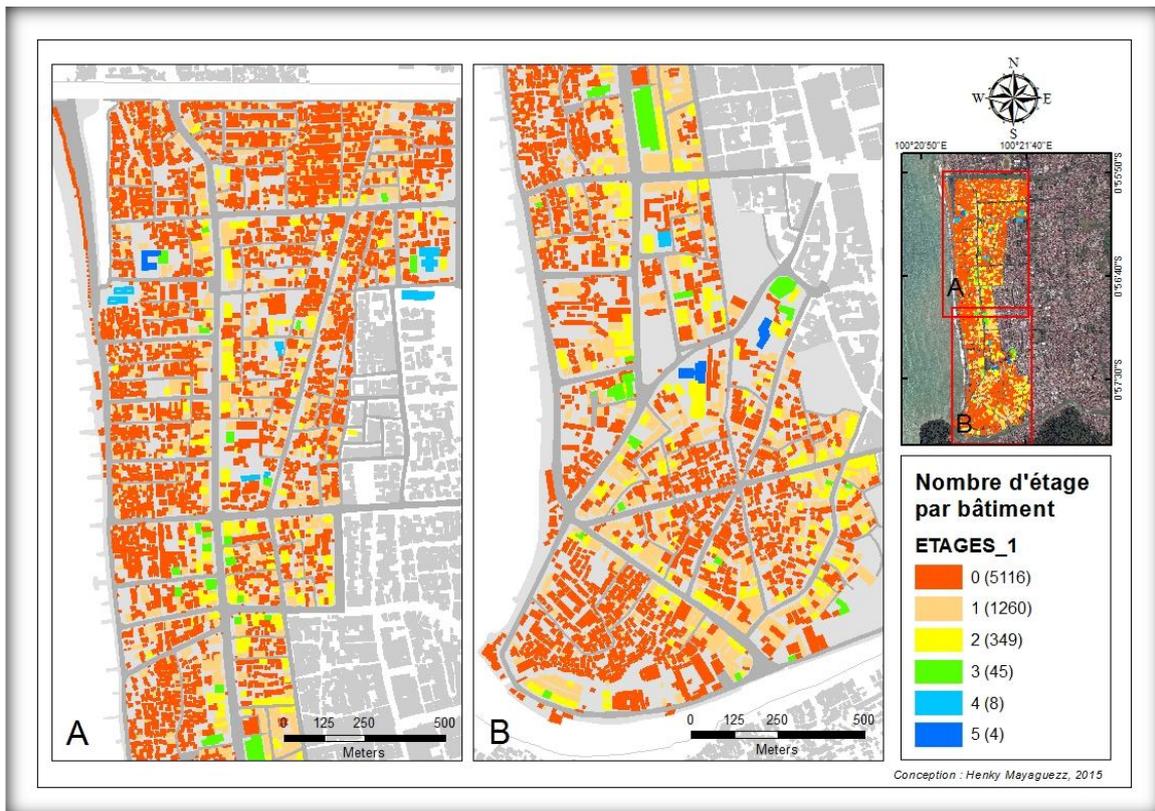


Figure 37. Nombre d'étages des bâtiments.

La présence d'un étage au dessus de niveau d'eau modélisé est un critère très important qui peut offrir la possibilité d'atteindre des endroits plus sécurisés sur la zone exposée à un tsunami. Toutefois, la plupart des bâtiments de la zone d'étude sont des bâtiments sans étage (5 116 bâtiments). De plus, ils se situent en général très près de la mer (Figure 37), ce qui augmente leur vulnérabilité structurelle à des tsunamis.

Les bâtiments ayant plus de trois étages sont très peu nombreux. Nous avons compté environ 57 bâtiments avec un nombre d'étages supérieur à trois. La probabilité de survie s'élève si on peut atteindre l'étage le plus haut de ces bâtiments. En considérant leur vulnérabilité structurelle, ces bâtiments sont à priori des zones refuges potentielles au moment de tsunami de faible intensité (à l'échelle VI « *slightly damaging* » sur l'échelle d'intensité de tsunami proposé par (Papadopoulos et Imamura 2001)). A ce niveau d'échelle, l'aléa a un impact sur les structures en bois, mais la plupart des bâtiments de maçonnerie résistent. Cette intensité (échelle VI) correspond à l'hauteur d'eau maximum de 2m (Shuto, 1993). Toutefois, ces bâtiments ne sont pas des zones refuges potentielles au moment de tsunami de forte intensité qui pourra endommager fortement des bâtiments maçonneries avec des étages.

4.3.2. Qualification des zones de plein air

Les personnes situées à l'extérieur seront directement exposées au moment des tsunamis. Le niveau de vulnérabilité s'aggravera lors de présence de débris potentiels flottants. Il s'agit de voitures, de bateaux, du mobilier urbain, y compris des matériaux provenant de constructions détruites qui auront été frappées par les tsunamis. Dans le cadre de cette thèse, nous avons pris en considération la densité de débris habituellement présents sur un lieu, comme des voitures, des « marchés » et des bateaux. Toutefois, on ne prend pas en compte la mobilité des débris potentiels. L'estimation de densité de débris est faite par les observations sur le terrain. Les niveaux de densités de débris sont classés en trois classes (Faible, Moyenne, et Forte) et se rapportent aux espaces de plein air et aux voies de communications (Figure 38).



Figure 38. Densité de débris potentiels flottants.

Généralement, les densités fortes et moyennes sont observées sur la plupart des voies de communication. Par contre, la densité de débris est habituellement faible sur les espaces de plein air. La densité la plus forte sur les zones de plein air est trouvée sur le port, les cours de cafés situés proche de la plage et dans certaines cours industrielles (Figure 39).



Figure 39. Exemple de secteur à forte présence de débris potentiels flottants : sur une voie de communication et sur le port.

Conclusion du chapitre

En cas de risque de tsunami, il est nécessaire de quantifier la distribution des enjeux humains sur la zone d'inondation modélisée. La quantification faite ici part de l'hypothèse que le rythme de vie contrôle la localisation des individus dans un espace donné au cours du temps. C'est l'activité de la communauté urbaine et le calendrier religieux qui sont considérés comme les déterminants de la répartition spatio-temporelle des populations. Aussi, la différence de fonction principale de chaque espace peut influencer la fréquentation humaine au cours du temps.

La méthodologie déployée dans cette étape peut se résumer avec ce schéma : établir un plan cadastral de la zone, une classification fonctionnelle des objets géographiques, puis un calendrier des activités de la population.

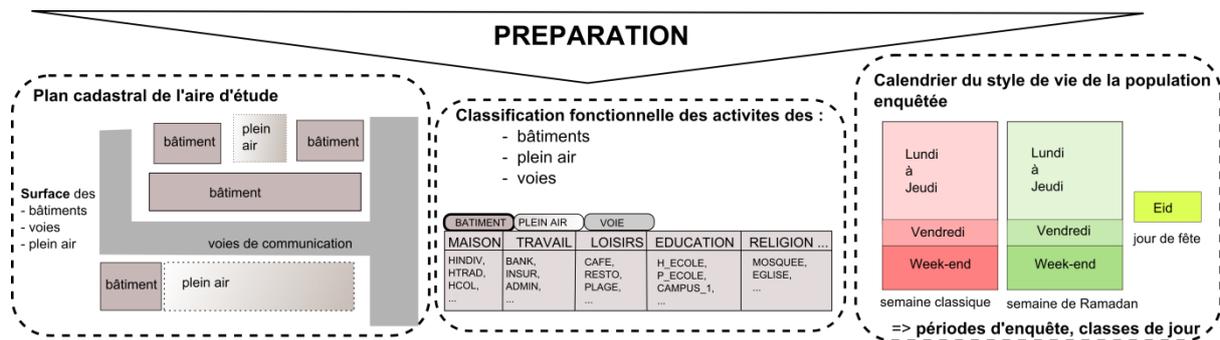


Figure 40. Phase de préparation de l'analyse de l'exposition humaine.

Pour les espaces bâtis, les bâtiments moins vulnérables fournissent une meilleure protection aux personnes à l'intérieur. Toutefois, la majorité des bâtiments à Padang sont des bâtiments vulnérables. La plupart des bâtis très vulnérables se situent à proximité du rivage maritime ce qui augmente leur vulnérabilité structurelle à des tsunamis.

Pour les personnes se situant à l'extérieur, leur vulnérabilité augmente du fait de la densité de débris potentiels flottants. Les densités fortes et moyennes sont généralement observées sur la plupart des voies de communication. La densité la plus forte sur les zones de plein air est au niveau du port et des cours de cafés à proximité de la plage, ou dans certaines cours d'usine.

Chapitre 5. Evaluation spatio-temporelle des enjeux humains

5.1. Capacité d'Accueil Maximale Crédible (CAMC)

Afin d'estimer le nombre de personnes présentes dans la zone d'étude, il est nécessaire de déterminer en premier temps une Capacité d'Accueil Maximale Crédible (CAMC) pour chaque polygone (bâti, plein air et voie de communication). C'est une valeur théorique exprimant le nombre maximum d'individus susceptibles d'occuper un lieu donné. Cet indicateur CAMC est calculé en utilisant la densité humaine théorique exprimée en personnes par m² et la superficie du polygone (eq.1). La densité humaine théorique est propre à chaque type de lieu, et s'obtient par calcul et extrapolation d'observations in situ : pour chaque type de lieux, il est nécessaire d'évaluer l'espace consommé au mètre carré par chaque personne, qui varie en fonction des activités qui s'y tiennent. Les CAMC peuvent être par ailleurs déterminées par les valeurs effectives obtenues à partir de données statistiques, de comptage et de témoignages recueillis lors de l'observation (eq.2) (Leone et al. 2012).

$$\begin{aligned} \text{CAMC} &= \text{Densité humaine} * \text{Surface au sol} && \text{(sans étage)} \\ &= \text{Densité humaine} * \text{surface au sol} * \text{nombre d'étages} && \text{(avec étages)} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{CAMC} = \text{L'effectif maximal du lieu} \quad (4)$$

L'implémentation pratique de cette méthode est difficile. Elle nécessite une connaissance et une observation directe sur la zone d'étude. Mais l'application de cette méthode nous permet d'avoir une bonne précision dans la détermination des données de CAMC pour chaque polygone. L'ensemble de cette méthode est détaillé ci-après.

5.1.1. CAMC des bâtiments

L'estimation des CAMC basées sur la densité humaine théorique (eq. 1) des différents bâtiments est obtenue selon quatre méthodes différentes :

- Par calcul : cette méthode a été appliquée sur les 4.610 polygones de classes fonctionnelles des habitations (HINDIV, HTRAD, HCOL) (Tableau 9). Nous avons échantillonné 239 habitations (soit 5% du total des polygones). Ces polygones sont déterminés de manière aléatoire en considérant les fonctions principales et les classes de vulnérabilité structurelle.

Tableau 9. Méthodes de calcul du nombre d'individu moyen par ménage et de densité humaine théorique.

Classe Fonctionnelle	Nombre total de bâtiments	Nombre de bâtiments échantillonnés	Surface totale habitée	Surface moyenne par logement	Nombre total d'individus dans les logements échantillonnés	Nombre d'individus moyen par ménage	Densité humaine théorique
HINDIV	2.994	151	14.478,14	95,88	664	4,4	0,05
HTRAD	1.031	65	5.325,3	81,93	275	4,23	0,05
HCOL	585	23 bâtis/66 ménages	3.127	47,38	273	4,13	0,09
Total	4.610	239			1.212		

- Par extrapolation : certaines classes fonctionnelles ont été estimées à partir des densités humaines théoriques calculées ci-après (Tableau 10).
- Par observation de terrain : une enquête dans les bâtiments sur le terrain permet de bien estimer le nombre maximal des individus. Cette méthode est utilisée par exemple sur les mosquées. Nous avons été présents durant les heures de pointe afin d'observer un nombre maximal de personnes.
- Par témoignage : les CAMC des églises, le lieu de culte pour les buddhis et la salle d'exposition sont calculées à partir de témoignages sur le terrain.

L'estimation des CAMC des bâtiments par l'effectif maximal du lieu (eq. 2) est obtenue au moyen des statistiques disponibles. Les méthodes sont les suivantes :

- Par comptage : Le nombre maximal de personnes dans les restaurants et les cafés est estimé par le comptage du nombre de chaises à l'intérieur et sur la terrasse. Nous avons ensuite ajouté le nombre moyen d'employés afin d'obtenir le nombre total des personnes pouvant être présentes dans ces établissements.
- Au moyen de statistiques : Les données de bureau administratif d'éducation ont permis de définir le nombre maximal d'élèves pour chaque établissement scolaire. De plus, le bureau du tourisme municipal nous a permis d'obtenir une estimation du nombre maximal d'individus présents dans les hôtels en fonction du nombre de chambres (nombre de chambres multiplié par deux personnes).

Tableau 10. Méthode de calcul des densités humaines théoriques et des effectifs des espaces bâtis.

FONCTION PRINCIPALE	DENSITE HUMAINE THEORIQUE (dh) AU M ²	EFFECTIF MAXIMAL DE POPULATION	
HINDIV	Le nombre d'individu moyen par ménage est de 4,4. La surface moyenne par logement équivalent à 95,88 m ² . Dh = 0,05 personne/m ²	Aucune	
HTRAD	Nombre d'individu moyen par ménage est de 4,23. La surface moyenne par logement équivalent à 81,93 m ² . Dh = 0,05 personne/m ²		
HCOL	Nombre d'individu moyen par ménage est de 4,13. La surface moyenne par logement équivalent à 47,38 m ² . Dh = 0,09 personne/m ²		
ADMI	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 0,3 personne/m ²		
BANK : Assurance, Banque, service privé	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 0,3 personne/m ²		
MOL : Super marché, Mol	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 0,5 personne/m ²		
PCOM : Magasin, épicerie	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 1 personne/m ²		
BTIQUE_MSN	Par extrapolation et témoignage. Dh = 0,2 personne/m ²		
MOSQUE	Par extrapolation et témoignage. Dh = 1,6 personne/m ²		
CULT : Eglise, Vihara	Par extrapolation et témoignage. Dh = 1 personne/m ²		
INDUS : Atelier, entrepôt	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 0,2 personne/m ²		
EXPO	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 0,5 personne/m ²		
SPORT	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 0,2 personne/m ²		
LOISIR	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 0,5 personne/m ²		
SANTE : Hôpitaux, centre médicaux, pharmacies	Par extrapolation et témoignage. Dh = 0,3 personne/m ²	Aucune	
EDUC : Campus, lycée, collège, école, cours	Aucune		Données statistiques sur l'effectif total des élèves et le nombre d'employés moyen par établissement scolaire
HOT : Hôtel			Données statistiques sur le nombre de chambres et le nombre d'employé moyen par établissement.
RESTO : Restaurant, café, karaoke, café_matin, café plage			Comptage du nombre de chaises à l'intérieur de l'établissement et estimation du nombre d'employés moyen par l'établissement.
SECU : Caserne de pompier, poste de police, armé, prison			Effectif par établissement
EVENT : établissement recevant ponctuellement du public, salle de spectacle, théâtre			Comptage ne nombre maximum de personne pendant un spectacle.
INAB : Habitation abandonnée, inhabité		0	0

Pour certaines fonctions, nous avons calculé la CAMC de manière particulière. La surface utile au rez-de-chaussée du MOL est beaucoup plus étendue que dans les étages. C'est ainsi que nous avons diminué la CAMC aux étages. Pour les boutiques maisons (BTQUE_MSN), la fonction du rez-de-chaussée est différente de celle de l'étage. La fonction au rez-de-chaussée est le magasin tandis que la fonction à l'étage est une habitation. L'ensemble de la CAMC de BTIQUE_MSN est calculée pour tous les étages : $((dh \text{ Magasin} * \text{surface}) + (dh \text{ Btique_msn} * \text{surface}))$.

5.1.2. CAMC des espaces de plein air

Dans ces cas, la CAMC a généralement été estimée par le calcul d'une densité humaine théorique à l'aide d'observations sur le terrain et par extrapolation (Tableau 11). Seules les CAMC de quatre fonctions (COUR_EDUC, COUR_CAFE_PLAGE, COUR_PRISON, COUR_INDUS) ont été déterminées suivant une évaluation directe de l'effectif maximal.

Tableau 11. Méthode de calcul des densités humaines théoriques et des effectifs des espaces de plein air.

FONCTION PRINCIPALE	DENSITE HUMAINE THEORIQUE (dh) AU M ²	EFFECTIF MAXIMAL DE POPULATION
PLAGE (A, B, C, D)	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 1 personne/m ²	Aucune
DIGUE (A, B, C, D)	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 1 personne/m ²	
COUR	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 0,07 personne/m ²	
COUR_SPORT	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 0,15 personne/m ²	
LOISIR	Par extrapolation et témoignage. Dh = 0,3 personne/m ²	
RUELLE	Par extrapolation et témoignage. Dh = 1 personne/m ²	
TVAG	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 0,03 personne/m ²	
PORT_MUARO	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 0,2 personne/m ²	
EVENT	Par extrapolation et observation sur le terrain. Dh = 0,2 personne/m ²	
COUR_EDUC	Aucune	
COUR_CAFE_PLAGE		Comptage du nombre chaises
COUR_PRISON		Effectif de prisonniers
COUR_INDUS		Effectif observation du terrain ou effectif du bâtiment
COURS_EAU		0

5.1.3. CAMC des voies de communication

L'estimation de CAMC pour les voies de communication est faite uniquement par la détermination de densité humaine théorique. Nous avons appliqué la valeur d'une densité de 0,3 personne/m² pour tous types de voies de communication.

Tableau 12. Méthode de calcul des densités humaines théoriques des espaces de voies de communications.

FONCTION PRINCIPALE	DENSITE HUMAINE THEORIQUE (dh) AU M ²
ROUT_1	Par extrapolation. Dh = 0,3 personne/m ²
ROUT_2	Par extrapolation. Dh = 0,3 personne/m ²
ROUT_3	Par extrapolation. Dh = 0,3 personne/m ²
CROUF_1	Par extrapolation. Dh = 0,3 personne/m ²
CROUF_2	Par extrapolation. Dh = 0,3 personne/m ²
ESSO	Par extrapolation. Dh = 0,3 personne/m ²
PARK	Par extrapolation. Dh = 0,3 personne/m ²
PARK_	Par extrapolation. Dh = 0,3 personne/m ²

La carte ci-dessous résume les résultats, mais la sémiologie d'une variable quantitative (cercle proportionnel) attachée à ces objets prévient la lisibilité de la carte à l'échelle de la zone d'étude. Un

zoom (le cadre A à gauche) sur une petite portion d'espace permet de mieux visualiser la distribution des CAMC.

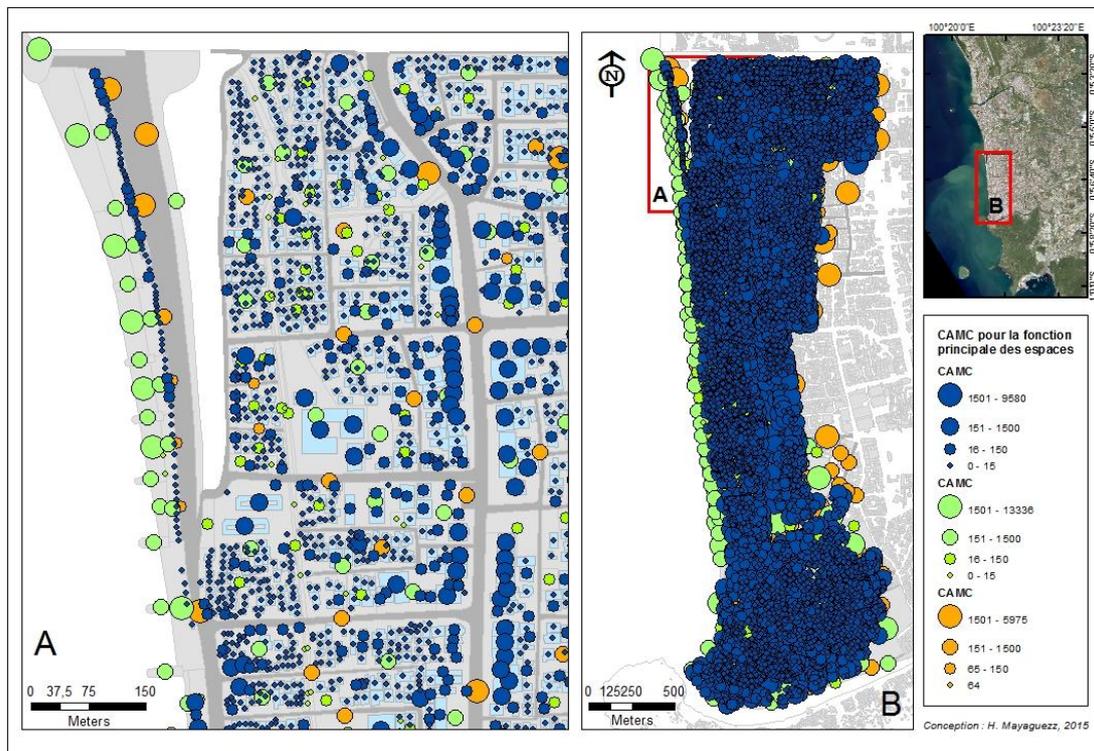


Figure 41. CAMC des espaces de la zone d'étude. Les cercles bleus sont les CAMC de bâtiments, les cercles verts sont les CAMC des espaces de plein air et les cercles oranges sont les CAMC des voies).

5.2. Variations du taux de fréquentation humaine

Le taux d'occupation humaine est la proportion de la CAMC présente à l'instant t dans un espace donné. Il varie entre 0 et 1. Il doit être estimé pour chaque classe fonctionnelle toutes les heures (entre 0 et 24 h) pour construire les courbes de fréquentation. Afin de réaliser cette estimation, nous avons choisi un espace de référence pour chaque classe fonctionnelle qui a été ensuite observé heure par heure. En considérant que le rythme de vie global à Padang est analysé selon 7 classes de jours (lundi, vendredi, week-end, Ramadan lundi, Ramadan vendredi, Ramadan week-end et fête), nous avons observé les espaces de référence pendant chaque classe de jour. Ensuite, les valeurs de taux de fréquentation ont été extrapolées à tous les bâtiments ayant la même fonction.

Les résultats de taux de fréquentation nous permettent d'estimer le nombre de personnes présentes sur chaque espace de la ville, heure par heure, pour les 7 classes de jours. Le nombre de personnes est calculé par la pondération de ces taux par la CAMC, suivant l'équation (3).

$$\text{Nombre de personnes} = \text{CAMC} * \text{Taux de fréquentation} \quad (5)$$

5.2.1. Méthode de comptage

La mesure des taux d'occupations humaines dans les zones de plein air a du être faite pour chacun de ces types de lieux : les plages, les digues et l'ensemble de la classe fonctionnelle des voies de communications. La méthode d'évaluation se réfère à celle utilisée par Robert, Sillère, et Lizard (2008) ; Leone et al. (2012) ; Sahal (2011). Elle consiste à compter les personnes sur les photos et les vidéos prises toutes les heures et pour les 7 classes de jours. Pour l'efficacité des observations, le temps d'observation respecte les heures d'ouverture et de fermeture de chaque classe fonctionnelle. Les lieux et les angles pour prendre des photos doivent être choisis en considérant la couverture totale de la zone à étudier. Il est nécessaire de choisir un endroit surplombant la zone d'étude, avec un angle de vision relativement large, comme indiqué sur la Figure 42.



Figure 42. Le site de prise des photos sur la plage présentant une large zone de couverture. Les photos journalières durant le dimanche 07h (haut à gauche) ; 11h (haut à droite) ; 15h (bas à gauche) ; 17h (bas à droite).

Pour observer les taux de fréquentations humaines sur les voies de communications, nous avons utilisé des enregistrements vidéos du trafic. En fait, le tournage de vidéos est plutôt appliqué aux endroits ayant une zone de couverture relativement étroite, car elle évite l'obstruction d'un objet par un autre objet en face de lui. Les vidéos prises au bord de la route ont été analysées en comptant le nombre de véhicules qui passent sur une ligne imaginaire pendant 10 secondes. Le

nombre total de véhicules passés le long d'une voie de communication est calculé de la manière suivante :

Exemple :

La longueur de voie = 1000m. Le nombre de véhicule passé dans 10 sec = 15 véhicules

Le temps de déplacement moyen en véhicule le long de voie = 120 secondes

La vitesse moyenne de véhicule = $1000\text{m} / 120\text{ sec} = 8,33\text{ m/s}$

La distance de déplacement d'une véhicule dans 10 secondes = $8,33\text{ m/s} * 10\text{ sec} = 83,3\text{ m}$

Le ratio de nombre de véhicule sur une voie = $1000\text{m} / 83,3\text{m} = 12$

Alors, le nombre total de véhicule le long de voie de communication :

Le nombre de véhicule passé dans 10 sec * le ratio de nombre de véhicule sur une voie.

Le nombre de total de véhicules = $15 * 12 = 180$ véhicules.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons distingué deux types de véhicules : les voitures et les motos (deux-roues en général). Compte tenu de nos limites pour évaluer le nombre de personnes dans les voitures, nous avons fait l'hypothèse que le nombre moyen de personnes dans chaque voiture se compose de 3 personnes, donc la densité humaine à l'intérieur des véhicules est de 0,3 personnes / m². Cette valeur a également été utilisée par Leone et al. (2012) pour évaluer la présence de personnes à l'intérieur des véhicules qui passent dans une rue. Tandis que le nombre moyen de personnes qui passent sur une moto est de 1,5 personne. Cette valeur provient de nos observations indiquant que le nombre de personnes sur une moto varie entre 1 et 2.

Pour évaluer le taux d'occupation humaine sur différents bâtiments, nous avons utilisé d'autres méthodes. Compte tenu du grand nombre de polygones de la classe fonctionnelle « habitation » (un total de 4610 polygones ou 68% des bâtiments au total), le taux d'occupation sur l'habitation a été mesuré au moyen de questionnaires qui ont été distribués à 239 foyers (environ 5% de total d'habitation). Ces bâtiments sont les espaces de référence pour la classe d'habitation. Pour obtenir des résultats homogènes, la sélection des habitations à enquêter a été effectuée de façon aléatoire. En utilisant les résultats de la sélection aléatoire, nous avons ensuite mené des entrevues avec les occupants. Ce questionnaire renseignait le nombre de personnes à la maison par heure sur 5 tranches horaires (07h-11h ; 11h-15h ; 15h-19h ; 19h-23h ; 23h-07h) pour 3 classes de jours dans la semaine (lundi, vendredi et week-end). En outre, le questionnaire a permis d'estimer le niveau de mobilité saisonnière pendant le Ramadan et les vacances de fête après le Ramadan. Durant le Ramadan, nos enquêtes concluent qu'environ 95,06% des familles restent toujours à Padang. Le niveau de mobilité est plus haut pendant les vacances de fête. Environ 82,30% des familles restent à Padang pendant cette période. Notre connaissance du rythme de vie dans la ville de Padang pendant le Ramadan et du niveau de mobilité saisonnière, nous a permis d'élaborer des courbes de fréquentation relativement précises pendant le mois de Ramadan.

Pour les établissements d'éducation, l'estimation du taux d'occupation a été déterminée par un questionnaire et un entretien auprès de personnes clés dans plusieurs écoles. Cette méthode a également été appliquée aux classes fonctionnelles 'restaurant' et 'hôtel'. Pour les autres classes fonctionnelles, l'estimation a été faite par l'observation et le témoignage des personnes situées autour des espaces.

Ces étapes d'évaluation du taux de fréquentation et de CAMC des entités géographiques peuvent être résumées dans la figure suivante.

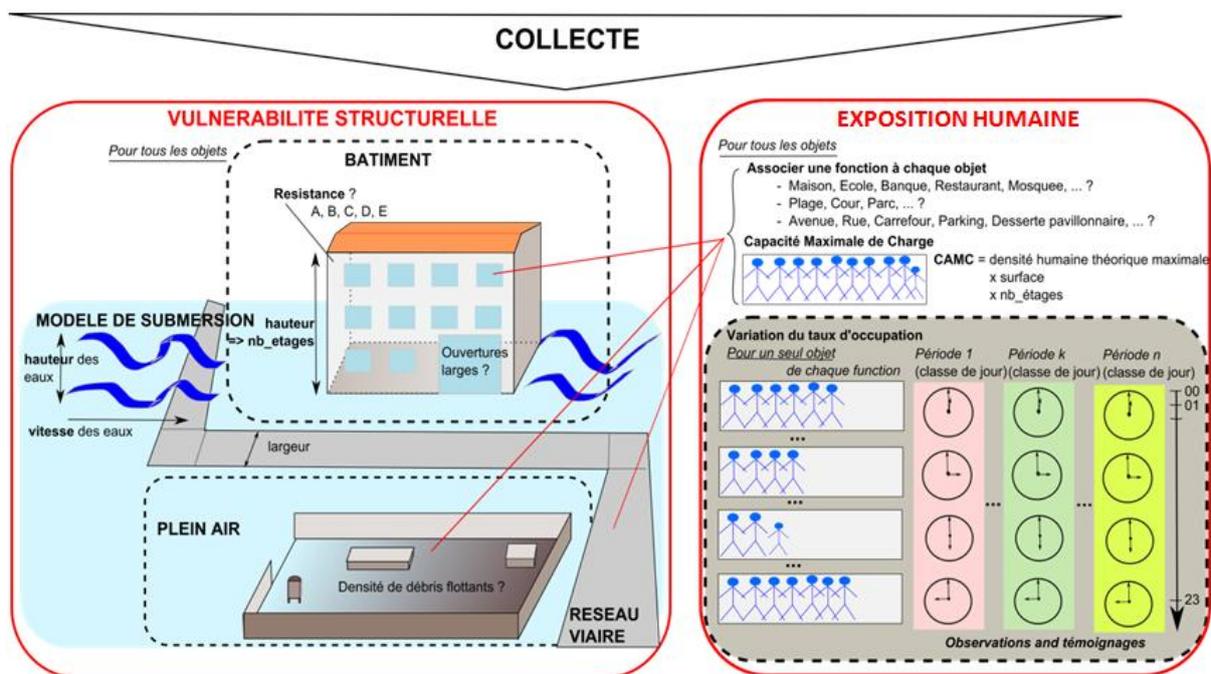


Figure 43. Collecte des données de vulnérabilité humaine et structurelle.

Ces mesures de taux d'occupation humaine ont ensuite été extrapolées à l'ensemble des espaces de la même classe fonctionnelle dans la zone d'étude. Il est ainsi possible de tracer des courbes d'occupation horaire pour chaque espace, sur chacun des 7 jours types enquêtés. Le calcul est effectué dans une première étape sous Excel. Ces données sont ensuite exportées sous forme de base de données PostgreSQL. Nous avons également exporté les données vectorisées des couches (BATI, PLEIN AIR, VOIE DE COMMUNICATION) sous forme de tables PostgreSQL (Figure 44).

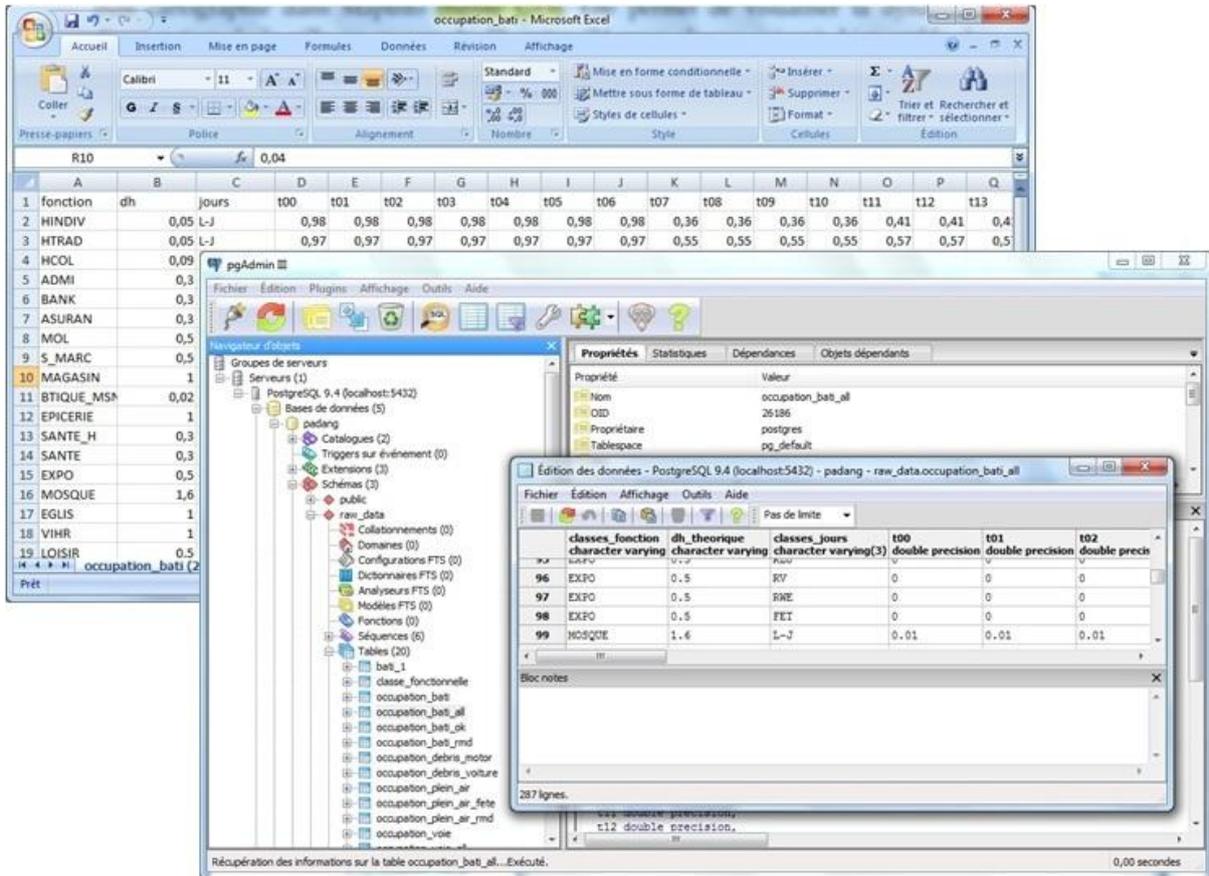


Figure 44. Traitement des données sous Excel et PostgreSQL pour construire la modélisation spatio-temporelle de l'exposition humaine.

La structure de la base de données suit le modèle d'occupation afin d'établir la répartition spatio-temporelle de population. Cette structure est présentée dans le schéma suivant (Figure 45). La classe *bâti* correspond à une relation (une table) dans *postgreSQL*, dont les attributs enregistrent les éléments indépendants des variations horaires et caractéristiques de chaque bâti comme sa résistance, un lien vers sa classe fonctionnelle (*classe_fonction*), le nombre d'étages (*étages*), la grande ouverture, la densité humaine théorique (*dh*), la Capacité d'Accueil Maximale Crédible (*CAMC*). En ce qui concerne l'inondation autour du bâti, la classe *bâti* est aussi caractérisée également par la hauteur d'eau (*hauteur_eau*), la vitesse de courant (*vitesse_eau*) et la probabilité de décès (*proba_deces*) des personnes qui les occupent.

Pour chaque classe fonctionnelle, la classe *bâti* est représentée par les espaces de références. Elle enregistre les taux d'occupation des espaces pendant 7 classes de jours. En utilisant le lien de *bâti* et *d'occupation de bâti*, nous avons modélisé la répartition spatio-temporelle des espaces bâtis. A la fin de la modélisation, nous avons pu établir pour chaque bâti le nombre de personne, les densités humaines et l'indice de Risque humain (IRh) heure par heure et pour les 7 classes de jours (7 x 24

heures). Cette méthode est ensuite appliquée aux espaces de plein air et espaces de voie de communication.

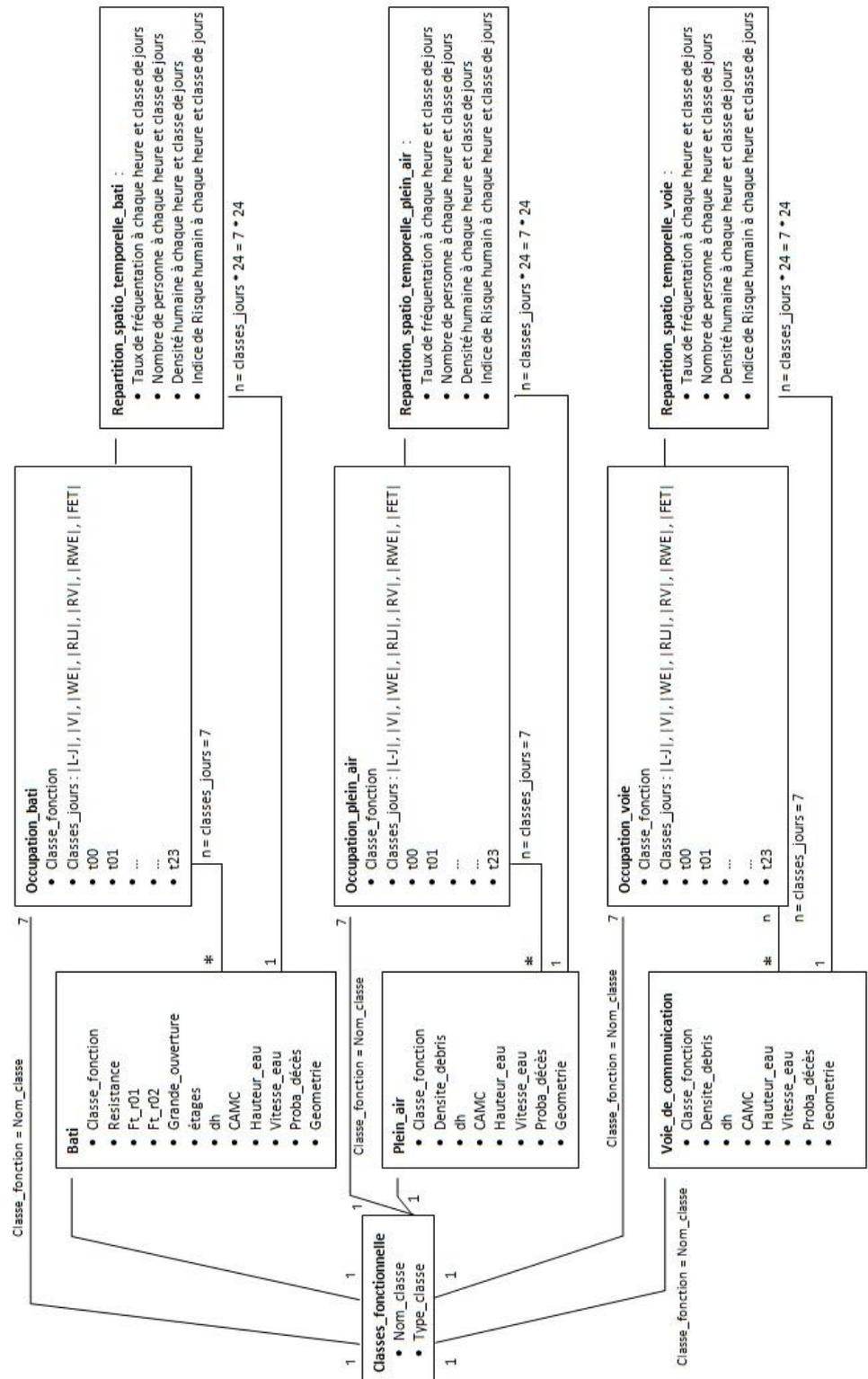
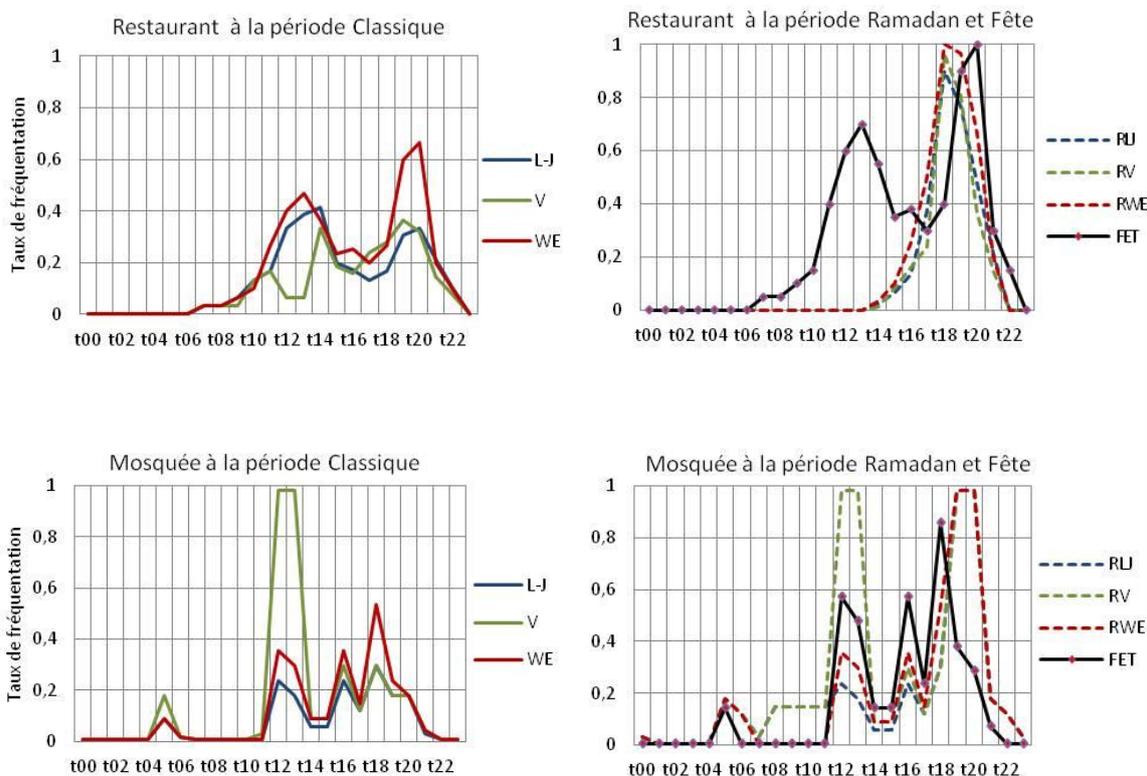


Figure 45. Diagramme de structure de la base de données sous PostgreSQL.

5.2.2. Variation du nombre total de population dans la zone d'étude

La modélisation de la distribution spatio-temporelle que nous proposons fournit plusieurs indicateurs pour chaque polygone heure par heure : le nombre de personnes, la densité humaine et un indice de risque humain. Nous proposons également la répartition spatiale de la probabilité de décès liée à la vulnérabilité structurelle et à l'aléa (hauteur et vitesse d'eau).

Afin de bien comprendre la variation du nombre total de population, il est nécessaire de présenter les courbes de fréquentation humaines par classe fonctionnelle. Cinq graphiques sur la Figure 46 comparent les courbes de fréquentation heure par heure pour 7 classes de jours et pour 5 classes fonctionnelles : restaurant, mosquées, habitation (HINDIV), plage et route principale. Restaurant, mosquée et habitation sont les types de bâtiments où le taux d'occupation atteint souvent 100% soit leur capacité maximale.



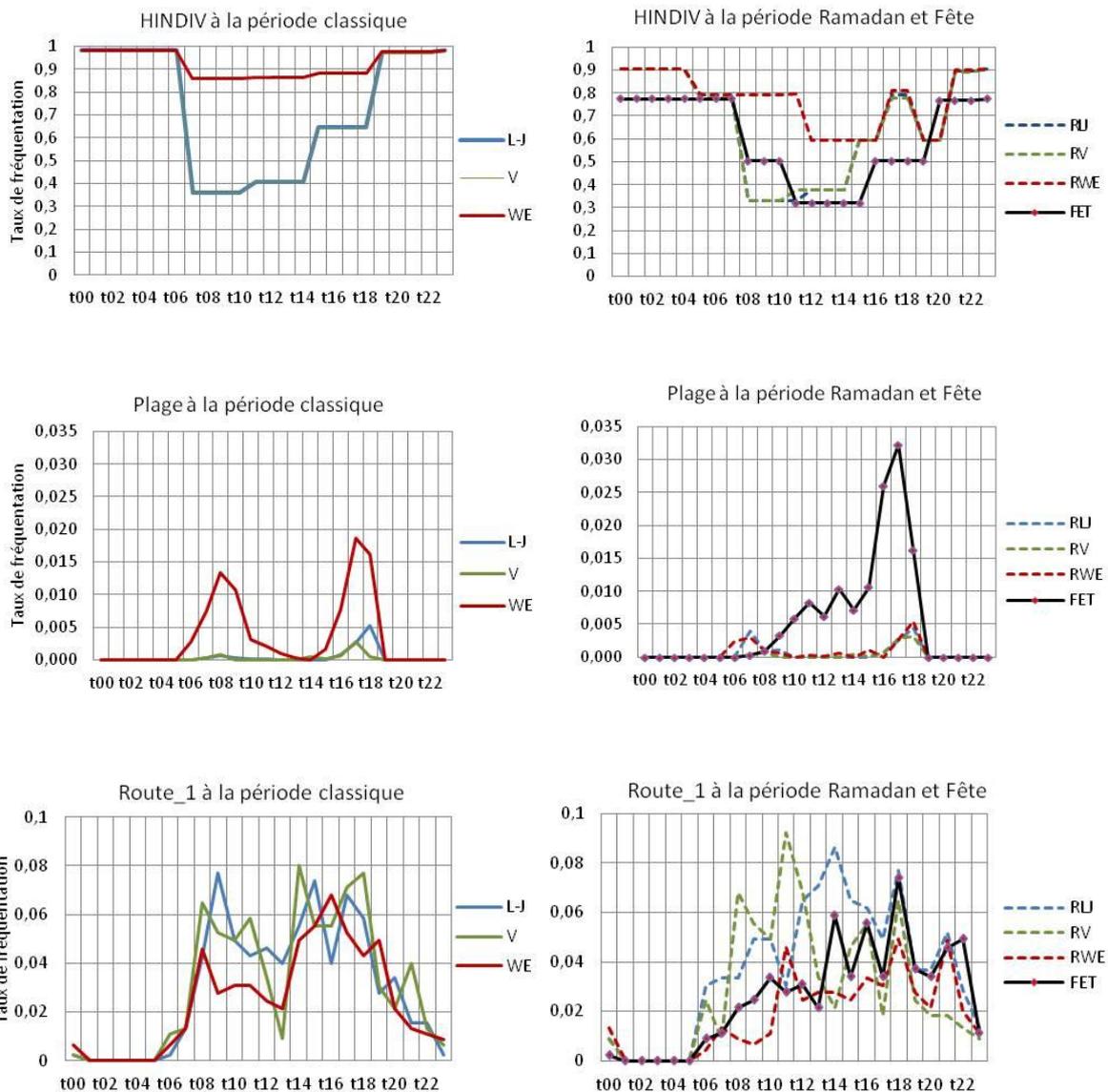


Figure 46. Exemple de courbes de fréquentation horaire pour 7 classes de jours. Sur le côté gauche sont présentés les courbes d'occupation durant la période classique (ligne bleue : du lundi au jeudi; ligne verte : vendredi; ligne rouge : week-end). Sur le côté droit sont les courbes d'occupation pendant la période du Ramadan (ligne pointillée bleue : du lundi au jeudi; vert pointillé : vendredi; ligne rouge en pointillés : Week-end). La ligne noire sur le côté droit est la courbe d'occupation durant les vacances (l'Aïd) après Ramadan.

Le taux des zones de plein air et des voies de communication sont souvent très faibles en comparaison de ceux des bâtiments, mais ils varient logiquement suivant le temps des activités : il existe plus de trafic durant la matinée (8h-11h) et l'après-midi (14h-18h), comme indiqué sur la Figure 47. En outre, les photos nous montrent des rues bondées ou des embouteillages aux intersections pendant la fête, à 18h. Il y a 6 voitures et 10 motos dans une zone d'intersection de 963 m², dont l'estimation de densité humaine à ce moment est de 0,034 personne/m². Bien que ce soit le moment le plus bondé sur la route, le taux de fréquentation humaine n'est que de 0,12. Voilà pourquoi leurs courbes ne sont pas directement comparables à celles des bâtiments. Certaines rues

bondées sont observées aux intersections sans feu de circulation (Figure 48). Ces endroits pourraient être des points de congestion au moment d'un tsunami. En effet, même s'il y a un feu rouge, un tremblement de terre peut déconnecter l'alimentation pour un temps très long, comme celui du 30 Septembre 2009 à Padang (Taubenböck et al. 2013), provoquant ainsi de nombreux embouteillages et de congestions.

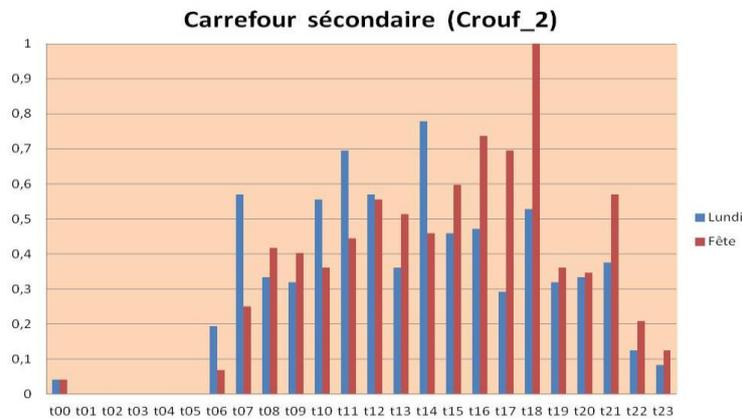


Figure 47. Taux de fréquentation diurne sur le taux de fréquentation maximum en carrefour secondaire pendant le lundi et les vacances de l'Aïd



Figure 48. Intersection secondaire au lundi 07h (à gauche) et dans la fête de l'Aïd 18h (à droite).

Le nombre de personnes de chaque espace est calculé par l'extrapolation des taux de fréquentation humaine de chaque espace de référence pour chaque polygone ayant la même classe fonctionnelle. Le taux de fréquentation humaine multiplié par la CAMC indique le nombre total d'individus dans un même bâtiment. En observant les courbes de nombre total de personnes, il est possible de visualiser l'heure de pointe de fréquentation pendant 24 heures pour chaque classe temporelle (Figure 49).

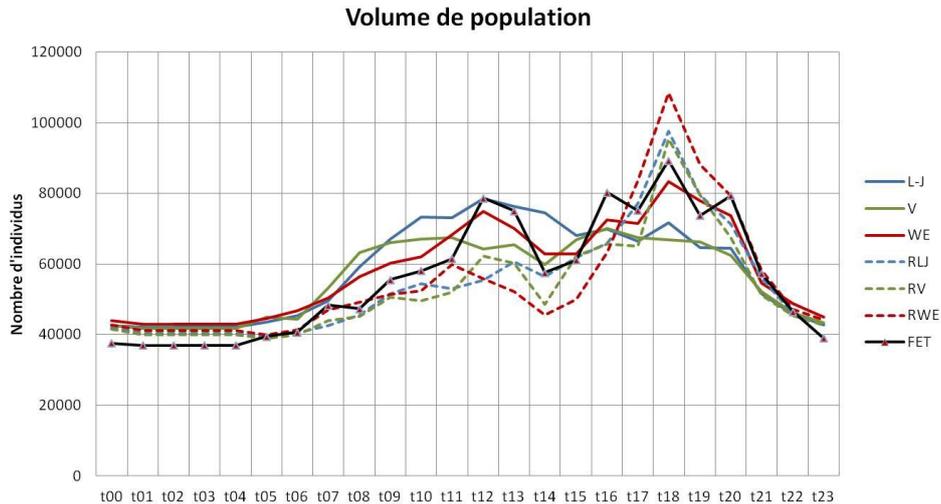


Figure 49. Nombre de personnes par classes temporelle sur 24 heures.

Le nombre total de la population dans cette partie de Padang augmente lentement au cours de la journée, à partir de 40.000 personnes à 06h jusqu'à 80.000 personnes à 18h avant de diminuer rapidement jusqu'à 40.000 personnes la nuit, entre 23h et 06h. Cela prouve que la zone d'étude n'est pas seulement une zone de résidence, puisque plus de la moitié de la population du pic de fréquentation disparaît de la zone pendant la nuit, probablement pour rentrer chez eux et se reposer. Ce résultat corrobore celui de (Bromley, Tallon, et Thomas 2003) qui indiquent que la répartition temporelle de la fréquentation humaine varie avec un facteur deux dans la journée sur le centre ville. Ce type de phénomène n'est pas facile à quantifier à travers les chiffres du recensement. Allant plus loin dans les détails, nous pouvons remarquer que le nombre maximal de population dans la zone d'étude est atteint durant le Ramadan à 18h, en particulier le week-end. C'est le moment pour les musulmans de rupture du jeûne ensemble. Nous avons également remarqué qu'il y a seulement une légère différence de la population totale dans la nuit entre la période classique et la période de Ramadan.

Lorsque l'on étudie en détail les courbes d'occupation de chaque catégorie de bâtiment, il semble que certaines classes fonctionnelles ont un profil temporel très similaire, comme indiqué sur la Figure 50 pour l'administration, la banque, les assurances, la fonction de l'industrie que nous appelons "TRAVAIL". Du fait que la majorité des activités humaines dans les bâtiments SECU sont plutôt de type administrative, nous avons choisi de regrouper la classe « SECU » dans le groupe « TRAVAIL ».

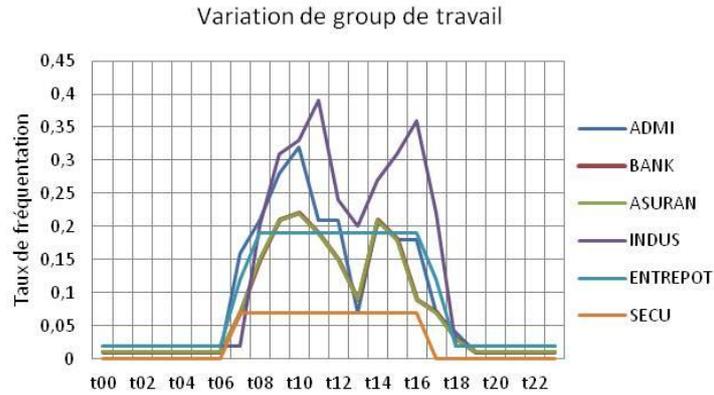


Figure 50. Taux de fréquentation de différentes fonctions de bâtis sur le groupe de travail.

5.2.3. Cartographie spatio-temporelle de la densité humaine

Après avoir calculé le nombre d'individus et la densité humaine pour chaque espace, heure par heure, sous PostgreSQL, nous avons visualisé les résultats sous ArcGIS 10.2. Un exemple du nombre d'individus par espace est cartographié en valeur absolue (Figure 51). Les individus situés à l'intérieur des bâtiments sont représentés en cercles bleus. A l'extérieur des bâtiments ils sont représentés en cercles vert (plein air) et cercles orange (voie de communication). Encore une fois, la sémiologie attachée à cette variable n'est pas idéale, et nécessite de zoomer (cadre A à gauche) pour visualiser les variations. C'est pourquoi les prochaines cartes représentent la densité humaine (nombre de personnes rapportées au mètre carré), ce qui permet d'utiliser une représentation choroplèthe plus lisible.

La densité humaine est cartographiée sous forme de gradation de couleurs. Cette méthode nous permet de visualiser la dynamique de densité humaine de la ville au moyen de 168 cartes (24 heures sur 7 classes jours).



Figure 51. Modélisation du nombre d'individus de chaque espace le week-end à 18h.

5.2.3.1. Analyse des variations horaires

Un de nos objectifs principaux est d'identifier la localisation des individus au moment du tsunami. C'est un des facteurs déterminants de la vulnérabilité humaine. Les habitants et visiteurs de Padang se déplacent tout au long de la journée suivant leurs activités personnelles. Puisque le moment du tsunami est imprévisible, on propose de calculer une répartition détaillée spatio-temporelle de la population sur la zone inondable du tsunami. Cette répartition permet d'évaluer les enjeux humains heure par heure durant une journée (Figure 52 et Figure 53).

Pour la classe de jour du lundi au jeudi à 02 heures du matin (codée L-J 02H), pour la population située au leurs domicile (HINDIV, HTRAD, HCOL) nous avons compté environ 2 593 bâtiments ayant une densité humaine de 0,03 – 0,05 personne/m², et environ 2 076 bâtiments ayant une densité humaine de 0,05 – 0,12 personne/m². A ce moment là, l'ensemble des zones de plein air est vide (Figure 52).



Figure 52. Comparaison des densités humaines pour 2 moments de la journée du lundi pendant la période classique (02h au dessus ; 10h au dessous).



Figure 53. Comparaison des densités humaines pour 2 moments de la journée du lundi pendant la période classique (18h au dessus ; 22h au dessous).

Les habitations se vident le matin lorsque la population se rend à ses activités. A 10 heures (L-J 10H), nous avons calculé environ 3.101 bâtiments ayant des densités humaines de 0,01 – 0,02

personne/m². Ce sont généralement les habitations. La forte densité humaine s'observe alors dans les établissements scolaires et les bâtiments de travail. Les voies de communications sont plus actives à ce moment (Figure 52). Les cartes montrent deux parties de la zone d'étude : la partie nord (carte A) et la partie sud (carte B).

En début de soirée, vers 18 heures (L-J 18H), les bâtiments administratifs et les services privés sont officiellement fermés. Il reste très peu de salariés qui font des heures supplémentaires. Les écoles sont fermées depuis plus d'une heure. A ces heures, les petits commerces et les restaurants situés le long des routes principales attirent les populations. C'est aussi le moment où les populations sont en déplacement sur les voies de communications. Nous avons également remarqué l'augmentation de densité de population sur les cafés et les zones de plein air près de la mer (Figure 53). Ces sont les jeunes qui se réunissent sur les cafés terrasses sur la plage.

A la fin de soirée vers 22 heures (L-J 22H), la majorité de la population est rentrée au domicile. L'ensemble des zones de plein air se vide doucement. Les cafés et les restaurants servent leurs derniers clients avant de fermer (Figure 53).

5.2.3.2. Analyse des variations hebdomadaires

En complément des cartes présentant les densités de population à deux horaires différents, l'analyse peut gagner en pertinence si nous présentons sur une seule carte le différentiel de densité de population entre deux horaires. Cette carte de différentiel met en évidence (Figure 54) ce qui change nettement entre deux horaires, via une palette divergente, en tons chauds (rouges) pour l'augmentation de densité au second horaire, et tons froids (bleus) pour la diminution de densité par rapport au premier horaire.

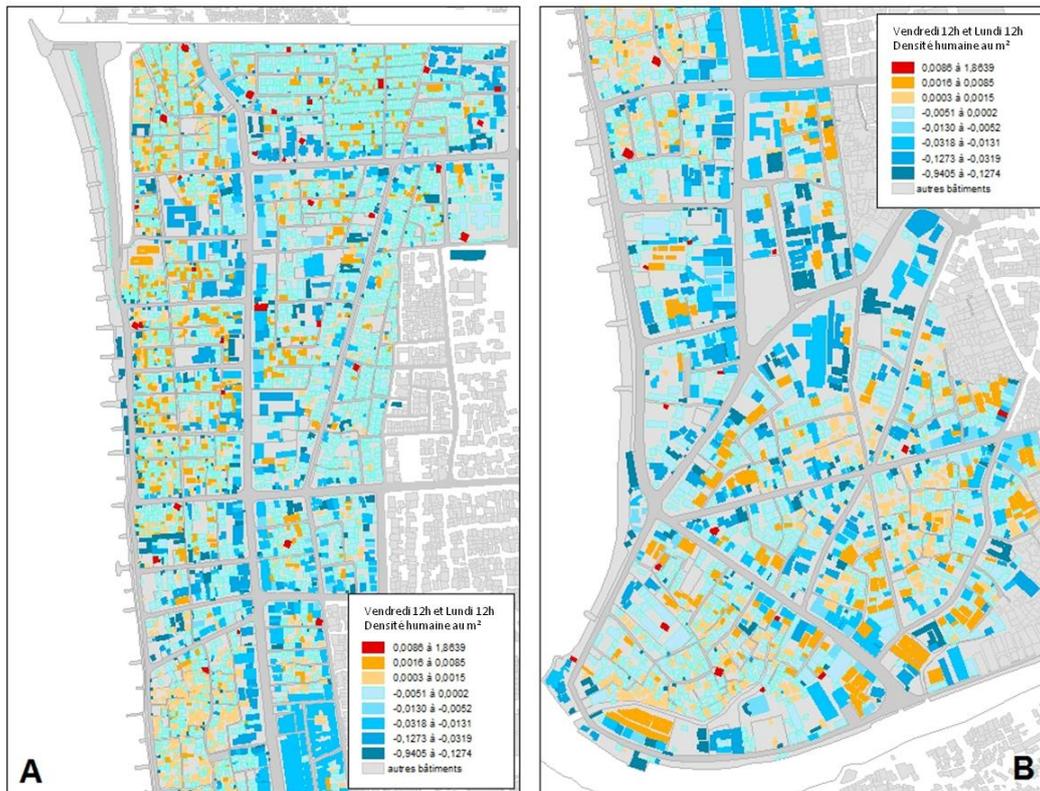


Figure 54. Carte montrant la différence de densité humaine des bâtiments entre le vendredi 12h et le lundi 12h pendant la période classique pour tous les bâtiments.

D'après nos observations dans la semaine, le rythme de vie tend à être identique du lundi au jeudi. Un rythme différent pour le vendredi a été remarqué puisque les hommes se réunissent dans les mosquées pour faire la prière de 12h à 13h (bâtiments en rouge dans la Figure 54). Afin de mettre en évidence cette variation, nous avons effectué la différence des valeurs de densité humaine de chaque bâti entre le vendredi 12h et le lundi 12h.

Les mosquées (polygones rouges) présentent une densité humaine significativement plus élevée le vendredi 12h, tandis que les bâtiments de travail (les bleus foncés) sont beaucoup moins fréquentés. A ce moment là, l'ensemble de l'activité urbaine ralentit et les mosquées atteignent les niveaux de fréquentations maximaux. Jusqu'à 28% des habitants de la zone urbaine sont alors concentrés dans les mosquées.

5.2.3.3. Analyse des variations saisonnières (classique et Ramadan)

Nous avons également remarqué la variation de densité humaine pendant les différentes saisons. Normalement les écoles sont plus fréquentées pendant la période classique, mais pendant la période du Ramadan, qui est définie par le calendrier islamique, les activités pédagogiques sur les

écoles sont arrêtées. Le processus d'apprentissage dans les écoles est remplacé par un processus d'apprentissage religieux dans les mosquées.

Afin de bien tenir compte de cette variation saisonnière, on effectue la différence de densité humaine de chaque bâtiment d'éducation du lundi 10h pendant la période classique avec celle du lundi 10h au moment du Ramadan. Cette comparaison montre que les écoles (polygones rouges) ont un taux fréquentation humaine plus élevé (Figure 55) durant la période classique que durant le Ramadan. Toutefois la densité humaine dans les mosquées est plus faible que pendant le Ramadan. La comparaison montre que les mosquées (polygone bleu foncé) ont un taux fréquentation plus réduit durant la période classique que le Ramadan.

Nous avons également distingué la variation saisonnière le week-end à 18h pendant la période du Ramadan ou pendant la période classique. En respectant le Ramadan, tous les restaurants sont fermés dans la journée. Ils reçoivent le premier client vers 17h ou avant la rupture du jeûne. Une heure après (vers 18h), les restaurants atteignent un taux de fréquentation maximal (polygone rouge). Cette densité est beaucoup plus élevée lors du Ramadan que lors du week-end 18h pendant la période classique (Figure 56).

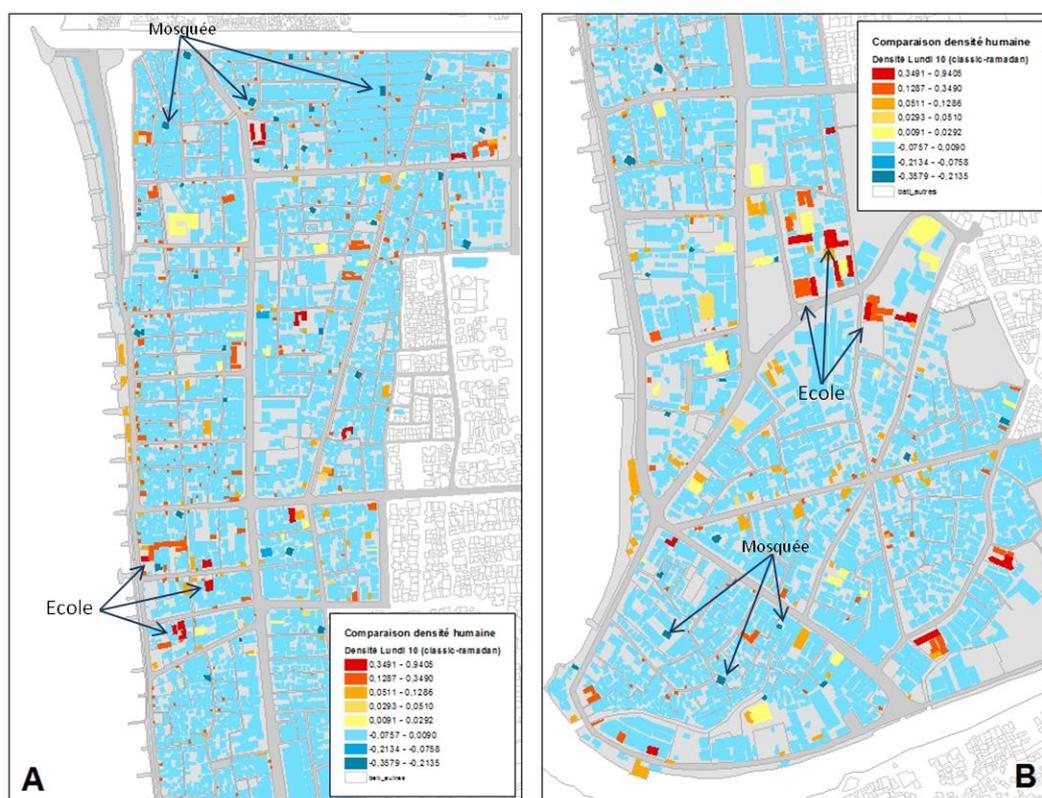


Figure 55. Carte montrant la différence de densité humaine dans les bâtiments entre le lundi 10h pendant la période classique et le lundi 10h pendant la période du Ramadan.

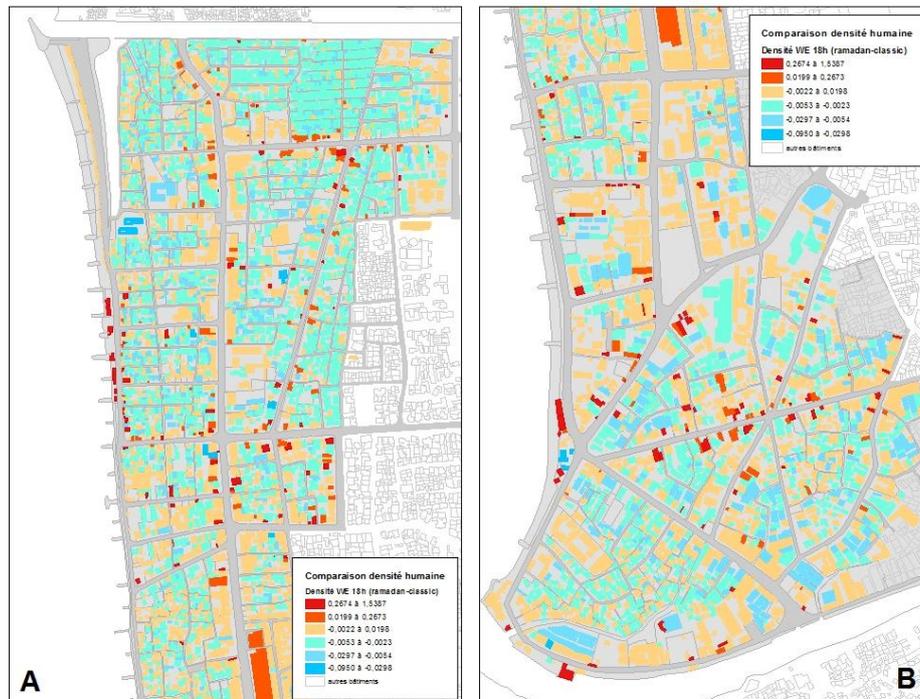


Figure 56. Carte montrant la différence de densité humaine dans les bâtiments entre le week-end 18h pendant la période du Ramadan et le week-end 18h pendant la période classique.

Conclusion du chapitre

L'étude détaillée de la répartition spatio-temporelle de la population sur la zone inondable du tsunami est nécessaire pour le programme de réduction de risque. En effet, elle révèle la disposition des enjeux humains et surtout leurs variations importantes (la population présente dans la zone étudiée peut varier du simple au double). Cette étude requiert de mettre en œuvre une enquête sur la zone d'étude qui s'avère longue à produire ses résultats. Mais après 7 mois d'enquête, et grâce également à l'organisation d'une base de données spatio-temporelle, on obtient ensuite des résultats précis quant à la localisation des enjeux humains heure par heure durant une journée, sur diverses périodes types. On en tire ainsi des taux et des courbes de fréquentation humaine pour chaque fonction des espaces, et en extrapolant pour tous les espaces, ouverts ou fermés, et il est possible de produire une analyse fine des mobilités intra-urbaines. Ceci est une information cruciale pour préparer des plans d'évacuation qui tiennent compte de ces enjeux, et surtout de la variabilité de leur situation et volume.

Chapitre 6. Cartographie multi-temporelle de l'exposition au risque

6.1. Principe du calcul des indices de risque

L'étape précédente nous a permis d'estimer la variabilité spatiale et temporelle du nombre de personnes et de la densité de population sur chaque espace de la ville. Nous allons à présent tenter dans ce chapitre de quantifier le risque qui se définit comme l'espérance mathématique des pertes potentielles (Leone 2007) pour les scénarios retenus. Dans le cadre de cette thèse, nous nous attacherons également à analyser la distribution spatio-temporelle des risques sur un espace défini.

Le risque est calculé au moyen d'un indice relatif de risque de pertes humaines (exprimé entre 0 et 1). L'Indice de risque humain (IRh) combine l'indice structurel de l'exposition (la probabilité de décès) avec un indice social de l'exposition (la densité humaine dans la zone considérée pour l'instant donné) et représente la probabilité de victimes dans chaque polygone (Leone et al. 2012). Formellement, l'indice de risque humain (IRh) est obtenu en multipliant la probabilité de décès (Pd) par les effectifs de population (Ep) - reconstitués à partir de la densité humaine mesurée à une heure et à une période donnée - divisée par la densité humaine maximale de notre échantillon, soit :

$$\text{IRh [0-1]} = \text{Pd [0-1]} * \text{Ep/Epmax [0-1]} \quad (6)$$

La valeur de Pd est obtenue au moyen de matrices de probabilités de décès (Chapitre 3.2.2 et 3.2.3). Cette méthode nous permet d'étudier la capacité de survie des individus (soit sur les espaces bâtis, soit sur les espaces de plein air) en fonction de la profondeur et de la vitesse des eaux de chaque partie de la zone exposée, facilitant ainsi la quantification des pertes humaines potentielles en fonction du temps d'arrivée de l'aléa.

Tous ces calculs sont directement automatisés pour chaque polygone (bâtiments, espaces de plein air ou routes) sous forme de traitements de base de données *PostgreSQL 9.3* avec son extension spatiale *PostGIS 2.2* à travers des procédures SQL. Cette étape de la méthodologie est résumée dans la Figure 57 conduisant au croisement automatisé entre les données collectées de vulnérabilité structurelle et humaine.

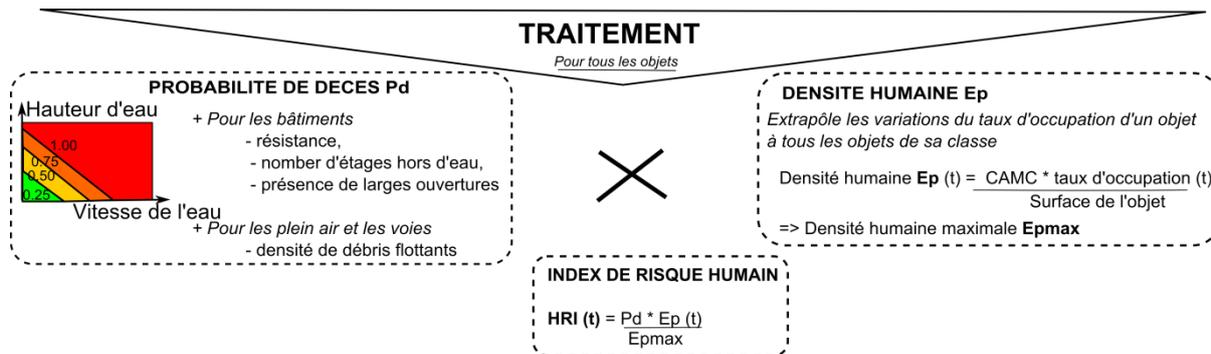


Figure 57. Traitement automatisé des données de vulnérabilité et d'exposition conduisant au calcul d'un index spatio-temporel de risque humain.

6.2. Cartes de probabilité de décès (pd) et répartition temporelle des personnes par niveau de pd.

Avant de cartographier les risques multi-temporels à Padang, il est nécessaire de construire la carte de probabilité de décès (pd) basée sur le modèle d'inondation. Ce modèle d'inondation est celui du scénario proposé par Taubenböck et al. (2009) dans le projet « Last Mile » à partir des données de hauteur et de vitesses de flux fournies sur une grille de résolution 5 m par 5 m (données gracieusement fournies par l'équipe de « Last Mile »).

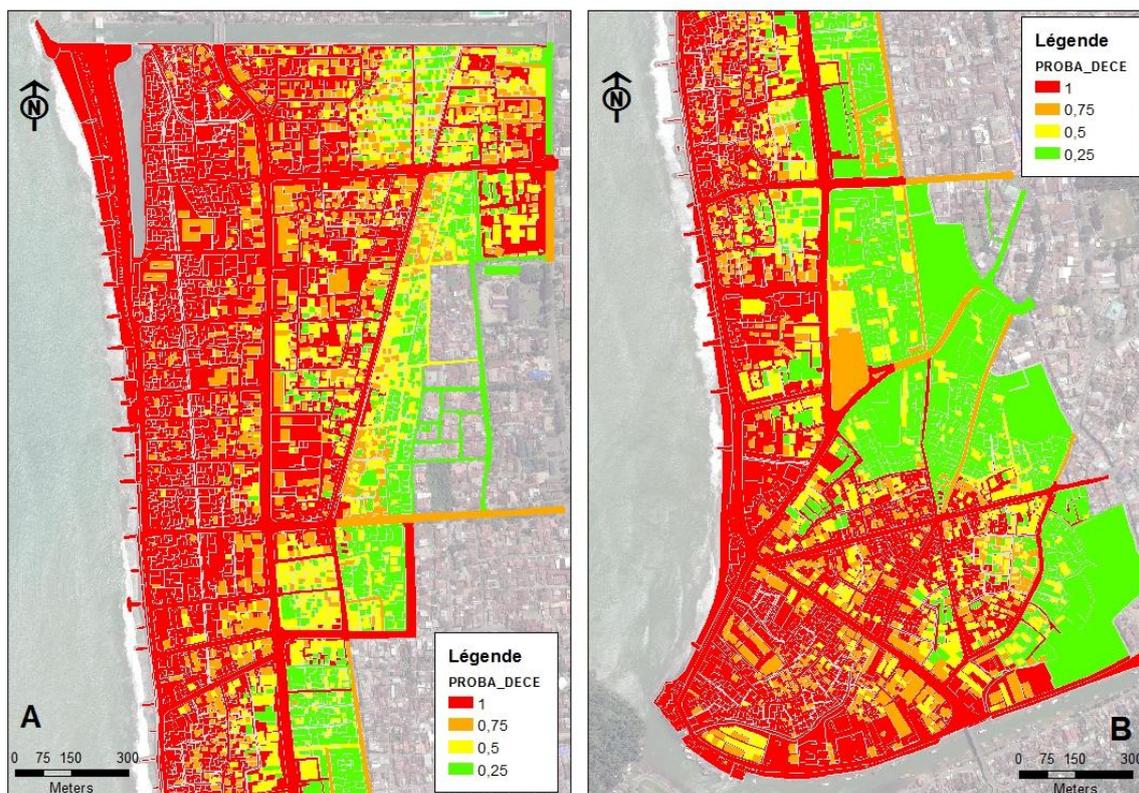
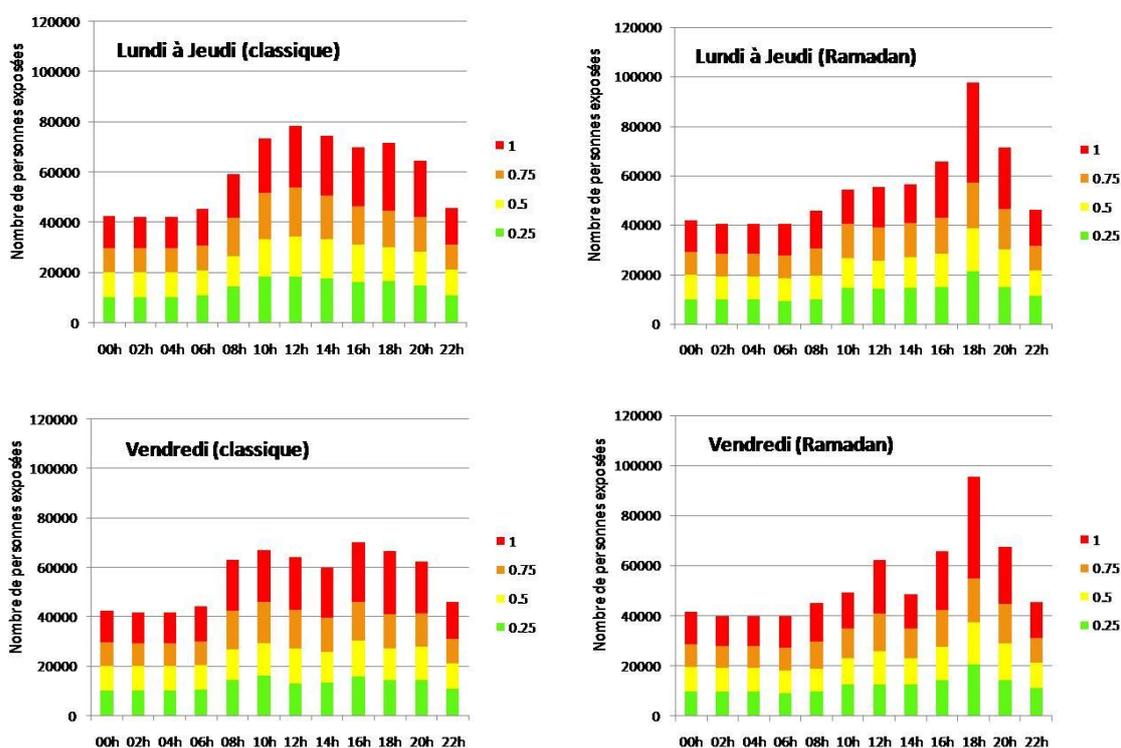


Figure 58. Probabilité de décès sur la zone d'étude. Partie nord (à gauche) ; partie sud (à droite).

La probabilité de décès issue des matrices précédentes a été calculée pour l'ensemble de la zone d'étude et a également été cartographiée sur deux parties (nord (A) et sud (B)), Figure 58. Ces cartes montrent que la zone la plus dangereuse pour les personnes en cas d'événement de tsunami est située le long de la bande littorale ($P_d = 1$). Plus loin à l'est, la P_d diminue.

A partir de ces données, nous pouvons calculer le nombre de personnes présentes aux différents niveaux de probabilité de décès, heure par heure et pendant 7 classes de jours. Les expositions humaines sont ensuite représentées dans les graphes suivants (Figure 59). En général nous avons remarqué que la variation journalière atteint des pics à 12h et 18h. On considère l'exposition humaine pendant la période classique et le Ramadan. Les expositions sont plus faibles pendant le Ramadan l'après midi que durant la période classique l'après midi. Durant le Ramadan qui a lieu généralement pendant une saison chaude, les gens préfèrent rester à l'intérieur l'après midi. La chaleur qui peut atteindre 32°C dans l'après midi limite leurs déplacements à l'extérieur. Les expositions humaines augmentent très vite à la fin de l'après midi. Elles atteignent un maximum vers 18h au moment où les gens font la rupture du jeûne ensemble.

Les répartitions des P_d ont tendance à être équilibrées pour chaque valeur. L'augmentation du nombre de personnes sur la zone ayant un risque élevé ($P_d = 1$) s'observe pendant la période du Ramadan vers 18h et pendant la fête de l'Aïd de 16h à 20h. La population se réunit dans des restaurants vers 18h avant le coucher du soleil qui a lieu vers 18h30. Pendant les périodes de vacances de l'Aïd, les zones autour des plages attirent les gens depuis le midi jusqu'au soir.



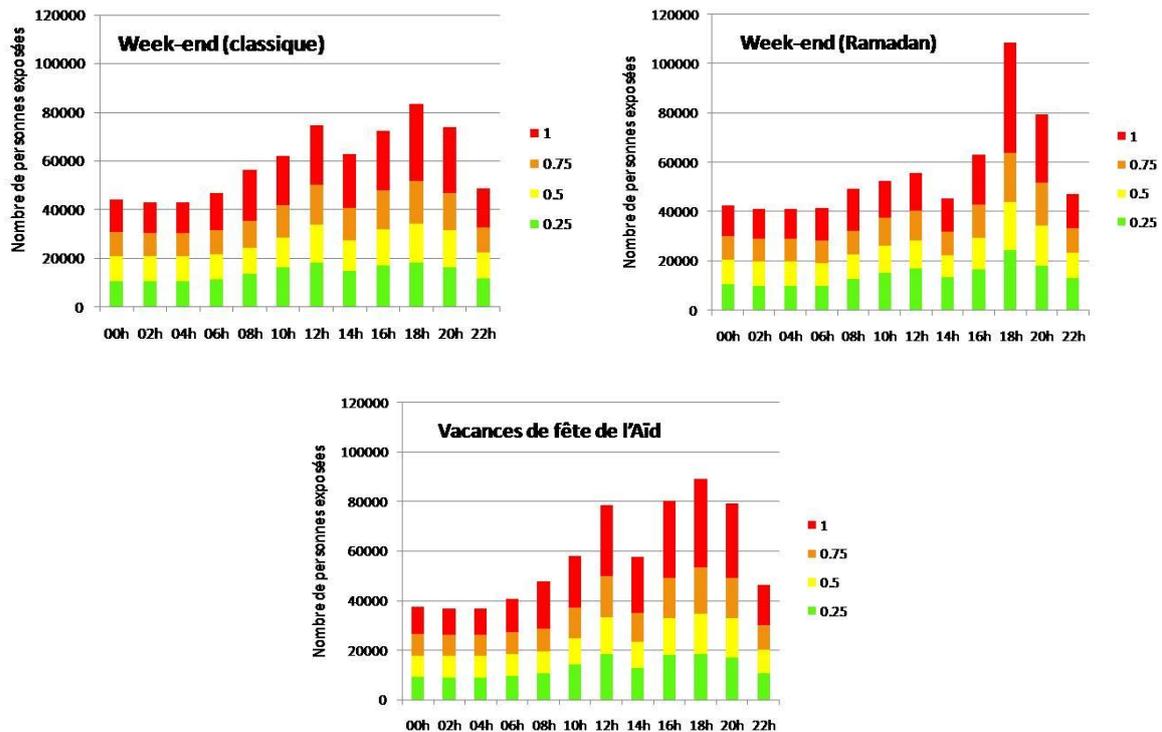


Figure 59. Répartition temporelle des enjeux humains par niveau de probabilité de décès.

6.3. Construction des scénarios par l'analyse des variations des taux d'occupation.

La conception de scénarios d'évacuation a pour but d'identifier plusieurs distributions distinctes de population à l'échelle locale selon diverses heures. Il s'agit donc d'identifier des scénarios en termes de distribution spatiale des enjeux humains suffisamment différents pour concevoir des plans d'évacuations spécifiques. Pour atteindre cet objectif, on étudie les variations de taux d'occupation regroupés par grandes classes fonctionnelles par période de temps. Nous avons vu que les différentes classes fonctionnelles peuvent être regroupées en raison de leur similitude temporelle (chapitre 5.2.2). Le choix de certaines heures (02H, 10H, 12H, 15H, 18H, 20h) est une conséquence de l'analyse précédente montrant en détail comment les journées sont organisées pour différents bâtiments et fonctions l'extérieures.

La Figure 60 montre un graphique de type « boîte à moustache » (*box plot*) comparant les variations de taux d'occupation pour toutes les périodes pour les différentes classes fonctionnelles. Une variation importante du taux d'occupation dans la classe « habitation » peut être remarquée : elle a la plus grande amplitude autour de sa valeur médiane (qui est plus élevée que les autres classes, montrant que les gens doivent majoritairement être évacués de leur domicile). Les classes « culte » et « loisir » montrent également une variation importante du taux d'occupation. En revanche, les variations de la classe « éducation » et de la classe « travail » ont une amplitude plus

faible autour de la médiane, parce que ces fonctions ne traitent que certaines sous-catégories spécifiques de la population pour quelques horaires fixes, dans des espaces qui ne deviennent jamais surpeuplés. En outre, les classes de plein air et de rue ne présentent qu'une légère variation autour de leur valeur médiane des taux d'occupation, qui est de plus très faible. C'est ainsi que ces deux taux d'occupation en extérieur n'influent pas sur les choix de scénarios, exceptés en cas d'un taux d'occupation exceptionnellement élevé.

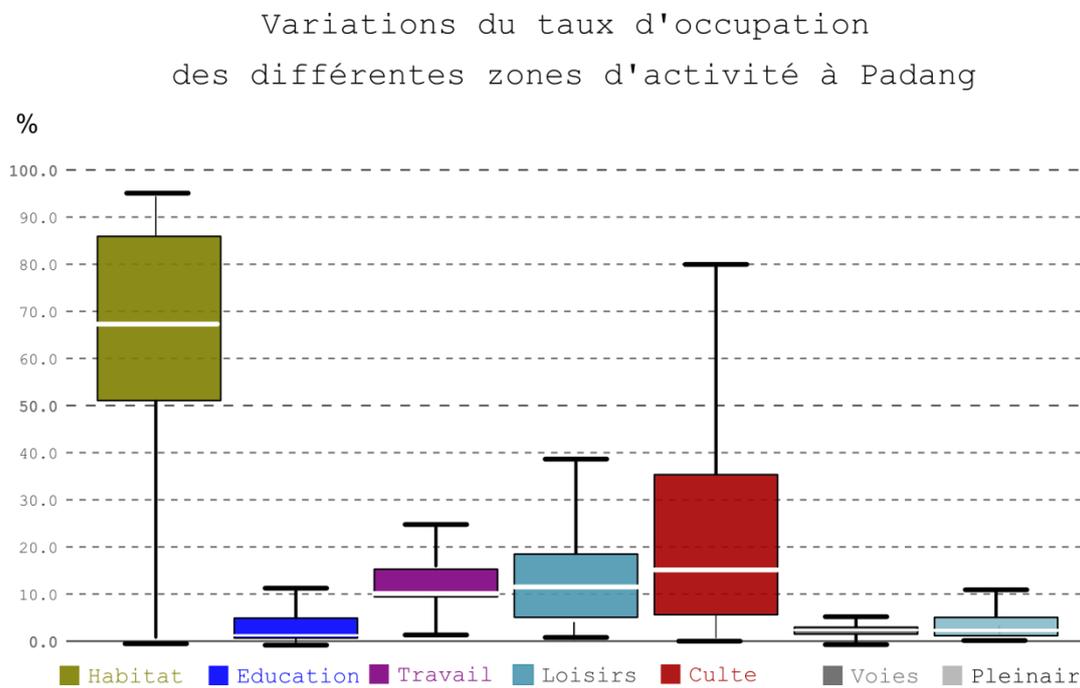


Figure 60. "Box plot" comparant les variations de taux d'occupation pour les différentes activités

Nous proposons ainsi d'évaluer 8 scénarios (Tableau 13): le scénario nocturne à 02h du matin (SC-1), le scénario du jour ouvrable à 10h pendant la période classique (SC-2), le scénario pendant le vendredi midi 12h (SC-3), le scénario pendant le week-end 18h (SC-4), le scénario du jour ouvrable à 10h pendant la période de Ramadan (SC-5), le scénario de week-end 18h pendant la période Ramadan (SC-6), le scénario du soir 20h pendant la période Ramadan (SC-7) et le scénario de vacances de l'Aïd 18h (SC-8). Ces scénarios sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 13. Les taux de fréquentations humaines dans la zone d'étude selon le groupe de classe fonctionnelle, pour les 8 scénarios choisis.

PERIODE	HABITATION	EDUCATION	TRAVAIL	LOISIR	CULTE	ROUTE	PLEIN AIR	SCENARIO
L-J 02	97,52	0,67	10,11	2,21	1,14	0	0	SC-1
L-J 10	41,49	67,53	31,98	10,93	1,14	2,97	2,78	SC-2
V 12	46,51	16,33	15,96	5,7	87,75	2,57	5,4	SC-3
WE 18	87,66	1,34	10,11	18,69	50,57	3,76	6,59	SC-4
RLJ 10	39,55	3,38	31,98	5,06	13,64	1,48	1,03	SC-5
RWE 18	82,11	0,67	10,11	29,21	50,57	2,35	11,36	SC-6
RWE 20	64,29	0,67	10,11	18,49	89,86	2,19	2,72	SC-7
FET 18	54,73	0,67	10,11	27,11	79,14	5,02	9,42	SC-8

Au scénario (SC-1) la population reste à son domicile tandis que d'autres classes fonctionnelles et espace extérieur sont vides. Dans le scénario (SC-2) à 10h les gens sont dispersés dans les centres d'éducation et les bâtiments de travail, tandis que les habitations sont beaucoup moins remplies. Le scénario (SC-3) montre le taux d'occupation élevé dans les mosquées le vendredi 12h tandis que d'autres classes fonctionnelles sont beaucoup moins remplies. Le scénario (SC-4) correspond à la propagation de personnes sur la zone de plein air, la route et les activités de loisirs pendant le week-end à 18h pendant la période classique. Le scénario (SC-5) est typique pour une journée de travail à 10h pendant la période du Ramadan où la majorité des gens travaillent, mais il n'y a aucune activité d'éducation dans les écoles, seules quelques personnes prient dans la mosquée. Le scénario (SC-6) est très semblable au scénario SC-4, avec une différence sur les loisirs et activités de plein air qui attirent plus de gens dans la ville le week-end à 18h pendant la période du Ramadan. Le scénario (SC-7) correspond au taux exceptionnel d'occupation pour les mosquées à 20h pendant la période du Ramadan. Enfin le scénario (SC-8) est très similaire à un week-end du mois de Ramadan (SC-6), même heure (18h), avec de nombreuses activités de loisirs et de plein air, mais avec cependant moins de personnes à la maison.

6.4. Cartographie spatio-temporelle de l'indice de risque humain

En utilisant la formule du risque humain proposée par Leone et al. (2012) ($IRh = Pd * Ep/Epmax$), nous présentons des cartes des indices de risques humains multi-horaires pour chacun des scénarios identifiés. Ces valeurs ont été calculées en multipliant les probabilités de décès par les ratios de densités humaines sur la densité humaine maximale. Il en résulte des valeurs IRh distinctes pour chaque espace renseigné, chaque période (jour et heure). Ces cartes nous permettent de visualiser la variation spatio-temporelle du risque humain basée sur le scénario construit par

Taubenböck (2009). Ce n'est pas les cartes qui montrent le nombre de pertes humaines, mais les cartes qui montrent les localisations de secteurs à risque élevé contribuant aux plus fortes probabilités de concentrations de victimes. Ces cartes sont utiles pour déterminer les emplacements des futures zones refuges puisqu'elles synthétisent une information de vulnérabilité structurelle (Pd) et humaine (volume de personnes en danger).

6.4.1. Indice de risque humain durant la nuit (SC-1)



Figure 61. Répartition spatiale d'indice de risque humain au lundi 02h.

Après minuit à Padang, à 02h du matin (Figure 61), les bâtiments ayant un risque élevé se dispersent sur la partie nord (carte A). Ces sont généralement les habitations collectives situées à proximité de la mer. Sur la partie sud (carte B), le secteur concentrant la plus forte probabilité de victimes est centralisé sur la prison et les habitations collectives autour de la prison. On remarque également la valeur IRh moins élevée sur les autres bâtiments le long de la plage (polygone marron) qui est identifiée comme les autres habitations (HINDIV et HTRAD). Quant aux autres bâtiments, ils ont des risques faibles à cette heure. De plus, le risque est très faible sur ensemble des zones de plein air.

6.4.2. Indice de risque humain durant 1 jour ouvrable à (10h) classique et de Ramadan (SC-2 et SC-5)

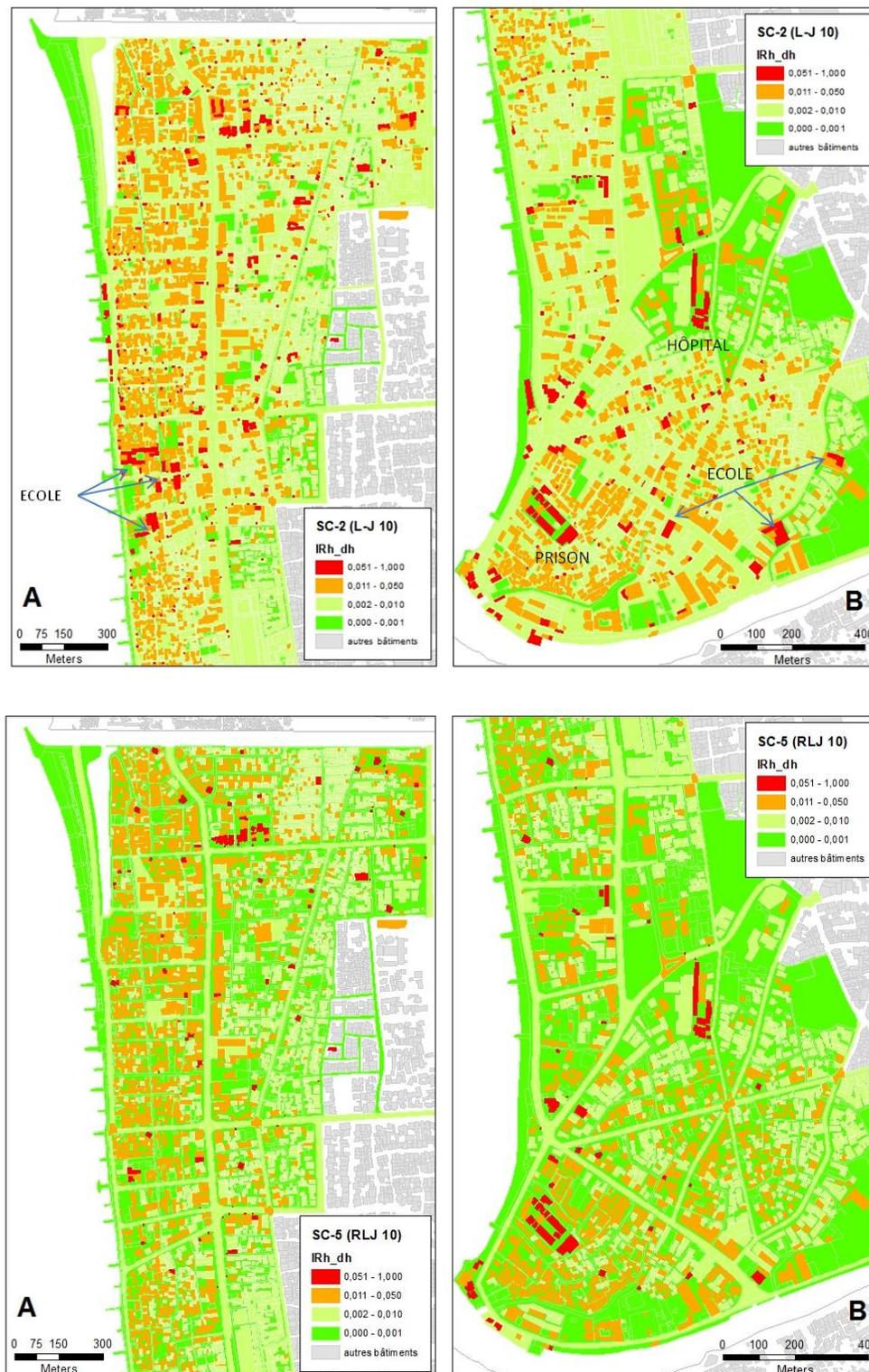


Figure 62. L'IRh pour la journée type à 10h pendant la période classique et Ramadan.

Pendant la journée type dans la semaine (lundi à jeudi), l'exposition de la population change suivant le rythme d'activité de la population. Le lundi matin à 10H pendant la période classique

(Figure 62 en haut), les risques élevés (polygones rouges) sont concentrés sur les écoles, les bureaux d'administratifs et les hôpitaux. On observe également le risque élevé sur les restaurants qui commencent à accueillir les premiers clients pour déjeuner. Pendant la période de Ramadan, le rythme de vie change comparé à la période classique. A lundi vers 10h du matin, les mosquées remplacent les écoles comme espaces ayant un risque élevé (Figure 62 en bas). Cette carte nous montre que la probabilité de victimes dans toutes les écoles est très faible en contraste avec la période non Ramadan. Le risque faible est également trouvé sur les restaurants jusqu'à la fin de l'après midi. Les bureaux administratifs et les hôpitaux restent ouverts pendant cette période, présentant un risque élevé sur ces espaces. Les autres bâtiments le long de la bande littorale montrent un risque moins élevé. Le niveau de risque sur les bâtiments se réduit vers les zones les plus éloignées de la mer.

Les espaces de plein air présentent les risques faibles pendant les deux périodes. Il n'y a qu'un faible risque sur la cour autour des bâtiments pendant la période classique. Ce niveau de risque est similaire à celui des voies de communication pour les deux périodes.

6.4.3. Indice de risque humain durant le vendredi midi (SC-3)

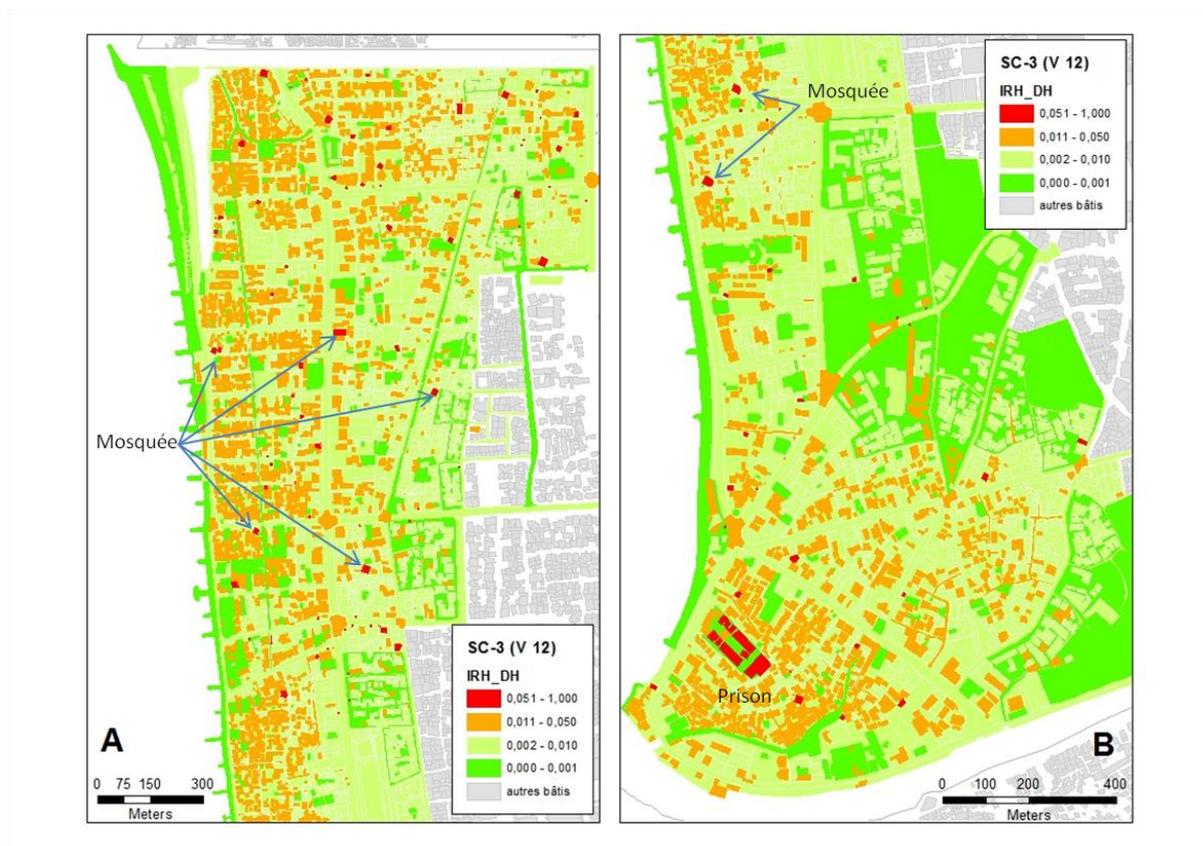


Figure 63. L'IRh le vendredi 12h pendant la période classique.

Le vendredi vers 12h, nous avons remarqué que les risques élevés se concentrent sur les mosquées où les hommes effectuent leur prière à la mosquée. Nous avons également identifié que la prison située dans la partie sud de la ville sont toujours présentant les risque élevés (Figure 63). Les autres bâtiments ont un risque moins élevé, surtout le long de la bande littorale.

Sur les espaces de plein air, il existe très peu de risque sur la cour autour des bâtiments, et presque pas de risque sur la plage. On observe également un peu de risque sur les carrefours secondaires. C'est le moment où les hommes sont en déplacement sur la route, soit pour rentrer chez eux, soit pour aller vers l'une des mosquées.

6.4.4. Comparaison des indices de risque humain durant le Week-end à (18h) classique et le Ramadan à (18h) (SC-4 et SC-6)

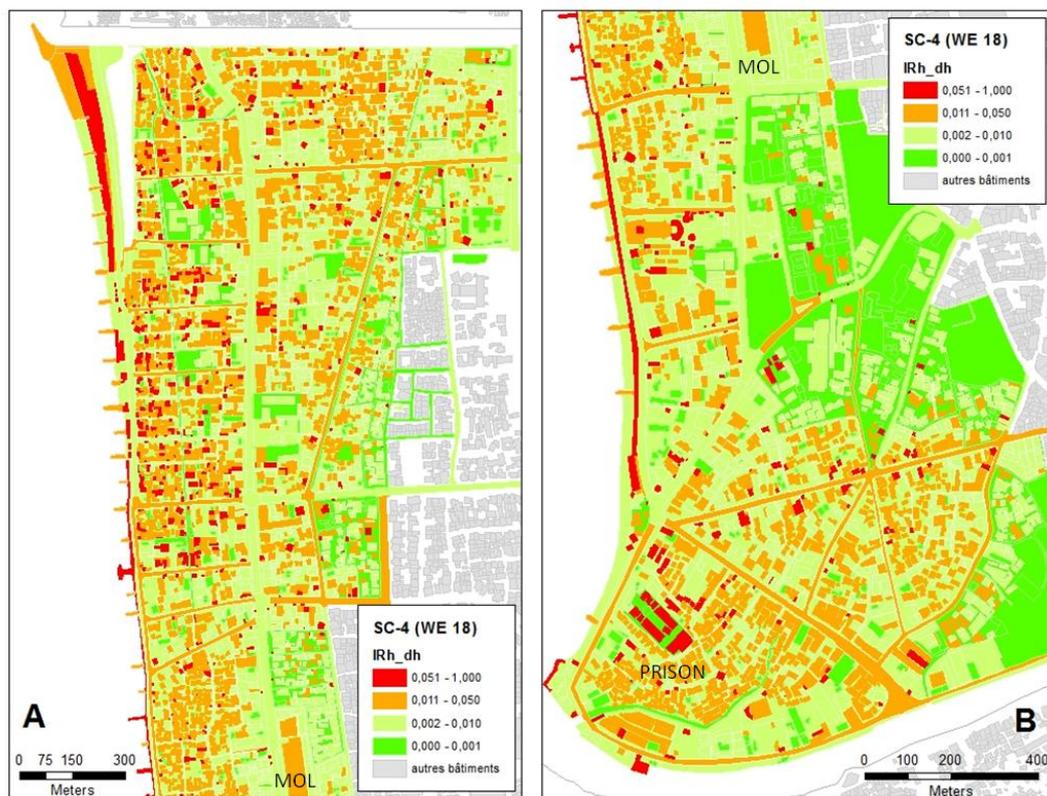


Figure 64. L'IRh le week-end à 18h pendant la période classique.

Durant le week-end à 18H pendant la période classique (Figure 64), la zone côtière attire beaucoup de gens pour attendre le coucher du soleil. Plusieurs zones autour de la plage, des restaurants et des cafés ont alors un risque élevé. La mosquée près de la plage attire les pratiquants musulmans qui vont alors prier après le coucher du Soleil. La plupart des gens qui viennent à la mosquée sont des visiteurs indonésiens vivant à l'extérieur de cette zone d'étude (le nombre de la population est deux fois plus élevé que pendant la nuit, dans la ville, à ce moment-là). Le MOL, les supermarchés et les boutiques sont également des destinations favorites de la population pour avoir du plaisir avec la famille et les amis. Ces derniers présentent les risques moins élevés que les bâtiments près de la plage. Ce moment est l'heure de pointe pendant la période classique dans notre zone d'étude où les gens se dispersent dans presque tous les endroits. Cette situation présente une forte probabilité de victime sur cette zone, de sorte qu'il est nécessaire de planifier une bonne évacuation si un tsunami grave se produit à ce moment. En outre, la plupart des visiteurs dispersés sur cette zone n'ont peut-être pas conscience de la vulnérabilité de cette zone au risque de tsunami, et n'y sont pas bien préparés.

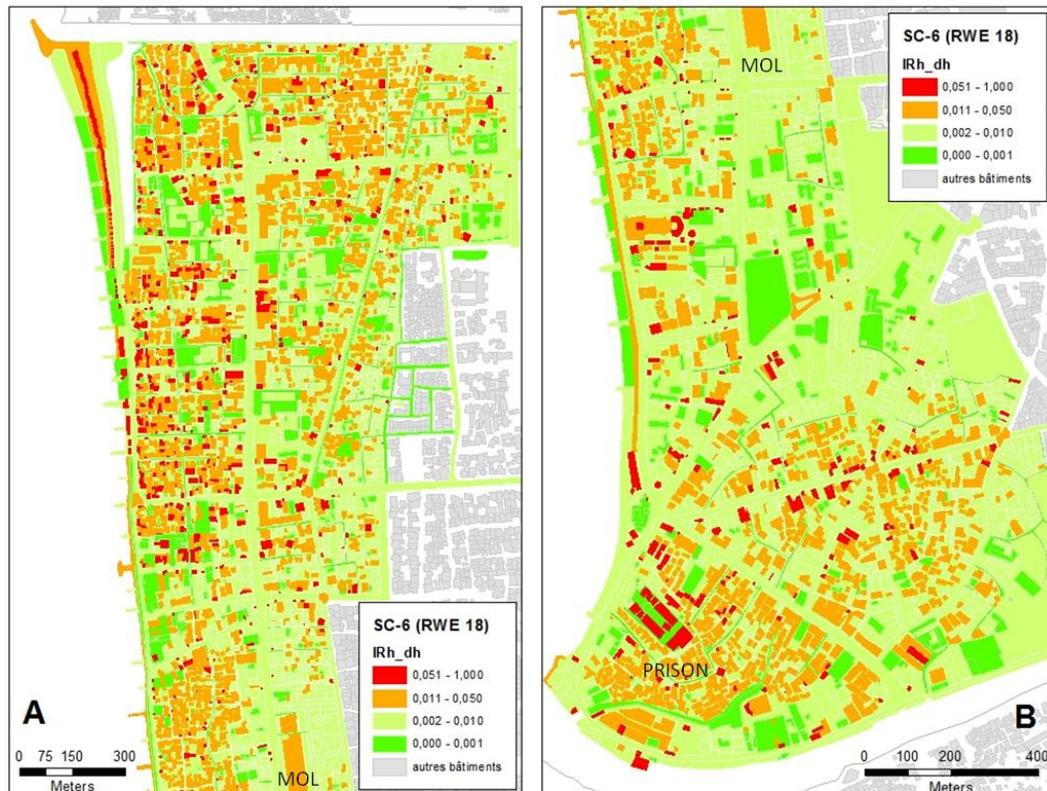


Figure 65. L'IRh le week-end 18h pendant la période du Ramadan.

Le week-end pendant la période du Ramadan (Figure 65) est le moment le plus densément peuplé de notre zone d'étude. Bien que les valeurs IRh autour de la plage le week-end à 18h soient plus faibles que durant la période classique, on observe le risque le plus élevé sur les restaurants et les cafés à proximité de la plage. Les habitations également présentent un risque, moins élevé que les restaurants et les mosquées. La plupart des membres de la famille sont à leur domicile. C'est le moment où les musulmans rompent le jeûne ensemble.

Les niveaux de risque dans d'autres bâtiments (les services publics et privés, les écoles) sont très faibles pour les deux périodes en raison de la fermeture de ces services à ce moment. En outre, dans les voies de communications, les risques sont plus faibles que pendant la période classique. La plupart des niveaux de risque sont inférieurs dans la rue, à l'exception du risque moins élevé observé sur les intersections secondaires pendant la période du Ramadan.

6.4.5. Indice de risque humain durant le Ramadan à 20H (SC-7)

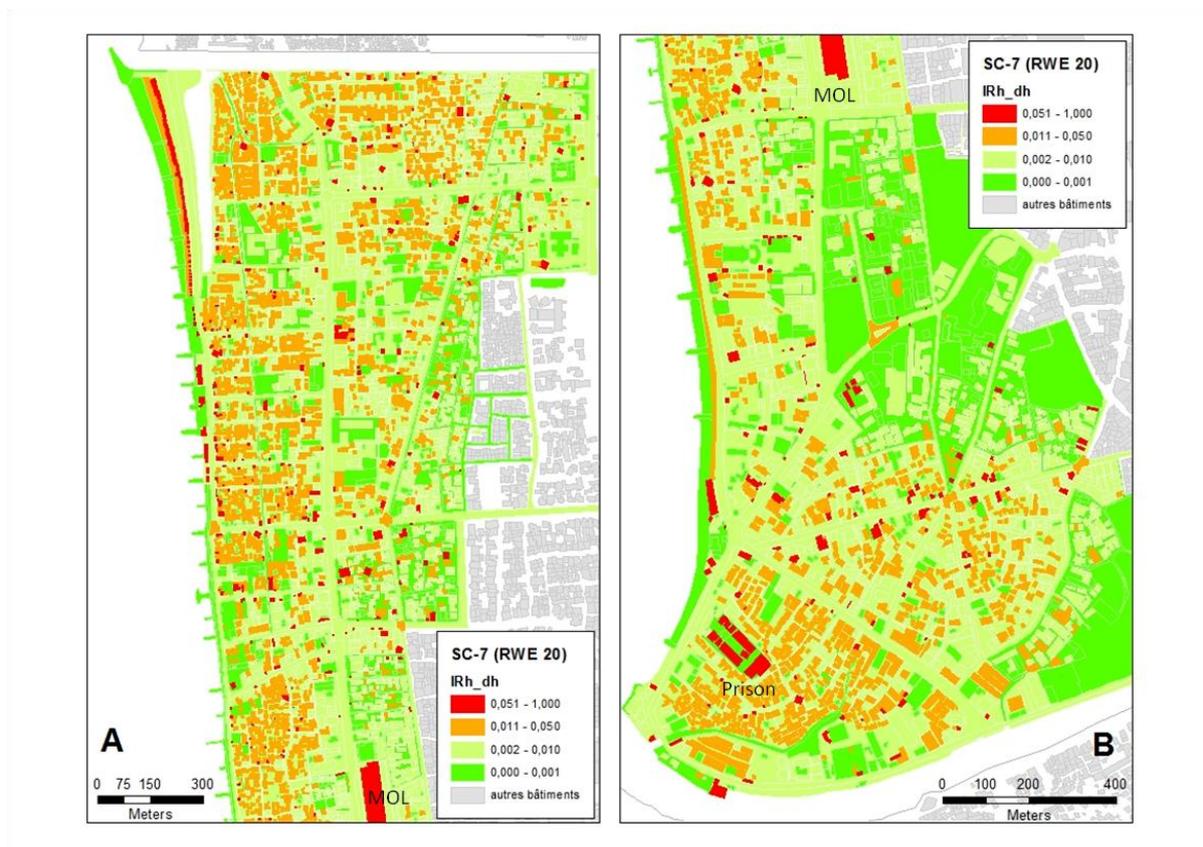


Figure 66. L'IRh le week-end, le soir à 20h pendant la période du Ramadan.

Le Ramadan est un mois sacré pour les musulmans. Ils effectuent le jeûne pendant la journée et font la prière dans la mosquée pendant la nuit. On observe que la mosquée atteint une participation maximale vers 19h-21h (Figure 66) comme chaque vendredi à 12h. Le point différent en ce qui concerne le vendredi 12h est la présence des femmes à un niveau similaire avec celui des hommes dans la mosquée. Ceci est le moment où le risque est très élevé dans la mosquée.

Les autres bâtiments ayant une forte probabilité de victimes sont le centre commercial lorsqu'une grande partie de la population fait du shopping après la rupture du jeûne. On observe également que la valeur d'IRh est encore élevée dans les restaurants et les cafés bien que le niveau de présence est moindre que vers 18h. Cependant, le risque est plus faible dans les rues. Tout type de rues a le même niveau de risque, sauf les intersections secondaires qui ont un risque moins élevé. En plein air, on n'observe également pas de risque le long de la plage. Mais le risque moins élevé est observé sur les terrasses de cafés situés à proximité de la plage.

6.4.6. Indice de risque humain durant les vacances de l'Aïd à 18h (SC-8)

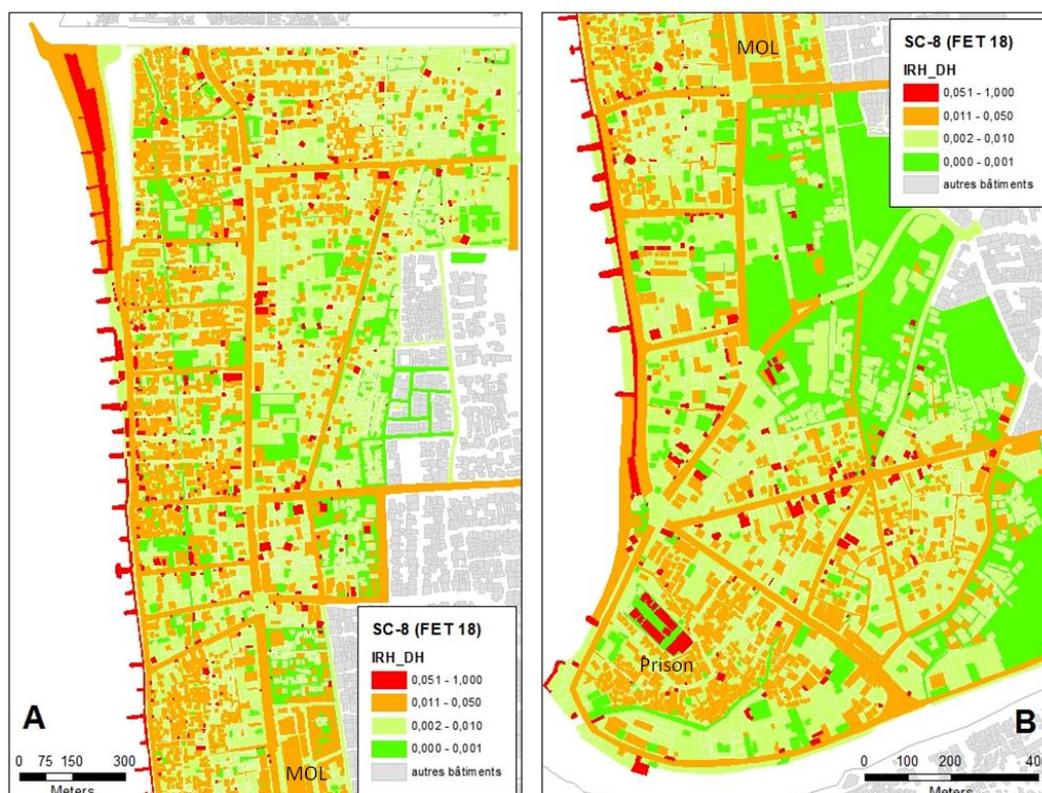


Figure 67. L'IRh pendant les vacances de l'Aïd à 18h.

L'Aïd est le moment pour célébrer « la victoire » après le jeûne pendant le Ramadan. Normalement, il y a toujours des vacances de l'Aïd pendant une semaine. Les habitants de Padang profitent de cette occasion pour s'amuser avec les familles et des amis, avec une préférence pour les abords des plages. On observe que certaines zones le long de la plage ont une forte fréquentation humaine (Figure 68), il en résulte une forte probabilité de victimes si un tsunami se déroulait à ce moment. En outre, c'est un moment où toutes les routes principales et secondaires présentent le risque le plus élevé comparé aux autres moments de l'année. Nous remarquons que les voies de communications sont en couleurs marron. A ce moment, les restaurants, les mosquées et les centres commerciaux ont un niveau de risque élevé. C'est une situation similaire à la période de week-end pour ce type de bâtiments.



Figure 68. La plage, une destination de loisir pendant les vacances de l'Aïd.

Conclusion du chapitre

Grace à la disponibilité du modèle d'inondation de tsunami, il est possible de construire la carte de probabilité de décès à Padang. En particulier, à travers une étude approfondie de la répartition spatio-temporelle des populations, nous avons pu connaître la variation de niveau de risque humain qui montre les localisations de secteurs à risque élevé contribuant aux plus fortes probabilités de concentrations de victimes.

Nous avons proposé non pas de s'intéresser à une répartition horaire « typique » des individus, représentative de n'importe quel jour de l'année, mais de choisir plusieurs scénarios de répartitions « spécifiques », correspondant à des périodes rythmant la vie de la ville ou du quartier qui décrit plusieurs distributions distinctes de population à l'échelle locale selon diverses heures, tels que les heures et jours de nuit, de travail, de prières, etc.

Les résultats obtenus montrent que la probabilité de concentration de victimes varie selon les scénarios choisis. Pendant la nuit, le risque est concentré sur les habitations. Le matin, le risque élevé se déplace sur les écoles, les bureaux publics ou privés et les hôpitaux. On observe que le risque se concentre sur la mosquée pendant le vendredi midi. En week-end à la fin de l'après midi, la forte probabilité de concentrations de victimes se disperse sur plusieurs zones autour de la plage, des restaurants et des cafés qui ont un risque élevé. La localisation du risque élevé change pendant la période du Ramadan. Le matin pendant les jours ouvrables, il n'y a aucun risque sur les écoles. Le risque se concentre sur les mosquées, les bureaux et les hôpitaux. Le week-end vers 18h pendant le Ramadan, le risque le plus élevé se concentre sur les restaurants et les cafés autour de la plage où le musulmans rompent le jeûne ensemble. Le soir pendant le Ramadan, le risque élevé s'observe sur les mosquées. Pendant les vacances de fête après le Ramadan vers 18h, la plus forte probabilité de victimes se concentre le long de la plage où les habitants de Padang profitent de cette occasion pour s'amuser en famille et entre amis.

Partie 3. Renforcement des capacités d'évacuation

La méthode et l'analyse de renforcement des capacités d'évacuation sont présentées dans les chapitres 7, 8 et 9 suivants.

Le chapitre 7 présente les méthodes d'identification des zones refuges en cas d'évacuation. Cette étape est initiée par la sélection de zone refuge (horizontale et verticale) basée sur certains critères. La méthode se poursuit en hiérarchisant des zones refuges sélectionnées afin de connaître la qualité de chaque zone refuge.

Le chapitre 8 présente une méthode de modélisation de l'accessibilité des zones refuges et de mise en place de simulations d'évacuation. Ce chapitre présente en premier lieu les facteurs qui provoquent des variations des vitesses de déplacement sur les voies utilisées. Nous avons ajouté également la prise en compte de la largeur de voie afin de moduler la vitesse de déplacement pendant l'évacuation. Une fois les vitesses de déplacements déterminées, la méthodologie repose sur la construction d'un graphe routier. Le processus d'évacuation commence depuis le point de départ en suivant le graphe routier pour atteindre le point de destination. En utilisant l'algorithme de Dijkstra (1959), il est possible de trouver le chemin le plus court et le plus rapide depuis le point de départ jusqu'au point de destination. A la fin de ce chapitre nous proposons une modélisation avec départs simultanés ou départs échelonnés des évacuations.

Le chapitre 9 montre les résultats de la modélisation avec départs échelonnés des évacuations. L'analyse de l'accessibilité des zones refuges est faite pour chaque scénario choisi afin d'identifier les problèmes pendant les évacuations. Cette analyse est illustrée avec des cartes des zones de couverture de refuge et des courbes de temps accès, et une cartographie détaillée des temps d'accès pour 3 scénarios remarquables.

Chapitre 7. Identification de zones refuges en cas d'évacuation

7.1. Définition d'une zone refuge

Comme nous avons expliqué dans le chapitre 2.4 les zones refuges sont des espaces de sécurisés. Elles sont conçues pour accueillir un groupe de personnes pour un temps indéterminé. A Padang, les zones refuges horizontales (zones topographiquement élevées) se situent très loin du rivage. Cela prend beaucoup du temps pour les rejoindre à pied en cas de situation d'urgence. En situation normale, il faut 40 minutes à pied pour les rejoindre depuis le rivage (Taubenböck et al. 2009). Par ailleurs, en considérant toutes les recommandations du FEMA (*Federal Emergency Management Agency*), et les risques d'embouteillages sur les routes, nous déconseillons toute évacuation motorisée.

Logiquement les zones refuges horizontales doivent être placées au dessus de la zone d'inondation modélisée. Dans le cadre de cette thèse, ces zones refuges sont déterminées sur points d'intersection entre la zone inondée modélisée et les réseaux routiers. Nous proposons donc de définir ces zones à proximité immédiates des voies routières pour qu'elles soient facilement accessibles. Afin d'optimiser la situation des zones refuges horizontales, il convient de déterminer la zone d'inondation modélisée. Nous avons donc choisi la zone qui a été générée lors des travaux de Imamura et al (2011). La limite d'inondation modélisée se situe à environ 1,7 km du rivage (ligne rouge sur la Figure 69). Cette zone est plus étendue que celle de (Taubenböck et al. 2009) qui est représentée en couleur bleu sur la figure suivante. Nous considérerons la différence entre ces deux limites de zones d'inondation modélisées comme la zone tampon d'évacuation. C'est une zone qui doit être libérée en cas de situation d'urgence de tsunami afin d'éviter l'incertitude de la hauteur et de l'extension d'exposition d'un tsunami.

Par ailleurs la localisation des zones refuges verticales est déterminée en considérant la zone inondée modélisé et l'Indice de Risque Humain. Les zones possédant la plus forte possibilité de victimes sont les endroits potentiels à choisir pour l'emplacement de zones refuges verticales. Ces zones sont également la localisation préférée pour les nouveaux refuges du fait de l'absence de bâtiment existant.



Figure 69. Localisation des zones refuges à Padang sur la zone inondée modélisée.

Puisque les zones refuges horizontales se situent très loin du rivage, les zones refuges verticales sont considérées comme des solutions alternatives prioritaires pour la mise en sécurité des personnes (Goseberg et al. 2014). Padang doit faire face à un risque de tsunami local, dont le temps d'évacuation sera réduit (estimé à 23 min à partir du séisme). Il ne sera donc pas possible pour la population d'évacuer vers un endroit éloigné du fait du temps d'avertissement trop limité. Ainsi, la solution à recommander est l'évacuation verticale vers le niveau supérieur des bâtiments ou des structures béton renforcées qui sont capables de résister aux effets des tsunamis (FEMA 2008). Ces bâtiments sont généralement implantés en secteur inondable afin de pouvoir sauver beaucoup de personnes. En raison de la densité de la population à Padang et du manque d'espace disponible pour construire de nouvelles installations pour l'évacuation, une option acceptable est d'utiliser les bâtiments élevés existants sur le secteur inondé (Imamura et al. 2011). Dans notre zone d'étude, nous avons identifié 32 bâtiments existants comme pouvant servir de zones refuges verticales potentielles (Tableau 14). Cette détermination a été faite sur le terrain par reconnaissance des sites en juin 2014.

Tableau 14. Zones refuges verticales potentielles.

No. Refuge	Nom refuge	Images	No. Refuge	Nom refuge	Images
1	Hôtel Mercure		17	Univ Eka sakti 2	
2	SD 03, 04, 21		18	Masjid Alwustha	
3	SD 23		19	Hôtel Axana	
4	SD 24		20	Shelter Pasar Raya	
5	Shelter Gubernur		21	SD Percobaan	
6	Plaza Andalas		22	SMP Maria	
7	Hôtel Inna Muara I		23	SD Agnes	
8	STBA Prayoga		24	Hôtel Bumi Minang	
9	Pustaka Daerah		25	Hôtel Inna Muara 2	
10	SMP Frater		26	Tee Box café	

11	Himpunan Kaluarga Li		27	Hôtel Hayam Wuruk	
12	Univ. Eka Sakti		28	Hôtel Cinnamon	
13	SMA Don Bosco		29	Masjid Nurul Iman	
14	SMP 2		30	Damar Plaza	
15	Budha Tzu Chi		31	Telkomsel	
16	SMP 4		32	SPR Plaza	

La plupart des zones refuges verticales (type école et bureau de gouvernement) sont dotées d'un toit en forme de terrasse, ce qui est favorable comme étage refuge. C'est un étage plat dont toute la surface peut être utilisée pour accueillir les personnes évacuées. Ces bâtiments sont également munis d'escaliers à l'extérieur afin de permettre aux évacués de monter au toit facilement (Figure 70).



Figure 70. Zone refuge verticale de type "école" ayant un toit destiné à accueillir les personnes évacuées.

7.2. Les critères de sélection des zones refuges verticales

Il existe certains critères à respecter pour que des bâtiments puissent être utilisés comme une zone refuge potentielle.

1. Sécurité du bâtiment

Il convient de considérer la résistance d'un bâtiment avant de déclarer le bâtiment comme une zone refuge verticale potentielle. Il doit avant tout être apte à résister au séisme et au tsunami. Le niveau de structure et de configuration détermine la résistance de chaque bâtiment. Selon le FEMA (FEMA 2008; FEMA 2012), les caractéristiques structurelles ayant un bon comportement sont : (a) système solide avec une capacité de réserve pour résister à des forces extrêmes; (b) des systèmes ouverts qui permettent à l'eau de circuler à travers avec un minimum de résistance; (c) les systèmes ductiles qui résistent à des forces extrêmes sans défaillance; (d) les systèmes redondants qui peuvent supporter une défaillance partielle sans effondrement progressif.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé une classification de la vulnérabilité des bâtiments pour choisir les zones refuges potentielles. C'est une classification de vulnérabilité de bâtiment proposé par Leone (2007) ; Leone et al. (2012) après le tsunami de 2004 en Indonésie (le détail est présenté au chapitre 3.1.2.). En prenant des critères pour les bâtiments les plus résistants (la classe D et E), les classes de sécurité des bâtiments qui pourraient faire office de refuge sont les suivantes, auxquelles on associe un score plus élevé en fonction de leur aptitude à être de bons refuges :

Résistance du bâti	Score
C	1
D	2
E	3

2. Hauteur des refuges

Afin que la zone refuge puisse remplir efficacement son rôle en tant que structure d'évacuation verticale, il convient de s'assurer que la zone de refuge sera au-dessus du niveau d'inondation maximal prévu lors du tsunami sur le site (FEMA 2012). L'altitude de la zone refuge devient un critère de qualité par rapport à la possibilité qu'un futur tsunami dépasse toutes les estimations possibles.

Basée sur les résultats du modèle de propagation numérique adopté, la hauteur maximale d'eau modélisée à Padang est de 6m (Taubenböck et al., 2009). Il en résulte donc

que les zones refuges horizontales (topographie) doivent être situées au-dessus de cette altitude. Par contre, les zone refuges verticales sont situées sur des territoires inférieurs à l'altitude 6 m. En considérant que la localisation des zones refuge doit se situer à une altitude supérieure de 30% + 3 m au dessus des *run ups* maximaux envisagés (FEMA 2008), la hauteur minimum d'un bâtiment pouvant servir de zone refuge verticale à Padang est donc de : $6m + (30\% \times 6m) + 3m = 11m$.

Le modèle d'inondation nous fournit également la variation de la hauteur d'eau pour chaque espace. La hauteur d'eau est maximum sur le territoire proche du rivage. Le niveau de l'eau diminue vers l'est, proportionnellement à la distance par rapport à la plage. Cela induit une différence de hauteur du premier étage refuge selon les zones refuges verticales. Tous les étages utilisables au dessus d'une hauteur d'eau modélisée sont considérés comme les étages refuges. Ainsi des seuils en termes d'étages déterminant la pertinence des zones refuges ont été évalués de la manière suivante :

Nombre d'étages refuge utilisables au dessus de Hmax	Score
Nb. étage = 1	1
Nb. étage = 2	2
Nb. étage >= 3	3

3. Capacité d'accueil

Afin de réduire le risque, il convient d'estimer la capacité d'accueil de chaque zone refuge verticale. Cette étape nous permet également estimer le nombre de zones refuges qui devrait être ajoutées.

Chaque zone refuge est préparée afin de pouvoir accueillir le plus grand nombre de population dans le temps déterminé. La durée de séjour dans un refuge est prévue entre 8 à 12 heures au minimum (FEMA 2008). L'espace nécessaire à une personne dans une zone refuge dépend de la durée de séjour dans le bâtiment. Plus longue est la durée d'occupation, plus grand l'espace minimum sera nécessaire par occupant pour répondre aux exigences de confort. Pour la zone refuge de tsunami, l'espace minimum recommandé est déterminé d'après la méthode de comptage de population dite « méthode Jacobs », où un espace de 10 pieds carré (0,93m²) est nécessaire par personne. C'est ainsi que nous avons calculé la capacité d'accueil de chaque zone refuge verticale, en se basant sur la superficie des étages pouvant servir pour l'évacuation.

Pour calculer la capacité d'accueil de chaque zone refuge verticale, nous avons utilisé l'équation (7) suivante (Budiardjo, 2006 ; Widyaningrum, 2009 in (Dewi 2010)).

$$TEBC = (CS * BA * NrF) / SpP \quad (7)$$

TEBC = Capacité d'accueil du bâtiment

CS = Score de capacité (%)

BA = surface du bâtiment (m²)

NrF = Nombre d'étages au dessus des eaux

SpP = Espace nécessaire per personne (0,93 m²)

Pendant une situation d'urgence, tous les types de bâtiments qualifiés comme zones de refuge verticales peuvent accueillir des personnes évacuées. Mais la capacité d'accueil de chaque bâtiment dépend aussi de sa fonction principale. Un score de capacité pour chaque bâtiment qui varie selon sa fonction principale permet de pondérer la capacité brute (TEBC). Il est déterminé par la différence d'espace libre disponible : par exemple, un magasin (MOL) peut être très encombré par des étals, un hôtel par des meubles (lits et chaises). Les règles utilisées pour calculer les scores sont les suivantes (Budiardjo, 2006 ; Widyaningrum, 2009 in (Dewi 2010)).

La fonction de bâtiment	Score de capacité
Mosquée	78%
Ecole	30%
Bureau	23.6%
Marché / MOL	23%
Hôtel	26.3%
Hall / Galerie	100%

Basée sur le calcul de capacité d'accueil de chaque zone refuge verticale, la zone refuge verticale la plus grande dans la zone d'étude peut accueillir jusqu'à 5 852 personnes, tandis que la plus réduite ne pourra accueillir que 95 personnes. La capacité totale de zone refuge verticale est estimée à 39 706 personnes. Cette capacité est inférieure à la présence minimale de populations qui est estimée à 42 057 personnes, en heures de nuit. Cette capacité d'accueil reste par ailleurs encore très éloignée de l'estimation de population présente le week-end à 18h pendant la période de Ramadan qui peut atteindre 82 420 personnes. Les classes de capacité d'accueil des bâtiments d'évacuation sont pondérées comme suit :

Description (personnes)	Score
Capacité d'accueil < 500	1
500 < capacité d'accueil < 2000	2
Capacité d'accueil > 2000	3

4. Disponibilité

Elle est définie par la possibilité d'entrer dans le bâtiment ainsi que sa pérennité au cours des années. Le choix de la disponibilité comme critère de qualité est justifié par le fait que plusieurs bâtiments ferment à certaines heures, tandis que d'autres sont toujours ouverts. Cette fermeture temporaire mais quotidienne dégrade la qualité de ces zones. C'est-à-dire que certaines sont inutilisables notamment la nuit.

Pour certaines zones refuge, l'accès vers l'étage refuge est totalement fermé pendant la nuit. Accès à l'étage refuge pour certaines zones refuges de type « école » est également fermé la nuit, mais cet étage est accessible pendant la situation de crise. Il existe une personne en charge d'ouvrir la porte pendant l'évacuation en milieu de nuit.

Les classes de disponibilité seront établies de la façon suivante :

Description	Score
Fermée la nuit	1
Incertaine	2
Pérenne et ouvert 24h/24	3

7.3. Hiérarchisation des zones refuges sélectionnées

7.3.1. Principe de hiérarchisation

Pour les territoires sensibles à un risque de tsunami local et dont les reliefs sont très loins du rivage, il est recommandé d'installer des zones refuges dans la zone potentiellement inondée par le tsunami afin de sauver des vies (FEMA 2008; FEMA 2012); (Imamura et al. 2011); (Goseberg et al. 2014). Le recours à des zones refuges verticales dans les zones d'évacuation de tsunami est fréquemment mis en avant. L'évacuation verticale constitue également une stratégie privilégiée de mise à l'abri des populations confrontées au risque tsunami au Japon, aux États-Unis ainsi qu'en Nouvelle-Zélande. Ainsi, au Japon, « À l'arrivée du tsunami généré par le séisme du 11 mars 2011 sur les côtes japonaises, environ 2 500 habitants de la ville de Kessennuma ont pu se réfugier dans les 11 bâtiments organisés pour servir d'abri en cas de tsunami (Fraser et al. 2013) ». On peut citer certaines études réalisées par Dewi (2010), Mas et al (2012), Leone et al (2012). Ces études intègrent à la fois les zones refuges verticales et les zones refuges horizontales dans la modélisation de l'accessibilité lors de l'évacuation en cas de tsunami.

Afin de classifier le niveau de qualité des différentes zones refuges, Leone et al (2012) proposent de hiérarchiser les zones refuges sélectionnées. Les différents critères de qualité

correspondent aux critères comme l'altitude des zones refuges par rapport au niveau de la mer, la capacité d'accueil des zones refuges, la disponibilité des zones refuges et la connectivité de chaque zone refuge par le nombre de connexions au réseau de voies de communication.

Dans le cadre de cette thèse, la hiérarchisation des zones refuges est appliquée uniquement pour les refuges verticaux. Nous avons considéré que toutes les zones refuges horizontales ont un niveau de qualité similaire. Comme les zones refuges horizontales sont situées à l'extérieur de la zone d'inondation modélisée, elles possèdent toute une capacité d'accueil illimitée. De plus leur disponibilité est toujours pérenne.

Chaque zone refuge verticale présente son niveau de qualité par rapport à ses caractéristiques propres. Le niveau de qualité correspond aux quatre critères précédents : sécurité du bâtiment, hauteur de zone refuge, capacité d'accueil et disponibilité. Ces critères interviennent directement dans la sélection de bâtiments appropriés afin que le processus de mise à l'abri d'un groupe de personnes soit sécurisé et que le bâtiment soit facilement accessible. Afin de hiérarchiser les zones refuges verticales, nous avons donc utilisé une pondération multi-critères avec code couleur sur une échelle de 1 à 3 :

3 point	: très bien
2 point	: bien
1 point	: correcte

A la fin du calcul de pondération, la classification finale de chaque zone refuge est construite en effectuant la somme de la pondération de chaque critère. Cette méthode de pondération multi-critères nous permet de proposer 4 classes de qualité de zone refuge à Padang.

11 – 12 points	: très bonne
9 – 10 points	: bonne
7 – 8 points	: correcte
5 – 6 points	: moyenne

7.3.2. Résultat

En se basant sur ces critères, nous avons classé les 32 bâtiments potentiels pouvant être des zones refuges verticales. Le classement final de ces zones refuges est obtenu par le calcul de la somme du score de chaque critère. Le détail du classement est présenté dans le Tableau 15 et ensuite cartographié sur la Figure 71.

Tableau 15. Hiérarchisation multi-critères des zones refuges verticales potentielles en fonction de leur qualité.

No	Nom zone refuge	Sécurité	Etage refuge	Capacité d'accueil	Disponibilité	Classement
1	Hôtel Mercure	E	3	2 878	Pérenne	12
2	SD 03, 04, 21	D	1	759	Pérenne	8
3	SD 23	E	1	419	Pérenne	8
4	SD 24	E	1	419	Pérenne	8
5	Shelter Gubernur	E	3	5 852	Pérenne	12
6	Plaza Andalas	E	2	4 330	Fermé la nuit	9
7	Hotel Inna Muara 1	E	3	1 011	Pérenne	11
8	STBA Prayoga	E	2	1 139	Pérenne	10
9	Pustaka Daerah	E	2	1 267	Incertain	9
10	SMP Frater	E	2	838	Incertain	9
11	Himpunan Kaluarga Li	E	2	385	Incertain	8
12	Univ. Eka Sakti	E	2	548	Fermé la nuit	8
13	SMA Don Bosco	E	2	545	Incertain	9
14	SMP 2	E	2	489	Incertain	8
15	Budha Tzu Chi	E	2	646	Incertain	9
16	SMP 4	E	2	402	Incertain	8
17	Univ Eka sakti 2	E	2	359	Fermé la nuit	7
18	Masjid Alwustha	E	2	754	Pérenne	10
19	Hôtel Axana	E	3	2 573	Pérenne	12
20	Shelter Pasar Raya	E	2	3 690	Pérenne	11
21	SD Percobaan	E	1	344	Pérenne	8
22	SMP Maria	E	2	799	Incertain	9
23	SD Agnes	E	2	684	Incertain	9
24	Hôtel Bumi Minang	E	5	2 828	Pérenne	12
25	Hôtel Inna Muara 2	E	4	2 036	Pérenne	12
26	Tee Box café	D	1	480	Fermé la nuit	5
27	Hôtel Hayam Wuruk	E	2	489	Pérenne	9
28	Hôtel Cinnamon	E	1	95	Pérenne	8

29	Masjid Nurul Iman	E	1	1 312	Pérenne	9
30	Damar Plaza	E	2	318	Fermé la nuit	7
31	Telkomsel	E	2	454	Fermé la nuit	7
32	SPR Plaza	E	2	554	Fermé la nuit	8



Figure 71. Indice de qualité des zones refuges verticales potentielles.

En se basant sur cette hiérarchisation, la répartition des zones refuges est la suivante : 7 zones sont classées très bonnes, 11 bonnes, 13 correctes et 1 moyenne. La capacité d'accueil de toutes les zones classifiées très bonne est de 20 868 personnes tandis que celle classés bonne est de 12 803 personnes. La capacité d'accueil totale des zones refuge classées correctes et moyennes est beaucoup plus réduite. Ensemble ces dernières classes (correcte et moyenne) possèdent une capacité d'accueil totale de 6 025 personnes sur 14 refuges. Bien qu'ils représentent environ 42% de refuges verticaux, ils sont souvent considérés comme trop petits ou peu disponibles.

Nous avons remarqué que les zones refuges verticales classées très bonnes sont inégalement réparties. Une forte concentration de ces refuges se situe dans les zones les moins exposées sur la

partie sud. Cependant ces types de refuges ne couvrent pas la zone plus exposée au sud. Sur la partie nord, la distribution spatiale des zones refuge est meilleure qu'au sud. Mais dans la partie nord, la plupart des zones refuges verticales correspondent à la classe correcte. Cette répartition pose donc un problème d'inégalité géographique de d'accessibilité aux refuges.

Les zones refuges horizontales se situent à l'extérieur de la zone inondation modélisée. L'implantation de ces zones est un peu éloignée des zones refuges verticales. Il y a donc nécessité de simuler l'évacuation en intégrant des zones refuges horizontales dans le scénario. L'intégration de ces zones dans la planification des évacuations permet d'améliorer l'accessibilité des zones refuges, notamment en cas d'indisponibilité de zones refuges verticales une fois celle-ci remplies par la population évacuée.

Conclusion du chapitre

Etant donné que la localisation des zones refuges horizontales à Padang se situe très loin du rivage, les zones refuges verticales sont considérées comme les solutions prioritaires pour la mise en sécurité des personnes. Afin de bien fonctionner comme une zone refuge, les bâtiments choisis devraient respecter certains critères. Tout d'abord la sécurité structurelle : le bâtiment doit résister aux effets du séisme et des flux hydrodynamiques. La présence d'un étage au dessus du niveau d'eau maximale modélisé est indispensable. La capacité d'accueil du bâtiment refuge doit être suffisante en regard du potentiel de population à accueillir autour du refuge vertical. Enfin la disponibilité du refuge est essentielle, car elle offre la possibilité d'entrer dans le bâtiment à tout instant ainsi que sa pérennité au cours des années.

A travers une analyse complète de ces critères, nous avons pu classifier les zones refuges verticales potentielles en fonction de leur qualité. Toutefois, la capacité totale des zones refuges verticales ne permet pas d'accueillir toutes les populations de la zone d'étude, même avec le scénario le plus faiblement peuplé. Par ailleurs, la distribution spatiale des refuges verticaux est inégale.

Chapitre 8. Mesure de l'accessibilité des zones refuges et simulation d'évacuations.

8.1. Modalités d'évacuation et critères de friction

L'utilisation des véhicules pendant le processus d'évacuation dans un territoire soumis à un risque de tsunami local n'est pas recommandé. Les probabilités de décès augmentent dans un véhicule. De plus, l'utilisation massive des véhicules provoque une saturation des voies de communication vers la zone refuge la plus proche. Un séisme de forte magnitude pourrait également endommager la route et gêner la circulation. Ce sont les raisons pour lesquelles l'évacuation en cas de tsunami doit se réaliser à pied. L'évacuation de masse à pied est très souvent le seul moyen pour la communauté d'échapper rapidement à une catastrophe naturelle. Le mouvement à pied est plus efficace dans le cas d'une évacuation rapide lors d'une courte période de temps (Bolton 2007). C'est ainsi que tous les types de voies de communications accessibles par toute la population peuvent être utilisés comme voies d'accès d'évacuation (IOC-UNESCO 2008). Les personnes évacuées doivent également éviter les passages étroits ou présentant des obstacles dans leur déplacement pour accéder aux zones de regroupement.

Afin de définir les itinéraires les plus proches et le plus rapide depuis la zone de danger vers la zone refuge, il est recommandé de calculer leur temps et distance d'accessibilité. L'accessibilité en cas de tsunami est liée à plusieurs facteurs qui provoquent des variations des vitesses et volumes de déplacements du flux d'individus. Chaque type d'accès présente plusieurs caractères qui sont : sa rugosité, ses irrégularités et ses inégalités en matière de flux de personnes. D'après Bavoux et al. (2005), l'ensemble des résistances que les accès vont imposer aux individus s'appellent les frictions. Les critères de frictions retenus en cas de tsunami selon Leone et al. (2012) sont les suivants :

- Largeur de voie ;
- Revêtement du sol ;
- Occupation des accès ;
- Pente du terrain ;
- Rétrécissements brutaux.

Largeur de voie

Pendant la situation d'urgence, la panique ne peut pas être évitée par la plupart des gens. Les personnes vont affluer dans les différentes voies de communication menant aux zones refuges. On peut imaginer que l'encombrement de la route va ralentir la vitesse de déplacement des évacués puisque chacun va essayer d'aller plus vite que les autres. Le groupe d'individus sera ralenti de façon

proportionnelle au rapport entre la largeur de voie et le nombre de personnes. Cette hypothèse, qui n'est pas forcément complètement réaliste, est intégrée dans notre modèle. Dans ce cas, la largeur de la route a été utilisée comme un facteur dans la détermination de la vitesse des évacués à pied sur le réseau. La méthode et le calcul de la variation de vitesse pédestre en fonction de la largeur sont présentés dans la partie 8.2 qui suit.

Revêtement du sol

Pendant le déplacement à pied, le type de revêtement du sol a un impact direct sur la vitesse des personnes qui l'empruntent. Les personnes prendront n'importe quel type de voie afin d'atteindre la zone refuge la plus proche. Il est possible que les personnes évacuées choisissent des itinéraires défavorables. La vitesse de déplacement ralentit sur les itinéraires de type sentier ou dans les herbes hautes. Par contre, la vitesse est optimale sur l'itinéraire urbain bitumé. On peut donc noter que la vitesse de déplacement est proportionnelle à la qualité du terrain.

Occupation des accès

L'occupation des accès peut gêner la circulation des personnes et modifier les vitesses de déplacement. Dans certaines voies de communication et pendant certains moments de la journée, la voie est occupée par d'autres activités. Par exemple, le parking occupe certaines voies de communication. C'est fréquent à Padang à cause du manque de places de stationnement. Certaines parties de voies proches du marché sont également utilisées par les commerçants pendant quelques heures. Il convient donc de tenir compte de ce taux d'occupation dans la différenciation des voies de communication, en exploitant les données sur la fréquentation horaire des lieux de vie.

Pente du terrain

Pour atteindre des terrains plus élevés, les individus doivent affronter la pente du terrain. La pente entraîne un ralentissement de la vitesse de déplacement d'un piéton. Plus la pente est importante, plus le piéton est ralenti. La vitesse possible en fonction de la pente a été évaluée par (Laghi, Cavalletti, et Polo 2006). La pente critique de déplacement pédestre en situation d'évacuation a été estimée autour de 26° (48 %) (Laghi et al. 2006) ; (Leone, Péroche, et Gutton 2014). Dans le cadre de notre étude, la pente du terrain est un facteur moins prépondérant car la topographie de la zone d'étude est relativement plate. La réduction de la vitesse avec la pente est retenue seulement pour l'accès aux zones refuges verticales.

Rétrécissement brutaux

Cela correspond aux points de passages provoquant souvent des engorgements de flux. Dans le cas de Padang, ces points correspondent aux passages entre la plage et les rues les plus proches. Nous avons remarqué également des points de rétrécissement brutaux à l'entrée des zones refuges verticales.

8.2. Mesures de vitesses de déplacement pédestre *in situ*.

L'âge est un des facteurs essentiels concernant la vitesse de déplacement à pied : les piétons âgés ont tendance à être plus lents que les plus jeunes. La vitesse à pied selon Knoblauch et al, (1996) pour les piétons plus jeunes (14 à 64 ans) est de 1,25 m/s ; pour les piétons âgés (65 ans et plus) elle est de 0,97 m/s. A part le facteur de l'âge, la vitesse de déplacement est également influencée par une variété de facteurs comme la largeur de voie, la densité et le nombre de personnes dans le groupe en déplacement (Knoblauch et al, 1996). Dans le cadre de cette thèse, l'âge des personnes localisées n'est pas connu a priori, et donc la variation de la vitesse de déplacement est déterminée seulement d'après ces autres facteurs (largeur de voie, quantité de personnes en déplacement), et des mesures *in-situ* correspondant à une variation de ces paramètres.

Afin de modéliser la vitesse de déplacement pédestre sur les différents types de voies à Padang, nous avons fait des expérimentations pendant les heures creuses (09h – 11h) et les heures pleines (17h – 18h). Les expérimentations ont été faites avec deux personnes en bonne santé en suivant les itinéraires déterminés. Les hommes se sont déplacés sur des itinéraires variant de 500 à 1300 m Figure 72). Le résultat des expérimentations est présenté sur le Tableau 16.

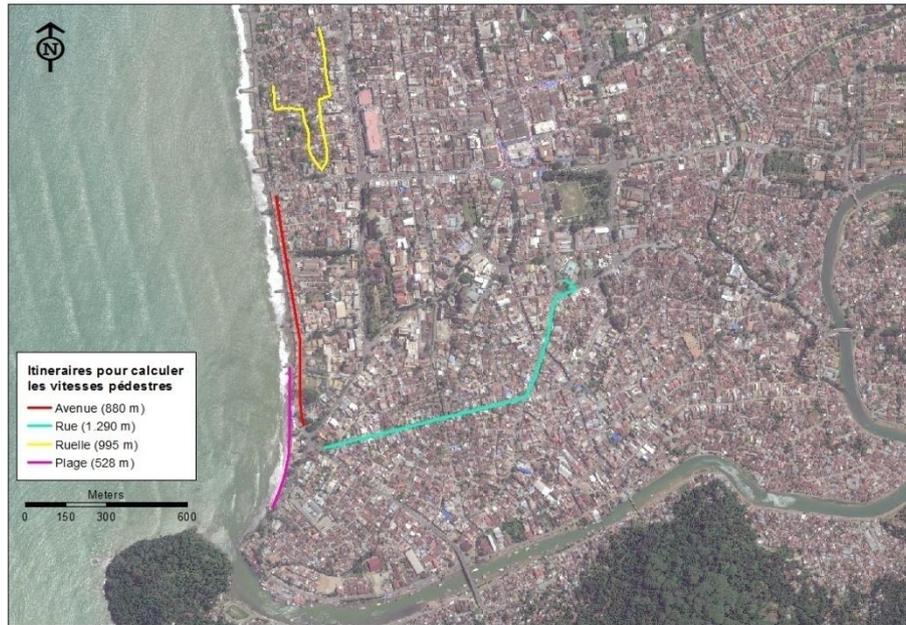


Figure 72. Itinéraires suivis pour modéliser les vitesses pédestres pendant les heures creuses et heures pleines.

Tableau 16. Vitesses pédestres établies expérimentalement ou estimées à Padang.

Type de voie	Distance (m)	Temps aux heures creuses (09h-11h)	Vitesses (m/s)	Temps aux heures pleines (18h-19h)	Vitesses (m/s)
Avenue (>12m)	880	12'13"	1,20	13'22"	1,10
Rue (3 – 8m)	1290	18'34"	1,16	19'30"	1,10
Ruelle (1 – 2m)	995	13'48"	1,20	*	0,90
Plage	528	8'35"	1,00	*	0,80
Point de congestion		*	0,5	*	0,5

* Estimations

Afin de connaître les voies de communication à Padang, nous présentons sur la Figure 73 l'illustration de typologie des routes sur laquelle les expérimentations de la vitesse de déplacement ont été calculées.

Type	Vitesse normale : vitesses aux heures creuses (en m/s)	Vitesse lente : vitesse aux heures pleines (en m/s)	Largeur de voie minimum	Revêtement au sol	Occupation de l'accès
Avenue	1,2	1,1	>12 m	Urbain	Variable
					
Remarque	Les avenues sont normalement des doubles voies goudronnées et possèdent des trottoirs. Quelques routes assez larges sont classées comme les avenues.				
Type	Vitesse normale : vitesses aux heures creuses (en m/s)	Vitesse lente : vitesse aux heures pleines (en m/s)	Largeur de voie minimum	Revêtement au sol	Occupation de l'accès
Rue	1,16	1,1	3 – 8 m	Urbain	Anthropique
					
Remarque	Les rues ont un revêtement majoritairement goudronné et sont dotées de trottoir. Beaucoup de petite commerce et véhicules occupent une partie de ces trottoirs. Cette occupation rend les trottoirs moins praticables				
Type	Vitesse normale : vitesses aux heures creuses (en m/s)	Vitesse lente : vitesse aux heures pleines (en m/s)	Largeur de voie minimum	Revêtement au sol	Occupation de l'accès
Ruelle	1,2	0,9	1 - 2 m	Urbain	Variable
					
Remarque	Les ruelles sont majoritairement goudronnées. Les ruelles sont interdites aux voitures, mais elles sont souvent utilisées par les motos. En plus d'être étroites, les ruelles sont souvent occupées par certaines activités de commerces en chariot.				

Type	Vitesse normale : vitesses aux heures creuses (en m/s)	Vitesse lente : vitesse aux heures pleines (en m/s)	Largeur de voie minimum	Revêtement au sol	Occupation de l'accès
Plage	1,0	0,8	variable	sable	pas d'occupation
					
Remarque	Sable fin ou grossier				
Type	Vitesse normale : vitesses aux heures creuses (en m/s)	Vitesse lente : vitesse aux heures pleines (en m/s)			
Point de congestion	0,5	0,5			
					
Remarque	Les points de congestion peuvent être des escaliers, des ressauts ou des rétrécissements brutaux. Les points de congestion sont essentiellement des accès aux plages et des entrées aux zones refuges (ligne bleue sur l'image à la droite)				

Figure 73. Typologie descriptive des voies de communication et les vitesses de déplacements pédestres associées (calculées et estimées) pour la modélisation.

En utilisant la vitesse pédestre issue de l'expérimentation, nous avons pu modéliser les vitesses pendant les situations d'urgence. C'est le moment où les gens se mettent à fuir ensemble pour survivre. Les routes plus larges sont plus favorables pour faire l'évacuation que les petites routes étroites. Afin de bien distinguer les différentes vitesses de déplacement sur une voie particulière, nous avons utilisé la formule de (Dewi 2010).

$C0 = W / S$	(8)	$V = (C0/C1) * Vs$	(10)
$C1 = W / S$	(9)		

V = Vitesses (m/s) pendant la situation urgence (évacuation)

C0 = Capacité de base de voie (arrondi inférieur)

$C1$ = Capacité réelle de voie pendant la situation urgence (arrondi supérieur)¹

V_s = Vitesse de déplacement pédestre expérimenté selon différents types de voie

W = largeur de voie (m)

S = Espace nécessaire par personne pendant le déplacement côte à côte 0,625 m²
(Neufert, 1999 *in* Dewi, 2010)

Afin d'estimer la vitesse de déplacement selon les différentes largeurs de voie, (Dewi 2010) utilise une approche d'espace nécessaire. Il est supposé que si les évacués marchent côte à côte dans la rue, ils ont besoin de 0,625 mètres carrés d'espace pour marcher. Ici, on montre le calcul de la vitesse de déplacement pour les différentes largeurs de voie (Tableau 17)

Tableau 17. Le calcul de la vitesse de déplacement pédestre selon la largeur de voie.

No	Largeur de voie	Capacité de base (C0)	Capacité réelle (C1)	Vitesse actuelle Heure creuse (m/s)	Vitesse actuelle heure pleine (m/s)
1	1 m	= 1/0,625 = 1,6 = 1 (arrondi inférieur)	= 1/0,625 = 1,6 = 2 (arrondi supérieur)	= 1/2 * 1,20 = 0,6	= 1/2 * 0,90 = 0,45
2	4 m	= 4/0,625 = 6,4 = 6	= 4/0,625 = 6,4 = 7	= 6/7 * 1,16 = 0,99	= 6/7 * 1,10 = 0,94
3	8 m	= 8/0,625 = 12,8 = 12	= 8/0,625 = 12,8 = 13	= 12/13 * 1,16 = 0,99	= 12/13 * 1,10 = 0,94
4	12 m	= 12/0,625 = 19,2 = 19	= 12/0,625 = 19,2 = 20	= 19/20 * 1,20 = 1,14	= 19/20 * 1,10 = 1,045

8.3. Modélisation d'évacuation pédestre et calcul de l'accessibilité au moyen de graphe.

Sur le sujet de l'évacuation urgence, il existe un grand corpus de recherches. Mais on peut le grouper en deux grands axes: (1) l'évacuation en véhicule ; (2) l'évacuation pédestre. En ce qui concerne l'évacuation pédestre, la modélisation d'évacuation est divisée en deux approches : l'une microscopique et l'autre macroscopique. Le modèle microscopique représente l'espace, le temps, et la personne au niveau le plus fin, tandis que le modèle macroscopique utilise une analogie de flux de piétons et de liquides. Dans de nombreux cas, le modèle microscopique est utilisé pour examiner les problèmes d'évacuation (Theodoulou et Wolshon 2004) car il a l'avantage de permettre de modéliser finement les caractéristiques et motivations particulières de chaque individu (âge, localisation exacte, etc.).

¹ On suppose que les personnes se serrent plus durant la situation d'urgence, et que donc l'espace nécessaire par personne est plus réduit.

Dans le contexte d'évacuation en cas de tsunami, l'objectif principal est de chercher la solution pour réduire les victimes dans la population. Cela correspond à trouver pour chaque personne la solution d'acheminement la plus faisable depuis la zone de danger jusqu'à la zone refuge. Dans la réalité, le processus d'évacuation commence depuis le point de la localisation de population (*source*) pour atteindre la zone refuge (*target*) en suivant le réseau routier.

Selon Lämmel (2011), la direction d'évacuation dépend de l'objectif d'évacuation. Les objectifs sont divisés en deux classes :

- La solution d'utilisateur optimal (*Nash equilibrium*). C'est un objectif d'évacuation qui minimise les temps de déplacements individuels. Selon cette solution, aucune personne évacuée ne peut suivre un plan d'évacuation commun à tous (Nash 1951). Chaque solution doit être personnalisée.
- La solution de système optimal (SO). C'est un objectif d'évacuation qui minimise les temps de déplacement du système ou le temps moyen de déplacement. Pour résoudre le problème de SO, il est commun d'assimiler le problème d'évacuation à un problème de dynamique de flux dans un réseau.

Généralement, une fois que la direction d'évacuation est définie, les personnes évacuées doivent respecter l'itinéraire planifié. C'est-à-dire qu'il n'est pas possible de changer la direction pendant le déplacement. Cette méthode est appelée dans la science de transport comme *day-to-day re-planning* ou *pre-trip re-planning* (Cascetta et Cantarella 1991). Au contraire, une possibilité de changer la direction pendant le déplacement est appelée route *re-planning* (plus réaliste). Préparer une route *re-planning* est plus exigeant que *pre-trip re-planning*. Cette méthode est souvent mise en œuvre par l'approche dite de « l'horizon de roulement » (Chiu et al., 2005 ; Liu et al. 2007). Dans cette méthode, la prise de décision est basée sur l'état de prévision des capacités de transport à court et moyen termes dans l'environnement des évacués. Cette approche s'utilise par exemple pour intégrer l'information issue de capteurs en temps réel sur l'état du trafic, permettant ainsi de modifier les décisions des personnes évacuées, et optimisant de telle sorte l'usage des capteurs (Vortisch, 2005 ; Flötteröd, 2008 in Lämmel 2011).

Dans leurs derniers développements, des modèles d'évacuation intègrent aussi l'aspect comportemental des personnes évacuées afin de produire un modèle plus réaliste. Le modèle le plus complexe et le plus prééminent est le modèle de force sociale proposé par (Helbing et Molnar 1995). Ce modèle conçoit que des forces attractives et répulsives déterminent le mouvement des piétons. Un autre modèle comportemental est le fait de Pan et al. (2007) qui développent une simulation d'évacuation multi-agents basée sur des paramètres physiques individuels (âge, sexe, poids) et des capacités de détection limitées (comme un angle visuel limité).

Dans cette thèse, nous avons choisi une approche macroscopique, modélisant un flux de piétons à évacuer dont on ne connaissait que la localisation précise au moment du déclenchement de la catastrophe, et pas suffisamment les caractéristiques physiologique (âge, sexe, etc.). L'approche proposée n'intègre pas un routage dynamique des personnes, car il n'existe pas de moyen de recontacter toutes les personnes durant leur évacuation pour les rediriger vers des sorties plus adaptées. Elle propose toutefois quelque chose d'assez proche avec un phasage des évacuations qui permet à chacun en fonction du moment de sa fuite et de sa situation géographique de choisir la possibilité la plus adaptée au moment. C'est donc une solution d'utilisateur optimal. Notre approche est fondée sur la recherche de plus court chemin (Algorithme de Dijkstra, 1959) sur un graphe représentant le réseau pédestre d'évacuation modélisé construit selon les réseaux routiers de la ville de Padang.

8.3.1. Construction du graphe routier

En cas d'évacuation, le réseau routier peut être simplifié en utilisant la théorie de graphe (Hamacher et Tjandra, 2001). Le réseau routier est transformé en graphe c'est-à-dire un objet mathématique composé de sommets et d'arcs ($G = \mathcal{N}, \mathcal{A}$). Les sommets (\mathcal{N} = les points) peuvent être associés aux nœuds du réseau, et les arcs (\mathcal{A} = liaisons entre les points) sont associés aux tronçons routiers (Lämmel, 2011). Ce processus d'évacuation peut être décrit dans le schéma suivant.

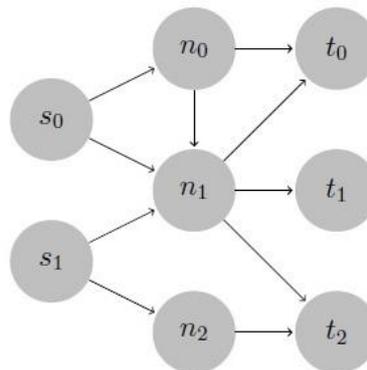


Figure 74. Schéma de réseau d'évacuation (extrait de Lämmel, 2011).

En suivant le schéma, les personnes évacuées partent depuis les nœuds de départ s_0 et s_1 (source). Ils suivent les chemins liés entre les nœuds intermédiaires n_0 , n_1 et n_2 . A la fin du processus, les personnes évacuées atteignent les nœuds de destination t_1 , t_2 et t_3 (target). Ils cherchent le chemin le plus proche depuis le nœud de départ jusqu'au nœud de destination. Ce chemin est déterminé selon la théorie des graphes.

Dans la littérature, il existe de nombreux algorithmes de recherche de plus courts chemins dans un graphe. C'est l'algorithme de Dijkstra (1959) qui a été utilisé dans notre modélisation. Afin de réaliser la modélisation d'accessibilité, cette application nécessite la création et la configuration de la base de données à partir des données géographiques disponibles :

- **Les points de départs.** Ces points sont les endroits de la zone inondée modélisée où les personnes sont localisées (chaque bâtiment, zone de plein air et voies de communication). Ces données géographiques proviennent du repérage et de la vectorisation de chaque espace. Dans cette thèse, ces données sont également validées pendant la diagnostique sur le terrain (le détail est présenté dans le chapitre 4 partie 4.2.3). Une localisation fine de points de départs nous permet de calculer un meilleur temps de parcours pour atteindre la zone refuge sélectionnée pour chacun de ces endroits.
- **La quantité de population exposée.** Basée sur la base de données de répartition spatio-temporelle de population dans la zone d'étude, nous pouvons estimer le nombre de personnes à évacuer et leur localisation heure par heure (le détail est expliqué dans le chapitre 5). Cette représentation nous permet une meilleure visualisation de la donnée démographique. Afin de proposer une modélisation réaliste, notre simulation est effectuée pour 8 types de répartition spatio-temporelle de la population correspondant aux 8 scénarios choisis et discutés dans le chapitre 6.
- **Le graphe routier.** Le réseau routier et pédestre utilisé pour la modélisation provient du repérage et de la vectorisation des voies. Il existe 6 classes de voies dans laquelle nous avons renseigné des vitesses de déplacement pédestre pendant les heures creuses et les heures pleines : avenue, rue, rue résidentielle, ruelle, plage, point de congestion.
- **Les points d'arrivée.** Dans notre modèle d'accessibilité pédestre, nous avons déterminé 32 bâtiments comme étant des zones refuges verticales potentielles. Ce modèle intègre également 5 zones refuges horizontales situées à l'extérieur de la zone inondée modélisée (voir le chapitre 7 pour le détail), espacées de 500 m à 700 m (soit 10 min à pied) les unes des autres le long d'un front non inondable parallèle à la côte.
- **Les vitesses de déplacement pédestres :** Ces données proviennent des vitesses expérimentées à Padang qui varient suivant le type et la largeur de voie (voir le chapitre 8.2 pour plus de détail).

Dans le cadre de cette thèse, la construction de graphe routier et la modélisation de l'accessibilité d'évacuation sont effectuées en utilisant le logiciel PostgreSQL. C'est un DBMS (*Database management system*) qui peut stocker et traiter les données. De plus, pour être en mesure de stocker des données spatiales, PostgreSQL nécessite le plugin supplémentaire appelé

PostGIS. PostGIS a un rôle en tant que fournisseur de services spatiaux pour le DBMS, rendant ainsi PostgreSQL spatio-compatible.

La première étape de la construction du graphe routier consiste à charger le fichier SIG du réseau routier (voie_access_32747.shp) sur la base de données PostgreSQL 9.4. Le fichier *shp* contient les informations concernant le type de voie, largeur, revêtement, occupation, vitesse pédestre pendant les heures creuses et les heures pleines. Le réseau des voies a été vectorisé par photo interprétation de d'une image satellitaire géo-référencée, et ensuite rectifié et enrichi avec des mesures sur le terrain (largeur des voies, type de revêtement, type de voie).. Les photo-interprétations sont prises sur certaines voies afin de valider les informations. Nous avons ensuite nommé ce réseau routier dans la base de données PostgreSQL « raw_data.voie_access_32747 ». Cette table de données est également la donnée d'entrée pour la création du graphe.

La construction de graphe nécessite l'installation de l'extension *postgis_topology* sur la base de données. Afin d'exécuter nos propres requêtes SQL, les syntaxes sont les suivantes :

```
create extension postgis_topology
select topology.CreateTopology('voies', 32747)
create table voies_line (id integer);
select topology.addTopoGeometryColumn('voies', 'public',
'voies_line', 'topogeom', 'MULTILINESTRING')
insert into voies_line (id, topogeom)
select ogc_fid, topology.toTopoGeom(wkb_geometry, 'voies', 1)
from raw_data.voie_access_32747;
```

Ce qui a été créé est stocké dans le schéma **voies** dont le contenu est la **table voies.edge, voies.face, voies.node et voies.relation**. **Voies.edge** est une table qui présente les arcs des graphes avec les nœuds entrants et sortants (des Segments) (Figure 75). **Voies.node** montre les nœuds (des Points). **Voies.relation** permet de faire la jointure entre les arcs du graphe et les objets routiers initiaux (Figure 76). Dans la table **voies.relation**, layer_id=1 correspond aux données du réseau routiers initial « raw_data.voie_access_32747 ». De plus, la colonne topogeo_id correspond à l'identifiant de la route dans « raw_data.voie_access_32747 ». La colonne element_id correspond à l'arc du graphe, et fait la jointure avec edge_id de la table **voie.edge** (Figure 76). Tout ce que nous avons fait est représenté dans la Figure 77.

	edge_id [PK] serial	start_node integer	end_node integer	next_left_edge integer	abs_next_left_edge integer	next_right_edge integer	abs_next_right_e integer	left_face integer	right_face integer	geom geometry(LineStr
1	1	1	20	16	16	1678	1678	145	449	0102000020EB7FC
2	2	3	419	-333	333	-304	304	329	228	0102000020EB7FC
3	3	5	540	-466	466	-1650	1650	447	445	0102000020EB7FC
4	4	7	757	756	756	-22	22	0	0	0102000020EB7FC
5	5	8	594	-525	525	-1637	1637	434	407	0102000020EB7FC
6	6	10	1260	-1718	1718	10	10	465	428	0102000020EB7FC
7	7	12	1084	1376	1376	-339	339	311	53	0102000020EB7FC
8	8	4	586	517	517	-171	171	91	140	0102000020EB7FC
9	9	14	899	1008	1008	-374	374	419	164	0102000020EB7FC
10	10	10	1113	1448	1448	-779	779	428	97	0102000020EB7FC
11	11	16	363	279	279	-1410	1410	134	335	0102000020EB7FC
12	12	11	807	855	855	-13	13	119	77	0102000020EB7FC
13	13	19	11	12	12	21	21	119	77	0102000020EB7FC
14	14	20	2	-14	14	-426	426	120	120	0102000020EB7FC
15	15	19	507	426	426	13	13	449	119	0102000020EB7FC

1743 lignes.

Figure 75. Les données voie.edge_data du graphe routier dans PostgreSQL.

	node_id [PK] serial	containing_face integer	geom geometry(Point,32747)
1	1		0101000020EB7F0000D0CCCC4C9EE22341431CEB0882DF6241
2	2		0101000020EB7F000056302A29A0E32341F2B050A584DF6241
3	3		0101000020EB7F0000181DC9E5C1DB2341BEC117CCE5DF6241
4	4		
5	5		
6	6		
7	7		
8	8		
9	9		
10	10		
11	11		
12	12		
13	13		
14	14		
15	15		

1272 lignes.

	topogeo_id integer	layer_id integer	element_id integer	element_type integer
1	1	1	1	2
2	2	1	2	2
3	3	1	3	2
4	4	1	4	2
5	5	1	5	2
6	6	1	6	2
7	7	1	7	2
8	8	1	8	2
9	9	1	9	2
10	10	1	10	2
11	11	1	11	2
12	12	1	12	2

3489 lignes.

Figure 76. Les données de voie.node et voie.relation.

situations : les nœuds qui sont considérés comme point de départ et les noeuds points d'arrivée. Dans le cadre de cette thèse, les noeuds de départ sont les noeuds qui se trouvent dans la "rue" dont la position est plus proche de la position des personnes dans la zone d'étude. C'est-à-dire les nœuds les plus proches de chaque bâtiment, zone de plein air où bien voie de communication. Sinon, les nœuds d'arrivée sont les nœuds les plus proches des zones refuges verticales et horizontales.

Pour préparer les données routage dans le DBMS, Il faut créer une table ayant la structure d'*edge_node*. Cette structure représente le nœud de départ, le nœud d'arrivée et le coût de transport (temps) pour traverser les deux nœuds. De plus, elle décrit spatialement la localisation de ces nœuds. La commande SQL suivante est créée pour exécuter la création de table avec un ensemble de données réseau. Le résultat de la création de la table peut être représenté comme le schéma dans la Figure 78.

```
create table graphe_routier (  
    id serial,  
    dir character varying,  
    source integer,  
    target integer,  
    cost double precision,  
    reverse_cost double precision,  
    x1 double precision,  
    y1 double precision,  
    x2 double precision,  
    y2 double precision,  
    the_geom geometry  
);
```

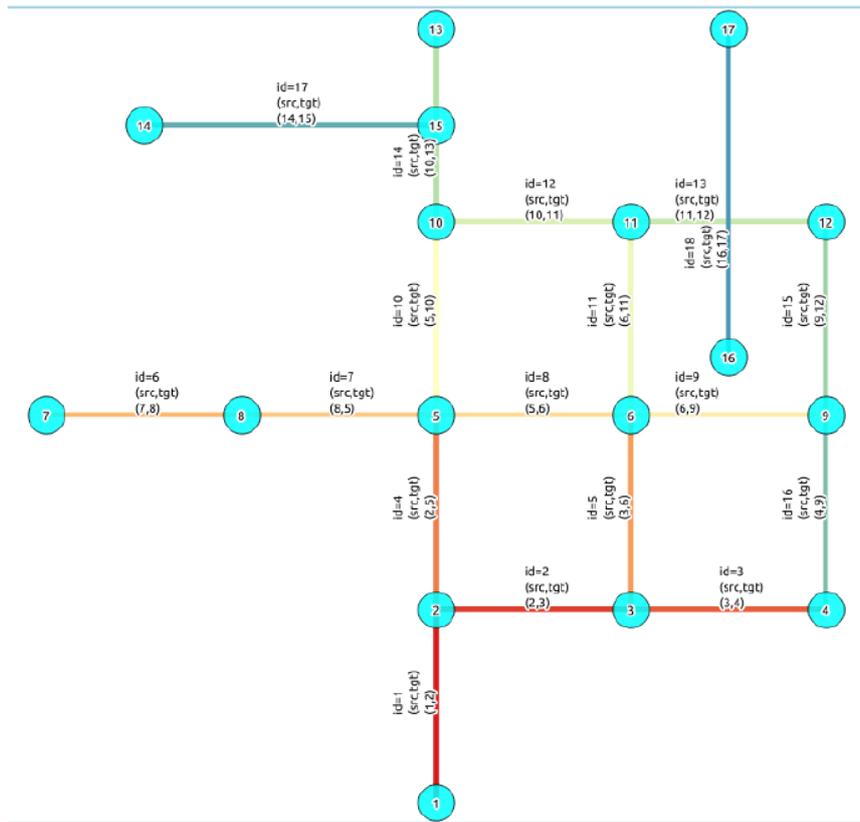


Figure 78. Le schéma du réseau créé en structure d'arc_noeud (extrait du manuel de Pg_routing).

8.3.3. Utilisation de l'algorithme de Dijkstra (a-star)

Une adaptation de l'algorithme de plus court chemin de Dijkstra existe sous l'appellation A* (Russell et Norvig 1995), A* (prononcé "A Etoile"). Cet algorithme A* améliore considérablement le calcul du coût. Comme cet algorithme est basé sur une approche heuristique, un meilleur coût par rapport à l'algorithme de Dijkstra ne peut pas être garanti (Lefebvre et Balmer 2007). L'algorithme A* permet de résoudre la plupart des problèmes de plus court chemin par l'évaluation de seulement un sous-ensemble du graphe général. Il retourne un ensemble de lignes *pgr_costResult* (seq, id1, id2, cost), correspondant à l'ensemble des couples de nœuds qu'il faut traverser avec le coût correspondant de l'arc (cost), et dont la composition forme le chemin le plus court recherché.

Pour tester cet algorithme, nous pouvons chercher le chemin le plus court (Figure 79) entre le nœud 1206 (départ) et le nœud 1217 (arrivée). La requête SQL suivante est utilisée afin de trouver le meilleur chemin dans la table *graphe_routier*.

```
select seq, id1 as node, id2 as edge, cost
from pgr_astar(
  'select id, source, target, cost, x1, y1, x2, y2 from
  graphe_routier', 1206, 1217, false, false
);
```

Le résultat dans le panneau de sortie nous donne les informations de nœuds (*node*) et d'arc (*edge*) empruntés. La valeur (-1) dans la colonne *edge* (arc) est le terminus.

seq	node	edge	cost
0	1206	1630	23.9795421322745
1	645	594	21.073466270202
2	464	592	54.7566971471487
3	1246	1689	25.9683704740253
4	679	643	40.1373118945286
5	1224	1661	31.0758455592937
6	436	1654	203.721018375267
7	1217	-1	0

Le coût (*cost*) de transport est exprimé *en temps de parcours* (longueur de chaque arc routier emprunté divisé par la vitesse de déplacement à pied des populations, suivant que l'on soit en heure creuse ou pleine). Ce test nous montre que le chemin choisi est celui qui est représenté par les nœuds d'étoiles rouges (Figure 79). Même s'il y a d'autres chemins, cet algorithme a bien choisi le chemin le plus rapide depuis le nœud de départ et le nœud d'arrivée. Le coût total depuis le nœud 1206 jusqu'au nœud 1217 = 23.98 + 21.07 + 54.76 + 25.97 + 40.14 + 31.08 + 203.72 = 400.72 secondes (soit 6 minutes 40.72 secondes).

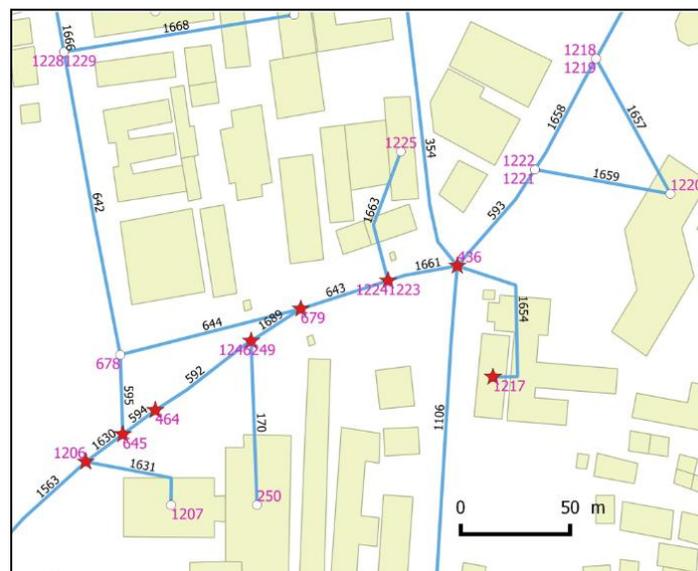


Figure 79. Le chemin depuis le nœud 1206 jusqu'au 1217 en suivant les nœuds en étoile rouge.

8.4. Application à l'étude de l'accessibilité pédestre de Padang.

En réalité pendant l'évacuation, le temps de parcours dépend du niveau de congestion. Toutefois, la solution de l'algorithme de plus court chemin ne tient pas compte de l'encombrement de la route pendant l'évacuation (Lämmel, 2011) *a priori* puisque le coût de déplacement sur chaque arc est fixé avant de lancer l'algorithme. Dans la simulation de la circulation, chaque voie a une

capacité d'écoulement spécifique. Le temps de déplacement sur une voie dépend de la capacité du flux et du niveau de congestion. Puisque la demande sur une voie n'est pas constante dans le temps, le temps de déplacement sur la voie est dépendant du temps.

Afin de tenir compte de l'encombrement dans la modélisation, nous avons donc proposé deux types de vitesse de déplacement pédestre. C'est la vitesse pédestre pendant les heures creuses et les heures pleines. La vitesse en heure creuse est appliquée si la somme de population sur la route est inférieure à 75% de sa capacité maximale habituelle à l'heure d'arrivée du tsunami. C'est une capacité maximum de la fréquentation humaine que la rue atteint habituellement, quelque soit la période ou le jour de la semaine. Il s'agit en effet de pouvoir basculer en heure pleine lorsque les arcs sont encombrés à hauteur de 75% de la population maximale pouvant s'y trouver lors de la simulation.

L'algorithme de recherche de plus court (et donc rapide ici) chemin peut opérer entre les nœuds du réseau viaire et produire la séquence des arcs routiers à emprunter pour chaque couple (départ, arrivée) ainsi que le coût que l'on calcule en temps de parcours, en secondes. Cependant, les bâtiments et les refuges ne sont pas tous directement implantés sur le réseau, il faut sélectionner les nœuds les plus proches du départ (du bâti, de la zone de plein air et de la voie) ainsi que de la destination (le refuge). Il convient également rajouter la distance d'accès au réseau depuis le bâtiment, et depuis le refuge. La sélection de ces nœuds peut se faire en utilisant un tampon de rayon 200 mètres autour de chaque cible. Pour chaque couple (objet, refuge) il y a ainsi un certain nombre de couples de nœuds à tester. Il ne faut pas oublier d'y ajouter la distance de déplacement à pied vers le nœud d'accès (on prend alors une distance euclidienne simple à « vol d'oiseau » ou « à travers champs »). Ce processus peut être simplifié sur la Figure 80. Les individus situés dans le bâti « s » font l'évacuation vers le refuge « t ». Ils empruntent le chemin qui s'étend sur les nœuds n_1 , n_3 et n_4 . Donc le coût de transport total est la somme de coût sur les arcs (depuis n_1 , jusqu'à n_4) et du coût euclidien (le coût depuis le bâti « s » jusqu'à n_1 , plus le coût depuis n_4 jusqu'au refuge « t »). Nous avons utilisé la vitesse moyenne de 1,1 m/s pendant le déplacement depuis le bâti « s » au nœud le plus proche.

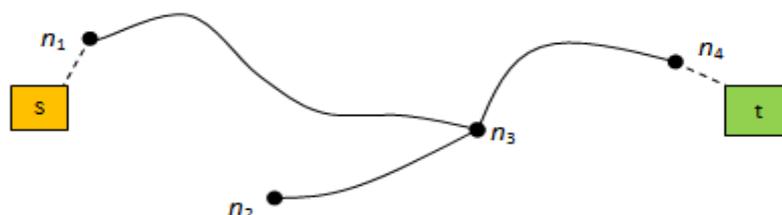


Figure 80. Le processus de cheminement depuis le point de départ jusqu'au point d'arrivée.

Dans notre étude, l'algorithme d'évacuation opère avec un départ programmé suivant l'heure et la période du scénario du tsunami. Nous proposons deux modèles d'évacuation en fonction du départ des personnes évacuées : évacuation simultanée et évacuation échelonnée. Pour l'évacuation simultanée, les objets se vident instantanément alors que dans la modèle d'évacuation échelonnée, le départ de l'objet est programmé plusieurs fois afin de permettre aux personnes évacuées de réagir de façon réaliste avec un départ échelonné sur une période de 5 minutes des lieux où ils se trouvent pour trouver les refuges disponibles. Toutefois, notre étude ne prend pas en considération le comportement des personnes évacuées dans la modélisation de l'évacuation échelonnée (en particulier en fonction de leur âge). Le comportement aurait pu être modélisé au niveau des vitesses de déplacement, en les faisant varier suivant l'âge des personnes, leur tranche d'âge étant évaluée en fonction de probabilités liées aux lieux et heures occupées

8.4.1. Création des chemins possibles et de l'évacuation résultante

Comme notre explication précédente l'indique, le processus d'évacuation consiste à demander à la population de chercher le chemin le plus rapide depuis leur position actuelle jusqu'à la zone refuge. Afin de réaliser cet objectif, il convient de créer une table chemin.

```
create table chemin (  
    identifiant serial,  
    objet_id integer,  
    type_objet character varying(10),  
    noeud_depart integer,  
    vide boolean,  
    refuge_id integer,  
    noeud_destination integer,  
    disponible boolean,  
    cout_net float,  
    cout_euclid float,  
    total_cost float,  
    path pgr_costResult[]  
);
```

Voici la signification des champs :

- **Objet_id** : c'est l'identifiant de la localisation des personnes ;
- **Type_objet** : le type des espaces de la localisation des personnes (bâti, plein_air et voie de communication) ;
- **Nœud_départ** : le nœud le plus proche de l'objet ;
- **Vide** : c'est une condition exprimant le départ. Il faut mettre « **false** » dans la table d'attributaire si l'objet n'est pas vide ;
- **Refuge_id** : c'est l'identifiant de zone refuge ;
- **Nœud_destination** : le nœud le plus proche de la zone refuge ;

- **NonRemplit** : c'est une condition exprimant le niveau de remplissage de la zone refuge. Il faut mettre « **true** » dans la table d'attributaire si la somme de personnes dans le refuge n'atteint pas la capacité d'accueil maximale, et « **false** » pour le contraire ;
- **Cout_net** : c'est une représentation du coût en temps de déplacement sur le graphe. Il calcule le temps de parcours à pied depuis le nœud de départ jusqu'au nœud d'arrivée ;
- **Cout_euclid** : c'est un coût de déplacement hors du réseau. C'est-à-dire la somme du temps de parcours à pied depuis l'objet jusqu'au nœud de départ et du temps parcouru depuis le nœud de destination jusqu'au refuge ;
- **Total_cost** : Total_cost représente le temps total (somme des cout_net et cout_euclid) ;
- **Path** : c'est le chemin emprunté depuis l'objet jusqu'au refuge. Cette colonne contient des informations sur l'ensemble des nœuds et arcs empruntés, également le temps de parcours pour chaque séquence.

Il faut ensuite calculer les chemins les plus courts entre les couples (nœuds départ, nœuds arrivée) pour chaque objet non vide vers chaque refuge nonRemplit, pour remplir la table chemin en utilisant les paramètres d'entrée de l'algorithme. Ces entrées sont lues ou calculées depuis des tables qui ont été stockées dans le schéma « padang ». Les données nécessaires pour calculer les chemins sont les suivantes :

1. la classe de jour d'arrivée du tsunami
2. l'heure d'arrivée du tsunami
3. la taille du buffer de sélection des nœuds proches des cibles (200m)
4. les vitesses de déplacement en heures creuses ou pleines sur les arcs
5. la population présente dans chaque objet à l'heure de déclenchement de l'évacuation
6. la zone refuge qui peut accueillir les personnes évacuées
7. le maximum d'encombrement observé sur chaque arc habituellement. Lorsque l'arc sera encombré à hauteur de 75% de cet encombrement, on passe alors en heures pleines.

Dès que les données sont prêtes, la requête SQL suivante nous permet de remplir la table chemin depuis tous les point de départ (bâtiments) jusqu'aux zones refuges. La table est initialisée, avec tous les bâtiments à évacuer et tous les refuges à atteindre, et un tampon spatial de 200 mètres autour d'eux pour attraper les nœuds du graphe routier accessibles. Il faut également chercher le chemin depuis les espaces de plein air et voies de communication en changeant les paramètres d'entrée.

```

insert into chemin (type_objet, objet_id, noeud_depart, vide,
refuge_id, noeud_destination, nonremplit, cout_euclid)
select 'bati', b.ogc_fid, v1.node_id, false, r.ogc_fid, v2.node_id,
true, (st_distance(b.wkb_geometry, v1.geom) + st_distance(r.wkb_geometry,
v2.geom)) * 1.1
from raw_data.bati_1 b, voies.node v1, raw_data.zone_refuge r, voies.node v2
where st_Dwithin(b.wkb_geometry, v1.geom, 200) and st_Dwithin(r.wkb_geometry,
v2.geom, 200) ;

```

La taille de chemin est en effet un frein à la mise en place d'un algorithme efficace. Il vaut mieux réduire le nombre de combinaisons à tester. La méthode compute_chemins() permet de calculer les meilleurs chemins possibles entre les couples de nœuds définis dans la table chemin.

```

CREATE OR REPLACE FUNCTION compute_chemins()
RETURNS void AS $BODY$
DECLARE
BEGIN
    RAISE NOTICE 'Début compute_chemins ';
    update chemin c set cout_net = k.cout_net, total_cost = k.cout_net + c.cout_euclid,
    path = un_chemin
    from (
        select sum(cost) as cout_net, array_agg((seq, id1, id2, cost)::pgr_costResult)
        as un_chemin, d as noeud_depart, a as noeud_destination
        from (
            select noeud_depart as d, noeud_destination as a, (truc).seq,
            (truc).id1, (truc).id2, (truc).cost
            from (
                select couples.noeud_depart, couples.noeud_destination,
                pgr_astar('select id, source, target, cost, x1, y1, x2, y2 from
                graph_routier', couples.noeud_depart,
                couples.noeud_destination, false, false) as truc
                from (SELECT distinct noeud_depart, noeud_destination FROM
                chemin WHERE vide is false and nonremplit is true and
                noeud_depart <> noeud_destination) as couples
            ) as toto
        ) as g group by d, a
    ) as k
    where c.noeud_depart = k.noeud_depart and c.noeud_destination = k.noeud_destination;

    RAISE NOTICE 'Fin compute_chemins ';
END;
$BODY$ LANGUAGE plpgsql;

```

Après avoir exécuté la requête compute_chemin (), PostgreSQL n'enregistre que cette requête. Il ne fournit aucun résultat à ce moment. Afin de pouvoir mettre à jour la table chemin, il faut appeler cette requête en utilisant la commande suivante :

```

select public.compute_chemins()

```

Sur notre machine (type : Windows7 avec des systèmes d'exploitation 64 bits ; RAM : 8,00 GB ; CPU : Intel(R) Xeon(R), la durée totale d'exécution de la requête est de 83 897 ms (soit 83 secondes).

8.4.2. Evacuation simultanée.

C'est un modèle d'évacuation classique. Dans les sciences du transport, on soutient souvent que la représentation statique est adéquate pour représenter les conditions qui se produisent pendant l'heure de pointe (Lämmel, 2011). Cependant ce modèle ne décrit pas la réalité du processus d'évacuation. Elle permet d'évaluer l'accessibilité « brute » des zones refuges. Dans le modèle simultané, les algorithmes d'évacuation ne jouent qu'une seule fois. Dès la première minute, c'est 100% de l'objet qui est évacué. Toutes les populations font l'évacuation en même temps.

Nous avons quand même réalisé ce modèle afin de bien faire la distinction avec le modèle échelonné. Avoir exécuté `compute_chemin()`, initialise la table chemin qui est nécessaire à la modélisation d'évacuation simultanée. Pour exécuter ce modèle, il faut d'abord créer la table d'évacuation dans DBMS PostgreSQL. La table évacuation permet de faire le bilan à chaque étape de l'algorithme des calculs de plus court chemin.

```
create table evacuation (
    pas_t integer,
    refuge_id integer,
    objet_id integer,
    saved_pop_of_object float,
    chemin pgr_costResult[],
    objet_type character varying(10),
    temps_parcours float,
    classes_jours character varying(3),
    heure time
);
```

La procédure `compute_evacuation_simple` met à jour la relation évacuation, après avoir initialisé le `graphe_routier` comme expliqué précédemment, et calcule le chemin minimal à emprunter entre chaque espace (bâti, plein_air et voie de communication) et chaque refuge, puis évalue pour chaque espace quel est le meilleur chemin vers l'ensemble des refuges accessibles, et enregistre alors ce choix comme évacuation.

```
CREATE OR REPLACE FUNCTION compute_evacuation_simple(classe_jour CHARACTER VARYING, tsunami_hour
CHARACTER VARYING)
RETURNS void AS $BODY$
/*
Cette fonction met à jour la relation d'évacuation sur Padang
*/
DECLARE
    couples RECORD;
    un_chemin pgr_costResult[100];
    un_temps_acces float;
    best_choice RECORD;
    bati integer;
    plein_air integer;
    voie integer;

BEGIN

    RAISE NOTICE 'Calling compute_evacuation avec les paramètres classe_jour (%)
    tsunami_hour (%) ', classe_jour, tsunami_hour ;

    -- Mettre à jour les coûts de déplacement sur les arcs du graphe routier
    update graph routier set cost = st_length(the geom)/heure creuse where current pop<
```

```

max_pop*0.75;
update graph_routier set cost = st_length(the_geom)/heure_pleine where current_pop>=
max_pop*0.75;

-- Pour chaque objet (bati, voie, zone de plein-air)
FOR bati in select distinct objet_id from chemin where total_cost is not null and
type_objet='bati' LOOP
    RAISE NOTICE 'Analyse du bati (%)', bati;
    -- Sélectionner le refuge dont le cout de transport est minimum pour cet objet.
    select refuge_id, k.objet_id, total_cost, path from chemin c,
    (select min(total_cost) as temps_minimum, objet_id from chemin where objet_id=bati
    and total_cost is not null group by objet_id ) as k
    where total_cost = k.temps_minimum and k.objet_id=bati and c.objet_id = bati
    LIMIT 1 into best_choice;

    RAISE NOTICE 'Enregistrer le meilleur chemin du bati (%)', bati;
    insert into evacuation (refuge_id, objet_id, saved_pop_of_object, chemin,
    objet_type, temps_parcours, classes_jours, heure)
    (select best_choice.refuge_id, best_choice.objet_id, rb.nbpop, best_choice.path,
    'bati', best_choice.total_cost, classe_jour, tsunami_hour::time)
    from public.repartition_spatio_temporelle_bati_all rb
    where rb.idbati=bati and rb.heure=tsunami_hour::time and
    rb.classes_jours=classe_jour );
END LOOP;

FOR plein_air in select distinct objet_id from chemin where total_cost is not null and
type_objet='plein_air' LOOP
    RAISE NOTICE 'Analyse du plein_air (%)', plein_air;
    -- Sélectionner le refuge dont le cout de transport est minimum pour cet objet.
    select refuge_id, k.objet_id, total_cost, path from chemin c,
    (select min(total_cost) as temps_minimum, objet_id from chemin where objet_id=
    plein_air and total_cost is not null group by objet_id ) as k
    where total_cost = k.temps_minimum and k.objet_id= plein_air and c.objet_id =
    plein_air LIMIT 1 into best_choice;

    RAISE NOTICE 'Enregistrer le meilleur chemin du 'plein_air (%)', bati;
    insert into evacuation (refuge_id, objet_id, saved_pop_of_object, chemin,
    objet_type, temps_parcours, classes_jours, heure)
    (select best_choice.refuge_id, best_choice.objet_id, rb.nbpop, best_choice.path,
    'bati', best_choice.total_cost, classe_jour, tsunami_hour::time)
    from public.repartition_spatio_temporelle_plein_air_all rb
    where rb.idair=plein_air and rb.heure=tsunami_hour::time and
    rb.classes_jours=classe_jour );
END LOOP;

FOR voie in select distinct objet_id from chemin where total_cost is not null and
type_objet='voie' LOOP
    RAISE NOTICE 'Analyse du bati (%)', voie;
    -- Sélectionner le refuge dont le cout de transport est minimum pour cet objet.
    select refuge_id, k.objet_id, total_cost, path from chemin c,
    (select min(total_cost) as temps_minimum, objet_id from chemin where objet_id= voie
    and total_cost is not null group by objet_id ) as k
    where total_cost = k.temps_minimum and k.objet_id= voie and c.objet_id = voie
    LIMIT 1 into best_choice;

    RAISE NOTICE 'Enregistrer le meilleur chemin du voie (%)', voie;
    insert into evacuation (refuge_id, objet_id, saved_pop_of_object, chemin,
    objet_type, temps_parcours, classes_jours, heure)
    (select best_choice.refuge_id, best_choice.objet_id, rb.nbpop, best_choice.path,
    'voie', best_choice.total_cost, classe_jour, tsunami_hour::time)
    from public.repartition_spatio_temporelle_voie_all rb
    where rb.idvoie=voie and rb.heure=tsunami_hour::time and
    rb.classes_jours=classe_jour );
END LOOP;

END;
$BODY$ LANGUAGE plpgsql;

```

Afin de pouvoir mettre à jour la table évacuation, il faut appeler cette fonction en utilisant la requête suivante, qui prend en paramètre la classe de jour et l'heure de la simulation pour adapter les quantités de population à évacuer de chaque zone :

```
select public.compute_evacuation_simple('L-J', '02:00');
```

La durée totale d'exécution de cette requête est de 8 945 742 ms (soit 2 heures, 29 minutes, 5 secondes). Le résultat dépend aussi du scénario passé en paramètres qui va configurer la quantité de population à évacuer et sa distribution spatiale. Dans l'exemple, c'est le scénario de nuit pour le lundi jusqu'au jeudi (L-J) vers 02 heures du matin. Afin de remplir la table d'évacuation avec tous les scénarios choisis, il faut ré-appeler cette requête en changeant le jour et l'heure d'arrivée de tsunami comme les suivantes :

```
select public.compute_evacuation_simple('L-J', '10:00');
select public.compute_evacuation_simple('V', '12:00');
select public.compute_evacuation_simple('WE', '18:00');
select public.compute_evacuation_simple('RLJ', '10:00');
select public.compute_evacuation_simple('RWE', '18:00');
select public.compute_evacuation_simple('RWE', '20:00');
select public.compute_evacuation_simple('FET', '18:00');
```

En affectant à chaque objet géographique évacué le refuge choisi et le temps de parcours associé pour l'évacuation, cette méthode permet de dessiner des cartes de couverture spatiale des refuges. Ces zones correspondent à la zone d'alimentation de chaque refuge. La Figure 81 montre la zone d'alimentation des refuges pour un scénario donné. De plus, le coût total (temps de parcours) entre chaque bâtiment et chaque refuge est cartographié dans la Figure 82 : les zones en rouge excèdent de loin le temps de fuite imparti, et posent un problème pour la sécurité civile.

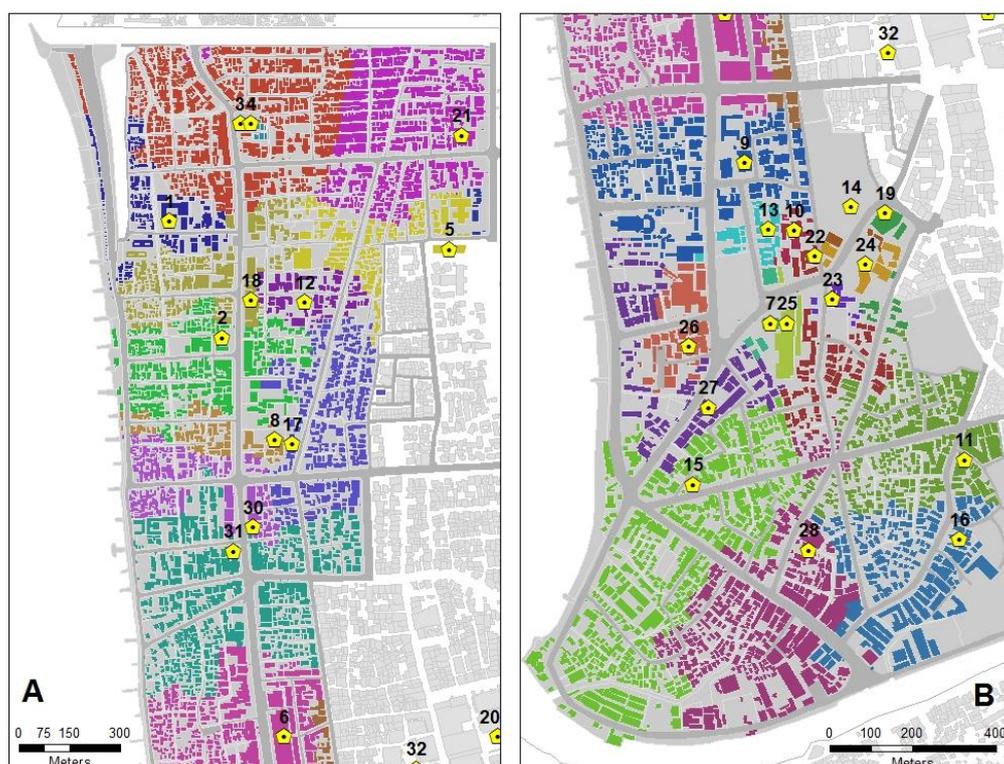


Figure 81. Couverture spatiale des refuges pour un scénario donné.

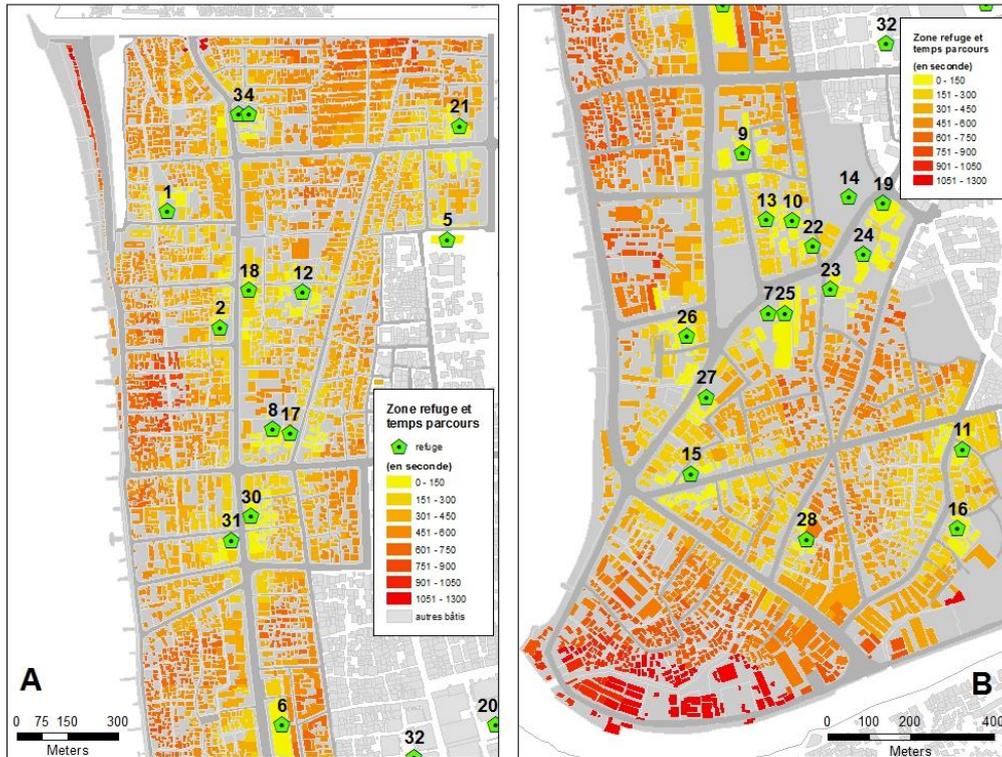


Figure 82. Disposition des refuges verticaux et temps d'accès depuis chaque bâtiment.

Cette méthode fournit également une mesure de la vitesse de remplissage des refuges, et permet de repérer ceux qui dépassent leur capacité d'accueil maximale ou au contraire qui ne l'atteignent jamais. On peut en interpolant sur une discrétisation régulière de la durée de l'évacuation obtenir des courbes de remplissage de chaque refuge en fonction des différents scénarios d'évacuation choisis (Figure 83).

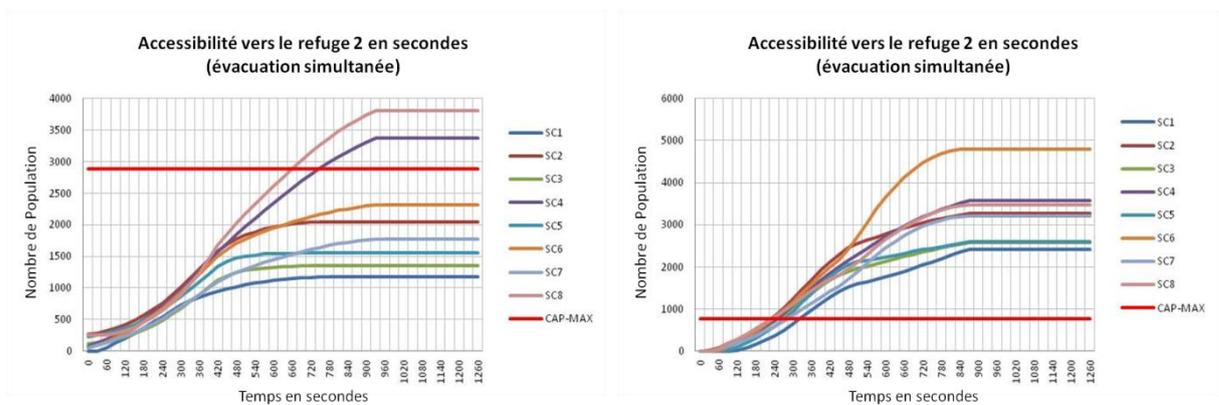


Figure 83. Remplissage des refuges 1 et 2 en fonction des différents scénarios.

Ces deux figures nous montrent que les personnes évacuées cherchent toujours les refuges le plus proches de leur position actuelle sans prendre en compte leur niveau de remplissage. Cela nous

permet de comprendre que la méthode d'évacuation simultanée est limitée dans la modélisation d'accessibilité d'évacuation pour atteindre les zones refuge verticales car elle envoie toujours vers des refuges les plus proches, mais aussi des refuges qui peuvent excéder leur capacité d'accueil. Toutefois ce modèle est plus utilisable pour les refuges horizontaux ayant une capacité d'accueil illimitée comme la carte et le courbe suivantes le montrent (Figure 84 et Figure 85).

Les valeurs de 1 à 5 sur la carte de couverture de zone refuge horizontale (Figure 84 gauche) donnent l'identifiant des zones refuges horizontales. Par exemple : tous les bâtiments en couleurs bleu clair font les évacuations vers le refuge horizontal numéro 1 situé sur la partie Est de la ville. La carte sur la Figure 84 (droite) montre le temps de parcours en secondes vers les zones refuges horizontales pour chaque bâtiment.

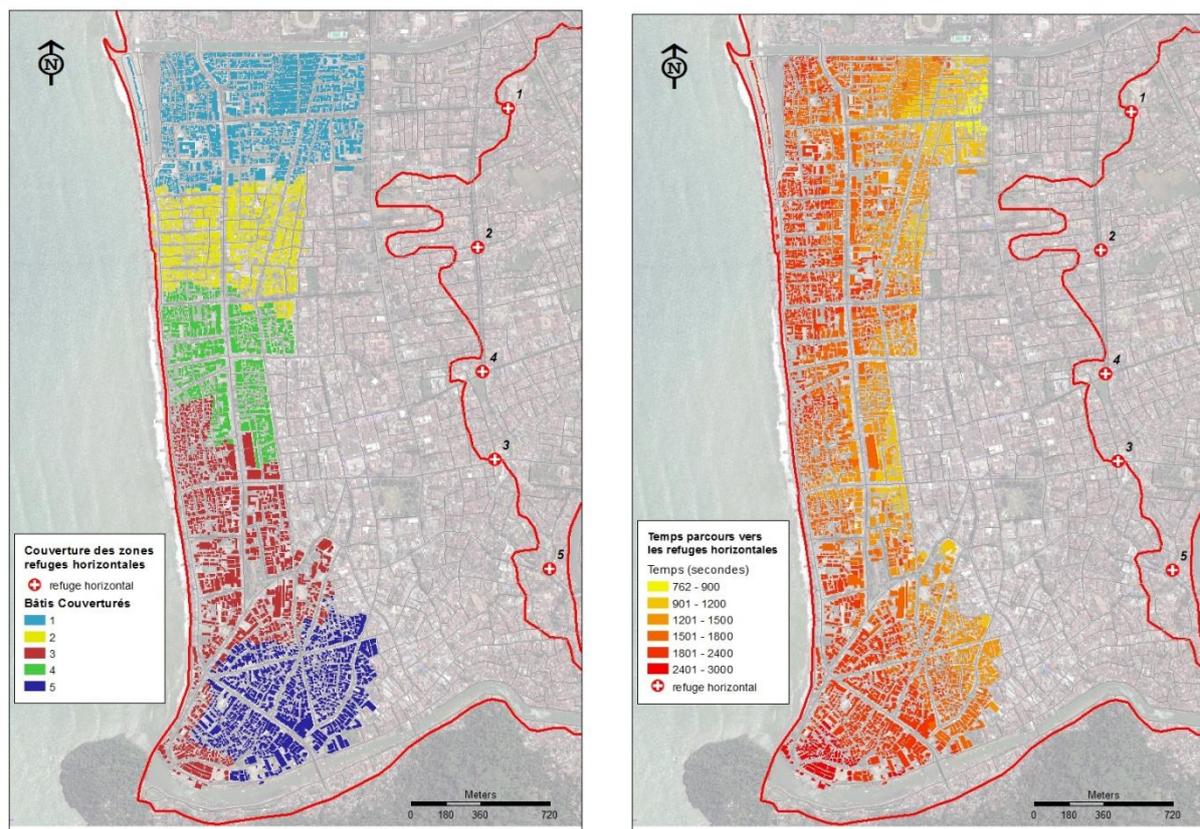


Figure 84. Les bâtiments dans la couverture des zones refuges horizontaux (à gauche) et leurs temps de parcours (à droite).

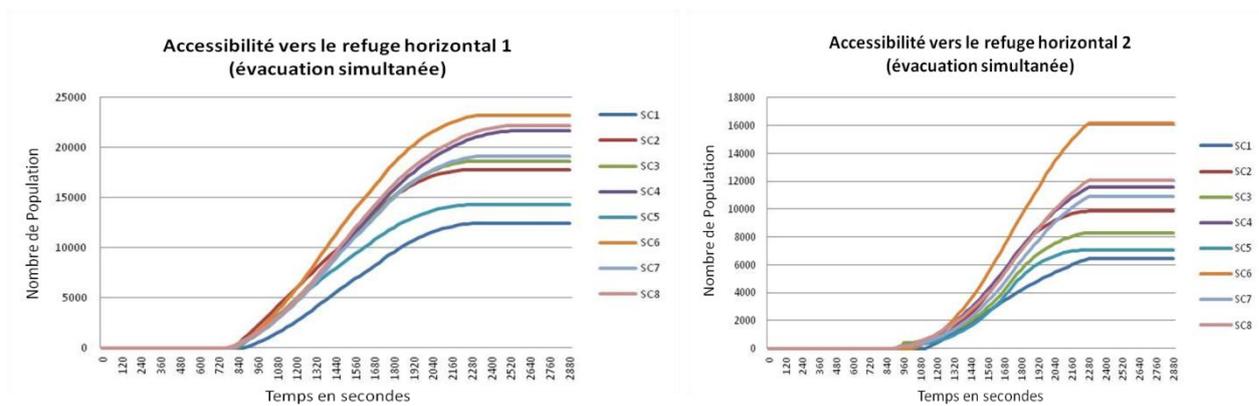


Figure 85. Un exemple de remplissage des refuges horizontaux 1 et 2 pour différents scénarios.

Ce résultat nous montre que la première personne atteint la zone refuge horizontal 1 vers 800 secondes (soit 13 minutes) après le déclenchement de l’alerte, alors qu’il a fallu environ 15 minutes pour la zone refuge horizontale 2 (Figure 85). La totalité de la population a atteint la zone refuge à partir de 2 280 secondes (soit 38 minutes). C’est une durée trop longue comparée au temps d’arrivée du premier tsunami qui est d’environ 16 à 20 minutes après un séisme. Il n’est pas acceptable pour la planification des évacuations qu’une partie de la population continue d’être exposée à un tsunami.

8.4.3. Evacuation échelonnée.

Etant donné la diversité des capacités d’accueil maximales des zone refuge verticales et des aires de couverture spatiale des refuges, certains refuges sont remplis dès la première minute d’évacuation alors que d’autres ne le sont jamais. La méthode d’évacuation simultanée force l’ensemble de la population à atteindre une zone refuge choisie. Toutefois, cette méthode s’éloigne du processus d’évacuation. Dans la réalité, une fois que la zone refuge est bien remplie, les autres personnes cherchent d’autres refuges disponibles.

Nous avons donc choisi une autre solution dans notre modélisation pour que les populations se déplacent dynamiquement pendant l’évacuation pour atteindre les refuges qui sont encore disponibles. Une option à considérer est de refaire jouer l’algorithme d’évacuation et d’envoyer ces personnes vers un refuge proche, en supprimant les refuges remplis de la boucle, et ainsi de suite. Cette approche permet de considérer ainsi les refuges horizontaux, souvent plus lointains, mais ayant une capacité d’accueil illimitée.

Dans notre programmation d’évacuation échelonnée, les bilans tirés de l’utilisation des algorithmes de modélisation sont les suivants :

- Il faut considérer que l'évacuation de chaque bâtiment, zone de plein air ou voie de communication n'est pas instantanée, ce qui est plus réaliste que de considérer un vidage instantané de chaque bâtiment à évacuer. Dans ce modèle, le départ des personnes est programmé plusieurs fois. Ce départ progressif permet de tenir compte du remplissage progressif des zones refuges, dont la capacité maximum ne doit pas être excédée. On prendra même un seuil de sécurité de 20% pour ne remplir qu'à 80% les refuges afin de tenir compte des cas de personnes retardataires.
- Le calcul d'évacuation échelonnée nécessite des mises à jour du niveau de remplissage des refuges. On peut alors choisir les refuges les plus proches en fonction du taux de remplissage atteint.
- L'algorithme d'évacuation procède à une mise à jour des paramètres de la recherche de zones refuges depuis chaque bâtiment, zone de plein air ou voie de communication au fur et à mesure que le temps passe depuis le début de l'évacuation. Celle-ci permet de tenir compte du remplissage progressif des voies d'évacuation, dont l'encombrement augmente et donc des effets de congestion du trafic.
- En considérant que le temps d'arrivée prévu d'un tsunami est admis comme compris entre 16 minutes après le séisme (Goseberg et al. 2014) et 20 minutes (Imamura et al. 2011), le taux d'encombrement des voies évolue progressivement durant ces périodes. Lorsque la population se déverse dans la rue, la rue devient peu à peu très encombrée. Il faut donc compléter la table du graphe routier avec deux paramètres supplémentaires : la vitesse de déplacement en heure creuse ou pleine sur chaque segment. On propose que la vitesse en heure creuse soit appliquée si la somme de population sur la route n'est remplie qu'à moins de 75% de sa capacité maximale habituelle à l'heure d'arrivée du tsunami. Il s'agit en effet de pouvoir basculer en heure pleine lorsque les tronçons sont encombrés à hauteur de 75% de la population maximale pouvant s'y trouver.
- Le modèle nécessite également une mise à jour des coûts de déplacement sur les arcs du graphe routier selon la condition actuelle de la route afin de calculer les chemins les plus courts entre les couples (nœuds départ, nœuds arrivée) pour chaque objet non vide vers chaque refuge non rempli.
- Le calcul d'évacuation échelonnée nécessite des mises à jour de niveau de vidage de bâtiment, zone de plein air et voie de communication. Cela nous permet de tenir compte du vidage progressif des zones à évacuer pendant l'évacuation.

Afin de réaliser cette modélisation, il faut d'abord créer la table d'évacuation échelonnée dans le DBMS PostgreSQL. Cette table permet de faire le bilan à chaque étape de l'algorithme des calculs de plus rapide chemin.

```

create table evacuation_échelonne (
    pas_t integer,
    refuge_id integer,
    objet_id integer,
    saved_pop_of_object float,
    chemin pgr_costResult[],
    objet_type character varying(10),
    temps_parcours float,
    classes_jours character varying(3),
    heure time
);

```

Les paramètres d'entrée de l'algorithme d'évacuation échelonnée sont donc :

1. la classe de jour d'arrivée du tsunami
2. l'heure d'arrivée du tsunami
3. la taille du buffer de sélection des nœuds proches des cibles (200m)
4. les vitesses de déplacement en heures creuses ou pleines sur les arcs
5. la population présente dans chaque objet à l'heure de déclenchement de l'évacuation
6. le maximum d'encombrement observé sur chaque arc habituellement. Lorsque l'arc sera encombré à hauteur de 75% de cet encombrement, on passe alors en heures pleines.
7. le temps d'évacuation maximum
8. le pas de temps (Chaque 30 secondes)
9. le niveau maximal d'occupation toléré pour les refuges (80%)
10. la part de personnes évacuées d'une zone à chaque pas de temps : (10%)

Dès que tous les paramètres d'entrée de l'algorithme d'évacuation échelonnée sont prêts, le modèle peut être exécuté. Avant d'exécuter le modèle, il convient d'initialiser le chemin avec les coûts et les séquences vides depuis chaque objet jusqu'au refuge le plus proche afin que les objets cherchent les refuges les plus proches qui sont encore disponibles. L'initialisation de chemin est faite chaque fois avant l'itération du modèle. Le modèle d'initialisation du chemin est le suivant :

```

CREATE OR REPLACE FUNCTION init_evacuation_optim(classe_jour character varying, tsunami_hour
character varying, tampon_spatial double precision, average_speed double precision)
    RETURNS void AS
$BODY$
/*
Cette fonction initialise une évacuation sur Padang
*/
    DECLARE
        t integer;
        couples RECORD;
        un_chemin pgr_costResult[100];
        un_temps_acces float;
        best_choice RECORD;
        bati integer;
        voie integer;

```

```

        plein_air integer;

BEGIN

RAISE NOTICE 'Calling init_evacuation avec les paramètres tampon_spatial (%) average_speed
(%) ', tampon_spatial, average_speed ;

truncate chemin_optim;
-- Initialiser une relation chemin (identifiant, objet, nœud_depart, vide, refuge,
nœud_destination, disponible, coût_réseau, coût_hors_réseau, coût_total, séquence de
déplacement) avec les coûts et les séquences vides.

RAISE NOTICE 'Init chemins vers bati';
insert into chemin_optim (type_objet, objet_id, noeud_depart, vide, refuge_id,
noeud_destination, nonremplit, cout_euclid)
select 'bati', depart.ogc_fid, depart.node_id, false, arrivee.ogc_fid, arrivee.node_id,
true, (depart.d_min+arrivee.d_min)*average_speed
from
    (select v1.node_id, v1.geom, b.ogc_fid, b.wkb_geometry, k.d_min from voies.node v1,
    raw_data.bati_1 b,
    (select min(st_distance(b.wkb_geometry, v1.geom)) as d_min, b.ogc_fid as bati_id
    from raw_data.bati_1 b, voies.node v1
    where st_Dwithin(b.wkb_geometry, v1.geom, tampon_spatial)
    group by b.ogc_fid) as k
    where st_distance(b.wkb_geometry, v1.geom) = k.d_min and b.ogc_fid = k.bati_id
    ) as depart,
    (select v1.node_id, v1.geom, b.ogc_fid, b.wkb_geometry, k.d_min from voies.node
    v1, raw_data.zone_refuge_32747 b,
    (select min(st_distance(b.wkb_geometry, v1.geom)) as d_min, b.ogc_fid as bati_id
    from raw_data.zone_refuge_32747 b, voies.node v1
    where st_Dwithin(b.wkb_geometry, v1.geom, tampon_spatial)
    group by b.ogc_fid) as k
    where st_distance(b.wkb_geometry, v1.geom) = k.d_min and b.ogc_fid = k.bati_id
    ) as arrivee ;

RAISE NOTICE 'Init chemins vers voie';
insert into chemin_optim (type_objet, objet_id, noeud_depart, vide, refuge_id,
noeud_destination, nonremplit, cout_euclid)
select 'voie', depart.ogc_fid, depart.node_id, false, arrivee.ogc_fid, arrivee.node_id,
true, (depart.d_min+arrivee.d_min)*average_speed
from
    (select v1.node_id, v1.geom, b.ogc_fid, b.wkb_geometry, k.d_min from voies.node v1,
    raw_data.voie_comme b,
    (select min(st_distance(b.wkb_geometry, v1.geom)) as d_min, b.ogc_fid as bati_id
    from raw_data.voie_comme b, voies.node v1
    where st_Dwithin(b.wkb_geometry, v1.geom, tampon_spatial)
    group by b.ogc_fid) as k
    where st_distance(b.wkb_geometry, v1.geom) = k.d_min and b.ogc_fid = k.bati_id
    ) as depart,
    (select v1.node_id, v1.geom, b.ogc_fid, b.wkb_geometry, k.d_min from voies.node
    v1, raw_data.zone_refuge_32747 b,
    (select min(st_distance(b.wkb_geometry, v1.geom)) as d_min, b.ogc_fid as bati_id
    from raw_data.zone_refuge_32747 b, voies.node v1
    where st_Dwithin(b.wkb_geometry, v1.geom, tampon_spatial)
    group by b.ogc_fid) as k
    where st_distance(b.wkb_geometry, v1.geom) = k.d_min and b.ogc_fid = k.bati_id
    ) as arrivee ;

RAISE NOTICE 'Init chemins vers plein_air';
insert into chemin_optim (type_objet, objet_id, noeud_depart, vide, refuge_id,
noeud_destination, nonremplit, cout_euclid)
select 'plein_air', depart.ogc_fid, depart.node_id, false, arrivee.ogc_fid,
arrivee.node_id, true, (depart.d_min+arrivee.d_min)*average_speed
from
    (select v1.node_id, v1.geom, b.ogc_fid, b.wkb_geometry, k.d_min from voies.node v1,
    raw_data.plein_air2 b,
    (select min(st_distance(b.wkb_geometry, v1.geom)) as d_min, b.ogc_fid as bati_id
    from raw_data.plein_air2 b, voies.node v1
    where st_Dwithin(b.wkb_geometry, v1.geom, tampon_spatial)
    group by b.ogc_fid) as k
    where st_distance(b.wkb_geometry, v1.geom) = k.d_min and b.ogc_fid = k.bati_id
    ) as depart,
    (select v1.node_id, v1.geom, b.ogc_fid, b.wkb_geometry, k.d_min from voies.node
    v1, raw_data.zone_refuge_32747 b,
    (select min(st_distance(b.wkb_geometry, v1.geom)) as d_min, b.ogc_fid as bati_id
    from raw_data.zone_refuge_32747 b, voies.node v1
    where st_Dwithin(b.wkb_geometry, v1.geom, tampon_spatial)
    group by b.ogc_fid) as k
    where st_distance(b.wkb_geometry, v1.geom) = k.d_min and b.ogc_fid = k.bati_id
    ) as arrivee ;

RAISE NOTICE 'Update cout net and total cost';

```

```

update chemin_optim set cout_net=0, total_cost=cout_euclid where
noeud_depart=noeud_destination;
update chemin_optim set vide = false, disponible=true, cout_net=null, total_cost=null,
path=null where cout_net is not null and cout_net<>0;

RAISE NOTICE 'Initialiser le graphe routier avec les valeurs de populations et max de pop
si connues.';
-- Initialiser le graphe routier avec les valeurs de populations et max de pop si connues.
update graph_routier set current_pop = 0, max_pop=500;
-- La requête a été exécutée avec succès : 1744 lignes modifiées. La requête a été exécutée
en 31 ms.
update graph_routier set current_pop = k.current_nb_pop, max_pop=k.max_pop_observe
from (
select sum(current_nb_pop) as current_nb_pop, sum(max_pop_observe) as
max_pop_observe, edge_id
from (
select nbpop * j.longueur_decoupe/longueur_route as current_nb_pop, t.max *
j.longueur_decoupe/longueur_route as max_pop_observe, j.edge as edge_id
from repartition_spatio_temporelle_voie_all r, jointure_edges_voies_poly j,
(select max(nbpop) as max, idvoie from
repartition_spatio_temporelle_voie_all group by idvoie) as t,
(select sum(longueur_decoupe) as longueur_route, routeid from
jointure_edges_voies_poly group by routeid) as u
where r.heure=tsunami_hour::time and r.classes_jours=classe_jour
and r.idvoie=j.routeid and t.idvoie=j.routeid and u.routeid=j.routeid ) as m
group by edge_id
)as k
where id = k.edge_id;

RAISE NOTICE 'Fin init_evacuation';

END;
$BODY$
LANGUAGE plpgsql VOLATILE
COST 100;
ALTER FUNCTION init_evacuation_optim(character varying, character varying, double precision, double
precision)
OWNER TO postgres;

```

Le modèle itère donc sur une boucle temporelle, avec un départ programmé suivant l'heure et la période du scénario du tsunami. Dans cette proposition les objets se vident progressivement. Suivant un rythme donné par un paramètre : par exemple, à chaque 30 secondes, c'est 10% de la population de chaque objet qui est évacuée. On prend comme pas de temps un délai de 30 s pour mettre à jour les paramètres vitesse de déplacement sur chaque arc et la disponibilité des refuges.

```

CREATE OR REPLACE FUNCTION compute_evacuation_dyn2(classe_jour character varying, tsunami_hour
character varying, max_time integer, iter_time integer, max_occupation_rate_refuge double
precision, mean_rate_evacuation_bati double precision)
RETURNS void AS
$BODY$
/*
Cette fonction met à jour la relation d'évacuation sur Padang
*/
DECLARE
t integer;
couples RECORD;
un_chemin pgr_costResult[100];
un_temps_acces float;
best_choice RECORD;
bati integer;
pleinair integer;
voie integer;

BEGIN

RAISE NOTICE 'Calling compute_evacuation avec les paramètres max_time (%) iter_time (%)
max_occupation_rate_refuge (%) mean_rate_evacuation_bati (%)', max_time, iter_time,
max_occupation_rate_refuge, mean_rate_evacuation_bati ;

-- perform init_evacuation_optim(classe_jour, tsunami_hour, 200, 1.1);
update chemin_optim set vide = false, disponible=true, cout_net=null, total_cost=null,

```

```

path=null
where cout_net is not null and cout_net<>0;

t := 0;

WHILE t < max_time LOOP
-- Mettre à jour les coûts de déplacement sur les arcs du graphe routier
update graph_routier set cost = st_length(the_geom)/heure_creuse where current_pop<
max_pop*0.75;
update graph_routier set cost = st_length(the_geom)/heure_pleine where
current_pop>= max_pop*0.75;

-- Calculer les chemins les plus courts entre les couples (nœuds départ, nœuds
-- arrivée) pour chaque objet non vide vers chaque refuge disponible.
RAISE NOTICE 'Calcul des plus courts chemin ';
perform compute_chemins_optim();

RAISE NOTICE 'Analyse du bati ';
-- Pour chaque objet (bati, voie, zone de plein-air)
FOR bati in select distinct objet_id from chemin_optim where total_cost is not null
and type_objet='bati' LOOP
-- RAISE NOTICE 'Analyse du bati (%)', bati;
-- Sélectionner le refuge dont le cout de transport est minimum pour cet
objet.
select refuge_id, k.objet_id, total_cost, path from chemin_optim c,
(select min(total_cost) as temps_minimum, objet_id from chemin_optim where
type_objet = 'bati' and objet_id=bati and total_cost is not null and
nonremplit is true group by objet_id ) as k
where total_cost = k.temps_minimum and k.objet_id=bati and c.objet_id =
bati and type_objet='bati' LIMIT 1 into best_choice;

--RAISE NOTICE 'Enregistrer le meilleur chemin du bati (%)', bati;
insert into evacuation_dynamique2 (pas_t, refuge_id, objet_id,
saved_pop_of_object, chemin, objet_type, temps_parcours, classes_jours,
heure)
(select t, best_choice.refuge_id, best_choice.objet_id, rb.nbpop *
mean_rate_evacuation_bati, best_choice.path, 'bati',
best_choice.total_cost, classe_jour, tsunami_hour::time
from public.repartition_spatio_temporelle_bati_corr rb
where rb.idbati=bati and rb.heure=tsunami_hour::time and
rb.classes_jours=classe_jour );
END LOOP;

RAISE NOTICE 'Analyse du plein air';
FOR pleinair in select distinct objet_id from chemin_optim where total_cost is not
null and vide is false and type_objet='plein_air' LOOP
-- Sélectionner le refuge dont le cout de transport est minimum pour cet
objet.
select refuge_id, k.objet_id, total_cost, path from chemin_optim c,
(select min(total_cost) as temps_minimum, objet_id from chemin_optim where
objet_id=pleinair and type_objet='plein_air' and total_cost is not null and
nonremplit is true group by objet_id ) as k
where total_cost = k.temps_minimum and k.objet_id=pleinair and c.objet_id =
pleinair and type_objet='plein_air' LIMIT 1 into best_choice;

--RAISE NOTICE 'Enregistrer le meilleur chemin du bati (%)', bati;
insert into evacuation_dynamique2 (pas_t, refuge_id, objet_id,
saved_pop_of_object, chemin, objet_type, temps_parcours, classes_jours,
heure)
(select t, best_choice.refuge_id, best_choice.objet_id, rb.nbpop *
mean_rate_evacuation_bati, best_choice.path, 'plein_air',
best_choice.total_cost, classe_jour, tsunami_hour::time
from public.repartition_spatio_temporelle_plein_air_all rb
where rb.idair=pleinair and rb.heure=tsunami_hour::time and
rb.classes_jours=classe_jour );
END LOOP;

RAISE NOTICE 'Analyse du voie';
FOR voie in select distinct objet_id from chemin_optim where total_cost is not null
and vide is false and type_objet='voie' LOOP
-- Sélectionner le refuge dont le cout de transport est minimum pour cet
objet.
select refuge_id, k.objet_id, total_cost, path from chemin_optim c,
(select min(total_cost) as temps_minimum, objet_id from chemin_optim where
objet_id=voie and type_objet='voie' and total_cost is not null and
nonremplit is true group by objet_id ) as k
where total_cost = k.temps_minimum and k.objet_id=voie and c.objet_id =
voie and type_objet='voie' LIMIT 1 into best_choice;

--RAISE NOTICE 'Enregistrer le meilleur chemin du bati (%)', bati;
insert into evacuation_dynamique2 (pas_t, refuge_id, objet_id,

```

```

        saved_pop_of_object, chemin, objet_type, temps_parcours, classes_jours,
        heure)
        (select t, best_choice.refuge_id, best_choice.objet_id, rb.nbpop *
        mean_rate_evacuation_bati, best_choice.path, 'voie',
        best_choice.total_cost, classe_jour, tsunami_hour::time
        from public.repartition_spatio_temporelle_voie_all rb
        where rb.idvoie=voie and rb.heure=tsunami_hour::time and
        rb.classes_jours=classe_jour );
END LOOP;

-- Faire le bilan pour chaque refuge afin de détecter une saturation en population:
-- si la somme des populations recueillies dans le refuge atteint 80% ou plus de la
CAMC du refuge, alors le refuge est mis indisponible
RAISE NOTICE 'Mise à jour de la disponibilité des refuges';
update chemin_optim c set nonremplit = false
from
(select sum(saved_pop_of_object) as tot_pop, refuge_id from evacuation_dynamique2
where classes_jours = classe_jour and heure = tsunami_hour::time group by
refuge_id) as k,
(select capacite_a as capacite_accueil, ogc_fid from raw_data.zone_refuge_32747
where capacite_a is not null) as q
where k.refuge_id = c.refuge_id and q.ogc_fid = c.refuge_id and k.tot_pop >=
max_occupation_rate_refuge * q.capacite_accueil ;

-- Faire le bilan pour chaque objet afin de détecter s'il est complètement évacué (
-- la somme des parts des populations évacuées est égale à 100% de la population
initiale de l'objet).
RAISE NOTICE 'Mise à jour du niveau de vidage des bâtiments';
update chemin_optim c set vide = true
from
(select sum(saved_pop_of_object) as tot_pop, objet_id from evacuation_dynamique2
where objet_type = 'bati' and classes_jours = classe_jour and heure =
tsunami_hour::time group by objet_id) as k,
(select nbpop, idbati from public.repartition_spatio_temporelle_bati_corr rb where
rb.heure=tsunami_hour::time and rb.classes_jours=classe_jour) as q
where k.objet_id = c.objet_id and type_objet = 'bati' and q.idbati = c.objet_id
and k.tot_pop >= q.nbpop;

RAISE NOTICE 'Mise à jour du niveau de vidage du plein air';
update chemin_optim c set vide = true
from
(select sum(saved_pop_of_object) as tot_pop, objet_id from evacuation_dynamique2
where objet_type = 'plein_air' and classes_jours = classe_jour and heure =
tsunami_hour::time group by objet_id) as k,
(select nbpop, idair from public.repartition_spatio_temporelle_plein_air_all rb
where rb.heure=tsunami_hour::time and rb.classes_jours=classe_jour) as q
where k.objet_id = c.objet_id and type_objet = 'plein_air' and q.idair = c.objet_id
and k.tot_pop >= q.nbpop;

RAISE NOTICE 'Mise à jour du niveau de vidage des voies';
update chemin_optim c set vide = true
from
(select sum(saved_pop_of_object) as tot_pop, objet_id from evacuation_dynamique2
where objet_type = 'voie' and classes_jours = classe_jour and heure =
tsunami_hour::time group by objet_id) as k,
(select nbpop, idvoie from public.repartition_spatio_temporelle_voie_all rb where
rb.heure=tsunami_hour::time and rb.classes_jours=classe_jour) as q
where k.objet_id = c.objet_id and type_objet = 'voie' and q.idvoie = c.objet_id and
k.tot_pop >= q.nbpop;

-- idéalement : répartir les populations évacuées sur les routes
-- TODO

-- avancer le temps
RAISE NOTICE 'Valeur de t en debut de boucle (%) ', t;
t:=t+iter time;
RAISE NOTICE 'Valeur de t en fin de boucle (%) ', t;
END LOOP;
RAISE NOTICE 'fin de boucle (%)', t;

END;
$BODY$
LANGUAGE plpgsql VOLATILE
COST 100;
ALTER FUNCTION compute_evacuation_dyn2(character varying, character varying, integer, integer,
double precision, double precision)
OWNER TO postgres;

```

Pour tester ce modèle, nous avons fait la simulation échelonnée pour le scénario 2 (SC-2). C'est le lundi matin vers 10 heures quand les salariés sont dans leurs lieux de travail et les élèves dans leurs écoles. Dans ce test, chaque 60 secondes, c'est 20% de la population de chaque objet qui est évacuée.

Les cartes de la Figure 86 présentent le résultat de cette simulation traduit en termes de couverture spatiale des refuges, et montre leur évolution en fonction des phases de l'évacuation. Au premier départ d'évacuation ($t = 0$ seconde), les personnes partent pour atteindre les zones refuges les plus proches. Ce sont les zones refuges verticales qui sont considérées comme la destination préférée. A la fin de première évacuation, certaines zones refuges verticales sont pleines. Cette condition force les personnes évacuées à chercher d'autres refuges qui sont non remplis pour le deuxième départ ($t = 60$ secondes). Le remplissage des zones refuges verticales pour le deuxième départ augmente progressivement. La capacité d'accueil des zones refuges verticales est beaucoup plus réduite dans le troisième départ ($t = 120$ secondes). Il n'y a plus que 3 zones refuges verticales proches encore non remplis lors du quatrième départ ($t = 180$ secondes). Pour le dernier départ ($t = 240$ secondes), il n'existe pas de possibilité d'atteindre une zone refuge verticale. Seules les zones refuges horizontales sont non remplies.

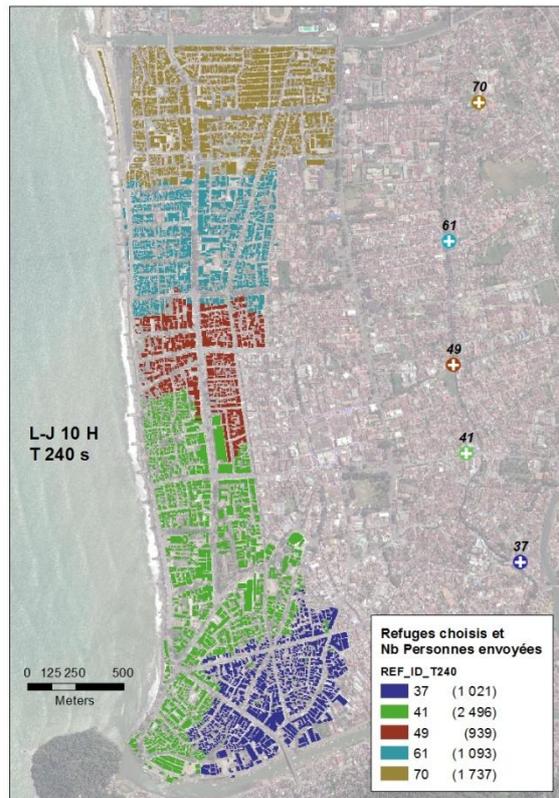
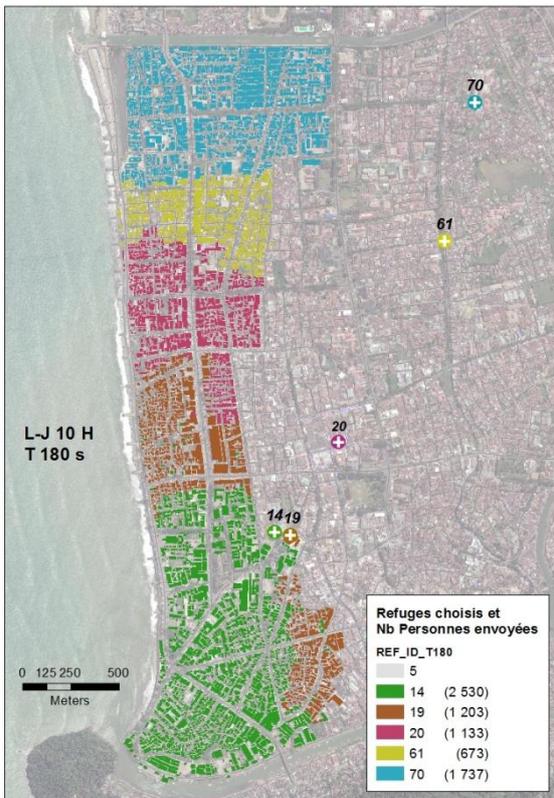
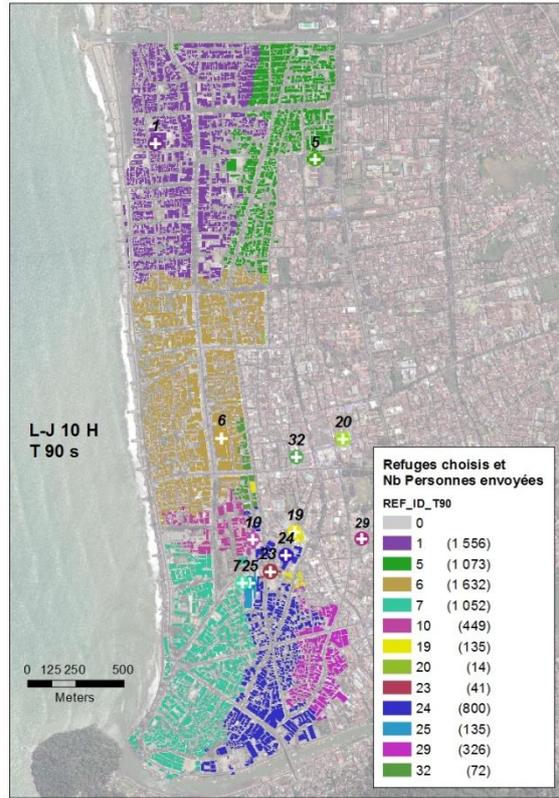
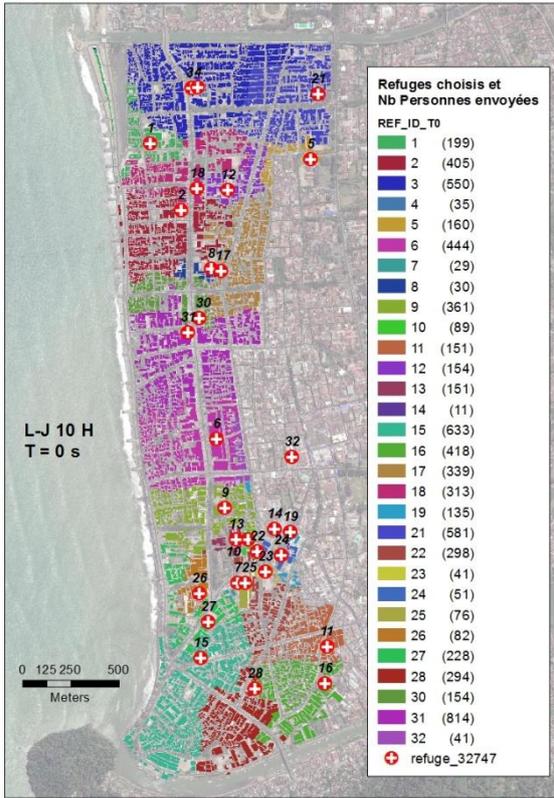


Figure 86. Changement de couverture des refuges en fonction de temps de départ d'évacuation (t=0, t=60, t=120, t=180, t=240).

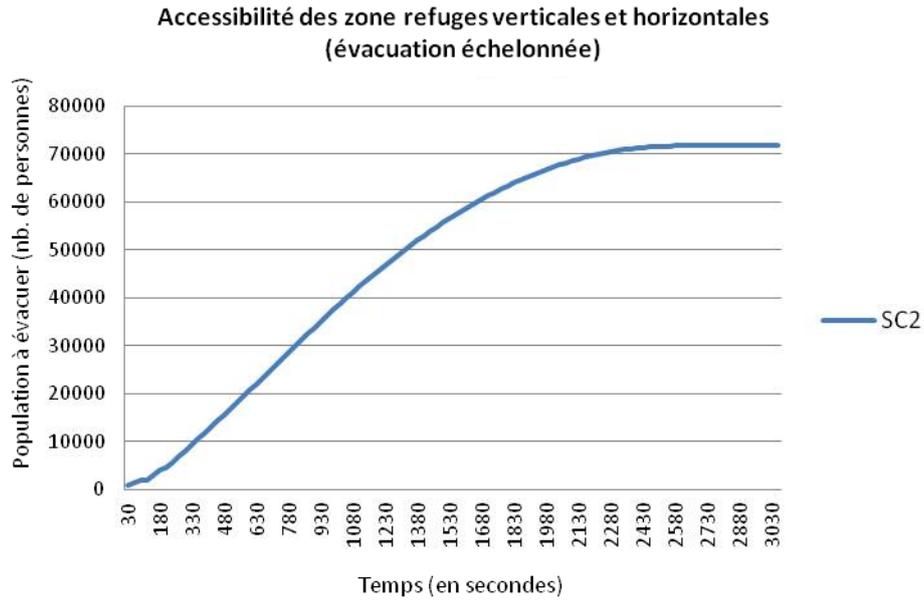


Figure 87. Un exemple de courbe d'accessibilité d'évacuation échelonnée des zones refuges pour le lundi matin vers 10h.

Pour le scénario 2, cette simulation nous montre que certaines personnes peuvent être mises à l'abri dès la première minute de l'évacuation (Figure 87). Cependant, après 20 minutes (1 200 secondes), environ 45 000 personnes sont abritées, et le reste non, donc en danger. La totalité de la population atteint une zone refuge seulement à partir de 2 580 secondes (soit 43 minutes).

Conclusion du chapitre

La vitesse de déplacement des individus est une des informations indispensables pour évaluer l'accessibilité des refuges. Ses valeurs sont influencées par les facteurs comme la largeur des voies, le revêtement du sol, l'occupation des accès, la pente du terrain et les rétrécissements brutaux. Afin d'obtenir des données réalistes sur les vitesses de déplacements dans le contexte de Padang, nous avons réalisé des mesures in-situ sur les différents types de voies. De plus, nous avons considéré que la vitesse de déplacement sur une voie dépend du niveau d'encombrement des voies. La modélisation et la mesure des vitesses pendant les heures creuses et les heures pleines tiennent ainsi compte de ce facteur d'encombrement.

En cas d'évacuation, la modélisation et la mesure de l'accessibilité est faite en transformant les réseaux routiers en graphe, c'est-à-dire un objet mathématique composé de sommet (nœuds) et d'arc (tronçon routier). Dans le modèle, les personnes évacuées partent à pied depuis les nœuds de départ en suivant les chemins le plus proche en temps pour atteindre les nœuds de destination. Les chemins les plus rapides sont ainsi déterminés par l'utilisation de l'algorithme Dijkstra (1959).

Afin d'intégrer la différence de densité humaine suivant les scénarios, la méthode simule l'évacuation selon la période du scénario du tsunami passé en paramètre. Nous proposons également deux modèles d'évacuation en fonction du mode de départ des personnes : une évacuation simultanée et une évacuation échelonnée. Dans l'évacuation simultanée, les objets se vident instantanément alors que dans le modèle échelonné, le départ est programmé plusieurs fois afin de permettre aux personnes évacuées de réagir de façon plus réaliste sur une période de 5 minutes. Ce modèle d'évacuation échelonné n'aboutit toutefois pas directement à un plan d'évacuation, car il serait compliqué d'expliquer à l'échelle du bâtiment qu'il existe des possibilités de fuite diverses en fonction du moment de déclenchement de la fuite.

Chapitre 9. Analyse de la capacité d'évacuation suivant divers scénarii

9.1 Les variables des scénarii

Afin d'évaluer les capacités d'évacuation de la population, nous avons réalisé plusieurs scénarios faisant varier le moment de déclenchement d'un tsunami, permettant ainsi de mesurer les variations de l'accessibilité des zones refuges. Cela était nécessaire du fait de l'incertitude sur la date de réalisation de l'événement au cours temps. Un tsunami peut se produire à n'importe quelle heure dans la journée, ou dans la semaine ou durant n'importe quel mois de l'année. Les scénarios choisis nous permettent de faire varier le nombre de personnes à évacuer (en fonction des estimations réalisées dans la première partie de cette thèse), le nombre de zones refuges et les vitesses de déplacement. En effet, les conditions de réalisation de l'évacuation (densité de population, refuges disponibles, accessibilité du réseau) dépendent très fortement du moment de la journée et de la période. Certaines zones refuges sont fermées la nuit, et les densités de population ont une forte variabilité dans les bâtiments et les zones de plein air suivant l'heure. Ainsi, comme l'indique la Figure 88, le choix des scénarios contrôle d'une part la vitesse de déplacement des personnes à évacuer, et d'autre part la liste des refuges disponibles. La vitesse de déplacement sur le réseau dépend de son encombrement, et tient compte des variations de fréquentation des quartiers de la ville, avec une catégorisation simplifiée en heure creuse ou heure pleine. Les refuges sont décrits par leur capacité d'accueil maximale, leur disponibilité, leur niveau de sécurité et leur position. Cependant, pour chaque objet géographique à évacuer (rue, espace de plein-air ou bâtiment) le critère le plus important pour le choix d'un refuge sera sa position (le plus proche possible par le réseau de rues) et sa disponibilité réelle (c'est-à-dire non rempli).

Ces simulations réalisées sur graphe produisent des estimations de temps de parcours calculées suivant les itinéraires les plus rapide, vers les zones refuges les plus proches en temps, sans prise en compte des comportements humains (effets de panique par exemple), ni des différents profils de population (genre, sexe, âge, en groupe ou non, etc.). On fait l'hypothèse d'une évacuation planifiée, avec des itinéraires balisés et une population préparée, et on teste donc son efficacité.

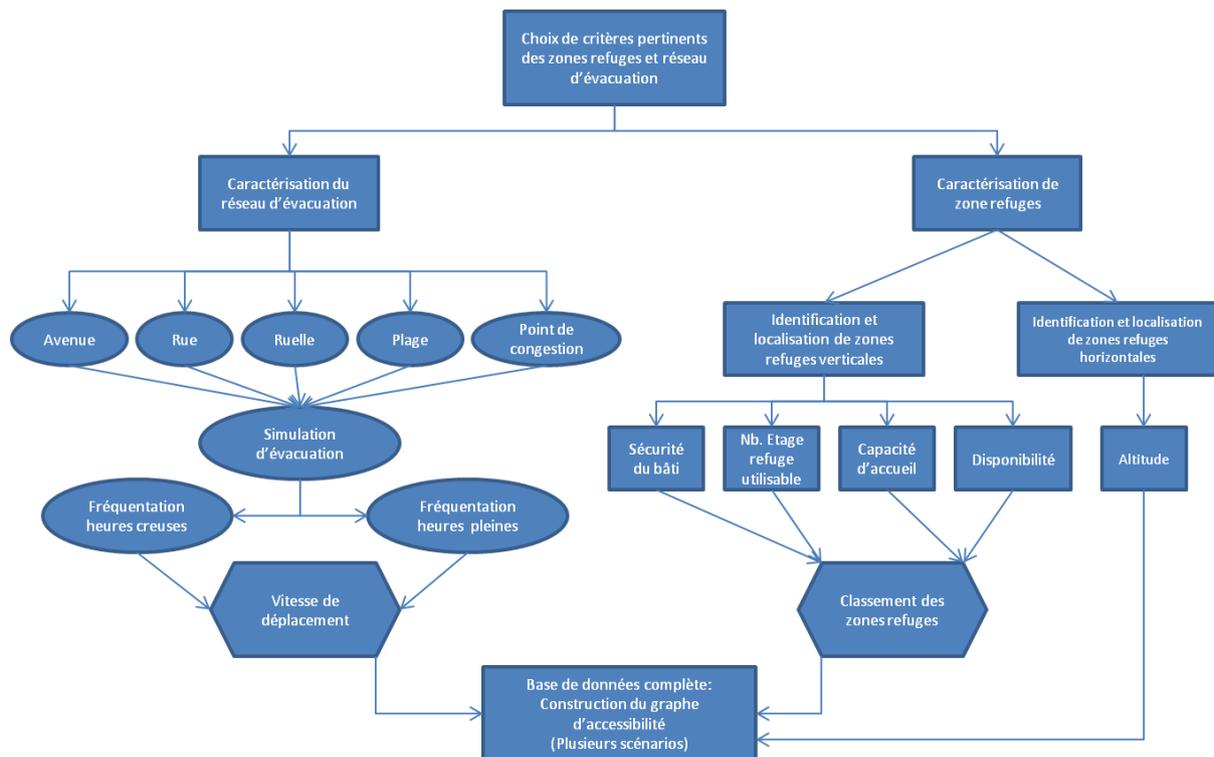


Figure 88. Synthèse des étapes méthodologiques conduisant à l'élaboration de scénarios d'accessibilité des zones refuges.

9.2 Restitution graphiques des résultats

La représentation cartographique s'avère être un des meilleurs moyen de visualiser les couvertures de zones refuges et les temps de parcours depuis chaque position jusqu'à la zone refuge. Pour réaliser ces objectifs, la simulation que nous avons programmée enregistre les résultats dans une base de données spatiale (PostgreSQL avec Postgis) qui en autorise une exploitation fine grâce au couplage avec le logiciel de statistique R (R Development Core Team, 2008).

En effet, la relation *evacuation_dynamique* (*pas_t*, *objet_id*, *temps_parcours*, *v*, *objet_type*, *refuge_id*, *saved_pop_of_objet*, *chemin*, *classes_jours*, *heure*) décrit pour chaque scénario, combinaison d'une classe de jour et d'heure (*classes_jours*, *heure*), à chaque *pas_t* de simulation et pour chaque type d'objet (*objet_type*) et chaque objet (identifié par *objet_id*) quel refuge a été choisi (*refuge_id*) et la quantité de population évacuée (*saved_pop_of_objet*) depuis cet objet, et la durée d'évacuation (*temps_parcours*) pour cette fraction de population jusqu'au refuge. Ainsi, l'analyse par scénario de cette relation permet de connaître :

- Par refuge : le temps d'accès minimal, maximal, et moyen (calculé en utilisant des opérateurs de réduction sur les variables *temps_parcours + pas_t*), la somme totale de

personnes évacuées, le niveau de dépassement éventuel par rapport à sa capacité maximale d'accueil.

- Par objet : le temps de fuite moyen (moyenne des temps de parcours (*temps_parcours*) additionnés des retards de départ (*pas_t*) pondérée par les parts de population évacuées), le refuge majoritairement choisi sur l'ensemble des pas de la simulation, ou bien choisi à chaque pas de simulation (le plus proche, et non plein).

L'usage des logiciels de cartographie (QGIS ou ArcGIS) qui lisent la table *evacuation_dynamique* dans la base de données permettent également de construire deux types de cartes afin de présenter des couvertures des zones refuges et des temps de parcours de chaque objet.

Les **cartes de couverture des zones refuges** permettent de présenter la zone refuge choisie la plus proche et non pleine avant le départ depuis chaque objet à chaque pas de temps. Dans le cas de la modélisation simultanée, il n'y a qu'un cycle d'évacuation, et donc on visualise seulement les refuges les plus proches, dans lesquels 100% de la population des objets est directement envoyée, ce qui provoque généralement un dépassement de capacité du refuge. En revanche, dans le cas de la modélisation échelonnée, il est possible de montrer chaque zone refuge choisie pour le même objet à chaque pas de temps *pas_t* correspondant à un tour de simulation évacuant 10 % (plus ou moins suivant les paramètres du programme) de la population présente dans l'objet. Lorsqu'on inverse la lecture de la carte, on visualise alors pour chaque refuge, à chaque pas de temps de la simulation, quel est l'ensemble des bâtiments dont il draine la population, et donc sa couverture spatiale.

Les **cartes de temps de parcours** nous permettent de visualiser le temps de déplacement pédestre depuis chaque objet pour atteindre la zone refuge la plus proche. Il existe 3 parties dans le calcul : (1) les temps d'accès depuis chaque objet (source) jusqu'au nœud de départ le plus proche ; (2) les temps de déplacement le long de graphe de rues ; (3) les temps depuis le nœud de destination jusqu'au refuge. Ces temps sont calculés en secondes, et correspondent à la variable *temps_parcours*. Les résultats obtenus sont ensuite visualisés sur une carte choroplèthe, dont la discrétisation rend compte de la distribution des temps de parcours pour chaque objet à évacuer : du plus clair pour les temps courts au plus foncé pour les temps longs. Cette méthode a été retenue pour représenter la vitesse d'évacuation de chaque objet dans notre zone d'étude.

La représentation de la cartographie de temps d'accès est alors faite de deux façons :

- (1) temps d'accès moyen ;
- (2) temps d'accès réel.

Le temps d'accès moyen montre la durée de déplacement moyen depuis chaque objet jusqu'à chaque refuge disponible. Dans le modèle dynamique, les individus se déplacent vers le premier refuge le plus proche. Dès que le refuge est bien rempli, les autres individus dans le même objet cherchent un autre refuge disponible. La méthode de calcul de temps d'accès moyen peut être vue par la Figure 89. La carte de temps d'accès moyen est présentée dans l'analyse d'accessibilités par scénario comme une synthèse, tandis que la carte de temps d'accès réel est montrée pour visualiser les différents temps d'accès de chaque objet en fonction du tour de simulation (temps de départ des personnes évacuées) et du choix de refuge le plus proche résultant.

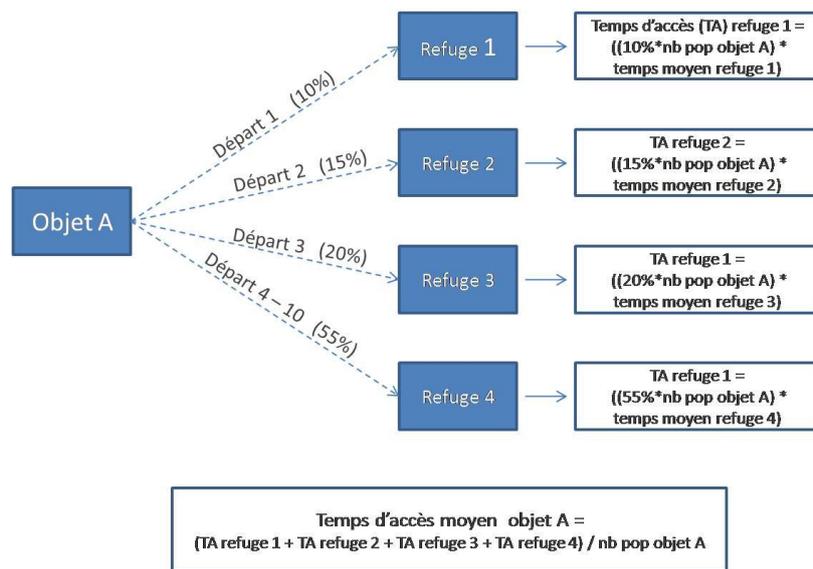


Figure 89. Méthode de calcul de temps d'accès moyen par objet.

La vitesse des populations pour atteindre les zones refuges est présentée par **les courbes d'accessibilité**. Ces courbes expriment le volume de personnes réfugiées dans les zones refuges au cours du temps, c'est-à-dire le nombre de personnes pouvant atteindre ces zones en fonction du temps. Elles sont calculées par le cumul des parts de population évacuées arrivées dans un refuge donné, cumul ordonné en fonction des temps de parcours (*temps_parcours*) additionné du temps de retard dans la prise de décision d'évacuer (*pas_t*). Pour faciliter la représentation et comparaison de courbes pour différents refuges, nous procédons à une interpolation polynomiale locale de degré 2 sur les données brutes pour évaluer la quantité de population totale évacuée à chaque intervalle de 30 s, pour chaque refuge, suivant le scénario. La superposition de toutes les courbes selon les scénarios nous permet de comparer la variation d'accessibilité des zones refuges en fonction des scénarios, en particulier en fonction des densités de population présentes dans leur voisinage au moment du tsunami. Il est possible également de comparer ces courbes avec la courbe d'accessibilité des zones refuges horizontales. C'est un moyen nécessaire afin de comprendre

l'efficacité de planification des évacuations en intégrant tous les types des zones refuges (verticales et horizontales).

Le modèle échelonné des évacuations nous donne également la quantité théorique de personnes sauvées et la quantité réelle de personnes qui sont potentiellement sauvées. Cette différence vient de l'algorithme de simulation d'évacuation qui à chaque tour n'envoie des personnes vers un refuge que si celui-ci est non plein (c'est-à-dire que le cumul de populations évacuées vers celui-ci est inférieur à 80%). Or, lorsque tous les refuges avoisinants sont pleins, il arrive qu'à son dernier tour de simulation, un refuge non plein, rempli à 75% par exemple, reçoive alors une quantité de population qui excède sa capacité. Ce refuge est alors déclaré plein pour le tour de simulation suivant, mais les personnes en excès dans ce refuge ne sont pas potentiellement sauvées. Les personnes arrivées en retard sont alors obligées de trouver une autre zone refuge proche qui soit encore disponible. Si tout est plein, cela peut les conduire à partir pour un refuge horizontal, plus loin encore. La quantité réelle de personnes potentiellement sauvées est la valeur juste avant la dernière itération vers ce refuge.

Post-simulation, on évalue quels sont les refuges qui ont dépassé leur capacité d'accueil, et à partir de quel moment. Ce qui permet de distinguer les quantités théoriques de population sauvées des quantités réelles. On peut imaginer aussi que cette différence serait une aide à l'équilibrage des zones refuges, en proposant de construire par exemple des extensions aux zones refuges verticales d'une capacité égale à cette valeur de dépassement.

9.3. Analyse des résultats

Comme nous avons expliqué dans le chapitre précédent, la simulation d'évacuations simultanées est un modèle peu réaliste en générale, car le départ est programmé une seule fois pour tout le monde d'un coup de chaque objet. De plus, toutes les populations sont obligées d'atteindre les zones refuges qui sont choisies avant le départ, et si elles sont pleines, il n'existe pas de solution de repli. En effet, ce modèle simultané ne prend pas en considération la capacité d'accueil de chaque zone refuge verticale.

Afin de résoudre ce problème, nous avons programmé une modélisation échelonnée de l'évacuation, suivant des principes exposés dans le chapitre précédent, et résumés ici. En considérant que le temps de décision face aux alertes par chaque personne ne peut pas être estimé, nous avons programmé dans ce modèle une variation des temps de départ. Nous avons donc choisi des temps de départ s'échelonnant toutes les 30 secondes durant 5 minutes, depuis chaque objet, permettant à chaque fois de faire partir 10% de la population de l'objet. De plus, nous avons fixé le

seuil de remplissage des refuges à 80% de leur capacité maximale pour respecter au maximum les individus retardés. A chaque itération, une zone refuge est considérée comme inaccessible si le refuge est rempli de 80% de sa capacité maximale. Le refuge est fermé à partir de cette itération (départ) si bien que les autres individus sont obligés de trouver un autre des refuges disponibles.

Notre analyse délivre d’abord un commentaire de la situation générale de l’évacuation simulée avec le modèle échelonné, pour les 8 scénarios temporels sélectionnés dans la première partie. Elle décrit ensuite chacun des scénarios en détail.

9.3.1. Problèmes posés par l’organisation d’une évacuation en conditions actuelles.

En considérant que le délai prévu d’arrivée d’un tsunami est environ de 23 minutes (Taubenböck, 2009), le temps d’accès moyen ne doit pas dépasser 23 minutes (soit 1 380 secondes) à partir du séisme tsunamigène. En effet, considérant le temps d’arrivée la première vague est très court après le séisme (23 minutes), nous faisons l’hypothèse que les populations commencent les évacuations directement dès que la secousse est terminée. En effet, l’évacuation est à lancer uniquement lors d’un fort séisme. Cela donne le bénéfice d’un « temps d’or » pour le processus d’évacuation. Les sirènes d’évacuation annoncées quelques minutes plus tard (5 min au maximum) valideront la décision. En effet, les consignes pour un séisme d’envergure sont de sortir des bâtiments, et vu qu’une très grande majorité des bâtiments de Padang (cf chap. 6) sont non résistants aux séismes, donner comme consigne de sortir pour rejoindre un bâtiment résistant (une zone refuge potentielle) est un plan cohérent pour les civils. En effet, sur notre zone d’étude à Padang, on ne compte que 72 bâtiments de classes E (tableau suivant), qui peuvent potentiellement résister au séisme tsunamigène. Et si ces bâtiments sont marqués par un signe spécial indiquant aux habitants qu’ils sont dans un refuge pour tsunami (parce qu’il respecte les autres critères pour jouer le rôle de refuge), alors ils sauront qu’ils n’ont pas à bouger.

Tableau 18. Récapitulatif du niveau de résistance des bâtiments.

résistance	Nombre de bâtiments
A	1731
B	3408
C	925
D	646
E	72

L'exécution des différents scénarios d'évacuation et leur analyse pour chacun des refuges nous fait d'abord constater que tous les refuges horizontaux (sauf le 37 et dans certains cas) sont inaccessibles dans le temps de fuite imparti (1 380 secondes), comme l'indique la Figure 90. De même pour le refuge vertical 20, qui est trop loin.

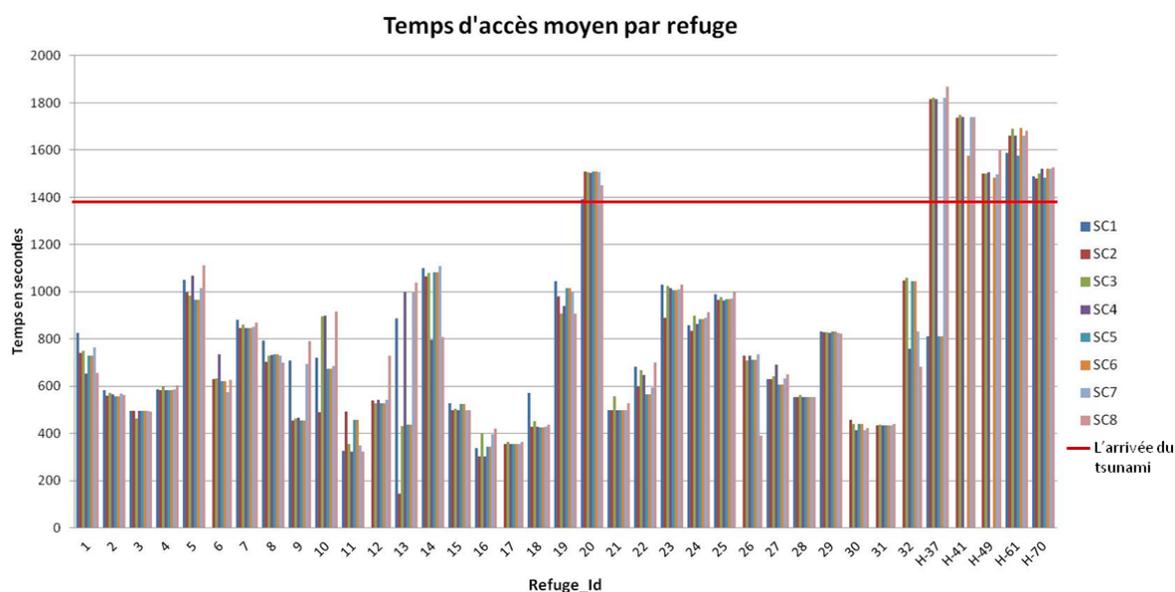


Figure 90. Comparaison des temps d'accès moyen par refuge, pour l'ensemble des scénarios.

L'accessibilité des refuges ne semble pas beaucoup varier en fonction des refuges qui gardent un temps d'accès moyen stable, quel que soit le scénario, sauf pour les refuges 37, 32, 10, 11, 12, 13 et 14. Or, si l'on prend le scénario 2 (Lundi au Jeudi, à 10H00), le second plus fréquent dans une année, et donc celui qui a le plus de chances de se produire après le scénario nocturne (L-J, 02h), on constate également que les refuges horizontaux doivent accueillir une part non négligeable de la population. La Figure 91 indique ainsi qu'une somme totale de 21 994 personnes sont dirigées vers les refuges horizontaux, mais seulement 2 705 personnes atteignent ces zones avant la limite fatidique des 1 380 secondes (23 minutes), ce qui veut dire que 26,46% des personnes évacuées au total sont en danger quand le tsunami arrive sur elles.

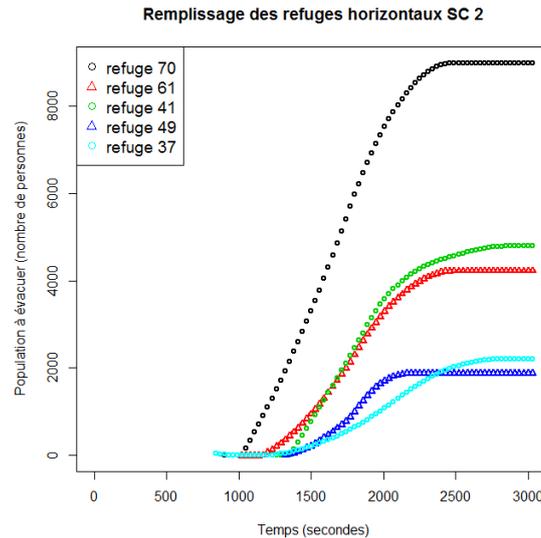


Figure 91. Courbe de remplissage des refuges horizontaux, dans le cas du scénario Lundi-Jeudi, 10H.

Enfin, la constatation la plus dramatique est aussi que souvent, plus de la moitié des refuges dépassent leur capacité maximale d'accueil. Il y a donc une différence significative entre les courbes théoriques de population sauvées et les courbes de population potentiellement sauvées. Le tableau suivant récapitule pour chaque refuge le niveau de remplissage en % de sa capacité maximale atteint suivant chaque scénario.

Certaines zones refuges permettent d'accueillir toutes les personnes en déplacement avant la fermeture de refuge, alors que les autres dépassent la capacité d'accueil maximale. En considérant les personnes en retard, nous avons aussi toléré un dépassement de la capacité d'accueil maximale jusqu'à 110%. C'est une valeur acceptable du fait que la moitié des personnes évacuées sont les enfants. L'espace nécessaire pour des enfants est plus réduit que pour des adultes. Sous le seuil de 110 % de remplissage, le refuge est donc validé (ok) et au-delà le refuge excède sa capacité maximale (non ok). Le pourcentage moins de 110% est qualifié comme le bon remplissage (refuge ok), tandis que pour plus de 110% est classifié comme mauvais remplissage (refuge non ok). Pour Quant aux zones refuges horizontales, elles sont toutes validées (ok) du fait de leur capacité illimitée d'accueil.

Cette considération nous permet de montrer le remplissage de chaque zone refuge en fonction des scénarios (Tableau 19). Cette table présente également le temps au moment la population commence remplit les refuges, et aussi le temps limite quand le refuge atteint la capacité maximum. Toutefois les refuges « non ok » sont présents sur tous les scénarios. Ses répartitions sont plus nombreuses de refuges « ok ». De plus, les scénarios SC-4, SC-6, SC-7 et SC-8 sont les scénarios les plus denses. Environ 75% de la totale du refuge sont les refuges non ok.

Tableau 19. Récapitulatif du niveau de remplissage des zones refuges, en fonction des scénarios.

Refuge id	Capacité max	SC-1 (L-J ; 02 H)			SC-2 (L-J ; 10 H)			SC-3 (V ; 12 H)			SC-4 (WE ; 18 H)			SC-5 (RU ; 10 H)			SC-6 (RWE ; 18 H)			SC-7 (RWE ; 20 H)			SC-8 (FET ; 18 H)			
		% rempli	Temps depart	Temps limit	% rempli	Temps depart	Temps limit	% rempli	Temps depart	Temps limit	% rempli	Temps depart	Temps limit	% rempli	Temps depart	Temps limit	% rempli	Temps depart	Temps limit	% rempli	Temps depart	Temps limit	% rempli	Temps depart	Temp Limit	
1	2879	115	0	120	100	0	90	136	0	120	81	0	60	111	0	120	106	0	60	133	0	90	90	0	60	
2	759	137	0	30	111	0	30	175	0	60	142	0	30	81	0	30	94	0	0	140	0	30	125	0	30	
3	419	125	0	0	151	0	0	179	0	0	219	0	0	149	0	0	236	0	0	209	0	0	213	0	0	
4	419	154	0	30	162	0	30	238	0	30	265	0	30	164	0	30	292	0	30	265	0	30	282	0	30	
5	5852	100	0	190	91	0	120	96	0	150	125	0	120	85	0	150	95	0	90	0	90	120	137	0	120	
6	4331	Fermée			81	0	90	99	0	120	129	0	90	88	0	120	123	0	60	0	60	105	0	60		
7	1011	135	0	120	113	0	90	87	0	90	131	0	90	95	0	120	175	0	60	122	0	90	136	0	60	
8	1139	123	0	60	84	0	60	120	0	90	158	0	60	130	0	90	115	0	60	164	0	60	90	0	30	
9	1267	115	0	60	86	0	60	96	0	90	108	0	90	95	0	90	104	0	60	120	0	90	255	0	90	
10	839	84	0	240	86	0	90	140	0	180	187	0	180	95	0	180	189	0	120	0	180	204	0	180		
11	386	83	0	30	245	0	30	121	0	30	83	0	0	210	0	60	109	0	0	176	0	30	84	0	0	
12	548	Fermée			196	0	60	157	0	90	210	0	60	109	0	60	117	0	30	176	0	60	305	0	60	
13	545	102	0	90	83	0	60	87	0	120	278	0	120	138	0	120	910	0	90	431	0	120	418	0	120	
14	409	208	0	270	54	0	180	392	0	240	119	0	180	597	0	270	709	0	150	204	0	210	115	0	180	
15	646	173	0	30	95	0	0	91	0	0	126	0	0	169	0	30	173	0	0	126	0	0	139	0	0	
16	403	147	0	30	104	0	0	183	0	30	91	0	0	132	0	30	122	0	0	180	0	30	312	0	30	
17	359	Fermée			95	0	0	144	0	30	101	0	0	146	0	30	143	0	0	0	93	0	101	0	0	
18	755	195	0	60	89	0	30	110	0	30	109	0	30	82	0	30	197	0	30	0	96	0	110	0	30	
19	2573	103	0	240	106	0	180	102	0	240	81	0	150	103	0	240	149	0	150	119	0	180	81	0	150	
20	3690	81	0	270	134	60	210	89	60	240	220	30	210	90	60	270	110	30	150	116	30	210	103	30	180	
21	344	96	0	0	169	0	0	195	0	0	168	0	0	134	0	0	206	0	0	165	0	0	193	0	0	
22	800	113	0	90	155	0	60	095	0	60	148	0	60	124	0	90	120	0	30	0	0	60	114	0	60	
23	685	167	0	240	140	0	150	254	0	210	329	0	180	250	0	240	984	0	120	340	0	210	325	0	180	
24	2828	84	0	210	82	0	120	119	0	150	97	0	150	187	0	210	80	0	90	140	0	180	140	0	150	
25	2036	93	0	210	133	0	150	86	0	150	214	0	150	95	0	180	82	0	90	117	0	150	311	0	120	
26	481	Fermée			271	0	60	213	0	60	358	0	60	236	0	90	463	0	30	340	0	60	127	0	30	
27	489	224	0	60	237	0	30	196	0	30	350	0	30	222	0	60	86	0	0	296	0	30	262	0	30	
28	95	231	0	0	309	0	0	261	0	0	363	0	0	246	0	0	479	0	0	327	0	0	356	0	0	
29	1312	91	60	180	104	60	150	85	60	150	96	30	90	98	90	240	91	30	60	103	60	150	92	30	120	
30	319	Fermée			398	0	30	329	0	30	93	0	0	237	0	30	124	0	0	113	0	0	118	0	0	
31	454	Fermée			179	0	0	131	0	0	165	0	0	115	0	0	216	0	0	153	0	0	181	0	0	
32	554	Fermée			320	0	120	279	0	150	129	0	120	252	0	150	329	0	90	134	0	120	125	0	90	
37	horizontal	illimitée	0	0	illimitée	0	270	illimitée	0	270	illimitée	0	270	illimitée	0	270	illimitée	0	270	illimitée	0	270	illimitée	0	270	
41	horizontal	illimitée	Non utilisé	illimitée	240	270	illimitée	270	270	illimitée	240	270	illimitée	240	270	illimitée	Non utilisé	illimitée	180	270	illimitée	240	270	illimitée	210	270
49	horizontal	illimitée	Non utilisé	illimitée	240	270	illimitée	270	270	illimitée	240	270	illimitée	240	270	illimitée	Non utilisé	illimitée	180	270	illimitée	240	270	illimitée	210	270
61	horizontal	illimitée	210	270	illimitée	90	270	illimitée	120	270	illimitée	90	270	illimitée	120	270	illimitée	60	270	illimitée	90	270	illimitée	150	270	
70	horizontal	illimitée	210	270	illimitée	150	270	illimitée	180	270	illimitée	150	270	illimitée	180	270	illimitée	120	270	illimitée	150	270	illimitée	150	270	

Vert : refuges qui n'ont pas dépassé leur capacité d'accueil (OK).
 Rouge : refuges qui ont dépassé leur capacité d'accueil (non OK) de 110%.

L'analyse de l'accessibilité pour l'ensemble des scénarios est présentée dans le tableau suivant (Tableau 20). Elle montre le bilan des personnes à évacuer, des refuges utilisés, des personnes envoyées aux refuges horizontaux et des personnes en danger. En général, aucun scénario d'accessibilité ne garantit la sauvegarde de la totalité de la population. La possibilité de plus grand nombre de victimes est celle du scénario Ramadan vers 18H (SC6), où on anticipe 76% environ de pertes en vies humaines. On constate aussi que la fermeture de certains refuges verticaux pendant la nuit (SC1) aggrave le risque de pertes humaines, puisque les parts de pertes humaines sont très comparables entre le scénario SC1 (environ 50,79%) et SC5 (environ 50,6%) alors que significativement plus de personnes sont à évacuer dans le scénario 5 (22% de personnes en plus).

Tableau 20. Synthèse de l'accessibilité des évacuations en fonction des scénarios.

Critères	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC8
Nb. de personnes à évacuer	42066	72885	62264	82902	54191	106019	77540	87987
Nb. de personnes vraiment sauvées en 23 minutes dans les refuges	20700	28412	28552	25761	26791	24530	19731	26161
Nb. de personnes en danger	21366	44473	33712	57141	27400	81489	57809	61826
Nb. Refuges OK	10	14	11	8	11	7	7	7
NB. Refuges non OK	15	18	21	24	21	25	25	25
Nb. Personnes envoyées aux refuges horizontaux	5453	21994	13706	25790	7655	49378	23482	32696
Nb. de personnes atteignant les refuges horizontaux en 23 min.	508	2693	1837	2479	1529	4633	2233	2652
Nb. de personnes en danger dues au déplacement vers des refuges horizontaux (évacuation supérieure à 23 min)	4945	19301	11869	23311	6126	44745	21249	30044
Pourcentage des personnes en danger par rapport à la population à évacuer	50,79%	61,02%	54,14%	68,93%	50,56%	76,86%	74,55%	70,27%

Ces pertes, qui sont dues soit à un dépassement de capacité du refuge vertical, soit à un éloignement trop important des refuges horizontaux, augmentent avec la quantité de population à évacuer. On peut tracer un diagramme (Figure 92) montrant que la part des pertes dues à l'éloignement des refuges est corrélée avec la quantité de personnes à évacuer, alors que la part due au manque de place dans les refuges recule. Ce qui signifie clairement que *la capacité d'évacuation verticale est très vite saturée*, et qu'ensuite entre en ligne de compte l'éloignement des zones de refuge horizontales pour sauver des personnes (et donc la mobilité de ces personnes).

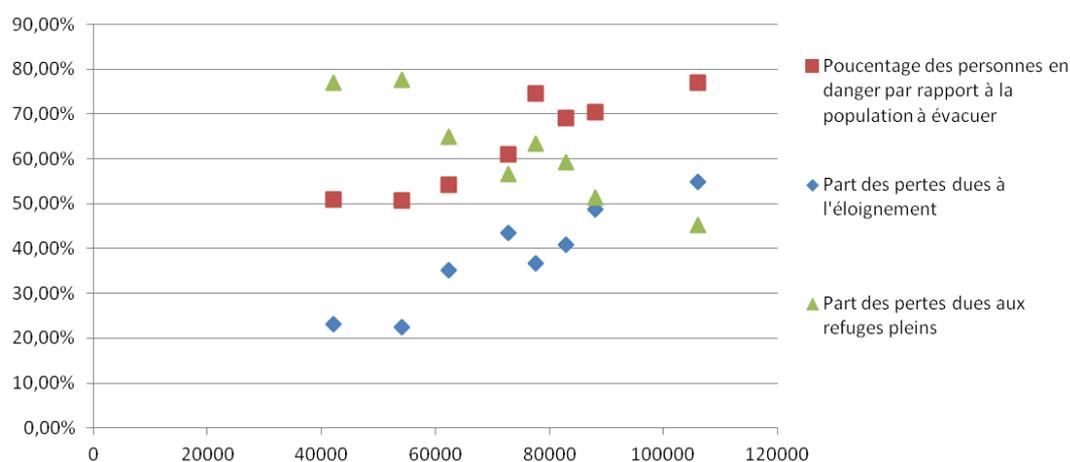


Figure 92. Croisement entre quantité de population à sauver, et pertes, différenciées suivant leur cause.

Par exemple, dans le cas du scénario 2, on peut tracer les courbes de remplissage pour 14 refuges qui n'excèdent pas leur capacité maximale, Figure 93, et les courbes des 18 autres refuges verticaux qui dépassent (Figure 94), et parfois très largement, leur capacité d'accueil, comme dans le

cas du refuge 14 qui atteint 540% de sa capacité maximale d'accueil, soit 2640 personnes, au lieu des 489 qu'il pourrait accueillir.

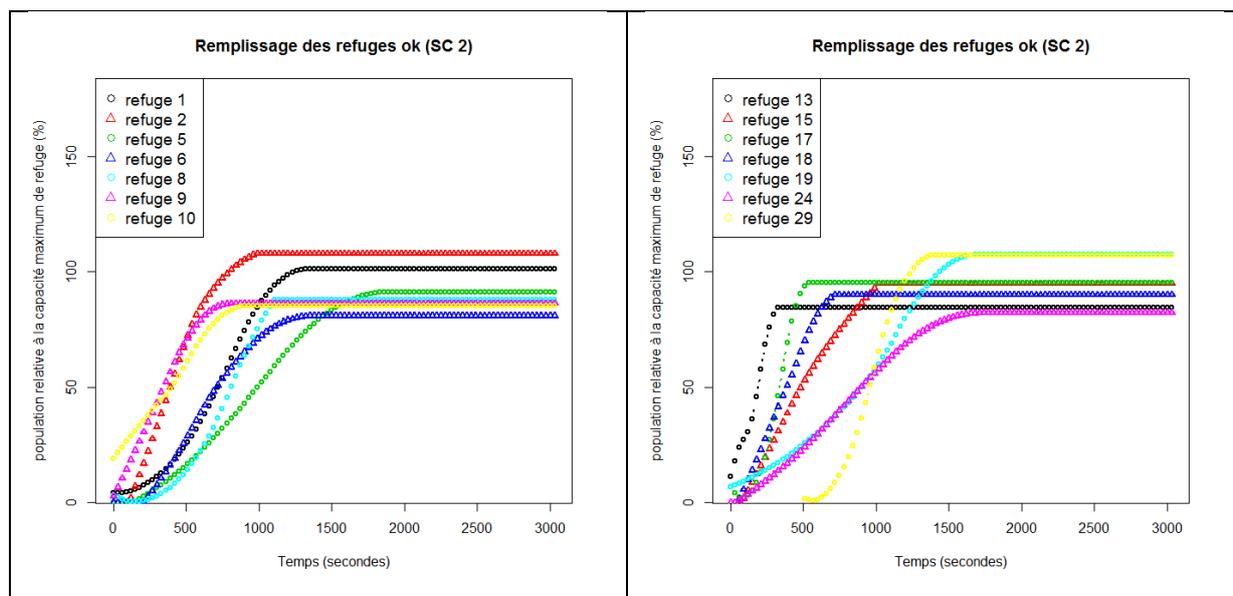


Figure 93. Courbes de remplissage des refuges OK du scénario 2 (L-J à 10h00).

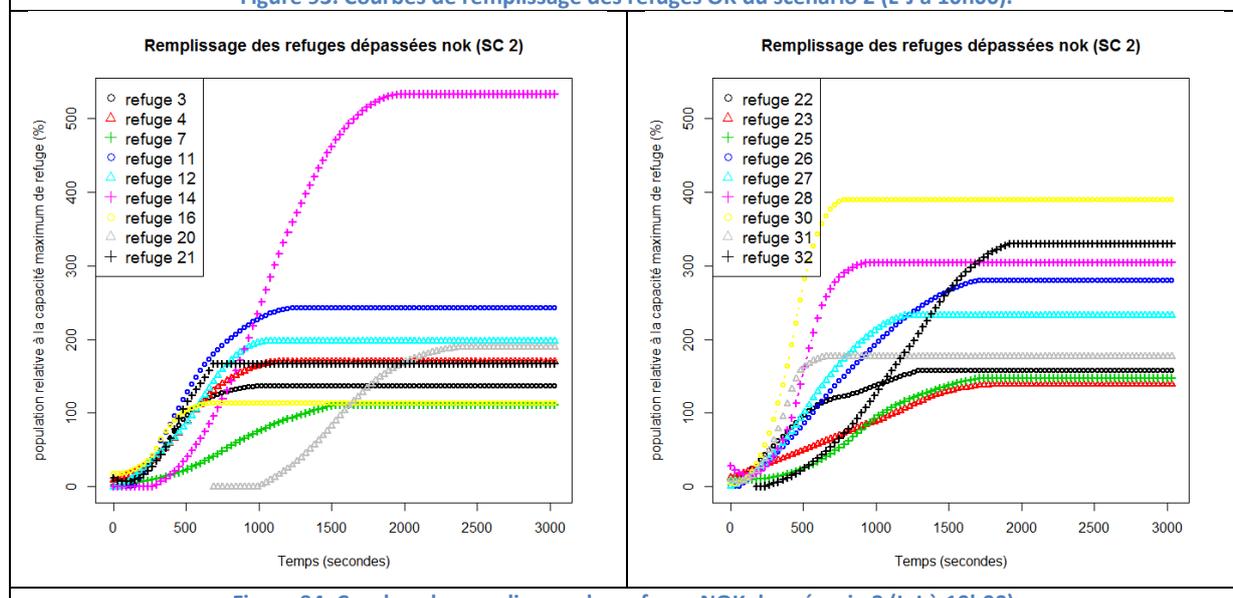


Figure 94. Courbes de remplissage des refuges NOK du scénario 2 (L-J à 10h00).

Finalement, on peut présenter une synthèse pour ce scénario des refuges qui posent problème ou non. C'est l'objet de la carte de la Figure 95 qui présente en vert les refuges verticaux n'excédant pas leur capacité maximale, et en rouge les refuges qui ne pourront pas accueillir la masse de population se présentant à leur porte. Les refuges horizontaux, qui sont de toute façon trop loin à l'heure actuelle pour être atteints en un temps limité de 1 380 s, sont présentés également sur la carte.

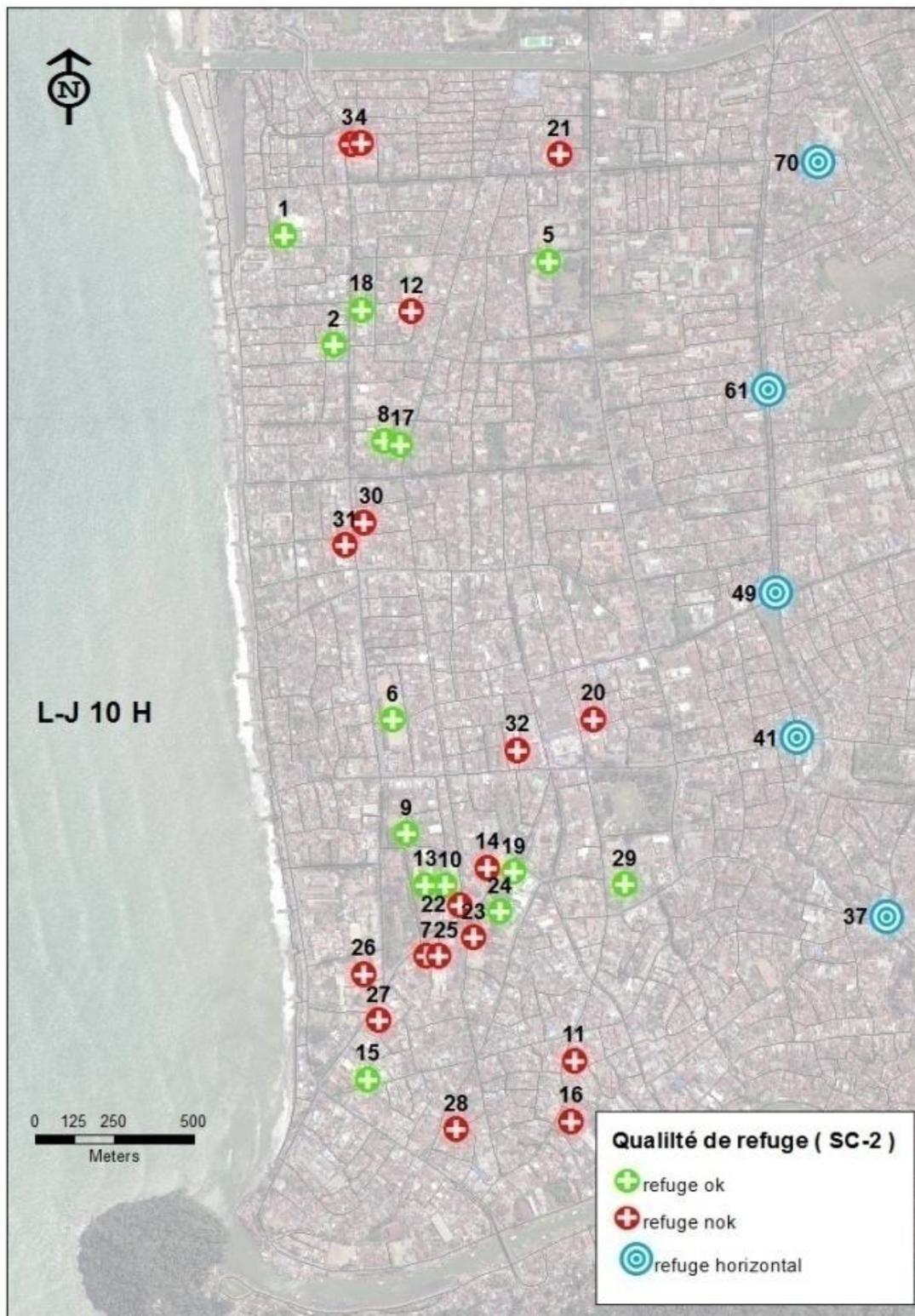


Figure 95. Carte de synthèse sur la qualité des refuges pour l'évacuation dans le cas du scénario 2 (Lundi-Jeudi 10h00).

9.3.2. Analyse d'accessibilité de zones refuges pour les différents scénarios.

Dans cette partie, une analyse fine de l'accessibilité des refuges est présentée, scénario par scénario. Chaque analyse résume les particularités du scénario et les faits notables à prendre en compte pour l'organisation d'un plan d'évacuation. Les scénarios 1, 2 et 6 sont plus approfondis, en raison de leurs impacts particuliers.

Afin de rappeler la situation pour chaque scénario, nous présentons également la distribution spatio-temporelle de population calculée au moment du déclenchement de l'alerte au tsunami en utilisant la carte de densité humaine. Cette carte est complétée par les informations sur la localisation et la capacité d'accueil de zones refuges.

9.3.2.1. Accessibilité de nuit (SC- 1)

Un tsunami peut se produire pendant la nuit comme dans la journée. Ce scénario de nuit est le plus probable. Dans ce scénario, la population est concentrée dans les habitations, tandis que l'ensemble des zones de plein-air est normalement vide (Figure 96). C'est la situation où la quantité de population est la plus faible dans notre zone d'étude. Suivant notre calcul exposé dans la deuxième partie, 42.066 personnes sont à évacuer à ce moment là. Par ailleurs, l'évacuation est particulière du fait que certaines zones refuges verticales sont fermées de nuit. Nous avons considéré qu'au moins 7 zones refuges verticales sont fermées (refuges numéro 6, 12, 17, 26, 30, 31, 32). Ce sont les zones refuges verticales de type centre commercial et de service privé. Cette fermeture des refuges pousse les personnes habitant autour de ces refuges à chercher directement une autre zone refuge disponible.

A cause de la fermeture de certaines zones refuges verticales de nuit, la capacité d'accueil totale des zones refuges verticales diminue jusqu'à 32 663 personnes (soit 77,6% des personnes à évacuer). Toutefois l'accessibilité moyenne est assez bonne durant cette période du fait que le nombre total de population est très faible comparé aux autres périodes, et du fait de l'absence d'encombrement du réseau routier (personne dans les rues ou les espaces de plein-air). Par contre le temps d'accès moyen pour atteindre les zones refuges horizontales dépasse les 23 minutes, comme toujours. Nous avons évalué qu'environ 626 bâtis (soit 3 883 personnes) dépassent le temps d'accès moyen de 23 minutes (Figure 97). Il n'y a que 3 zones refuges horizontales qui sont utilisées par les populations (H-37, H-61, H-70), tandis que les refuges H-41 et H-49 ne sont jamais atteints par les personnes dans notre zone d'étude. Le temps d'accès moyen le plus long est de 1 800 secondes (soit 30 minutes), et c'est celui pour atteindre la zone refuge horizontale H-61.

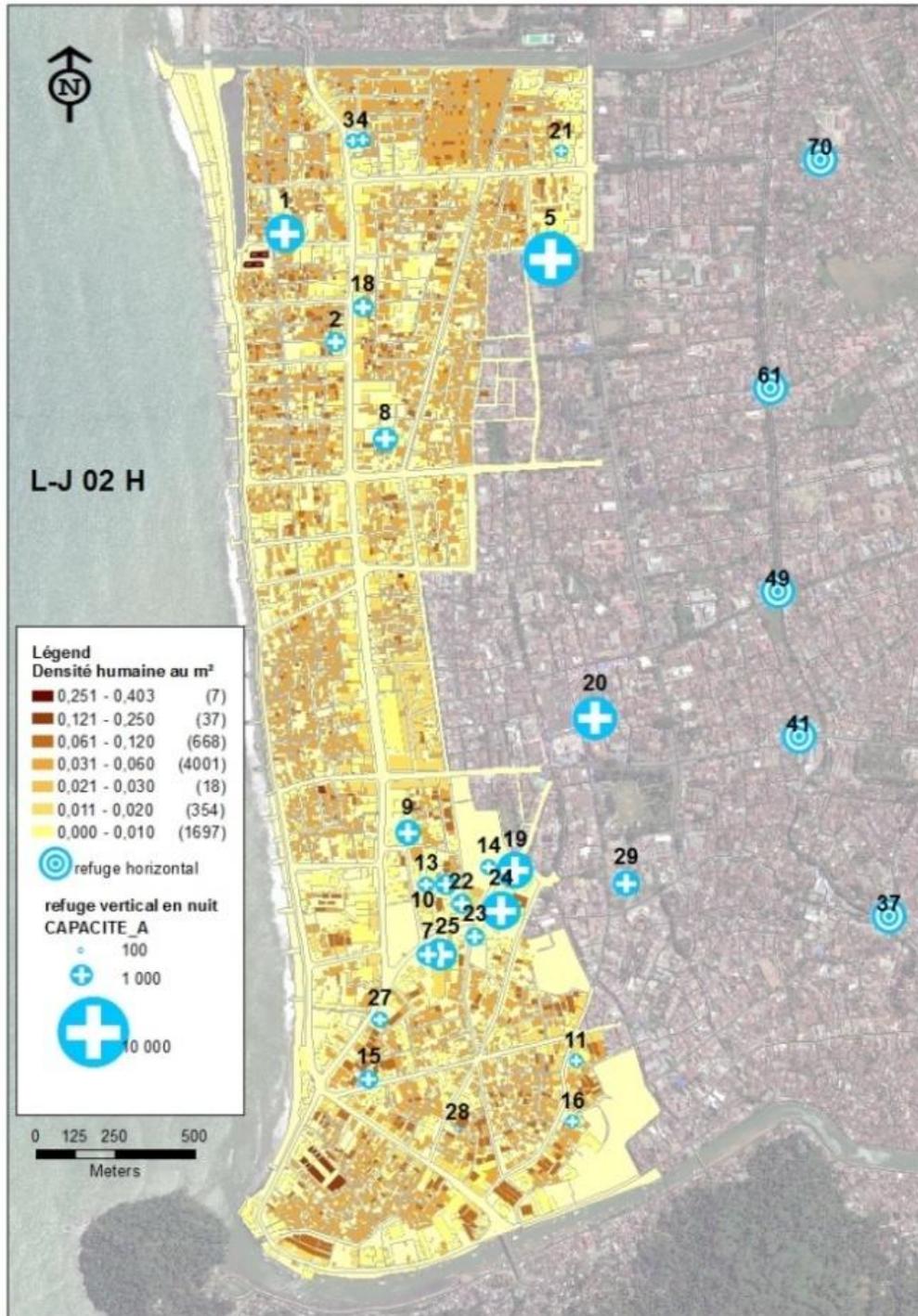


Figure 96. Carte de densité de population et de position des refuges. Scénario nocturne (L-J, 02H).



Figure 97. Carte des temps d'accès moyen aux refuges. Scénario nocturne (L-J, 02H).

Temps d'accès moyen par refuge (SC1)

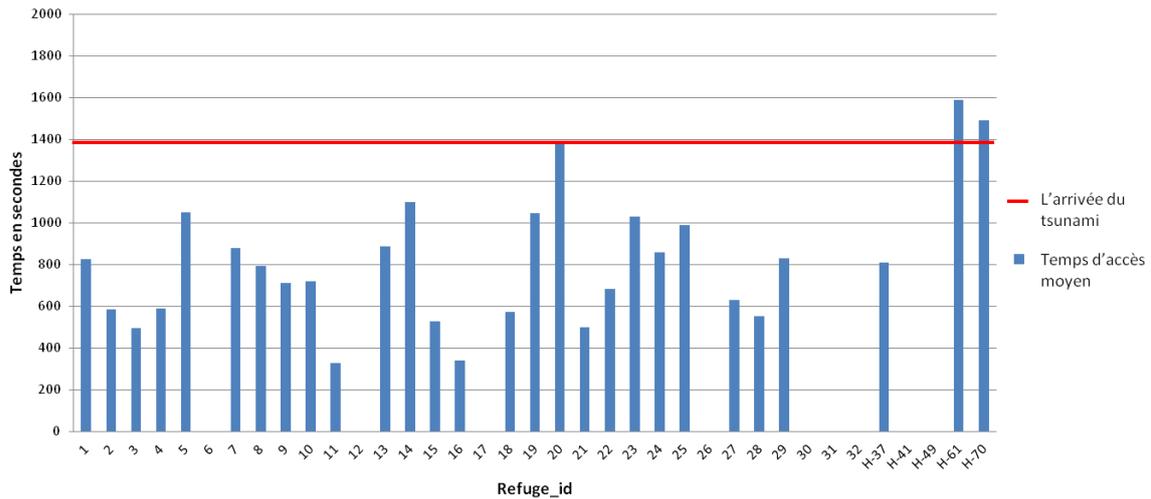


Figure 98. Temps d'accès moyen aux refuges. Scénario nocturne (L-J, 02H).

La Figure 99 permet de cartographier 4 étapes significatives de l'évacuation, avec l'accessibilité en temps réel. Afin de pouvoir analyser la situation dynamique des évacuations, les cartes sont présentées sur 4 départs différents pour chaque scénario, après T, temps de lancement de l'alerte à l'évacuation pour tsunami. Nous avons choisi le premier départ (Départ T +0s), quatrième départ (Départ T+90s), le septième départ (Départ T+180s) et le dernier départ (Départ T+270s). Ces différents départs montrent la variation de la couverture des zones refuges à chaque tour de simulation, ou vague de départ des objets (10% tous les *départs*). Les cartes de temps d'accès par départ vont permettre d'analyser le temps nécessaire pour accéder aux refuges et les refuges qui sont encore disponibles à chaque départ.

- Dans le premier départ (Départ T 0), toutes les populations sont abritées en moins de 23 minutes. Nous avons remarqué que les refuges verticaux numéros 20 et 29 ne sont pas utilisés pour ce départ. Ils ne sont pas les refuges les plus proches pour les personnes évacuées des bâtiments à ce moment.
- Après avoir passé 3 tours de simulation, soit 3 départs, certaines zones refuges verticales sont indisponibles pour le quatrième départ (départ T+90s). Seulement 12 refuges verticaux peuvent accueillir les personnes évacuées. Le temps d'accès est plus long que le premier départ. Environ 211 bâtis dépassent déjà le temps d'accès à un refuge de 23 minutes. Par ailleurs, aucun bâti ne dépasse de plus de 30 minutes.
- Au septième départ (Départ T+180s), 8 zones refuges verticales sont encore disponibles. Cela permet encore aux populations sur la partie sud de la ville d'atteindre les refuges dans le temps requis. Toutefois il existe 124 bâtis qui dépassent le temps d'accès de 30 minutes. Durant ce départ, les zones refuges horizontales ne sont pas encore utilisées par les personnes évacuées.

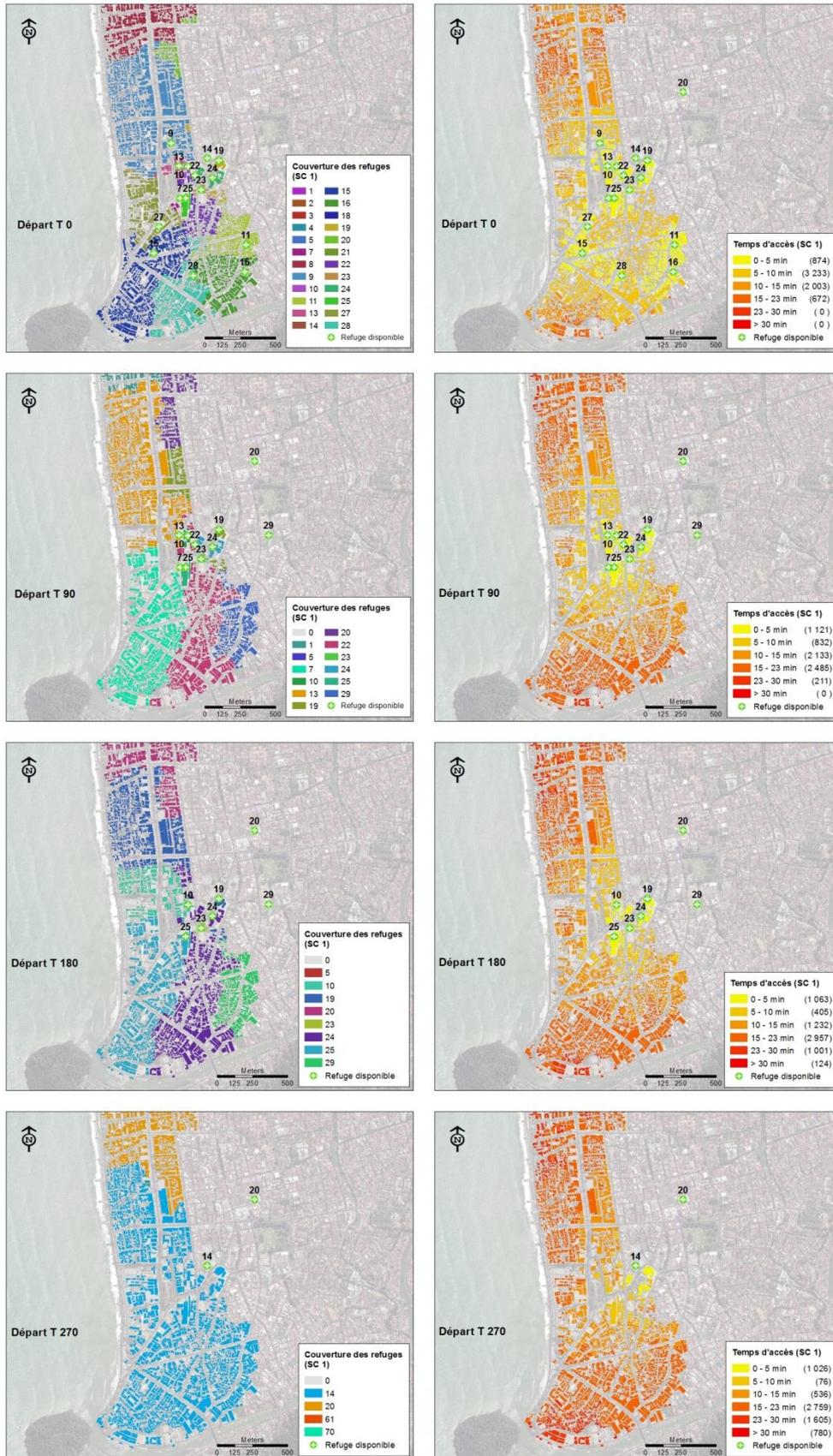


Figure 99. Couverture dynamique des zones refuges et temps d'accès nocturne 02h.

- Au dernier départ, environ 780 bâtis (11,5%) dépassent le temps d'accès de 30 minutes (1 800 secondes). C'est beaucoup plus qu'au précédent départ. Toutefois il existe encore deux zones refuges verticales qui sont toujours disponibles sur la partie sud, alors que 7 refuges verticales sont fermés dès ce moment. De plus, deux zones refuges horizontales situées dans la partie nord sont utilisées alors que celles situées au sud n'accueillent pas de population.

Cette analyse montre que la totalité de population théoriquement présente est abritée à partir de 2 300 secondes (soit 38 minutes). 30 205 personnes sont abritées en 1 380 secondes (23 minutes). Le reste est encore en déplacement pour atteindre le refuge choisi.

La Figure 100 illustre également la différence entre l'accessibilité théorique et réelle des refuges verticaux, montrant le volume de personnes potentiellement sauvées durant ce scénario. A l'arrivée de la vague 23 minutes après de le séisme, le volume de personnes potentiellement sauvées à ce moment est de 27 342 individus, ce qui signifie qu'environ 50,79 % du total de population durant la nuit sont en danger).

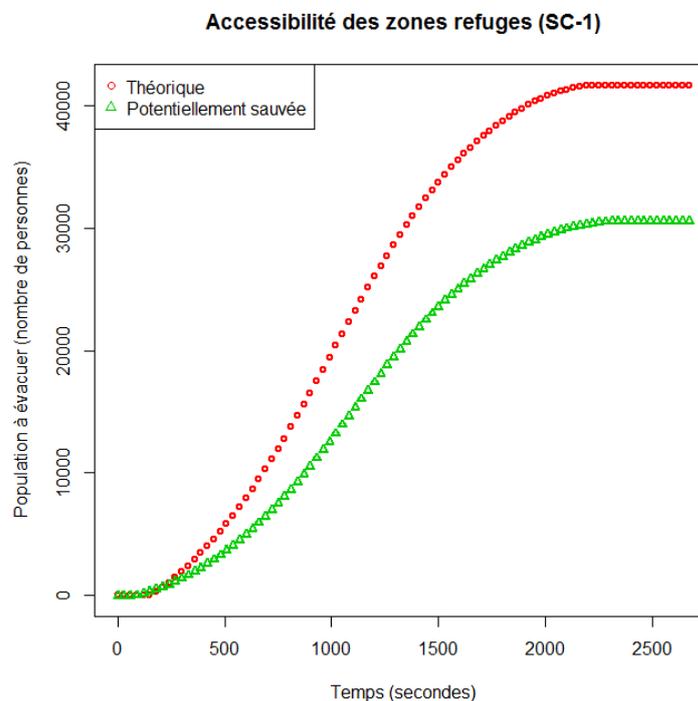


Figure 100. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 1.

9.3.2.2. Accessibilité du jour ouvrable : L-J 10 H (SC-2)

Ce scénario est la seconde situation la plus fréquente dans l'année. La totalité de la population atteint presque 2 fois celle du scénario de nuit soit environ 72 885 individus. La population se disperse dans les établissements scolaires et les bâtiments de travail. Il reste peu de personnes à leur domicile. On a remarqué également l'augmentation des personnes qui sont en

déplacement sur les routes tandis que les zones de plein air sont faiblement occupées (Figure 101). En cas d'évacuation face à un tsunami, la forte densité de population durant cette période allonge le temps d'accès pour atteindre les zones refuges. Il y a environ 1 506 bâtis (soit 16 184 personnes) ayant un temps d'accès moyen de plus de 23 minutes, environ 4 fois plus que lors de la période de nuit. 153 bâtis d'entre eux (soit 1 644 personnes) dépassent la limite de 30 minutes pour atteindre les refuges (Figure 101).

A partir du scénario 2, toutes les zones refuges verticales sont ouvertes, et leur temps d'accès moyen est inférieur à 23 minutes, sauf pour le refuge 20. Par ailleurs le temps d'accès moyen vers toutes les zones refuges horizontales dépasse les 23 minutes, du fait de leur éloignement du rivage et de la forte densité de population qui diminue la vitesse de déplacement sur le réseau (Figure 102).



Figure 101. Scénario classique du jour ouvrable (L-J, 10H).
 A gauche : carte de densité de population et de position des refuges.
 A droite : carte des temps d'accès moyen aux refuges.

Temps d'accès moyen par refuge (SC2)

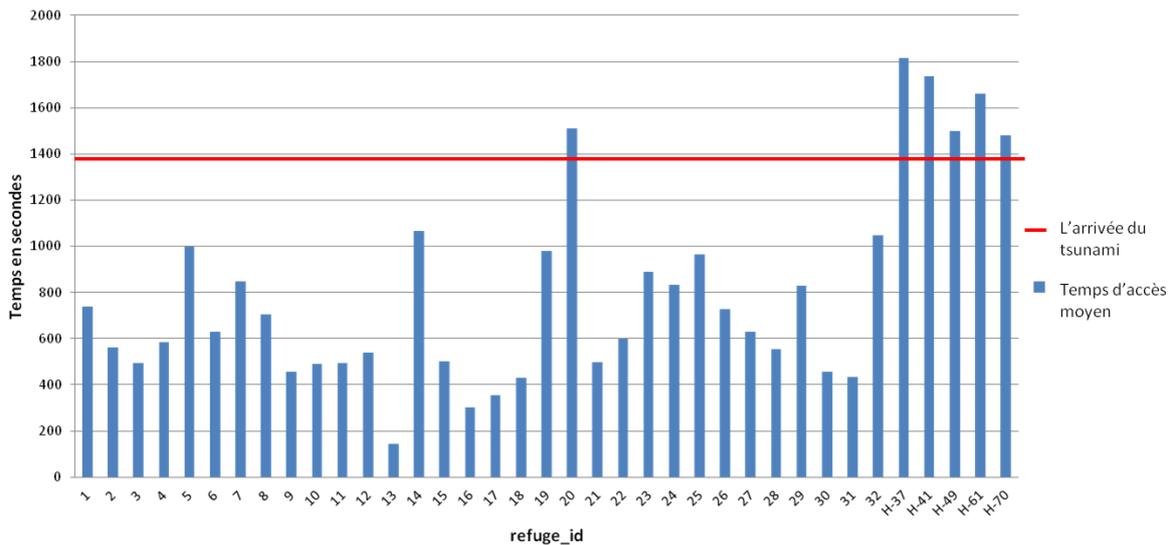


Figure 102. Temps d'accès moyen aux refuges. Scénario classique du jour ouvrable (L-J, 10H).

L'accessibilité en temps réel est cartographiée sur 4 étapes de la simulation pour comprendre en détail les enjeux de l'évacuation, en particulier sur la partie sud de la ville, Figure 103.

- Dans le premier départ, (Départ T+0s), 10% des populations totales se déplacent vers les refuges verticaux. Presque tous refuges verticaux sont utilisés, sauf les refuges 20 et 29 qui se trouvent assez loin. De plus, les refuges horizontaux ne sont jamais choisis pendant ce départ. Par ailleurs, toutes les personnes peuvent atteindre les refuges en moins de 15 minutes de déplacement.
- Pour le quatrième départ (Départ T+90s), quelques refuges sont déjà indisponibles. Seuls 12 refuges verticaux sont encore disponibles. Certains refuges ont été remplis avant que le deuxième départ ne commence. Les personnes situées sur la partie sud de la ville doivent disposer de plus de 25 minutes pour aller à un des refuges disponibles. A ce moment, les refuges horizontaux ne sont pas encore utilisés.
- La situation est plus délicate au septième départ. Seuls 3 refuges verticaux sont encore disponibles. A ce moment, deux zones refuges horizontales sont déjà utilisées. Pour les personnes qui choisissent ce départ, plus de 25 minutes sont nécessaires pour accéder aux refuges du fait de l'indisponibilité des refuges les plus proches.
- Le dernier départ est la pire situation. Dans ce cas, il n'y a aucune chance d'accéder à un refuge vertical. Seuls des refuges horizontaux peuvent accueillir les personnes évacuées, et ils sont à plus de 30 minutes de temps de marche. Pour les personnes se situant dans certains bâtis de la partie la plus au sud de la ville, proche de l'embouchure de la rivière, plus de 40 minutes de déplacement sont nécessaires pour atteindre les zones refuges horizontales les plus proches.

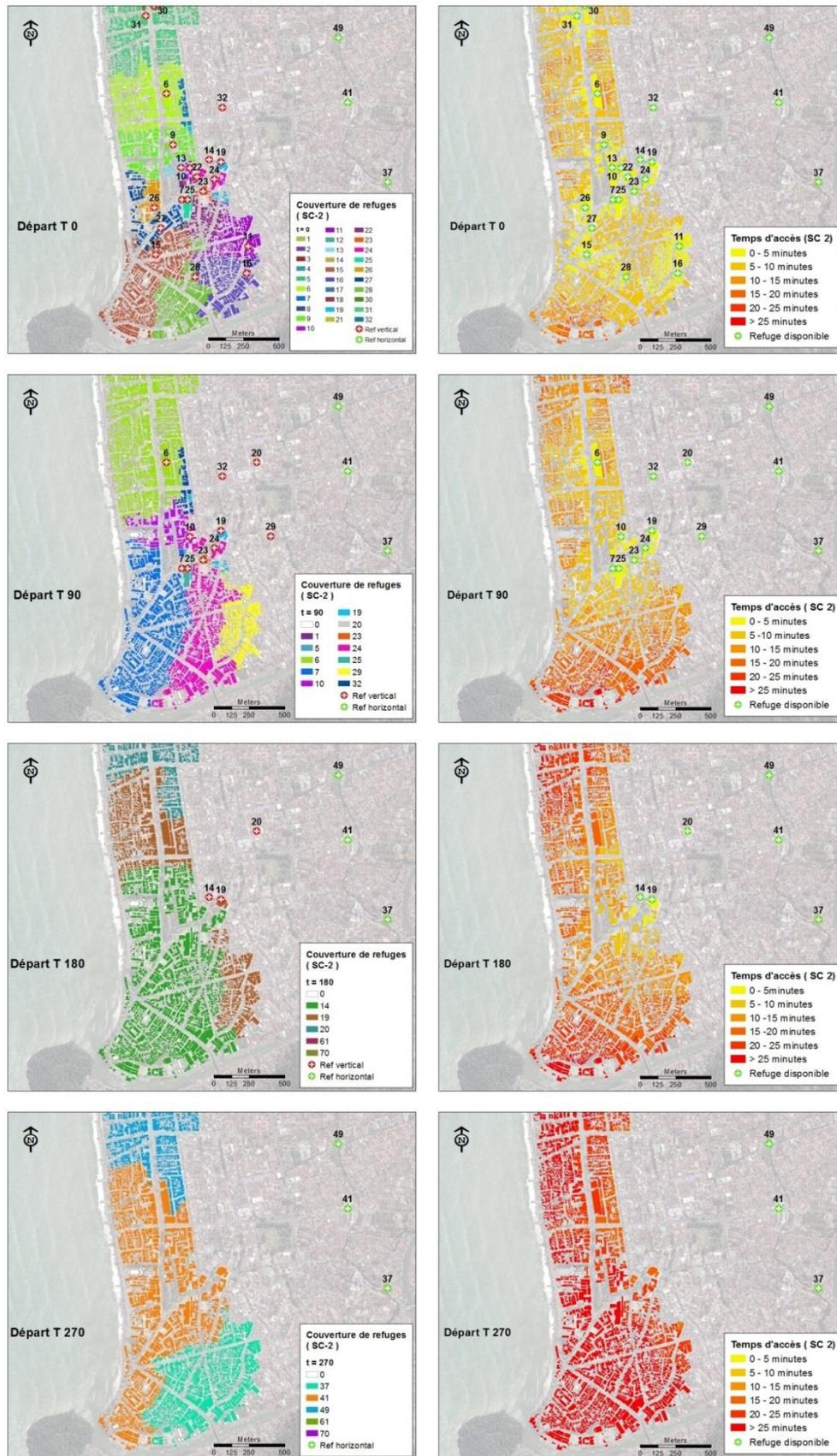


Figure 103. Couverture dynamique des zones refuges et temps d'accès un jour ouvrable, L-J 10h.

L'accessibilité des zones refuges durant cette période est plus mauvaise que la nuit : tous les individus sont théoriquement mis à l'abri au bout de 46 minutes (contre 38 minutes la nuit). C'est une durée très longue en considérant que la première vague de tsunami arrive 23 minutes après le séisme tsunamigène. Après 23 minutes, 45 200 personnes sont théoriquement déjà dans les abris. Mais par ailleurs, les personnes potentiellement sauvées sont présentées également sur la Figure 104, et cette estimation donne un résultat pessimiste quant à l'accessibilité réelle des zones refuges. Il n'y a que 28 412 personnes qui sont potentiellement sauvées au moment de l'arrivée de la vague. Cela signifie que 61,02% de la population sont en danger.

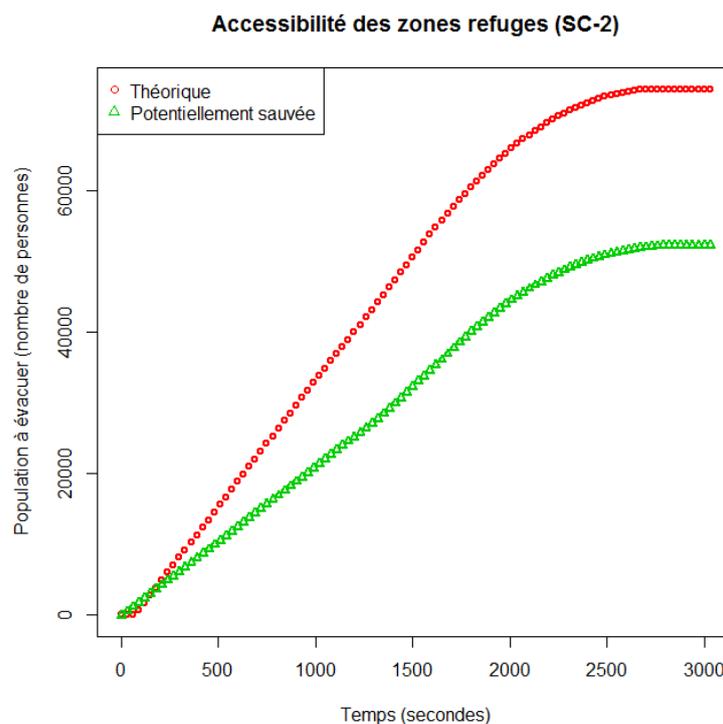


Figure 104. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 2.

9.3.2.3. Accessibilité du Vendredi midi : V 12 H (SC-3)

Le vendredi 12h est un moment très particulier à Padang où les hommes se réunissent dans les mosquées, qui atteignent alors leur capacité d'accueil maximale. 62 264 personnes sont alors présentes en moyenne dans la zone d'étude. Le temps d'accès moyen par refuge pour cette période est similaire à celui du scénario 2 (Figure 106). Par contre le nombre de bâtis dont le temps d'accès moyen à un refuge excède les 23 minutes est beaucoup deux fois plus élevé que celui du scénario 2. Environ 831 bâtis (soit 7 629 personnes) dépassent 23 minutes de temps d'accès moyen à un refuge. Avec ce scénario, il n'y a que 25 bâtis (soit 229 personnes) dont le temps d'évacuation dépasse 23 minutes. La lecture des cartes de densité humaine et de temps d'accès moyen met en évidence

certaines bâtiments possédant une densité forte de population et également un temps d'accès moyen aux refuges supérieur à 23 minutes (Figure 105). C'est le cas pour certains bâtis situés sur la zone la plus au sud, proches de l'embouchure de la rivière. Nous remarquons également certains bâtiments au nord, proches du rivage, à l'Ouest du refuge 2 et 31.

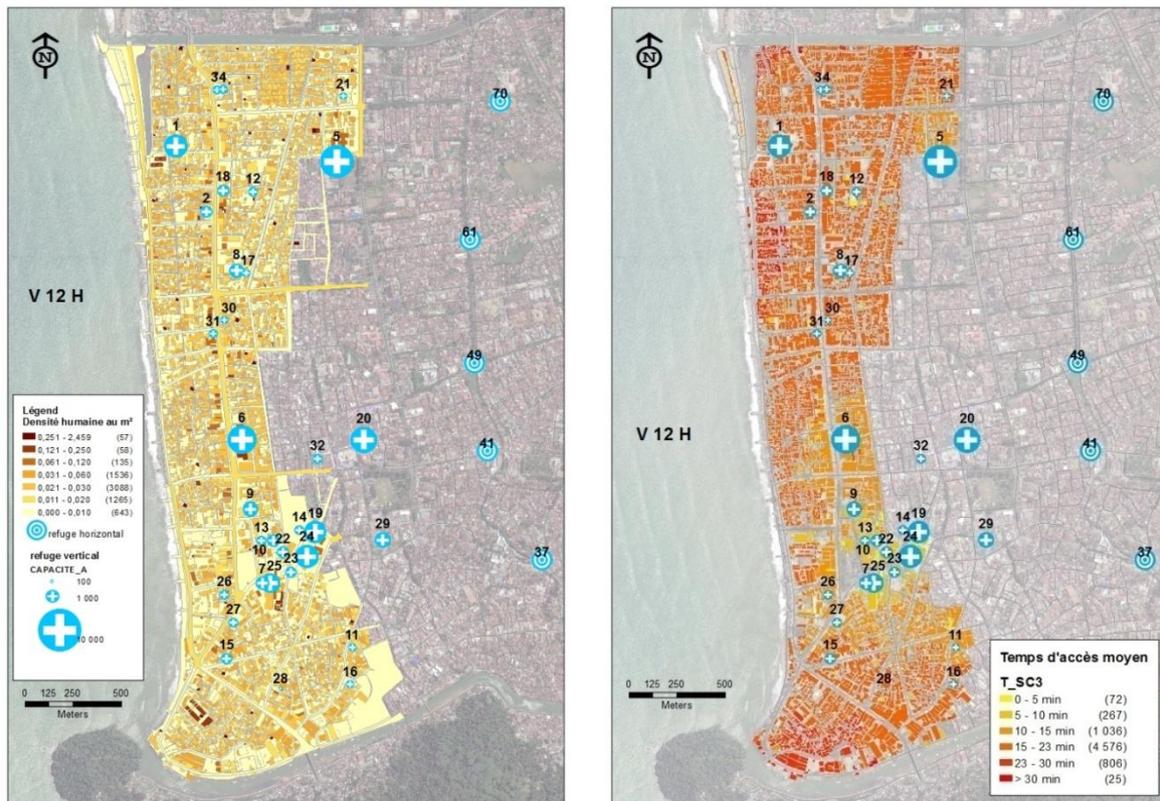


Figure 105. Scénario classique du Vendredi, 12H. A gauche : carte de densité de population et de position des refuges. A droite : carte des temps d'accès moyen aux refuges.

Temps d'accès moyen par refuge (SC3)

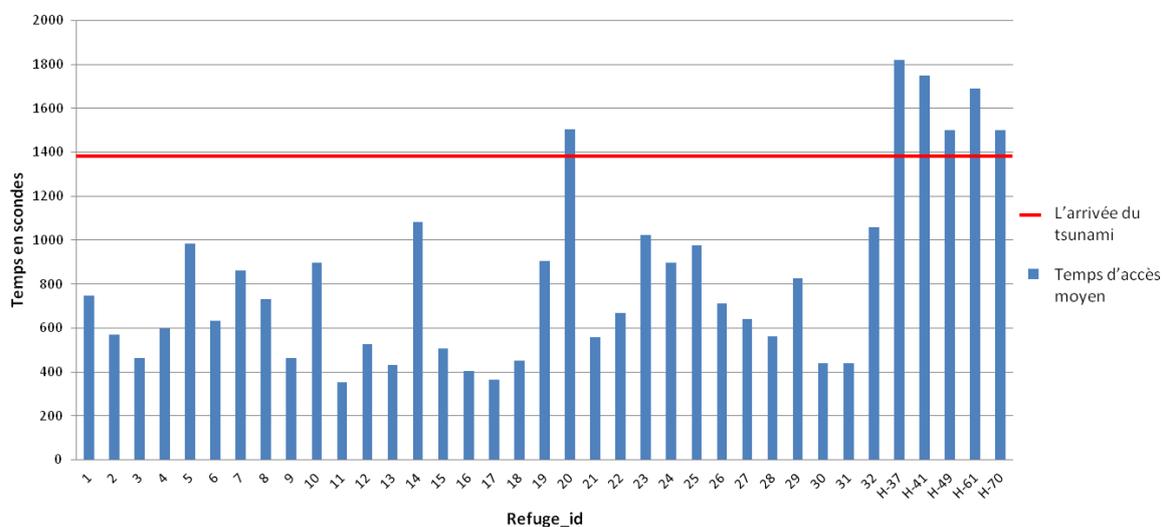


Figure 106. Temps d'accès moyen aux refuges. Scénario classique du moment de la prière le Vendredi, 12H.

La situation devient plus délicate quand on considère l'accessibilité réelle des évacuations. Toutes les populations seront théoriquement abritées à partir de 44 minutes (2 640 secondes) après de séisme. De plus, environs 43 500 personnes sont abritées en 23 minutes (1380 secondes). Dans ce cas là, environ 18 764 personnes sont encore en déplacement.

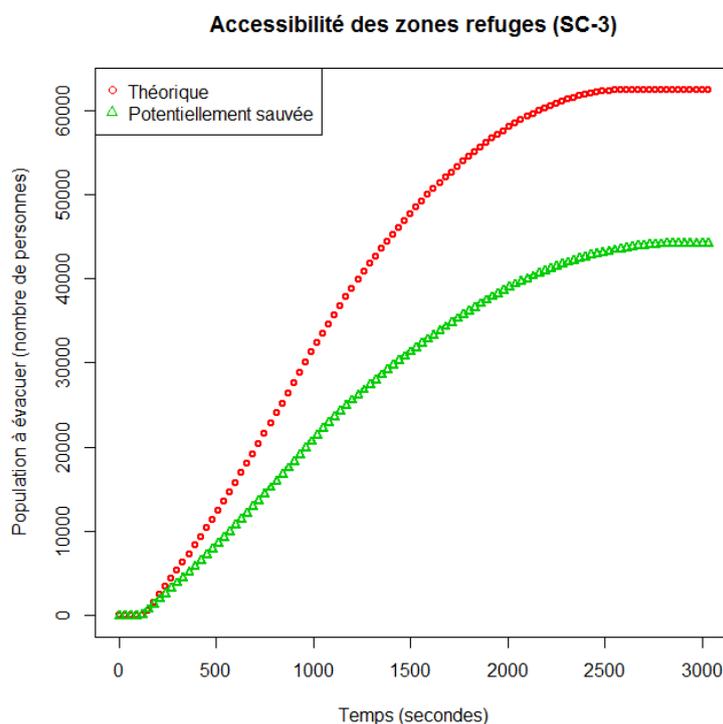


Figure 107. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 3.

Par ailleurs, on estime que 28 552 personnes sont potentiellement sauvées après 23 minutes de déplacement. En comparant avec la totalité des personnes présentes dans la zone d'étude, il reste 54,14% de la population qui est encore en danger.

9.3.2.4. Accessibilité de week-end à 18 H: WE 18 H (SC-4)

Le scénario de week-end, à la fin de l'après-midi est un des scénarios ayant la plus forte population dans la semaine, avec 82 902 personnes à évacuer. Certains bâtiments et zones de plein air à côté de la plage sont saturés pendant cette période. La plupart des personnes situées à proximité du rivage à ce moment sont les gens habitant à l'extérieur de cette zone. Ils viennent pour profiter du coucher de soleil ensemble avec les amis et la famille.

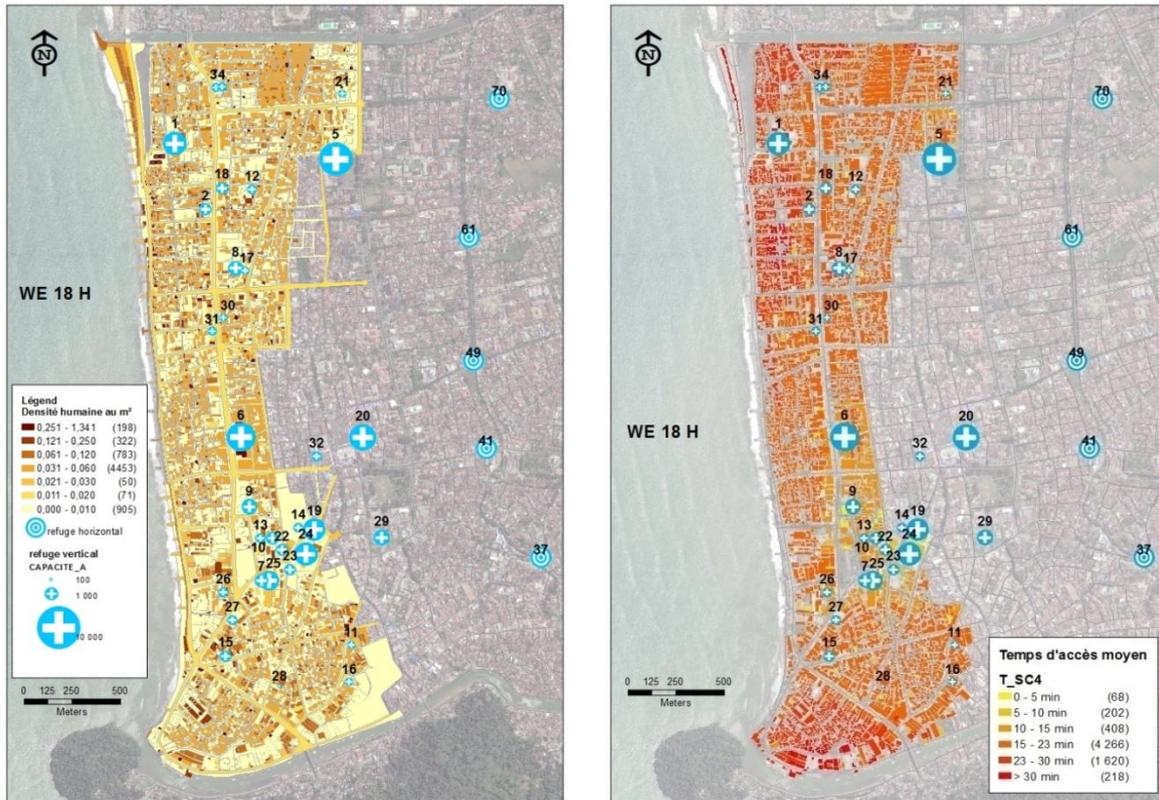


Figure 108. Scénario du week-end classique à 18H. A gauche : carte de densité de population et de position des refuges. A droite : carte des temps d'accès moyen aux refuges.

En considérant qu'un tsunami se produise durant ce scénario, environ 22 467 personnes dépassent le temps d'accès moyen de 23 minutes pour atteindre les refuges. Ils sont tous obligés de marcher plus de 23 minutes pour être en sécurité. La localisation de ces personnes se disperse sur la partie sud proche de la rivière et sur la partie nord proche du rivage (Figure 108). Ces zones sont donc les zones prioritaires dans la planification des évacuations.

L'accessibilité réelle durant cette période montre que 48 850 personnes sont **théoriquement** abritées en 23 minutes (soit 60% de la totale population) (Figure 109). En comparant avec la courbe d'accessibilité des personnes **potentiellement sauvées**, le nombre de personnes sauvées sur les abris est diminué du fait de leur dépassement de capacité. Ce ne sont donc que 23 761 personnes qui peuvent atteindre les refuges en sécurité en 23 minutes de déplacement. Environ 68,93% de totale population pendant cette période sont en danger.

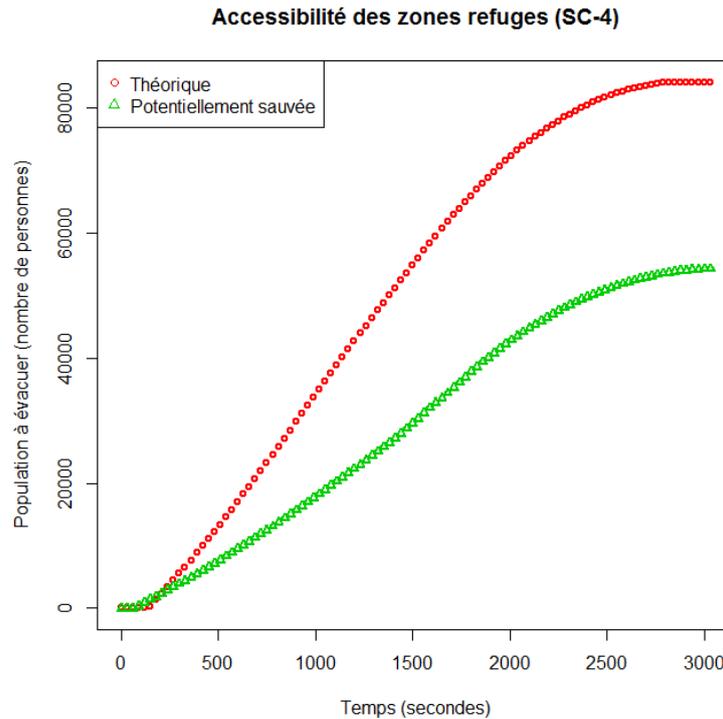


Figure 109. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 4.

9.3.2.5. Accessibilité le jour ouvrable durant le Ramadan : RLJ 10 H (SC-5)

Afin de connaître l'accessibilité durant la période de Ramadan, nous avons analysé la densité humaine en la croisant avec le temps d'accès moyen par objet. La population se situe plutôt sur les bâtiments. Sa distribution spatiale sur l'ensemble de la zone de plein air est faible du fait de la réduction des déplacements de personnes sur cette période. La totalité des personnes à évacuer est de 54 191.

L'évaluation de l'accessibilité des refuges pendant cette période montre que le temps d'accès moyen est meilleur que les autres périodes, même meilleur que celle de la nuit qui se caractérise par un plus faible volume de personnes à évacuer. Ceci s'explique aussi par la disponibilité de toutes les zones refuges verticales pendant cette période (Figure 111). Il n'y a que 3 947 personnes qui dépassent la limite de 23 minutes pour se mettre à l'abri. Alors que durant la nuit, il y a presque autant de personnes (3 883 personnes) qui dépassent 23 minutes de déplacement.

De plus, deux zones refuges horizontales ne servent jamais pour l'évacuation. On remarque également la zone sur la partie sud où se trouve une accumulation de refuges verticaux. Le temps d'accès moyen pour les bâtis autour de ces zones refuges est le plus rapide dans ce secteur (Figure 110).

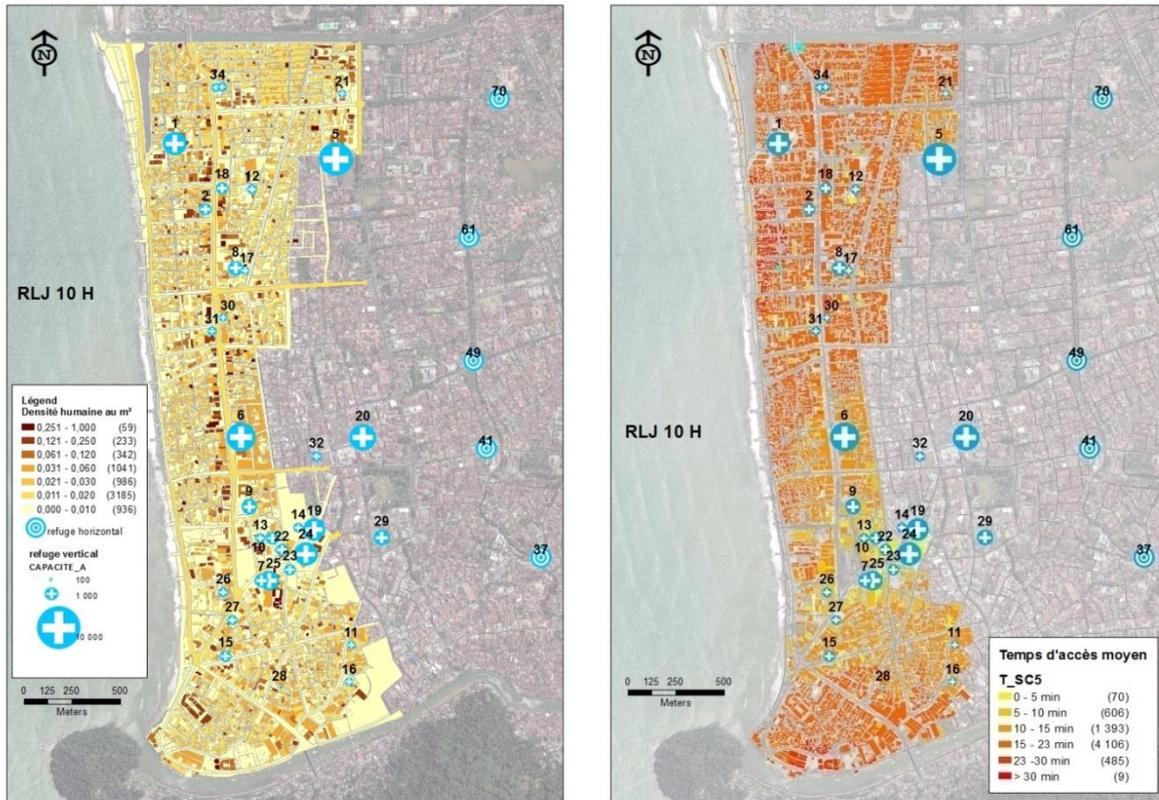


Figure 110. Scénario du ramadan en semaine à 10H. A gauche : carte de densité de population et de position des refuges. A droite : carte des temps d'accès moyen aux refuges.

Temps d'accès moyen par refuge (SC5)

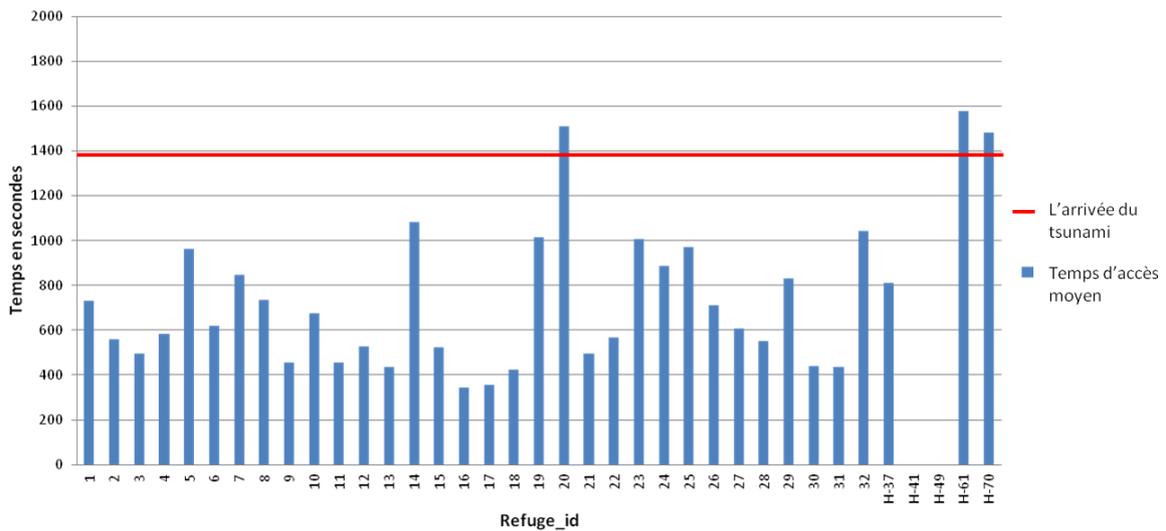


Figure 111. Temps d'accès moyen aux refuges. Scénario du Ramadan en semaine, à 10H.

L'efficacité de l'évacuation pendant cette période peut être évaluée par les courbes de la Figure 112, et comparée à celle de l'évacuation de nuit. 41 165 personnes (75,96%) sont théoriquement déjà abritées en 23 minutes (1 380 secondes), contre 30 205 personnes (71,8%) durant le scénario de nuit. En comparaison avec la courbe d'accessibilité des personnes

potentiellement sauvées, il n’y a que 26 791 personnes qui sont potentiellement sauvées après 23 minutes de déplacement. A ce moment-là, il reste environ 50,56% de la totalité de population qui est encore en déplacement (en danger).

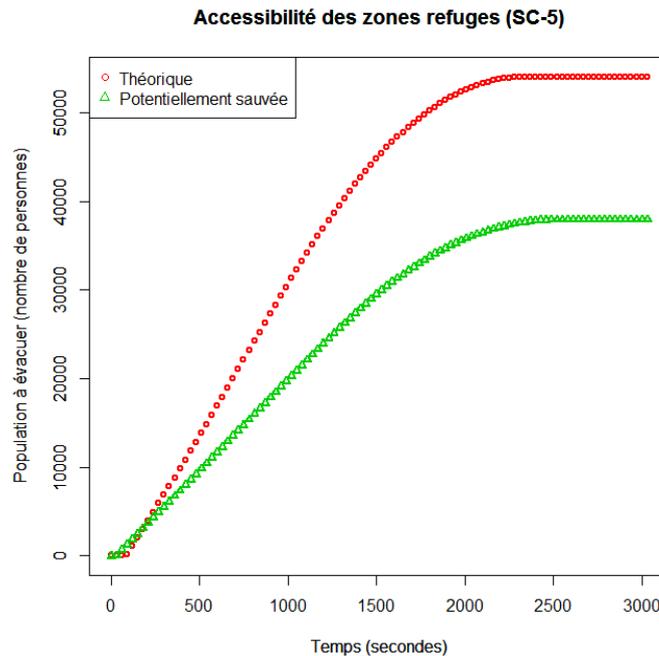


Figure 112. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 5.

9.3.2.6. Accessibilité le week-end 18h durant le Ramadan : RWE 18 H (SC-6)

Cette période est la plus dense dans l’année sur notre zone d’étude. Environ 106 019 personnes sont alors situées dans cette zone urbaine. La population se réunit dans les restaurants et les cafés pour manger après le coucher du soleil. Les mosquées et le centre commercial sont également pleins à ce moment (Figure 113). Ceci a pour conséquence l’augmentation du temps d’accès moyen pour atteindre les zones refuges. Comme la disponibilité des refuges reste la même, le remplissage des refuges se fait plus rapidement. En considérant le temps d’accès moyen de chaque espace, le nombre de personnes qui dépassent 23 minutes de déplacement atteint 39 879 personnes. 6 659 d’entre elles dépassent 30 minutes de déplacement, et sont situées sur la partie sud proche de la rivière ou sur la partie nord proche du rivage. C’est le pire scénario d’évacuation à considérer. A partir de cette étude, le programme de réduction de risque devrait considérer l’accessibilité des évacuations durant cette période. La politique de prévention doit prendre en compte la situation la plus mauvaise afin de pouvoir sauver le plus de vies possible.

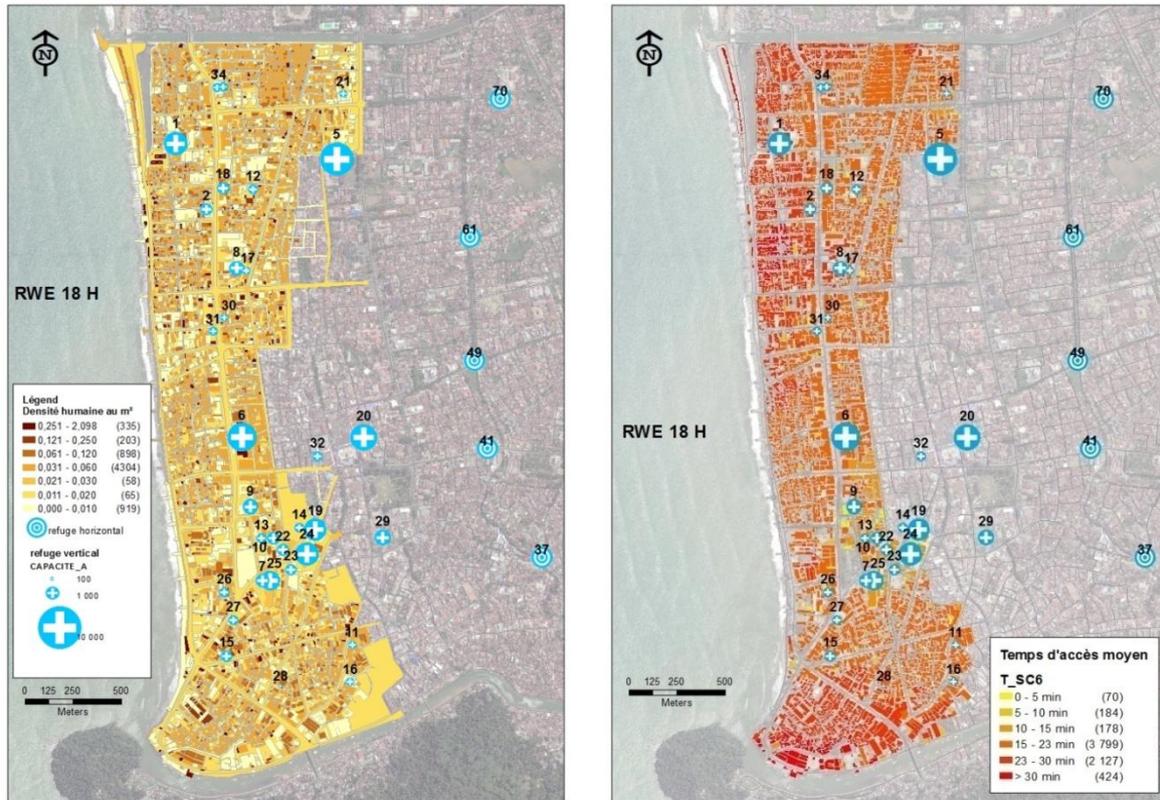


Figure 113. Scénario du Ramadan le week-end à 18H. A gauche : carte de densité de population et de position des refuges. A droite : carte des temps d'accès moyen aux refuges.

Temps d'accès moyen par refuge (SC6)

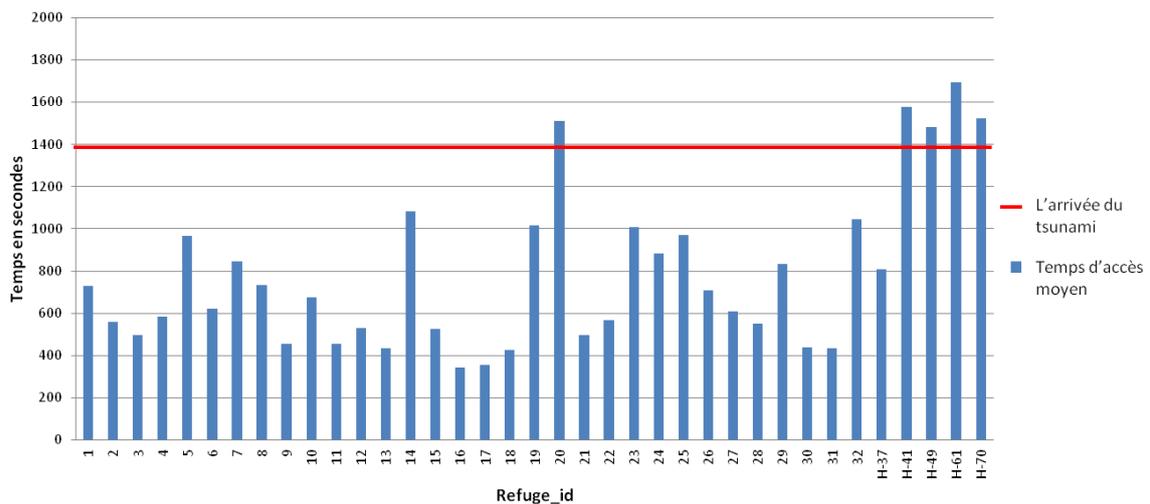


Figure 114. Temps d'accès moyen aux refuges. Scénario du Ramadan le week-end, à 18H.

Le remplissage des zones refuges pour le scénario 6 est le plus rapide comparée aux autres scénarios. Au quatrième départ (Départ T+90s), il n'y a que 9 refuges verticaux qui sont encore disponibles (Figure 115). C'est très peu en comparant à la disponibilité des refuges lors des scénarios précédents : en comparaison, à ce départ, 12 refuges sont disponibles pour le SC1 (nocturne, L-J 02h00) et SC2 (jour ouvrable, L-J 10h00).

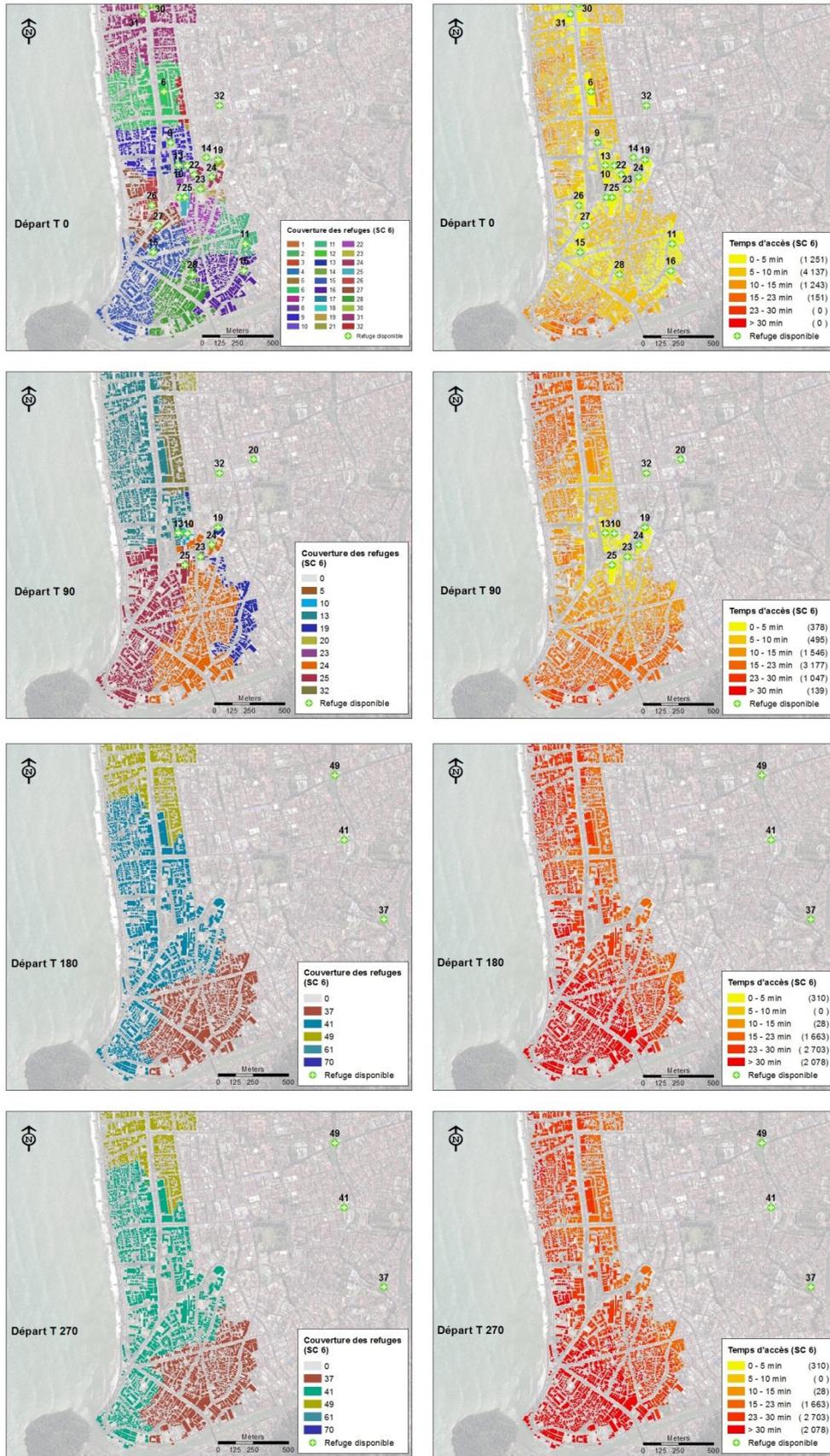


Figure 115. Couverture dynamique des zone refuges et temps d'accès le WE durant le Ramadan à 18h.

De plus, la similarité des temps d'accès pour le septième (Départ T+180s) et le dernier départ (Départ T+270s) est notable. En effet, aucun refuge vertical ne fonctionne lors de ces deux départs. Cela a pour conséquence d'allonger les déplacements pour atteindre les refuges. Environ 4 781 bâtis (soit 70,5%) sont à plus de 23 minutes de déplacement à pied d'un refuge. 2 078 bâtis d'entre eux (soit 30,64%) dépassent plus de 30 minutes de déplacement avant de trouver une zone sécurisée.

L'ensemble de la population peut théoriquement être abritée à partir de 49 minutes. A l'arrivée de la vague (23 min après le séisme), il n'y a que 54 200 personnes qui sont théoriquement déjà dans les abris. Il reste environ 51 819 personnes qui sont encore en déplacement vers les refuges disponibles. La courbe de l'accessibilité de personnes potentiellement sauvées indique une valeur plus pessimiste encore : il n'existe que 24 530 personnes qui sont potentiellement sauvées après 23 minutes d'évacuation (Figure 116). Cela signifie qu'environ 76,86% de la totalité de population (soit 60 897 personnes) est encore en danger.

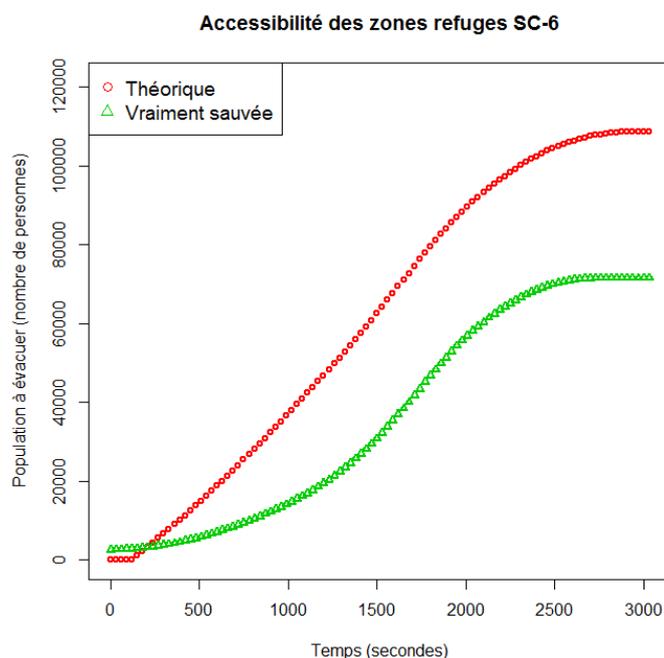


Figure 116. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 6.

9.3.2.7. Accessibilité le week-end 20hdurant le Ramadan : RWE20 H (SC-7)

Cette période est un moment un peu spécial dans notre analyse. La population est encore nombreuse car certaines personnes restent présentes dans la plupart des restaurants et des cafés. Par ailleurs, toutes les mosquées sont bien remplies par les fidèles pour les prières. Une des particularités de cette période à considérer en cas de tsunami est la présence des femmes et des enfants dans les mosquées pendant les prières. Cela augmente le risque du fait de leur vitesse de

déplacement plus limitée et d'autres facteurs qui les rendent particulièrement plus vulnérables comme dans le cas du tsunami 2004 à Banda Aceh (Leone et al, 2012). Sur l'ensemble de la zone, nous estimons qu'environ 77 540 personnes sont présentes.

En ce qui concerne le temps de déplacement pour atteindre les zones refuges, environ 17 321 personnes dépassent le temps d'accès moyen de 23 minutes. Ce sont toujours les bâtis situés dans la même zone que pour les autres scénarios (Figure 117). Pour 149 bâtis et les zones de plein air autour de ces bâtis (soit 1 703 personnes), les temps d'accès aux refuges dépassent les 30 minutes.

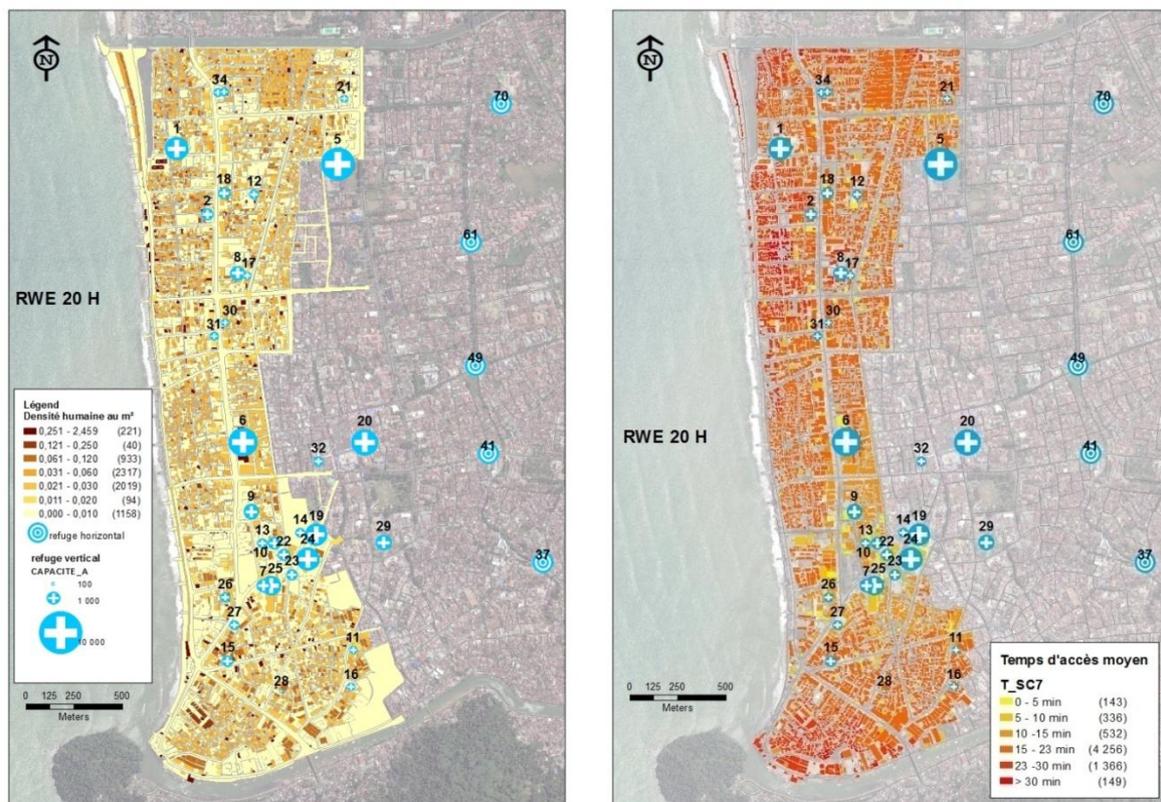


Figure 117. Scénario du Ramadan le week-end à 20H. A gauche : carte de densité de population et de position des refuges. A droite : carte des temps d'accès moyen aux refuges.

Au niveau de l'accessibilité des zones refuges par personne, l'ensemble de la population est théoriquement abrité à partir de 47 minutes (2 850 secondes). 61,79% d'entre eux (soit 48 286 personnes) sont déjà sur les abris en 23 minutes (1 380 secondes). Il reste 29 254 personnes qui sont en déplacement, surtout ceux qui ont commencé à se déplacer depuis les rivages (Figure 117, Figure 118).

L'accessibilité de personnes potentiellement sauvées est présentée également dans la Figure 118. Le volume de personnes potentiellement sauvées est de 19 731 individus après 23 minutes de déplacement suite au séisme tsunamigène. Cela fait dire qu'environ 74,55% de la totalité de personnes est encore en déplacement (en danger).

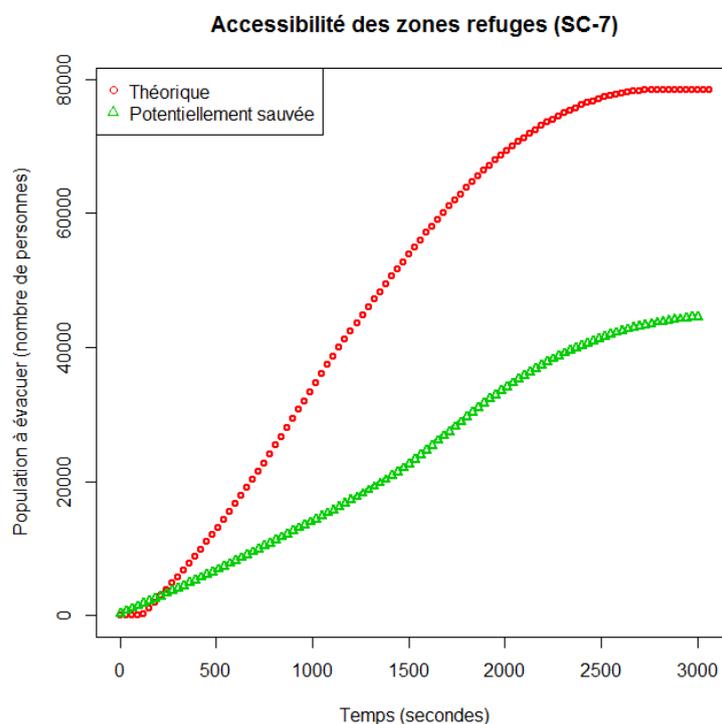


Figure 118. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 7.

9.3.2.8. Accessibilité pendant les vacances de fête : FET18 H (SC-8)

C'est une période aussi intéressante à analyser. Durant ce moment, la totalité de personnes présentes dans la zone d'étude est de 87 987 personnes. Bien que ce moment soit rare dans l'année, il correspond aux densités de population les plus fortes aux alentours des plages (Figure 119). De plus, la plupart des personnes arrivées sont les gens d'origine de l'extérieur de la ville. Ils ne connaissent peut-être pas bien la vulnérabilité de cette zone face à un tsunami, et sont peut-être de surcroît moins bien entraînés aux procédures d'évacuation, ce qui augmente leur vulnérabilité.

En ce qui concerne le temps d'accès moyen depuis les bâtis, les personnes situées dans 2 072 bâtis (soit 881 personnes) n'atteignent les zones refuges qu'après 23 minutes de déplacement (Figure 119), et pour 298 bâtis proches du rivage (soit 3 866 personnes), le temps d'évacuation dépasse 30 minutes sur les voies de communication.

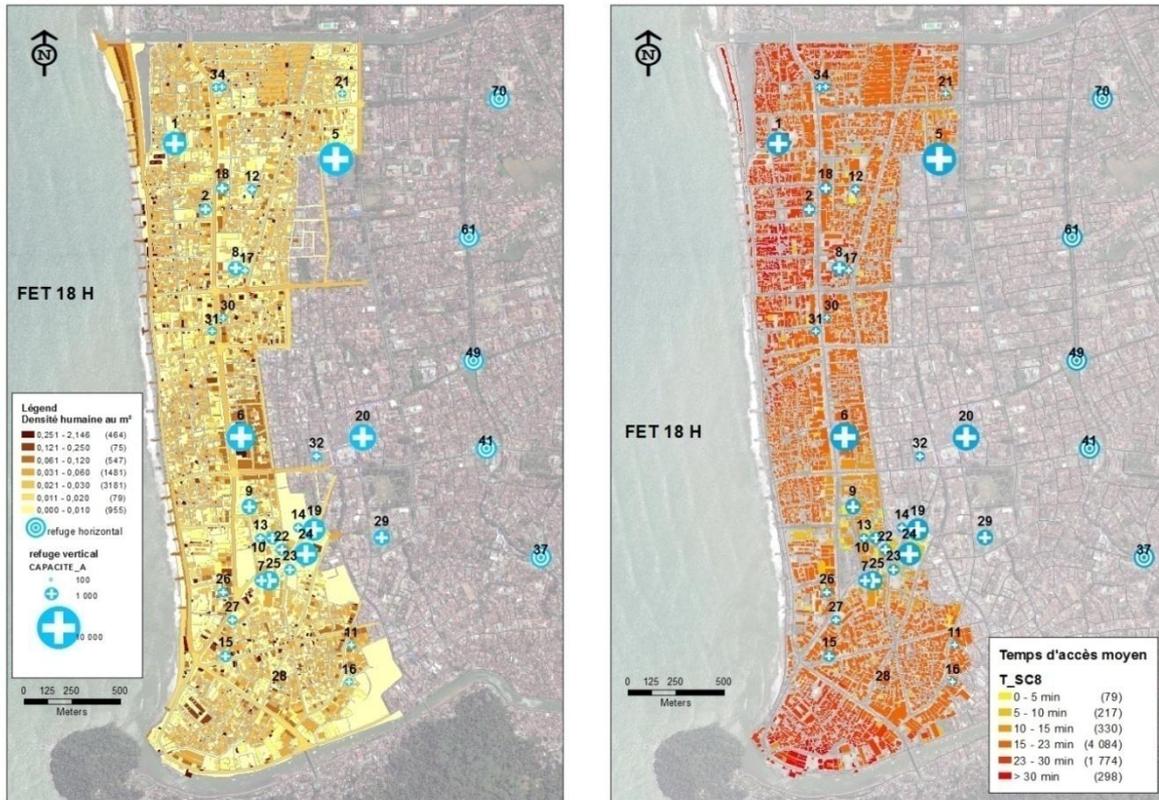


Figure 119. Scénario de Fête à 18H. A gauche : carte de densité de population et de position des refuges. A droite : carte des temps d'accès moyen aux refuges.

En ce qui concerne la sauvegarde des personnes, toute la population est théoriquement mise à l'abri dans 50 minutes (3 000 secondes) de déplacement après de séisme (Figure 120). Au moment où la première vague arrive vers 23 minutes, seulement 55,5% de population (49 949 personnes) sont dans les refuges si les personnes suivent les consignes d'évacuation. En comparaison avec la courbe de l'accessibilité de personnes potentiellement sauvées, environ 26 161 personnes sont déjà sur les abris après 23 minutes de déplacement. Ce n'est qu'environ 29,73% de la population totale présente lors du scénario 8. Il reste encore 70,27% de la population totale qui est encore en danger.

Accessibilité des zones refuges (SC-8)

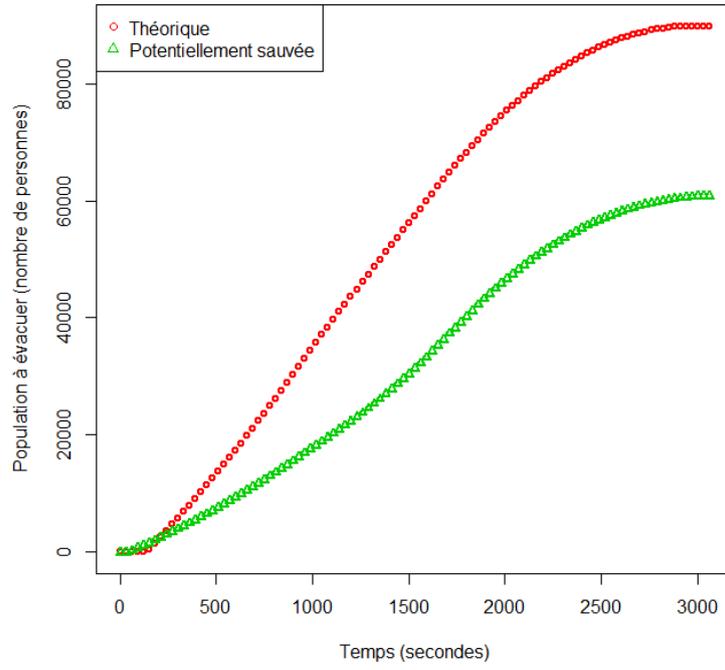


Figure 120. Accessibilité réelle et théorique des refuges verticaux lors du scénario 8.

Conclusion du chapitre

La simulation dynamique des évacuations que nous avons proposée permet d'intégrer les zones refuges verticales et horizontales, mais aussi le paramètre essentiel qu'est la limite de capacité d'accueil d'une zone refuge verticale, ce qui n'est pas possible dans le modèle statique. Les refuges pleins sont directement qualifiés comme indisponibles (fermés) lorsqu'ils atteignent ou dépassent leur capacité lors d'une itération. Par ailleurs le modèle de simulation reste le plus proche possible de la réalité d'une évacuation, en simulant un vidage progressif des zones à évacuer, même si rapide, avec nos paramètres (un immeuble est vidé en 5 minutes).

De plus, ce modèle s'ajuste à la variation de densité humaine. Les scénarios des évacuations que nous avons analysés tiennent compte de la variation spatio-temporelle de densité humaine à Padang. Lorsque la population présente est nombreuse comme le week-end vers 18h, les zones refuges verticales sont remplies plus vite. Ces refuges n'arrivent pas accueillir les personnes évacuées pour l'itération prochaine. A l'inverse pendant la nuit, il existe les zones refuges qui sont encore disponibles à la fin des évacuations.

En considérant la fermeture de certains refuges pendant la nuit, la simulation montre que la capacité d'évacuation est bien impactée. Ce résultat se vérifie par la comparaison entre le scénario de nuit (SC1) et le scénario de matin pendant le Ramadan (SC5). En effet, le SC5 présente une situation plus dense en population que le SC1, et cependant le temps d'accès aux refuges pendant le SC5 est meilleures que le SC1.

Ce modèle de simulation prouve également que retarder la décision d'évacuer provoque l'allongement du temps d'accès au refuge. Les refuges plus proches sont déjà remplis par les personnes évacuées à la première minute des évacuations. Les personnes à qui l'accès aux refuges est garanti sont celles qui décident d'évacuer plus vite. Ce résultat peut aider à sensibiliser les populations civiles à l'importance de la vitesse de réaction en cas d'alarme.

Partie 4. Discussions et recommandations

Cette partie soumet un ensemble de recommandations issues de l'expérience acquise pendant ce travail de thèse en vue d'une amélioration de renforcement de capacité d'évacuation et la préparation des collectivités de Padang au risque tsunami. Elle discute des propositions pour améliorer l'accessibilité d'évacuation en ajoutant les nouveaux refuges, et une prescription d'utilisation prioritaire des zones refuges verticales par les personnes les plus vulnérables. De plus, elle propose un plan d'évacuation par secteur dont les limites correspondent aux voies de communication de la ville (routes et rues). Cette partie analyse également les voies les plus empruntées pendant les évacuations.

Enfin, cette dernière partie discute des contributions de la thèse concernant l'évaluation de la répartition spatio-temporelle de l'exposition humaine, des capacités d'évacuation des populations, et des préconisations possibles pour le renforcement de la résilience face au tsunami. Elle décrit les approches et leurs limites, et les améliorations envisageables.

Chapitre 10. Recommandations générales pour renforcer la préparation face au risque tsunami à Padang.

Les analyses et résultats des travaux menés dans le cadre de cette thèse sont une source de réflexions qui amènent à formuler un certain nombre de recommandations destinées aux acteurs de la gestion du risque tsunami. Les propositions pointent essentiellement la question du renforcement des capacités d'évacuation de la population. La première recommandation consiste à installer de nouveaux refuges verticaux sur la zone d'inondation modélisée. Une seconde suggère la différenciation de l'utilisation des zones refuges suivant le type de personnes vulnérables. Ensuite, les recommandations concernent la préparation de la mise en sûreté de la population à l'aide d'un plan d'évacuation.

10.1. La mise en place de zones refuges supplémentaires.

10.1.1. La capacité d'accueil de la zone refuge requise

Nos analyses de l'accessibilité des zones refuges montrent que la capacité d'accueil de l'ensemble de zones refuges verticales (39 706 personnes) est insuffisante pour toutes les personnes évacuées. Pour certains scénarios d'arrivée de tsunami, l'inégalité entre la capacité d'accueil des zones refuges verticales et la totalité de population présente est très importante. Cette inégalité atteint plus de 2 fois la capacité d'accueil maximale de l'ensemble de zones refuges verticales existantes, surtout durant certains scénarios : SC4, SC6, SC8. Elle atteint presque 2 fois celle du scénario du jour ouvrable (SC2). Cela a de lourdes conséquences pour les personnes qui sont alors situées à proximité du rivage (loin des zones refuge horizontales). En cas de retard dans la prise de décision de fuite, ces personnes seront obligées de se déplacer plus loin pour se mettre en sécurité sur les zones refuges horizontales. Les zones refuges verticales sont déjà remplies à ce moment. Il ne reste aucun choix sauf les zones refuges horizontales, qui sont trop loin.

10.1.2. Implantation de zones refuges supplémentaires.

Parmi les perspectives d'amélioration des capacités d'évacuation, on peut optimiser l'emplacement des nouveaux refuges dans la zone d'inondation modélisée. Cette proposition réduirait considérablement le temps d'accès à des zones refuges.

L'installation des nouveaux refuges est à prioriser sur les endroits présentant une forte probabilité de victimes (Cf. les cartes d'index de risque humain). Les déplacements durant plus de 23

minutes depuis ces endroits aux zones refuges sont également un critère de choix pour l'emplacement de ces nouveaux refuges. Nous souhaitons cependant rester dans une approche pragmatique et pas forcément idéale, en proposant des constructions possibles à la fois sur le plan financier et foncier (terrains libres). En considérant la disponibilité des terrains, nous pouvons installer au moins deux zones refuges verticales. Nous proposons que le premier refuge soit placé dans la partie la plus au sud proche de la rivière et que le second refuge soit situé dans la partie nord de la zone d'étude. Les deux nouveaux refuges portent le numéro 39 (au sud) avec une capacité d'accueil de 2 392 personnes, et le numéro 38 (au nord) qui peut accueillir 4 608 personnes. Ces valeurs de capacités d'accueils sont calculées en considérant la superficie au sol et la fonction principale de chaque étage. Ses méthodes de calcul correspondent au calcul de capacité d'accueil de zone refuge présentée sur le chapitre 7.2. Pour le refuge numéro 38, on peut considérer un bâtiment de 1 800 m² avec 4 étages. Les deuxièmes et troisièmes étages sont considérés comme des étages refuges, agencés comme hall d'accueil. Le quatrième est l'étage toit dont toute la surface peut être utilisée pour accueillir les personnes évacuées. Ce nouveau refuge 38 sur la partie nord est placé à une distance d'environ 800 mètres au rivage. C'est un endroit assez loin du fait de la disponibilité faible de terrains plus proches du rivage. Mais cet endroit reste encore à moins de 23 minutes de marche depuis le rivage en considérant une vitesse de déplacement moyenne est de 1,1 m/s. Le refuge numéro 39 est, lui, un bâtiment de 1 250 m², mais placé à moins de 250 m du rivage. Il sera également bâti avec 4 étages. Par contre, il n'y a que 2 étages refuges dans ce bâti en considérant la hauteur d'eau modélisée (et l'incertitude de hauteur de tsunami). Le troisième étage aura la fonction de hall d'accueil comme l'étage toit au quatrième étage.

Afin de vérifier l'efficacité des nouveaux refuges, il est nécessaire de les intégrer dans la modélisation dynamique. Nous avons choisi le scénario 2 (L-J ; 10h) dans la simulation. C'est un des scénarios les plus fréquents dans l'année. La densité de population durant ce scénario est aussi élevée. De plus, c'est un moment où les jeunes sont présents dans les écoles. Le résultat de la simulation est présenté avec la localisation de nouveaux refuges sur la Figure 121. L'accessibilité des refuges avec les deux nouveaux refuges est comparée avec le résultat de l'accessibilité initiale, par une carte présentant la différence de temps moyen d'évacuation et donc le gain de temps que cela représente. Les zones les plus foncées gagnent jusqu'à 800 secondes, soit 13 minutes, et cela dans un grand rayon (entre 150 et 300 m), ce qui montre clairement l'impact positif de l'installation de ces deux refuges 38 et 39.

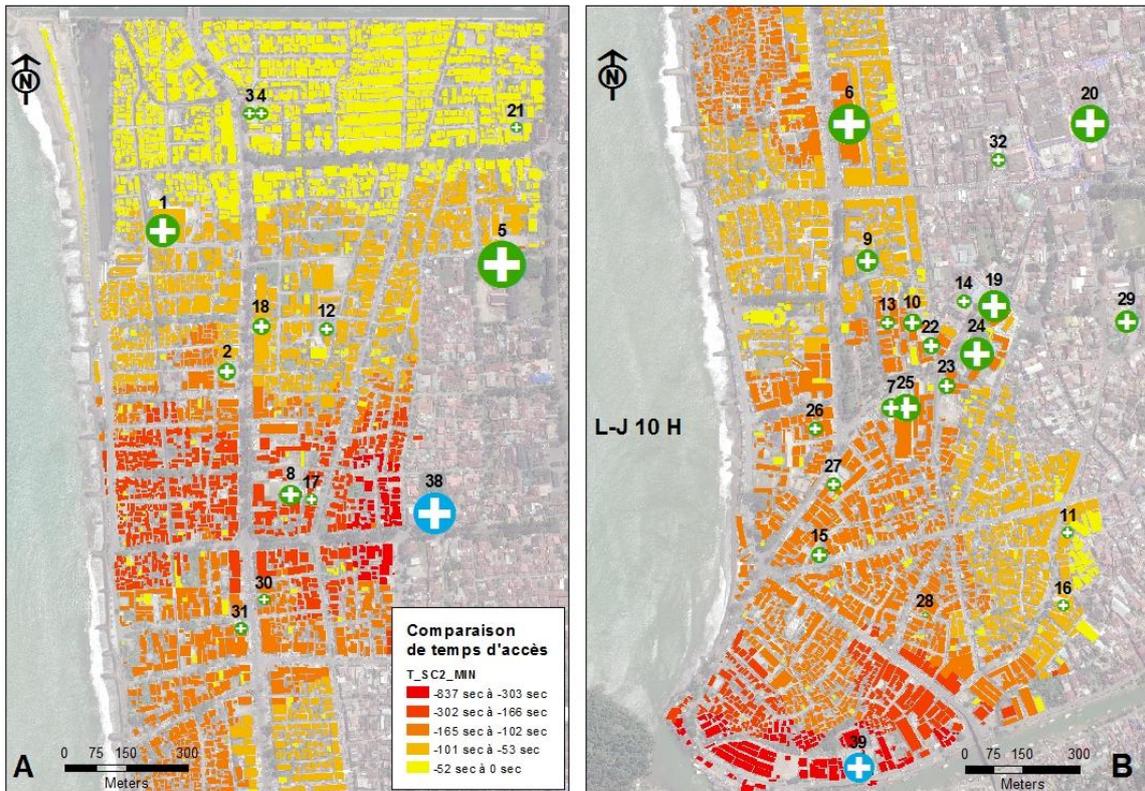
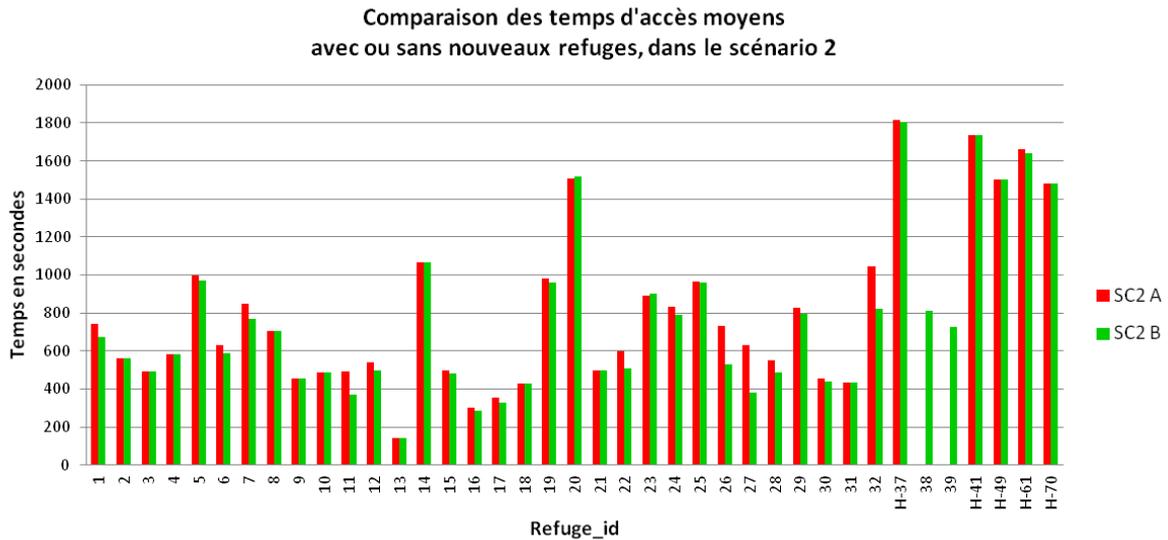


Figure 121. Différence des temps d'accès moyen entre la situation incluant deux nouveaux refuges 38 et 39 (en bleu) et la situation initiale pour le scénario 2.

Ce résultat confirme l'avantage qu'offre l'implantation de nouveaux refuges pour l'évacuation. Grâce à la capacité d'accueil des nouveaux refuges qui sont assez grands, les personnes évacuées prennent ces refuges comme première destination. On peut constater les polygones bâtis ayant la couleur rouge aux alentours des refuges numéro 38 et 39. Les personnes situées dans ces bâtis réduisent leur temps d'accès moyen pour atteindre des zones refuges d'environ 303 à 837 secondes par rapport à la situation initiale. Cela signifie que la construction de nouveaux refuges renforce sensiblement la capacité d'évacuation.

Les effets de cette proposition sont également soulignés par la représentation du temps d'accès moyen par refuge (Figure 122), pour chacun des deux scénarios : SC2 A pour la situation initiale et SC2 B pour la proposition de nouveaux refuges. On peut constater la diminution de temps d'accès entre le SC2 A et SC2 B, notamment sur les refuges 1, 5, 6, 7, 11, 12, 15, 16, 17, 19, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 et 32. La diminution de temps d'accès est également constatée sur les refuges horizontaux comme H-37 et H-61.



SC2 A = temps d'accès moyen initial
 SC2 B = temps d'accès moyen après la proposition de deux refuges supplémentaires

Figure 122. Comparaison de temps d'accès moyen durant le SC2 entre la situation initiale et la situation avec la proposition de deux nouveaux refuges.

La simulation de la proposition incluant des nouveaux refuges confirme l'amélioration de l'accessibilité des évacuations. Elle change la destination des personnes évacuées grâce à l'augmentation de la capacité d'accueil de ces refuges. Afin de synthétiser l'efficacité de la proposition avec deux refuges, nous présentons les courbes d'accessibilité des zones refuges pour les deux situations (Figure 123). Basée sur la courbe de l'accessibilité, après 23 minutes (soit 1 380 secondes), 45 224 personnes sont théoriquement abritées dans le scénario initial, alors que 51 699 personnes le sont dans le scénario avec deux refuges de plus.

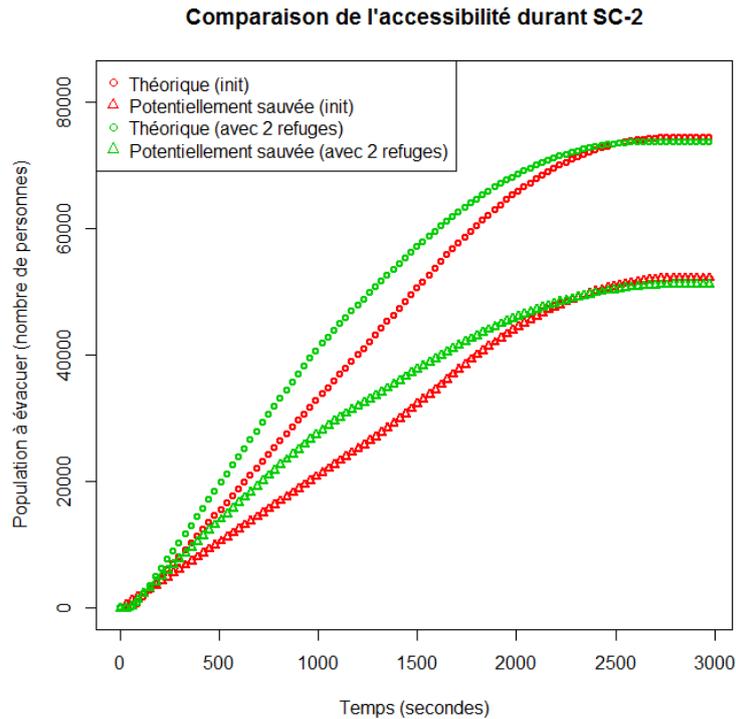


Figure 123. La comparaison de la courbe d'accessibilité durant le SC2 entre la situation initiale et la situation avec la proposition de deux nouveaux refuges.

En ce qui concerne les personnes potentiellement sauvées, on peut estimer que 42 047 personnes sont déjà abritées après 30 minutes de déplacement sur le scénario incluant 2 refuges de plus, contre 39 262 sur le scénario initial. En comparaison avec la totalité de personnes présentes pendant le SC2 (72 885 personnes), il reste encore 42,31% de la totalité des personnes qui sont encore en danger.

Toutefois, ce résultat ne permet pas de sauver tout le monde. Il sert d'abord de moyen pour sensibiliser les autorités au fait que la probabilité de victimes reste encore élevée. La construction de nouveaux refuges confirme bien l'amélioration très sensible de la capacité d'évacuation. La mise en œuvre de cette recommandation nécessite un engagement concret de la politique du gouvernement qui mérite d'être argumenté avec de tels résultats. Par exemple, le permis de construire de grands bâtiments sur la zone inondation modélisée doit être fourni à la condition d'ouvrir ces bâtiments à l'évacuation en cas de nécessité.

10.2. Prescription d'une priorité aux personnes les plus vulnérables.

Le modèle d'évacuation échelonnée que nous proposons considère que tous les individus dans la zone de couverture d'un refuge vertical sont autorisés à accéder au refuge à la condition que celui-ci ne soit pas rempli. Cependant, considérant la pénurie de refuges, et la variabilité des conditions physiques, nous avons envisagé de restreindre l'accès au refuge en fonction de la condition physiologique des personnes. Il semble plus aisé d'agir par prescription à l'avance, en destinant l'utilisation de zones refuges verticales aux personnes les plus vulnérables autour des refuges : les enfants, les personnes âgées, les femmes et également des personnes handicapées. Les jeunes et les adultes (les personnes en situation de travail généralement) sont dirigés eux vers les zones refuges horizontales. Ils ont la taille et la force physiologique suffisante pour se déplacer plus rapidement et plus loin.

Afin de tester cette proposition dans le modèle d'évacuation échelonnée, il faut d'abord classer les entités géographiques (bâtiments, zones de plein air, et voies de communication) autorisées à accéder aux refuges verticaux. Nous avons de nouveau choisi le scénario de lundi matin (L-J : 10h) dans la simulation. Les personnes situées dans les bâtiments comme fonction les écoles maternelles (ECOLE_M), les écoles primaires (ECOLE_P), les habitations (HINDIV, HTRAD, HCOL) sont autorisés à accéder aux refuges verticaux. Elles sont toutes considérées comme peuplées par les personnes les plus vulnérables durant cette période. Les enfants occupent majoritairement ces écoles. Les femmes et leurs enfants en bas âge, ainsi que les personnes âgées sont normalement dans les habitations. En revanche les personnes situées dans les bâtiments de travail classés comme (ADMI, BANK, ASURAN, INDUS, ENTREPOT, SECU) sont envoyées vers les refuges horizontaux. Les personnes des autres fonctions de bâtis et des zones de plein air sont autorisées à utiliser n'importe quelle zone refuge.

Cette proposition est difficile à appliquer en réalité sans une diffusion de l'information et des échanges pour une bonne compréhension de cette mesure par la population. Pour l'instant, cette proposition est appliquée de façon théorique dans le modèle de simulation des évacuations pour vérifier son impact. L'objectif est de vérifier le niveau d'amélioration de la capacité d'évacuation avec cette proposition.

Les résultats de simulation nous montrent l'amélioration de temps d'accès moyen pour les classes « habitations ». Sur la partie sud de la ville où il y a peu de zones refuges verticales, nous constatons la réduction considérable du temps d'accès pour les habitations. Les polygones en rouges, orange et jaune (Figure 124) sont la représentation de bâtiments habités par les personnes

vulnérables pendant le jour ouvrable comme le lundi matin à 10 heures. La prescription appliquée dans ce modèle améliore bien le temps d'accès moyen de classe habitation pour atteindre la zone de sécurisée. Leurs habitants gagnent du temps jusqu'à 408 secondes (soit 6,8 minutes) par rapporte le modèle initial. Par contre, les personnes situées sur les bâtiments de travail ont besoin de beaucoup plus de temps pour atteindre la zone refuge horizontale. Ils sont représentés par les polygones en bleu dans la Figure 124.

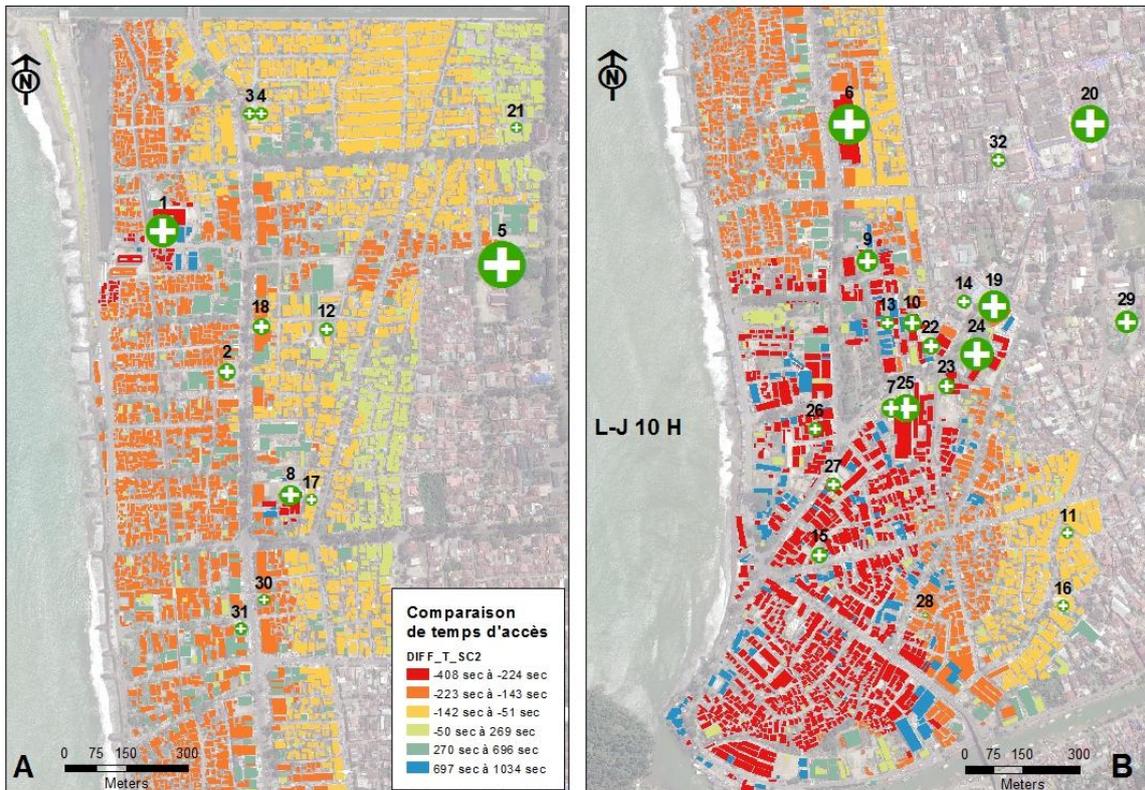
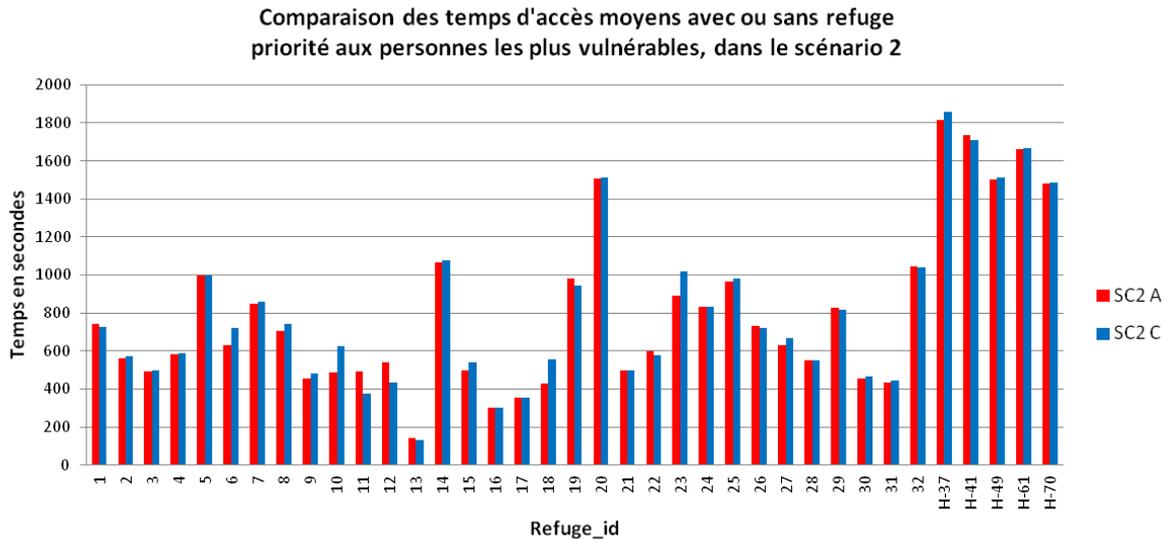


Figure 124. Différence des temps d'accès moyen entre une évacuation différenciée suivant l'activité des personnes et une évacuation sans prescription pour le scénario 2.

La distinction de la simulation est également présentée sur le temps d'accès moyen par refuge (Figure 125). L'accessibilité des refuges est exposée par le graphique SC2 A pour la situation initiale et celui de SC2 C pour la proposition différenciée. Toutefois on constate que seulement 8 refuges verticaux présentent une réduction de temps d'accès. La plupart de refuges verticaux voient une augmentation du temps d'accès moyen depuis les zones d'évacuation. Ceci peut être expliqué par l'extension de la couverture des zones refuges verticales du fait de l'interdiction d'accès pour les personnes situées dans les bâtiments de travail proches. Les individus venant d'habitations plus lointaines sont ainsi autorisés à accéder aux refuges. Il en résulte une augmentation du temps d'accès moyen pour chaque abri.



SC2 A = temps d'accès moyen initial

SC2 C = temps d'accès moyen après la proposition de refuges verticaux destinés aux personnes vulnérables

Figure 125. Comparaison de temps d'accès moyen par refuge durant le SC2 entre la proposition d'une évacuation différenciée et non différenciée.

Afin de connaître l'efficacité de la proposition différenciée, nous présentons les courbes d'accessibilité des zones refuges pour la situation initiale et la situation différenciée (Figure 126). On constate que le modèle différencié améliore l'accessibilité d'évacuation pour les personnes qui sont **potentiellement sauvées**. En considérant l'arrivée de la première vague 23 minutes après le séisme, 28 412 personnes sont potentiellement sauvées dans le scénario initial, contre 31 019 personnes dans le modèle différencié (l'amélioration d'accessibilité de la proposition différenciée est de 2 607 personnes). Cela vient du fait que cette proposition permet de ne pas trop saturer les refuges proches des personnes en fuite, et que cela diminue l'écart entre le volume de personnes collectées par les refuges et celui qu'ils peuvent réellement accueillir.

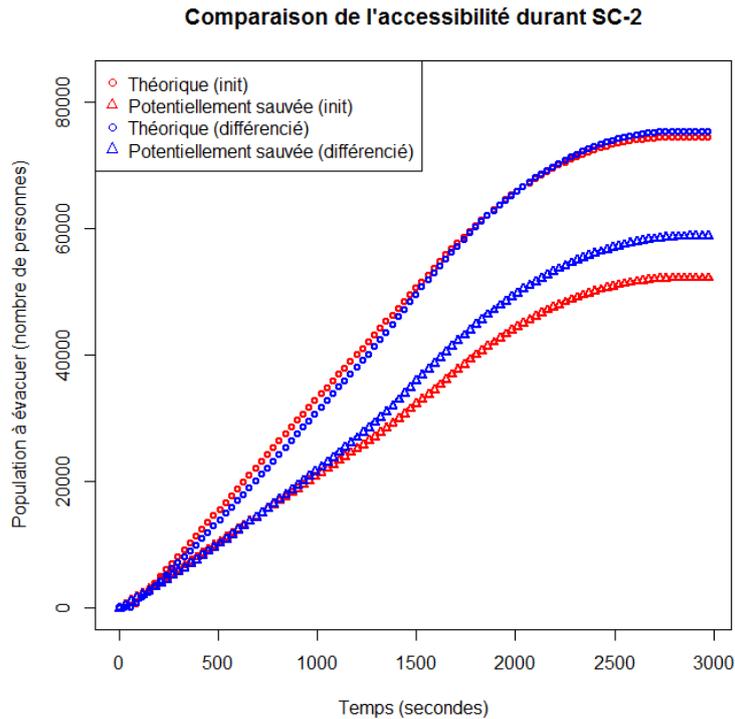


Figure 126. Comparaison des courbes d'accessibilité durant le SC2 entre la situation initiale et la simulation proposant une évacuation différenciée suivant les activités des personnes.

10.3. Combinaison des propositions de zones refuges supplémentaires et d'évacuation différenciée.

En considérant les résultats des simulations précédentes basées sur la proposition de nouveaux refuges et d'évacuation différenciée, il est intéressant de combiner ces deux propositions afin de connaître la meilleure façon d'améliorer l'accessibilité d'évacuation. Les deux nouveaux refuges verticaux sont installés pour compléter les autres refuges. Durant le processus d'évacuation, ces refuges verticaux sont destinés aux personnes plus vulnérables. Les jeunes et les adultes (les personnes en situation de travail généralement) sont envoyés vers les zones refuges horizontales.

Ces hypothèses sont intégrées dans une simulation échelonnée. Le scénario choisi est encore le scénario d'un jour ouvrable (lundi matin vers 10h). Le résultat de la simulation nous montre la réduction considérable du temps d'accès moyen depuis les bâtiments autour de nouveaux refuges Figure 127. La simulation nous indique également la diminution du temps d'accès moyen pour les classes habitations (HINDIV, HTRAD, HCOL) et école maternelle (ECOLE_M) et école primaire (ECOLE_P).

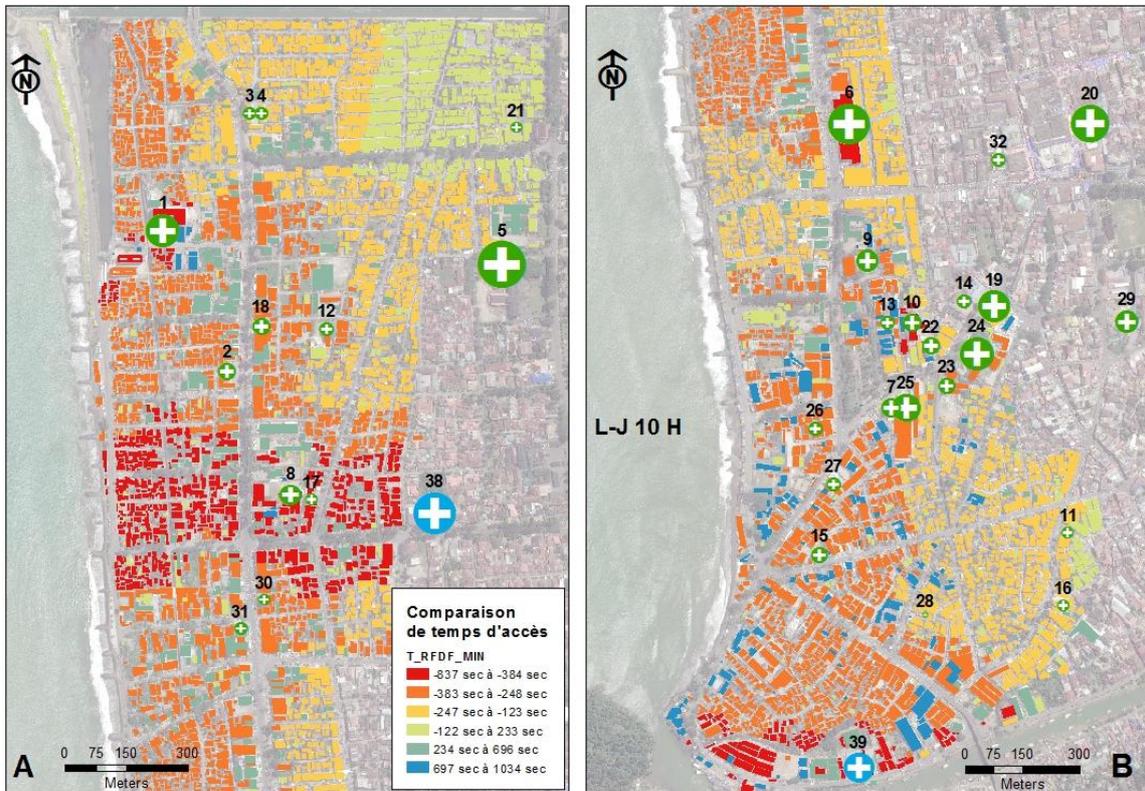
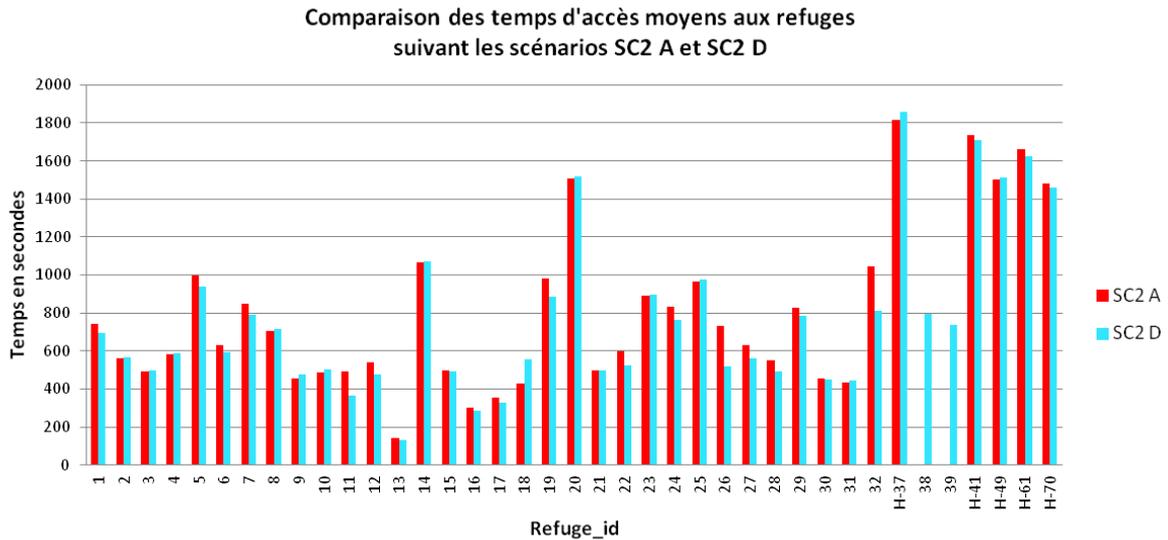


Figure 127. Différence des temps d'accès moyen entre une évacuation incluant deux refuges 38 et 39 (en bleu cercle) et une prescription pour une évacuation différenciée, vis-à-vis d'une évacuation sans option pour le scénario 2.

Les effets de cette proposition sont également soulignés par la représentation du temps d'accès moyen par refuge (Figure 128Figure 122), pour chacun des deux scénarios : SC2 A pour la situation initiale et SC2 D pour l'ensemble de proposition de nouveaux refuges et l'utilisation de refuges verticaux uniquement pour les personnes vulnérables. La diminution considérable de temps d'accès entre le SC2 A et SC2 D est comparable à celle entre les scénarios SC2 A et SC2 B. La diminution de temps d'accès concerne les refuges 1, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 19, 22, 24, 26, 27, 28, 29, 30 et 32. La diminution de temps d'accès est également constatée sur les refuges horizontaux comme H-41, H-61 et H-70.



SC2 A = temps d'accès moyen initial

SC2 D = temps d'accès moyen après la proposition de 2 refuges supplémentaires et les refuges verticaux destinés aux personnes vulnérables (différencié)

Figure 128. Comparaison de temps d'accès moyen durant le SC2 entre la situation initiale et la situation avec la proposition de deux nouveaux refuges et d'une évacuation différenciée.

Afin de déterminer l'efficacité globale de la proposition, nous présentons les courbes d'accessibilité des zones refuges pour la situation initiale et la situation combinant les deux propositions (Figure 129). Cette figure nous montre que cette combinaison améliore également le volume de personnes qui sont **potentiellement sauvées**. Sur le modèle initial, il existe environ de 52 188 personnes qui sont potentiellement sauvées à la fin de l'évacuation, alors qu'environ de 60 525 personnes sont potentiellement sauvées avec le modèle combinant toutes propositions. Ce dernier modèle augmente le volume de personnes potentiellement sauvées jusqu'à 8 337 individus. C'est plus efficace que le modèle différencié seul.

En considérant l'arrivée de la première vague 23 minutes après le séisme, 28 412 personnes sont potentiellement sauvées dans le scénario initial, alors que 34 960 personnes dans le modèle combinant toutes propositions (l'augmentation du volume de personnes sauvées est de 6 548 personnes). On peut estimer également que 28 412 personnes sont potentiellement sauvées sur le modèle initial, contre 34 960 personnes dans le modèle combiné (l'efficacité de ces propositions combinées est donc de 6 548 personnes).

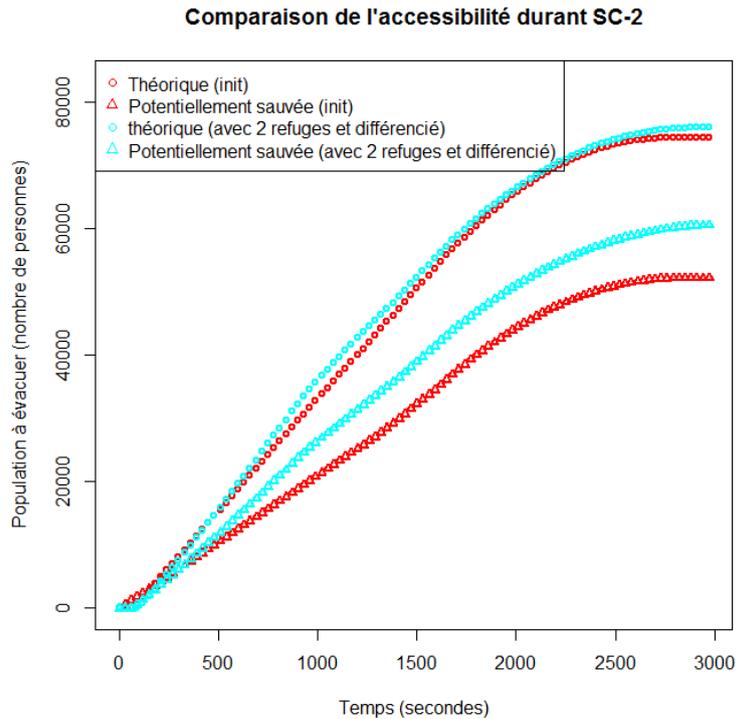


Figure 129. Comparaison de la courbe d'accessibilité durant le SC2 entre la situation initiale et une simulation proposant deux nouveaux refuges et une évacuation différenciée.

Les résultats de simulation de l'accessibilité des zones refuges nous permettent également de mettre ensemble les courbes d'accessibilité dans une même figure afin de bien distinguer les rôles de chaque proposition. Sur la Figure 130 nous présentons la comparaison entre la situation initiale, la situation avec deux nouveaux refuges et la situation avec la combinaison des propositions. Cette figure nous permet de bien comprendre que l'évacuation combinant toutes les propositions améliore nettement le volume de personnes potentiellement sauvées. L'amélioration du nombre de personnes évacuées est vérifiée du début à la fin d'évacuation.

Par ailleurs, la situation avec deux nouveaux refuges (les courbes en vert) montre une amélioration de l'accessibilité des refuges sur les deux courbes (théorique et potentiellement sauvée). Toutefois la totalité de personnes abritées à la fin d'évacuation ne change pas.

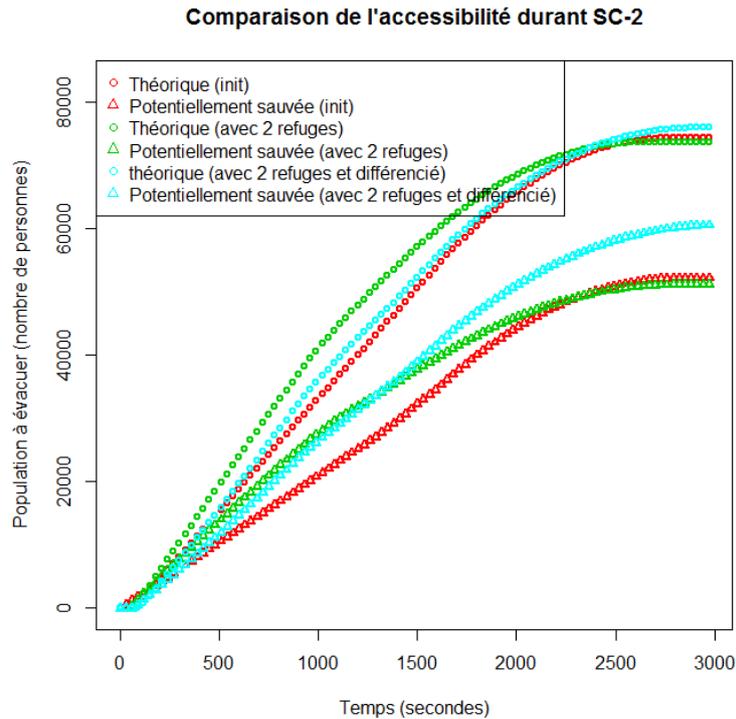


Figure 130. Comparaison de la courbe d'accessibilité durant le SC2 entre la situation initiale, la situation avec la proposition de deux nouveaux refuges, et la situation avec toutes les propositions.

10.4. Plan d'évacuation

Afin de réaliser un planning d'évacuation lors d'un tsunami à Padang, nous avons modélisé sur le chapitre précédent des couvertures spatiales et des temps d'accès en fonction de 8 scénarios choisis. Toutefois ces cartes semblent difficiles à appliquer. Les couvertures spatiales construites par le modèle ne sont pas dans les secteurs divisées par des routes (Figure 131). La population située dans un même secteur devrait être dirigée au même refuge afin de facilement communiquer le plan d'évacuation aux populations.

Afin que la carte soit opérationnelle, il est nécessaire de grouper la population dans le même secteur. Cette approche nécessite d'initialiser la construction des secteurs respectant les limites des quartiers (détourés par des rues). La taille des secteurs délimités et leur extension spatiale se base sur le morcellement de la couverture des refuges sur les différents pas de temps de simulation d'un scénario. Nous utilisons le réseau routier comme frontière de secteurs. Toutes les données de volumes de population des bâtis, plein airs et de voies de communication dans un secteur sont agrégées (par somme) aux secteurs.

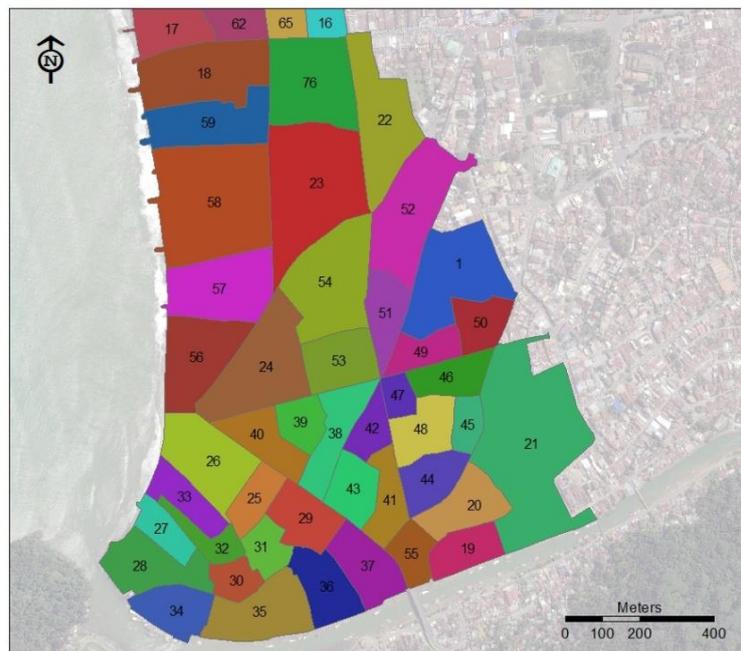
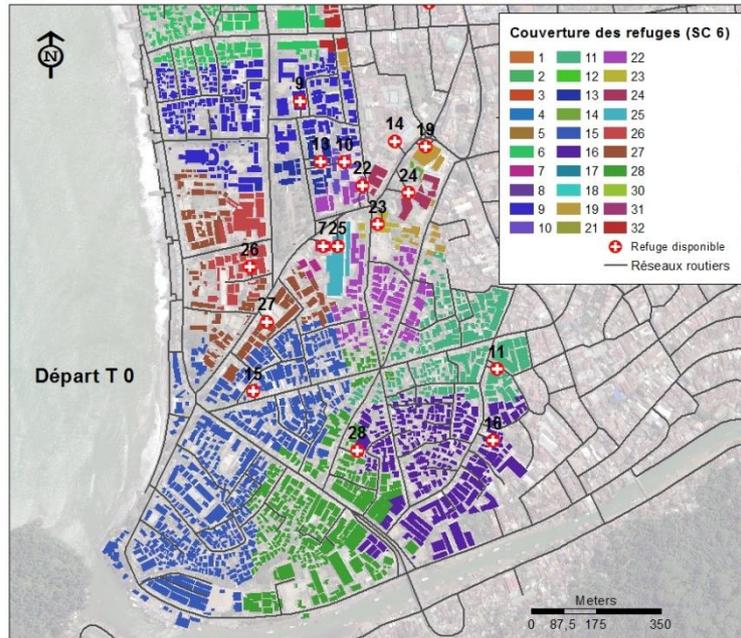


Figure 131. La couverture spatiale des refuges ne correspond pas aux secteurs divisés par les voies (en haut). Carte des secteurs délimités par les voies (en bas).

Par ailleurs, pour simplifier les instructions pour l'évacuation et éviter les « retours arrière » vers des refuges proches, mais près du rivage, on choisit de toujours faire bouger les populations en direction opposée au rivage, donc vers l'Est. En principe donc, la direction d'évacuation est toujours vers l'est de la ville. Il est interdit de choisir les routes d'évacuation vers la plage afin que l'évacuation soit optimale. Cette approche est programmée en calculant la direction d'évacuation depuis le centroïde du secteur vers l'est. Il est nécessaire de décrire une ligne imaginaire sur la

direction nord (0°) et sud (180°) passant par le centroïde du secteur. La direction d'évacuation autorisée est uniquement vers les refuges à moins de 180° (Figure 132). Dans cet exemple, la population située sur le secteur n'est autorisée à partir que vers les refuges 3, 4 et 5 (flèche vert).

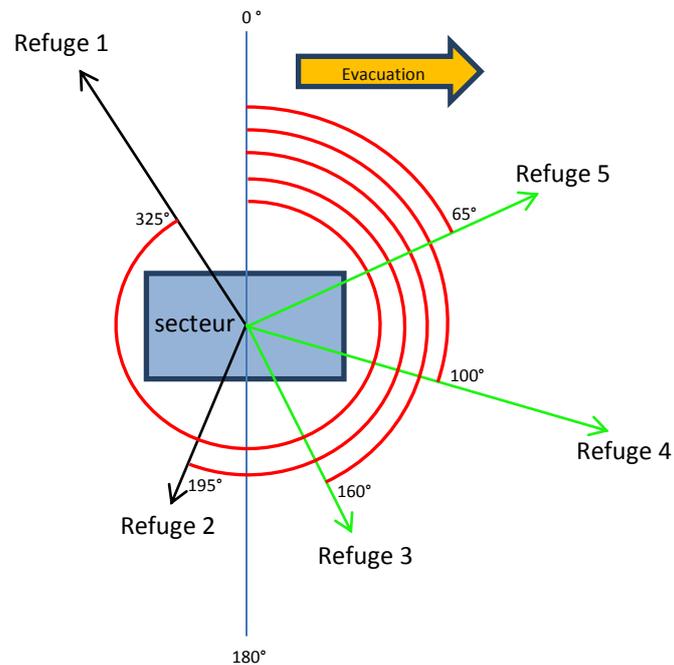


Figure 132. Le schéma de direction d'évacuation autorisé.

Nous simulons l'évacuation échelonnée pour réaliser le plan d'évacuation en conditions actuelles (sans nouveau refuge ni prescription suivant l'âge et le sexe des personnes). Afin d'avoir le résultat le plus réaliste, la simulation échelonnée est lancée en déplaçant 1% de la population chaque 3 secondes (en 100 itérations toute la population a été évacuée). Toutes les populations donc commencent à fuir dans les 300 secondes (5 minutes) qui suivent le séisme pour atteindre les refuges non remplis les plus proches. Tout d'abord, la simulation est effectuée pour le scénario 2 (L-J : 10h). Cette simulation est possible sur notre machine du fait du faible nombre des espaces (secteurs) à tester. Nous n'avons que 90 secteurs à tester, un nombre beaucoup plus réduit que 6 782 des espaces bâtis dans notre zone d'étude. Cette simulation dure toutefois 5 jours sur notre machine. Le résultat nous permet de distinguer la différence de temps d'accès moyen par secteur et également l'ordre des refuges choisis par secteur et par de temps de réaction. Le temps d'accès est meilleur pour les secteurs à proximité des refuges (en jaune dans la Figure 133 de gauche). Un meilleur de temps d'accès se remarque sur les secteurs proches des refuges possédant une capacité d'accueil assez élevée, comme les secteurs situés autour des refuges 1, 5 et 6. De plus, pour chaque phase de réaction (toutes les minutes par exemple) il est également possible de proposer une carte expliquant le refuge recommandé pour chacun des secteurs, comme dans la Figure 133 (à droite).

Selon cette carte, à un temps de réaction de 150 secondes après le séisme le Lundi 10H, les personnes situées sur chaque secteur font l'évacuation vers les refuges 1, 10, 14, 19, 20, 23, 37, 61 et 70.

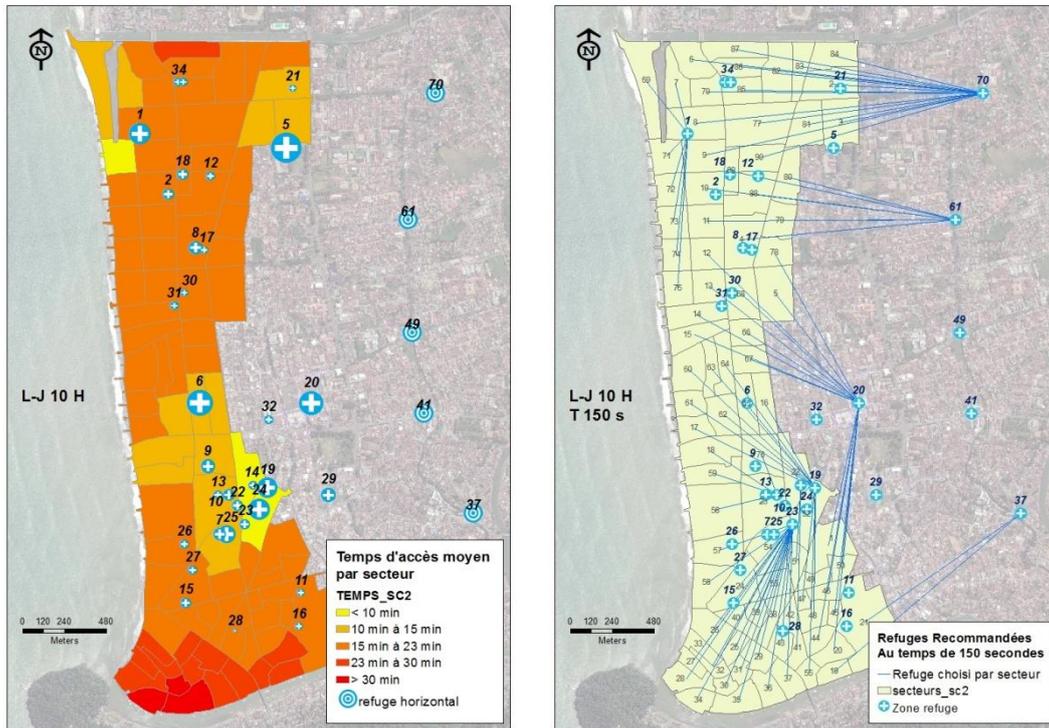


Figure 133. Exemples de carte d'évacuation par secteur.

On propose aussi des cartes adaptées pour chaque secteur présentant une vue synthétique des possibilités de fuite pour ce secteur. En effet, déjà pour plusieurs secteurs (Figure 134) les directions de fuite peuvent s'entrecroiser. Il vaut un carte par secteur comme dans la figure.

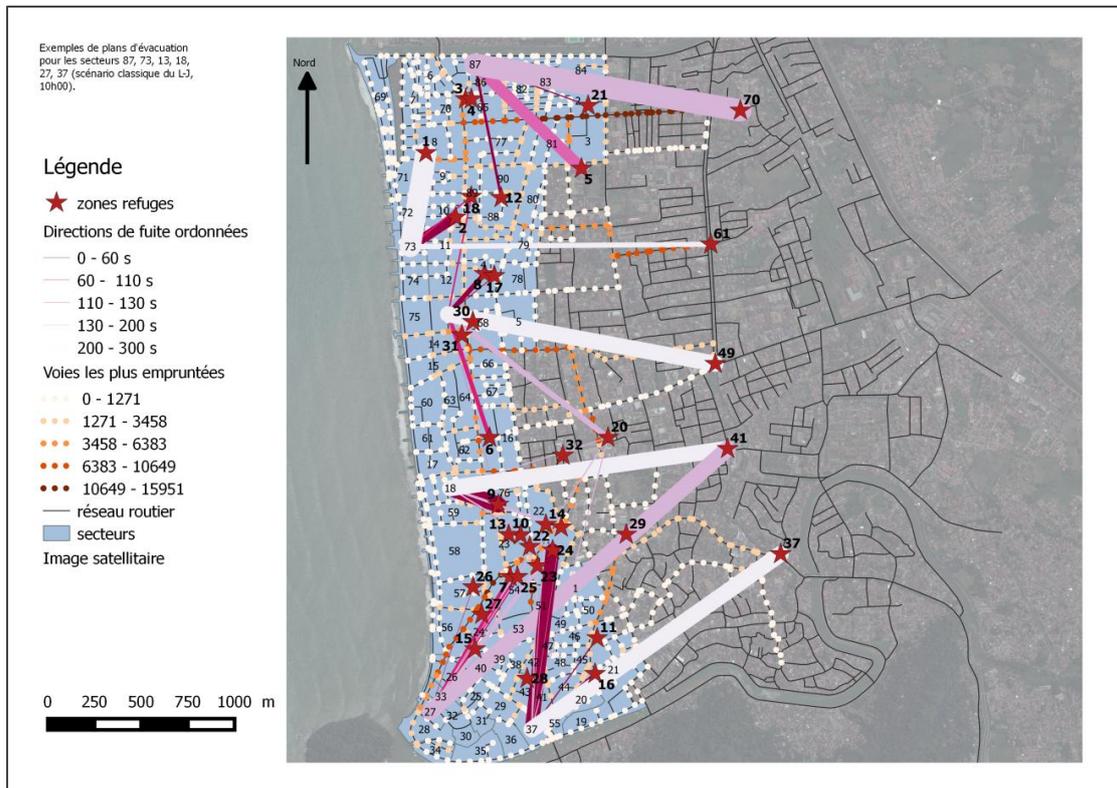


Figure 134. Les refuges choisis en fonction du temps de réaction et du nombre de personnes dirigées.

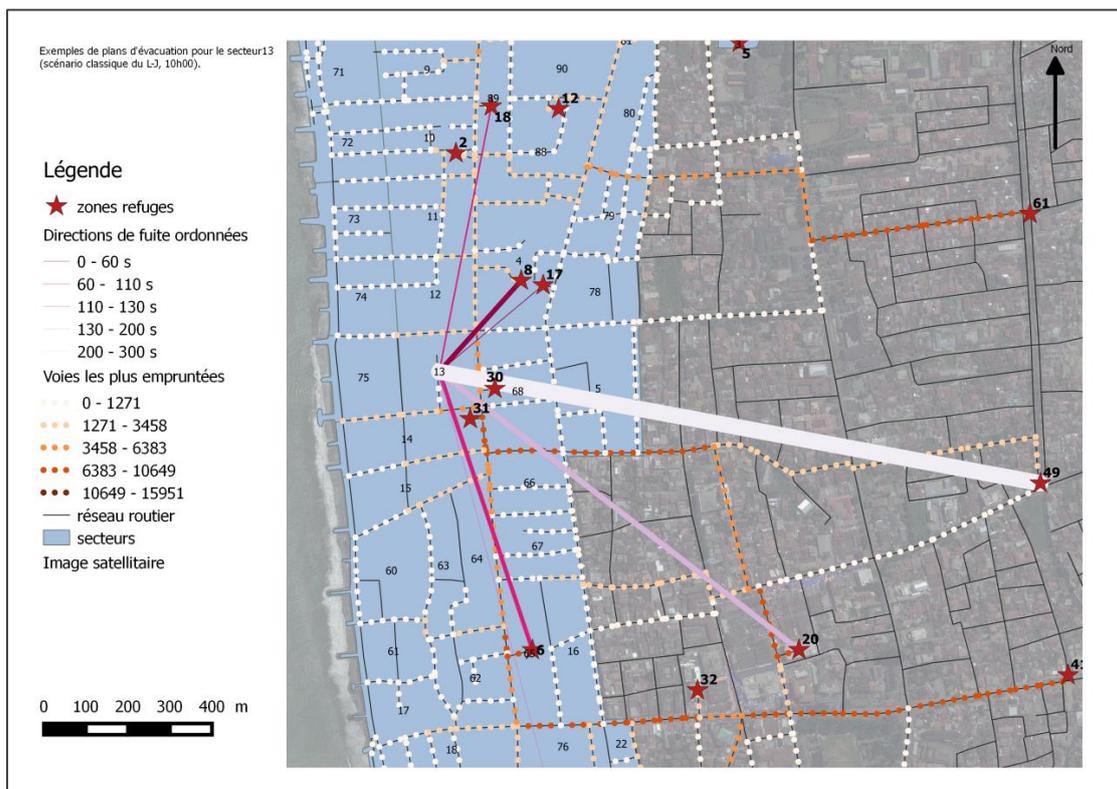


Figure 135. Plan d'évacuation du secteur 13.

Ces cartes sont à publier dans chaque secteur, et à faire connaître à la population. Cette carte de secteur propose un ensemble de directions fléchées pour la fuite, avec une représentation indiquant soit le volume de personnes qui pourront s'y déplacer (épaisseur du trait) ou bien la phase concernée (un trait plus clair correspond à un départ très différé, un trait plus sombre à un départ immédiat). Par exemple dans le secteur 13 durant le scénario 2 (L-J 10h) (Figure 135), les populations du secteur doivent se diriger vers les refuges numéro 30, 8, 17, 18, 6, 20 et 49. Pour un départ déclenché rapidement, il faut choisir le refuge 30, et un départ tardif, choisir le refuge 49. L'épaisseur de la flèche vers le refuge 49 indique que la capacité d'accueil de ce refuge est la plus grande (refuge horizontal) qui pourra accueillir le plus grand nombre de personnes évacuées (Figure 135). Par ailleurs, dans une symbologie différente, en ronds pointillés, sont marquées les voies d'évacuation les plus empruntées, plus foncées suivant le volume et la durée d'occupation par la foule en mouvement, selon les résultats de la simulation. Ce type de plan d'évacuation est moins directif que ceux habituellement diffusés, mais il permet à chaque personne de prendre une décision raisonnée en fonction de ses capacités et temps de réaction. Il faudrait le tester sur le terrain, et vérifier s'il est bien compris, et ensuite l'expliquer et le diffuser aux habitants.

Afin de vérifier la précision du modèle d'évacuation échelonnée avec 100 itérations, nous présentons les courbes d'accessibilité d'évacuation pour le scénario 2 (Figure 136). Ce sont les courbes d'accessibilité théorique et les courbes d'accessibilité potentielles pour les personnes. Ces courbes montrent que la courbe d'accessibilité des personnes potentiellement sauvées est très proche de la courbe des personnes théoriquement sauvées. Cela montre que ce paramétrage permet d'approcher les conditions réelles d'une évacuation où les populations sont dirigées à coup sûr vers un des refuges non remplis le plus proche.

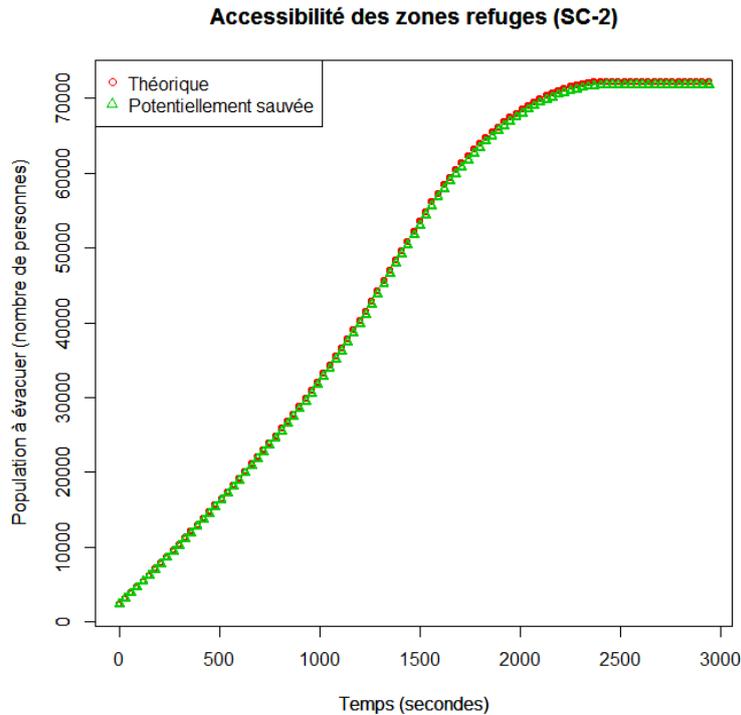


Figure 136. Les courbes d'accessibilités avec 100 itérations pour le scénario 2 (L-J : 10h).

10.5. Route d'évacuation

Les voies d'évacuation sont des routes utilisées par des personnes évacuées pour atteindre les zones refuges. Les voies choisies prennent en compte le coût en temps le plus rapide depuis les localisations de population aux zones refuges disponibles le plus proche. Basée sur le résultat de simulation échellonnée durant le scénario 2 (L-J ; 10h), nous avons constaté que certaines voies de communications sont favorisées par l'algorithme (Figure 137). En effet, l'intensité de couleur des segments de voie est proportionnelle à un indicateur qui multiplie le volume de population circulant dessus par la durée d'emprunt de chaque segment. Pour la partie nord de la zone d'étude, la voie vers le refuge horizontal numéro 70 est la voie la plus fréquentée. Par ailleurs sur la partie sud, les voies qui passent le long de refuge numéro 27, 7, 25, 23, 24, 14 et 19 sont également les voies les plus utilisées durant les évacuations. Les voies vers le refuge horizontal 37 sont également une option pour l'évacuation. Ces voies doivent être une préoccupation pour les décideurs. L'élargissement et le nettoyage des voies pour les débarrasser des occupations inutiles sont des mesures qui peuvent être appliquées. Lors du processus d'évacuation, ces voies seront une source de congestion. Il est donc nécessaire de mettre en place des policiers sur certaines intersections de routes afin de contrôler la circulation.



Figure 137. Les voies les plus utilisées durant les évacuations.

10.6. La préparation de la mise en sûreté de la population

10.6.1. L'alerte des populations

Il existe de nombreux outils pour alerter les populations concernées sur la possibilité d'arrivée de tsunami après un ou des séries de séismes. Nous avons identifié des outils comme les sirènes, les SMS ou les médias (télévision ou radios) pour l'émission d'alertes.

Les sirènes (Figure 138) apparaissent comme le moyen d'alerte le plus efficace. Elles permettent de toucher l'ensemble des populations concernées de jour comme de nuit, à condition que leur entretien soit régulier. Elles permettent par ailleurs, par des tests réguliers, de rappeler à la population l'existence d'un risque et de la rassurer quant à la capacité des autorités à la prévenir en cas de danger. Toutefois l'efficacité des sirènes est limitée par le coût d'installation et d'entretien très élevé. Les dysfonctionnements possibles compte-tenu du niveau de technicité de ce moyen apparaissent comme des problèmes dans l'utilisation de ce moyen.



Figure 138. Une des sirènes de tsunami à Padang située sur une des zones refuges verticales.

Les SMS apparaissent comme le second moyen d'alerte privilégié, malgré des limites liées à la couverture GSM et à la saturation possible des réseaux, très probable en cas de panique. La fiabilité des opérateurs est aussi importante. L'expérience du séisme de 30 Septembre 2009 à Padang montre que la plupart des opérateurs GSM dysfonctionnaient. Ce qui est dommage, car sans investissements financiers trop importants, cette technologie permet d'alerter des listes préfinies de « référents » : une ou plusieurs personnes autorisées à diffuser des informations aux populations dans leur voisinage spatial. L'échantillonnage de ces personnes doit couvrir l'ensemble de la zone concernée par l'alerte.

Ce moyen peut également être combiné avec la culture sociale et locale à Padang. Les mosquées sont bien réparties dans le territoire de Padang. Ces mosquées sont également équipées de hauts parleurs qui sont normalement utilisés pour inviter les musulmans à faire la prière ensemble. Les alertes au tsunami peuvent être envoyées aux imams ou les gardiens des mosquées. Les personnes autorisées dans les mosquées diffusent alors les alertes aux populations par les hauts

parleurs. Le contenu du message transmis doit indiquer l'heure prévue d'arrivée du tsunami, l'importance des effets attendus, et qui informera les populations de la fin de l'alerte (Sahal, 2011).

Les médias sont aussi considérés comme un bon moyen de diffuser les alertes. Toutefois, la possibilité de dysfonctionnement de l'électricité juste après un tsunami empêche de choisir ce moyen pour répandre une alerte sur les populations concernées. L'expérience du séisme de 30 septembre 2009 a laissé en effet les populations de Padang sans électricité, car la secousse sismique a détruit les réseaux qui sont restés en panne pendant quelques jours.

10.6.2. Les exercices « grande nature ».

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

On distingue les exercices locaux, organisés par une collectivité territoriale ou locale, impliquant les populations, et les exercices nationaux, organisés par le gouvernement central impliquant l'ensemble des régions du pays. Il est certainement possible de coupler ces deux types d'exercices.

Les exercices locaux doivent être l'occasion d'une implication de tous les acteurs. Le maire et tous les pompiers, les polices, les responsables de sécurité civile, les chefs d'établissements scolaires et hospitaliers pratiquent les exercices ensemble. Ces acteurs sont « priés » de pratiquer certains scénarios possibles sur le territoire. Tout problème de coordination entre les différentes autorités ou tout dysfonctionnement doit être identifié, et conduire à solliciter une réflexion aboutissant à une amélioration de l'organisation de la chaîne, de la répartition des rôles et de l'organisation de chacun des acteurs.

La participation active de la population durant ces exercices est nécessaire pour augmenter la résilience. La vitesse de déplacement réelle et les problèmes qui se posent lors de l'entraînement à l'évacuation sont sources d'apprentissage pour les autorités. Les solutions possibles qui se dégagent permettent d'améliorer la résilience. Ce type d'exercice a déjà été pratiqué quelques fois à Padang (Figure 139). Il est nécessaire de le faire régulièrement afin de toujours sensibiliser la population.



Figure 139. Un exemple des exercices d'évacuation grandeur nature à Padang (Photos de Henky Mayaguezz, 29082013).

Conclusion du chapitre

L'évaluation de l'accessibilité des zones refuges nous montre que la disponibilité des zones refuges existants ne permet pas mettre toutes les populations aux abris en 23 minutes suite à un séisme, quel que soit le scénario. Même durant la nuit, lorsque le volume de population est plus réduit, 50% de la population totale en danger.

Afin d'augmenter la capacité d'évacuation, nous proposons d'installer de nouveaux refuges situés sur la zone d'inondation modélisée, surtout aux endroits associés à une forte probabilité de victimes (fort IRH). L'implantation des nouveaux refuges renforcent la capacité d'évacuation. Les personnes évacuées prennent les nouveaux refuges comme première destination. Mais cela reste insuffisant. Une seconde recommandation suggère la différenciation de l'utilisation des zones refuges en donnant priorité aux personnes les plus vulnérables autour des refuges. Les personnes les plus vulnérables ont le droit d'accès à ces refuges, alors que les jeunes et les adultes (les personnes en situation de travail) sont dirigées vers les refuges horizontaux. Ces prescriptions améliorent le temps d'accès aux refuges des personnes vulnérables mais également le volume global de personnes mises en sûreté en 23 min. La combinaison de ces mesures est également très efficace et améliore à la fois les temps d'accès aux refuges et le volume global de personnes sauvées.

Afin que l'évacuation soit opérationnelle, le plan d'évacuation devrait montrer les refuges choisis par secteur et non par bâtiment. Nous proposons donc une délimitation des secteurs construits d'après les cartes de couverture des refuges sur différents scénarios et phases de départ. Le plan d'évacuation ne propose pas un unique refuge pour chaque secteur, mais les refuges proposés pour un secteur sont toujours orientés pour s'éloigner du rivage, et proposés en fonction de la phase de départ de l'évacuation. On propose de diffuser une carte d'évacuation de secteur dans chaque secteur, présentant un ensemble de directions fléchées pour la fuite (4 en moyenne) avec une indication de volume de personnes qui pourront y accéder (épaisseur du trait) mais aussi de phase d'évacuation (teinte du trait).

Les recommandations concernant le renforcement des capacités d'évacuation concernent également le réseau routier. Il s'agit de procéder à l'élargissement et au nettoyage des voies les plus empruntées pendant les évacuations. L'implantation de policiers sur certaines intersections améliorera la circulation. Les sirènes et les hauts parleurs sur les mosquées peuvent alerter la majorité de la population. Enfin les exercices grandeur nature sont à répéter fréquemment afin de bien sensibiliser des populations.

Chapitre 11. Discussion : apports, limites et perspectives d'amélioration

Cette thèse propose une évaluation de l'exposition humaine spatio-temporelle ainsi que de la capacité d'évacuation face aux tsunamis. Notre objectif principal est de mieux comprendre la distribution spatiale et temporelle de la population sur la zone d'inondation faisant suite à un tsunami à Padang, et ceci selon le rythme de vie de la population dans la ville, et de mieux analyser l'accessibilité vers des zones refuges selon des scénarios multi-horaires. Ces connaissances sont utilisées pour proposer des mesures pour le renforcement de la capacité d'évacuation.

Ce chapitre traite de l'applicabilité de la méthode proposée en exposant les limites propres à chacune des étapes de mise en œuvre de la méthode. Il propose également des pistes d'amélioration.

11.1. Evaluation de la répartition spatio-temporelle de l'exposition humaine.

11.1.1. Originalité de l'approche

Une des questions abordées au cours de cette thèse concerne l'évaluation de la distribution spatio-temporelle des enjeux humains. La méthode proposée consiste à estimer le volume des individus situés dans chaque espace de la zone inondable suivant une fréquence horaire. Cette démarche permet de déterminer différents scénarios d'évacuations en cas d'un tsunami, en fonction du volume et de la répartition des individus dans la zone inondable. Dans le chapitre 4 et 5, cette méthode a été développée pas à pas pour étudier les mécanismes qui déterminent la fréquentation d'un espace par des individus jusqu'à la visualisation cartographique de l'exposition humaine, comme le résume schématiquement la Figure 140.

Notre approche d'évaluation de la répartition humaine au cours du temps se focalise sur les rythmes de vie de la population locale. Le modèle de fréquentation se fonde sur l'hypothèse que les habitants suivent globalement un schéma de vie commun, suivant un rythme de vie impliquant des répétitions à heures fixes ou périodes fixes de leurs activités. Ce rythme provoque une variation de la répartition de la population dans le temps, en fonction des heures de la journée mais aussi en fonction des jours de la semaine et des périodes de l'année. Puisque la ville de Padang est la capitale de la province et que plus de 95% de la population est musulmane, nous avons effectué des observations sur différentes classes de jour en tenant compte des activités religieuses (lundi, vendredi, week-end, Ramadan lundi, Ramadan vendredi, Ramadan week-end et fête de l'Aïd). Ces observations sont faites sur les différentes classes fonctionnelles des espaces (bâtiments, plein air et

voies de communications) afin de construire les taux et les courbes de fréquentation humaine heure par heure suivant les différentes classes de jour. A travers ce travail, nous vérifions que les rythmes de vie contrôlés par des activités urbaines et des activités religieuses déterminent la répartition spatio-temporelle des populations. En modélisant les taux et les courbes de fréquentation humaine, nous sommes en mesure d'estimer le nombre de personnes dans chaque espace heure par heure, et donc de visualiser la variation de densité humaine dans la ville pendant les différentes classes de jour. Par ailleurs, nous avons réalisé des animations vidéo présentant une vision dynamique de l'occupation de Padang, avec une grille de résolution spatiale de 50 par 100 m, plus appropriée pour une étude synthétique de la variation de population, qui a été présentée aux gestionnaires de la ville.

D'autres études sont focalisées sur l'analyse de la distribution spatio-temporelle des risques sur un espace défini. Ces études nécessitent une modélisation de l'aléa à l'échelle très fine afin de pouvoir établir la hauteur d'eau et la vitesse d'eau sur chaque espace dans la zone d'inondation modélisée. Ces données sont disponibles grâce à la recherche de l'équipe « *Last-mile* » à Padang. Ces données sont construites à partir des études de la modélisation depuis le processus de génération et de propagation de tsunami depuis la source jusqu'à la côte, et d'inondation de tsunami dans la ville (Taubenböck et al. 2009).

A travers les données de hauteur et de vitesse d'eau sur chaque espace, nous pouvons donc quantifier le risque qui est défini comme l'espérance mathématique des pertes potentielles pour les scénarios retenus (Leone 2007). Dans un premier temps nous pouvons établir la carte de probabilité de décès sur chaque espace en utilisant les matrices de probabilité de décès proposées par Leone et al (2012). C'est une carte statique qui représente la probabilité de décès pour chaque personne dans chaque espace, quel que soit le niveau de fréquentation de cet espace. A partir de nos données de fréquentation, nous pouvons aussi croiser le nombre de personnes présentes avec les différents niveaux de probabilité de décès. En considérant la variation de la fréquentation humaine dans un espace au cours du temps, il devient possible de quantifier et cartographier l'indice de risque humain pour les scénarios choisis. Ces cartes ne montrent pas le nombre de pertes humaines, mais la localisation des secteurs à risque élevé ayant les plus fortes probabilités de concentration de victimes.

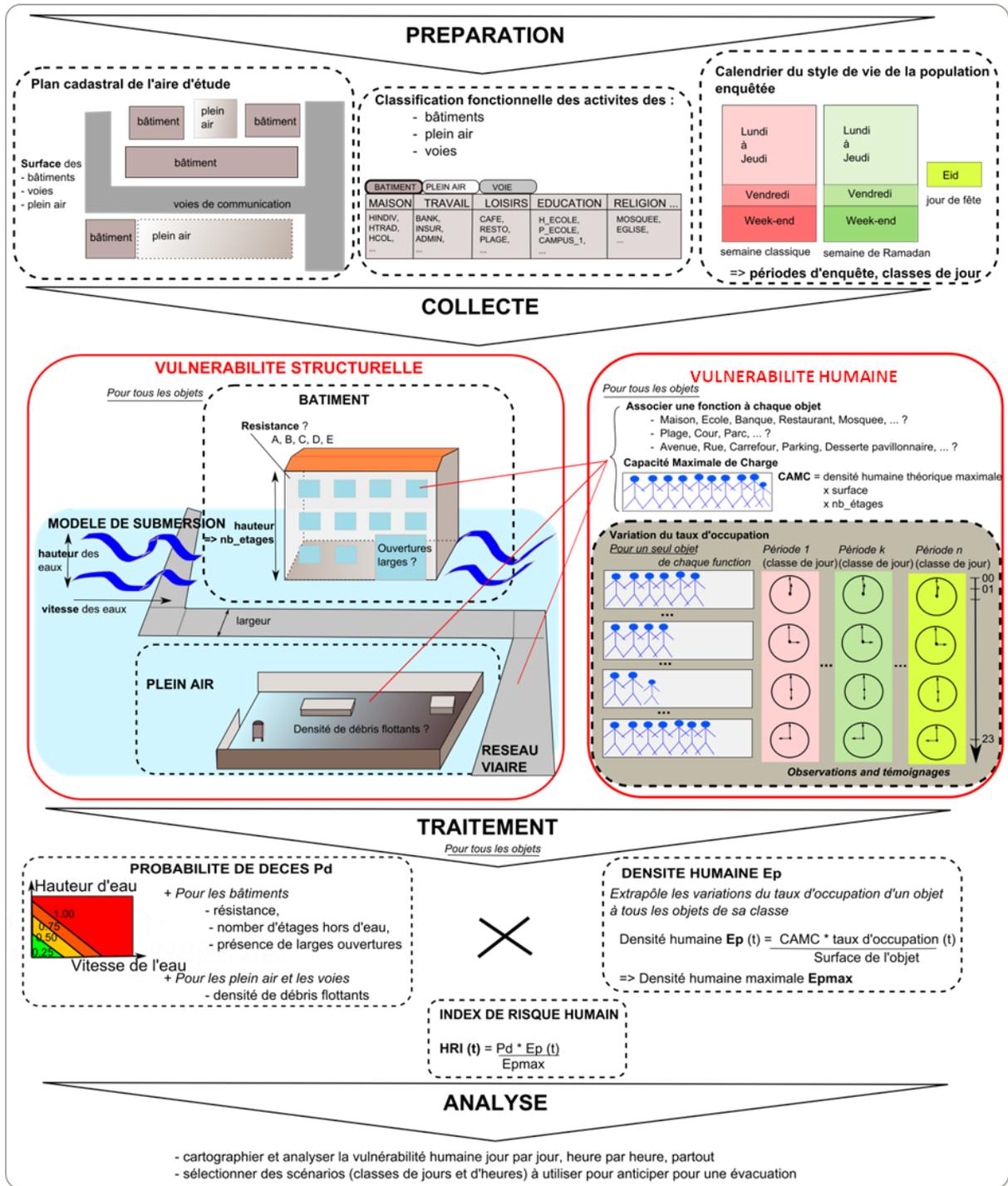


Figure 140. Méthode d'évaluation de la répartition spatio-temporelle de l'exposition humaine.

11.1.2. Synthèse des résultats

Les résultats obtenus montrent que la probabilité de concentration de victimes varie fortement selon les scénarios choisis. Pendant la nuit, le risque est concentré sur les habitations. Le matin, le risque élevé se concentre sur les écoles, bureaux publics ou privés et hôpitaux. On observe que le risque se concentre sur la mosquée pendant le vendredi midi. En week-end à la fin de l'après-

midi, la forte probabilité de concentrations de victimes se situe sur plusieurs zones : autour de la plage, des restaurants et des cafés. La localisation du risque élevé change pendant la période du Ramadan. Le matin pendant les jours ouvrables, il n'y a aucun risque sur les écoles. Le risque se concentre sur les mosquées, les bureaux et les hôpitaux. Le week-end vers 18h pendant le Ramadan, le risque le plus élevé se concentre sur les restaurants et les cafés autour de la plage où les musulmans rompent le jeûne. Le soir pendant le Ramadan, le risque élevé s'observe dans les mosquées. A la fin de l'après-midi vers 18h pendant les vacances de fête après le Ramadan, la plus forte probabilité de victimes se concentre autour de la plage où les habitants de Padang sortent en famille ou avec des amis. Nous avons ainsi pu dégager 8 scénarios particuliers de distribution spatio-temporelle à partir des données de fréquentation récoltées, intéressants pour la préparation de l'évacuation.

11.1.3. Limites de l'approche

11.1.3.1 Améliorations envisageables au niveau de la méthode d'enquête

En ce qui concerne l'efficacité de l'approche méthodologique pour évaluer la distribution spatio-temporelle des populations, il reste toutefois nécessaire de faire une mise à jour régulière des données d'enquête de la distribution des individus : construction de nouveaux bâtiments, apparition de nouveaux sites de plein air attirant le public, etc. L'installation fixe de nouveaux sites intéressants induit un changement de la distribution spatio-temporelle des populations.

Au niveau du plan cadastral, il serait intéressant de considérer l'achat d'une image satellitaire à la résolution adéquate de la zone de Padang, avec la mise en œuvre d'une méthode automatique d'extraction des formes de bâtiments. Cela ferait économiser du temps de saisie et de vérification.

Bien que notre méthode évalue les taux de fréquentations humaines pour chaque fonction des espaces heure par heure, la proportion d'échantillonnage pour chaque fonction n'est pas suffisamment ajustée pour que les données soient fiables à 100%. Nous avons échantillonné environ 5% du total des bâtiments ayant comme fonction principale « habitation » (HINDIV, HTRAD, HCOL). Cependant, pour les autres fonctions, nous avons utilisé un seul échantillon pour construire la courbe de fréquentation humaine sans prendre en compte la totalité de chaque fonction. Nous avons choisi celui qui peut représenter la fonction principale de l'espace au mieux, mais peut-être qu'une sélection aléatoire de 2 ou 3 représentants de la classe aurait été plus rigoureuse.

Par ailleurs, certains détails au niveau de la classification des activités auraient pu être regroupés, puisque très similaires. Par exemple, « bank » et « assuran » peuvent certainement être regroupés, limitant ainsi les besoins de l'enquête.

Nos travaux de recherche démontrent l'existence d'une variation spatio-temporelle de densité humaine sur la zone d'inondation modélisée. De plus, ces travaux ciblent les secteurs et les moments dans la ville où une forte probabilité de victimes est anticipée. Toutefois notre étude considère que le niveau de vulnérabilité des individus est similaire. La connaissance des variations de types physiologiques dans la zone d'inondation modélisée permettrait aux autorités d'augmenter l'efficacité du programme de réduction de risque. Des informations sur la localisation et la période de concentration de personnes très vulnérables complèteraient les informations spatio-temporelles des enjeux humains. Certaines interventions appropriées seraient alors possibles pour sauver les personnes très vulnérables afin que les évacuations soient efficaces.

11.1.3.2. Incertitude et lacunes sur les données d'inondation.

Malgré la précision de la cartographie spatio-temporelle des enjeux humains en comparaison avec la modélisation de l'aléa, le résultat présente une incertitude dans les secteurs submergés et dans les paramètres hydrauliques de la submersion modélisée. De manière générale, pour calibrer et valider des études numériques, il est nécessaire de les comparer avec des motifs de tsunami d'inondation historiques. Mais pour la ville de Padang, il y a très peu d'éléments de validation pour les études numériques (Borrero et al. 2006). Afin de modéliser les inondations, Taubenböck et al (2009) ont donc décidé de compter sur un grand nombre de scénarios de sources pré-calculées avec les épicentres répartis spatialement autour de l'archipel Mentawai (Figure 141). Ce sont des secteurs pour lesquels on attend des ajustements sismo-tectonique importants. La zone autour de l'archipel de Mentawai est considérée comme une lacune tectonique après la libération de sa dernière énergie en 1797 et 1833 (Natawidjaja et al. 2006a).

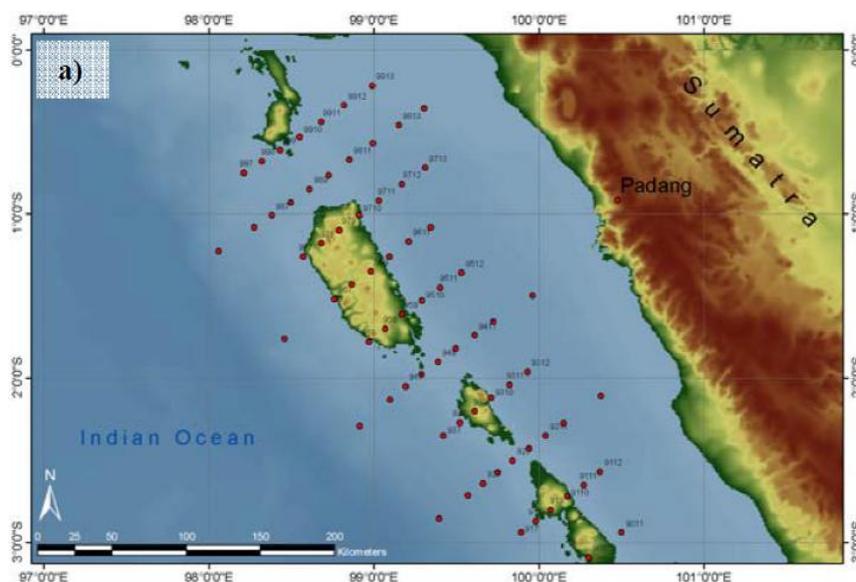


Figure 141. Les sources de génération possible de tsunami. (Extrait de Taubenböck et al, 2009)

La modélisation d'aléa faite par Taubenböck et al (2009) a considéré les sources de génération possibles de tsunami. De plus la propagation et le *shoaling effect* ont été bien modélisés du fait de la prise en compte de la friction de fond et de la qualité variable des données bathymétriques. Enfin, le modèle de submersion a été confronté à la rugosité des surfaces émergées que peuvent constituer bâtiments, aménagements, etc.

Le modèle d'inondation utilisé présente les valeurs des hauteurs et des vitesses d'eau pour chaque espace. Ce sont des valeurs fines ayant une résolution de 5m x 5m. Ce modèle d'inondation est construit en considérant la rugosité des espaces émergés et la présence des bâtiments. Il présente la valeur de la hauteur et de la vitesse d'eau autour des bâtiments. Cependant, il met à 0 les valeurs de vitesse et hauteur sur la géométrie des bâtiments. Cela pose problème lors de la confrontation du modèle d'inondation aux enjeux, notamment les enjeux humains dans les bâtiments. En l'absence de données appropriées sur la géométrie du bâtiment (hauteur d'eau, vitesse d'eau), la probabilité de décès d'individus dans les bâtiments aurait dû être minimum dans notre étude. Mais nous avons calculé des valeurs de hauteur et vitesse d'eau moyennées dans un tampon de 40 m autour de chaque bâtiment. Cette méthode produit des valeurs de hauteur et de vitesse d'eau dans les bâtiments plus satisfaisantes, cohérentes avec les valeurs autour des bâtiments, ce qui nous permet de calculer la probabilité de décès des individus dans les bâtiments. Mais ces moyennes sur un tampon de 40 m dégradent la qualité de la résolution initiale des données qui était de 5 m par 5 m.

Enfin, le modèle d'inondation de tsunami ne couvre pas la totalité du territoire de Padang. Il se concentre sur la zone bien urbanisée de Padang. Il manque une partie du territoire de Padang, notamment à l'extrême nord de la ville. C'est une zone comportant des habitations qui n'est pas renseignée par des informations sur les zones de submersion et des valeurs d'inondation (hauteur et vitesse d'eau). Idéalement, il faudrait évaluer ces données pour compléter l'étude.

Malgré l'exhaustivité de l'approche méthodologique utilisée dans la modélisation d'inondation de tsunami, ce n'est que la hauteur d'eau et la vitesse d'eau qui ont été utilisées pour évaluer les pertes humaines potentielles. L'énergie spécifique induite par le courant pendant les inondations de tsunami dans la ville n'est pas prise en compte. Dans le cadre de cette thèse, nous avons considéré que des espaces (et donc les personnes) ayant le même niveau de hauteur d'eau et la même vitesse d'eau subissent le même impact.

11.2. Evaluation de la capacité d'évacuation des populations.

11.2.1. Description de la méthode

Cette thèse développe une modélisation de l'accessibilité des zones refuges en utilisant le logiciel *PostgreSQL* avec la cartouche spatiale *PostGIS* et l'extension *PgRouting* pour la programmation opérationnelle du graphe de communication. En utilisant la théorie des graphes, notre modèle choisit le meilleur chemin possible pour chaque objet à évacuer vers chaque refuge. Chaque personne choisit ainsi le chemin le plus court en temps (puisque les arcs du graphe sont valués en temps de parcours) depuis sa localisation actuelle pour atteindre la zone refuge. La localisation des personnes se répartit sur les différents espaces, soit dans les bâtiments, zones de plein air ou voies de communication. Le temps de déplacement est peut alors être calculé en trois étapes : (1) Le temps depuis les localisations actuelles de populations jusqu'à la voie la plus proche; (2) le temps de déplacement sur le réseau de voies ; (3) le temps de déplacement depuis la dernière voie empruntée jusqu'à la zone refuge la plus proche. La totalité de temps de déplacement est la somme des déplacements dans les trois étapes mentionnées au-dessus.

En premier, nous avons simulé l'accessibilité pour atteindre uniquement des zones refuges horizontales par une recherche de plus court chemin à pied sur un réseau de rues (Péroche, Leone, et Gutton 2014). Le résultat de simulation nous montre que la première personne atteint la zone refuge environ 15 minutes de déplacement. Cependant, la totalité de la population a besoin d'environ 40 minutes pour atteindre les refuges. C'est un niveau d'accessibilité inacceptable si on considère l'estimation du temps d'arrivée de la première vague de tsunami, qui est de 23 minutes après un séisme (Taubenböck et al. 2009), surtout si l'on déduit ensuite le délai d'alerte et de réaction de la population.

Afin d'améliorer la performance des évacuations, nous avons proposé une simulation intégrant les zones refuges verticales ensemble avec les zones refuges horizontales. Tout d'abord nous simulons des évacuations simultanées, c'est-à-dire que toutes les personnes démarrent leur évacuation en même temps, et ne changent pas d'avis. Toutefois ce modèle est éloigné de la réalité sur le terrain car les populations sont alors forcées d'entrer dans un refuge sans prendre en compte la disponibilité de ce refuge. Et il est peu probable qu'absolument tout le monde sorte en même temps d'un immeuble, il y a forcément un goulot d'étranglement à la sortie et un petit délai dans la décision de chacun, comme le montre la modélisation des comportements humains dans un contexte d'évacuation piétonne faite par Helbing et al. (2000).

Ensuite, nous avons développé un modèle d'évacuation échelonnée plus spécifique. Ce modèle programme différents temps de départ pour les individus, conformément à différents temps

de réaction pour déclencher une évacuation. En utilisant cette approche méthodologique, nous augmentons théoriquement l'accessibilité des zones refuges. Des populations habitant à la proximité de zones refuges verticales peuvent accéder à ce refuge dès l'avertissement déclenché. Nous soulignons également que ce modèle intègre la limitation de la capacité de remplissage de la zone refuge verticale, ce qui n'est pas appliqué dans le modèle simultané. Le modèle d'évacuation échelonnée tend donc d'avantage vers la situation d'un processus d'évacuation réelle. Les personnes qui partent en retard n'ont pas la possibilité d'atteindre la zone refuge verticale la plus proche à cause de l'indisponibilité de celle-ci. Elles sont obligées de trouver une des zones refuges les plus proches qui soit encore disponible.

Afin de maintenir la continuité de l'application, il est nécessaire de faire une mise à jour régulière de l'existence des zones refuges verticales. Ce modèle nécessite uniquement une étude de la distribution spatio-temporelle des populations et l'identification des zones refuges. Il ne nécessite pas une modélisation d'inondation présentant les valeurs de hauteur et de vitesse d'eau (seulement nécessaire pour évaluer des probabilités de décès). Cependant, notre modèle a besoin des limites spatiales de la zone d'inondation pour choisir une localisation de zones refuges horizontales qui soient installées sûrement sur des zones non inondées.

11.2.3. Limites de l'approche

11.2.3.1 Au niveau de la méthode de simulation et du traitement des résultats

Cette approche méthodologique se révèle assez efficace pour évaluer l'accessibilité des zones refuges. Toutefois, l'implémentation du modèle dynamique permet encore que certains refuges dépassent leur capacité d'accueil maximale (Figure 142). Ce cas se produit à la dernière itération, juste avant de rendre indisponible un refuge. En effet, le seuil de la limite de remplissage à 80% marche généralement bien dans le modèle dynamique. Mais lorsque la population alentour reste très nombreuse, et ne trouve pas d'autre issue qu'un petit refuge plein à 75%, on observe généralement une explosion de sa capacité d'accueil, toujours lors de la dernière itération de l'algorithme pour ce refuge, comme le montre la Figure 142 pour les refuges 4 et 20 qui ne sont ensuite plus sollicités pour servir de refuge, mais dépassent amplement les 100% (le refuge 20 atteint presque 200% de remplissage). Nous n'avons pas de moyen pour communiquer avec ces personnes dans le modèle afin de les diriger sur un des refuges disponibles. Cet inconvénient du modèle se gomme aisément en paramétrant autrement les simulations : évacuer par exemple 1% de la population chaque seconde d'un objet (bâtiment, rue, ou zone de plein air), et donc 100% de la population en 100 itérations. Nous avons vérifié cela avec la préparation d'un plan d'évacuation par

secteur, sur un scénario, mais cela a considérablement rallongé le temps de calcul (pourtant sur seulement 70 secteurs). En effet, il faut actuellement 48 H pour réaliser la simulation d'un scénario sur l'ensemble des 7000 entités géographiques (qui tourne sur un PC de type serveur, avec 2 CPU à 1.6 GHz et 64 Go de RAM) paramétré sur 10 itérations (10% de population évacuée chaque 30 secondes).

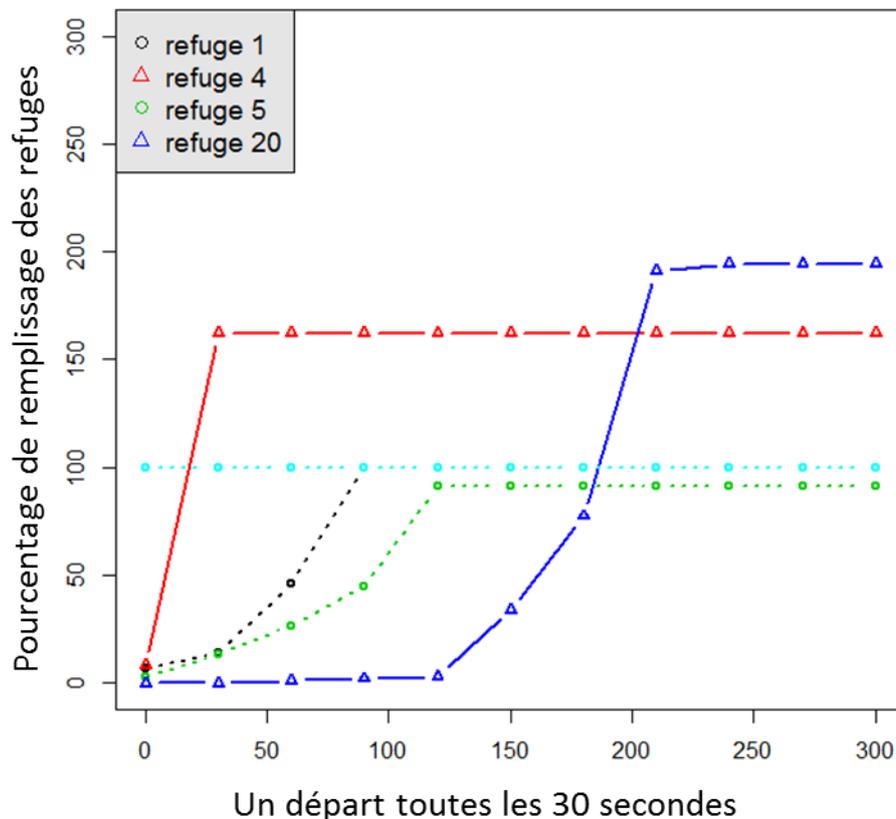


Figure 142. Les refuges dépassent leur capacité maximale (100%).

Par ailleurs les résultats de ces simulations dynamiques nécessitent un traitement soigneux des données produites pour préparer un plan d'évacuation. En effet, la carte des refuges les plus proches pour *chaque secteur* de la ville ne s'obtient pas directement en sortie de simulation. Ainsi, si nous proposons une carte de couverture dynamique des refuges *pour les bâtiments*, il faut ensuite délimiter des *secteurs d'évacuation* à proprement parler, qui tiennent compte des évolutions de la couverture des refuges avec les différents pas de temps de la simulation.

11.2.3.2 Au niveau de la prise en compte des facteurs psychologiques et physiologiques

Ce modèle ne prend pas directement en compte les facteurs d'ordre psychosociologiques tels que les effets liés au stress (Fahy et Proulx 2001) et à la panique (Helbing, Farkas, et Vicsek 2000), ou

de la prise de risque (Tang et Ren 2008). Mais dans notre travail, nous avons considéré différentes vitesses de déplacement dans les différents types de voies. La vitesse de déplacement ralentit sur la plage ou sur des points de rétrécissement brutaux. La différence de largeur de voies a été également prise en compte pour calculer la vitesse de déplacement de la foule. Si la foule utilise une petite route étroite, la vitesse de déplacement est réduite.

Notre modèle de simulation considère que toutes les personnes résidant dans la zone d'étude ont une physiologie similaire, ce qui est une hypothèse excessive. En effet, chaque individu est caractérisé par une capacité de mobilité personnelle différente. La connaissance de la physiologie des individus est également importante dans le cadre de la modélisation des évacuations. Les différentes classes de physiologie conditionnent la vitesse de déplacement des individus. Les hommes et les femmes se distinguent par des dissemblances anatomiques, telles que la taille, la force et la résistance physique. L'âge est aussi un critère à prendre en compte lors d'un tsunami du fait de la limite de la mobilité pour certaines classes d'âge. Les enfants, les femmes et les personnes âgées ou bien les personnes ayant des capacités réduites ne possèdent pas la même capacité à affronter le danger. Ils ont été identifiés comme des groupes les plus vulnérables. Le tsunami de décembre 2004 nous montre que les enfants de moins de 10 ans ainsi que les personnes ayant plus de 40 ans ont une vulnérabilité plus élevée. Le niveau de victimes pour les femmes est également plus grand que les hommes (IOC-UNESCO, 2009). Ces critères correspondent à ceux présentés par (Doocy et al. 2009) montrant que la mortalité a été particulièrement élevée parmi les femmes, les plus jeunes et les groupes les plus âgés. Ces groupes de population ont une capacité physique inférieure en termes de vitesse, d'endurance et de capacité à nager en cas d'inondation. La probabilité de décès pour ces groupes de personnes est donc plus élevée que celle d'un jeune homme en bonne santé. Afin de réduire les incertitudes liées à ce manque de connaissance, il est nécessaire de réaliser une étude approfondie sur les différentes formes de la physiologie des individus afin d'avoir un résultat satisfaisant sur l'évaluation de pertes humaines potentielles. Là encore, les perspectives d'amélioration de la méthode sont possibles. On peut notamment imaginer que la physiologie dépend des caractéristiques comme le sexe, l'âge, variables qu'il serait sûrement possible d'estimer à partir des fonctions majoritaires des bâtiments, ou des zones de plein air. Par exemple, dans les écoles, on trouve principalement des enfants, et dans les habitations non vides en journée, des femmes au foyer ou des personnes âgées.

11.3. Renforcement des capacités d'évacuations

11.3.1. Nouvelles connaissances apportées

La méthode proposée pour évaluer la répartition spatio-temporelle de la population nous permet de bien analyser l'accessibilité des refuges lors des évacuations. Les informations précises sur la localisation des populations heure par heure facilitent la planification des évacuations pour les autorités.

En considérant la rapidité de temps d'arrivée d'un tsunami (23 minutes, soit 1 380 secondes maximum), et au regard de l'éloignement des zones refuges horizontales, nous avons proposé d'intégrer une planification des évacuations à partir de secteurs vers des zones refuges horizontales et verticales. C'est une démarche acceptable en considérant la disponibilité des nouveaux bâtiments faisant office de refuges verticaux et de certains bâtiments existants qui ont le potentiel pour être refuges et qui sont situés dans la zone d'inondation modélisée.

L'intégration de ces deux types de refuges augmente considérablement la possibilité des personnes d'atteindre une zone refuge dans les délais impartis. Toutefois le niveau de l'accessibilité est limité par la disponibilité totale des zones refuges verticales. Dès lors qu'une zone refuge verticale atteint sa capacité maximale d'accueil, les personnes arrivées en retard sont obligées de trouver une autre zone refuge non remplie proche. Ce qui suppose d'abord que les refuges soient reliés par un système de communication leur permettant de re-router les retardataires vers des refuges non pleins. De plus, nous faisons également remarquer que le niveau d'accessibilité des zones refuges est influencé par la somme des populations dans la zone d'inondation. L'accessibilité des zones refuges vers 02h du matin est meilleure que le week-end vers 18h, parce que le volume de personnes présentes est deux fois plus faible à 02H du matin et que l'encombrement des voies est très faible en comparaison du week-end 18H.

Pour répondre au problème de l'engorgement des refuges verticaux, nous avons simulé un scénario d'évacuation échelonné en fonction des activités des bâtiments (et incidemment de la tranche d'âge des personnes les occupant) avec une prescription vers un refuge horizontal pour un jeune travailleur en zone commerciale (loin du rivage) et une prescription au contraire vers un refuge vertical en zone commerciale pour des personnes âgées ou des femmes au foyer habitant la zone sud de la ville, par exemple. Les résultats sont prometteurs, mais la mise en œuvre d'une telle politique d'évacuation exigerait une grande maîtrise et préparation de tous.

Nous avons également développé un plan d'évacuation à partir de secteurs, des zones opérationnelles délimitées par des rues. Leur granularité permet d'agir sur le terrain si l'on explique bien aux résidents de Padang comment reconnaître leur secteur, et où trouver l'information de fuite

(sur des panneaux aux carrefours, en bas des immeubles et construction, sur les places par exemple), mais aussi sur des sites Web en ligne. Cette information est explicitée au moyen d'une carte adaptée pour chaque secteur. Cette carte fléchée propose différentes directions de refuges proches, et indique pour chacun d'entre eux la capacité potentielle d'accueil ainsi que le temps de départ correspondant. La fuite depuis chaque secteur est toujours organisée en s'éloignant du rivage à pied, ce qui permet de rester cohérent dans les choix proposés aux individus.

11.3.2. Perspectives d'intégration des résultats dans un programme de réduction du risque

La simulation d'évacuation ne dispense pas de vrais exercices d'évacuation, mais elle peut aider à optimiser l'emplacement de nouveaux refuges, ou à détecter quels refuges doivent être agrandis. Dans cette thèse, nous n'avons pas réalisé d'autres scénarios de simulation avec ces propositions, mais cela aurait été envisageable avec un peu plus de temps.

Concernant la préparation sur le terrain de l'évacuation, il est indispensable d'afficher les localisations de zones refuges sur certains endroits recevant du public. Les exercices d'évacuation sont également considérés comme la meilleure façon d'augmenter la connaissance des populations par rapport à l'existence des zones refuges et des voies d'évacuation appropriées. Pour cela, nous avons montré comment produire des cartes par secteur d'habitation indiquant les refuges les plus proches, avec un signalement des destinations possibles pour chaque secteur, suivant le moment du départ. La sémantique de ces cartes est nouvelle et reste à tester sur le terrain, pour produire la signalétique appropriée sur le terrain, et mettre en œuvre une politique de sensibilisation des civils.

Conclusion du chapitre

Dans cette thèse, une démarche originale pour l'évaluation de l'exposition des enjeux humains a été mise en œuvre à l'échelle d'une ville, Padang. La méthode, qui s'inspire de précédents travaux dans le domaine (Leone et al. 2012), a été améliorée et adaptée au terrain d'étude, et systématisée dans ses développements méthodologiques via l'emploi d'une base de données spatio-temporelle. Ensuite, elle propose une méthode d'évaluation des capacités d'évacuation fondée sur une simulation dynamique d'une évacuation et la connaissance fine des refuges comme des enjeux humains. Elle permet d'établir un diagnostic complet du risque, ainsi que des préconisations pour la planification d'une évacuation.

L'implémentation de la démarche présente cependant encore certaines incertitudes dans sa mise en œuvre. Tous les facteurs n'ont pas été pris en compte, que ce soit pour la modélisation de la distribution spatio-temporelle de l'exposition des personnes, ou bien pour l'analyse et le renforcement des capacités d'évacuation. Certaines pistes d'améliorations ont été proposées pour prendre en compte les facteurs manquants, si bien qu'on espère dans un avenir très proche une amélioration de la démarche dans son ensemble.

BIBLIOGRAPHIE

- Ahas, Rein, Anto Aasa, Siiri Silm, et Margus Tiru. 2010. « Daily rhythms of suburban commuters' movements in the Tallinn metropolitan area: Case study with mobile positioning data ». *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 18 (1): 45-54.
- Appert, M., et L. Chapelon. 2008. « La vulnérabilité des réseaux routiers urbains face aux risques d'altération ». *La mise en carte des risques naturels. Diversité des approches. Géorisques*, n° 2: 47-58.
- Baladès, J-D. 2004. « Plans de prévention des risques naturels (PPR). Les risques d'inondation : le ruissellement péri-urbain, Note complémentaire, Direction de la Prévention des pollutions et des risques, Sous-direction de la Prévention des risques majeurs ». In . Paris.
- Bardet, J.-P., Costas E. Synolakis, Hugh L. Davies, Fumihiko Imamura, et Emile A. Okal. 2003. *Landslide tsunamis: Recent findings and research directions*. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-0348-7995-8_1.
- Bavoux, Jean-Jacques, Francis Beaucire, Laurent Chapelon, et Pierre Zembri. 2005. *Géographie des transports*. Paris. https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=inrE_IFfjQ8C&oi=fnd&pg=PA145&dq=g%C3%A9ographie+des+transports&ots=rj0uGTw-i4&sig=kIPFbAXbUrEpbjQmZoSPvqaLHK8.
- Behrens, Jörn, Alexey Androsov, A. Y. Babeyko, Sven Harig, Florian Klaschka, et Lars Mentrup. 2010. « A new multi-sensor approach to simulation assisted tsunami early warning ». *Natural Hazards and Earth System Science* 10 (6): 1085-1100.
- Bollin, Christina, Ria Hidajat, et J. Birkmann. 2006. « Community-based risk index: Pilot implementation in Indonesia ». *Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient societies*, 271-89.
- Bolton, Patricia A. 2007. « Managing pedestrians during evacuations of metropolitan areas ». <http://trid.trb.org/view.aspx?id=809182>.
- Borrero, José C., Kerry Sieh, Mohamed Chlieh, et Costas E. Synolakis. 2006. « Tsunami inundation modeling for western Sumatra ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103 (52): 19673-77.
- BPS, et Bappeda. 2011. *Padang In Figures 2010*. BPS Kota Padang dengan Bappeda Kota Padang.
- Briggs, R. W., K. Sieh, A. J. Meltzner, D. Natawidjaja, J. Galetzka, B. Suwargadi, Y. Hsu, M. Simons, N. Hananto, et I. Suprihanto. 2006. « Deformation and slip along the Sunda megathrust in the great 2005 Nias-Simeulue earthquake ». *Science* 311 (5769): 1897-1901.
- Bristow, Gillian, John Farrington, Jon Shaw, Tim Richardson, et others. 2009. « Developing an evaluation framework for crosscutting policy goals: the Accessibility Policy Assessment Tool ». *Environment and planning. A* 41 (1): 48.
- Bromley, Rosemary DF, Andrew R. Tallon, et Colin J. Thomas. 2003. « Disaggregating the space-time layers of city-centre activities and their users ». *Environment and Planning A* 35 (10): 1831-52.
- Brune, S., A. Y. Babeyko, S. Ladage, et S. V. Sobolev. 2010. « Landslide tsunami hazard in the Indonesian Sunda Arc ». *Natural Hazards and Earth System Science* 10 (3): 589-604.
- Cascetta, Ennio, et Giulio Erberto Cantarella. 1991. « A day-to-day and within-day dynamic stochastic assignment model ». *Transportation Research Part A: General* 25 (5): 277-91.
- Chapelon, Laurent. 1996. « Modélisation multi-échelles des réseaux de transport: vers une plus grande précision de l'accessibilité ». *Mappemonde* 3 (96): 28-36.
- Chiu, Yi-Chang, Pavan Korada, et Pitu B. Mirchandani. 2005. « Dynamic traffic management for evacuation ». In *84th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC*.

- Chlieh, Mohamed, Jean-Philippe Avouac, Kerry Sieh, Danny Hilman Natawidjaja, et John Galetzka. 2008. « Heterogeneous coupling of the Sumatran megathrust constrained by geodetic and paleogeodetic measurements ». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)* 113 (B5). <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007JB004981/full>.
- Choi, B. H., E. Pelinovsky, K. O. Kim, et J. S. Lee. 2003. « Simulation of the trans-oceanic tsunami propagation due to the 1883 Krakatau volcanic eruption ». *Natural Hazards and Earth System Science* 3 (5): 321-32.
- Choosumrong, Sittichai, Venkatesh Raghavan, et Nicolas Bozon. 2012. « Multi-Criteria Emergency Route Planning Based on Analytical Hierarchy Process and pgRouting ». *Geoinformatics* 23 (4): 159-68.
- Dewi, Ratna Sari. 2010. « A GIS-based approach to the selection of evacuation shelter building and routes for tsunami risk reduction, A case study of Cilacap coastal area Indonesia. Double Degree International Programme of Geo-Information for Spatial Planning and Risk Management, University of Twente (Netherland) and Gadjah Mada University (Indonesia) ». Universitas Gadjah Mada. http://etd.ugm.ac.id/index.php?mod=book_detail&sub=BookDetail&act=view&typ=html&book_id=45387&obyek_id=4&unitid=1&jenis_id=.
- Dijkstra, Edsger W. 1959. « A note on two problems in connexion with graphs ». *Numerische mathematik* 1 (1): 269-71.
- Dominey-Howes, Dale, Paula Dunbar, Jesse Varner, et Maria Papathoma-Köhle. 2010. « Estimating probable maximum loss from a Cascadia tsunami ». *Natural hazards* 53 (1): 43-61.
- Doocy, Shannon, C. Robinson, Crawford Moodie, et Gilbert Burnham. 2009. « Tsunami-related injury in Aceh Province, Indonesia ». *Global public health* 4 (2): 205-14.
- Fahy, Rita F., et Guylène Proulx. 2001. « Toward creating a database on delay times to start evacuation and walking speeds for use in evacuation modeling ».
- Falck, C., M. Ramatschi, C. Subarya, M. Bartsch, A. Merx, J. Hoeberechts, et G. Schmidt. 2010. « Near real-time GPS applications for tsunami early warning systems ». *Natural Hazards and Earth System Science* 10 (2): 181-89.
- FEMA. 2008. « Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis, FEMA P646 ».
- . 2012. « Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis, second edition, FEMA P646 ».
- Fleischer, J., R. Häner, S. Herrnkind, A. Kloth, U. Kriegel, H. Schwarting, et J. Wächter. 2010. « An integration platform for heterogeneous sensor systems in GITEWS–Tsunami Service Bus ». *Natural Hazards and Earth System Science* 10 (6): 1239-52.
- Fraser, Stuart, Alison Raby, Antonios Pomonis, Katsuchihiro Goda, Siau Chen Chian, Joshua Macabuag, Mark Offord, Keiko Saito, et Peter Sammonds. 2013. « Tsunami damage to coastal defences and buildings in the March 11th 2011 Mw 9.0 Great East Japan earthquake and tsunami ». *Bulletin of earthquake engineering* 11 (1): 205-39.
- Fruin, J. 1971. *Pedestrian Planning and Design*, Metropolitan Association of Urban Design and Environmental Planners, Inc. New York.
- Gaillard, J. C., Elsa Clavé, Océane Vibert, Azhari, Dedi, Jean-Charles Denain, Yusuf Efendi, Delphine Grancher, Desi Sofian R.Sari, et Ryo Setiawan. 2011. « Acihais, Minangkabaus et Simeulues : trois ethnies face à la catastrophe du 26 décembre 2004 ». *Publication de la Sorbonne Tsunarisque. Le tsunami du 26 décembre 2004 à Aceh, Indonésie*.
- Gauraz, A. L., N. Valencia, M. Koscielny, R. Guillande, A. Gardi, F. Leone, et T. Salaun. 2009. « Tsunami damages assessment: vulnerability functions on buildings based on field and earth observation survey. » In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 11:5785. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009EGUGA..11.5785G>.
- González, Frank I. 1999. « Tsunami! » *Scientific American* 280 (5): 44-55.

- Goseberg, N., G. Lämmel, H. Taubenböck, N. Setiadi, J. Birkmann, et T. Schlurmann. 2014. « The Last-Mile Evacuation Project: A Multi-Disciplinary Approach to Evacuation Planning and Risk Reduction in Tsunami-Threatened Coastal Areas ». In *Early Warning for Geological Disasters*, édité par Friedemann Wenzel et Jochen Zschau, 207-26. Advanced Technologies in Earth Sciences. Springer Berlin Heidelberg. http://link.springer.com/gutenberg.univ-lr.fr/chapter/10.1007/978-3-642-12233-0_11.
- Hamacher, Horst W., et Stevanus A. Tjandra. 2001. *Mathematical modelling of evacuation problems: A state of art*. Fraunhofer-Institut für Techno-und Wirtschaftsmathematik, Fraunhofer (ITWM). <http://kluedo.ub.uni-kl.de/files/1477/bericht24.pdf>.
- Hanka, W., J. Saul, B. Weber, J. Becker, P. Harjadi, et others. 2010. « Real-time earthquake monitoring for tsunami warning in the Indian Ocean and beyond ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10: 2611-22.
- Helbing, Dirk, Illés Farkas, et Tamas Vicsek. 2000. « Simulating dynamical features of escape panic ». *Nature* 407 (6803): 487-90.
- Helbing, Dirk, et Peter Molnar. 1995. « Social force model for pedestrian dynamics ». *Physical review E* 51 (5): 4282.
- Helling, Amy. 1998. « Changing intra-metropolitan accessibility in the US: Evidence from Atlanta ». *Progress in Planning* 49 (2): iii - 107.
- Hill, Emma M., Jose C. Borrero, Zhenhua Huang, Qiang Qiu, Paramesh Banerjee, Danny H. Natawidjaja, Pedro Elosegui, et al. 2012. « The 2010 Mw 7.8 Mentawai earthquake: Very shallow source of a rare tsunami earthquake determined from tsunami field survey and near-field GPS data ». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)* 117 (B6). <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2012JB009159/full>.
- Imamura, Fumihiko, Abdul Muhari, Erick Mas, Mulyo Haris Pradono, Stephanie Wegscheider, Joachim Post, et Megumi Sugimoto. 2011. « Tsunami Disaster Mitigation by Integrating Comprehensive Countermeasures in Padang City, Indonesia ». *Journal of Disaster Research* 7 (décembre): pp. 48-64.
- IOC-UNESCO. 2008. « Intergovernmental coordination group for the Tsunami Early warning and mitigation system in the north eastern Atlantic, the Mediterranean and connected seas (ICG/NEAMTWS) ». Athen, Greece.
- Jha, Mithilesh, Katie Moore, et Behruz Pashaie. 2004. « Emergency evacuation planning with microscopic traffic simulation ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1886 (1): 40-48.
- Johnston, David, Rylee Pettersson, Gaye Downes, Douglas Paton, Graham Leonard, Katharine Pishief, et Rob Bell. 2008. « Developing an effective tsunami warning system: Lessons from the 1960 Chile earthquake tsunami for New Zealand coastal communities ». *Kotuitui: New Zealand Journal of Social Sciences Online* 3 (2): 105-20.
- Kanamori, Hiroo, Luis Rivera, et William HK Lee. 2010. « Historical seismograms for unravelling a mysterious earthquake: The 1907 Sumatra Earthquake ». *Geophysical Journal International* 183 (1): 358-74.
- Knoblauch, Richard L., Martin T. Pietrucha, et Marsha Nitzburg. 1996. « Field studies of pedestrian walking speed and start-up time ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1538 (1): 27-38.
- Konca, A. Ozgun, Jean-Philippe Avouac, Anthony Sladen, Aron J. Meltzner, Kerry Sieh, Peng Fang, Zhenhong Li, et al. 2008. « Partial rupture of a locked patch of the Sumatra megathrust during the 2007 earthquake sequence ». *Nature* 456 (7222): 631-35.
- Koshimura, Shunichi, Toshitaka Katada, Harold O. Mofjeld, et Yoshiaki Kawata. 2006. « A Method for Estimating Casualties due to the Tsunami Inundation Flow ». *Natural Hazards* 39 (2): 265-74. doi:10.1007/s11069-006-0027-5.

- Koshimura, Shunichi, Takayuki Oie, Hideaki Yanagisawa, et Fumihiko Imamura. 2009. « Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia ». *Coastal Engineering Journal* 51 (03): 243-73.
- Laghi, M., A. Cavalletti, et P. Polo. 2006. « Evacuation routes tools ArcGIS toolbox ». *Asian Disaster Preparedness Center*, 98.
- Lämmel, Gregor. 2011. « Escaping the tsunami: evacuation strategies for large urban areas concepts and implementation of a multi-agent based approach ». <http://www.opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/frontdoor/index/index/docId/3108>.
- Lange, D., F. J. Tilmann, A. Rietbrock, et D. H. Natawidjaja. 2009. « The Relation of the 30 September 2009 Mw 7.6 Earthquake to the Structure of the West Sumatran Subduction Zone ». In *AGU Fall Meeting Abstracts*, 1:2079. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009AGUFM.U13E2079L>.
- Latter, J. H. 1981. « Tsunamis of volcanic origin: summary of causes, with particular reference to Krakatoa, 1883 ». *Bulletin volcanologique* 44 (3): 467-90.
- Lavigne, F., R. Paris, D. Grancher, P. Wassmer, A. Setiawan, Gunawan T. Syahnan, Waluyo B. Fachrizal, et al. 2006. « Le tsunami du 26 décembre 2004: chronologie et reconstitution de la catastrophe dans la région de Banda Aceh (Sumatra, Indonésie) ». *Rapport du projet Tsunarisque. Délégation Interministérielle pour l'aide Post-Tsunami/Ambassade de France en Indonésie/Paris, Jakarta*, 21-37.
- Lavigne, Franck, et Raphaël Paris. 2011. *Tsunarisque: le tsunami du 26 décembre 2004 à Aceh, Indonésie*. Publications de la Sorbonne.
- Lefebvre, Nicolas, et Michael Balmer. 2007. *Fast shortest path computation in time-dependent traffic networks*. Citeseer. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.335.385&rep=rep1&type=pdf>.
- Leone, Frédéric. 2007. « Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes naturelles: contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones) ». Université Paul Valéry-Montpellier III. <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00276636/>.
- Leone, Frédéric, M.A Babtista, B. Zourarah, K. Mehdi, F Lavigne, N. Meschinet de Richmond, R. Omira, et al. 2012. « Evaluation des vulnérabilités territoriales et humaines face aux tsunamis au Maroc (Façade atlantique et ville d'El Jadida) : données historiques, modélisation de l'aléa et des enjeux humains, critères de vulnérabilité, indicateur de risque, aide à la gestion des évacuations ». Projet ANR-08-RISKMAT-05 MAREMOTI (MAREgraphie, observations de tsunamis, modélisation et études de vulnérabilité pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée occidentale) WP5 (D5.4., D5.5, D5.6). UMR GRED (Ex. EA GESTER) / Université Montpellier 3 et IRD.
- Leone, Frédéric, Nancy Meschinet de Richmond, et Freddy Vinet. 2010a. *Aléas naturels et gestion des risques*. Presses universitaires de France.
- Leone, Frédéric, N.M. de Richmond, et Freddy Vinet. 2010b. *Aléas Naturels Et Gestion Des Risques*. Presses universitaires de France.
- Leone, Frédéric, Mathieu Péroche, et Rafaëlle Gutton. 2014. « Le risque tsunami en Martinique: planifier une évacuation préventive en optimisant l'accessibilité de sites refuges ». *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement* 14 (2). <http://vertigo.revues.org/15046>.
- Leone, Frédéric, Mathieu Péroche, Emilie Lagahé, Monique Gherardi, Alexandre Sahal, Freddy Vinet, Said Hachim, et Franck Lavigne. 2013. « Modélisation de l'accessibilité territoriale pour l'aide à la gestion de crise tsunami (Mayotte, France) ». In *Annales de géographie*, 693:502-24. Armand Colin. http://www.cairn.info/resume.php?ID_ARTICLE=AG_693_0502.
- Leone, Frédéric, et Freddy Vinet. 2006. « La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels ». *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques*, 9-25.

- Liu, Henry X., Jeff X. Ban, Wenteng Ma, et Pitu B. Mirchandani. 2007. « Model reference adaptive control framework for real-time traffic management under emergency evacuation ». *Journal of Urban Planning and Development* 133 (1): 43-50.
- Mas, Erick, Anawat Suppasri, Fumihiko Imamura, et Shunichi Koshimura. 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* 34 (1): 41-57.
- McCaffrey, Robert. 2009. « The Tectonic Framework of the Sumatran Subduction Zone », *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37: 345-66.
doi:10.1146/annurev.earth.031208.100212.
- McCloskey, J., D. Lange, F. Tilmann, S. S. Nalbant, A. F. Bell, D. H. Natawidjaja, et A. Rietbrock. 2010. « The September 2009 Padang earthquake ». *Nature Geoscience* 3 (2): 70-71.
- Mofjeld, Harold O., Christina Massell Symons, Peter Lonsdale, Frank I. González, et Vasily V. Titov. 2004. « Tsunami scattering and earthquake faults in the deep Pacific Ocean ». *Oceanography* 17 (1): 38-46.
- Moussaïd, Mehdi. 2010. « Etude expérimentale et modélisation des déplacements collectifs de piétons ». Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
<http://thesesups.ups-tlse.fr/1118/>.
- Münch, U., A. Rudloff, et J. Lauterjung. 2011. « Postface“ The GITEWS Project—results, summary and outlook” ». *Natural Hazards and Earth System Science* 11 (3): 765-69.
- Murakami, H., K. Takimoto, et A. Pomonis. 2012. « Tsunami evacuation process and human loss distribution in the 2011 Great East Japan earthquake—a case study of Natori city, Miyagi prefecture ». In *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*.
http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1587.pdf.
- Nash, John. 1951. « Non-cooperative games ». *Annals of mathematics*, 286-95.
- Natawidjaja, D.H., K. Sieh, M Chlieh, J Galetzka, B. Suwargadi, H. Cheng, R. L. Edwards, J.P. Avouac, et S.N. Ward. 2006a. « Source parameters of the great Sumatran megathrust earthquakes of 1797 and 1833 inferred from coral microatolls ». *Journal of Geophysical Research* 111 (B6): 1978-2012. doi:10.1029/2005JB004025.
- Natawidjaja, D. H., K. Sieh, M. Chlieh, J. Galetzka, B. W. Suwargadi, H. Cheng, R. L. Edwards, J. P. Avouac, et S. N. Ward. 2006b. « Source parameters of the great Sumatran megathrust earthquakes of 1797 and 1833 inferred from coral microatolls ». *Journal of Geophysical Research* 111 (B6): B06403.
- Pan, Xiaoshan, Charles S. Han, Ken Dauber, et Kincho H. Law. 2007. « A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations ». *Ai & Society* 22 (2): 113-32.
- Papadopoulos, Gerassimos A., et Fumihiko Imamura. 2001. « A proposal for a new tsunami intensity scale ». In *ITS 2001 Proceedings*, 569-77.
http://www.researchgate.net/profile/Fumihiko_Imamura/publication/228781850_A_proposal_for_a_new_tsunami_intensity_scale/links/0c96051c50bff2873d000000.pdf.
- Papathoma, M., et D. Dominey-Howes. 2003. « Tsunami vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Corinth, Greece ». *Natural Hazards and Earth System Science* 3 (6): 733-47.
- Papathoma, M., D. Dominey-Howes, Y. Zong, et D. Smith. 2002. « Assessing tsunami vulnerability, an example from Herakleio, Crete ». *Natural Hazards and Earth System Science* 3 (5): 377-89.
- Péroche, M., F. Leone, et R. Gutton. 2014. « An accessibility graph-based model to optimize tsunami evacuation sites and routes in Martinique, France ». *Advances in Geosciences* 38: 1-8.
- Rikitake, T., et I. Aida. 1988. « Tsunami hazard probability in Japan ». *Bulletin of the Seismological Society of America* 78 (3): 1268-78.

- Robert, Samuel, Guérino Sillère, et Sophie Lizard. 2008. « Évaluer et représenter le nombre d'usagers sur une plage urbaine (Les Ponchettes, Nice) ». *Mappemonde*, n° 91. <http://mappemonde.mgm.fr/num19/articles/res08305.html>.
- Rudloff, A., J. Lauterjung, U. Münch, et S. Tinti. 2009. « Preface "The GITEWS Project (German-Indonesian Tsunami Early Warning System)" ». *Natural Hazards and Earth System Science* 9 (4): 1381-82.
- Russell, Stuart, et Peter Norvig. 1995. « Artificial intelligence: a modern approach ». <http://cuminad.scix.net/cgi-bin/works/Show?1bb0>.
- Saadatseresht, Mohammad, Ali Mansourian, et Mohammad Taleai. 2009. « Evacuation planning using multiobjective evolutionary optimization approach ». *European Journal of Operational Research* 198 (1): 305-14.
- Sahal, Alexandre. 2011. « Le risque tsunami en France: contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque. » Université Panthéon-Sorbonne-Paris I. <http://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-00651617/>.
- Sahal, Alexandre, et Julie Morin. 2012. « Effects of the October 25, 2010, Mentawai tsunami in La Réunion Island (France): observations and crisis management ». *Natural hazards* 62 (3): 1125-36.
- Satake, Kenji, Yuichi Nishimura, Purna Sulastya Putra, Aditya Riadi Gusman, Haris Sunendar, Yushiro Fujii, Yuichiro Tanioka, Hamzah Latief, et Eko Yulianto. 2013. « Tsunami source of the 2010 Mentawai, Indonesia earthquake inferred from tsunami field survey and waveform modeling ». *Pure and Applied Geophysics* 170 (9-10): 1567-82.
- Schlurmann, T., W. Kongko, N. Goseberg, D. H. Natawidjaja, et K. Sieh. 2010. « Near-field tsunami hazard map Padang, West Sumatra: Utilizing high resolution geospatial data and reasonable source scenarios ». *COASTAL ENGINEERING*, 2.
- Setiadi, Neysa. 2014. « Assessing People's Early Warning Response Capability to Inform Urban Planning Interventions to Reduce Vulnerability to Tsunamis: Case Study of Padang City, Indonesia ». Univ. Bonn, Inst. für Geodäsie und Geoinformation. <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2014/3502/3502a.pdf>.
- Sevtsuk, Andres, et Carlo Ratti. 2010. « Does urban mobility have a daily routine? Learning from the aggregate data of mobile networks ». *Journal of Urban Technology* 17 (1): 41-60.
- Shuto, N. 1993. *Tsunami intensity and disasters*. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-3620-6_15.
- Sieh, K. 2007. « The Sunda Megathrust—Past, present and future ». *Journal of Earthquake and Tsunami* 1 (01): 1-19.
- Spahn, Harald, Michael Hoppe, H. D. Vidiarina, et Benny Usdianto. 2010. « Experience from three years of local capacity development for tsunami early warning in Indonesia: challenges, lessons and the way ahead ». *Natural Hazards and Earth System Science* 10 (7): 1411-29.
- Steinmetz, T., U. Raape, S. Teßmann, C. Strobl, M. Friedemann, T. Kukofka, T. Riedlinger, E. Mikusch, et S. Dech. 2010. « Tsunami early warning and decision support ». *Natural Hazards and Earth System Science* 10 (9): 1839-50.
- Strunz, G., J. Post, K. Zosseder, S. Wegscheider, M. Mück, T. Riedlinger, H. Mehl, et al. 2011. « Tsunami risk assessment in Indonesia ». *Natural Hazards and Earth System Science* 11 (1): 67-82.
- Sugimoto, Toshitsugu, H. Murakami, Y. Kozuki, K. Nishikawa, et Tomoe Shimada. 2003. « A human damage prediction method for tsunami disasters incorporating evacuation activities ». *Natural Hazards* 29 (3): 587-602.
- Tang, Fangqin, et Aizhu Ren. 2008. « Agent-based evacuation model incorporating fire scene and building geometry ». *Tsinghua Science & Technology* 13 (5): 708-14.
- Taubenböck, Hannes, Nils Goseberg, Neysa Setiadi, Gregor Lämmel, Florian Moder, Martin Oczipka, Hubert Klüpfel, et al. 2009. « "Last-Mile" preparation for a potential disaster—Interdisciplinary approach towards tsunami early warning and an evacuation information

- system for the coastal city of Padang, Indonesia ». *Natural Hazards and Earth System Science* 9 (4): 1509-28.
- Taubenböck, H., N. Goseberg, G. Lämmel, N. Setiadi, T. Schlurmann, K. Nagel, F. Siegert, et al. 2013. « Risk Reduction at the “Last-Mile”: An Attempt to Turn Science into Action by the Example of Padang, Indonesia ». *Natural Hazards* 65 (1): 915-45. doi:10.1007/s11069-012-0377-0.
- Terrier, Christophe. 2009. « Distinguer la population présente de la population résidente ». *Courrier des statistiques* 128: 63-70.
- Theodoulou, Gregoris, et Brian Wolshon. 2004. « Alternative methods to increase the effectiveness of freeway contraflow evacuation ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n° 1865: 48-56.
- Titov, Vasily, Alexander B. Rabinovich, Harold O. Mofjeld, Richard E. Thomson, et Frank I. González. 2005. « The global reach of the 26 December 2004 Sumatra tsunami ». *Science* 309 (5743): 2045-48.
- UNESCO. 2009. *Tsunami risk assessment and mitigation for the Indian Ocean; knowing your tsunami risk – and what to do about it*. IOC manuals and guides No. 52.
- Watts, P., et C. F. Waythomas. 2003. « Theoretical analysis of tsunami generation by pyroclastic flows ». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)* 108 (B12). <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002JB002265/full>.
- YUN, NY, et M. HAMADA. 2012. « A Study on Evacuation Behaviors in the 2011 Great Japan Earthquake ». http://peer.berkeley.edu/~aschell/15WCEE/pdf/WCEE2012_1213.pdf.