

WP 5. Vulnerability damages and emergency management studies

Livrables D5.4, D 5.5, D 5.6

**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, indicateurs de risque,
aide à la gestion des évacuations

Frédéric Leone (Dir.)

Mathieu Péroche, Emilie Lagahé, Anthony Heymann, Monique Gherardi, Jean-Philippe
Cherel, Jean-Charles Denain, Nancy Meschinet de Richemond, Nicolas Meunier
UMR GRED (ex EA GESTER) / Université Montpellier 3 & IRD

Samira Mellas, Bendahhou Zourarah, Khaled Mehdi
Univ. El Jadida, Maroc

Rachid Omira, Maria-Ana Baptista
Univ. Lisbonne

Franck Lavigne, Alexandre Sahal, Delphine Grancher
LGP / Univ. Paris 1 & CNRS Meudon

Avec le soutien technique de :

*Université d'El Jadida (Convention)
Agence Urbaine d'El Jadida (Driss Inani)
Direction de l'Aménagement du Territoire du Maroc
Observatoire National de l'Environnement Marocain (Mme Bourrous)
Centre National des Etudes et de Recherches Routière du Maroc (Convention)*

Septembre 2012

Citation de ce rapport :

Leone F. (Dir.), Baptista M.A., Zourarah B., Mehdi K., Lavigne F., Meschinet de Richemond N., Omira R., Mellas S., Péroche M., Lagahé E., Heymann A., Gherardi M., Grancher D., Cherel J.P., Sahal. A., Denain J.C., Meunier. N., Inani D. (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, indicateurs de risque, aide à la gestion des évacuations* - Rapport WP5 (D5.4., D5.5, D5.6), **Projet ANR-08-RISKNAT-05 MAREMOTI** (MAREgraphie, observations de tsunamis, modélisation et études de vulnérabilité pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée occidentale), UMR GRED (ex. EA GESTER) / Université Montpellier 3 & IRD, 190 p. + annexes.

SOMMAIRE

RESUME	4
A CONTEXTE HISTORIQUE DES TSUNAMIS AU MAROC	6
A.1 Confrontation de différents catalogues	6
A.2 Le tsunami de 1755 et la ville d'El Jadida : réanalyse des sources historiques.....	10
A.2.1 Des incertitudes qui persistent	10
A.2.2 Une nécessaire réanalyse des sources documentaires primaires	12
A.2.3 Un contexte implicite difficile à cerner	14
A.2.4 Corpus documentaire examiné	15
A.2.5 Autres documents consultés, mais moins utiles	16
A.2.6 Commentaire plus détaillé sur chacun des 4 documents intéressants	23
A.2.7 Liste des sources historiques consultées	36
B CONDITIONS DE MODELISATION D'UN TSUNAMI DE REFERENCE (1^{ER} NOVEMBRE 1755)	38
B.1 Construction de référentiels « trait de côte » et « fond communal »	38
B.2 Elaboration de MNT et MNE.....	42
B.2.1 MNT régional	42
B.2.2 MNT et MNE locaux (El Jadida)	43
B.3 Modélisation d'un tsunami de référence (source HSH, 1 ^{er} novembre 1755)	46
B.3.1 Choix d'un scénario de référence	46
B.3.2 Modèle de simulation	49
B.3.3 Résultats de la simulation	51
C EXPOSITION TERRITORIALE AU RISQUE TSUNAMI A L'ECHELLE REGIONALE	57
C.1 Les principaux enjeux de la façade atlantique marocaine	57
C.2 Les bases de données sur l'occupation du sol et la population.....	63
C.2.1 La base MEDGEOBASE/Maroc sur l'occupation du sol	64
C.2.2 La base LandScan 2008	65
C.3 Géo-indicateurs d'exposition aux tsunamis.....	66
C.3.1 Choix d'un maillage territorial de référence	66
C.3.2 Des expositions centrées sur l'axe urbain médio-atlantique	67
C.4 Présentation de la ville d'El Jadida : contexte historique et géographique.....	70
C.4.1 les fondations historiques de la ville d'El Jadida	70
C.4.2 Maillage territorial	73

D	FACTEURS ET CRITERES DE VULNERABILITE HUMAINE FACE AUX TSUNAMIS	78
D.1	Quelle approche de la vulnérabilité ?.....	78
D.2	La vulnérabilité humaine <i>a posteriori</i> : les enseignements de quelques retours d'expérience	78
D.2.1	Facteurs physiologiques	79
D.2.2	Facteurs géographiques	80
D.2.3	Facteurs psycho-sociologiques	81
D.2.4	Facteurs socio-culturels	83
D.2.5	Facteurs socio-économiques	84
D.2.6	Synthèse des principaux facteurs de vulnérabilité	85
E	CRITERES DE VULNERABILITE DU BATI FACE AUX TSUNAMIS	86
E.1	Confrontation de quelques typologies du bâti existantes	86
E.1.1	Banda Aceh, tsunami du 26 décembre 2004, Leone et al. (2010)	86
E.1.2	Sri Lanka, tsunami du 26 décembre 2004, Garcin et al. (2007)	88
E.1.3	Maroc, typologie prospective, Omira et al. (2009)	89
E.2	Evolution et typologie urbaine d'El Jadida	91
E.2.1	Les grandes phases d'urbanisation de la ville d'El Jadida	91
E.2.2	Proposition d'une typologie du bâti propre à El Jadida	94
F	DIAGNOSTIC DE VULNERABILITE HUMAINE A EL JADIDA	103
F.1	Zone d'étude	103
F.2	Contenu du SIG	104
F.3	Critères de vulnérabilité relevés	106
F.3.1	Personnes situées à l'intérieur (bâtiments)	106
F.3.2	Personnes situées à l'extérieur (voies et espaces publics)	109
G	EVALUATION SPATIO-TEMPORELLE DES ENJEUX HUMAINS SUR EL JADIDA	112
G.1	La variable « enjeux » d'un scénario de risque	112
G.2	Principaux modes et rythmes de vie.....	112
G.2.1	Des rythmes de vie guidés par la religion (Maroc)	112
G.2.2	Mobilité urbaine et rythmes de vie à El Jadida	113
G.3	Typologie des espaces suivant leur fonction	116
G.4	Capacité d'Accueil Maximale Crédible (CAMC).....	119
G.4.1	Définition	119
G.4.2	CAMC des bâtiments	120
G.4.3	CAMC des espaces extérieurs (plein-air)	123
G.4.4	CAMC des voies de communication	123
G.5	Taux et courbes de fréquentation (TF).....	125
G.5.1	Définition	125
G.5.2	Méthodes de comptage	125
G.5.3	Améliorations et limites des courbes de fréquentation	128
G.5.4	Résultats cartographiques	129

H	CARTOGRAPHIE MULTI-TEMPORELLE DU RISQUE SUR EL JADIDA	133
H.1	Principe du calcul des indices de risque	133
H.2	Matrices de probabilités de décès	133
H.2.1	Personnes de trouvant à l'extérieur d'un bâtiment	133
H.2.2	Personnes de trouvant à l'intérieur d'un bâtiment	136
H.3	Résultats cartographiques	139
I	DEFINITION DE ZONES REFUGES EN CAS D'EVACUATION	143
I.1	La notion de zone refuge (ZR)	143
I.2	Sélection des zones refuges à El Jadida	144
I.3	Hierarchisation des zones refuges sélectionnées	145
I.3.1	Principe de hierarchisation	145
I.3.2	Critères de hierarchisation	146
I.3.3	Résultats du classement	148
J	MODELISATION DE L'ACCESSIBILITE DES ZONES REFUGES	152
J.1	La notion d'accessibilité	152
J.2	Calculer l'accessibilité au moyen de graphes	152
J.3	Modalités d'évacuation et critères de friction	153
J.4	Graphe et typologie des accès à El Jadida	156
J.5	Vitesses de déplacement pedestre appliquées	158
J.6	Scénarios d'accessibilité multi-horaire	164
J.6.1	Les variables des scénarios	164
J.6.2	Restitutions graphiques des résultats	165
J.6.3	Résultats : accessibilité globale (AG)	165
J.6.4	Résultats : accessibilité locale (AL)	169
J.6.5	Discussion	178
K	CONCLUSION : UTILITE DES RESULTATS POUR LA PREVENTION	180
K.1	Contribution à un nouveau modèle de vulnérabilité humaine	180
K.2	En attendant un système d'alerte régional	180
K.3	Valorisation et aide à la prévention	181
	BIBLIOGRAPHIE	185
	ANNEXE 1 :	190
	ANNEXE 2 :	193
	ANNEXE 3 :	217
	ANNEXE 4 :	236

RESUME

Le retour d'expérience mené à la suite du tsunami du 26 décembre 2004 en Indonésie dans le cadre du programme Tsunarisque, nous a permis d'appréhender ce risque sur d'autres territoires exposés. Cette communication développe une approche d'évaluation intégrée du risque de tsunami sur le littoral atlantique Marocain, focalisée sur la ville d'El Jadida (anciennement Mazagan). Notre approche privilégie une modélisation spatio-temporelle de la vulnérabilité humaine à l'échelle urbaine couplée à une modélisation numérique fine et quantitative de l'aléa submersion par tsunami. Cette recherche est en cours de développement au sein du programme de recherche ANR MAREMOTI (MAREgraphie, observations de tsunaMis, mOdélisation et études de vulnérabilité pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée occidentale) piloté par le CEA.

Les simulations numériques ont été réalisées avec le code COMCOT-Lx de la FFCUL. Ce code de calcul permet de modéliser la génération du tsunami par déformation du plancher océanique, la propagation des vagues en haute mer, puis l'amplification et l'inondation des rivages. Le scénario de référence choisi pour cette étude est celui du 1^{er} novembre 1755, dit de Lisbonne. La source sismique tsunamigène retenue est la *Horseshoe fault* du golfe de Cadix (HSF, Garcia 2003). La modélisation produite depuis cette source très énergétique nous donne un temps d'arrivée des premières ondes de 53 mn sur El Jadida. Elle a par ailleurs permis d'obtenir trois zonages de submersion marine de résolution croissante en faisant varier les supports altimétriques des modèles : (1) zonage régional sur tout le littoral marocain atlantique sur support MNT SRTM à 90m, (2) zonage local à El Jadida sur support MNT 27m, (3) zonage local à El Jadida sur support MNE à 1m intégrant le bâti existant, les rues et les ouvrages de protection portuaire (quais, digues, esplanade de front de mer). Outre le zonage de la submersion à terre, les simulations produisent deux paramètres déterminants pour comprendre les processus d'endommagement sur les personnes et les infrastructures : la vitesse et la profondeur de l'inondation. Sur El Jadida, le gradient de vitesse s'étend de 0 à 10 m/s tandis que les profondeurs d'eau sont comprises entre 0 et 9 m. Ces valeurs sont proches de certains témoignages historiques du tsunami de 1755 sur la ville de Mazagan. Ces comparaisons méritent d'être affinées par une nouvelle modélisation intégrant la configuration bathymétrique et urbaine de la ville à l'époque et une réexpertise des sources documentaires historiques.

En complément de cette simulation numérique, notre étude s'est focalisée sur la vulnérabilité humaine d'El Jadida. Une première phase du travail a consisté à diagnostiquer sur le terrain et renseigner dans une base SIG plusieurs critères de vulnérabilité du bâti et des personnes situées à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments : résistance du bâtiment (5 classes de vulnérabilité), nombre d'étages, présence de grandes ouvertures, densité d'objets flottants potentiels dont les véhicules en déplacement ou en stationnement. Ces critères ont été sélectionnés à partir des observations de terrain menées en Indonésie en 2004, de la bibliographie et de plusieurs vidéos montrant l'impact de tsunami récents. Au total ce sont 2634 polygones bâtis et 688 espaces ouverts (espaces de plein air) sur une zone d'étude totale submersible de 6 km² qui ont été renseignés. Les référentiels spatiaux du diagnostic intégrés au SIG ont été une image satellite *Quick Bird* du 15 juillet 2009 (11h34 locale) et la base de données du SDAU de la province d'El Jadida de 2004.

Dans un deuxième temps, le scénario a été alimenté par une analyse du rythme urbain et des mobilités spatio-temporelles au sein de la ville. En complément des observations et enquêtes visant à reconstituer les déplacements de personnes, nous avons alimenté la base SIG par les fonctions principales et secondaires de chaque lieu étudié (bâtiments et espaces ouverts), en différenciant même pour les bâtiments les fonctions des rez-de-chaussée et des étages supérieurs. La typologie des fonctions retenue compte 49 classes (28 pour les lieux bâtis, 21

pour les espaces extérieurs). Ensuite, chaque fonction a été assortie d'une courbe de fréquentation humaine entre 0 et 24h, pour deux saisons (haute et basse saison touristiques). Les taux de fréquentation horaire ont été obtenus soit directement par comptage sur plusieurs lieux représentatifs de la ville, soit par extrapolation et/ou à partir des statistiques disponibles auprès des administrations locales. Par ailleurs, la capacité d'accueil maximale crédible de chaque rez-de-chaussée ou espace ouvert (dont les rues) a été estimée en fonction de sa classe fonctionnelle et de sa localisation. Ces données démographiques ont permis de développer un modèle de fréquentation qui débouche sur des cartes de densités humaines heure par heure, et d'obtenir ainsi une estimation fine des enjeux humains exposés à un éventuel tsunami.

Une troisième phase de l'analyse répond aux objectifs fixés : évaluer, quantifier et spatialiser le risque de pertes humaines en cas de tsunami majeur sur El Jadida au moyen d'indices de risque (geo-indices). Ces indices sont issus de matrices de probabilités de décès fondées sur les données de vitesses et de profondeur de submersion, et croisées avec les densités humaines au pas horaire. Chaque matrice de décès est adaptée à l'environnement des personnes en intégrant les facteurs de vulnérabilité extrinsèques qui s'appliquent (ex. fragilité du bâtiment, densité de débris flottants, etc.). Ces matrices intègrent en particulier les courbes de fragilité du bâti développées par notre équipe après le tsunami de 2004 en Indonésie (Leone *et al.*, 2010). Les résultats cartographiques permettent de visualiser le niveau de risque pour les personnes, sa variabilité spatiale et temporelle, au sein d'une ville touristique du Maghreb. On obtient ainsi une cartographie dynamique du risque.

Outre ses premiers résultats cartographiques pour sensibiliser les décideurs et guider leurs choix de prévention, cette étude a été l'occasion de développer un nouveau modèle de vulnérabilité humaine, transposable à d'autres sites. Ce modèle a été complété par une évaluation de l'accessibilité pédestre des zones refuges en cas d'évacuation planifiée. Cette accessibilité a été modélisée sur la base d'un graphe des rues de la ville en utilisant un algorithme de recherche des plus courts chemins. Les zones refuges potentielles ont préalablement fait l'objet d'un diagnostic débouchant sur un classement qualitatif. Plusieurs scénarios d'accessibilité ont été testés en fonction des zones refuges sélectionnées, des vitesses d'évacuation, et du moment de la journée (jour / nuit). Les temps et courbes d'accessibilité obtenus ont facilité l'élaboration d'un schéma d'évacuation d'une partie de la ville destiné aux autorités locales. Ce schéma doit maintenant s'inscrire dans un dispositif d'alerte et d'évacuation national qu'il reste à créer.

A CONTEXTE HISTORIQUE DES TSUNAMIS AU MAROC

A.1 CONFRONTATION DE DIFFERENTS CATALOGUES

F. Kaabouben et al. (2009) ont répertorié l'ensemble des tsunamis probables ayant touché les côtes marocaines atlantiques et méditerranéennes depuis 382 apr. J.-C (tableau A1). Ce catalogue est construit sur le modèle de celui du GITEC (*Genesis and Impact to Tsunamis in the European Community*). Il recense 14 événements tsunamigènes sur l'ensemble des côtes marocaines. Seulement 7 d'entre eux présentent un bon niveau de fiabilité de « tsunami déterminé ». Bien que la localisation des sources des séismes ne soit pas connue avec précision, 7 des 14 événements ont frappé la côte atlantique. Parmi l'ensemble de ces événements, le plus dévastateur est celui du 1^{er} novembre 1755 (Mw 8.5), il s'est produit sur la côte atlantique.

Comme tous les tsunamis connus sur les côtes marocaines sont d'origine sismique, le recueil des séismes marocains est l'une des principales sources de données pour la construction de ce catalogue. La liste des événements tsunamigènes se base également sur des observations directes, sur des témoignages écrits contemporains et sur des données disponibles dans les pays voisins (Portugal et Espagne). Parmi les événements plus récents, survenus au cours du XX^e siècle, figurent entre autres, ceux détectés par les marégraphes.

Year	Month	Day	Hour	Min	Longitude	Latitude	Source Area	Mw	Reliability	Source
382	–	–	–	–	–10.00	36.00	South West Iberia	–	2	3,4
881	5	22					West Mediterranean	–	4	1
1522	9	22	10		–02.66	36.97	West Mediterranean	6.5	4	1
1680	10	9	7		–04.60	36.80	West Mediterranean	6.8	4	1
1733	–	–	–	–	–	–	West Mediterranean	–	0	19
1755	11	1	10	16	–10.00	36.50	South West Iberia	8.7	4	1,3,5,6,7,8
1761	3	31	12	15	–13.00	34.50	Gloria Fault	8.5	3	2,9
1790	10	9	1	15	–00.60	35.70	West Mediterranean	6.7	1	1
1856	8	21	21	30	+05.72	36.83	West Mediterranean	–	0	20
1941	25	11	18	04	–18.98	37.42	Gloria Fault	8.2	4	6,10
1969	2	28	2	40	–10.57	36.01	South West Iberia	7.9	4	11,12,13,14,15,16,17
1975	5	26	9	11	–17.56	35.98	Gloria Fault	7.9	4	11,18
1980	10	10	12		+01.68	36.28	West Mediterranean	5.8	0	20
2003	5	21	18	44	+03.08	36.80	West Mediterranean	7.0	0	21, 22, 23

Tableau A1 : Catalogue des tsunamis probables ayant touché les côtes marocaines (Kaabouben et al., 2009).

Sources : (1) El Mrabet (1991, 2005); (2) Baptista et al. (2006); (3) Catalogo GITEC; (4) Sousa (1678); (5) Gazette de Cologne (1756); (6) Debrach (1946); (7) Gazette d'Amsterdam (1755); (8) Verdadera Relacion (1756); (9) Le Journal Historique (1773); (10) Moreira (1968); (11) (Baptista et al. (1992); (12) Heinrich et al. (1994); (13) Gjevik et al. (1997); (14) Rabinovich et al. (1998); (15) Di'ario de Noticias (1969); (16) Di'ario da Manhã (1969); (17) Al Alam (1969); (18) Kaabouben et al. (2008); (19) Soloviev (1990); (20) USGS online database; (21) Tinti et al., 2005; (22) Alasset et al., 2006; (23) Tel et al., 2004; (24) Yelles-Chaouche (1991).

D'autres catalogues sont disponibles également en ligne sur internet comme par exemple celui du GIC/SATANEM et de la NOAA. Celui du GIC/SATANEM a été révisé récemment par une équipe de chercheurs italiens en charge de compiler l'ensemble des données historiques disponibles sur d'éventuels tsunamis pour toute l'Europe. Ils en ont recensés 237.

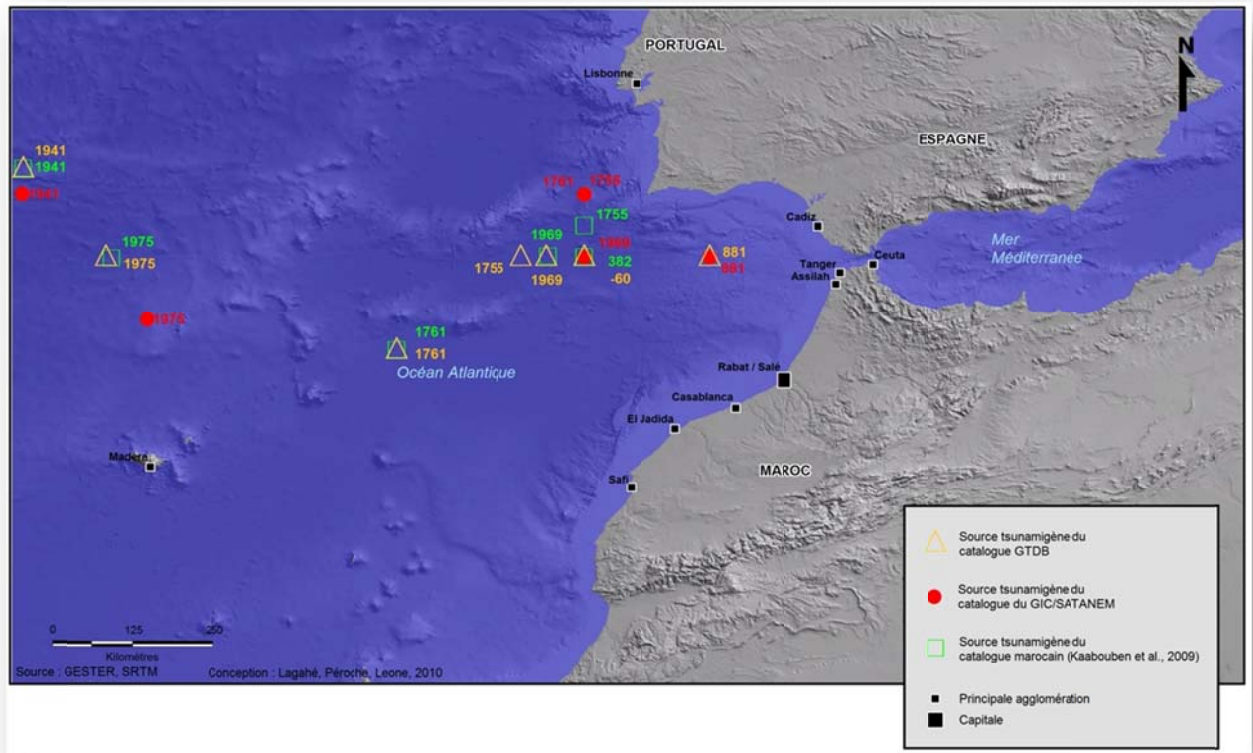


Figure A1: Carte de situation des sources des tsunamis ayant touché les côtes marocaines (D'après Kaabouben et al (2009); NOAA online Database; GIC/SATANEM).

Il est intéressant de confronter ces deux catalogues à celui réalisé par Kaabouben et al. (2009), afin de mettre en exergue les incertitudes ainsi que le manque de fiabilité des sources historiques antérieures au XX siècle. La carte ci-après localise les sources tsunamigènes qui figurent dans les trois catalogues (figure A1). Il s'agit des événements qui auraient probablement touchés la côte Atlantique de 382, 881, 1755, 1761, 1941, 1969 et 1975 apr. J.-C. Ces informations sont tirées du catalogue de Kaabouben et al., (2009). Nous avons surimposé leur localisation à celle fournie par les catalogues du GIC/SATANEM et de la NOAA. On remarque que seules les sources récentes et qui ont bénéficié d'un enregistrement instrumental sont bien groupées. Cette carte montre l'incertitude qui demeure dans la localisation des sources tsunamigènes, en particulier dans le Golfe de Cadix. A ce titre, 5 sources sismiques potentiellement tsunamigènes ont été recensées dans cette zone (figure A2). L'une

d'entre elles a généré en particulier l'évènement catastrophique du 1^{er} novembre 1755, dit séisme de Lisbonne.

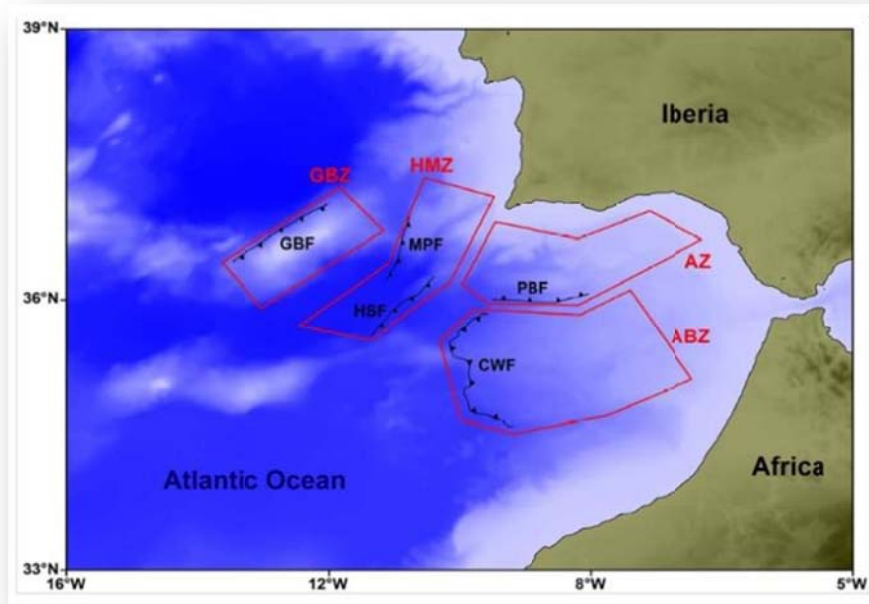
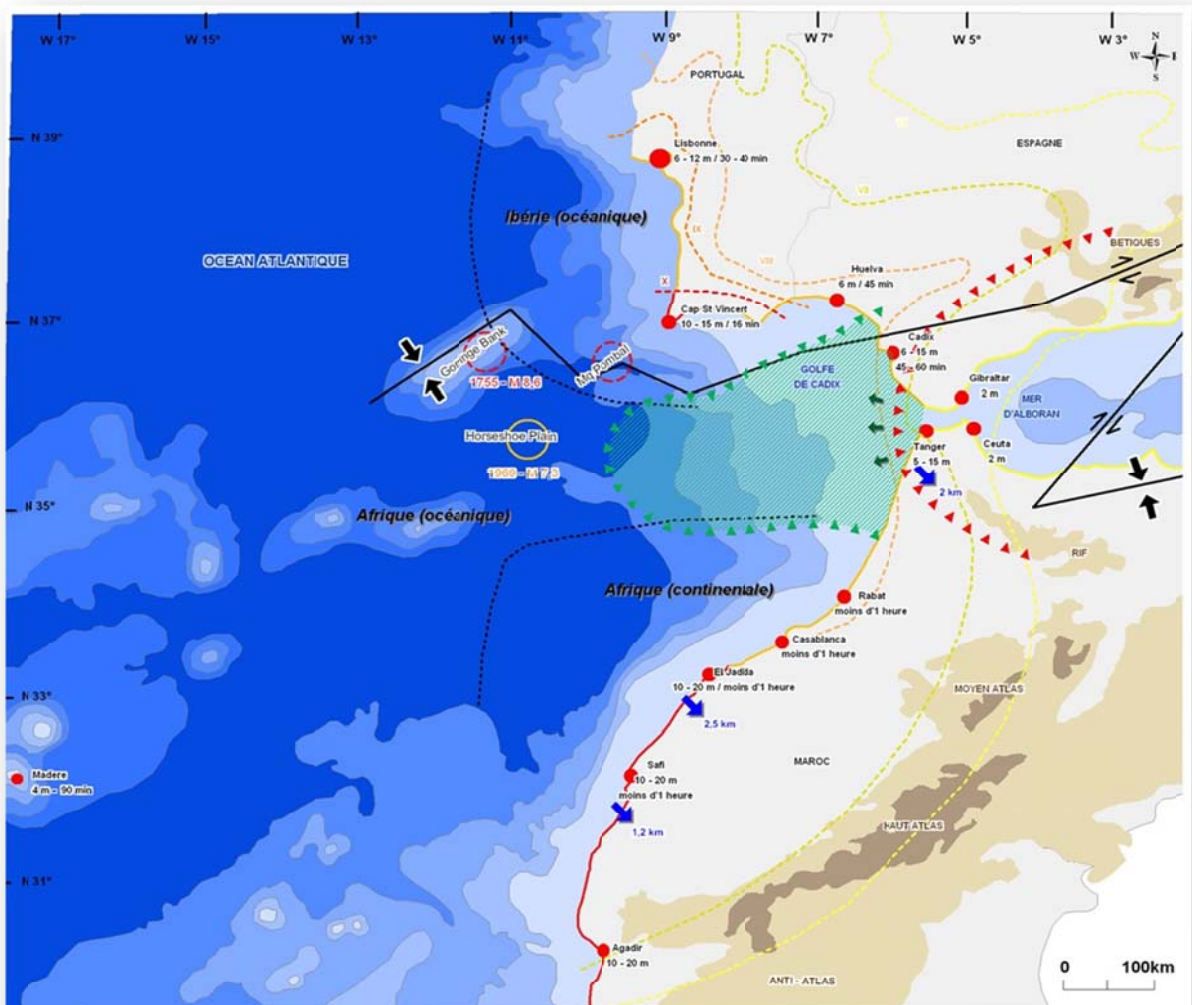


Figure A2 : Sources potentiellement tsunamigènes et failles correspondantes dans le Golfe de Cadiz (polygones rouges): GBZ : Goringe bank zone; HMZ : Horseshoe/Marques de Pombal zone; AZ : South Algarve zone and ABZ : Alboran wedge Slab zone. Typical faults (black traces); GB F: Goring Bank fault; MPF : Marques de Pombal fault, HSF : Horseshoe fault, PBF : Portimao Bank fault and CWF : Cadiz Wedge fault. (D'après Omira et al., 2009).

Deux évènements retiennent particulièrement notre attention. Celui de 1^{er} novembre 1755 pour son ampleur exceptionnelle et celui du 28 février 1969 pour son âge récent. Bien que présentant des impacts très différents (très réduits pour 1969), ce sont les deux évènements les mieux renseignés par les archives et les mieux décrits dans la littérature. Une synthèse cartographique du contexte de déclenchement et des effets de l'évènement de 1755 est présentée sur la **figure A3**.



Conception : R. MEUNIER, M1 GCRN, 2008

Sources : Gutscher (2005) et Gutscher, Baptista and Miranca (2006), cartes modifiées

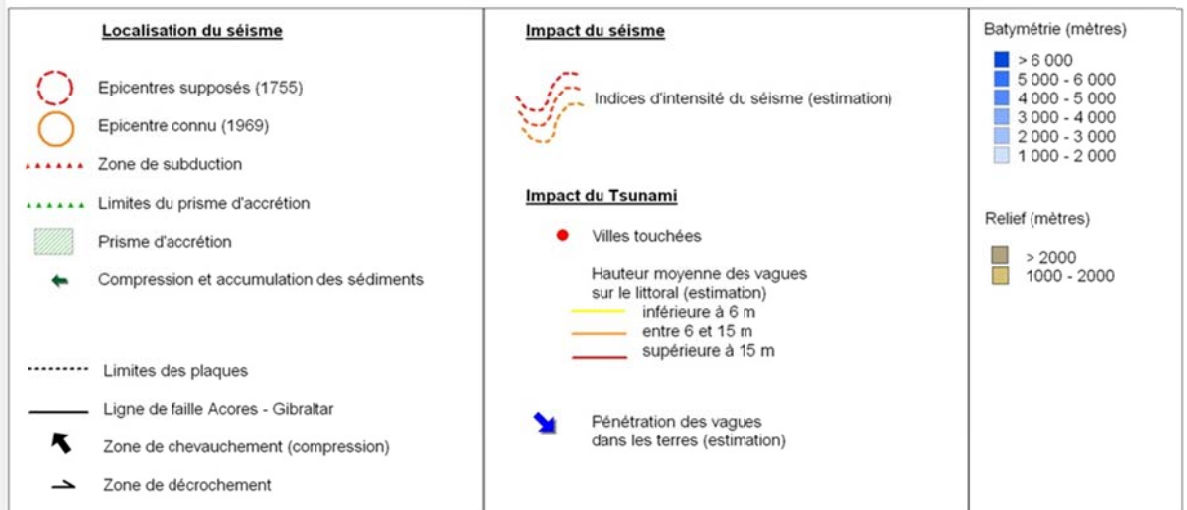


Figure A3 : Contexte et effets du séisme et du tsunami induit du 1^{er} novembre 1755.

A.2 LE TSUNAMI DE 1755 ET LA VILLE D'EL JADIDA : REANALYSE DES SOURCES HISTORIQUES

A.2.1 DES INCERTITUDES QUI PERSISTENT

Le 1^{er} novembre 1755, Lisbonne est ravagée par un séisme situé dans le golf de Cadiz et d'une magnitude proche de 8,7 sur l'échelle de Richter (Baptista et al, 2003). Ce tremblement de terre provoque une série d'incendies au sein de la ville et sera ressenti à travers toute la péninsule Ibérique, le nord du Maroc et Madère. Il va également engendrer un tsunami de très grande ampleur. Ces faits sont rapportés à travers de nombreux écrits dans les pays frappés par cette catastrophe. Ce tsunami a été observé sur le pourtour du Golf de Cadiz (Portugal, Espagne et Nord du Maroc). Il aurait causé des dégâts considérables dans un grand nombre de ville, entre Tanger et Agadir, et tué environ 1 000 personnes sur les côtes marocaines. Le train d'onde a parcouru tout le bassin atlantique pour venir affecter les côtes des Caraïbes et les côtes d'Amérique du Nord et du Sud, situées à plus d'un millier de kilomètres de la source (figure A4). Le tsunami du 1^{er} novembre 1755 (Mw 8.5) est le seul télétsunami connu en Atlantique nord. Il s'agit d'un événement de référence qui vient alimenter la base de nombreux scénarios de risque pour cet océan. C'est pourquoi une bonne connaissance de cet événement historique est nécessaire.

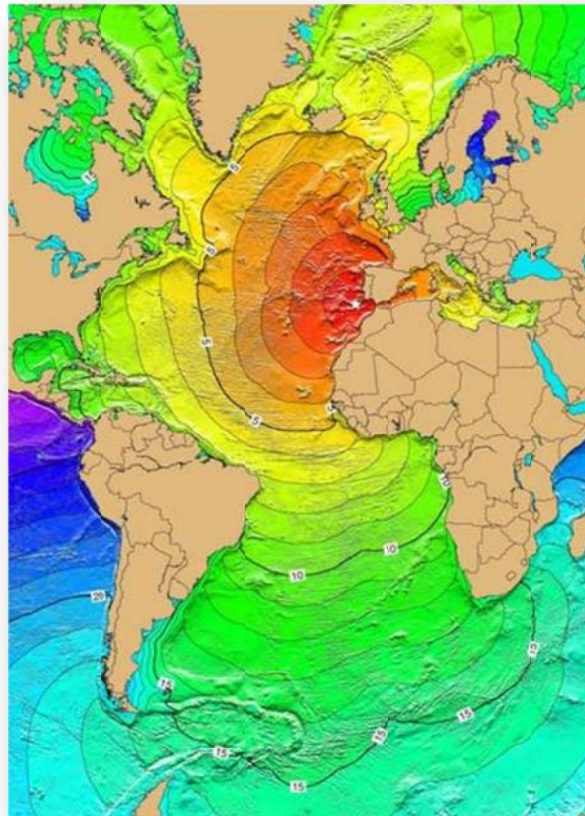


Figure A4 : Temps de propagation des ondes du tsunamí de 1755 (Source NOAA).

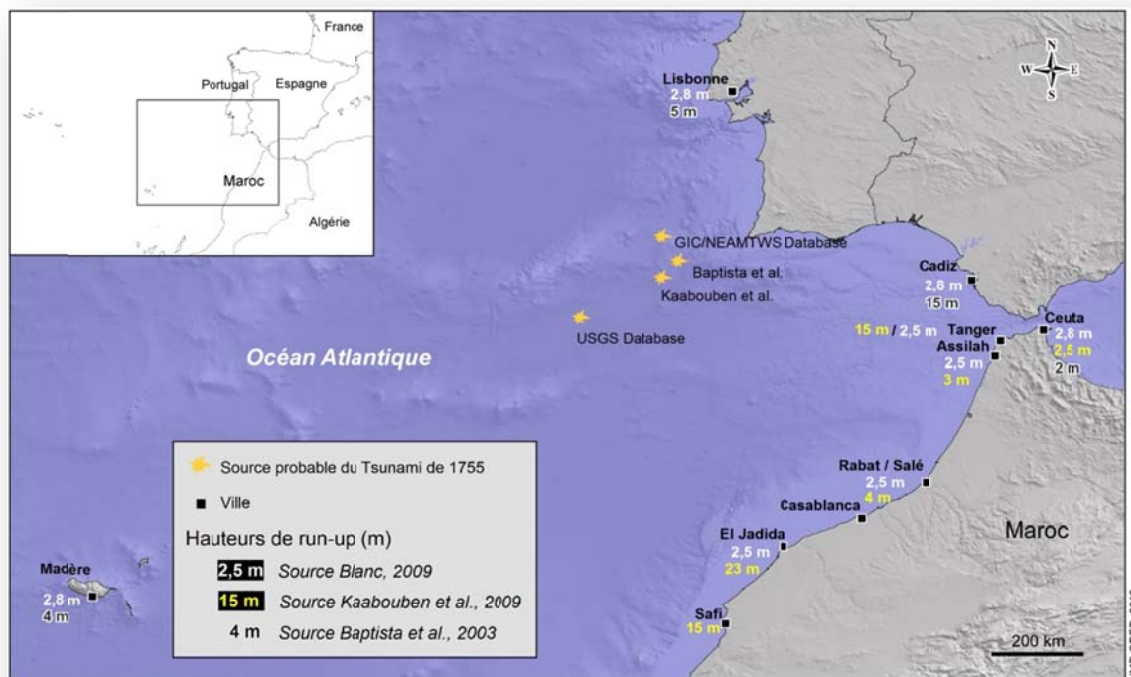


Figure A5 : Carte comparative des hauteurs de *run-up* du tsunami de 1755 suivant trois auteurs.

Site	Run-up	Référence
Assilah	3 m	Sylvanus, 1755 El Mrabet, 1991
Ceuta	2,5 m	Gaz. Cologne, 1756
El Jadida	23 m	El Mrabet, 1991
Rabat / Salé	4 m	El Mrabet, 1991
Safi	15 m	Anonymous 1755; Anonymous 1756; Fowke 1756
Tanger	15 m	Gazette D'Amsterdam, 1756; Debrach, 1946; El Mrabet, 1991

Tableau A2 : Reconstitution des hauteurs d'eau à la côte du tsunami de 1755 et sources utilisées par Kaabouben et al. (2009).

Un travail de compilation et d'analyse des recueils historiques sur les effets de ce tsunami a déjà été réalisé par un certain nombre de chercheurs (Kaabouben et al, 2009 ; Baptista et al., 2009, Blanc et al., 2009). Mais il persiste encore de nombreuses incertitudes. Celles-ci concernent notamment la source exacte du séisme et les hauteurs de *run-up* sur les côtes (figure A5 et tableau A2).

La vague la plus destructrice fut observée le long des côtes du sud et des côtes ouest du Portugal, du Golfe de Cadix et de la côte occidentale du Maroc (Kaabouben, 2009). Seulement Blanc (2009) met en évidence un grand nombre d'incohérences, notamment entre les hauteurs de *run-up* et leur localisation par rapport à la source du tsunami.

De plus, aucune des expériences de modélisation réalisées à ce jour n'a permis de confirmer une hauteur de vague comprise entre 15 et 25 m sur la ville de Cadix (Baptista et al., 1998b, 2003 ; Gutscher et al., 2006 in Blanc, 2009). D'après l'étude d'une sélection restreinte de sources documentaires primaires, Blanc (2009) démontre que l'impact du tsunami de 1755 sur la côte marocaine fut beaucoup plus faible que ce que certains témoignages décrivent. Selon lui, il est fort probable que l'amplitude de la vague de tsunami n'ait atteint que 2,5 m au-dessus du niveau de la mer à Cadix ainsi qu'à Tanger. Elle ne serait que de 1,5 m à 2 m de plus au sud sur la côte marocaine.

Nous voyons à quel point il est difficile d'établir les caractéristiques exactes de cet événement. Le manque de fiabilité des témoignages, les difficultés de traduction et de conversion des unités de mesure de l'époque peuvent aboutir à des résultats faussés ou à de mauvaises interprétations. Il est donc important de comparer et de confronter les différentes sources dont on dispose et d'améliorer ainsi la connaissance de cet événement de référence. Aussi, après un premier travail comparatif réalisé par P.-L. Blanc (2009), nous proposons ci-dessous une réanalyse des principales sources documentaires initiales existantes sur cet événement en les replaçant en particulier dans leurs contextes historiques et culturels.

A.2.2 UNE NECESSAIRE REANALYSE DES SOURCES DOCUMENTAIRES PRIMAIRES

Le séisme et le tsunami du 1er novembre 1755 qui toucha les côtes portugaises et marocaines a fait l'objet de nombreux écrits et commentaires à l'époque et jusqu'au XXe siècle – La destruction de Lisbonne a fortement marqué les contemporains ; le développement des gazettes en ce milieu de XVIIIe siècle assurant une diffusion de l'information à l'échelle européenne jamais atteinte auparavant pour une catastrophe naturelle. Les modèles de simulation numérique de tsunami se développent aujourd'hui de plus en plus grâce aux progrès techniques et informatiques (SIG, MNT) et suite à la prise de conscience du risque qui a suivi l'événement du 26 décembre 2004 en Indonésie. Cet essor des modèles s'accompagne d'un besoin accru de données historiques réelles et fiables afin de contrôler et valider les simulations proposées. Dans cette perspective, P.-L. Blanc (2009) propose une analyse critique d'un corpus documentaire significatif pour montrer, d'une part la confusion faite dans de nombreux récits entre le séisme tsunamigène du 1er novembre 1755 et un séisme rifain des 18-19 (selon les documents européens) ou 27-18 novembre (selon les documents marocains) de la même année, et d'autre part la surestimation des effets du tsunami sur les côtes marocaines : la confusion entre les deux séismes décredibilisait les témoignages ou interprétations modérées sur l'inondation, et favorisa une interprétation « maximaliste » des données disponibles, surestimation transmise

ensuite au cours des siècles dans la littérature savante faute d'un retour critique aux sources initiales. Effectivement, une des sources primaires disponibles relatant le séisme du 1^{er} novembre 1755 évoque trois vagues successives de plus de 24 m : la lettre de monsieur Soyris écrite à Marrakech le 5 novembre 1755 (soit 4 jours après le séisme et 7 jours après son arrivée dans la ville), rapporte¹, après d'autres informations précises conformes aux autres témoignages (comme l'heure -9h39- et la durée - 8 minutes- de la secousse), une donnée de hauteur d'eau de 75 pieds (soit 24,36 m). Mais contrairement à ce témoignage, l'analyse critique de P.-L. Blanc l'amène à considérer que l'amplitude du tsunami du 1^{er} novembre 1755 au Maroc ne doit pas avoir dépassée celle atteinte à Cadix (Blanc, 2008) soit 2,50 m au dessus de la marée astronomique (vague de 5 m de creux au plus).

Il s'agit ici de proposer un réexamen de sources historiques disponibles (en français, anglais, espagnol et portugais) pour le site de Mazagan-El Jadida, dont une qui² ne figure pas dans le corpus examiné par P.-L. Blanc (2009), et de préciser/compléter les analyses antérieures : si les valeurs chiffrées qu'il propose pour corriger la surestimation historique de l'amplitude du tsunami sur les côtes marocaines (1,90 à 2,30 m à El Jadida) nous paraît beaucoup plus proche de la réalité que la valeur extrême issue de la lettre de M. Soyris, certains aspects du raisonnement nous semblent incomplets ou discutables, de nature à minimiser peut-être un peu trop les valeurs à intégrer dans un scénario de risque tsunami (une hypothèse de l'ordre de 5 m nous paraîtrait plus crédible). Il nous semble en effet important de compléter les travaux antérieurs en s'intéressant notamment au contexte culturel et historique au sein duquel les témoignages de l'époque doivent être compris : le risque d'anachronisme dans l'interprétation de textes anciens peut conduire au contresens ou à une mauvaise évaluation de la valeur/fiabilité de certaines données chiffrées. La place des informations présentées dans une lettre dépend aussi du système de valeurs partagé par l'auteur et le destinataire : ces informations ne doivent donc pas être extraites sans précautions de leur contexte, ni interprétées telles quelles à travers notre système de valeur/nos schémas d'analyse contemporains (Chouquer G., 2008). En particulier, il faut souligner que nous ne sommes pas au XVIII^e siècle au Portugal (comme en Espagne ou en France) dans une société laïque, dans laquelle « l'objectivité », la « science » signifie implicitement une coupure radicale entre l'objet étudié et l'observateur, et l'absence de toute action ou dessein divin (Meschinot de Richemond et Reghezza, 2010).

Il convient enfin de préciser que le travail proposé ici est une étape et ne doit pas être considéré comme exhaustif ou définitif car l'examen de sources documentaires en arabe reste encore à mener et pourrait s'avérer décisif, notamment pour éclairer certains aspects du contexte culturel de production des sources documentaires européennes examinées.

¹ « On marque des villes de la marine que la mer a augmenté pendant 3 fois de soixante et quinze pieds, tellement que la garnison Portugaise a Mazagan avoit été dans la nécessité d'abandonner la Ville (...) »

² « Rapport sur le grand tremblement de terre survenu à Mazagan le 1^{er} novembre 1755 ».

NB : La qualité du travail proposé par P.-L. Blanc nous amène à nous appuyer largement sur son article de 2009 publié en anglais : pour plus de commodité, des extraits encadrés sont insérés ci-après pour faciliter la lecture de nos arguments.

A.2.3 UN CONTEXTE IMPLICITE DIFFICILE A CERNER

Les explications divines des catastrophes naturelles dominant jusqu'au XVIIe siècle. Mais si les causes ou processus invoqués sont inexacts, les archives contiennent beaucoup d'informations indirectes utiles à l'interprétation des témoignages et des chiffres rapportés (contexte culturel et social, mentalités). Encore faut-il les voir et s'y arrêter sans les écarter *a priori* : leur intérêt ne réside pas toujours dans la véracité des faits ou chiffres rapportés mais dans la manière dont ils témoignent de la familiarité des sociétés avec leur environnement et de la manière dont elles tissent et préservent ce lien. Une catastrophe naturelle n'est alors pas perçue comme une rupture insupportable dans le temps historique. C'est au contraire, en tant qu'épreuve ou punition envoyée par Dieu, une occasion majeure pour une société monarchique chrétienne de réaffirmer sa nature immuable.

(...) Dans les sociétés européennes du XVIIe-XVIIIe siècle la conception de l'État monarchique et de la nature s'inscrit dans une vision du monde encore largement marquée par la relation à Dieu : l'ordre et les faits naturels relèvent d'une volonté divine. La hiérarchisation stricte de la société en ordres et corps constitués est considérée comme le reflet de cette volonté. N'étant pas dans une société laïque, le risque majeur est alors la damnation éternelle et la « vulnérabilité » par excellence correspond à la fragilité des humains face au Diable, au péché. C'est l'avènement d'une société de citoyens et non plus de sujets du roi, d'une conception - issue de la philosophie des Lumières - de l'humain comme extérieur à la nature qui permet de définir la vulnérabilité et la résilience dans le sens que nous leur donnons aujourd'hui.

Considérer que Dieu est à l'origine des catastrophes naturelles n'est pas synonyme de fatalisme et de passivité. Le croire constitue un anachronisme et un contresens, où le chercheur projette sur le passé, pour reprendre l'expression de G. Chouquer (2008), le prisme culturel « moderne » dans lequel il baigne. Ce prisme pose que le progrès est une évolution linéaire (à quelques accidents près) et toujours ascendante, ce qui rend très difficile de reconnaître que nos ancêtres puissent avoir mis en place (aussi bien, voire mieux que nous) des mesures de gestion des phénomènes naturels dommageables. Ce prisme pose également que l'être humain est séparé de la nature, qu'il lui est supérieur et qu'il la maîtrise(ra) de plus en plus, de mieux en mieux.

Cette coupure nette entre les humains et la nature, issue de la Modernité, conduit à fonder la démarche scientifique sur la séparation entre l'observateur et l'objet observé, c'est l'objectivité scientifique. G. Chouquer (2008) montre combien croire à cette objectivité, c'est-à-dire prétendre à une analyse débarrassée des artéfacts humains de l'observateur, marque le début des sciences en tant que disciplines. Celles-ci s'individualisent et se spécialisent de plus en plus, élaborent leur méthodologie, leur

corpus et renforce leur identité à travers la (ré)écriture de leur propre histoire. Ce processus conduit à des approches de plus en plus sectorielles et à une théorisation qui se développe au détriment de l'empirisme pragmatique qui prévalait auparavant. Il passe souvent inaperçu car nous épousons facilement aujourd'hui le point de vue disciplinaire qui a prévalu, oubliant que ce dernier n'est pas seulement le reflet de découvertes indiscutables, de démonstrations avérées, mais est aussi le fruit d'une lente construction sociale et humaine, de conflits entre acteurs aujourd'hui oubliés. L'histoire des sciences n'est pas un processus neutre sans incidence sur les contenus scientifiques eux-mêmes.

A.2.4 CORPUS DOCUMENTAIRE EXAMINE

A.2.4.1 Document 1

Le rapport sur Mazagan 1755 : *Relaçõ do grande terremoto, que houve na praça de Mazaçam en o primeiro de Novembro de 1755. Referem se os seus effeitos, e ruinas que causou, e brevemente se mostra de que procedem os tremores de terra. Lisboa : Com as licenças necessarias. Anno 1755 (8 p., dont 2 p. pour le titre et la page de garde). Version portugaise conservée à la bibliothèque nationale de Lisbonne transmise par Maria-Ana Baptista, traduite en français par Fernanda Moscarelli et Nancy de Richemond. Ce document ne fait visiblement pas partie du corpus examiné par P.-L. Blanc.*

A.2.4.2 Document 2

La lettre de Meknès du 8 novembre 1755, suivie de la lettre de Tetouan du 24 novembre 1755 : *Copia de huma carta Escrita pelo Padre Guardiam do Real Convento de Maquinés [Meknès], e Vice-Prefeito das Santas Missoens, que nas partes da Barbaria conserva a religiosa Provincia de Sao Diogo dos RR. PP. Franciscanos descalcos ao Padre Procurador dellas ; Lisboa, Com todas as licenças necessarias, Anno de MDCCLVI (8 p., dont 2 p. pour le titre et la page de garde). Version portugaise conservée à la bibliothèque nationale de Lisbonne transmise par Maria-Ana Baptista, traduite en français par Fernanda Moscarelli et Nancy de Richemond.*

Ce document correspond, en termes de contenu et d'intitulé à une source espagnole consultée par P.-L. Blanc (2009) et référencée dans sa bibliographie sous l'appel Sanz, A. (Ed.). Le contenu correspond également à l'annexe jointe à la seconde lettre de Partyet (Consul général de France à Madrid) du 22 décembre 1755 (référéncé dans sa bibliographie sous l'appel Partyet, Mr., 1755c – ANF/Marine B7/396) ; et reprise aussi dans les Actes de la séance du 77 janvier 1756 de l'Académie Royale des Sciences de Paris (référéncé dans sa bibliographie sous l'appel Mairan J.-J., 1756) – **voir commentaire plus développé en partie 4.**

A.2.4.3 Document 3

Lettre de Mr. Soyris à M. Guys, écrite à Marrakech le 5 novembre 1755 (référéncée dans la bibliographie de P.-L. Blanc 2009 sous l'appel Soyris, Mr., 1755 – ANF/Marine B7/403), **version française.**

The other local document at our disposal is a letter written on 5 November by Monsieur Soyris, trade agent of a company from Marseilles, based in Safi, but visiting in Marrakech, where he did not hesitate to initiate diplomatic contacts : this explains why his letter can now be found in the Archives Nationales de France (Soyris, 1755; mentioned as Soyvia by Levret, 1991: Soyris was the name of a parish and seigneurie in Quercy, now a hamlet of Labastide-Murat, Lot Dept.).³

A.2.4.4 Document 4

3 pages extraites de Goulven J., *La Place de Mazagan sous la domination Portugaise (1502–1769)*, Paris, 1917. Version française

Goulven introduit comme suit une longue citation, entre guillemets, d'un texte paru dans la Gazette de Lisbonne : « Les portugais eurent à subir, au XVIII^e siècle, les effets d'un tremblement de terre qui jeta l'épouvante dans la population et l'éprouva. C'est cette secousse sismique qui détruisit Lisbonne en 1755. Voici ce qu'on écrivit à ce sujet de la forteresse de Mazagan à la *Gazette de Lisbonne* [suit 2 pages de citation] ». J. Goulven renvoie également, en note de bas de page, à l'ouvrage de Luiz Maria Do Couto (p. 138), cité en bibliographie par P.-L. Blanc.

Few local descriptions of the events and damages, by reliable direct witnesses, remain or are easily available. The most detailed account which we know of comes from the last harbour detained by Portugal on the Moroccan coast, Mazagaõ, now El Jadida. The original was a letter by a resident there, printed in the *Gazeta de Lisboa* when the journal appeared again. Luis-Maria do Couto quoted it extensively in his book entitled "*Memorias para historia da praça deMazagaõ*" (date and printer unknown to us), but as far as we know nothing establishes him as the author. We obtained it through a transcription by Pereira de Sousa (1919) of the *Gazeta de Lisboa*, in Portuguese, and by a French translation of Goulven (1917) of the work of do Couto: despite the different pathways of the two versions, they coincide with each other.

A.2.5 AUTRES DOCUMENTS CONSULTÉS, MAIS MOINS UTILES

Ces documents ont une utilité assez limitée pour la question qui nous occupe (tsunami à Mazagan-El Jadida), soit parce qu'ils n'évoquent pas directement le tsunami, soit parce qu'ils ne concernent pas Mazagan ou les côtes marocaines. Leur intérêt est essentiellement contextuel : ils illustrent la manière dont les informations sur le séisme tsunamigène du 1^{er} novembre 1755 ont été diffusées en Europe, à travers les copies successives et/ou croisées (parfois entachée d'erreurs de transcription ou de traduction). Les documents primaires évoqués aux paragraphes précédents ont largement nourris les récits des gazettes et les débats des sociétés savantes qui se développent beaucoup à cette époque. Ces documents montrent également l'intérêt suscité en Europe par la catastrophe de Lisbonne et la curiosité des élites de cette deuxième moitié du XVIII^e siècle pour les phénomènes naturels. L'effervescence

³ NB : Pour éviter de répéter les arguments et informations donnés par P.-L. Blanc (2009), et pour plus de commodité, des extraits de son article encadrés sont insérés au fil du texte pour faciliter la lecture de nos arguments.

scientifique du siècle des Lumières s'appuie largement sur l'érudition et la culture classique de nombreux ecclésiastiques et membres de sociétés savantes ; les réflexions sur les tremblements de terre parues dans le *Journal Historique sur les Matières du Tems* (Paris) sont classées, dans la table des matières de 1756⁴, dans la rubrique « Mathématique, Physique, Médecine » et non dans la rubrique « Histoire, Géographie, Antiquités ».

Ces documents témoignent également d'un aspect important du contexte culturel de l'époque : ce XVIII^e siècle voit l'essor de la « Modernité » c'est-à-dire une transformation majeure des mentalités et du rapport entre les humains et leur environnement naturel.

A.2.5.1 Extraits du Journal Historique sur les Matières du Tems, Paris, 1755-1773

Transmis par Maria-Ana Baptista (version française)

3. In January 1756, the *Journal Historique sur les Matières du Tems* dealt with the effects of these earthquakes in Morocco (J. H. M. T., 1756). It does not give the origin of the news which it relays.
(...)
J. H. M. T. (Anonyme) : De Portugal. *Journal Historique sur les Matières du Tems*, Tome LXXIX, 39-41, janvier 1756a.
J. H. M. T. (Anonyme) : Afrique. *Journal Historique sur les Matières du Tems*, Tome LXXIX, 135-138, février 1756b.

- J. H. M. T. (Anonyme) : *Journal Historique sur les Matières du Tems*, Tome LXXVIII, 470-474, décembre 1755. **(non cité par P.-L. Blanc)**
Extrait évoquant le séisme du 1^{er} novembre 1755 en Espagne et au Portugal.
- J. H. M. T. (Anonyme) : *Journal Historique sur les Matières du Tems*, Tome LXXIX, 38-52, janvier 1756. **Extrait plus étendu que celui indiqué en bibliographie par P.-L. Blanc**, évoque les dommages dus au séisme du 1^{er} novembre 1755 au Portugal, en Espagne et en France.
- J. H. M. T. (Anonyme) : *Journal Historique sur les Matières du Tems*, Tome LXXIX, 68-71, janvier 1756. **(non cité par P.-L. Blanc)**
Cet extrait porte sur l'agitation des eaux de 4 lacs allemands suite au séisme du 1^{er} novembre 1755 et sur les secours envoyés par la Grande Bretagne au Portugal suite au séisme.
- J. H. M. T. (Anonyme) : *Journal Historique sur les Matières du Tems*, Tome LXXIX, 131-143, février 1756. **(Extrait plus étendu que celui indiqué en bibliographie par P.-L. Blanc)**.
Cet extrait porte sur la suite des effets du séisme du 1^{er} novembre 1755 au Portugal et évoque un deuxième séisme le 21 novembre qui aggrave les

⁴ « Table générale des matières des dix premiers mois de 1756, livres nouveaux, pièces fugitives », p. 478 du J. H. M. T. (Anonyme) : *Journal Historique sur les Matières du Tems*, Tome LXXIX, 1756.

dommages (« (...) détruit plusieurs maisons de cette malheureuse ville [Lisbonne], qui n'avaient été qu'ébranlées. Leur chute a fait périr encore plus de 300 personnes, du nombre de celles qui étaient retournées dans cette ville pour chercher dans les ruines ceux de leurs effets, qui ont échappé à la voracité des flammes et à l'avidité des voleurs. »).

Sont également évoquées les conséquences en Espagne du séisme du 27 novembre, ainsi que des secousses sismiques en Italie, en France, à Bruxelles, en Allemagne, en Angleterre, en Irlande, en Suède et au Danemark au cours des mois de décembre, octobre et septembre 1755. Sont ensuite évoqués (p. 135 à 138) les effets du séisme du 1^{er} novembre en Afrique et notamment au Maroc. Le texte fait référence à la fameuse lettre de Tétouan du 24 novembre (voir paragraphes précédents) et à un second séisme le 18 novembre. Les pages 138-139 évoquent « l'agitation dans les eaux » aux Antilles (Antigua, la Barbade) « semblable à celle que l'on a remarqué en divers endroits de l'Europe », ainsi que la secousse du 18 novembre ressentie en Amérique du nord (Boston, Philadelphie, New-York).

Les pages 139-143 sont consacrées à une dissertation « question sur des tremblemens de terre » (écrite à Paris, 10 janvier 1756, auteur inconnu⁵).

- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 146-147, février 1756. **(non cité par P.-L. Blanc)**
Ce court extrait évoque l'aide de l'Espagne au Portugal, suite au séisme de novembre 1755 (ordres aux « gouverneurs des provinces d'Espagne limitrophes au Portugal (...) de fournir aux Portugais tous les secours de vivres et d'argent qu'on pourroit leur procurer. »)
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 175-179, mars 1756. **(non cité par P.-L. Blanc)**
Il s'agit dans cet extrait de la recension critique (en 4 pages) d'une « brochure de 63 pages » intitulée « Conjectures Physico⁶-mécaniques sur la propagation des secousses dans les tremblemens de terre, et sur la disposition des lieux qui en ont senti les effets ».
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 214-217, mars 1756. **(non cité par P.-L. Blanc)**
Cet extrait évoque des secousses sismiques ressenties au Portugal le 21 décembre 1755, en France (Auvergne) le 7 novembre (sans dommages), en Ecosse le 31 décembre, le 26 janvier 1756 à Cologne, en Suède le 1^{er} novembre 1755. Au Danemark, « les effets produits par les secousses ont été beaucoup moins sensibles sur terre que sur les eaux », notamment lacustres.

⁵ Dans ses considérations sur la Physique, l'auteur y met une majuscule, majuscule qui se retrouve dans la seconde partie du texte **Rapport sur Mazagan 1755**.

⁶ Là aussi, il y a une majuscule pour le mot Physique.

p. 217 : « On chanta le 18 janvier le *Te Deum* dans toutes les églises de Vienne [Empire d'Allemagne], en action de grâces de ce qu'il a plu à Dieu de la garantir du tremblement de terre. La veille on avoit observé un jeûne général, et les spectacles avoient été fermés. »

- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Temps, Tome LXXIX, 301-304, avril 1756. **(non cité par P.-L. Blanc)**

« Suite des tremblemens de terre » : le texte évoque de nombreuses répliques sismiques ressenties au Portugal (à Lisbonne) en décembre et janvier, le 18 février en France (très légères) et sur l'actuel territoire belge, ainsi qu'Allemagne à la même date (dommages à Bonn et Cologne). Secousses mentionnées en Saxe le 2 février, en Bohême le 12 janvier (avec des dommages) et enfin en Italie en décembre et janvier (très peu de dommages).

Un paragraphe porte ensuite sur les dommages résultant des récents séismes à Alger (toutes les maisons sont « plus ou moins endommagées ») et ceux consécutifs au séisme du 1^{er} novembre à Oran. Le texte insiste sur les dommages aux églises et sur les signes de la présence divine⁷ (signes atmosphériques : nuage sur la ville d'Oran, « déluge de feu », tonnerre ; signes de protection – le sonneur dans le clocher foudroyé n'est pas blessé - ou de punition – l'Eglise des Franciscains est endommagée). La frayeur des habitants est aussi évoquée, mais dans le contexte religieux de l'époque la mention de cette frayeur ne doit pas forcément être interprétée comme un témoignage objectif sur le déroulement des faits. Pour autant, la prudence nécessaire vis-à-vis de ces récits anciens ne doit pas conduire à les écarter trop vite pour manque de fiabilité. Une analyse plus approfondie et nuancée peut être riche d'enseignements par l'intermédiaire des métadonnées qui peuvent en être extraites.

Ainsi, cette mention de la frayeur des populations se retrouve dans de nombreux autres récits⁸, souvent exprimée dans un style codifié et stéréotypé, finalement pauvre en données brutes. Cette formulation stéréotypée et récurrente, sous la plume d'ecclésiastiques qui témoignent par ailleurs d'une grande acuité de regard et finesse d'observation dans d'autres paragraphes, ne doit pas toujours être prise au pied de la lettre. A notre avis, dans certains passages, c'est une figure rhétorique qui a davantage pour rôle de souligner que les habitants sont conscients de la présence de Dieu autour d'eux, et du poids de leurs péchés, que d'indiquer un comportement objectif passif lié à un sentiment fataliste d'impuissance. Cette interprétation permet également de comprendre l'apparente contradiction, qui peut exister d'une phrase à l'autre, entre des informations qui nous semblent exagérées si elles ne correspondent

⁷ « Le tonnerre tomba sur la grande Eglise, perça le clocher et frappa le Sonneur sans le blesser. (...) l'Aiguille de la tour de l'Eglise des Franciscains fut abattue. »

⁸ Récits de la Gazette de Lisbonne, rapport sur le séisme de Mazagan (3.1.) et beaucoup d'autres témoignages concernant l'Europe et d'autres séismes (Actes de la Royal Society de Londres, paragraphe 3.3.)

pas à une catastrophe majeure et des propos plus modérés, d'apparence plus objective, correspondant à des dommages réels limités et attestés par d'autres sources. Avant de rejeter l'une ou l'autre des informations au titre qu'elle est incompatible avec l'autre, il nous paraît plus judicieux de se demander si l'une ou l'autre ne doit pas être interprétée différemment, non comme un élément objectif du discours, mais comme remplissant un rôle particulier dans le système de valeurs de la société à laquelle appartiennent l'auteur et le destinataire. Ce rôle peut être très difficile à percevoir pour le lecteur d'aujourd'hui, dont la grille culturelle de lecture est bien différente (Chouquer G., 2008 et Meschinet de Richemond et Reghezza, 2010).

La suite des extraits du J. H. M. T. consultés ne présente pas d'intérêt pour l'étude des tsunamis historiques au Maroc (détails ci-après).

- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 310-311, avril 1756. **(non cité par P.-L. Blanc)**
Les dommages du séisme sont évoqués de manière indirecte (impossibilité pour les pirates barbaresque des côtes marocaines de poursuivre leurs raids contre les navires européens ; volonté de reconstruire la ville de Lisbonne) : **document peu intéressant.**
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 368-369, mai 1756. **(non cité par P.-L. Blanc)**
« Suite des tremblemens de terre » : le texte évoque un séisme au Portugal le 18 février, en Italie le 13-14 février (Naples), une légère secousse à Malte (« peu de dommages »). Tremblements de terre qui ont détruit la ville de Quito au Pérou (sic), les 26-27-28 avril 1755, avec des répliques jusqu'au 30 mai. **Document peu intéressant.**
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 462-464, juin 1756. **(non cité par P.-L. Blanc)**
« Suite des tremblemens de terre » : le texte évoque des répliques ressenties à Lisbonne et les suites du séisme destructeur, une secousse ressentie en Italie le 13 avril 1756 (Venise, Padoue, Vérone, Trévise) et le 18-19 (Venise), d'autres en France (Paris le 26 et 30 avril). Mention de tsunami à la Barbade le 1^{er} novembre 1755 à partir de 14 h et jusqu'à 22 h (en diminuant d'intensité après 17h). **Document peu intéressant.**
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXX, 12-13, juillet 1756. **(non cité par P.-L. Blanc)**

Evocation des travaux de Buache⁹, indiquant sur une carte les lieux touchés par des tremblements de terre et les tsunamis. Cette cartographie est le « résultat des travaux de recherche de M. Buache, et des observations lues à l'Académie ».

- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXX, 39-44, juillet 1756. **(non cité par P.-L. Blanc)**
« Suite des tremblemens de terre » : le texte évoque les suites de la catastrophe à Lisbonne (reconstruction) et les secousses ressenties depuis.
Suit, en réponse à une demande du Journal, une lettre de plusieurs pages du curé de Sains sur les secousses ressenties en avril 1756 à Breteuil (Picardie).
Document peu intéressant.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXXIX, 466-467, juin 1761. **(non cité par P.-L. Blanc)**
Séisme ressenti à Madrid et au Portugal (Lisbonne en particulier) le 31 mars 1761 : « plus violent que celui de 1755, sans avoir fait beaucoup de dommage ».
Document peu intéressant.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome CXIII, 474-476, juin 1773. **(non cité par P.-L. Blanc)**
Séisme ressenti à Cadix et ses environs le 12 avril 1773, « la mer resta calme (...) et aucun édifice ne fut endommagé ». Le même séisme a été ressenti à Lisbonne et Malaga, sans faire de dommages. Secousses ressenties à Guernesey les 15 et 16 avril, sans dommages. **Document peu intéressant.**
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome CXIII, 479, juin 1773. **(non cité par P.-L. Blanc)**
Séismes (sans dommages) en Bretagne les 15 et 23 avril 1773. **Document sans intérêt.**

A.2.5.2 Extraits de l'ouvrage de Pereira de Sousa, 1919.

Transmis par Maria-Ana Baptista (version portugaise, non traduite)

Pereira de Sousa F.-L. : O Terremoto do 1 de Novembro de 1755 em Portugal e um Estudo Demographico; Distritos de Faro, Beja e Evora, Lisboa, Vol. I, p. 72-73¹⁰, Vol. I., Cap. IV, O maremoto e efeitos geologicos, 84-90¹¹; Cap. VI, O maremoto e efeitos geologicos, 221¹²; 503-510¹³; 806-808¹⁴; Cap. IX, 815-831¹⁵; Cap. X, O maremoto, efeitos

⁹ « Premier Géographe du Roi, et Adjoint à l'Académie Royale des Sciences »

¹⁰ Rien sur le Maroc.

¹¹ Extrait intéressant.

¹² Rien sur le Maroc.

¹³ Rien sur le Maroc.

¹⁴ Rien sur le Maroc.

luminosos e efeitos geologicos, 846-849¹⁶; Vol. II, Cap. VIII, O maremoto e efeitos geologicos, 403¹⁷; Vol. II, Cap. X, Principais sismos nos distritos de Santarem e Portalegre anteriores e posteriores ao de 1 de Novembro de 1755, 417-420 ; publié en 1919.

Ces extraits ne font visiblement pas partie du corpus examiné par P.-L. Blanc.

Seules les pages tirées du Vol. I., Cap. IV, O maremoto e efeitos geologicos, 84–90 paraissent intéressantes. **Il faudrait faire une traduction plus précise des pages 86-87 :** L’auteur cite La gazette de Lisbonne, n°28, 1756 qui évoque un tsunami à la Barbade le 1^{er} novembre 1755 avec une élévation de la mer « mais cinco palmos de altura ». Tsunami à Cadix.

P. 86-87 : évoque le séisme et tsunami au Maroc (à Tanger, Meknes, Fez) en citant la Gazette de Lisbonne, n°5, 1756 : pas de données chiffrées¹⁸.

Evoque ensuite le tsunami à Madère, avec une élévation de la mer de 5 m. Mais l’auteur considère cette valeur comme exagérée.

A.2.5.3 Extraits des Actes de la Royal Society de Londres, 1757-1758.

Transmis par Maria-Ana Baptista. (version anglaise)

Ces documents ne font visiblement pas partie du corpus examiné par P.-L. Blanc. Ils n’ont qu’un intérêt contextuel assez secondaire pour la question qui nous occupe (tsunami à El Jadida)

- **Royal society** (GB) - Philosophical transactions of the Royal society of London : giving some account of the present undertakings, studies, and labours of the ingenious in many considerable parts of the world. (Vol. XLIX, Part II, for the year 1756, M.DCC.LVII), pp. 351-444 (49 p.).

Ce document de 49 pages rassemble des témoignages le séisme et « l’extraordinaire et surprenante agitation des eaux » observée (le 1^{er} novembre 1755) en plusieurs endroits de Grande Bretagne. Ces mouvements des eaux ont été observés sur les côtes, dans des ports comme Portsmouth (entre 10 et 11h du matin) ou Plymouth (vers 16h), mais aussi sur des « eaux confinées » dans le Sussex, le sud du Surrey, le Kent, le Berkshire, l’Oxfordshire (...), jusqu’en Ecosse (Loch Lommond, Loch Ness...) et en Irlande.

On y trouve aussi des témoignages sur le séisme du 18 novembre 1755, ressenti en Amérique du nord.

¹⁵ Rien sur le Maroc.

¹⁶ Commentaires et descriptions des effets du séisme (y compris tsunami, comportement des eaux) classés par lieux, au Portugal. (évoquant pour Lisbonne de 3 vagues successives de 3 braças [brasses ?] de haut, Cap. X., p. 847) Pas d’information sur les côtes marocaines.

¹⁷ Rien sur le Maroc.

¹⁸ pour autant que j’ai bien compris le portugais...

- **Royal society (GB)** - Philosophical transactions of the Royal society of London : giving some account of the present undertakings, studies, and labours of the ingenious in many considerable parts of the world. (Vol. L, Part I, for the year 1757, M.DCC.LVIII).
Une lettre à propos du séisme du 18 novembre 1755 en Amérique du Nord (Nouvelle Angleterre).

(...) 5. Morsy (1976) has published the transcription of a letter kept under the mark C.O. 91/12 in the Public Record Office in London, sent on 1 January 1756 by General Thomas Fowke, Governor of Gibraltar, to his authorities (Fowke, 1756a).

6. A copy was read to the Royal Society of London on 4 March, 1756, and published in the Philosophical Transactions (Fowke, 1756b). The relationship between these two English texts is the same as between the translated attachment to the letter by Partyet and the proceedings of the Royal Academy of Sciences of Paris: the differences result from difficulties in reading exotic place names and in deciphering the manuscript on the occasion of two printings, 220 years apart. Obviously, the Governor of Gibraltar did not witness by himself, in the Moroccan towns which he mentions, the 1 November 1755 earthquake and tsunami, but he does not state his sources. He also refers to the 18–19 November earthquake, peculiar to the region of Fez and Meknes.

A.2.6 COMMENTAIRE PLUS DETAILLE SUR CHACUN DES 4 DOCUMENTS INTERESSANTS

A.2.6.1 *Le rapport sur Mazagan 1755*¹⁹

(Version portugaise conservée à la bibliothèque nationale de Lisbonne transmise par Maria-Ana Baptista, traduite en français par Fernanda Moscarelli et Nancy de Richemond). Ce document ne fait pas partie du corpus examiné par P.-L. Blanc.

Traduction du texte (F. Moscarelli et N. de Richemond) :

« Rapport sur le grand tremblement de terre survenu dans la Place²⁰ de Mazagan le 1^{er} novembre 1755, qui se réfère aux effets et aux ruines qu'il a causé, et qui montre brièvement quelle est l'origine de ces tremblements de terre.

Lisbonne : avec les autorisations nécessaires, l'an 1755.

[Ils] Rapportent...

En écrivant cette brève narration, mon intention n'est pas de cacher la vérité, ni d'exagérer l'événement ; parce que, si cacher la vérité est une faute d'historien, grossir les faits est également une faute littéraire. Pour beaucoup de gens, l'exagération presque incroyable des faits doit permettre au lecteur d'accéder à la vérité, peut-être parce qu'ils ne comprennent pas que les grandes exagérations déplacent la limite de la crédibilité et rendent les récits moins véridiques. Je serai très prudent ; et je préfère perdre par sincérité que gagner par mensonge, notamment parce que je sais que l'âme de l'histoire est la vérité. Je rapporterai le dommage fatal, le mémorable Tremblement de terre du 1^{er} novembre qui s'est produit dans la célèbre place forte de Mazagan et ses environs : je décrirai la cause de ces Tremblements, et je proposerai beaucoup d'autres considérations historiques à ce sujet.

¹⁹ Relação do grande terremoto, que houve na praça de Mazagam en o primeiro de Novembro de 1755. Referem se os seus efeitos, e ruínas que causou, e brevemente se mostra de que procedem os tremores de terra. Lisboa : Com as licenças necessárias. Anno 1755.

²⁰ Dans le sens place forte.

Sur la Côte Africaine, où la Nation Portugaise a plusieurs fois été triomphante, se trouve la place forte de Mazagan qui, en d'infinies occasions concernant les actions héroïques du Portugal, fut un glorieux théâtre offert à l'admiration du monde. Ce petit espace de terre n'a pas seulement été défendu contre l'invasion des ennemis, qui sont innombrables, mais il a été aussi harcelé par des incursions périodiques, et des affrontements ; considérant comme la plus grande gloire que ses habitants n'aient jamais dégainé une épée ou tiré un coup de pistolet contre un nombre égal d'ennemis. Nombreuses furent les occasions de lutter contre un ennemi supérieur en nombre, quand, pour chacun de nous, il y avait quatre Maures. Et l'occasion est aussi survenue à 1 contre 180, chose qui semble incroyable s'il n'existait pas tant d'histoires vraies pour la créditer avec certitude.

Le 31 octobre, un litige entre 150 Maures et 26 Portugais a ravivé dans la mémoire le souvenir de l'effort Lusitanien, puisque non seulement les habitants de la Place se sont défendus avec grand honneur, mais ils ont aussi combattu avec beaucoup d'énergie, laissant 32 morts à terre, 4 captifs et quelques blessés. Mais qui aurait pu dire qu'une action si bizarre serait suivie d'un si triste succès !

L'aube du 1^{er} novembre était si sereine et si agréable qu'elle semblait vouloir arracher toute tristesse des cœurs humains. Les Soldats s'étaient préparés à leurs obligations comme de coutume, beaucoup de monde était dans l'Eglise pour entendre la Messe, d'autres attendaient pour se confesser, quand vers 9h34 un petit mouvement dans la terre commença à se faire sentir, augmentant par saccades pendant plus de 6 minutes ce qui provoqua la confusion chez tous les habitants, parce que les uns fuyaient vers les églises tandis que les autres hurlaient pour qu'on les en retirent. Certains, terrifiés, n'ont pas eu le choix ; d'autres, baignés de larmes, se lamentaient sur leur malheur. Les mamans affligées tenaient embrassées les petites filles ; les maris étaient, pour les uns, perdus, pour les autres, surpris. Les gens de Guerre avaient presque perdu le sens pour garder leur poste. Ainsi tout n'était que confusion, que regret, que misère.

Le tremblement a cessé, mais la nécessité des secours semblait augmenter face aux maisons ruinées, aux quelques blessées, à la population craintive, et s'ajoutait à cela la peur des répliques. On commença promptement à tout mettre en sécurité, en donnant des ordres plus importants, en faisant tout d'abord appel à Dieu Notre Seigneur pour qu'il suspende sa Justice et ne permette pas l'accablement de tant d'âmes qui ont continuellement combattu pour la défense de la Très Sainte Foi. Pas plus tard qu'une heure et demie après, la répétition du même Tremblement se fit sentir, mais avec moins d'agitation et de violence. Il était cinq heures de l'après-midi quand nous vîmes un groupe de Maures, hommes et femmes marchant dans la campagne en direction de la Place, qui, faisant signe aux sentinelles, les suppliaient avec d'humbles paroles de les abriter. On ouvrit les portes avec beaucoup de prudence et l'on recueillit ceux qui, fuyant leur patrie, venaient chercher du soutien chez leurs ennemis. Ils rapportèrent ce qu'ils venaient de subir, et l'on en déduisit que la secousse avait été moins importante à Mazagan que dans les environs. Le groupe de Maures était composé de 36 hommes et de 19 femmes, presque tous commotionnés, qui adressaient force supplications, dévotions et pénitences à nous autres Catholiques. Ils ont demandé avec une grande instance à être baptisés, et au regard de la diligence dont ils ont fait preuve à cet effet, on décida de les instruire dans les principaux mystères de notre Sainte Foi. Ils se sont appliqués à cette fin avec tant de désir que, en peu de jours, ils ont été capables de recevoir le sacré Baptême ; rendant ainsi moins sensible l'ancienne défaite et laissant le succès de cette action comme une des plus précieuses pierres qui ornent la Couronne des triomphes Portugais.

Mais face à la grandeur de l'événement [de ce succès], il ne serait pas hors de propos d'exposer la cause du si terrible Phénomène de la nature. Premièrement, nous devons envisager comme certain qu'il existe à l'intérieur de la terre des mines qui sont très grandes et dilatées, les unes avec du Souffre, d'autres avec du Salpêtre, et d'autres avec des matières bitumineuses, et inflammables. Et il ne semble pas douteux que ces mines sont irrégulières, c'est-à-dire qu'un minéral est composé de plusieurs veines, dans lesquelles il y a correspondance avec un autre minéral. De son côté, les veines de ce deuxième minéral ont des correspondances avec un troisième minéral, d'après les connaissances théoriques, élégamment démontrées par le Père Kirker, infatigable Mathématicien, dans son incomparable œuvre sur le Monde souterrain. Tout le monde sait, ou se doute, qu'il y a des grottes immenses à l'intérieur de la terre, même celui qui n'est pas, ne ce fut-ce qu'un peu, versé dans les Mathématiques, la Physique. Cela suppose que, lorsque du feu arrive à une veine minérale, il va la parcourir et à son arrivée dans une grande mine, il fait une grande secousse ; à son arrivée dans une petite mine, il fait une secousse plus petite. Ainsi s'explique pourquoi la secousse est ressentie davantage dans certaines parties de la terre que dans d'autres ; ou pourquoi la secousse est ressentie dans un endroit et pas dans un autre : la raison en est que l'endroit situé au-dessus de la mine souffre forcément davantage qu'une partie de la terre plus éloignée. Et encore, la distance peut être si grande, la mine si petite ou la matière si peu active, que l'on ne sent rien.

J'ai parlé des concavités qu'il y a dans la terre parce qu'il est sûr que ces concavités sont remplies d'un air très sale et remplies de diverses vapeurs, et parce qu'il est sûr également que le feu a la vertu de raréfier l'air. Continuons mon explication : à l'arrivée du feu dans l'une de ces grottes, l'air se raréfie, et comme l'air raréfié occupe plus d'espace, il

cause une secousse d'autant plus forte que l'air est plus raréfié. Remarquons qu'il est impossible d'arrêter la secousse jusqu'à ce que cet air, qui est la cause, s'évapore par [à travers] la terre : il faut souligner que plus forte est la résistance, plus forte est la secousse, parce que l'évaporation est plus difficile. Ensuite, il semble aussi clair d'expliquer pourquoi les Tremblements de terre se produisent plus souvent à proximité de la mer : si l'eau est plus légère que la terre, elle est par conséquent plus apte à laisser passer l'air et les vapeurs qui causent la secousse.

Deux choses que tous souhaitent savoir (mais autant il est facile de souhaiter, autant il est difficile de savoir) : y aura-t-il encore des secousses, et y aura-t-il encore une secousse aussi importante que la première ? A ces questions, je réponds que, tant qu'il y aura des mines, il y aura évidemment des secousses. Quant à la seconde question, je réponds : que Dieu [seul] sait ce qui va se produire, mais qu'il semble que, évidemment, il n'y aura pas de nouveau [de sitôt ?] une secousse égale à la première, encore qu'il y ait (ce qui n'est également pas croyable) des mines similaires à celle qui provoqua la première secousse. Et il est aussi clair que, la terre étant déjà ouverte par endroit à cause de l'évaporation de la première secousse, il y aura en conséquence moins de résistance. Et j'ajoute : puisque la résistance est moindre, la secousse sera évidemment moins forte, pour les raisons qui ont été dites. [Mais] comme les Phénomènes de la nature ne sont pas sujets aux jugements mathématiques et aux discours Physiques, il s'ensuit qu'il est bien possible que ces suppositions soient les plus probables, mais elles ne sont pas **infaillibles**²¹.

On souhaite également connaître la cause des extraordinaires mouvements de la mer ; mais comme toutes ces choses ne demandent pas seulement une culture très importante, mais aussi des développements plus amples, je réponds : ainsi comme l'agitation d'un vase rempli d'eau fait que l'eau change de situation, ainsi le mouvement de la terre fait aussi changer l'état naturel de l'eau de mer. Et plus forte sera la secousse, plus importante sera l'inondation ; comme on l'a observé en Afrique où la mer est arrivée à inonder quatre lieues communes [soit 20 km ?] : ce qui n'empêche pas de voir de grandes inondations là où la secousse est presque imperceptible ; alors on doit donc en déduire que le tremblement de terre naissant au milieu de la mer, cela fait qu'il s'est élargi en faisant les dommages qui ont été observés en plusieurs endroits.

Deus Super omnia.

Totum Subjicio correctioni Supremorum Tribunalium. »

Commentaire sur ce texte : Ce texte concerne Mazagan face au séisme de 1755, la moitié est consacrée à des considérations générales sur les causes des tremblements de terre. Il ne donne pas de précision sur les effets du tsunami alors que les effets de la secousse sismique sont évoqués. Si la forteresse avait été submergée par 3 vagues de 24 m, cela aurait certainement été mentionné. Les dommages humains et matériels dus à la secousse ne semblent pas être très importants, ce qui coïncide avec d'autres témoignages modérés concernant ce site (Goulven, 1917 ; Blanc, 2009). L'intérêt de ce document est plutôt de confirmer la surestimation historique des hauteurs d'eau critiquée par P.-L. Blanc, et en particulier d'isoler un peu plus le témoignage indirect de Soyris, visiblement excessif.

Il n'y a pas de précision sur l'auteur (ou les auteurs) de ce document mais il est visiblement rédigé par un ecclésiastique.

L'intérêt de ce document est également contextuel et culturel.

Le texte illustre combien les phénomènes naturels catastrophiques sont l'occasion de réaffirmer le lien entre Dieu et les humains (de rappeler aux humains l'importance de ce lien s'ils l'ont oublié). L'analyse de ce texte est intéressante car elle permet de montrer quelques nuances dans les modalités de la relation entre Dieu, les humains, leur environnement et de souligner la complexité de la vision du monde qui se transforme au XVIIIe siècle (entrée dans la Modernité, voir partie 1).

²¹ C'est nous qui soulignons.

Il permet aussi de se poser la question (soulevée par d'autres lettres ou récits de gazette) du lien entre témoignage sur un événement précis et les réflexions générales sur le sujet des séismes, association qui paraît souvent étrange et fantaisiste au lecteur du XXI^e siècle.

Un séisme n'est pas directement créé par Dieu (d'où le développement d'ensemble à visée scientifique qui suit le témoignage empreint de religiosité), mais il s'inscrit dans la Création faite et voulue par Dieu. Création qui s'envisage à l'époque dans une vision fixiste et non dynamique ou évolutive de la nature. Dieu est donc la source, l'origine des phénomènes naturels mais de manière indirecte (d'où la majuscule souvent mise dans le texte portugais à « Phénomènes de la nature », « discours Physique », en écho aux majuscules mises en début de texte aux termes religieux tels que « Dieu », « Baptême », « Sainte Foi », ...).

L'appropriation sociale, l'intégration dans le temps quotidien d'un phénomène naturel rare mais destructeur se fait par l'affirmation de ce lien humains/Dieu à travers une interprétation fondée sur ce lien qui est, à l'époque, vécu quotidiennement par les populations dans leurs pratiques sociales et religieuses. L'affirmation en début de texte des vertus Portugaises face à l'adversité et l'hostilité des Maures correspond à un éloge de vertus chrétiennes. Le triomphe, la gloire et l'héroïsme militaire sont le signe d'une élection divine d'autant plus éclatante que l'hostilité des ennemis est grande, et numériquement indiscutable : on peut y voir un écho aux récits bibliques de l'Ancien Testament. La conversion et le baptême d'un groupe de sinistrés Maures est bien présenté comme « une des plus précieuses pierres de la Couronne des triomphes Portugais (bas p. 5) » Présenter ce fait comme un dessein divin caché dans la catastrophe permet d'intégrer le phénomène naturel rare et dommageable dans la vie sociale et quotidienne des populations : il s'agit de montrer en quoi ce phénomène naturel non seulement ne détruit pas la vision du monde portée par la société mais encore la renforce. Dans ce but, tout élément fait signe ou sens : si les populations musulmanes des environs sont plus touchées que la place forte de Mazagan elle-même, c'est un signe implicite de la bienveillance de Dieu envers les Chrétiens ; mais les souffrances ou les dommages subis par les Portugais sont une juste punition de leurs péchés ou une épreuve à surmonter pour assurer leur Salut ou l'occasion de se rapprocher de Dieu. Ce qui est important c'est de rappeler ce lien entre la divinité et sa création, création dont les humains font partie.

Les explications à visée scientifique de la seconde partie ne se veulent pas en contradiction avec la vision religieuse du monde évoquée au début du document. La transition entre les deux parties le souligne, qui associe dans les superlatifs la conversion des sinistrés musulmans et la force du phénomène naturel : « *Mais face à la grandeur de ce succès, il ne serait pas hors de propos d'exposer la cause du si terrible Phénomène de la nature.* » D'une manière circulaire, la fin du paragraphe qui traite des causes des séismes renvoie également implicitement à la puissance divine (« *[Mais] comme les Phénomènes de la nature ne sont pas sujets aux jugements mathématiques et aux discours Physiques, il s'ensuit qu'il est bien possible que ces suppositions soient les plus probables, mais elles ne sont pas **infaillibles.*** »). L'omniscience de Dieu est d'ailleurs explicitement citée quelque lignes plus haut (« *Dieu [seul] sait ce qui va se produire* ») : cette formule de rhétorique peut paraître bien creuse aujourd'hui dans nos sociétés

laïcisées, mais elle ne l'est pas encore à l'époque de l'écriture du texte. L'emploi du terme « infallible » n'est pas neutre ; il caractérise avant tout la puissance divine, laquelle excède les capacités de connaissance humaine. Ce texte s'inscrit donc dans une conception du monde selon laquelle Dieu n'agit pas directement ou grâce à la magie : les règles qui régissent la nature peuvent être étudiées par l'Homme et il est bon qu'elles le soient²², mais il serait illusoire de croire que l'Homme puisse connaître un jour complètement ces mécanismes dans la mesure où ceux-ci ont été créés et choisis par Dieu et, à ce titre, reflètent sa puissance et son immensité. Cette conception du monde correspond à une époque de transition vers la « modernité », époque qui ne voit pas encore s'opérer pleinement la coupure entre l'humain et la nature, le savant et son objet d'étude, mais qui pose les bases de cette évolution à travers l'approfondissement des questionnements scientifiques.

A.2.6.2 Examen de la lettre de Meknès du 8 novembre 1755, suivie de la lettre de Tétouan du 24 novembre 1755²³

(Version portugaise conservée à la bibliothèque nationale de Lisbonne transmise par Maria-Ana Baptista, traduite en français par Fernanda Moscarelli et Nancy de Richemond)

Ce document ne contient aucune information exploitable sur la hauteur d'eau mais évoque l'ampleur de l'inondation par le tsunami du 1er novembre sur les côtes marocaines, même si Mazagan n'est pas mentionné. Il est fait mention de « l'altération de la mer » dans les ports de Safi et Santa Cruz (Agadir) entre 10h du matin et 6h du soir.

P.-L. Blanc a consulté des versions espagnole et française de ce document. La version portugaise que nous avons examinée ne diffère visiblement pas beaucoup en ce qui concerne les informations sur le séisme, mais commence différemment : il n'est pas fait mention du séisme en Espagne ou au Portugal mais des « persécutions et labeurs causés par l'ambition des Maures » qui prennent en otage deux missionnaires de Salé le 28 août et exigent une rançon, faute de quoi ils exécuteront les otages.

The compiled reports which we have been able to consult are, by order of recording or publication :

1. Two letters from the French Consul General in Madrid to his authorities, dated 15 and 22 December 1755 (Partyet, 1755a, b); their rather late date (1 1/2 month after the tsunamigenic earthquake, 1 month

²² La foi n'est plus tout à fait l'ennemie ouverte de la science, mais elle entend se situer au-dessus (plus largement, sur le lien entre science et religion, voir aussi Gould S.-J. : Darwin et les grandes énigmes de la vie, Point Sciences, 1997 (« uniformité et catastrophe » p. 157 et suivantes) et M. Krafft M.: Les feux de la Terre, histoire de volcans, Gallimard, 1991.

²³ Cópia de huma carta escrita pelo Padre Guardiam do Real Convento de Maquinés [Meknès], e Vice-Prefeito das Santas Missoens, que nas partes da Barbaria conserva a religiosa Provincia de Sao Diogo dos RR. PP. Franciscanos descalcos ao Padre Procurador dellas ; Lisboa, Com todas as licenças necessarias, Anno de MDCCLVI (8 p.)

after the Rifian earthquake) bears testimony to the difficult communications between Morocco and Europe at the time. At least, the Rifian earthquake of 18–19 or 27–28 November was already mentioned.

To the second of these letters is attached a report, translated by Partyet himself (Partyet, 1755c), entitled “Extract of several letters received by the General of St. Francis from the missionaries of the order who are in Morocco”, the first part of which has a subtitle “From Miquenez on 8 November 1755. . .” followed by an “Extract of a letter from Tetuan on 24 November 1755”. The initial document is of clearly acknowledged Hispanic descent: it was a compilation sent by the head of the Order of St. Francis to the Bailiff of Arriaga, minister of Maritime Affairs and of the Colonies of King Ferdinand IV, thus in charge of the relations with Morocco. Some versions of this text were the subject of various editions in Seville, Madrid, Barcelona, and of a Portuguese translation published in Lisbon (all referenced under “Descalços, Franciscanos 1756” in Levret (1991), but this is the name of the order, the Barefoot Franciscans). All of them show a first part supposedly dated 8 November, then a letter of 24 November, purportedly quoting an Express from Fez. It may be a paradox that the French translation, attached to the diplomatic letter of 22 December, might be the oldest copy still in existence : but the Royal Archives of Spain or the archives of the Order of St. Francis may still detain some of the original letters.

2. The exact same title is found in the proceedings of the Royal Academy of Sciences of Paris (Mairan, 1756) for a text read in the session of 7 January 1756. There is no doubt that it is a copy of the same, and the only interest of a careful reading is to correct a few mistakes which found their way therein. The presentation of the two reports making up these documents is ambiguous: the account by the Missionary fathers, written in Meknes, is immediately followed by the Tetuan report, which start with “We have experienced a second earthquake”. This wording has made all believe that the first summary dealt only with the 1 November earthquake. The date (8 November) globally attributed to the compilation of the Father Guardian of Meknes appears to imply that the damages were caused by the 1 November earthquake, but it may just be the date of the very first letter of the series so summed up. The “Extract of a letter from Tetuan of 24 November 1755”, by itself, only lists some results of the Rifian 18–19 November 1755 earthquake. When Levret (1991) compared the effects of the two earthquakes according to both the European and Moroccan sources, a possibility of amalgamation and repeat of data (when towns were deemed twice destroyed) was not considered.

La lecture du document nous amène aux mêmes conclusions que P.-L. Blanc : ces lettres ont fait l’objet de nombreuses éditions/ retranscriptions qui ont circulé en Europe et sont visiblement une compilation faite par le Père Gardien du couvent royal de Meknès et Vice-préfet des Saintes Missions, à partir de différents récits/témoignages de pères missionnaires, et envoyée à sa hiérarchie.

3 Comparison of the presentation of the documents

(...) The phrasing allows some ambiguity in the transcriptions or translations and in the interpretation. The appendix to the letter by Partyet (1755c), read at the Academy (Mairan, 1756), states that the earthquake was felt “in several place in the kingdom of *Maroc*”, the J. H. M. T. (1756) says that it was felt “at *Maroc*”. At the time, *Maroc* could either refer to the vast territory constituted as a Sultanate independent from the Turkish Empire, which the French still know under that name, or to the town of *Maroc*, that is to say Marrakech. The same applies for the Spanish *Marruecos*, hence a strong possibility to ascribe to the immediate vicinity of Marrakech facts or events that simply occurred anywhere else in the country.

None of the texts describes the earthquake itself, only shown through estimates of the number of houses brought down, and of the number of victims buried in the rubble. All the reports said to derive from a compilation by the Father Guardian of the Royal Convent of Meknes, dated 8 November, begin with a description of damages far inland in Morocco (Fez and Meknes), and even further South (Marrakech). As letters written before the 18 November date should only mention the 1 November earthquake and tsunami, the question arises, whether the oceanic tsunamigenic earthquake caused such damages, or whether this account also describe those resulting from to the Rifian earthquake, which happened later than the alleged date of the document.

Tout à fait d’accord avec le passage ci-dessus de P.-L. Blanc

The priority of the Guardian of the Meknes Convent was to let his Superior know of the destruction of their church and buildings, as it was important for the General of the Order to pass the information to the Spanish authorities, who were interested in the political role of these missionaries, which was to negotiate the ransom of the Spanish prisoners (slaves) in Morocco. This is the reason why he dealt with the destruction inland first, without much attention to the dates of the events.

Commentaire sur ce texte : En accord avec P.-L. Blanc, il est important de souligner ici que les extraits de lettres de ce document paraissent beaucoup plus partiales et orientées que celle du « rapport Mazagan » (absent de la bibliographie de P.-L. Blanc) : ce sont des religieux qui s'écrivent et ce qui revêt de l'importance à leurs yeux, ce sont les dommages aux biens de l'Eglise. Le séisme du 1^{er} novembre ayant lieu le jour de la Toussaint, il est explicitement présenté comme une punition divine (« la Majesté Divine veut punir nos péchés et ingratitude avec un si terrible et jamais vu tremblement de terre, dans le jour de Tous les Saints à 9h45 du matin et qui dura 8 minutes ».) La lettre de Tétouan du 24 novembre souligne aussi que le second séisme (séisme rifain de la fin du mois de novembre) est un instrument de la justice divine (« Quant à nos juifs de la grande Judearia, il me semble que Dieu a manifesté une juste répulsion [envers eux] et déchargé le coup de sa Divine justice [sur eux], puisque 8 personnes échappèrent vivantes à cette infamie sur les mille qui habitaient là. ») Les informations rapportés sont clairement subordonnés à cette vision religieuse des faits et du monde (seuls les témoignages des Chrétiens sont dignes de confiance) et ne sont ni exhaustifs, ni « objectifs » dans le sens où nous l'entendons aujourd'hui. Ils se veulent « véridiques », c'est-à-dire qu'ils doivent correspondre à ce qui est considéré comme la vérité par les auteurs/lecteurs de ces lettres qui sont, rappelons-le, des ecclésiastiques : Dieu punit les péchés des Chrétiens à travers ces calamités naturelles ou éprouve leur foi ; Dieu préfère les Chrétiens aux « Maures, infidèles ».

Le caractère partial et orienté de ce document est également lié au fait que les informations qu'il contient sont destinées à être relayée jusqu'au plus haut sommet de l'Etat. Mais complétons les propos de P.-L. Blanc : si le roi d'Espagne et le roi du Portugal sont intéressés par le rôle politique des missionnaires au Maroc (pour négocier le rachat de prisonniers en particulier²⁴) l'Eglise catholique est aussi à l'époque une puissance temporelle et un « roi très catholique » doit défendre non seulement la foi (domaine spirituel) mais aussi soutenir l'Eglise et son action (domaine temporel et matériel), en particulier sa présence aux marges des territoires Chrétiens, face aux « infidèles ». Cette obligation morale ne doit pas être sous-estimée dans le contexte culturel de l'époque, car elle structure la vision hiérarchique et chrétienne du monde largement partagée par les européens du XVIII^e siècle. Informer la royauté sur les dommages subis par l'Eglise catholique au Maroc est aussi une manière de rappeler le souverain à ses devoirs de chrétien et de défenseur de l'Eglise, solennellement affirmés lors du sacre.

²⁴ C'est aussi cette question politique sensible qui occupe l'essentiel de la lettre de Soyris, diplomate officieux.

A.2.6.3 Lettre de Soyris du 5 novembre 1755, à Marrakech.

(Version française)

4.3 Marrakech: a counter-testimony by M. Soyris

Fortunately, we have at our disposal a local testimony on the situation in Marrakech on 1 November 1755. A French commercial agent, Soyris, whose travel also had diplomatic, though unofficial, purposes, did write there, in Marrakech, a letter, on 5 November, only four days after the events (Soyris, 1755). He talks at length of his audience with the Governor of Marrakech, Prince or Imperial Highness Sidi Mohamed III Ben Abdullah, son (and successor two years later) of Sultan Mulay Abdullah IV Ben Ismail, as well as of his interview, the day before he wrote, thus, on 4 November in the evening, with Prince Mulay Idriss, brother by marriage and counselor to the Governor. Soyris did not allow himself to be engrossed by the earthquake, which he indeed had felt, as he provided us with accurate pieces of information on the time and duration: "The first of this month at nine hours 39 min in the morning we had a violent earthquake, which lasted the space of 8 min". These details lead us to assume that we have here a direct witness, and who indeed had a watch. He does not mention that his audience with the Governor, which took place on the very same day, was cancelled or disrupted: if the earthquake had been very strong, it would certainly have terminated the interview and dismissed the visitors to safety! He does mention some damages, but only by hearsay: the wording "some houses collapsed and very few people happened to be buried under the ruins" certainly does not express the shock that an eyewitness would have experienced. Soyris also mentions that the harbours of Southern Morocco sent couriers to the Prince to apprise him of the same earthquake. And he gives us a complementary information, exactly opposite to what could be believed from the published testimonies: "It appears that it has been stronger towards the North than it was towards the South". Levret (1991) mentioned this letter by Soyris, but only took it into account by down-grading the intensity of the 1 November earthquake in Marrakech from VIII to VII.

Transcription de la fin de la lettre de Soyris, p. 5-6

« On m'assure ici que les hollandois doivent venir sans faute a la rade de Safi pour faire leur paix avec le Prince, de la meme maniere qu'ils l'ont faite avec le Roy Mulei abdella son père, comme ils n'ont point des esclaves dans ce país, ils en seront quittes pour un present de la valeur d'environ quatre vingt mille livre Tournoi, il ni a pourtant pas apparence que la frégate qui doit porter l'ambassadeur arrive avant le mois de mars prochain. La saison étant trop dangereuse a present sur cette cote.

Le premier de ce mois a neuf heures 39 minutes du matin, nous avons eu un violent tremblement de terre qui a duré l'espace de 8 minutes, quelques maisons se sont écroulées et fort peu de personnes se sont trouvées ensevelies sous les ruines. Il est venu des courriers de Ste Croix, de Safi, d'Azamor, et de Salé au Prince pour informer cette altesse qu'ils ont ressenti le même tremblement, et cela a la meme heure ; mais il paroît qu'il a été plus fort du côté du Nord qu'il ne l'a été au Sud. On marque des villes de la marine que la mer a augmenté pendant 3 fois de soixante et quinze pieds, tellement que la garnison Portugaise a Mazagan avoit été dans la necessité d'abandonner la Ville, et de hazarder sa liberté en se retirant plus d'une lieue a la montagne. Graces a Dieu il n'est point arrivé d'autre mal aux Chretiens – que la peur. On craint à present une récidive, et si elle arrive il restera fort peu de maisons en nature, qui en general sont endomagées, nous espérons dans le courant de la semaine prochaine de partir pour Saffi, d'où j'aurai l'avantage de vous écrire plus amplement. J'ai l'honneur d'être... »

Commentaire sur ce texte : L'essentiel de la lettre de Mr. Soyris porte sur un éventuel traité d'alliance entre le Prince et le roi de France, passant notamment par le rachat des esclaves français, (traité qui pourrait se préciser si l'auteur de la lettre est porteur d'ordres précis pour mener la négociation, compte-tenu de la bonne volonté du Prince qui souhaite « faire l'opposé de son prédécesseur Mulei Ismail c'est-à-dire la paix avec le France, et la guerre avec l'Angleterre » p.1 fin § 1)

Nous sommes d'accord avec la remarque de P.-L. Blanc qui souligne que, si la secousse à Marrakech avait été ressentie très violemment, la rencontre de Soyris avec le Gouverneur, qui a eu lieu le jour-même du séisme, aurait été interrompue ou ajournée. Mais la remarque suivante de P.-L. Blanc ("He does mention some damages, but only by hearsay: the wording "some houses collapsed and very few people happened to be buried under the ruins" certainly does not express the shock that an eyewitness would have experienced.") ne nous semble pas pertinente : dans sa lettre, l'auteur s'efforce d'éviter tout propos empreint de "passion", tout propos qui n'ai pas un caractère raisonnable. Il est clair, comme l'écrit d'ailleurs P.-L. Blanc quelques lignes plus haut, que Soyris a ressenti le séisme ; mais il s'efforce d'en donner un témoignage extérieur, objectif, sans affect. Dès lors, le caractère impersonnel de la phrase de Soyris décrivant les dégâts ne nous semble pas un élément suffisant pour en déduire qu'il parle par ouïe-dire et non comme témoin. D'autant plus qu'il ne cache pas que les autres informations qu'il donne, au sujet des ports notamment, sont de seconde main.

Les informations directes sur le séisme et indirectes sur le tsunami sur la côte occupent le dernier paragraphe de la lettre. Celui-ci est introduit par une transition qui souligne la dangerosité des côtes marocaines pendant la saison considérée. Cette transition est intéressante car le danger de la côte en cette saison n'est pas mentionné pour lui-même mais par rapport aux intérêts diplomatiques qui occupent le cœur de la lettre : l'ambassadeur hollandais n'arrivera pas de sitôt.

Le récit de l'événement (séisme et tsunami) arrive donc à l'appui de l'affirmation de la dangerosité des côtes au moment où l'auteur écrit. L'événement est traité sur le mode « anecdote pittoresque et dramatique de voyage » et selon un prisme culturel précis : l'événement important n'est pas tant le phénomène naturel lui-même (le séisme ayant fait apparemment peu de dommages) mais le fait que la garnison portugaise de Mazagan, en quittant la ville, a pris le risque de s'enfoncer (sur une lieue) dans un arrière-pays non chrétien pour échapper à l'eau. C'est donc le courage voire l'héroïsme des soldats face à l'adversité qui est ainsi souligné. Immédiatement après il est fait mention de Dieu et les soldats sont désignés sous le terme « ces Chrétiens » : à notre avis cette formulation n'a pas pour but de souligner la fatalité de ce type d'événement, mais de souligner que Dieu protège les Chrétiens, sous-entendu signe logique et naturel de leur supériorité sur les « infidèles ». Dans l'article de P.-L. Blanc (2009²⁵),

²⁵ The end of the letter of Soyris (1755) reports quite a different estimate of the tsunami in Southern Morocco, including Mazagaõ: "they write from the maritime towns that the sea increased three times, of seventy five feet, so much that the Portuguese garrison in Mazagaõ had been compelled to abandon the City, and to put its freedom at risk by withdrawing more than one league away to the Mountain. Thank God nothing worse happened than fear". There is a contradiction with what he stated earlier in the same letter, "it appears that it has been stronger towards the North than it was towards the South". Obviously,

L'omission du terme « Chrétiens » dans la traduction anglaise de cette phrase nous semble révélatrice de la grande difficulté d'identification et de prise en compte par les chercheurs contemporains du contexte culturel implicite des documents anciens.

Cette hiérarchie implicite entre Chrétiens et autochtones musulmans, la vision fixiste d'un monde hiérarchisé voulu par Dieu et dont l'Église et les rois chrétiens sont les garants se traduit également par l'opposition entre l'action²⁶ des soldats portugais (qui réagissent à l'événement en prenant d'autres risques) et la passivité²⁷ du « peu de personnes [qui] se sont trouvées ensevelies sous les ruines », certainement des autochtones.

The end of the letter of Soyris (1755) reports quite a different estimate of the tsunami in Southern Morocco, including Mazagaõ: "they write from the maritime towns that the sea increased three times, of seventy five feet, so much that the Portuguese garrison in Mazagaõ had been compelled to abandon the City, and to put its freedom at risk by withdrawing more than one league away to the Mountain. Thank God nothing worse happened than fear". There is a contradiction with what he stated earlier in the same letter, "it appears that it has been stronger towards the North than it was towards the South". Obviously, Soyris only mentions of Mazagaõ by hearsay, and there may have been a problem of translation and conversion of Moroccan units to European. But formulated that way, in French, in Soyris' letter, this testimony must be discarded as fabrication: if a wave of 75 *pieds* of amplitude (24.36 m) had struck Mazagaõ, repeated several times at that, Sultan Sidi Mohamed III Ben Abdullah would not have had to recapture this portion of the Moroccan coasts from the Portuguese in 1769, because there would have been no survivor there as early as 1755. Neither could have taken place any evacuation of the town to the country inland, as the period of the waves would not have allowed anyone to walk any distance away through the devastated surroundings.

Comme P.-L. Blanc, la valeur de « 75 pieds » de haut (24,36 m) pour les vagues du tsunami qui touchèrent la côte de Mazagan nous paraît très excessive et entachée d'erreur...

As to the height of the tsunami at shoreline, the idea that it could have been of fifty feet (14 to 16 m) at Tangier and that it could have flowed over the ramparts (J. H. M. T., 1756b; F. F. B. J., 1756) must be abandoned, just as had to be abandoned the idea of a sixty feet (19.5 m) high wave in Cadiz (Bewick, 1756; Ulloa, 1756; Blanc, 2008). In the same way, the idea that it could have been of seventy-five feet (24.5 m) in Mazagaõ and other harbours in Southern Morocco (Soyris, 1755) must be discarded : either it is a complete fabrication, or there must have been a deep misunderstanding in translating or converting Moroccan units to European units, and an estimate of seventy-five inches (1.9 to 2.3 m) might be closer to the truth.

...mais il nous paraît très hasardeux d'interpréter la valeur de 75 pieds, relayée par Soyris, comme étant 75 pouces et d'en proposer une transcription brute dans le système métrique moderne. Le prisme culturel moderne qui nous imprègne

Soyris only mentions of Mazagaõ by hearsay, and there may have been a problem of translation and conversion of Moroccan units to European.

²⁶ connotée positivement.

²⁷ connotée négativement.

aujourd'hui (voir partie 1) rend particulièrement ardue la prise en compte d'une marge d'erreur à la lecture de données chiffrées à deux décimales. Cette transcription chiffrée, même présentée sous forme de fourchette (1,90 à 2,30 m), tend ainsi à balayer les précautions méthodologiques de la démarche et facilite une mise hors contexte de l'hypothèse proposée en donnant implicitement un sentiment de précision et de fiabilité au lecteur (voir introduction de Chouquer, 2008.)

A.2.6.4 *Trois pages extraites de Goulven J., La Place de Mazagan sous la domination Portugaise (1502–1769), Paris, 1917.*

(Version française)

5.5 A local account from the Portuguese stronghold of Mazagaõ (El Jadida)
The letter from Mazagaõ, now El Jadida, initially published in the *Gazeta de Lisboa* provides us with some pieces of information which are not found in the Spanish, French or English texts, but tend to the same meaning. The earthquake occurred at 9 1/2 h, and its duration was estimated to 1/4 of an hour. It does not report any destruction of building by the earthquake, but only the opening of holes in various places (. . . abrindo bocas em varios sitios. . .), most likely cracks rather than holes. Of course, it also dwells upon the fright of the people.
The text dealing with the tsunami is the most detailed that we found on the event in Morocco, thus warranting an extensive quotation (as quoted by Pereira de Sousa, 1919 and translated to French by Goulven, 1917):

« Le 1^{er} novembre de l'année qui termine (1755), par un jour sans vent, le soleil était clair et chauffait ; on souffrit dans cette place [de Mazagan] des effets d'un formidable tremblement de terre qui commença à 9 heure et demie. La terre trembla pendant un quart d'heure, ouvrant des trous en divers endroits. La consternation générale s'accrut lorsqu'on vit les pierres des édifices bouger et trembler ; bien qu'ils ne tombèrent pas, ils souffrirent beaucoup. Chacun quitta son logis et recourut au ciel ; dans des processions de Rogations on porta les images les plus Saintes qu'on vénérât dans la Place. Mais tout cela se faisait sans ordre et sans accord, car la confusion régnait partout à un tel degré, que personne ne rentra voler dans les maisons vides. **Notre gouverneur Joseph Leite de Sousa, animé de l'esprit de chevalier catholique**²⁸, accourut de suite faire retirer le très Saint Sacrement de l'Eglise, pour le mettre dans un lieu plus haut et plus sûr. L'inquiétude augmenta quand la mer dans un mouvement effroyable, sautant par-dessus les roches, défonça les portes, et entra dans la place où elle laissa, en se retirant, de nombreux poissons. Tout le monde anxieux s'enfuit se réfugier sur les murailles, où le gouverneur, dans des tournées continuelles, réconfortait chacun, suppléant par sa présence à l'abandon dans lequel les soldats avaient laissé leurs postes ; il rencontra uniquement son fils aîné, Fernand Pereira Leite de Sousa, qui était de sentinelle à la porte où il resta avec de l'eau jusqu'à la ceinture, abandonné de ses compagnons. La mer fut démontée jusqu'à 2 heures de l'après-midi ; elle emporta des balles dans son ressac et, ayant raviné le sol jusqu'au roc vif, elle enleva les terres dans lesquelles on avait semé de l'orge, des fèves, ainsi que les prairies où paissaient les chevaux, puis elle démolit les fortifications extérieures et les palissades. Des barques et des canots de S. M. les uns se perdirent, les autres se brisèrent. Les vagues

²⁸ C'est nous qui soulignons.

engloutirent trois personnes ; elles enlevèrent et emportèrent avec elles, l'Alcaïde major de cette Place, puis le ramenèrent vivant dans la place par une poterne. On lui administra les Sacrements ; mais après avoir vomé pendant huit jours du sable, des petits mollusques, des petits coquillages et un peu de sang caillé, il guérit. Les Maures, bien qu'ils perdirent beaucoup de gens²⁹, continuèrent à nous inquiéter, faisant leur possible pour nous empêcher la corvée de bois que nous allions couper aux buissons voisins, ce dont nous avions le plus besoin. » (Goulven, p. 164-166)

From this testimony, it follows that the tsunami broke on the rocky tidal platform, levelled on the shore by the astronomical tides and wind waves. The sea came into the stronghold after breaking open the doors (after Goulven; implies "*as portas*" in Portuguese), rather than the harbours ("*os portos*" in Pereira de Sousa), as Mazagaõ did not have any outer port at the time, just a smaller cove notched to the east of the rampart, and a single Sea Gate, opening on that cove. The plural may show that there were two successive gates under the rampart, or just that there were two leaves to the gate. The walls of the Portuguese Place were not overflowed by the wave: to the opposite, the people had taken refuge on the parapet walk, and the Governor was walking around, exhorting the people to fortitude.

A tentative estimate of the height of the tsunami may be derived from the circumstances of the Governor's son, the only sentry who did not abandon his post: the water reached up to his waist, i.e. about 1m height, if we admit him to have been 1.6 to 1.7m tall. He was probably soaked so by the first wave, as we can doubt that he waited for each of the following surges. Without abandoning his watch, he must have had a possibility to climb for safety on the rampart at each rise.

Can we determine which gate he was on watch at? There were only two gates at Mazagaõ, a Sea Gate to the East,

and a Land Gate or Gate of the Redoubt of the Generals to the south-west: a third one, called the Oxen Gate, had been walled up 150 years earlier or so (Fig. 3). The Governor's son cannot have been on watch at the Sea Gate: this is the place where three people, who were drowned, and a fourth one, barely escaping (the *Alcaïdem'or* of the town, and main civil authority?), had been carried away by the first tsunami wave, and brought back miraculously.

Furthermore, we are informed that the successive waves did wear away the ground around the fortified place: all the work done on the ground, cultivation (barley, broad beans, meadows), fences, also set into the ground, as well as the outer defences, which were only trenches and earthen embankments, meant to prevent cavalry raids on the cattle and horses turned out to grass, were carried away when the soil was eroded to the bare rock. Thus, the tsunami waves did circle the fortress, with additional help from the moats, which contained water at the time. The inundation reached the Land Gate.

Thus, the son of the Governor can only have been on guard at the Land Gate, and the circuit of the water around the city explains that the flow weakened to the point of not carrying him away. The estimate of the inundation there is 1m above ground at the Gate of the Redoubt of the Generals. But this estimate may not accurately refer to the present state: the Redoubt of the Generals, mined by the Portuguese when they had to evacuate when the Moroccan troops recaptured Mazagaõ in 1769, does no longer exist as such, and we cannot evaluate the difference in the level of the roadway when the wall was rebuilt. It was probably considered enough to level the ruins before rebuilding the rampart, the present Land Gate may be or not at a different level than the former Gate of the Redoubt of the Generals.

Commentaire sur ce texte : Nous sommes d'accord avec l'argumentation de P.-L. Blanc en ce qui concerne l'arrivée du tsunami, le fait qu'il n'a pas submergé les murs de la forteresse (ce qui est confirmé par les autres sources, et notamment le « rapport Mazagan » analysé en partie 4.1.), la configuration des lieux (la forteresse a été encerclée par les eaux) et des portes (trois, dont une seule vers la terre et où se trouvait

²⁹ C'est nous qui soulignons.

certainement le fils du gouverneur). Le « rapport Mazagan » (4.1.) et ce document vont dans le même sens : le nombre de victimes portugaises liées à l'agitation marine et recensés à l'intérieur de la place forte est peu important (0 ou 3).

Mais l'argumentation de P.-L. Blanc à partir du récit du comportement du fils du gouverneur nous paraît plus hasardeuse. En effet, on retrouve ici des éléments sur le contexte culturel et religieux de l'époque, déjà évoqués dans nos précédents commentaires. Ces éléments ne nous semblent pas avoir été suffisamment pris en compte par P.-L. Blanc. Le gouverneur est « animé de l'esprit de chevalier catholique », il est un des rares à garder son sang-froid face à l'inondation en restant actif et en réconfortant les autres. Son fils fait preuve du même courage et du même sang-froid en restant seul à son poste face au danger. Ces faits peuvent être vrais, mais ils peuvent aussi correspondre non pas à une vérité factuelle objective mais à ce que nous appellerons un « récit véridique ». Nous entendons par là un récit dont la fonction dans le contexte culturel, social, religieux d'une publication de l'époque est de rappeler combien l'ordre des choses, l'ordre social (voulu par Dieu) n'est pas détruit par un événement « naturel³⁰ » dramatique, lequel événement fait lui-même partie du dessein divin (Dieu n'agit pas directement pour faire monter les eaux, mais rien de ce qui se produit sur terre n'est complètement hors de sa puissance omnisciente et immanente). Ainsi, dans une société monarchique finement hiérarchisée en différents ordres, le comportement du gouverneur et de son fils correspond précisément à celui attendu d'un « chevalier catholique » : par nature, par le sang, ils doivent être plus courageux que ceux qui les entourent et qui leur sont inférieurs socialement, ils doivent soutenir l'Eglise et montrer les qualités qui correspondent aux valeurs chrétiennes qui structurent cet idéal chevaleresque. Le récit du comportement du gouverneur et de son fils sur les remparts ressemble ainsi beaucoup à un passage rhétorique obligé³¹ ; il peut correspondre à une vérité d'ensemble pour ce qui est important aux yeux des contemporains (montrer ces fameuses qualités censées être propres aux nobles chrétiens) mais ne pas correspondre dans le détail aux faits réels, en particulier le détail fourni sur la hauteur d'eau. Il ne nous semble donc pas que la fonction de ce passage du texte soit de fournir au lecteur de 1756 une information que nous dirions « objective ». Mais cela peut, par contre, être le cas d'autres passages - et notamment la phrase suivante indiquant que la mer fut démontée jusqu'à 14h : les difficultés d'interprétation sont donc grandes. Il nous paraît finalement bien hasardeux de construire un raisonnement/questionnement (à quelle hauteur correspond la ceinture d'un soldat portugais de 1755 ; à quelle hauteur d'eau cela correspond-il si l'on tient compte des changements de niveau du sol de la porte depuis cette époque) fondé sur le membre de phrase « la porte où il resta avec de l'eau jusqu'à la ceinture, abandonné de ses compagnons » pour proposer une valeur chiffrée de hauteur d'eau.

³⁰ Nous mettons des guillemets à « naturel » car le risque d'anachronisme est grand : nous voulons utiliser ici le mot dans le sens « phénomène physique » et sans y ajouter notre implicite culturel du XXI^e siècle européen qui oppose « naturel » à « culturel » et met généralement les humains, si ce n'est en dehors de la nature, du moins à part, à une place particulière.

³¹ Il ne faut pas oublier que la publication d'un récit dans la *Gazette de Lisbonne* en 1756 est soumise à autorisation.

A.2.7 LISTE DES SOURCES HISTORIQUES CONSULTEES

- Anonyme : Copia de huma carta Escrita pelo Padre Guardiam do Real Convento de Maquinés e Vice-Prefeito das Santas Missoens, que nas partes da Barbaria conserva a religiosa Provincia de Sao Diogo dos RR. PP. Franciscanos descalcos ao Padre Procurador dellas ; Lisboa, Com todas aslicenças necessarias, Anno de MDCCLVI, 8 p., 1755.
- Anonyme : Relação do grande terremoto, que houve na praça de Mazagam en o primeiro de Novembro de 1755. Referem se os seos effeitos, e ruinas que causou, e brevemente se mostra de que procedem os tremores de terra. Lisboa : Com as licenças necessarias. Anno 1755 ; 8 p., Lisbonne, 1755.
- Do Couto L.-M. : Memorias para historia da praça de Mazagaõ, Luis Maria do Couto de Albuquerque da Cunha : Fide Goulven, 1917, date inconnue.
- Goulven J.: La Place de Mazagan sous la domination Portugaise (1502–1769), Paris, 164–166, 1917.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXVIII, 470-474, décembre 1755.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 38–52, janvier 1756.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 68–71, janvier 1756.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 131-143, février 1756.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 146-147, février 1756.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 175-179, mars 1756.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 214-217, mars 1756.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 301-304, avril 1756.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 310-311, avril 1756.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 368-369, mai 1756.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXIX, 462-464, juin 1756.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXX, 12–13, juillet 1756.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXX, 39–44, juillet 1756.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome LXXXIX, 466-467, juin 1761.
- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Tems, Tome CXIII, 474–476, juin 1773.

- J. H. M. T. (Anonyme) : Journal Historique sur les Matières du Temps, Tome CXIII, 479, juin 1773.
- Pereira de Sousa F.-L. : O Terremoto do 1 de Novembro de 1755 em Portugal e un Estudo Demographico; Distritos de Faro, Beja e Evora, Lisboa, Vol. I, Cap. IV, O maremoto e efeitos geologicos, 84-90 ; Cap. VI, O maremoto e efeitos geologicos, 221 ; 503-510; 806-808; Cap. IX, 815-831; Cap. X, O maremoto, efeitos luminosos e efeitos geologicos, 846-849; Vol. II, Cap. VIII, O maremoto e efeitos geologicos, 403; Vol. II, Cap. X, Principais sismos nos distritos de Santarem e Portalegre anteriores e posteriores ao de 1 de Novembro de 1755, 417-420 ; publié en 1919.
- Royal society (GB) - Philosophical transactions of the Royal society of London : giving some account of the present undertakings, studies, and labours of the ingenious in many considerable parts of the world. (Vol. XLIX, Part II, for the year 1756, M.DCC.LVII), 49 p (pp. 351-444).
- Royal society (GB) - Philosophical transactions of the Royal society of London : giving some account of the present undertakings, studies, and labours of the ingenious in many considerable parts of the world. (Vol. L, Part I, for the year 1757, M.DCC.LVIII).
- Soyris, Mr. : Extrait d'une lettre de Maroc en datte du 5 novembre 1755: de Soyris a Guys, Archives Nationales de France, Marine B7/403, 1755.

B CONDITIONS DE MODELISATION D'UN TSUNAMI DE REFERENCE (1^{ER} NOVEMBRE 1755)

B.1 CONSTRUCTION DE REFERENTIELS « TRAIT DE COTE » ET « FOND COMMUNAL »

L'absence de référentiel officiel, homogène et précis pour la définition du trait de côte marocain nous a conduits à numériser celui-ci au moyen des supports satellitaires haute résolution multi-dates disponibles dans l'application Google Earth. En effet, la confrontation des différentes bases de données géoréférencées sur les traits de côte existants montre une grande diversité de tracés, souvent très imprécis, ou du moins totalement inadaptés à des problématiques littorales et de modélisation de la submersion marine (figure B1).

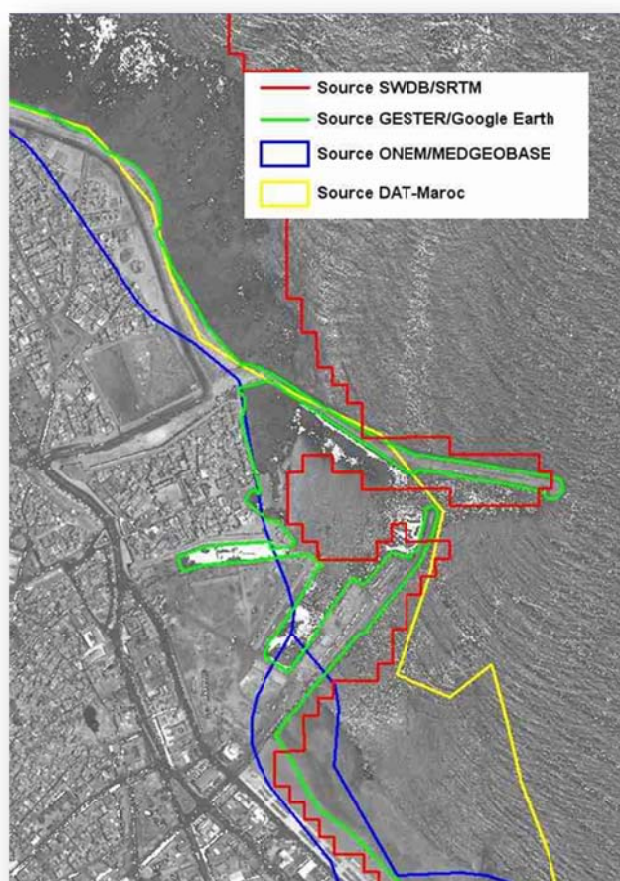


Figure B1 : Confrontation des différents traits de côte disponibles à l'échelle du Maroc. Illustration des écarts sur la ville d'El Jadida.

Ce trait de côte se définit comme la courbe/ligne située à l'intersection visible de la terre et de la mer sur les images disponibles. La numérisation a été effectuée

manuellement par photo-interprétation. Les produits sont disponibles au format vectoriel en .shp, .tab pour une exploitation sous SIG et .kml (figure B2).

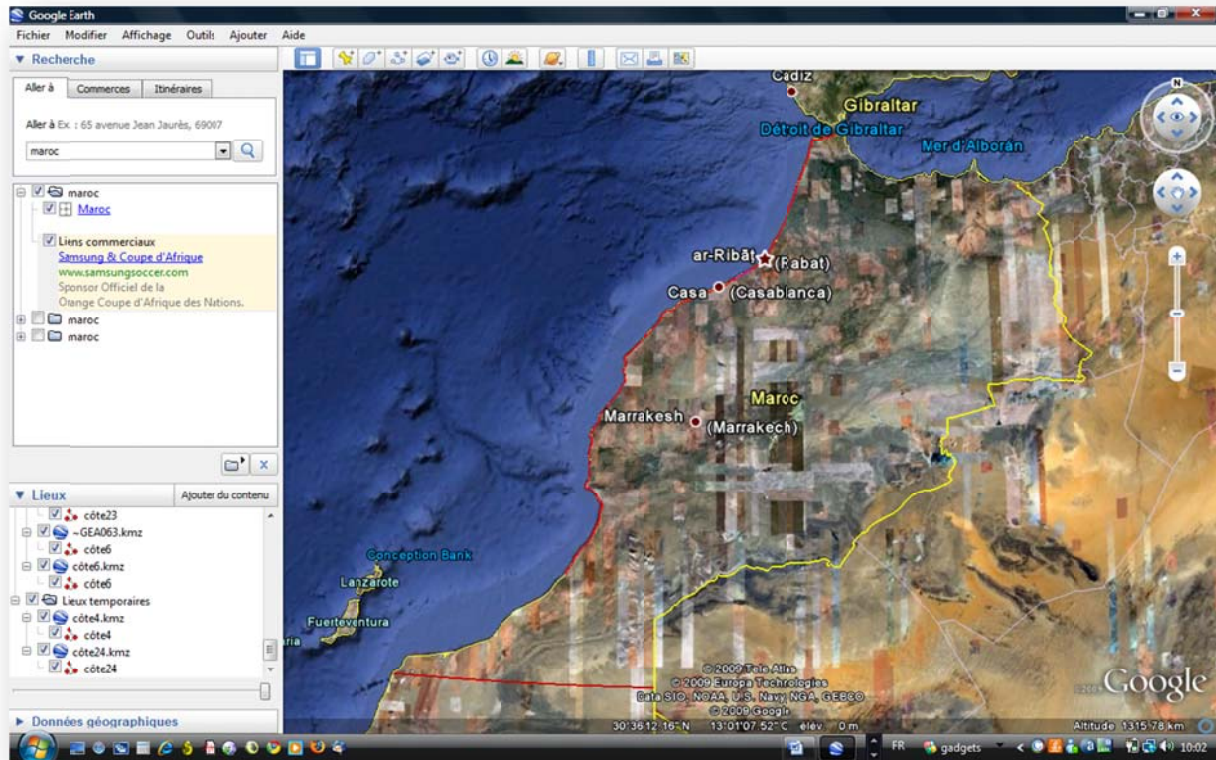


Figure B2 : En rouge, les 1310 km de référentiel côtier numérisés dans l'application Google Earth.

Le trait de côte a été numérisé en suivant soit la ligne de démarcation entre le sable mouillé et le sable sec (figure B3), soit le pied des côtes rocheuses ou de l'urbanisation. L'outil « horloge » de Google Earth a permis de choisir l'affichage des différentes images satellites afin d'optimiser la visibilité des zones (sans nuages) et prendre en considération les dernières évolutions dans l'occupation du sol (nouveaux aménagements littoraux en particulier). Nous avons pu exploiter des scènes allant de 2003 à 2009. Au total, ce sont 1310,25 km de côtes qui ont numérisés, entre Sidi Ifni au Sud d'Agadir et Ceuta au Nord.

Les caractéristiques du système de projection sont les suivantes :

Système de coordonnées géographiques : GCS_WGS_1984

Datum : D_WGS_1984

Méridien principal : Greenwich

Unité angulaire : Degree

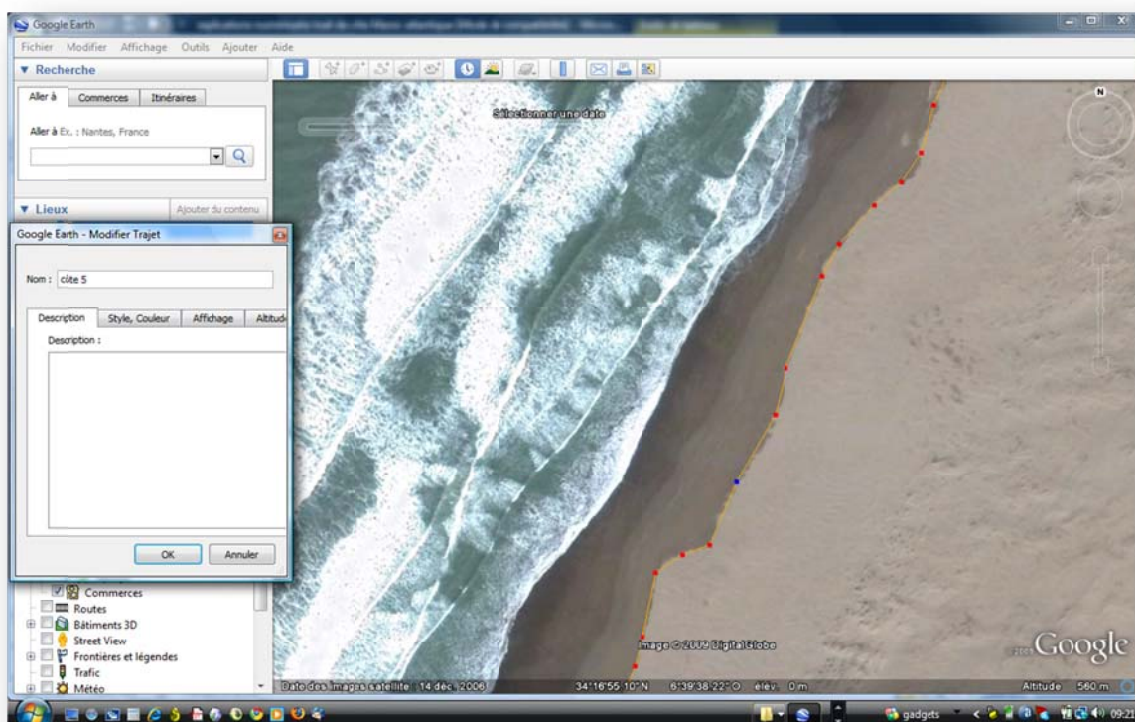


Figure B3 : Exemple de numérisation suivant la ligne de démarcation entre sol mouillé et sol sec.

La **numérisation** a été effectuée en moyenne à **300 m d'altitude** (échelle : 1/2697). Lors de problème de visualisation ou de qualité, elle a été effectuée entre 800 m (échelle : 1/7194) et 1 km 200 (échelle : 1/10791). Le fichier comporte 24 tronçons découpés aléatoirement (1 à 24).

Quelques tronçons ont présenté des difficultés de numérisation :

- **Côte 1** : nuages épais : petite partie numérisée à 900 m d'altitude, du point 35°54'44.49"/ 5°22'54.61', au point 35°54'31.36"/5°23'28.59"
- **Côte11** : numérisation entre 800 et 900 m d'altitude car cliché de mauvaise qualité jusqu'au point 33.24 N et 8.08 O. Puis numérisation à 300 m.
- **Côte 13** : le port de Jaffar est numérisé aux alentours de 900 m d'altitude.
- **Côte 14** : petite partie numérisée à 900 m d'altitude, du point 32°48 et 8°56 au point 32°47 à 8°58
- **Côte 17** : partie numérisée à 1000 m d'altitude, du point 31°37' /9°40' au point 31°34'/ 9°42'
- **Entre côte18 et côte19** : Nuages épais, impossible de numériser du point 31°03'/9°49' au point 31°01'/ 9°49'
- **Entre côte19 et côte20** : Nuages épais, impossible de numériser du point 30°58'/9°49' au point 30°56'/9°49'

- **Côte 20** : numérisation à 1km200 pour mauvaise résolution jusqu'au point 30°43' / 9°51'.
Puis du point 30°36' et 9°47' au point 30°36' et 9°46'.
Puis du point 30°36' et 9°46' au point 30°35' et 9°46'.
Puis du point 30°32'31'' / 9°42'11'' au point 30°32'17'' / 9°42'03''.
Puis du point 30°30'32.59'' / 9°41'14.08'' au point 30°30'00.77'' / 9°40'44.38''.
- **Côte 22** : numérisation à 1km40 du point 29°46'40.56'' / 9°51'49.04'' au point 29°45'01.84'' / 9°53'42.31''

Le tableau suivant récapitule les dates et échelles de numérisation des différents tronçons (tableau B1).

Numéro de tronçon	Date de l'image sous Google Earth	Altitude moyenne de numérisation (en m)
1	JUIN 2004	300
	JUILLET 2003	900
	MARS 2003	300
	JUILLET 2003	900
	MAI 2003	300
	AOUT 2008	300
	JUILLET 2009	300
2	JUILLET 2009	300
	SEPTEMBRE 2003	
3	MARS 2008	300
4	DECEMBRE 2009	800
5	DECEMBRE 2009	800
	AVRIL 2006	300
6	SEPTEMBRE 2006	300
7	JUILLET 2007	300
8	AOUT 2007	300
9	MAI 2008	300
10	JUIN 2009	300
11	DECEMBRE 2009	1000
	JUIN 2004	300
12	JUIN 2004	300
	MAI 2007	300
13	JUILLET 2006	300
		1000
	MARS 2004	300
14	FEVRIER 2004	300
		1000
15	OCTOBRE 2004	300
16	MAI 2009	300
17	DECEMBRE 2007	1000
18	SEPTEMBRE 2003	1000
19	SEPTEMBRE 2003	1000
20	MAI 2009	1200
		300
		1200
		300
		1200
		300
		1200
		300
1200		
21	JUIN 2009	1200
22	MAI 2006	1400
		300
23	AVRIL 2004	300
	JUIN 2008	300
24	JUIN 2008	300

Tableau B1 : Caractéristiques des différents tronçons de littoral numérisés.

Ce trait de côte nous a ensuite permis de définir précisément les limites maritimes de **79 communes littorales** du Maroc en améliorant le fond officiel gracieusement fourni par la Délégation à l'Aménagement du Territoire du Maroc (DAT). Ce nouveau référentiel communal nous permettra de calculer l'exposition de chaque commune à la submersion par un tsunami. Ces communes s'étendent de Taghazout au Sud à Taghramt au Nord.

B.2 ELABORATION DE MNT ET MNE

Afin de servir de support aux modélisations numériques d'un tsunami de référence et des submersions côtières induites, plusieurs modèles numériques de terrain ont été produits au cours du projet. Il s'agit de grilles de résolutions croissantes, intégrant à la fois des données bathymétriques, topographiques, d'élévation du bâti et des infrastructures côtières.

B.2.1 MNT REGIONAL

Le MNT régional (Maroc atlantique) a été produit par intégration des données bathymétriques de la base de données internationale GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*) qui compile à l'échelle mondiale des sondages bathymétriques et des relevés de radars altimétriques satellitaires. Les données topographiques des côtes marocaines sont issues de la base de données SRTM version 2 (*Shuttle Radar Topography Mission*) de résolution 90 m. L'isohypse « 0 m » provient du trait de côte numérisé par l'équipe. Les grilles résultantes sont en coordonnées métriques UTM, datum WGS84. Les grilles obtenues possèdent des mailles allant de 400 m x 400 m (bathymétrie) à 100 m x 100 m (topographie). Les MNT ont été produits à l'aide du logiciel Surfer (Golden Software) selon une triangulation par interpolation linéaire (figure B4). Le choix de cette méthode d'interpolation tient au fait que la plupart des données utilisées sont déjà maillées et au grand nombre de valeurs considérées. La qualité des données interpolées par cette méthode a été testée par validation croisée. Cette technique consiste à enlever une à une les données mesurées pour les prévoir ensuite à partir de l'interpolation des données voisines. Les erreurs de la validation croisée (résidus) sont ensuite obtenues en soustrayant les valeurs prédites aux valeurs mesurées.

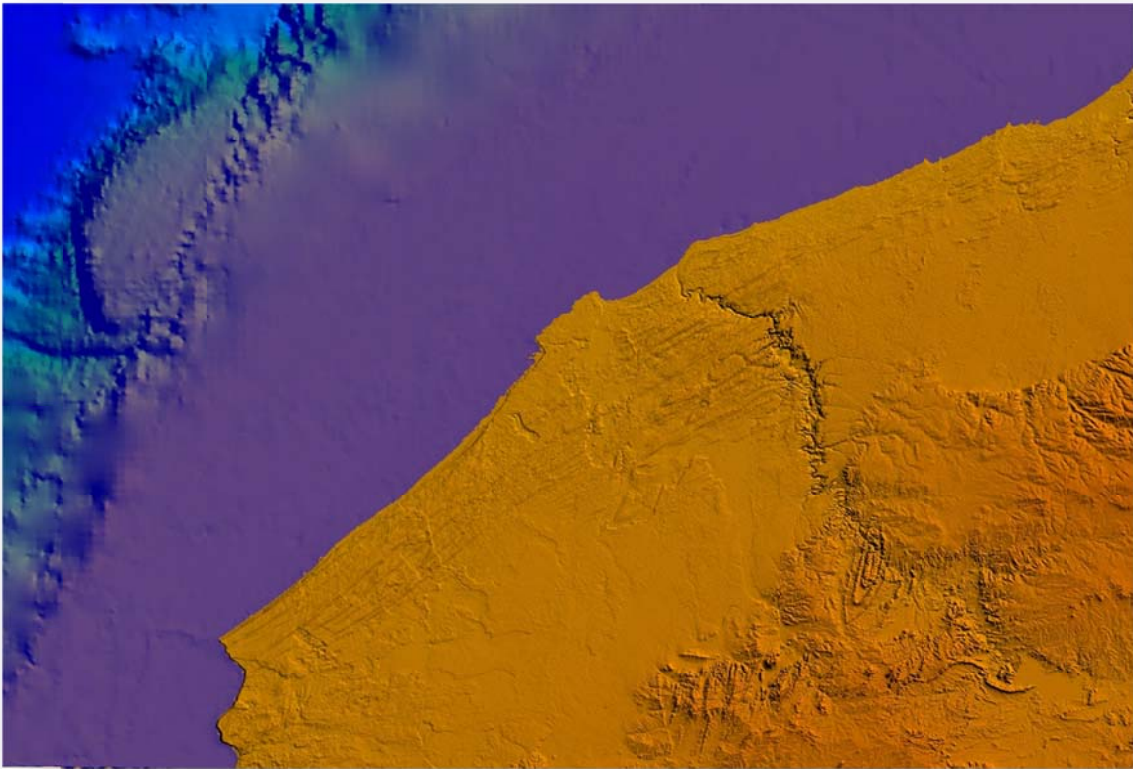


Figure B4 : Extrait du MNT régional (topo SRTMv2 /bathy GEBCO) produit sur le littoral atlantique marocain.

B.2.2 MNT ET MNE LOCAUX (EL JADIDA)

Afin de produire un premier modèle d'inondation (submersion) local, une grille MNT plus fine - de haute résolution - a été produite sur le littoral d'El Jadida. Cette grille interpolée intègre les données topographiques du SDAU d'El Jadida (2006) issues de levés DGPS. Ce jeu de points a été enrichi par les courbes de niveaux 5, 10, 15, 25, 30 et 35 m de la carte topographique au 1/50 000 de la zone et d'autres relevés GPS, en particulier le long du littoral. Les données bathymétriques proviennent de la carte marine d'El Jadida (source SHOM). Le trait de côte (niveau 0 m) a été numérisé à partir d'images satellites disponibles sous Google Earth (référentiel GESTER, 2010). Tous ces points ont été agrégés en un seul jeu puis interpolés par krigeage de manière à obtenir une grille de résolution 27m x 27m (figure B5).

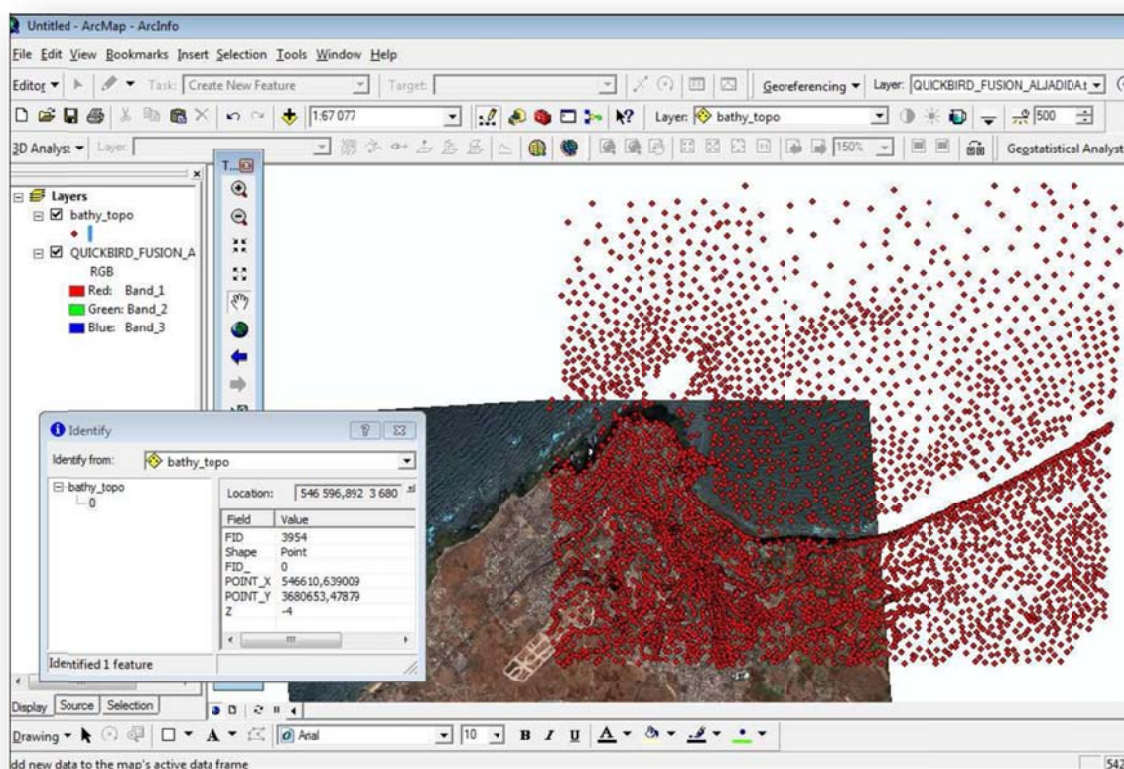


Figure B5 : Ensemble des points côtés en X, Y, Z ayant servi à la construction du MNT d'El Jadida (interface ArcGis).

Afin de produire un modèle fin d'inondation intégrant les effets de rugosité, d'obstacle et de canalisation des flots induits par les aménagements urbains, nous avons fait évoluer ce MNT en modèle numérique d'élévation (MNE). Nous avons pour ce faire intégré les formes en plan et les élévations des principaux blocs de bâtiments et infrastructures (quais, esplanade, digues, remparts) présentes dans une hypothétique zone d'inondation inférieure à 10 m d'altitude. Les données sur les bâtiments proviennent du SDAU mais elles ont été entièrement corrigées (altitudes et formes) suite à un important travail de reconnaissances de terrain couplé à de la photo-interprétation d'une image satellitaire Quick Bird du 15 juillet 2009. Après intégration dans le MNT initial, ces nouvelles données ont été interpolées pour produire une nouvelle grille de 1 m de résolution sur la partie basse et littorale de la ville (façade orientale) (figure B6).

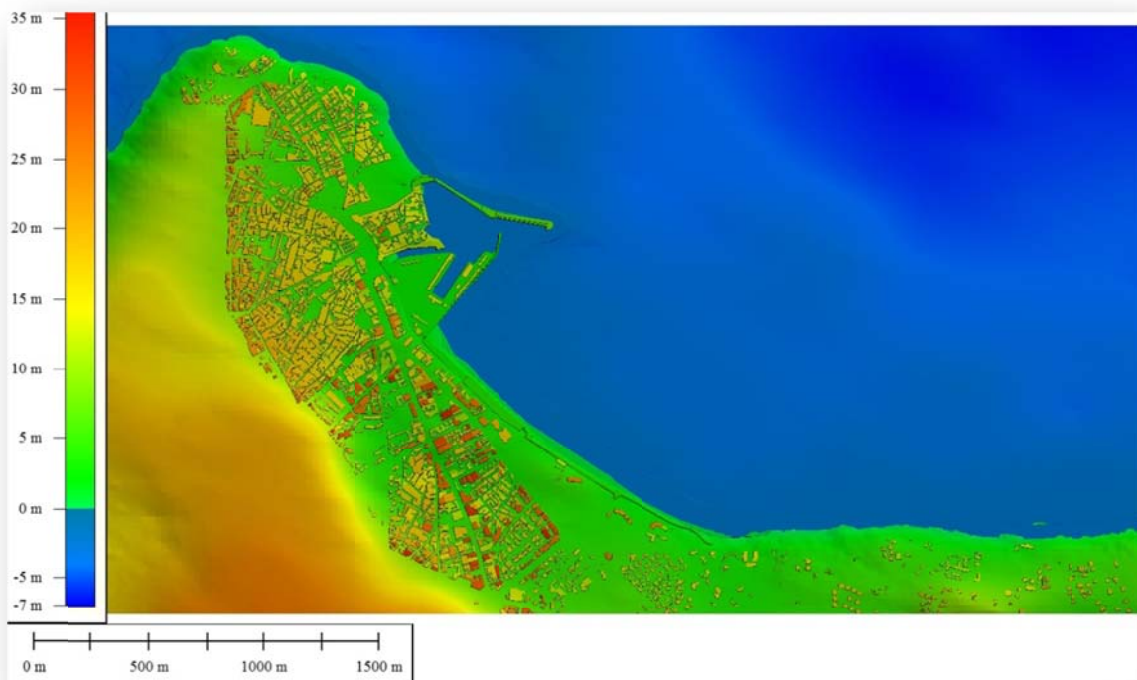


Figure B6 : MNE à 1 m de résolution sur la ville d'El Jadida (bâti de la zone d'étude seulement).

En complément, nous avons produit un MNE équivalent en résolution, mais reproduisant l'occupation de la zone et le trait de côte aux alentours de 1755. Ces informations ont été tirées de différentes gravures d'époque et en particulier d'un plan de la cité Portugaise géométriquement exact datant de 1753 (source BNF). On y voit une cité fortifiée au plan conforme à celui actuel, mais dotée de douves qui ont été depuis remblayées. Le trait de côte y était sensiblement différent à l'actuel du fait de l'absence de quais au Sud de la cité. Pour cette version « 1755 » du MNE, la bathymétrie a été creusée au niveau des digues actuelles et tous les aménagements situés hors de la cité ont été supprimés (figure B7).

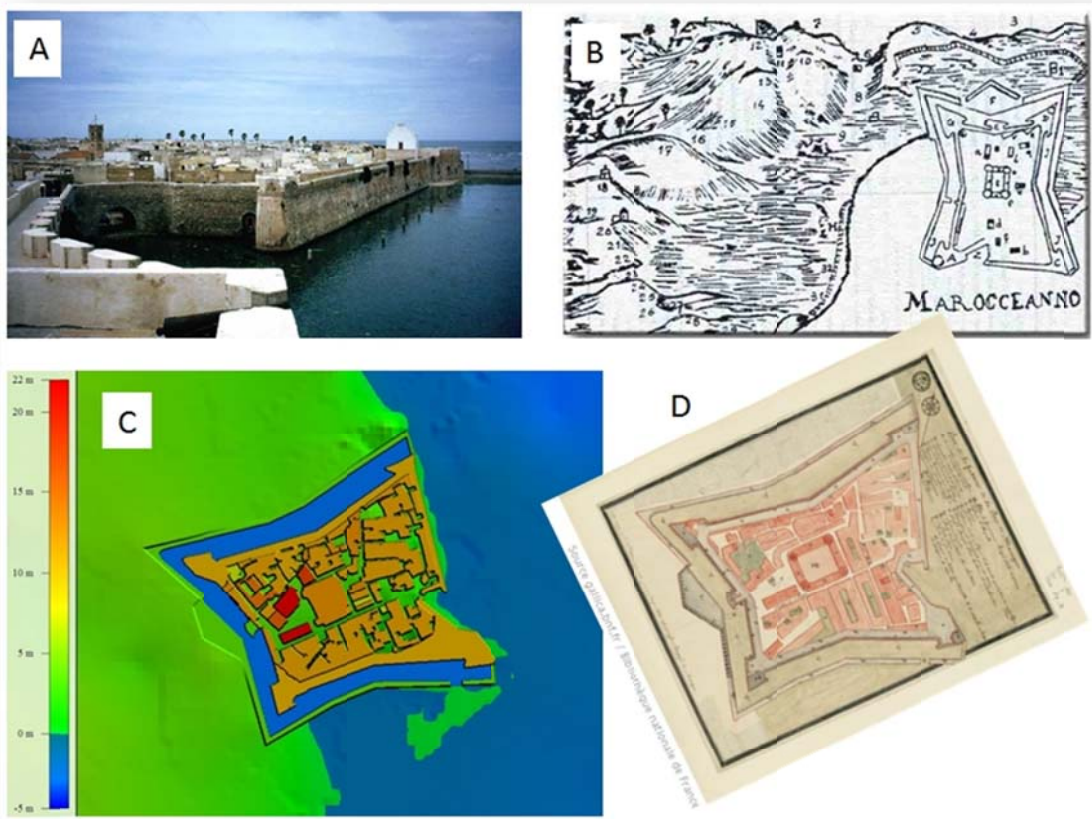


Figure B7 : A : Vue actuelle de la citadelle d’El Jadida depuis le haut du rempart sud en bord de mer, B : Carte de 1752 de la cité de Mazagan (source gallica.bnf.fr), C : Extrait du MNE en contexte proche de 1755, D : Plan de la forteresse de Mazagan de 1753 (source gallica.bnf.fr).

B.3 MODELISATION D’UN TSUNAMI DE REFERENCE (SOURCE HSH, 1^{ER} NOVEMBRE 1755)

B.3.1 CHOIX D’UN SCENARIO DE REFERENCE

Une analyse de vulnérabilité humaine et territoriale aux tsunamis se justifie au regard d’un scénario d’impact. La question du choix des scénarios peut être largement débattue : choix d’un scénario maximisant l’aléa à très faible récurrence, au risque de produire des bilans catastrophiques et alarmistes décourageant les décideurs ? Ou choix d’un scénario beaucoup plus probable mais minimisant les impacts et pouvant entraîner un faux sentiment de sécurité ? L’idéal serait de produire un éventail de scénarios pour envisager des mesures de prévention adaptées à chaque situation. Compte tenu du très grand nombre de variables entrant dans la construction d’un scénario d’impact (depuis le choix de la source du tsunami jusqu’à ses impacts sur des enjeux mobiles et aux comportements incertains), il a été impossible de produire

plusieurs scénarios de risques d'impact sur le Maroc et El Jadida. Aussi, avons-nous privilégié ici plusieurs scénarios de mobilité des enjeux humains au détriment de plusieurs scénarios d'aléa. Ce choix se justifie totalement à notre avis dans le cadre d'une analyse de vulnérabilité dont l'objectif est justement d'intégrer d'autres variables de l'équation du risque qui font encore largement défaut dans les méthodes existantes. Parmi ces variables complémentaires figurent celles qui définissent la probabilité d'endommagement (critères de vulnérabilité) des différents éléments exposés (biens, personnes, activités) pour un aléa d'intensité donnée, et bien entendu, la nature et la quantité de ces éléments potentiellement exposés au moment de l'arrivée du tsunami.

Ainsi, le scénario d'aléa retenu et modélisé qui servira de cadre de référence pour les analyses de vulnérabilité, d'exposition et d'impacts dans le cadre de cette étude de cas, est celui, reproductif, du tsunami du 1^{er} novembre 1755 (Mw 8.5). Il s'agit donc d'un scénario déterministe à faible probabilité, mais qui renvoie à un événement relativement bien renseigné sur le plan historique. Il présente par ailleurs l'avantage d'interpeller un maximum de décideurs locaux sur les besoins d'une planification d'évacuation préventive en cas d'alerte et de stimuler la sensibilisation locale sur ce risque encore très mal perçu au Maroc.

La source exacte du séisme du 1^{er} novembre 1755 demeure encore à ce jour incertaine. Quatre zones sources impliquant 5 failles potentiellement tsunamigènes sont généralement évoquées dans la littérature pour cet événement majeur. Omira et al. (2009) ont modélisé les tsunamis générés par chacune de ces sources (figure B8). Il apparaît c'est la faille HSF (*Horseshoes Fault*) qui génère le tsunami le plus énergétique pour la façade atlantique marocaine et El Jadida. C'est cette dernière qui a été retenue pour notre scénario d'impact.

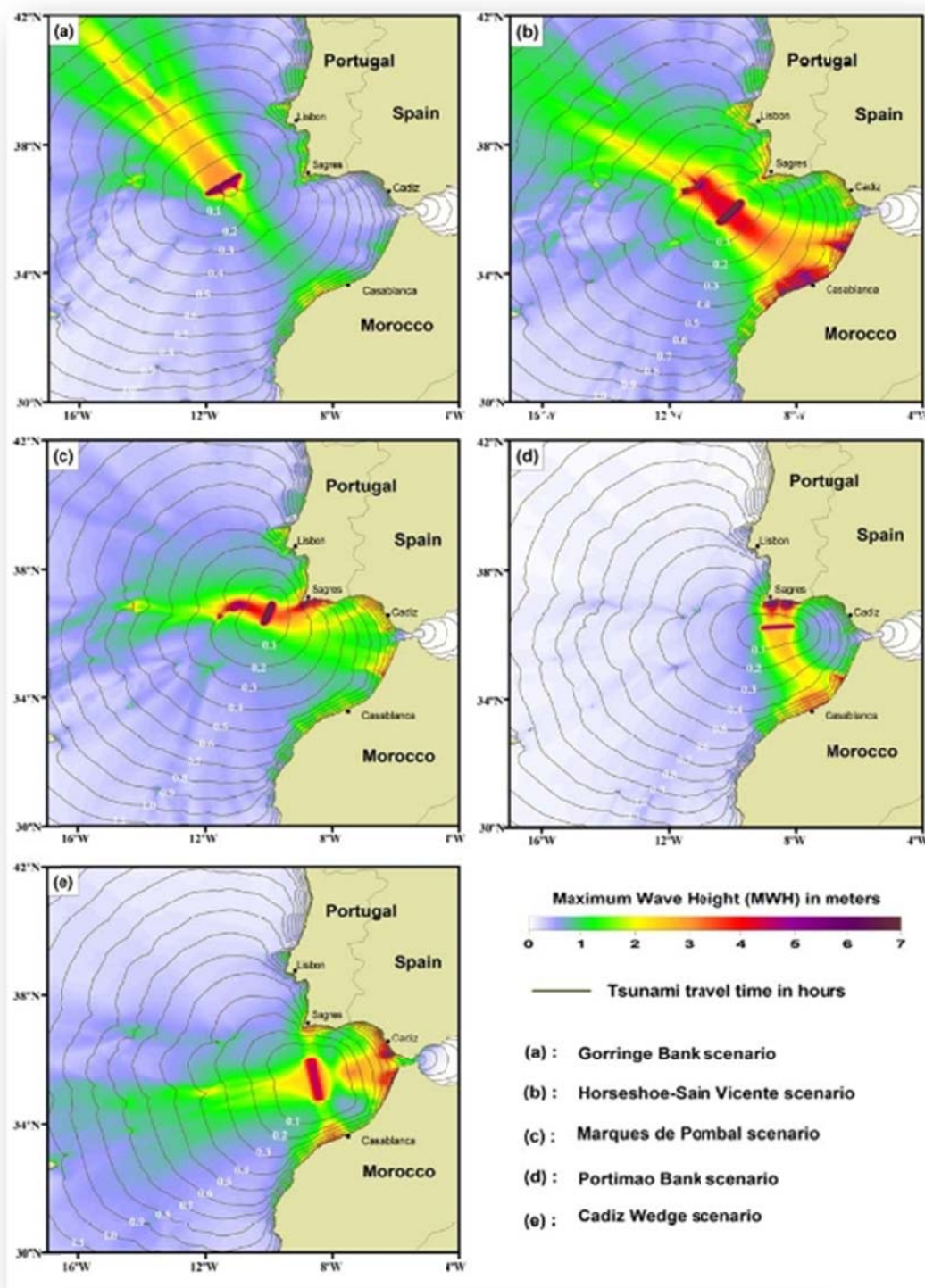


Figure B8 : Modèles de propagation de tsunami pour différentes sources sismiques du golfe de Cadiz (temps de parcours en heures et hauteurs maximales de vagues en m) (Omira et al., 2009).

B.3.2 MODELE DE SIMULATION

Le **modèle de simulation** utilisé est le COMCOT-Lx. Il est basé sur le code COMCOT (*Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model*) (Liu et al., 1994) modifié par l'équipe de la FFCUL (*Foundation of the Faculty of Sciences of the University of Lisbon*) dans le cadre des projets européens TRANSFER et NEAREST. Le modèle COMCOT correspond à un ensemble de codes numériques de simulation. Il permet de modéliser la génération du tsunami par la déformation du fond de la mer due au séisme, la propagation des vagues, puis l'amplification et l'inondation des rivages.

La **génération du tsunami** par un séisme sous-marin s'appuie sur l'hypothèse suivante. Sachant que la vitesse de rupture d'une faille est environ 10 fois supérieure à la vitesse de propagation des tsunamis (pour 5000 m d'eau, environ 800 km/h), la génération du tsunami est donc considérée comme instantanée par rapport à sa période (environ 1000 s), ce qui permet de prendre un champ de vitesse initial nul. On considère que la déformation initiale de la surface de l'eau est équivalente à la déformation cosismique du fond de la mer. Le champ de déplacement vertical du fond de la mer est calculé au moyen d'un modèle de dislocation tel que celui développé par Okada (1985). Ce modèle fait l'hypothèse d'un milieu élastique isotrope et homogène dans lequel une faille rectangulaire casse avec un glissement uniforme. Le champ de déplacement peut être ainsi calculé à partir des 9 paramètres géométriques décrivant la géométrie de la faille (latitude, longitude, profondeur, longueur, largeur, angles de *strike*, *dip*, *rake* et *slip*) et de 2 paramètres mécaniques qui définissent les propriétés élastiques du milieu (constantes de Lamé λ et μ) (figure B9).

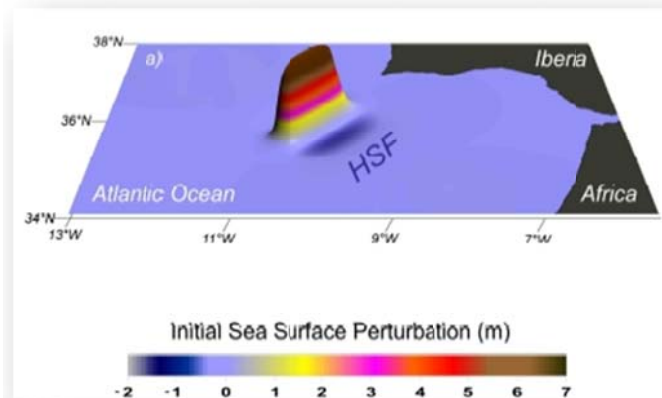


Figure B9 : Déformation initiale de la surface d'eau pour le scénario HSF (Omira, 2010).

La **propagation des tsunamis** générés par un séisme est traitée dans l'approximation « ondes longues », pour laquelle les longueurs d'onde sont très supérieures (typiquement, quelques dizaines à centaines de kilomètres) à l'épaisseur de la couche

d'eau (figure B10). Les équations de l'hydrodynamique, incluant les termes non linéaires, considèrent l'océan comme une couche mince par rapport aux longueurs d'onde étudiées et prennent en compte les fortes amplitudes des vagues à proximité des côtes (Mei, 1983). Au large, les hauteurs des vagues sont négligeables devant la profondeur et n'influencent pas la vitesse de propagation du tsunami, qui peut être simplement définie en fonction de la profondeur h et de l'accélération de la pesanteur

$$c = \sqrt{gh}$$

g :

La résolution des équations décrivant la propagation du tsunami est réalisée à l'aide d'une méthode par différences finies. Les équations sont discrétisées sur une grille dite de type C : l'élévation de l'eau et la profondeur sont calculées au centre des mailles et les vitesses aux centres des côtés des mailles. Le schéma numérique, centré en temps et décentré en espace, est implicite de type Crank-Nicolson, précis au deuxième ordre dans le temps. Le système d'équations est résolu dans le modèle à l'aide d'une procédure itérative, pour chaque pas de temps.

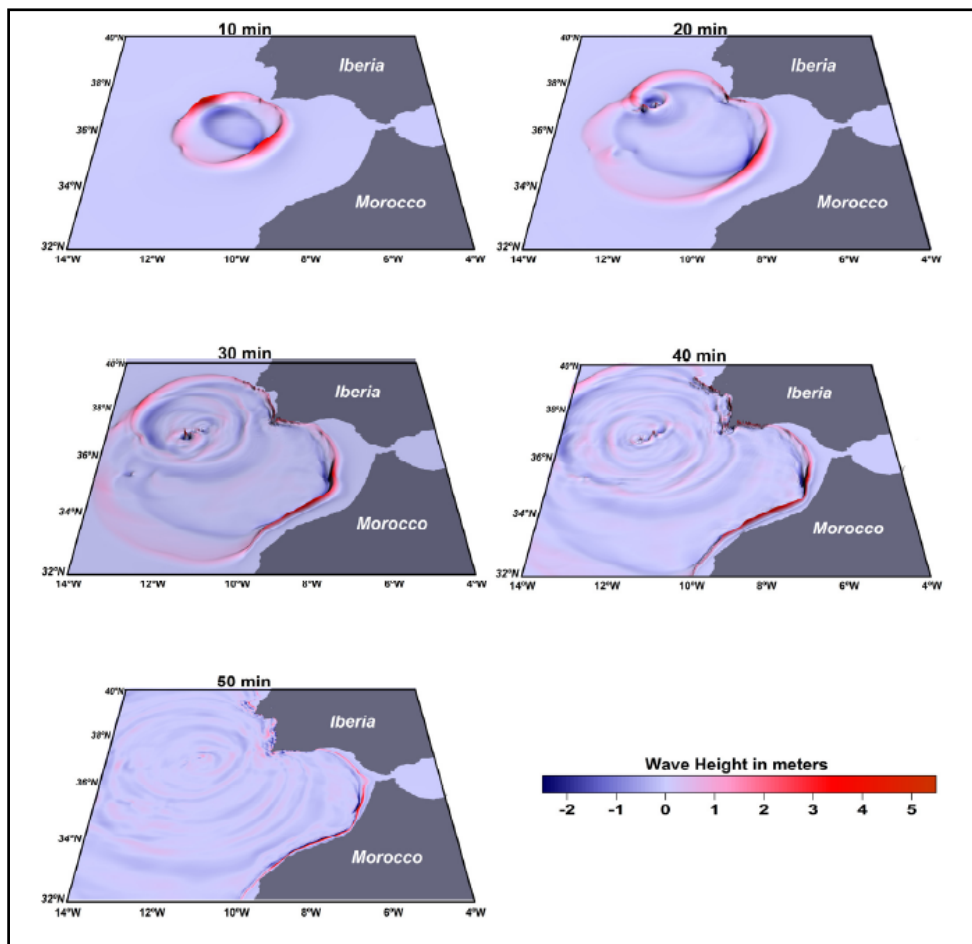


Figure B10 : Simulation de la propagation depuis la zone épiscopentrale dans la région du Golfe de Cadix (scénario HSF) (Omira, 2010).

L'inondation des côtes : A l'approche des hauts fonds et des côtes, la période des vagues reste constante tandis que la longueur d'onde diminue fortement. La conservation de l'énergie conduit à une augmentation de la hauteur des vagues, proportionnelle à $h^{1/4}$ (Mei, 1983). Pour pouvoir rendre compte des phénomènes d'amplification, les grilles bathymétriques utilisées pour la simulation ont des résolutions croissantes près des côtes, et incluent la topographie dans le dernier niveau de grille afin d'estimer les *run-ups* et vitesses d'écoulement. Le principe de calcul des *run-ups* est d'extrapoler dans les mailles sèches les quantités calculées dans les mailles voisines mouillées. Le calcul du *run-up* nécessite de connaître la topographie très précise des zones inondables, jusqu'à des altitudes cohérentes avec les inondations maximales attendues.

B.3.3 RESULTATS DE LA SIMULATION

La simulation a permis d'obtenir trois zonages de submersion marine de résolution croissante en faisant varier les supports altimétriques des modèles :

- un zonage régional sur tout le littoral atlantique marocain sur support **MNT SRTM à 90 m** de résolution ;
- un zonage local à El Jadida sur support **MNT à 27m** de résolution ;
- un zonage local à El Jadida sur support **MNE à 5 m** de résolution (dégradation du MNE à 5m pour réduire les temps de calcul), intégrant le bâti existant, les rues et les ouvrages de protection portuaire (quais, digues, esplanade de front de mer).

La **simulation régionale** depuis la source HSF donne des temps d'arrivée compris entre 51 mn (Rabat) et 66 mn (Ceuta) sur le littoral marocain étudié (figure B11). D'après cette simulation le port de Casablanca serait touché 58 minutes après le séisme. L'amplification et la pénétration du tsunami sur les terres dépendent de la bathymétrie, de la topographie et du profil des côtes. Le zonage de l'inondation terrestre obtenu entre Taghazout au Sud à Taghramt au Nord présente les distances de pénétration les plus importantes au niveau des embouchures de fleuves et des principales zones lagunaires. La valeur la plus importante est atteinte dans la lagune Moulay Bousselham au Nord avec près de 6 km de pénétration. Les hauteurs d'eau associées sont tout aussi variables. Le modèle sort une hauteur d'eau maximale de 14,4 m à Anfa près du boulevard de la Corniche. En front de mer, les villes les plus exposées sont Casablanca, El Jadida et Assilah et Rabat / Salé. Mais la moyenne de ces hauteurs d'inondation par maille de 25 km de côté montre une exposition plus forte entre Assilah et El Jadida (figure B12). Sur El Jadida, la simulation régionale indique la possibilité de vagues de 9 m en front de mer, avec des temps d'arrivée de l'ordre de 53 mn depuis le déclenchement du séisme sur la source HSF (figure B11).

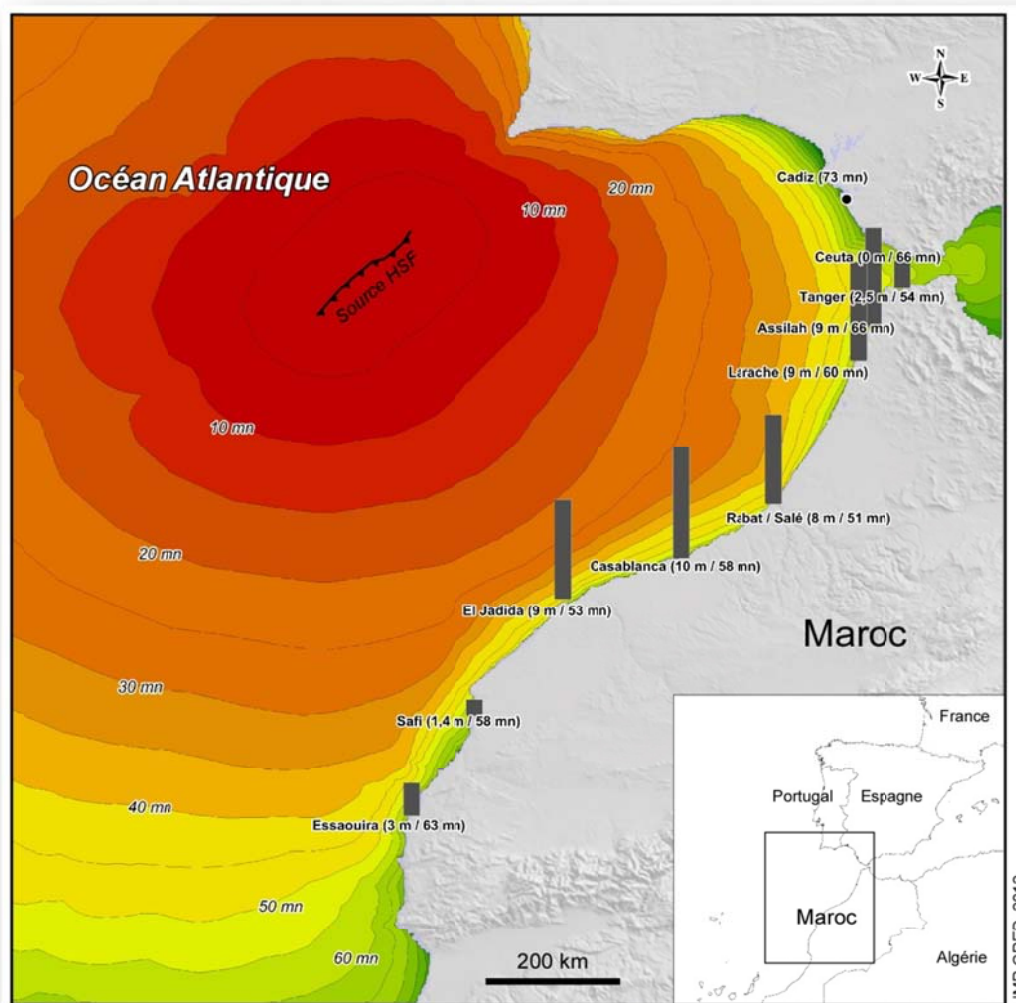


Figure B11 : Temps de trajet (TTT, en minutes) et hauteurs de vague maximales à la côte (MWH, en mètres) modélisées pour un tsunami de source HSF (type 1755).

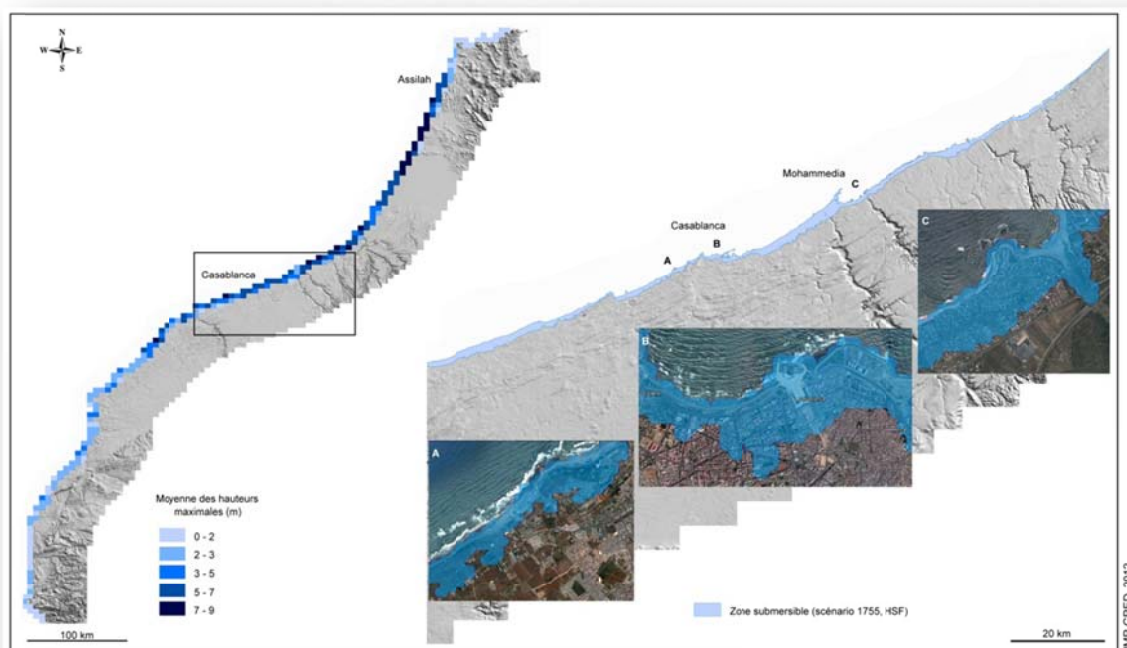


Figure B12 : Hauteurs moyennes des vagues maximales et enveloppe de submersion modélisées pour un tsunami de source HSF (type 1755).

Les **simulations locales** à haute résolution obtenues sur El Jadida produisent deux paramètres déterminants pour comprendre les processus d'endommagement sur les personnes et les infrastructures : la vitesse et la profondeur de l'inondation. Le gradient de vitesse simulé s'étend de 0 à 10 m/s et les profondeurs d'eau sont comprises entre 0 et 9 m. Ces deux variables de l'aléa permettront de définir les matrices de probabilité décès des futurs modèles de vulnérabilité du bâti et des personnes situées à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments.

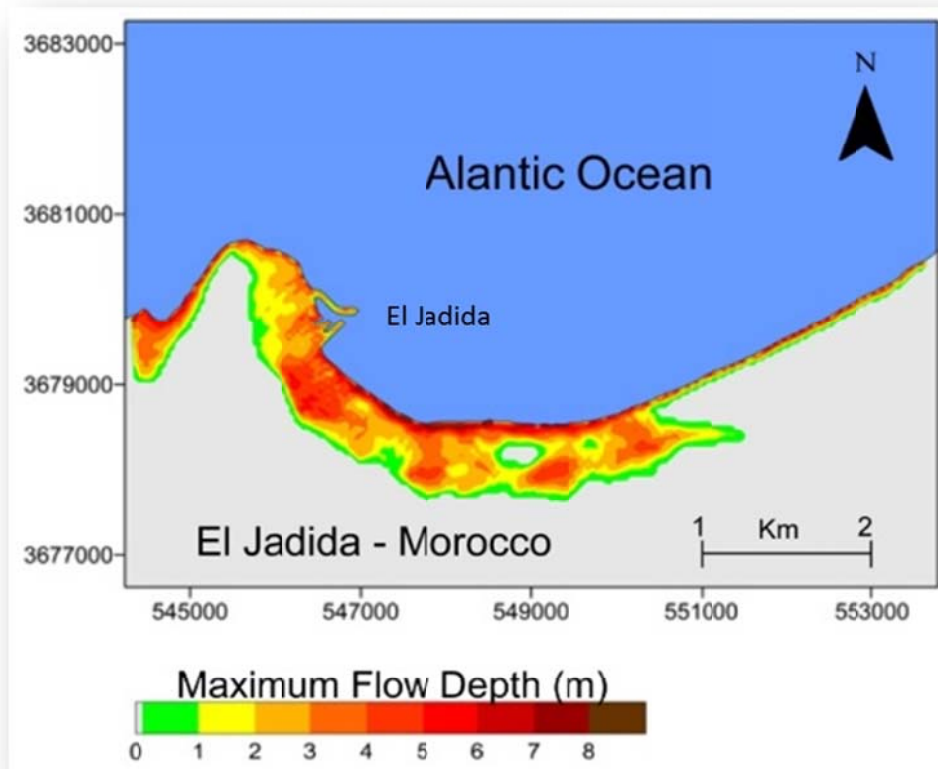


Figure B13 : Profondeurs d’inondation sur El Jadida. Modélisation locale sur MNT 27 m de résolution.

Ce modèle d’inondation local sur MNE (figures B14 et B15) donne une inondation plus réaliste que sur MNT (figure B13). Il montre les effets de canalisation des flots, en particulier dans les avenues perpendiculaires au rivage. Par contre, il n’intègre pas d’éventuelles destructions de bâtiments en front de mer et les incidences que cela pourrait avoir sur la dynamique de la submersion intra-muros. Par ailleurs, on note sur ce modèle MNE un effet de rugosité d’ensemble du bâti qui freine les flots, et réduit la profondeur d’inondation dans les terres par rapport au modèle sur MNE. Enfin, il présente l’avantage d’intégrer la défense côtière dans le MNE et d’en apprécier l’impact direct sur la dynamique de l’aléa. A ce titre, on peut voir le caractère quasi-transparent des digues de protection sur la pénétration d’un tsunami de majeur de type 1755. On peut par contre apprécier l’effet de protection totale assuré par les remparts de la cité portugaise qui sont en moyenne de 11 m de haut.

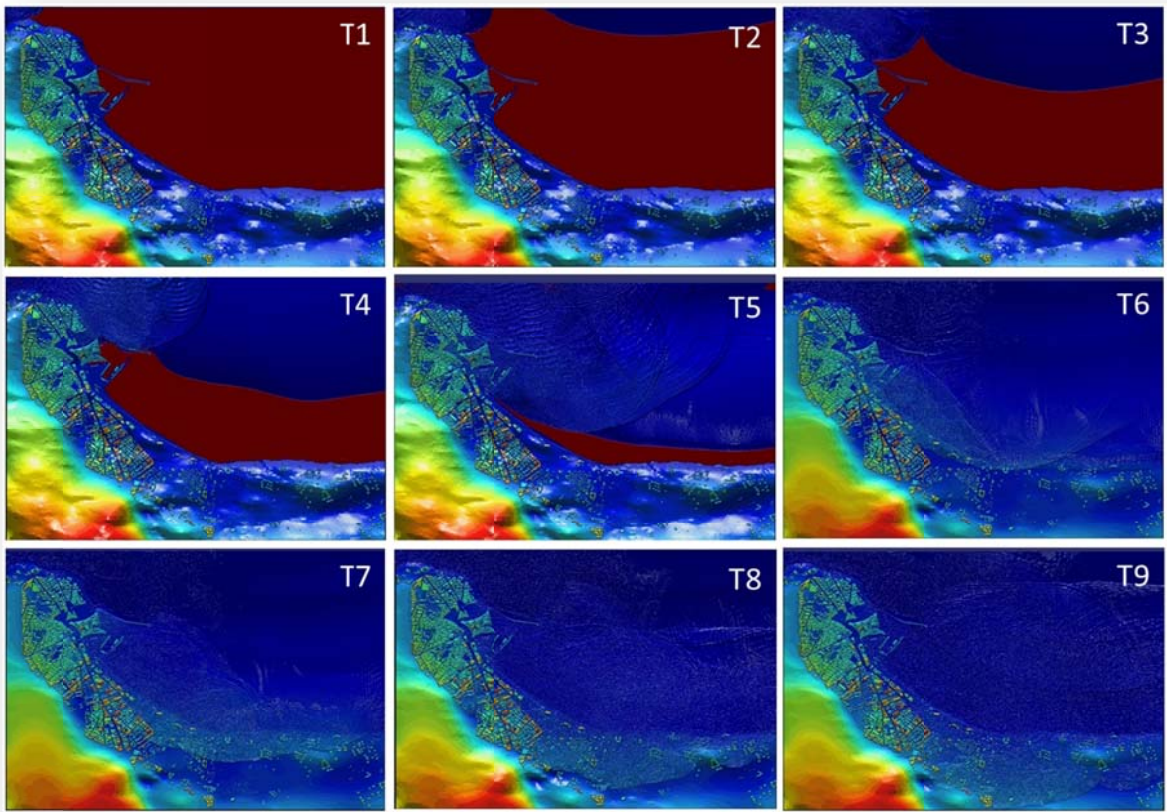


Figure B14 : Modélisation dynamique de l'inondation sur El Jadida. Modélisation locale sur MNE de 5 m de résolution (1755, source HSF).

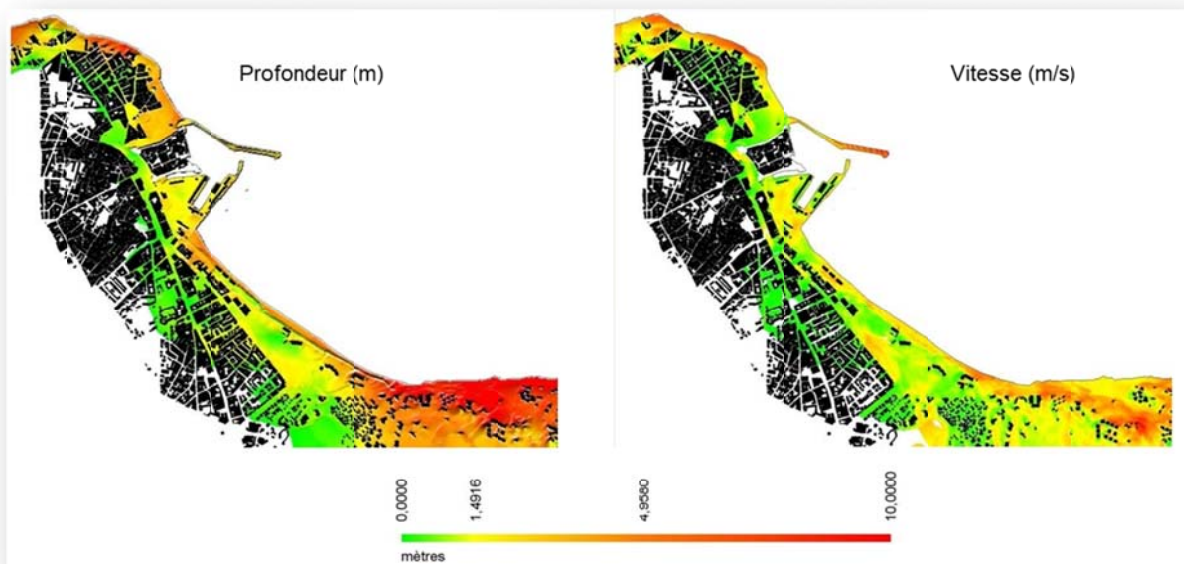


Figure B15 : Hauteurs (épaisseurs) et vitesses d'inondation maximales sur El Jadida. Modélisation locale sur MNE de 5 m de résolution (1755, source HSF).

La modélisation d'un tsunami généré par un séisme similaire à celui de 1755 (Mw 8.5) a été affinée localement sur la ville d'El Jadida en considérant un trait de côte et une bathymétrie proches des conditions de 1755. Elle donne des hauteurs maximales proches de 6 m (figure B16). Ces résultats permettent d'écarter définitivement une hauteur de vague de 75 pieds (soit 24,36 m) à El Jadida (anciennement Mazagan), rapportée par Soyris (1755) dans une lettre datée du 5 novembre. Ces hauteurs de vagues prédites restent cependant largement supérieures aux estimations de Blanc (2009).

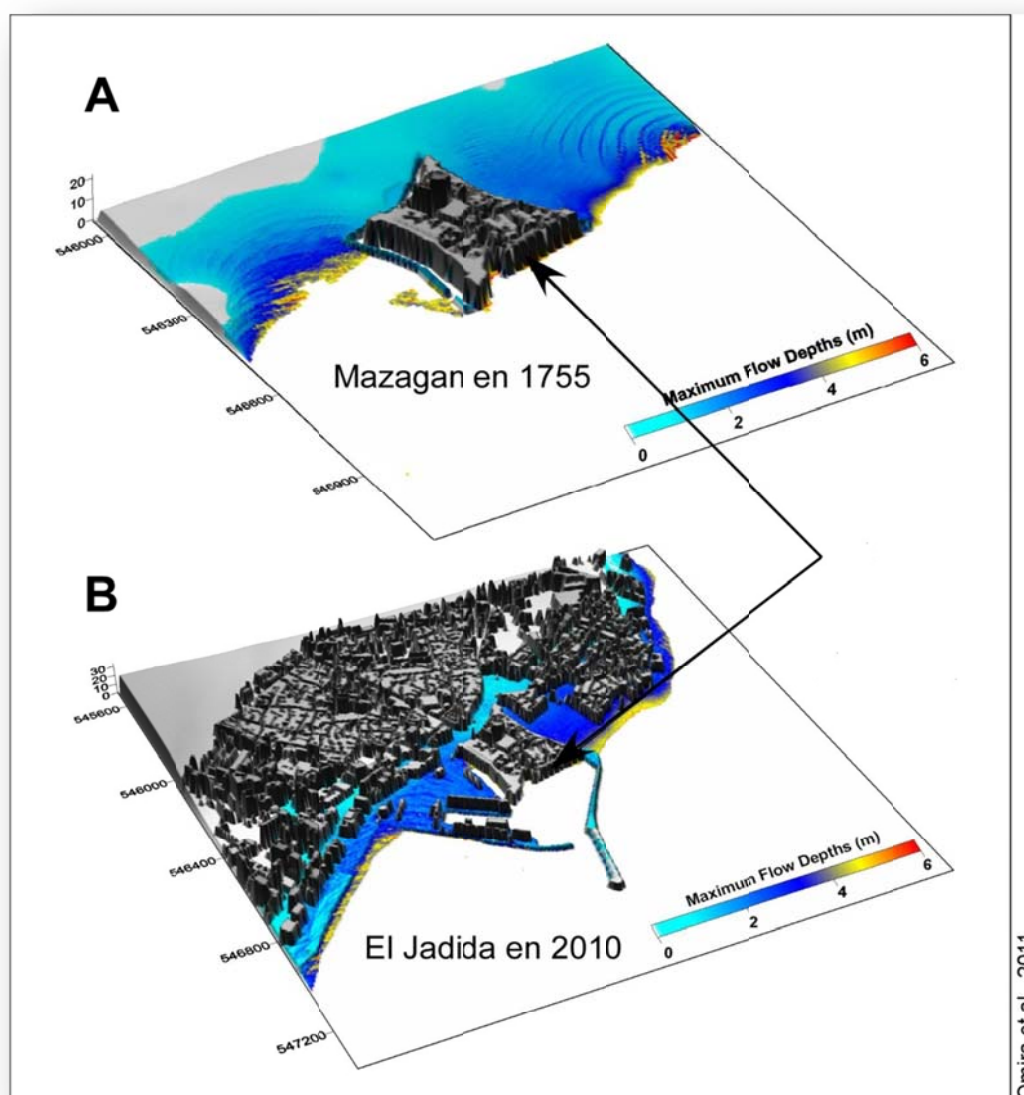


Figure B16 : Modélisation des épaisseurs d'eau maximales sur la ville de Mazagan (1755) et d'El Jadida (2010).

C EXPOSITION TERRITORIALE AU RISQUE TSUNAMI A L'ECHELLE REGIONALE

C.1 LES PRINCIPAUX ENJEUX DE LA FAÇADE ATLANTIQUE MAROCAINE

C.1.1.1 Présentation

En quelques décennies le Maroc est passé d'une société à dominante rurale, à une société à dominante urbaine. Durant la même période le pays a connu une autre mutation majeure : d'un Maroc structuré autour des villes de l'intérieur comme Fès, Mekhnès et Marrakech, on est passé à un Maroc tourné vers le littoral atlantique et méditerranéen. Progressivement le littoral est devenu le cadre de vie, le lieu d'ancrage et d'implantation de l'essentiel des foyers humains et des diverses activités économiques et de loisirs. Ce littoral est l'une des grandes richesses du pays. Riche en paysages et en sites naturels, il recèle également un potentiel économique considérable pour le développement.

Des disparités importantes caractérisent cet espace littoral. Le **littoral méditerranéen** est généralement pauvre, peu désenclavé, isolé du reste du pays par les reliefs imposants de la chaîne montagneuse du Rif. Le développement industriel et touristique y reste très limité. Le tourisme ne mobilise que la population locale. Sur le littoral méditerranéen, la pression démographique est de 93 habitants/km².

Le littoral **atlantique** joue le rôle de pôle structurant de l'économie nationale, compte tenu de son poids démographique, économique et de sa fonction dans l'organisation de l'espace national. Cette concentration représente :

- 62% de la population urbaine des grandes villes ;
- 80% des effectifs permanents des industries ;
- 67% de la valeur ajoutée ;
- 53% de la capacité touristique ;
- 92% du commerce extérieur.

C.1.1.2 Enjeux urbains

C'est la conséquence directe de la démographie galopante que connaît le pays (**figure C1**). En effet, le Maroc qui comptait près de 9 millions d'habitants en 1950, en abrite aujourd'hui plus de 30 millions. Pendant ce temps, la pression sur le littoral n'a cessé d'augmenter : côté Atlantique, une littoralisation passant d'un peu moins de 20% en 1936 à 54% de la population totale en 2000. Son taux d'accroissement est estimé à 5 %. Les deux wilayas de Casablanca et Rabat concentrent à elles seules 62 % de cette population littorale. On y retrouve les plus grandes villes du pays : Casablanca, Rabat-Salé, Tanger, Larache, Kénitra, Mohammedia, Safi, Agadir, Laâyoune. Ces

agglomérations côtières sont en pleine expansion et assurent l'essentiel de la croissance urbaine. On assiste au développement de grands quartiers périphériques ou de petits centres urbains autour de ces grandes métropoles côtières. C'est le cas de Rabat avec Témara et Skhirate, de Salé avec Kariat Oulad Moussa, Sidi Moussa et Bouknadel, de Casablanca avec Lahraouine, Tit Mellil, Médiouna, Bouskoura, d'Agadir avec Biougra, Inzegane et Ait Melloul. Cette urbanisation accélérée a évidemment des conséquences sur l'urbanisme : développement de l'habitat insalubre et particulièrement des bidonvilles. Plus de 50% des bidonvilles sont concentrés sur l'axe « Kénitra- Safi ». A elle seule, la métropole casablancaise réunit le tiers des foyers d'habitat insalubre du Royaume. En tout, ce sont près de 75000 ménages casablancais qui vivent au milieu de tas de tôles sans les moindres conditions de vie décentes.

Cette urbanisation est marquée par un autre phénomène : c'est le poids particulier de l'axe Kénitra – El Jadida qui à lui seul concentre plus de la moitié de la population urbaine des zones côtières. La densité moyenne est de 169 habitants/km² entre Kénitra et le Grand Casablanca. Enfin la zone côtière est caractérisée par les densités les plus fortes en milieu rural : sur une profondeur de 10 à 20 km, entre Tanger et Safi, les densités vont de 100 à 400 habitants au km².

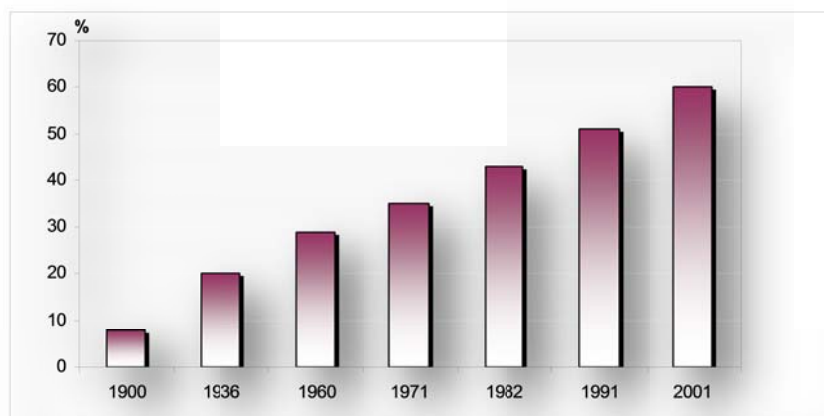


Figure C1 : Evolution du taux d'urbanisation des zones côtières marocaines entre 1900 et 2004 (source MATEE/DE/CL, 2005).

C.1.1.3 Enjeux industriels

Le littoral marocain est le lieu d'implantation de la plupart des unités industrielles avec plus de 90% des industries situées à proximité des zones côtières. Le tissu industriel a du mal à se diffuser dans les villes de l'intérieur. Le littoral atlantique centralise les principales activités industrielles : textile, chimie, industrie mécanique et électrique. Il est le lieu d'implantation de près 77 % des unités industrielles surtout le long de l'axe Safi- Kénitra (60% des unités industrielles, près de 70% de l'emploi industriel et 80 % des investissements industriels du Maroc). Ces unités sont souvent localisées soit dans

l'enceinte du port, soit à proximité. C'est le cas notamment à Casablanca, Mohammedia, El Jadida, Safi et Kénitra. Sur cet axe, Casablanca occupe une place centrale. Si l'on considère le Grand Casablanca, c'est-à-dire l'ensemble Casablanca-Mohammedia et leurs centres périphériques immédiats, le poids industriel de cette agglomération se renforce puisqu'il regroupe près de 62% des effectifs industriels permanents. Dans cette métropole la production industrielle est très diversifiée : le tissu productif, qui compte près de 3000 unités, assure plus des deux tiers des produits chimiques et mécaniques, et plus de la moitié de l'industrie textile et de la production agroalimentaire. Dans ce domaine le leadership de Casablanca est incontestable : la métropole économique représente non seulement un lieu d'implantation de l'appareil de production le plus complexe et le plus diversifié, mais aussi le plus important centre financier et le plus important marché de consommation du pays. La capitale économique assure ainsi la fonction de plaque tournante du pays pour le drainage et la diffusion des produits industriels finis ou semi finis. Elle est aussi le lieu de concentration des institutions financières et de localisation des sièges sociaux de la plupart des grandes entreprises et des grandes banques nationales ou étrangères.

C.1.1.4 Enjeux touristiques

L'élévation du tourisme au rang de secteur économique prioritaire, et les diverses mutations des comportements socio-économiques au cours de ces deux dernières décennies, se sont traduites par un déferlement de la demande nationale sur le produit balnéaire, entraînant la prolifération des campings sous équipés et la multiplication des projets de promotion touristique et immobilière, notamment dans les espaces localisés à la périphérie des grandes agglomérations littorales. L'axe littoral atlantique occupe une place centrale dans les activités touristiques. Trois centres importants polarisent la demande interne et internationale : le pôle d'Agadir et sa région, le pôle El Jadida-Casablanca-Mohammedia et le pôle Rabat-Témara Skhira-Bouznika. Dans ces régions, les projets touristiques et les projets de résidences secondaires se multiplient à une cadence accélérée. L'importance prise par le littoral atlantique dans la géographie touristique coïncide avec la régression du poids du littoral méditerranéen, amorcée dès la fin des années 60. Il intervient ainsi pour plus de 50% dans les capacités d'accueil (toutes catégories confondues). Ainsi, et conscients des nombreux atouts dont dispose le Royaume (proximité de l'Europe, richesses naturelle, culturelle et historique, art culinaire, hospitalité des populations, ...), le Gouvernement et le secteur privé ont mis en place en 2001 une nouvelle politique touristique ambitieuse et volontariste, dénommée «Vision 2010». Cette stratégie ambitionne de faire du Maroc l'une des principales destinations touristiques mondiales et une puissance majeure à l'horizon 2010 afin de pouvoir accueillir 10 millions de touristes. En effet, la détermination affichée est celle de transformer le secteur du tourisme en une véritable industrie. Les 3 principaux programmes élaborés dans le cadre de la Vision 2010 augmenteront la capacité de 160 000 lits hôteliers :

- Le Plan Azur prévoit la création de 6 stations touristiques intégrées (+ 85 000 lits hôteliers) ;
- La correction et l'extension des destinations traditionnelles concernent Agadir, Tanger et Tétouan (+ 45 000 lits) ainsi que Fès et Ouarzazate / Zagora (+ 30 000 lits) ;
- Le développement du tourisme de niche et du tourisme rural favorisera un équilibre régional et permettra un enrichissement du produit « tourisme ».

Le Plan Azur

Parmi les stations projetées par le Plan Azur, cinq sont situées sur le littoral atlantique (figure C2). Il s'agit de Port Lixus près de Larache, à Khmis Sahel, de Mazagan près d'El Jadida, à El Haouzia, de Mogador à Essaouira, de Taghazout entre Agadir et le Cap Guir, et de Plage Blanche au Sud de Guelmim. La station Saïdia-Mediterranea est située sur la côte méditerranéenne, à proximité de la frontière algérienne.

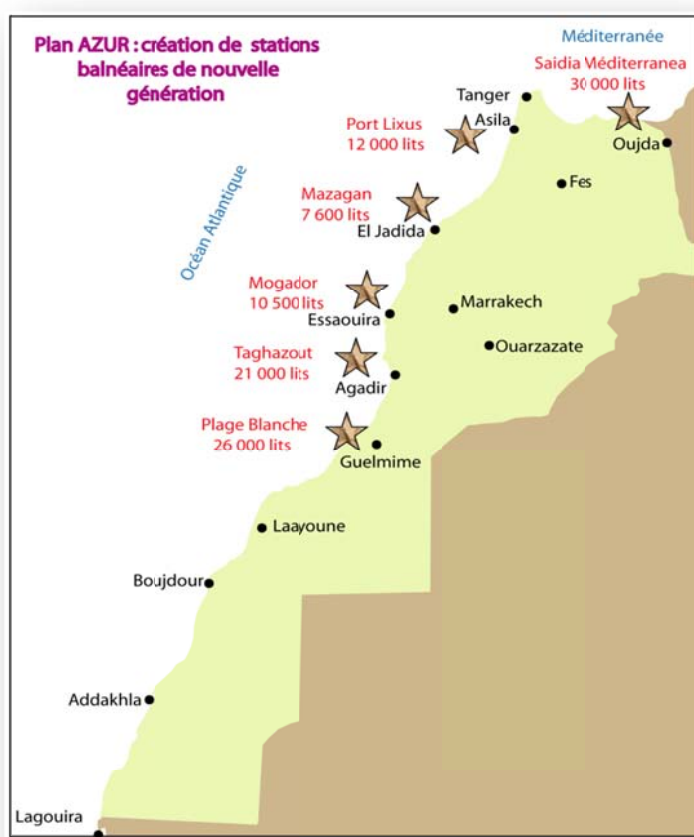


Figure C2 : Localisation et caractéristiques des différentes stations balnéaires du plan Azur (source DAT, Maroc).

Le projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg

Il s'agit de l'une des plus importantes opérations d'aménagement du territoire au Maroc (figure C3). C'est un projet structurant qui va transformer les deux bords du fleuve en pôle touristique et urbain et réconcilier aussi bien le site avec sa rivière, son environnement et son histoire, que les deux villes ancestrales voisines, Rabat et Salé, qui se tournaient le dos. Élément d'union entre deux villes historiques, le projet d'aménagement de la vallée de Bouregreg, qui s'étend sur une superficie de 6000 ha, allant de l'embouchure au barrage de Sidi Mohammed Ben Abdallah. Il est réparti en six séquences : « Bab Al Bahr », en amont du pont Mohammed V, « Amwaj » qui s'étend du pont Moulay Hassan au pont ONCF, « Kasabat Abi Raqraq », entre le pont ONCF et l'autoroute, « Sahrij Al Oued », qui va de l'amont du pont Mohammed V à la rocade, « El Menzah Al Kabir », le plateau qui domine la vallée de Bouregreg au Sud et « Bouhayrat As Souhoul », la partie de la vallée qui donne sur le lac du barrage Sidi Mohamed Ben Abdallah.



Figure C3 : Vue de la nouvelle marina dans l'estuaire du Bouregreg (F. Leone, 2012).

C.1.1.5 Enjeux hydrologiques et agricoles

Le littoral atlantique recèle des ressources en eau très importantes. Il est le point d'aboutissement des principaux cours d'eau du pays, dont deux grands fleuves pérennes : le Sebou et l'Oum Rbaia. Les autres principaux cours d'eau sont le Loukkos, le Bouregreg, le Tensift et le Souss. D'autres oueds atlantiques (Massa, Draa), beaucoup moins importants, sont assez souvent fermés à leurs embouchures par des bouchons sableux dus à l'action hydrodynamique de l'océan. A eux seuls, les trois grands fleuves

que sont le Sebou, le Bouregreg et l'Oum Rabia totalisent le tiers de l'ensemble du potentiel hydrologique du pays. Cette relative abondance des domaines hydrauliques a permis la formation, tout le long de ce littoral, de plusieurs périmètres irrigués et le développement de la petite et moyenne irrigation. Ainsi, entre Tanger et Kénitra, la disponibilité en eau, jointe à la douceur du climat ont permis le développement du grand périmètre irrigué du Gharb qui s'étend sur plus de 90 000 ha et celui du Loukkos qui couvre 40 000 ha environ. Au centre, entre Kénitra et El Jadida, la fertilité des sols, le relief plat et la disponibilité de l'eau ont favorisé l'essor de la production agricole et sa diversification dans le périmètre irrigué de Doukkala et dans la Chaouia. Au Sud, autour d'Agadir, la présence de sols riches ayant une capacité élevée de rétention en eau, a favorisé le développement d'un important périmètre irrigué dans la plaine du Souss. A côté de ces grands périmètres agricoles, on retrouve au niveau du littoral atlantique, des zones dites Oulja : il s'agit de bandes étroites constituées de terres sablonneuses, qui bénéficient de la douceur de l'air et des réserves d'eau souterraines des sillons interdunaires et sur lesquelles s'est développée une agriculture de haute rentabilité destinée aux grands centres urbains côtiers. Les plaines littorales de la façade atlantique, grâce à la douceur de leur climat et à la relative abondance des précipitations sont ainsi devenues le principal grenier du Maroc moderne.

C.1.1.6 Grands enjeux infrastructurels

Le réseau **autoroutier** marocain a une longueur de 818 km (au 28 juillet 2007). La cadence de réalisation du réseau autoroutier qui a prévalu jusqu'à aujourd'hui était de 50 km/an. La nécessité de mise à niveau des infrastructures a imposé d'améliorer cette cadence, la faisant passer à 150 km/an, ce qui permettra de disposer d'un réseau autoroutier de 1500 km en 2010. L'autoroute Casablanca - Rabat a été la première à être mise en place. Elle est également l'autoroute payante la plus fréquentée d'Afrique avec un trafic de 34 094 véhicules/jour.

Le réseau **ferroviaire** marocain est de 1900 km dont 370 km à voie double. 53% du linéaire est électrifié et 900 km sont exploités en traction diesel. Il s'organise sous la forme d'un couloir reliant Marrakech au centre et Oujda à l'Est, avec des antennes desservant le port de Tanger au détroit, et les ports de Safi et Jorf-Lasfar sur l'Atlantique.

Le **port de Casablanca** est le principal port de commerce du Maroc. Il constitue avec Mohammedia, le premier complexe portuaire marocain, ces deux ports traitant ensemble plus de 50% du trafic portuaire national. Il s'étend sur 605 ha et possède 7500 mètres linéaires de quais. A son extrémité Sud se situent la Marine Royale et le port de plaisance, le port de pêche et le chantier de réparation navale. Puis se succèdent, d'Ouest en Est, 5 terminaux.

Le **port de Jorf Lasfar** constitue l'un des maillons essentiels de l'infrastructure portuaire du Maroc. Il est situé à 17 km au sud de la ville d'El Jadida, à 110 Km au sud-

ouest de Casablanca et à 130 km au nord-est de Safi. Le port de Jorf Lasfar est à vocation minéralière, céréalière et de commerciale. Il dispose des capacités nautiques lui permettant d'accueillir des navires de port en lourd de 120 000 tonnes. Traitant actuellement près de 12 millions de tonnes, le port de Jorf Lasfar est conçu pour répondre à un trafic maritime de plus de 25 millions de tonnes grâce à ses infrastructures, à son outillage et au développement de complexes phosphatiers et thermique et d'une zone industrielle.

Le **port de Mohammedia** distant de 23 km du Port de Casablanca est situé au centre de l'axe Kénitra- El Jadida. Il est le premier port pétrolier du Maroc. Il est composé d'un ancien bassin destiné à tous les vracs liquides autres que les hydrocarbures (huiles, mélasses...). C'est également un port de pêche et de plaisance, un terminal pétrolier équipé de deux postes d'une profondeur de 18 mètres lui permettant de recevoir des grands pétroliers et des gaziers. Le trafic annuel d'hydrocarbures y avoisine les 10 MT soit 95% des besoins du pays en produits pétroliers. La plus grande raffinerie du Maroc, la Samir, est située à proximité et est approvisionnée à partir du terminal pétrolier par un réseau de 20 km de pipelines.

Le **port de Safi** est situé au Nord-Ouest de la ville, sur une superficie d'environ 42 ha. Ce port occupe la seconde place après celui de Jorf Lasfar en matière d'exportation des minerais. Il joue un rôle primordial dans le développement économique et social de la région de Doukkala-Abda. Il assure l'emploi de 10 939 marins actifs.

Le **port d'Agadir** est le plus important dans la région du sud. Grâce à ses infrastructures modernes, le port contribue pleinement à l'essor économique de la région du Sous Massa Draa qui est portée essentiellement sur l'agriculture, la pêche et le tourisme. Il est le premier port du Maroc de pêche en haute mer et le premier port de sardines du monde. Le poisson peut être traité directement à la sortie des bateaux grâce à des usines de conservation et de congélation.

Le **port de Kénitra** est l'unique port fluvial du pays. Sa création répondait d'abord à un besoin militaire, mais aussi économique. Depuis sa création, il a joué pleinement son rôle de pôle d'attraction et de développement local et régional. De fait toute l'infrastructure économique et urbaine de la ville s'est fondée principalement sur ce port fluvial.

C.2 LES BASES DE DONNEES SUR L'OCCUPATION DU SOL ET LA POPULATION

La construction d'indicateurs d'exposition au risque de tsunami passe par l'intégration de données sur les principaux enjeux territoriaux. Ces données doivent être géoréférencées avec précision et validées. L'objectif de notre travail étant de valoriser les données SIG existantes, nous avons exploité deux sources d'informations géographiques d'échelle régionale :

- La base MEDGEOBASE de l'ONEM (Observatoire National de l'Environnement Marocain, 1997) sur l'occupation du sol en zone littorale ;
- La base mondiale LandScan de l'ORNL (Oak Ridge National Laboratory, 2008) à partir de laquelle nous avons pu extraire la population littorale (<http://www.ornl.gov/sci/landscan>).

Ces deux bases sont géoréférencées, gratuites et ont été validées par les organismes producteurs. La base MEDGEOBASE a été obtenue au moyen d'une convention d'échange de données, tandis que la base Landscan a été obtenue après déclaration d'usage non commercial.

C.2.1 LA BASE MEDGEOBASE/MAROC SUR L'OCCUPATION DU SOL

Pour mieux gérer l'utilisation du sol dans ses différentes composantes, le Département de l'Environnement marocain a décidé de créer, en collaboration avec l'Union Européenne et la Banque Mondiale, une base de données informatisée sur l'occupation du sol. Ce projet a débuté en janvier 1994 et pris fin début 1997. Il s'étend sur une superficie de 91 700 km² de la frontière Algérienne à l'Est jusqu'à Agadir au Sud, sur une bande littorale de 60 km de large. Cette base a été produite à l'échelle du 1/100 000, par photo interprétation d'images satellites Landsat et Spot, couplée à diverses données d'appui (cartes topographiques, photos aériennes et cartes thématiques,...). Elle identifie et délimite les zones homogènes d'occupation des terres dont la superficie est égale ou supérieure à 25 hectares (source ONEM, 1997).

L'identification de ces zones repose sur une nomenclature standardisée et hiérarchisée à 4 niveaux, comportant 64 types d'occupation du sol (proches de ceux définis dans la base européenne Corine Land Cover). L'objectif était de fournir un outil d'inventaires détaillés et susceptibles de mises à jour régulières, permettant de définir les zones particulièrement fragiles à protéger ou celles éventuellement aménageables. Cependant, à ce jour aucune version plus récente de BD n'a été produite.

Pour les besoins de notre travail, nous avons simplifié la nomenclature existante par regroupement de certaines typologies d'occupation du sol en neuf classes, dont sept qui ont été retenues comme enjeux de référence (figure C4). Il s'agit des zones urbanisées des zones industrialisées et commerciales, des zones portuaires, des terres arables, des forêts, des milieux naturels ou semi naturels et des surfaces en eau. La classe des réseaux de communication a été écartée car trop imprécise.

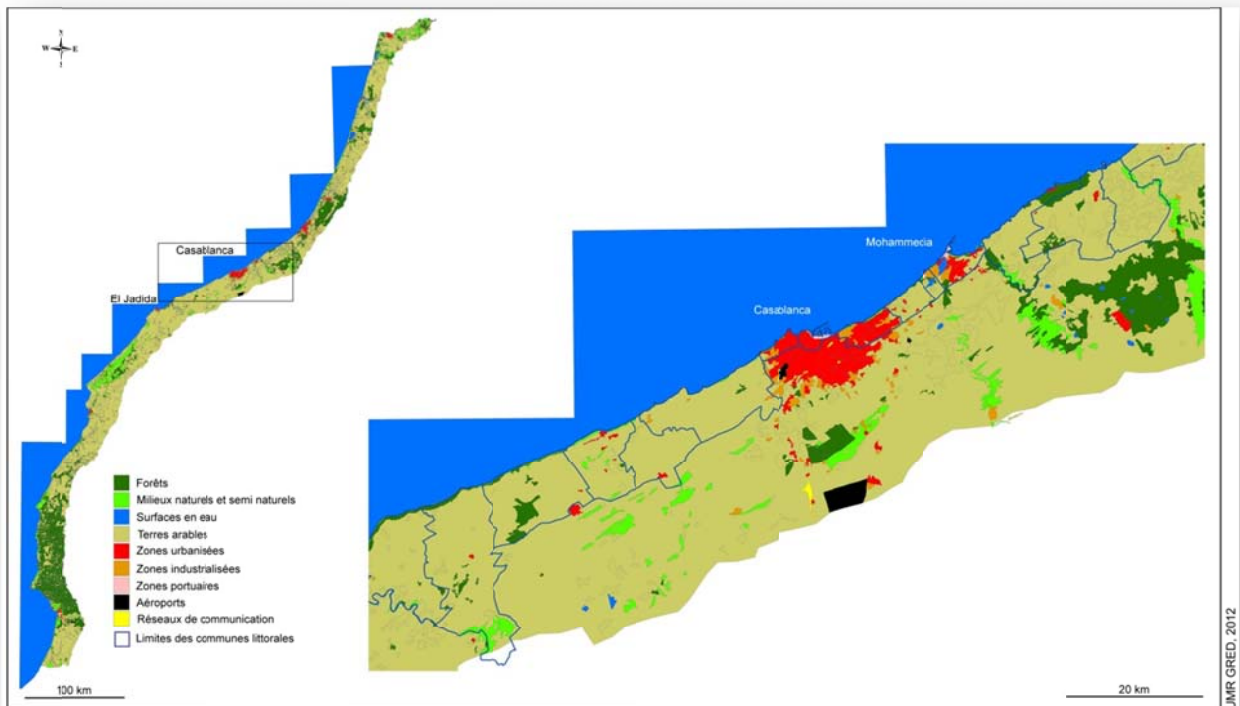


Figure C4 : Extraits de la base de données MEDGEOBASE/Maroc sur le littoral atlantique (typologie simplifiée de l'occupation du sol selon 9 classes).

C.2.2 LA BASE LANDSCAN 2008

Les données sur la population proviennent de la base internationale LandScan 2008 de l'Oak Ridge National Laboratory (ORNL, 2008). Les effectifs de population y sont agrégés sur des mailles de 1 km², ce qui autorise une grande précision dans l'affichage des enjeux humains (figure C5). Cette base démographique a été validée dans le cadre de travaux précédents, qui portaient sur la méditerranée occidentale (Arc latin et région Languedoc-Roussillon), par confrontation spatiale et quantitative avec les données statistiques officielles de divers services statistiques nationaux. Les écarts de valeur étaient inférieurs à 5 % et l'implantation spatiale de très bonne qualité. Les différences les plus significatives concernaient essentiellement les grosses agglomérations (Leone, 2011). Au Maroc, sur l'ensemble des 67 communes littorales étudiées, l'écart relatif de population entre le RGP (2004) et la BD Landscan (2008) est proche de +18 %. Une telle différence s'explique principalement par l'imprécision du découpage communal marocain qui peut varier d'une source à l'autre, voire d'un recensement à l'autre. Elle peut s'expliquer aussi par la forte croissance démographique que connaît le Maroc, en particulier sur sa façade maritime.

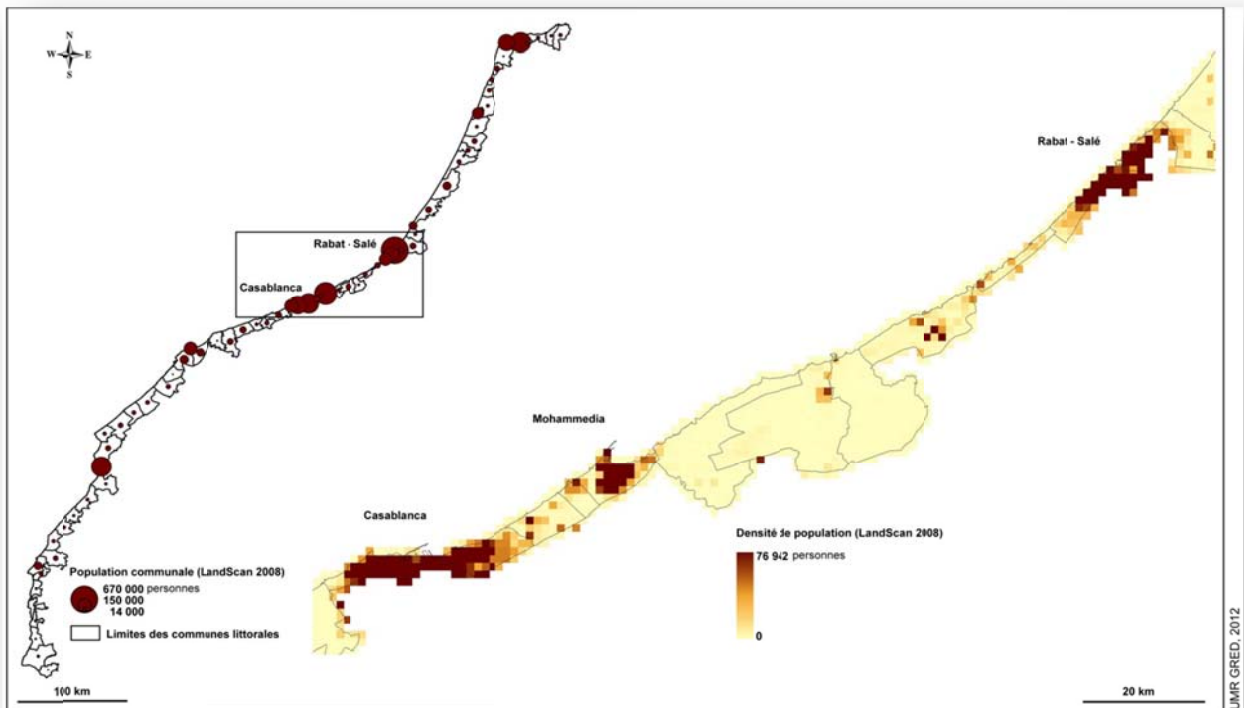


Figure C5 : Extraits de la base de données Landscan 2008 sur le littoral atlantique du Maroc (population).

C.3 GEO-INDICATEURS D'EXPOSITION AUX TSUNAMIS

C.3.1 CHOIX D'UN MAILLAGE TERRITORIAL DE REFERENCE

La cartographie de l'exposition territoriale aux tsunamis impose un maillage territorial de référence sur lequel sont agrégés les différents indicateurs issus des requêtes spatiales entre objets du SIG. Ce maillage doit présenter le meilleur compromis entre l'information disponible, la précision exigée et les besoins cartographiques pour communiquer et partager les résultats. Dans le cas présent, les indicateurs sont définis à deux échelles territoriales : la commune littorale et une maille géographique uniforme de 5 km de côté.

Le fond de carte des communes a été obtenu auprès de la direction de l'aménagement du territoire du Maroc (DAT). Il a été retravaillé sur la limite littorale par photo-interprétation de 1310 km de côte à partir d'images satellites de haute résolution. Ce nouveau référentiel concerne 67 communes qui s'étendent de Taghazout au Sud à Taghramt au Nord.

C.3.2 DES EXPOSITIONS CENTREES SUR L'AXE URBAIN MEDIO-ATLANTIQUE

Les indicateurs d'exposition à la submersion par tsunami ont été exprimés en valeur absolue et/ou relative. Une sélection des résultats cartographiques pour trois familles d'enjeux majeurs (population, zones urbanisées, zones industrialisées) permet d'analyser la variabilité spatiale de l'exposition à l'échelle du littoral atlantique marocain (figures C6, C7 et C8). Sur l'ensemble des communes retenues, ce sont près de 1 434 700 personnes qui sont exposées dont 200 000 personnes qui le sont fortement, à des hauteurs d'eau comprises entre 8 et 9 m. Ces enjeux humains sont particulièrement importants sur la métropole casablancaise dont 5 communes sont citées dans le TOP 10 de cet indicateur. En valeur relative (% de la population communale), les communes les plus exposées sont plus dispersées, mais appartiennent majoritairement à la conurbation littorale Rabat-El Jadida, excepté Boukhalef et Assilah plus au Nord. Les enjeux urbains sont le reflet de cette exposition humaine avec une concentration des communes les plus exposées sur ce même corridor urbain littoral médio-atlantique (Troin, 2002). C'est la commune d'Ain Sebaa qui présente le plus fort taux d'exposition urbaine en valeur relative (70,7%). Cette disposition se distingue encore mieux sur la carte en carroyage. Au total, ce sont près de 21,46 km² de surfaces urbanisées qui sont exposés sur la portion littorale étudiée. Les zones industrielles, très présentes sur le littoral atlantique marocain, ne sont pas épargnées (6,13 km² exposés). Les sites les plus exposés sont également à Casablanca, suivis de ceux de Safi et El Jadida au Sud et de Boukhalef au Nord. En lien avec ces sites, toutes les infrastructures portuaires sont menacées malgré les ouvrages de défense côtière présents et dont les digues de protection restent inférieures aux hauteurs de vague modélisées.

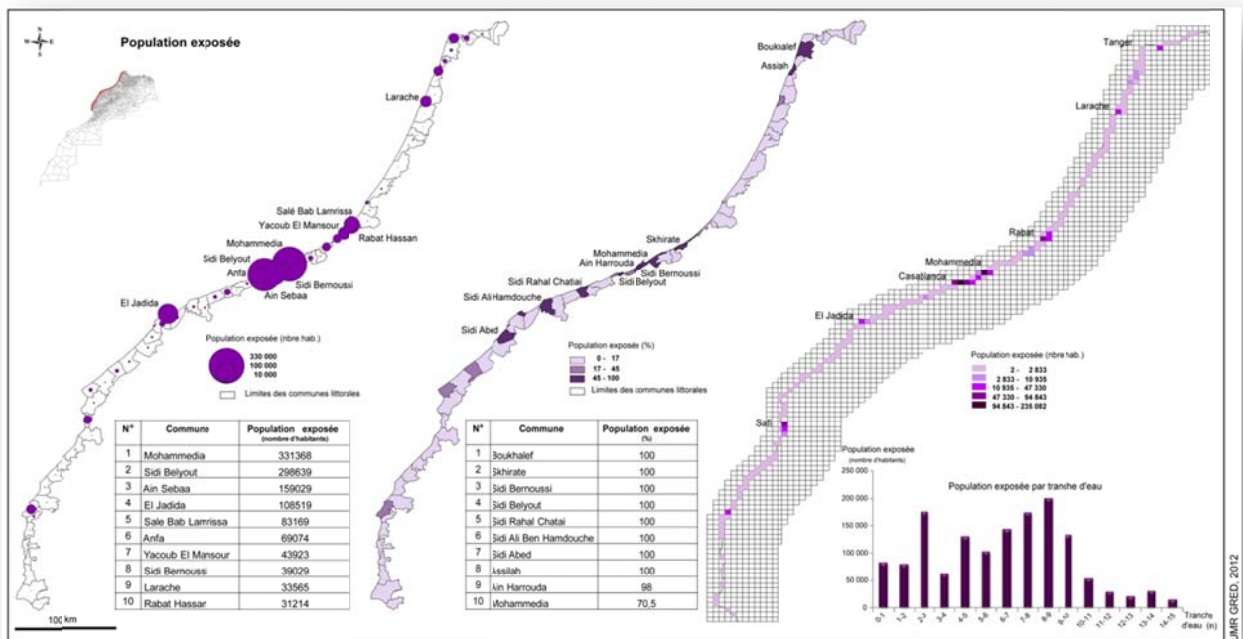


Figure C6 : Indicateurs d'exposition humaine à la submersion marine par tsunami (scénario type 1755, source HSF).

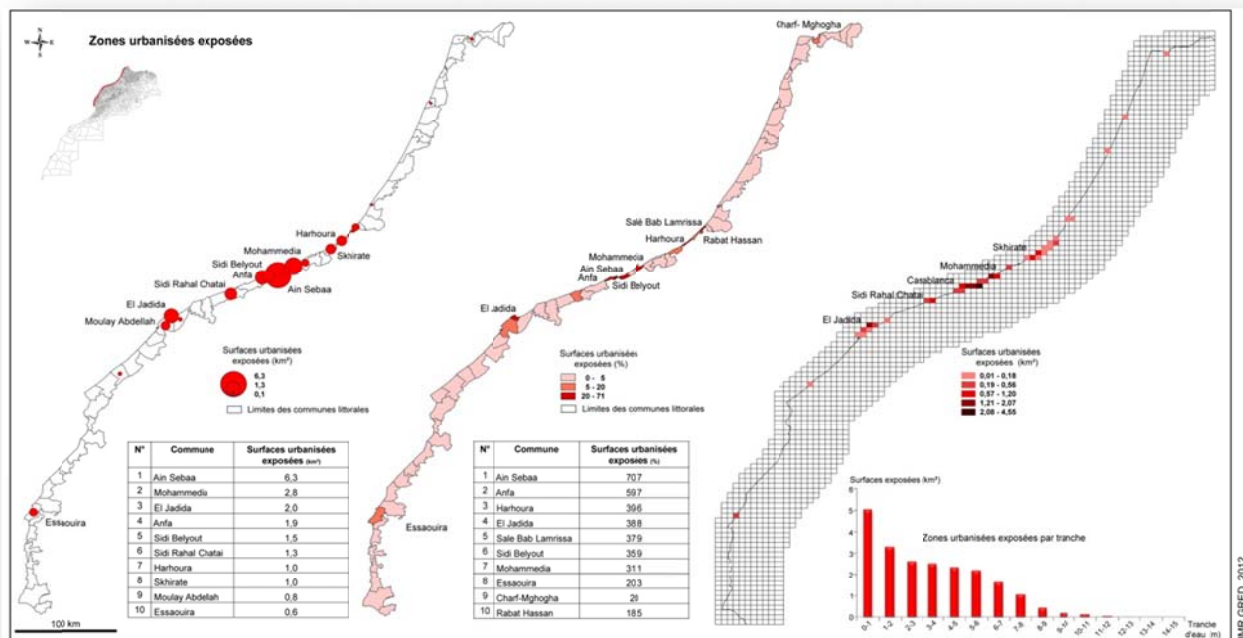


Figure C7 : Indicateurs d'exposition urbaine à la submersion marine par tsunami (scénario type 1755, source HSF).

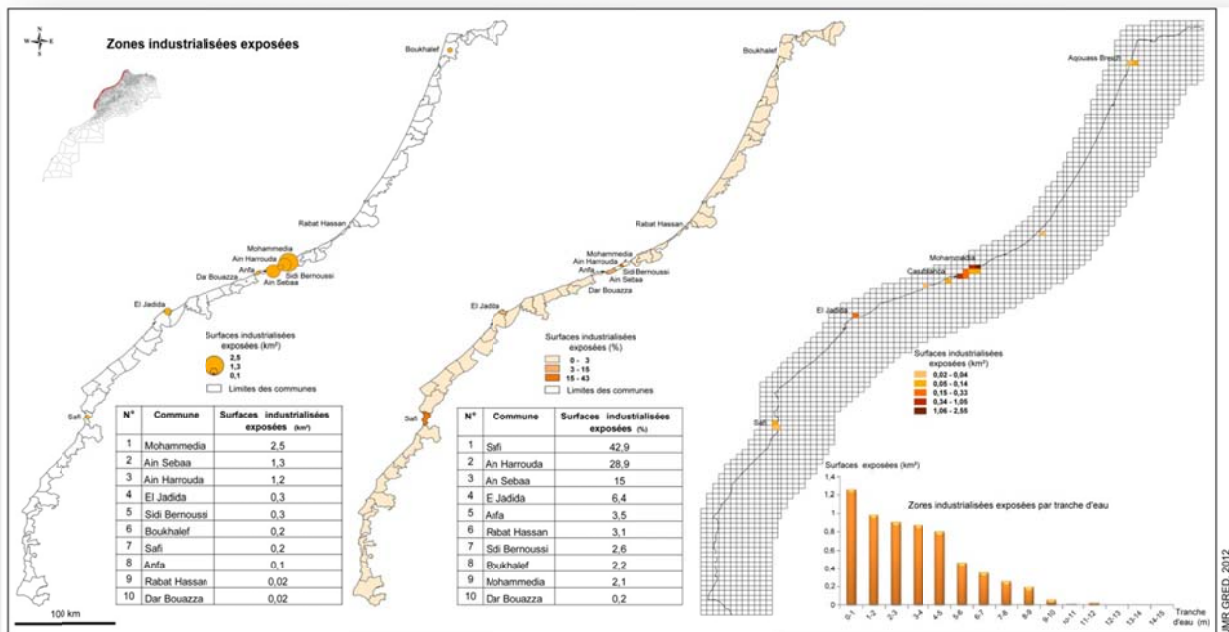


Figure C8 : Indicateurs d'exposition industrielle à la submersion marine par tsunami (scénario type 1755, source HSF).

En conclusion, c'est l'axe urbain médio-atlantique qui présente la plus forte exposition territoriale en valeur absolue. Cette situation est logiquement liée à l'importance des enjeux présents mais également à une forte emprise spatiale de la submersion qui peut atteindre localement plus de 2 km. Les communes de Mohammedia et Ain Sebaa sont d'ailleurs les plus citées dans le Top 10 des neuf indicateurs produits dans notre étude. Cette approche régionale de l'aléa a permis de renseigner le risque à l'échelle régionale en intégrant quelques bases de données sur les principaux enjeux pour produire un premier jeu d'indicateurs. Ces indicateurs permettent une lecture géographique et quantitative du risque utile pour sensibiliser les autorités au sein d'un pays en plein essor urbain, en particulier sur son littoral. Ce travail est basé sur un scénario extrême, déterministe et à faible probabilité, mais qui a le mérite de reproduire un événement historique connu et donc mieux perçu. Les indicateurs produits sont largement perfectibles et devront être réactualisés périodiquement en fonction de l'évolution des bases de données disponibles sur l'occupation du littoral. A ce titre nous encourageons les autorités marocaines à mettre à jour le référentiel trait de côte produit pour cette étude ainsi que la base SIG sur l'occupation du littoral. C'est dans ces conditions que ces indicateurs pourront constituer un outil, parmi d'autres, de suivi de la gestion intégrée des zones côtières comparable à ce qui s'est mis en place en France à l'initiative du Conservatoire du littoral.

C.4 PRESENTATION DE LA VILLE D'EL JADIDA : CONTEXTE HISTORIQUE ET GEOGRAPHIQUE

C.4.1 LES FONDATIONS HISTORIQUES DE LA VILLE D'EL JADIDA

Dès l'Antiquité, le site d'El Jadida est un lieu d'escale apprécié pour les navires longeant les côtes africaines. Les premiers écrits qui témoignent de l'existence de la ville datent des 12^{ème} et 13^{ème} siècles. Le géographe Chérif Al Idrissi évoque dans un de ses livres, paru à la moitié du 12^{ème} siècle, un port appelé Mazighan. Ces diverses traces écrites confirment l'ancienneté des origines de la ville d'El Jadida. Cependant ce n'est qu'à partir du 16^{ème} siècle que la ville va connaître son réel essor. En 1502, les portugais, partis de Lisbonne, font naufrage dans la baie de Mazagan face à une tour en ruine du nom d'El Brija. Cette tour fut le point de départ de la construction de la citadelle, qui va devenir le symbole de l'occupation portugaise. « *Cette citadelle est isolée de la terre par une large douve, d'où l'on ne peut sortir ou accéder que par trois portes, dont une s'ouvrant sur l'océan* » (Chahid et Lekhiar, 2006) (figure C9). Les portugais dénomment cette forteresse Mazagão³². Tout au long de son édification la ville sera assiégée par les tribus environnantes et ses habitants trouveront refuge dans l'enceinte de la citadelle durant plus de 250 ans. En 1769, les troupes du sultan sidi Mohamed Ben Abdallah envahissent la forteresse de toute part. La garnison portugaise est précipitamment chassée de la citadelle et s'enfuit par la porte de la mer, en brûlant tous ses biens. Certains auteurs précisent que cette bataille aurait causé la mort de plusieurs centaines de personnes (Vidal, 2005) tandis que d'autres vont jusqu'à dénombrer 5 000 victimes (Chahid et Lekhiar, 2006). Cette attaque marque définitivement la fin de l'occupation portugaise. La ville dénommée alors Madhouma, mot arabe qui signifie en ruine, fut fermée et interdite à tous les habitants jusqu'en 1820.

³² Ce nom serait issu du toponyme berbère, Mazighan, qui signifie : « eau du ciel », terme employé dans la région pour désigner les puits destinés à recueillir les eaux de pluie (Moreira in Vidal, 2005).



Figure C9 : La cité portugaise d'El Jadida (F. Leone, 2008).

C'est à cette date que le sultan Moulay Abderrahmane fit reconstruire le mur d'enceinte de la cité et autorisa une colonie juive à s'y installer. Il nomme alors la ville El Jadida, la nouvelle. Les flux commerciaux avec l'Europe connaissent un nouvel essor. Cette ville « embryonnaire » se développe avec l'arrivée des premiers colons dans les années 1830 (figure C10). Commence alors une période d'échanges maritimes importants, avec l'installation des premiers comptoirs commerciaux ainsi que l'intensification des représentations étrangères. La démographie du centre de la ville passe alors de 200 habitants en 1850 à environ 15 000 habitants au début du XX^e siècle. Ce changement démographique va s'accompagner d'un nouvel encadrement politique, avec le début du protectorat français en 1912. Il s'en suit la mise en place du premier Plan d'Aménagement Urbain qui va donner lieu aux fondements de la ville moderne avec les différents quartiers administratifs et résidentiels actuels. Parallèlement la ville présente un fort attrait touristique. De nombreuses installations balnéaires voient le jour et on la surnomme la « Deauville marocaine ». Entre les années 1920 et 1950 une série d'infrastructures urbaines ainsi que l'aménagement du port permettent à la ville de reprendre un nouvel élan économique.

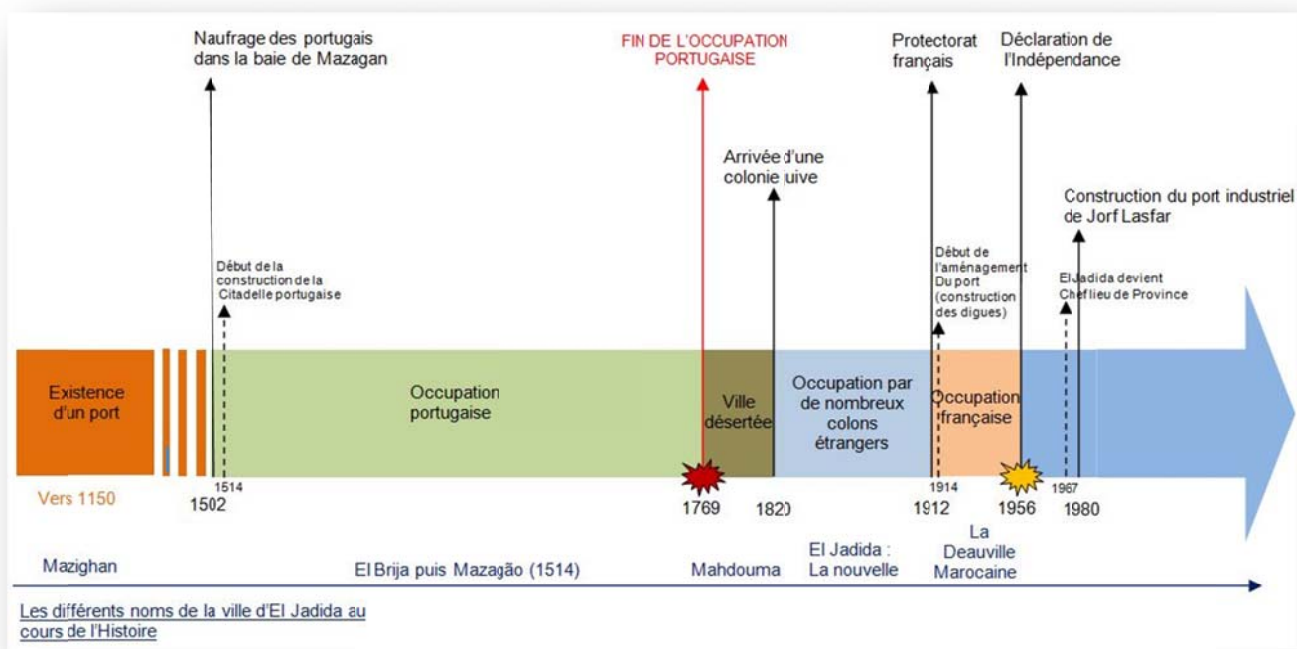


Figure C10 : Frise chronologique des grands évènements historiques de la ville d'El Jadida (sources : Chahid et Lekhiar, 2006 ; Direction Régionale Doukkala-Abda., 2008).

En 1956, l'indépendance est déclarée. Puis, la ville va sombrer dans une léthargie profonde et se contenter uniquement de sa situation de ville balnéaire. « Une sorte d'instinct de conservation qui ne se réveille que le temps d'une saison estivale. El Jadida devait supporter tout au long de ces années de vaches maigres le qualificatif de plage de la ville de Marrakech » (Chahid et Lekhiar, 2006). Durant les années 60, ne s'étant pas adapté aux différentes mutations maritimes, le port d'El Jadida devient un simple port à barcasses. C'est à partir des années 80, que la construction du port de Jorf Lasfar va insuffler un nouveau souffle à la ville jusqu'à nos jours.

Cette chronologie historique permet de mieux comprendre la structure urbaine de la ville. En effet, les différentes civilisations qui ont occupé, plus ou moins brièvement, la ville d'El Jadida ont laissé de nombreuses traces historiques. La présence d'une église, d'une mosquée et d'une synagogue dans l'enceinte de la citadelle reste un témoignage incontestable des différentes cultures qui ont forgé l'identité actuelle de la ville. L'héritage portugais reste donc bien présent au sein de la ville et offre un site touristique classé depuis 2004 au Patrimoine Mondial de l'UNESCO, la cité portugaise.



Encadré 1 : Les aménagements du port d'El Jadida

C.4.2 MAILLAGE TERRITORIAL

Le Maroc est découpé en trois subdivisions administratives ; les régions, les provinces et les communes. La région des Doukkala-Abda est l'une des 16 régions³³ du Maroc. Elle est composée de deux provinces, Safi (Abda) et El Jadida (Doukkala) (figure C11). Ces deux provinces sont subdivisées en 10 communes urbaines et 77 communes rurales (Direction Régionale Doukkala-Abda, 2008). Située au Sud de la plaine centrale, sur la côte atlantique, la région Doukkala-Abda s'étale sur 12 344 km², pour une population de 2,07 millions d'habitants, soit 6,5% de la population nationale (Direction Régionale Doukkala-Abda, 2008 ; MHUAE, 2009).

Cette région présente une large ouverture maritime. Sa frange littorale s'étend sur 350 km de long. Cette zone littorale est marquée par une diversité morphologique importante avec une alternance de côtes sableuses (entre Azemmour et Oualidia) et de côtes rocheuses (Mouabid, 2000 ; Knapik, 2009). Plusieurs entités morphologiques sont présentes : la baie d'El Jadida-Azemmour, la côte rocheuse entre El Jadida et Jorf Lasfar, le complexe lagunaire Oualidia-Sidi Moussa, la succession de grandes falaises continues entre le Cap Beddouza et Safi (Zourarah, 2002 in Knapik, 2009).

³³ Région créée en 1997 suite à la promulgation de la loi n°47-96 relative à l'organisation des régions qui fixe le nombre de celle-ci. (Direction Régionale Doukkala-Abda., 2008).

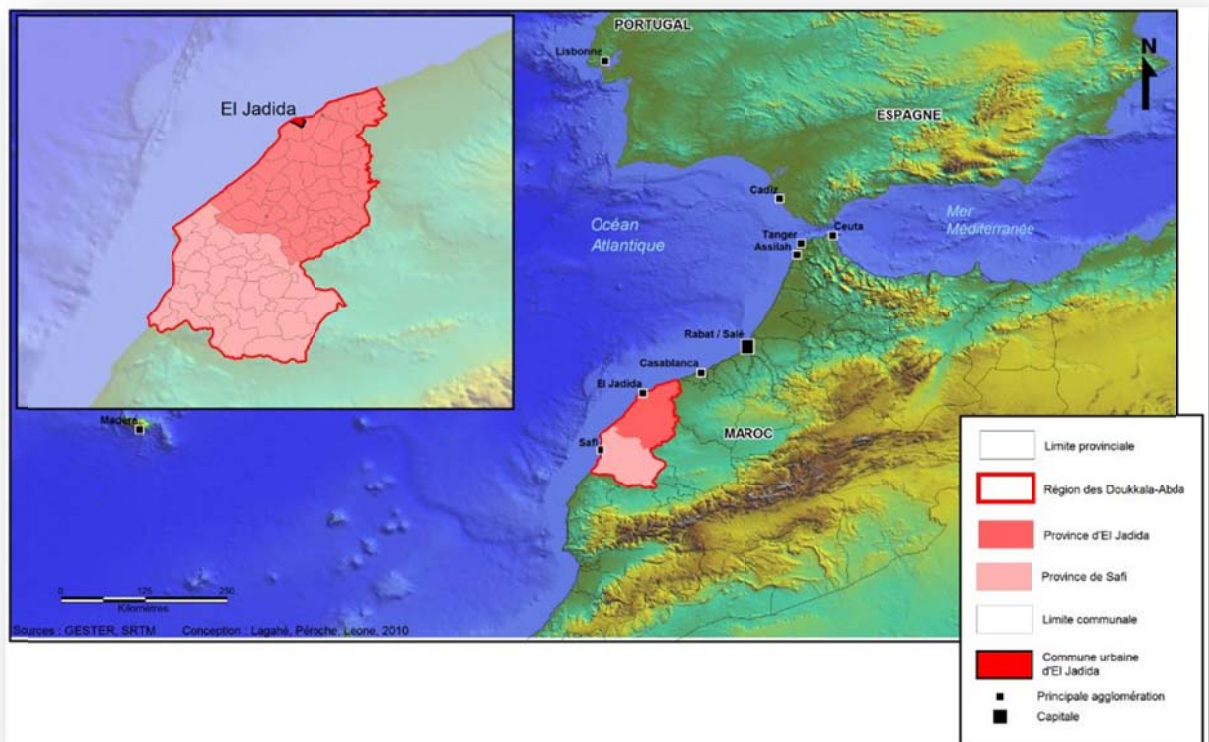


Figure C11 : Découpage administratif de la région des Doukkala-Abda.

Cette ouverture sur l’océan atlantique offre une importante ressource halieutique, moteur de l’une des principales activités économiques de la région : la pêche. Cette région constitue également un ensemble de grande valeur agricole. Les sols fertiles, « Tirs » offrent des potentialités élevées qui ont permis à l’agriculture d’être la principale activité économique et l’atout essentiel pour le développement régional. Le secteur de l’industrie connaît un essor grandissant grâce aux deux pôles industriels de la région, notamment le port de Jorf Lasfar. En ce qui concerne le secteur tertiaire, la région possède de nombreuses plages et de sites de qualité. De ce fait elle connaît un tourisme national balnéaire important. De plus, son artisanat de poterie et de textile la caractérise aussi bien à l’échelle nationale qu’internationale. Enfin, comme autre atout, la région est pourvue d’importantes infrastructures de transports et se situe à proximité de 3 aéroports internationaux.

Cette région possède de nombreuses potentialités qui suscitent de nouveaux intérêts pour le développement de projets économiques de grande envergure comme le pôle industriel de Jorf Lasfar ou la station balnéaire de Mazagan. C’est au sein de cet espace multifonctionnel que la ville d’El Jadida voit son rayonnement s’accroître. Cependant ce rayonnement n’a pas toujours été d’ampleur régionale.

Le 10 juillet 1967 fut créée la Province d'El Jadida, divisée administrativement en 5 Municipalités (El Jadida, Azemmour, Sidi Bennour, Bir Jdid, Zemamra). Elle se caractérise par une forte densité d'habitant 183 hab. / km², contre 42,1 hab. / km² enregistrés au niveau national, avec une population essentiellement rurale dans une proportion de 73 %. La ville d'El Jadida, quant à elle, est promue au rang de chef-lieu de province. Ce nouveau statut offre à la ville la possibilité de s'épanouir, en s'ouvrant vers de nouvelles perspectives de développement comme l'industrie ou les services. Cela a eu pour conséquence la réorganisation et l'extension du tissu urbain ainsi que l'accroissement rapide de la population. Aujourd'hui la commune urbaine d'El Jadida compte près de 156 000 habitants. Toutefois, son développement urbain récent et ses perspectives économiques prometteuses ne s'expliquent pas seulement par l'acquisition d'une fonction administrative. Située sur la frange littorale atlantique à 100 km au sud de Casablanca, El Jadida s'intègre également dans des espaces aux fortes potentialités économiques dont certains peuvent être qualifiés de « région urbaine » (Meunier, 2008) (figure C12). Elle fait partie, de ce que Troin (2002) appelle le « corridor urbain moyen atlantique ». Cet espace prend ainsi la forme d'un corridor de villes fortement reliées par de multiples axes de communication, associés aux forts échanges qui animent cette partie du littoral. La proximité de ces grands centres urbains joue un rôle essentiel dans la base économique de la ville qui repose essentiellement sur un tourisme balnéaire populaire. Cette région urbaine forme donc une véritable « conurbation en devenir » (Meunier, 2008).

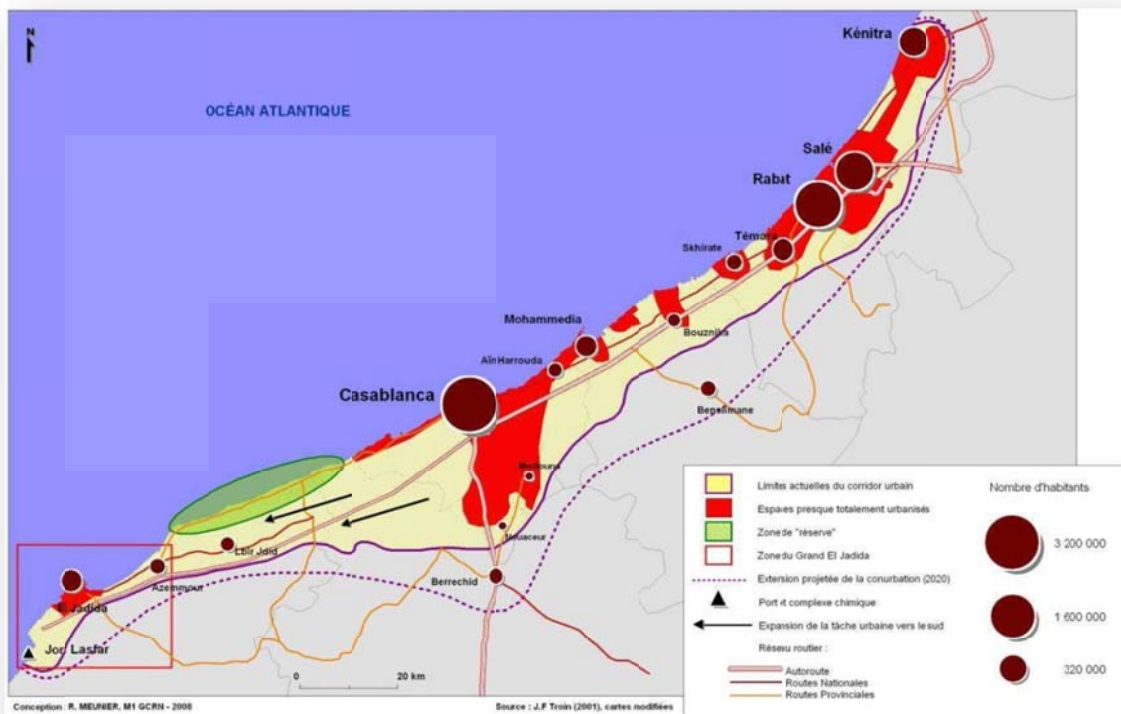


Figure C12: L'insertion du Grand El Jadida dans le corridor urbain moyen atlantique (d'après Troin, 2002).

A une autre échelle la ville d'El Jadida joue un rôle important au sein du grand El Jadida (figure C13). Cette appellation, utilisée depuis le SDAU de 1983, définit une conurbation allant d'Azemmour à Jorf Lasfar, de près de 241 000 personnes (soit 22% de la population provinciale) (MHUAE, 2009). Sur une frange littorale d'environ 35 km, le territoire du Grand El Jadida forme la terminaison sud du corridor urbain moyen atlantique. Cet espace est actuellement connu par le caractère diversifié de son économie. Il dispose d'un potentiel de croissance propre reposant sur 3 piliers majeurs en plus de la fonction administrative provinciale de la ville d'El Jadida, on peut noter : son riche potentiel agricole en arrière-pays avec ses retombées agro industrielles, son industrie diversifiée en expansion et sa vocation touristique régionale. Le grand El Jadida se compose donc d'une série d'agglomérations qui possèdent chacune un système économique et social distinct mais qui, au final, forme un ensemble assez complémentaire qui s'apparente à un pôle de développement local.

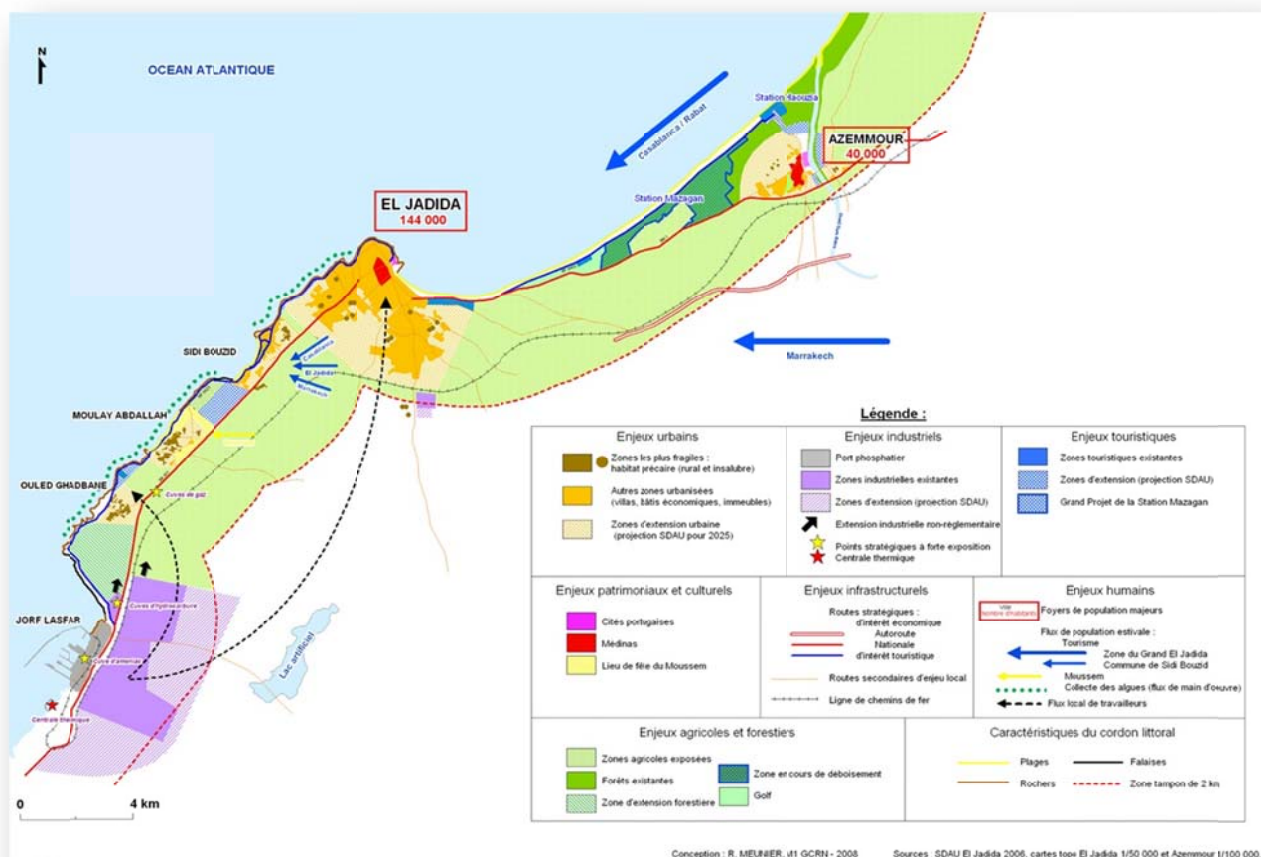


Figure : Les principaux enjeux littoraux du Grand El Jadida (d'après SDAU, 2006).

Les différentes subdivisions territoriales dans lesquelles cette ville est imbriquée montrent toute la complexité du maillage territorial marocain. La gestion économique et politique de ces espaces est complexe. En effet, cet empilement de territoires suggère l'existence de nombreuses interactions entre les différents centres de décisions. Cette organisation territoriale entremêlée peut être un facteur de vulnérabilité systémique en cas de tsunami. La position géographique en bordure du littoral atlantique marocain et l'intégration au sein d'une importante conurbation urbaine sont des facteurs de vulnérabilité fonctionnelle et économique majeurs. La ville d'El Jadida constitue un point de convergence d'enjeux très importants face au risque de tsunami, ce qui justifie aussi le choix de ce site d'étude dans le projet d'ANR MAREMOTI.

D FACTEURS ET CRITERES DE VULNERABILITE HUMAINE FACE AUX TSUNAMIS

D.1 QUELLE APPROCHE DE LA VULNERABILITE ?

Le concept de vulnérabilité se retrouve de plus en plus souvent au cœur des analyses de risque et il vient compléter progressivement l'étude stricte de l'aléa malgré un déficit en méthodes d'évaluation, de surcroît normalisées (Leone & Vinet, 2005 ; Leone, 2007 ; Leone et al., 2010). Cette partie de notre recherche porte sur la caractérisation de la vulnérabilité humaine face aux tsunamis, en vue de son évaluation en contexte urbain, sur la ville d'El Jadida. Nous verrons que cette évaluation est interdépendante de celle de la vulnérabilité du bâti (vulnérabilité physique, ou structurelle), et qu'elle dépend également des capacités d'évacuation en cas de tsunami. La vulnérabilité y sera considérée comme une propension à subir l'endommagement. Sa caractérisation repose sur l'une analyse des interactions entre différents facteurs, à la fois intrinsèques aux individus, mais également extrinsèques (ou environnementaux).

Il s'agit dans un premier temps de caractériser rétrospectivement la vulnérabilité humaine au moyen de retours d'expérience afin de mieux cerner les facteurs qui la déterminent. Dans un deuxième temps, cette vulnérabilité peut être évaluée *a priori* au moyen d'un diagnostic de vulnérabilité conduisant à l'évaluation du risque de pertes humaines (démarche prospective de scénario de risque, ou d'impact). Le diagnostic peut s'avérer être une démarche très complexe, qui tout comme le retour d'expérience, passe par l'analyse d'un certain nombre de facteurs de vulnérabilité que l'on s'efforce généralement de mesurer au moyen de critères et d'indicateurs de vulnérabilité.

J. Post et al. (2009) proposent une échelle temporelle de la vulnérabilité qui repose sur les réponses humaines immédiates face à une crise. Il se concentre principalement sur des personnes sensibilisées au risque de tsunami. Cela sous-entend que ces personnes savent comment réagir lors de l'apparition des signes annonciateurs d'un tsunami. Or dans notre étude la population n'est pas sensibilisée au risque de tsunami et aucun système d'alerte n'est mis en place. Cependant, il ajoute une nouvelle composante dans l'évaluation de la vulnérabilité des personnes : la dimension temporelle. C'est en ce sens, que nous tenterons de caractériser la vulnérabilité humaine sous un angle spatio-temporel via une étude de mobilité intra-urbaine de la population d'El Jadida.

D.2 LA VULNERABILITE HUMAINE A POSTERIORI : LES ENSEIGNEMENTS DE QUELQUES RETOURS D'EXPERIENCE

Dans cette approche *a posteriori*, il s'agit d'analyser les principaux facteurs de vulnérabilité humaine en cas de tsunami (propension au décès). Nous verrons à travers plusieurs retours d'expérience, notamment celui sur le tsunami du 26 décembre 2004, quels sont les facteurs déterminants face à un tsunami.

D.2.1 FACTEURS PHYSIOLOGIQUES

À la lumière de ces différents retours d'expérience il apparaît un premier grand groupe de facteurs de vulnérabilité humaine, dits **physiologiques**. Ce premier ensemble de facteurs s'appréhende à l'aide de critères dit « primaires » (Atillah, 2008). Ces critères sont définis comme étant non maîtrisables, directement liés à la condition humaine. Cannon (2000), classe ces facteurs dans un sous-système « l'état sanitaire » qui regroupe des critères tels que l'âge, le sexe, et d'autres facteurs comme la mobilité. En effet, les hommes et les femmes se distinguent par des dissemblances anatomiques : la taille, la force et la résistance physique sont plus importantes chez l'homme. La culture, l'éducation ou le système sociétal rajoutent parfois à ces inégalités physiques de nouvelles différenciations pouvant alors influencer la mobilité. La **figure D1** issue d'une étude de l'IOC-UNESCO (2009), met en évidence ces différents critères en s'appuyant sur le cas du tsunami de 2004.

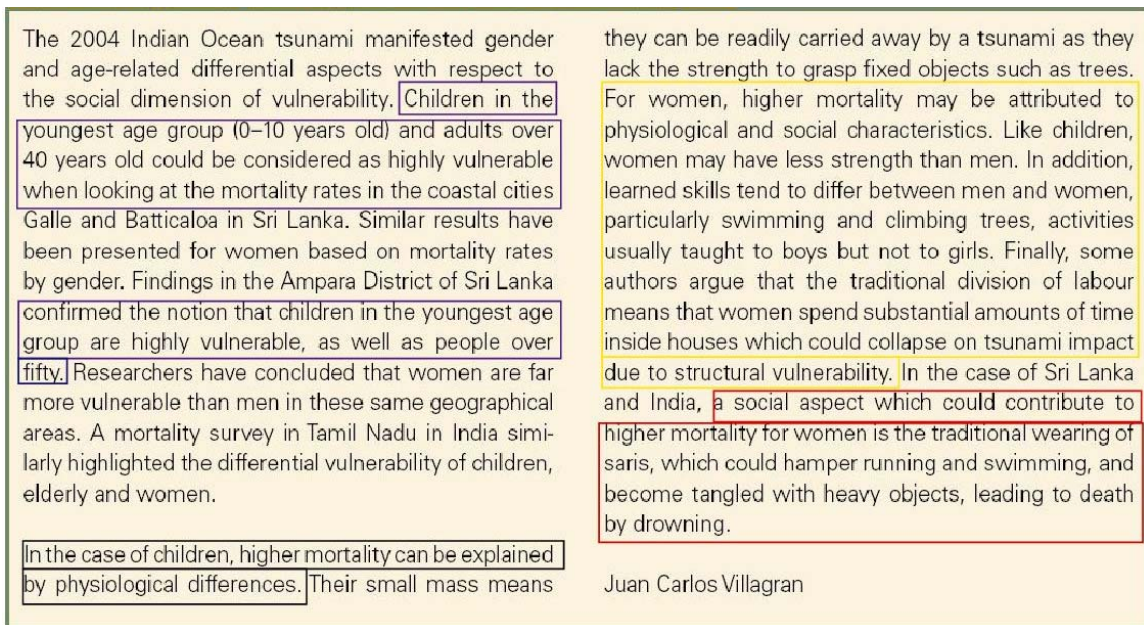


Figure D1 : Les différences physiologiques et sociales entre les « genres » dans la vulnérabilité sociale (IOC-UNESCO, 2009).

En bleu, des classes d'âges sont mises en évidence. Les enfants de moins de 10 ans ainsi que les personnes ayant plus de 40 ans ont une vulnérabilité plus grande. En jaune, J.C Villagran met en évidence les différences qui existent entre l'homme et la femme. Enfin en rouge, on voit comment les facteurs sociaux peuvent influencer le comportement des genres.

L'âge, le sexe, le genre et la mobilité sont autant de critères à prendre en compte lors d'un tsunami. La mobilité se trouve largement affectée par l'arrivée du flot du tsunami. Baladès (1994) a mis en évidence les limites de déplacement des personnes en cas d'inondation, synthétisée sur un graphique que nous détaillerons plus tard dans ce rapport. On retiendra principalement de cette étude que la hauteur d'eau d'un mètre constitue une valeur seuil pour laquelle :

- Un enfant ne peut se déplacer ;
- Une voiture peut flotter et constituer un embâcle ;
- Les engins classiques de secours ne peuvent plus intervenir.

Sugimoto et al (2003) s'attachent à présenter les calculs d'une méthode appelée : « *The human damage prediction* ». Elle est estimée par rapport aux variations de la hauteur d'eau (*inondation height*), de la vitesse (*flow velocity*) et de la rapidité d'évacuation (*evacuation speed*). Koshimura (2006) développe la question de la vélocité humaine lors d'un tsunami, c'est-à-dire la capacité physique de mobilité face à une vitesse et une hauteur d'eau.

Au regard de ces multiples études, la mobilité apparaît bien comme un critère déterminant lors de l'arrivée du tsunami. Elle peut être réduite par le port d'un habit traditionnel comme vu au paragraphe précédent. De plus, elle peut être affectée par des critères de péjoration comme la quantité de débris potentiels flottants. Lors du tsunami de 2004, de nombreuses vidéos montrent à quel point il est difficile de fuir une fois pris dans un flot de débris (figure D2).



Figure D2 : Importance du flot de débris du tsunami de 2004 à Banda Aceh (source vidéo Internet).

D.2.2 FACTEURS GEOGRAPHIQUES

A l'arrivée du tsunami la mobilité influe donc sur la capacité de fuite de l'individu. Cependant le critère le plus déterminant lors de l'impact d'un tsunami reste la localisation des personnes. En effet, la localisation de l'individu à ce moment précis va

déterminer son degré d'exposition au risque. Ces critères rentrent dans la classe que Thouret et D'Ercole (1994) appellent **facteurs géographiques de la vulnérabilité**. « *Les facteurs géographiques désignent les contraintes de localisation, le lieu et le moment précis, le style et la récurrence de l'impact* ». Pour éventuellement prévoir ces facteurs au moment de l'impact du tsunami, il est nécessaire de connaître les modes et rythmes de vie de la population étudiée. Il s'agit de connaître les habitudes de vie, les particularités du pays, pour savoir quels seraient les jours ou les heures qui concentrent le plus d'enjeux et quels seraient, de ce fait, les moments les plus vulnérables ? (Encadré 2, témoignage 1).

Par exemple le tsunami du 26 décembre 2004 a eu lieu en période de Noël, au moment où de nombreux touristes étaient en vacances sur les côtes indonésiennes. Certaines personnes se trouvaient à l'intérieur de leur véhicule (littéralement prises au piège) lorsque le tsunami est arrivé, tandis que d'autres ont pu accéder à l'étage ou courir sur des hauteurs. Certaines vidéos ont montré que des hommes se sont réfugiés dans des arbres alors que d'autres ont pu atteindre le toit des habitations. On voit bien que la proximité d'un espace refuge est un facteur important.

D.2.3 FACTEURS PSYCHO-SOCIOLOGIQUES

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 ces groupes sociaux mais aussi de leur culture et plus individuellement de la force physique et surtout mentale de chacun. Nous abordons ainsi une nouvelle classe de facteurs, dits **psycho sociologiques**. Mais cette représentation du phénomène est aussi influencée par des facteurs socio-culturels que nous développerons dans le paragraphe suivant.

Plusieurs retours d'expérience ont montré à quel point la mémoire du risque était un critère essentiel qui a permis de sauver bon nombre de vies (Encadré 2, témoignage 2). Par exemple, 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 plage s'est retirée sur 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 eut que 7 morts car un vieil homme avait déjà vécu un tsunami. Son récit sauvegardé, les populations ont su reconnaître l'arrivée d'un tsunami et se sont réfugiées sur les collines. Ce témoignage tiré de l'étude de Gaillard et al. (2004) montre toute l'importance du vécu et de la mémoire collective. A la perception du risque il convient d'ajouter le degré d'acceptabilité et d'adaptabilité propre à chacun.

Témoignage 1 : Tsunami aux Samoa 02/10/2009 à 08h32 | Corto M « (...) Puis une vague de 7 mètres de hauteur a déferlé sur les côtes sud des deux îles, ravageant 20 villages et faisant plus de 200 morts. A noter un moindre mal dans cette tragédie. Elle s'est en effet déroulée en semaine, alors que les belles plages de ces deux côtes sont envahies par les baigneurs le week-end. »

<http://fr.euronews.net/2009/10/14/abby-10ans-heroine-du-tsunami-aux-samoa/>

Témoignage 2 : Tsunami aux îles Salomon 04/04/2007 à 11h00 | Garth Macintyre, un Néo-Zélandais, se trouvait à 80 kilomètres de l'hypocentre du séisme lundi à 7h40. Il témoigne : « J'habite à Wellington et j'ai plutôt l'habitude des tremblements de terre. Mais celui-là était d'une autre dimension. Tout s'est mis à trembler dans l'hôtel. Les objets volaient des étagères. Il était presque impossible de tenir debout. C'était terrifiant et cela a duré près d'une minute. Une éternité ! Une demi-heure après la secousse, nous avons vu la mer se retirer. Nous avons compris qu'un tsunami arrivait. Alors nous avons couru vers les hauteurs en emmenant le plus de gens possible avec nous. »

http://sismo.ird.nc/index.php?view=article&catid=18%3Apresse&id=634%3A20070404-iles-salomon-20-morts-et-le-bilan-risque-de-salourdir&format=pdf&option=com_content&lang=en

Témoignage 3 : Tsunami aux Samoa 03/10/2009 à 07h41 | Corto M « (...) A certains endroits, la plage a même disparu et c'est la route qui fait office de digue. (...) Si par ici, personne ne comprend pourquoi Dieu a envoyé le Tsunami sur les Samoa (ce qui n'était jamais arrivé auparavant), les survivants qui ont failli y rester, sont persuadés que leur survie n'est due qu'à la volonté et la grâce de Dieu. Paradoxal, mais c'est le sentiment qui règne. Pour les Samoans, très religieux, il en faut davantage pour être découragé d'aller à l'église. »

<http://www.midilibre.com/articles/2009/10/01/ML-Tsunami-aux-iles-Samoa-et-seismes-en-Indonesie-appel-a-temoin-941181.php5>

Encadré 2 : Recueil de témoignages sur le vécu d'un tsunami.

Certains individus vont, au moment de la catastrophe, prendre des initiatives tandis que d'autres vont rester prostrés dans un état d'incapacité totale. Crocq et al. (2009) appellent ce phénomène la sidération : « la sidération saisit le sujet d'un coup, d'emblée dans toutes ses facultés ». Ce syndrome bien qu'incontrôlable suivant les individus, peut être partiellement maîtrisé au sein d'une population. Veyret (2004) nous dit « qu'il n'y a risque que parce que l'individu ou le groupe social se perçoit comme fragile ». Chaque société, chaque civilisation perçoit donc le risque différemment. Un groupe d'individu peut se reconnaître vulnérable face à un risque alors qu'un autre peut se sentir protégé. Se sentir en sécurité dépend donc du degré d'acceptabilité de l'individu et plus généralement de la société dans laquelle il évolue. Texier (2009) montre qu'il existe chez certaines sociétés en développement, des mécanismes culturels d'adaptation émotionnelle et psychologique face aux risques. Elle les qualifie de « phénomène culturel de relativisation et de minimisation du danger ». Les populations en proie à de tels mécanismes sollicitent également leur foi en des croyances diverses.

D.2.4 FACTEURS SOCIO-CULTURELS

En effet certains REX ont montré que des civilisations interprétaient les grandes catastrophes comme une intervention divine (Encadré 2, témoignage 3). Cet enracinement des traditions est un des critères qui s'inscrit dans la classe des **facteurs socioculturels**. D'après une interview d'Andrée Feillard, chercheur au CNRS, détachée auprès de l'École française d'Extrême-Orient à Jakarta, le tsunami serait pour la population musulmane : « une punition d'Allah pour les Acihais dont le péché serait celui de l'irrévérence (le mouvement de sécession d'Aceh, formé vers 1976, a été très actif depuis une quinzaine d'années) ; pour d'autres, le tsunami serait l'expression d'une colère générale d'Allah (les cinq prières quotidiennes seraient trop peu suivies, la corruption trop répandue) » <http://www2.cnrs.fr/presse/thema/694.htm>.

Une étude (Paradise, 2005) réalisée sur la perception du risque sismique sur la ville d'Agadir (Maroc) met en évidence l'influence du niveau d'éducation sur la connaissance du risque (figure D3).

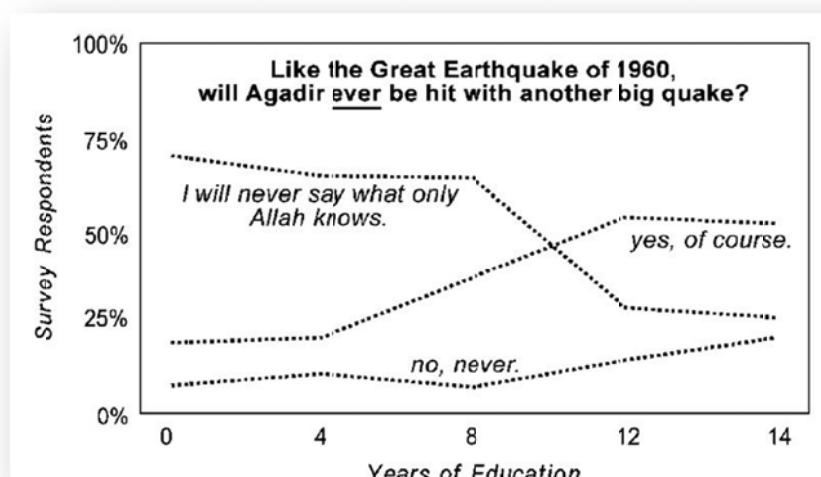


Figure D3 : Perception du risque au travers de l'éducation (Paradise, 2005).

75 % des personnes interrogées répondent : « Je ne saurais jamais ce que seul Dieu sait ». Ces personnes ont toutes un niveau d'étude peu élevé. A partir de 8 années d'études la courbe chute nettement. Les personnes qui ont plus de 8 années d'études répondent par oui ou non, sans faire référence à la religion.

Le niveau d'éducation est un critère important qui influe sur la perception et la représentation du phénomène. Lorsque Tilly Smith, une fillette britannique de 11 ans, 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 de tsunami, et la plage a été évacuée. Deux semaines avant les vacances, en cours de géographie, la jeune fille avait vu une vidéo sur le tsunami d'Hawaï de 1946. Grâce à

des connaissances simples qu'elle a su mobiliser, la fillette a permis à des dizaines de personnes d'avoir la vie sauve.

Enfin la structure familiale reste un critère essentiel lors de l'arrivée d'un tsunami. En effet, les enfants doivent être portés ou attendus par les parents, ce qui influe sur la mobilité et donc la capacité de fuite.

D.2.5 FACTEURS SOCIO-ECONOMIQUES

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. Si ce dernier se trouve dans une situation précaire, il va se retrouver en marge de la société. Selon D. Maltais et S. Gauthier (2008), « *les individus présentant un faible statut socioéconomique sont plus sujets à éprouver des sentiments de crainte devant la possibilité de perdre leur lieu d'habitation que les personnes disposant de sources de revenu plus élevées* » (Palm et Carroll, 1998). 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, la capacité de renseignement d'un individu peut être déterminante. Cette information, qu'elle provienne des autorités ou d'un simple concitoyen doit être fiable. Il faut donc avoir une bonne confiance envers les autorités. Lorsque la population peut s'adresser à une personne de confiance, qui représente l'autorité, cela peut lui procurer un sentiment de sécurité et influencer sur sa capacité d'adaptabilité.

Cette typologie des facteurs de vulnérabilité humaine a été réalisée dans une optique de simplification (tableau 4). En effet, les interactions qu'il peut y avoir entre ces différents facteurs sont multiples et complexes, surtout au sein d'un système urbain. De plus, cet essai de classification ne prend pas en compte les facteurs de vulnérabilité sociale (tableau 5). Or ces derniers influencent largement les facteurs liés à l'individu.

D.2.6 SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX FACTEURS DE VULNÉRABILITÉ

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

Tableau D1 : Principaux facteurs de vulnérabilité humaine (individu) et critères d'évaluation associés.

E CRITERES DE VULNERABILITE DU BATI FACE AUX TSUNAMIS

Dans ce chapitre nous proposons de décrire les principaux critères de vulnérabilité du bâti tels que définis par Leone et al. (2007 et 2010) suite au retour d'expérience mené sur le tsunami du 26 décembre 2004 en Indonésie. Nous confronterons les critères retenus avec ceux de deux autres typologies du bâti disponibles dans la littérature. Après un bref aperçu des différentes périodes de construction de la ville d'El Jadida, nous présenterons enfin la typologie du bâti retenue pour cette étude.

E.1 CONFRONTATION DE QUELQUES TYPOLOGIES DU BATI EXISTANTES

E.1.1 BANDA ACEH, TSUNAMI DU 26 DECEMBRE 2004, LEONE ET AL. (2010)

Dans le cadre d'un retour d'expérience mené consécutivement au tsunami de décembre 2004 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. L'équipe a fait notamment la distinction entre les bâtiments individuels et collectifs, entre les auto-construits et les « calculés », entre les renforcés ou pas (tableau E1).

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 tôle brute ou pente, 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 enforcée, 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 simple. Terrasses ou toitures le plus souvent. Grande dimension.	Géométrie en plan plus ou moins simple. Toitures planes ou inclinées, rouillées 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		

Tableau E1: Classification du bâti indonésien selon 5 classes de vulnérabilité décroissante (Leone et al., 2010).

Cette typologie se base sur des critères d'identifications 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'étage ;
- 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).

Cette typologie bien qu'adaptée à des pays en voie de développement dans les zones tropicales, est assez facilement transférable. Il s'agit alors de rester très attentif aux méthodes de construction qui diffèrent selon la culture des pays diagnostiqués. 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.

Modes et niveaux d'endommagement du bâti (tsunami - Banda Aceh)						
	D0	D1	D2	D3	D4	D5
Critères d'identification terrain	Aucun dommage ou dommages imperceptibles un an après	Dommmages négligeables à légers sans affectation des structures (meubler, abords et toitures abîmés, débris déposés dans les bâtiments)	Dommmages importants mais sans affectation des structures (murs et cloisons défoncés ou perforés, fenêtres et portes arrachées, toitures partiellement arrachées)	Dommmages aux structures pouvant affecter la stabilité du bâtiment (fracturation des piliers, effondrement partiel des planchers)	Dommmages lourds aux structures avec effondrement partiel du bâtiment	Destruction totale du bâtiment avec ou sans arasement
Photo terrain						
Classe de bâti illustrée	A	C	C	B	C	B
Visibilité aérienne	Pas visible	A peine visible	A peine visible pour les toitures. Pas visible pour le reste. Attention aux bâtiments dont la toiture a été enlevée après coup.	Pas visible, ou à peine si les toitures ont été enlevées ou arrachées	Visible	Très visible
Photo aérienne						
Niveau de récupération	Bâtiments habitables			Bâtiments à évacuer mais réparables	Bâtiments irrécupérables	

Tableau E2 : Typologie des dommages définis en Indonésie (Banda Aceh). (Leone et al., 2010).

Les dommages ont été hiérarchisés en 6 classes suivant une gravité croissante (de 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) (tableau E2).

Dans un second temps, l'exploitation statistique des dommages a permis la construction des toutes premières courbes d'endommagement du bâti en milieu urbain (figure E1). Cette représentation graphique permet également d'établir une corrélation statistique et empirique entre le niveau de destruction d'un bâtiment d'une classe de vulnérabilité donnée et la hauteur d'eau mesurée au sol. Nous verrons que ces courbes présentent une utilité pour établir le seuil de destruction total du bâti – à partir duquel la probabilité de décès de ses occupants est maximale – du moment où elles peuvent s'appliquer à une classification du bâti analogue à celle obtenue pour l'Indonésie.

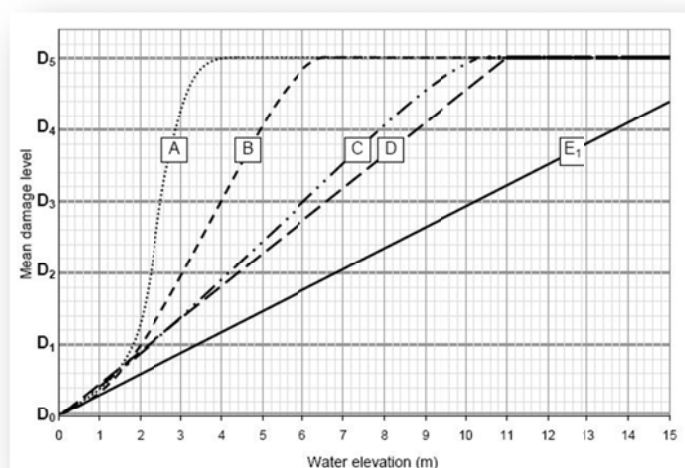


Figure E1 : Courbes d'endommagement moyen des bâtiments selon la typologie indonésienne (Gauraz et al., 2009).

Seule la courbe de la classe de bâti B a été construite de manière empirique. Les 4 autres courbes ont été extrapolées à partir de celle-ci. Elles permettent théoriquement de retrouver un niveau de dommage pour une classe de bâti à partir d'une hauteur d'eau.

E.1.2 SRI LANKA, TSUNAMI DU 26 DECEMBRE 2004, GARCIN ET AL. (2007)

Dans le cadre d'un autre retour d'expérience conduit après le tsunami de 2004 au Sri Lanka, une équipe de chercheurs du BRGM a réalisé un projet ayant pour objectif la mise en place d'un système d'information géographique sur les aléas et risques côtiers. Des scénarios de risque tsunami ont été réalisés sur des zones effectivement touchées par l'évènement de 2004 (Garcin et al., 2007). Après avoir identifié les enjeux, ils ont défini une typologie du bâti introduisant 7 classes structurelles :

- L : construction légère en bois, tôle, tronc ;
- B1 : construction en briques légères (mur à 1 rangée) ;
- B2 : construction en briques (mur à 2 rangées) ;
- CB1 : construction en parpaing de ciment de mauvaise qualité ;

- CB2 : construction en parpaing de ciment de bonne qualité avec colonnes en béton ;
- C : construction en béton armé ;
- LB : construction traditionnelle en moellons (calcaire corallien, calcaire, liant à la chaux).

Cette classification tient compte uniquement des matériaux utilisés pour la construction des murs. Elle est dépouillée de toute autre information sur les éléments structurels des bâtiments, ce qui la rend peu exploitable sur le terrain. Excepté pour la première classe (construction légère,...), il s'avère difficile de distinguer les autres classes entre elles, notamment dans le cas où les murs seraient recouverts, même d'un simple crépi. Dans leurs travaux, les auteurs n'établissent pas une hiérarchisation de vulnérabilité entre ces différentes classes.

E.1.3 MAROC, TYPOLOGIE PROSPECTIVE, OMIRA ET AL. (2009)

Dans un autre contexte géographique et culturel, une étude d'évaluation de la vulnérabilité du port de Casablanca (Maroc) et de ses alentours, face à l'impact d'une submersion par tsunami, a été entreprise par une équipe de chercheurs portugais. Dans ce cadre, Omira et al. (2009) ont établi une typologie de la vulnérabilité du bâti spécifique au Maroc. Le diagnostic terrain a conduit à définir 6 classes de bâti, différenciées principalement par la qualité des constructions (figure E2).

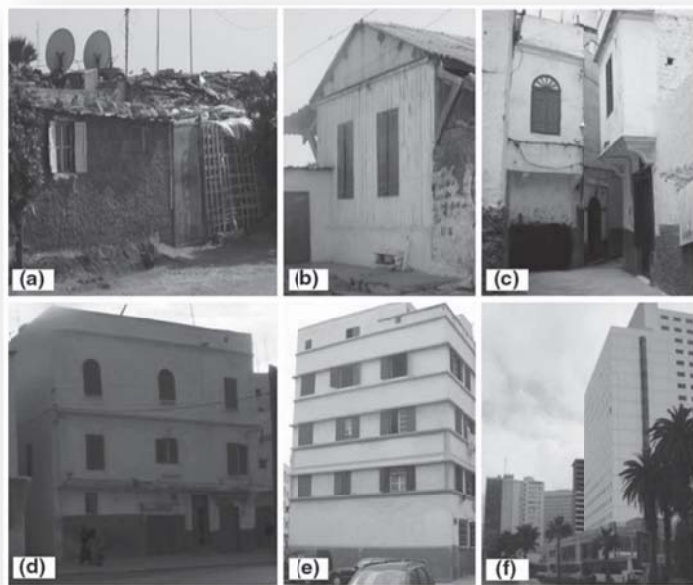


Figure E2 : Typologie du bâti définie sur le port de Casablanca (Omira et al., 2009).

a) Unreinforced masonry walls

b) Timber construction

- c) *Brick traditional*
- d) *Non-engineered RC buildings*
- e) *Engineered RC frames with infill masonry walls blocks, reinforced with concrete.*
- f) *Multi-storey engineered RC buildings*

Cette typologie tient compte d'un grand nombre de paramètres de construction :

- Nombre d'étage ;
- Type de matériaux de construction (brique, pierre sèche, parpaing...);
- Structure porteuse/ossature (renforcé ou pas) ;
- Profondeur des fondations ;
- Matériaux de la toiture ;
- Structure calculé ou auto-construite ;
- Type d'ancrage de la structure aux fondations ;
- Qualité des matériaux utilisés ;
- Remplissage ou non des murs ;
- Conformité ou pas du bâtiment au code parasismique marocain (RPS 2000).

Elle est très intéressante pour notre étude car elle caractérise l'ensemble du parc immobilier de la ville de Casablanca en 6 classes de vulnérabilité décroissante. Celle-ci tient compte des caractéristiques culturelles du type d'habitat marocain ainsi que de certains matériaux utilisés en construction. Par exemple, la première classe du bâti, la plus vulnérable, donne les détails sur la nature des murs. Contrairement au cas indonésien ou Sri lankais, qui est caractérisé par l'utilisation du bois, l'habitat précaire utilise ici plutôt des éléments de pisé ou de pierre à joints argileux sans liaison entre les murs. La classe C quant à elle caractérise l'habitat ancien traditionnel des villes du Maghreb, la médina. Par contre, des critères de construction très techniques sont introduits. Ceux-ci, bien que pertinents (respect des règles parasismiques, renforcement des structures...), apparaissent difficilement identifiables sur le terrain.

L'étude de ces trois typologies, nous a permis d'identifier les critères nécessaires à une évaluation prospective de la vulnérabilité du bâti (diagnostic). Les indicateurs sélectionnés pour la réalisation de notre propre typologie du bâti, doivent répondre aux exigences suivantes :

- être facilement repérable visuellement sur le terrain ;
- distinguer un minimum de classes structurelles ;
- tenir compte des spécificités culturelles des villes maghrébines.

Les critères retenus pour définir notre propre typologie seront exposés en dernière partie de cette partie après une brève rétrospective du développement urbain de la ville d'El Jadida.

E.2 EVOLUTION ET TYPOLOGIE URBAINE D'EL JADIDA

La typologie du bâti définie pour notre étude est le reflet d'un patrimoine architectural qui a évolué au cours du temps. Il nous est donc apparu nécessaire de retracer les grandes périodes de construction de la ville d'El Jadida afin de mieux cerner les spécificités du bâti d'El Jadida.

E.2.1 LES GRANDES PHASES D'URBANISATION DE LA VILLE D'EL JADIDA

Une analyse succincte de l'histoire de la ville permet de donner un bon aperçu de son évolution urbaine et de mieux comprendre l'organisation spatiale des différents types d'habitat. Tel que le montre la frise chronologique (figure C10), la ville a connu de nombreuses phases de déclin et d'expansion économique. Ces différentes phases ont joué un rôle primordial dans l'évolution des quartiers de la ville.

La cité portugaise édiflée à partir de 1514 par une colonie de Portugais s'impose comme le fondement de la ville (figure E3). Jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle, période à laquelle les colonisateurs furent chassés par les arabes, la ville ne connaît pas de réel développement. C'est seulement en 1822, lorsque le Sultan Moulay Abderrahman, a résolument considéré la ville comme un port de commerce que l'économie de la ville a repris. En cette période les seules habitations en dur étaient situées dans la citadelle. Désormais classée au patrimoine mondial de l'UNESCO, la cité portugaise a bénéficié ces dernières années de travaux de réhabilitation financés par l'Etat.



Figure E3 : Plan de la citadelle portugaise d'El Jadida (Mazagan) réalisé par un soldat de la garnison en 1753 (Source : Bibliothèque numérique Gallica).

La ville d'El Jadida ne se réduit plus exclusivement à un ensemble bâti enserré entre ces murs d'enceinte. Les premières "sorties" du quartier intra-muros datent de la moitié du 19^{ème} siècle (Carabelli, 1999). La véritable dynamique urbaine de la ville, en dehors des remparts du noyau portugais, s'est déclenchée à partir de 1912, date du début de l'encadrement politique français de la ville (Chahid et Lekhiar, 2006). Les classes aisées se sont déplacées juste à l'extérieur des remparts pour former ce que l'on appelle l'ancienne médina. Celle-ci est facilement identifiable sur le terrain par ces caractéristiques morphologiques : ruelles étroites et sinueuses, murs aveugles. Ce tissu ancien abrite encore une très forte densité de population. Ainsi la ville moderne de l'époque du protectorat a vécu son extension à partir du cœur de son nouveau port (Chahid et Lekhiar, 2006).

Les quartiers « populaires » situés au nord et au sud de la ville ont été construits entre 1916 et 1955. Ils sont bâtis suivant une trame Ecochard³⁴ qui consiste en une juxtaposition d'îlot de maisons ayant de un à deux étages (Mouabid, 2000). Les quartiers nord sont aujourd'hui parsemés de villas abandonnées par la communauté juive, de zone d'habitats plus récentes ainsi que d'anciennes usines d'industrie textile.

C'est également au début du protectorat français qu'apparaissent les quartiers administratifs autour du port. A partir de 1925 et jusqu'à la fin 1939, une première tranche d'équipement urbain a permis à El Jadida de se doter d'importantes constructions dont le marché central, le théâtre municipal, la poste, ou encore la banque centrale du Maroc. Sous le protectorat, les français ont construit un quartier résidentiel de villas sur les hauteurs de la ville. En raison de sa situation, le quartier est nommé le « plateau ». Réservé à une élite, ce type d'habitat progresse petit à petit vers le sud et le sud-est de la ville. On y trouve aujourd'hui de grosses infrastructures telles que l'hôpital Mohamed V ou encore la préfecture. A l'indépendance, les logements vides laissés par les français accueillent la population aisée de la ville.

Après l'indépendance, entre 1956 et 1970, la ville a connu une longue période de crise économique. Durant deux décennies son développement urbain fonctionne alors au ralenti, la ville sombre dans une « léthargie profonde ». Elle bénéficie uniquement de sa situation de ville balnéaire.

Ce n'est que vers la fin des années 1970, sous le règne d'Hassan II que la ville connaît un nouvel essor économique (création du port de Jorf Lasfar, d'une ligne ferroviaire ainsi que d'une université). Ce nouveau départ va alors contribuer à son étalement spatial. De nouveaux quartiers s'urbanisent le long des axes principaux en direction des villes de Casablanca et de Marrakech. La ville connaît une forte urbanisation.

³⁴ Michel Écochard (1905-1985) propose une politique pour l'habitation des populations musulmanes, fondée sur l'utilisation d'une «trame sanitaire» surnommée «trame Écochard», qui permet la densification et l'équipement progressifs des quartiers. Il affirme clairement sa volonté de résorber les bidonvilles (source dictionnaire de l'architecture du XX^e siècle, Paris : Hazan/Ifa, 1996).

On assiste aujourd'hui à une densification de l'habitat dans le centre-ville. Les anciennes villas et autres bâtiments de l'époque coloniale, en très mauvais état, sont souvent rasés pour construire à leur place des constructions d'habitats collectifs. De plus, de nombreuses maisons des quartiers populaires sont rehaussées d'un étage au fur et à mesure de l'agrandissement des familles.

De manière plus générale, au Maroc comme dans la plupart des pays en développement, les villes ont connu et connaissent encore un phénomène d'urbanisation rapide. Ce phénomène est lié à la conjugaison de deux facteurs : un exode rural associé à une croissance naturelle importante. Cette croissance démographique se traduit dans l'espace par un processus d'urbanisation rapide dont les conséquences sont multiples : développement anarchique du bâti, des secteurs informels et de l'habitat spontané. El Jadida n'y échappe pas, la ville voit en sa périphérie plusieurs douars³⁵. Ce type d'habitat est en croissance devant le regain d'intérêt que suscite la ville.

En parallèle on assiste à la dégradation de certains quartiers du centre-ville due à un phénomène de paupérisation. Par ailleurs, il est important de signaler que la production de l'habitat a été et se réalise toujours dans la majorité des cas par auto construction (non respect des normes architecturales et structurelles, matériaux de mauvaise qualité). La construction par l'intermédiaire d'entreprises spécialisées reste à l'heure actuelle peu significative (Meunier, 2008). Ces différents aspects sont révélateurs d'une forte disparité de la vulnérabilité du bâti au sein du parc immobilier de la ville.

En six siècles d'existence, la ville d'El Jadida a accumulé un patrimoine urbain riche de la succession ou de la cohabitation de différentes cultures (Portugais, Arabes, Juifs, Français...). La succession de phases de prospérité et de déclin économique entraîne des discontinuités dans la structure urbaine de la ville. L'extension d'El Jadida n'échappe pas à un certain désordre dont témoigne la fragmentation des quartiers. De plus, le nouvel élan économique que connaît la ville a pour conséquence l'extension et la complexification du tissu urbain, entraînant notamment l'imbrication de catégories de bâtiments très disparates dans leurs formes et leurs rigidités (Meunier, 2008).

L'analyse de la vulnérabilité structurelle à l'échelle du bâtiment paraît indispensable afin de prendre en compte la complexité de la structure urbaine de la ville d'El Jadida. Cette analyse n'est rendue possible que par la réalisation d'une classification du bâti qui tienne compte de l'hétérogénéité des constructions révélée par cette brève présentation historique.

³⁵ Les douars sont une forme d'habitat spontané, anarchique, construit à l'aide de matériaux des plus divers, autour d'un noyau rural.

E.2.2 PROPOSITION D'UNE TYPOLOGIE DU BATI PROPRE A EL JADIDA

L'enjeu de cette typologie est de pouvoir être compatible avec les courbes d'endommagement développées sur Banda Aceh à l'occasion du programme Tsunarisque (Leone et al., 2010). Courbes qui ont été complétées ou extrapolées pour certaines classes de bâti dans le cadre du projet européen SCHEMA (Gauraz et al., 2009 ; Valencia et al., 2011). La construction d'une classification du bâti en fonction de son degré de vulnérabilité ne peut s'envisager qu'à la lumière de retours d'expérience. C'est à partir de ces diagnostics de terrain rétrospectifs que l'évaluation de la capacité de résistance des bâtiments a pu être établie. Ces typologies sont basées sur l'identification de critères pouvant influencer la résistance d'un bâtiment face à une submersion par onde de tsunami. La confrontation de différentes typologies déjà établies dans la partie précédente nous a permis d'identifier les critères les plus pertinents pour une évaluation *a priori* de la vulnérabilité d'un parc immobilier. Les critères intrinsèques aux bâtiments appartiennent les facteurs structuraux et architecturaux de l'édifice. Nous les avons sélectionnés en fonction de leur facilité d'identification sur le terrain. Ainsi nous avons tenu compte des éléments suivants :

- les types de matériaux utilisés ;
- le nombre d'étage ;
- la dimension des structures porteuses (poteaux > ou < 20 cm) ;
- le mode de construction de l'ouvrage (structure calculée ou auto-construction) ;
- le caractère individuel ou collectif du bâtiment.

Le type de matériaux utilisés, à travers la capacité de résistance aux forces de pression basales, conditionne directement le degré de vulnérabilité de la structure. Un mur en briques, par exemple, est moins résistant qu'un mur en parpaings face aux pressions hydrodynamiques (figure E4).



Figure E4 : Exemple de dommage aux murs en briques parallèles au trait de côte. Tsunami 26 décembre 2007, Sri Lanka (EEFIT, 2005).

Le nombre d'étages influence la charge verticale du bâtiment. Ainsi plus il est élevé et plus les murs sont résistants et donc moins vulnérables aux pressions latérales. De plus, les gros édifices présentes généralement une structure calculée et plus renforcée.

L'expertise systématique de l'endommagement du bâti menée en Indonésie dans le cadre de Tsunarique a montré que tous les poteaux en béton armé de largeur inférieure ou égale à 20 cm de largeur ont été sectionnés pour une hauteur d'eau comprise entre 3 et 6 m (figure E5).



Figure E5 : Effets d'arrachement des poteaux de faible largeur. Banda Aceh (Leone et al, 2007).

La distinction entre une structure calculée ou auto-construite, recouvre plusieurs critères de vulnérabilité décrits plus haut. Au Maroc, beaucoup de constructions privées sont réalisées sans tenir compte des règles de l'art élémentaires en la matière faute de contrôle ou d'obligation à faire appel à un architecte. Les dispositions constructives ne sont pas respectées. De plus, les matériaux de construction ne sont pas souvent de bonne qualité.

Un critère de différenciation très important de notre typologie repose sur l'architecture générale du bâtiment. On distingue les bâtiments individuels et isolés de ceux qui sont accolés, formant un bloc, ou collectifs. Un bâtiment isolé est beaucoup plus vulnérable car il va subir une pression hydrodynamique de toutes parts. De plus, les formes irrégulières ou asymétriques favorisent les contraintes locales dans les angles et l'instabilité du bâtiment (Gauraz, 2008).






Type de bâtiment	Individuel			Collectif	
	A	B	C	D	E
Classes					
Critère d'identification terrain	Auto-construct en pierre sèche ou matériaux de récupération, Construction légère de plain pied, bâti non rigide ou semi-rigide	Auto-contruction, de plain pied ou d'un étage, bâti maçonné (briques) à structure légère comportant des poteaux ≤ 20 x 20 cm	Structure calculée et renforcée (poteaux > 20cm), architecture sophistiquée, très souvent étage	Auto-contruction, de 1 à 2 étages, structure moyennement renforcée, plusieurs poteaux ≤ 20x20 cm, géométrie simple	Structure calculée et renforcée (poteaux > 20cm), géométrie simple, bâtiments de grande taille, plusieurs étages
Vue terrain					
Exemple de bâtiments (adaptés de la nomenclature du RGPH, 2004)	En périphérie : constructions précaires (bidonville, douar, habitat rural périphérique), en ville kiosques, ateliers	Maisons marocaines traditionnelles	Villas modernes ou anciennes villas coloniales restaurées, parfois services privés (école privée, banque...)	Maisons marocaines traditionnelles et médina, maisons marocaines modernes, anciens équipements publics, petites et anciennes mosquées	Immeubles, équipements publics, locaux de bureaux, locaux d'hôtellerie ou industriels récents, ancienne grande mosquée et mosquée récente

Tableau E3 : Typologie du bâti d'El Jadida en fonction d'une vulnérabilité décroissante face aux effets d'un tsunami potentiel.

Cette typologie permet de classer l'ensemble du bâti de la ville d'El Jadida, en 5 classes structurelles en fonction d'une vulnérabilité décroissante (tableau E3). Elle repose donc sur l'intégration de critères relativement simples à identifier sur le terrain, accessibles par un non spécialiste en ingénierie de structures, facilement et rapidement identifiables sur le terrain. Les critères de vulnérabilité retenus doivent permettre de transposer cette typologie à d'autres villes du Maroc ou du Maghreb.

Le type A regroupe les constructions les moins résistantes. Il s'agit de constructions isolées, très légères en pierres sèches ou en pisé, parfois en bois et tôles (Baize et al., 2004). Ces constructions de plain-pied ont une hauteur faible généralement inférieure à 5 m. Cette catégorie représente 4 % de l'habitat de notre zone d'étude. Ce pourcentage ne reflète pas la réalité de l'ensemble de la ville d'El Jadida. En périphérie de la ville, cela correspond généralement à de l'habitat rural ou informel, non réglementaire (figure E5). Ces habitations insalubres abritent une population pauvre qui vit dans une très grande précarité. Dans ce cas précis, ces zones d'habitations non réglementaires se sont développées officieusement sur des espaces communaux non viabilisés pour l'extension urbaine (Meunier, 2008). En centre-ville, il s'agit le plus souvent de kiosques ou de téléboutiques construits en verre et en tôle. Ce sont des espaces très vulnérables qui peuvent accueillir plusieurs personnes en même temps. La capacité de résistance du bâti est quasiment nulle. De plus la capacité de fuir verticalement est impossible. Au regard de cette description, les individus localisés dans ce type d'habitat seront les plus vulnérables en cas de tsunami (figure E6).



Figure E5 : Habitat informel en périphérie de la ville (Lagahé & Péroche, 2010).



Figure E6 : Téléboutique en centre-ville (Lagahé & Péroche, 2010).

Le type B correspond à des constructions maçonnées généralement en briques, de structure légère et comportant des poteaux de 20 x 20 cm renforcés par des fers à béton. Les matériaux et les méthodes de construction de cette catégorie sont les mêmes que pour la catégorie D. Ce type d'habitat est caractérisé par une construction isolée. Il est donc très vulnérable aux pressions hydrauliques exercées lors d'une inondation par tsunami. Ce type de construction, très dispersé sur notre zone d'étude, représente seulement 4 % des bâtiments diagnostiqués. Il peut s'agir d'habitations marocaines traditionnelles auto-construites à 1 étage, de cafés-terrace ou encore de locaux industriels. Cette classe de bâti, bien que plus rigide que la classe A, est tout aussi vulnérable. Seule la présence d'un étage permettrait de sauver des vies, si les hauteurs d'inondation restaient assez faibles pour épargner la structure porteuse du bâtiment (figures E7 et E8).



Figure E7 : Construction individuelle (Lagahé & Péroche, 2010).



Figure E8 : Bâtiment isolé sur le port (Lagahé & Péroche, 2010).

Le type C correspond à une habitation individuelle, isolée du type villa (figure E9). La construction présente une géométrie en plan plus complexe avec toujours un étage. La structure est renforcée. Il peut s'agir de constructions modernes de haut standing comme d'anciennes villas coloniales. Elles sont toujours en retrait de plusieurs mètres par rapport aux rues, avec sur leurs pourtours, une petite cours délimitée par un mur. Cette classe de bâti représente 15 % du parc immobilier de notre zone d'étude. Elle est principalement constituée, en ville, par des anciennes villas de l'époque coloniale. Dans la partie est de notre zone d'étude elle est représentée par de nouveaux quartiers résidentiels en construction, dont les parcelles sont d'une surface minimum de 250 m². Ce type d'habitat abrite une catégorie de population aisée. Cette classe du bâti est la moins vulnérable des constructions isolées. La rigidité des structures ainsi que la bonne qualité des matériaux utilisés en sont les principales raisons.



Figure E9 : Villa moderne (Lagahé & Péroche, 2010).

Le type D est la classe de bâti la plus représentée dans le secteur d'étude. Il s'agit de bâtiments auto-construits, en bloc, sans structure en béton armé. Principalement à usage d'habitation, ils peuvent également abriter des commerces ou des garages au rez-de-chaussée. La structure est en général moyennement renforcée par rapport à la taille de ces bâtiments. Ils sont construits sur un à deux étages, avec un dernier niveau ceinturé par de hauts murs formant une terrasse (Baize et al., 2004). Leurs façades donnent directement sur la voirie. Cette classe représente 59 % du parc immobilier de notre zone d'étude. **L'habitat économique traditionnel** ancien constitue la médina. Ce tissu ancien très dense est situé en centre-ville. Il se caractérise par des habitations qui s'imbriquent les unes aux autres, de manière plus ou moins anarchique le long de petites ruelles très étroites et sinueuses. Ce type d'habitat abrite une population traditionnelle peu aisée. **L'habitat économique traditionnel moderne** constitue les « quartiers populaires » de la ville. Il s'agit de constructions qui datent de la fin de l'époque coloniale. Elles se sont développées aux marges de la médina selon un plan orthogonal, avec des voies de communication larges. Ces quartiers sont situés dans la partie Nord de la ville et au Sud de la médina (figure E10).

Bien que très différents dans la forme des structures et des matériaux utilisés, ces deux types d'habitat présentent des capacités de résistance potentielle proches, du fait de leur organisation en bloc. De plus la présence d'un étage au minimum, ainsi que l'accès à la terrasse permettraient aux occupants de se réfugier en cas de tsunami. Cette classe regroupe également les bâtiments à usage public (administration et enseignement) ou privé (services, entrepôts, petites industries). Ils sont le plus souvent de petite taille, assez anciens et parfois en mauvais état apparent. Il s'agit en général de petits immeubles de un à deux étages avec une structure renforcée. Certaines mosquées anciennes peuvent être classées dans cette catégorie. Ces espaces sont caractérisés par une forte concentration d'enjeux humains dans la journée.



Figure E10 : Habitat traditionnel marocain moderne (Lagahé & Péroche, 2010).

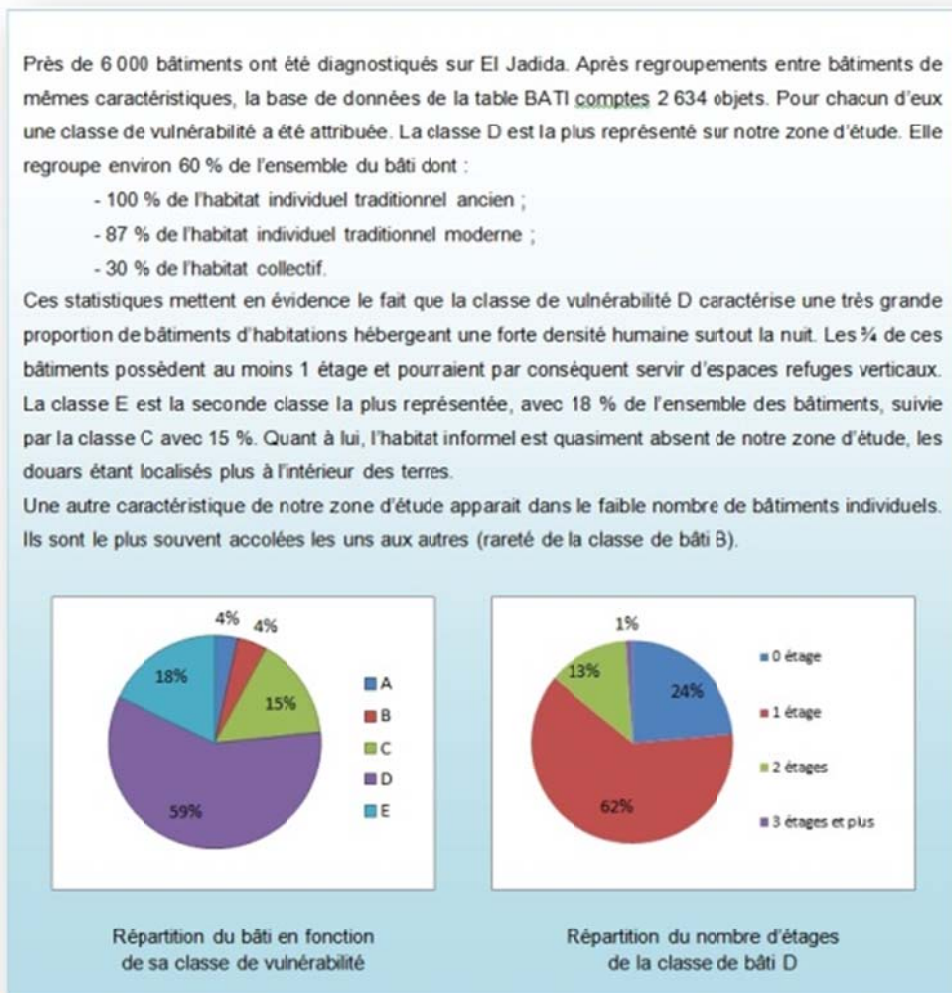
Le type E caractérise des bâtiments collectifs de très bonne conception avec des structures en béton armé renforcées et calculées (figure E11 et E12). Il s'agit le plus souvent d'immeubles d'habitat collectif avec des commerces en rez-de-chaussée. Cette classe regroupe également de gros bâtiments administratifs, religieux (mosquées récentes) ou privés (hôtels, banques). Elle comprend également d'anciens bâtiments coloniaux très imposants. Cette classe de bâti est très représentée en centre-ville, le long des grandes avenues. Elle représente 18 % du parc immobilier de notre zone d'étude. Ces bâtiments sont construits sur des terrains vagues et remplacent petit à petit les vestiges abandonnés du passé colonial de la ville (anciennes villas ou entrepôts). L'architecture massive de ce type de construction, ainsi que la présence d'un grand nombre d'étages, rendent la population beaucoup moins vulnérable face à un tsunami potentiel.



Figure E11 : Bâtiment administratif (Lagahé & Péroche, 2010).



Figure E12 : Habitat collectif avec petits commerces en rez-de-chaussée (Lagahé & Péroche, 2010).



Encadré 3 : Statistiques sur les classes de bâtiments diagnostiqués de notre zone d'étude.

F DIAGNOSTIC DE VULNERABILITE HUMAINE A EL JADIDA

F.1 ZONE D'ETUDE

Afin d'anticiper la livraison des premiers modèles d'inondation, nous avons dû définir une zone à diagnostiquer. Nous nous sommes basés pour cela sur l'isohypse 10 m. Cette zone d'étude est configurée en forme de baie orientée NO-SE (figure F1). Les deux enveloppes d'inondation fournis par la suite par R. Omira recouvrent partiellement cette zone mais sans la dépasser. Le premier modèle (sans effets de rugosité dus au bâti) présente une distance de pénétration maximale de 930 m dans les terres. Elle est atteinte en fond de baie, au niveau de la grande plage de la ville. Celle-ci, directement ouverte sur le large, est assez étroite et ne possède pas de dune bordière. De plus, l'arrière-pays y est marqué par une topographie très basse constituée de champs cultivés. La partie nord de la zone d'étude est plus élevée, constituée d'un estran rocheux qui forme le cap d'El Jadida. C'est dans ce secteur, à l'extrémité nord du cap, que la distance de pénétration modélisée est la plus faible (environ 150 m).

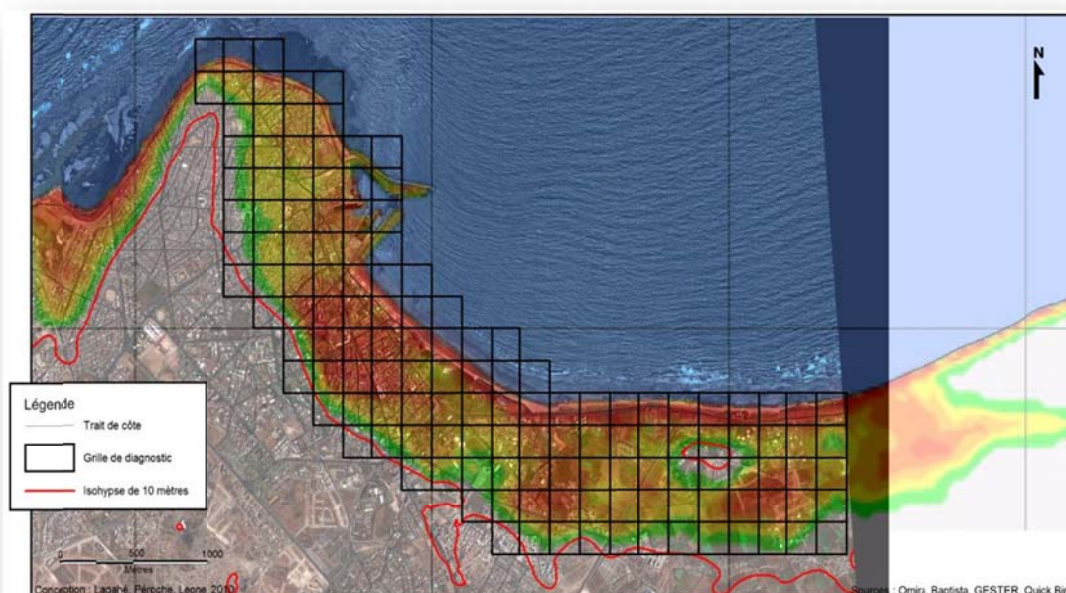


Figure F1 : Délimitation de la zone de diagnostic à partir du premier modèle d'inondation (sans prise en compte du bâti) et de la couverture QuickBird.

Par ailleurs, notre zone a été bornée à l'Est et à l'Ouest par les limites de notre référentiel spatial de référence. Il s'agit d'une image du satellite Quick Bird du 15 juillet 2009 (11h34), de résolution 30 cm, corrigée et géoréférencée par la société TTI. Cette image a permis des levés de terrain de grande précision pour mettre à jour les données sur le bâti du SDAU d'El Jadida datant de 2006.

Le repérage sur le terrain s'est fait au moyen d'une grille composée de dalles de 200 x 200 m de côté couvrant au total 6,048 km². Cette dimension a été établie pour des raisons pratiques : respecter une bonne qualité d'impression en format A4 et pouvoir diagnostiquer deux à trois dalles en une journée (figure F2).

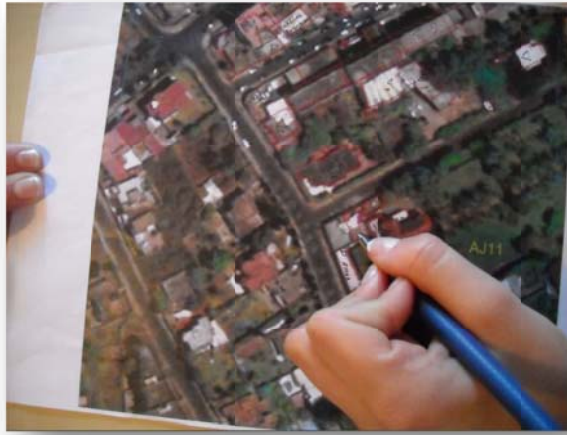


Figure F2 : Exemple de dalle utilisé pour le diagnostic terrain.

F.2 CONTENU DU SIG

La base de données issue du diagnostic a été structurée au format SIG Mapinfo, sous forme de trois tables distinctes suivant les types d'espaces urbains étudiés :

- Une pour les surfaces bâties (BATI.TAB)
- Une pour les surfaces extérieures plein air (PLEIN_AIR.TAB)
- Une pour les voies de communication (VOIE_DE_COMM.TAB)

Chaque table possède trois versions (figures F3 et F4) : une version simple, une version FHS (Fréquentation Haute Saison) et une version FBS (Fréquentation Basse Saison). La version simple contient les critères de vulnérabilité présentés plus loin, et d'autres attributs descriptifs comme la surface ou l'élévation des bâtiments. Les versions FHS et FBS comportent tous les champs qui ont servi aux calculs des densités humaines horaires. Chaque table peut être jointe à un fichier Excel dont le champ commun est celui de l'identifiant des objets.

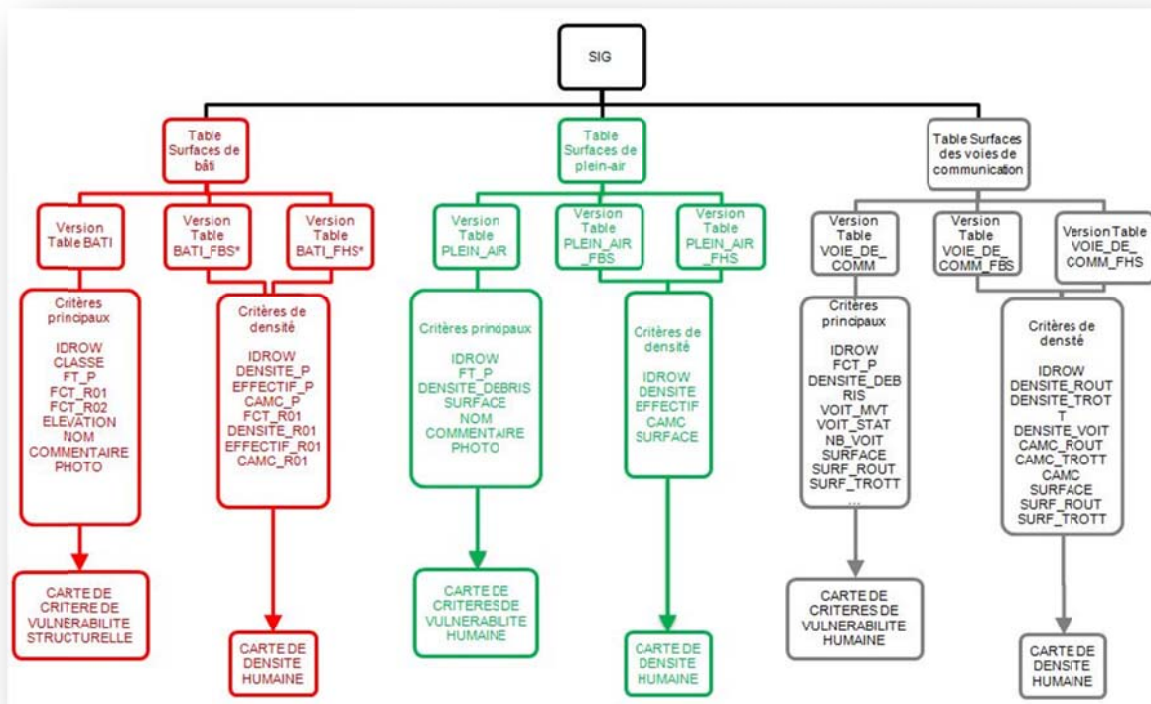


Figure F3 : Structure générale du SIG développé sur El Jadida.

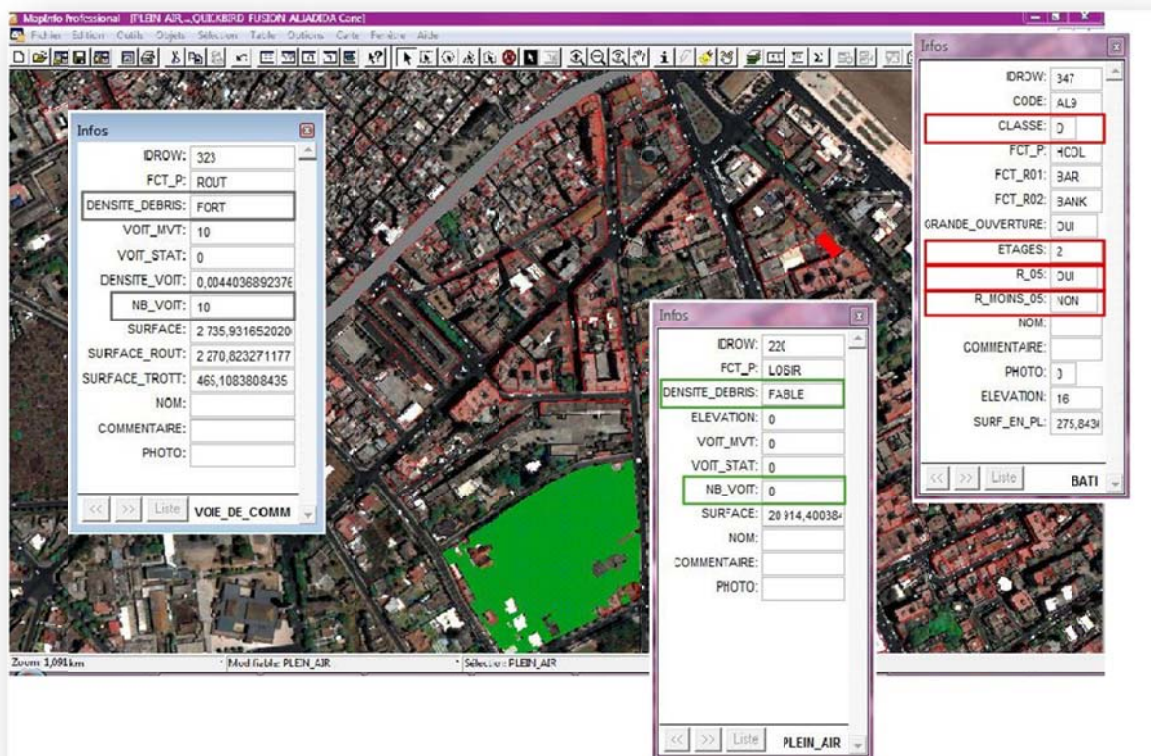


Figure F4 : Capture d'écran du SIG et critères de vulnérabilité humaine renseignés pour chaque type d'espace.

F.3 CRITERES DE VULNERABILITE RELEVES

La phase de diagnostic terrain s'est concentrée sur les critères de vulnérabilité humaine les plus pertinents et facilement accessibles, en différenciant en premier lieu les critères s'appliquant aux personnes situées à l'intérieur des bâtiments, donc indirectement exposées, des critères s'appliquant aux personnes situées à l'extérieur, et donc directement exposées, donc *a priori* plus vulnérables (tableau F1). Pour les individus situés à l'intérieur d'un bâtiment, il convient de prendre en compte le degré de résistance de la structure via la classe de vulnérabilité du bâtiment (5 classes), la présence ou non d'une grande ouverture (oui / non) pouvant favoriser l'entrée d'eau et le nombre d'étages, ce qui donne une indication sur la capacité de mise en protection verticale. En revanche, pour les individus situés à l'extérieur (voies et lieux publics en particulier), nous avons considéré seulement la densité de débris potentiellement flottants (trois classes).

Facteur de vulnérabilité humaine	Critère	Indicateur
Personnes à l'intérieur (bâtiments)		
Niveau de protection	Résistance du bâti	Classe de vulnérabilité (A, B, C, D, E)
Niveau de protection	Etanchéité du bâtiment	Présence ou pas d'au moins une grande ouverture au RdC (Oui / Non)
Capacité de mise en sécurité	Présence ou non d'un étage refuge	Nombre d'étage (0 à 6)
Personnes à l'extérieur (voies et lieux publics)		
Niveau de protection	Densité de débris potentiellement flottants	Nombre de voitures et d'objets mobiles (Forte, Moyenne, Elevée)

Tableau F1 : Les principaux critères de vulnérabilité humaine relevés sur le terrain.

F.3.1 PERSONNES SITUÉES A L'INTERIEUR (BATIMENTS)

Le niveau de protection global apporté par le bâtiment a été appréhendé au moyen de sa classe de vulnérabilité selon la typologie définie précédemment (figure F5). On peut assez logiquement estimer que les bâtiments les moins vulnérables apporteront une meilleure protection, et une meilleure capacité de mise en sécurité de leurs occupants.

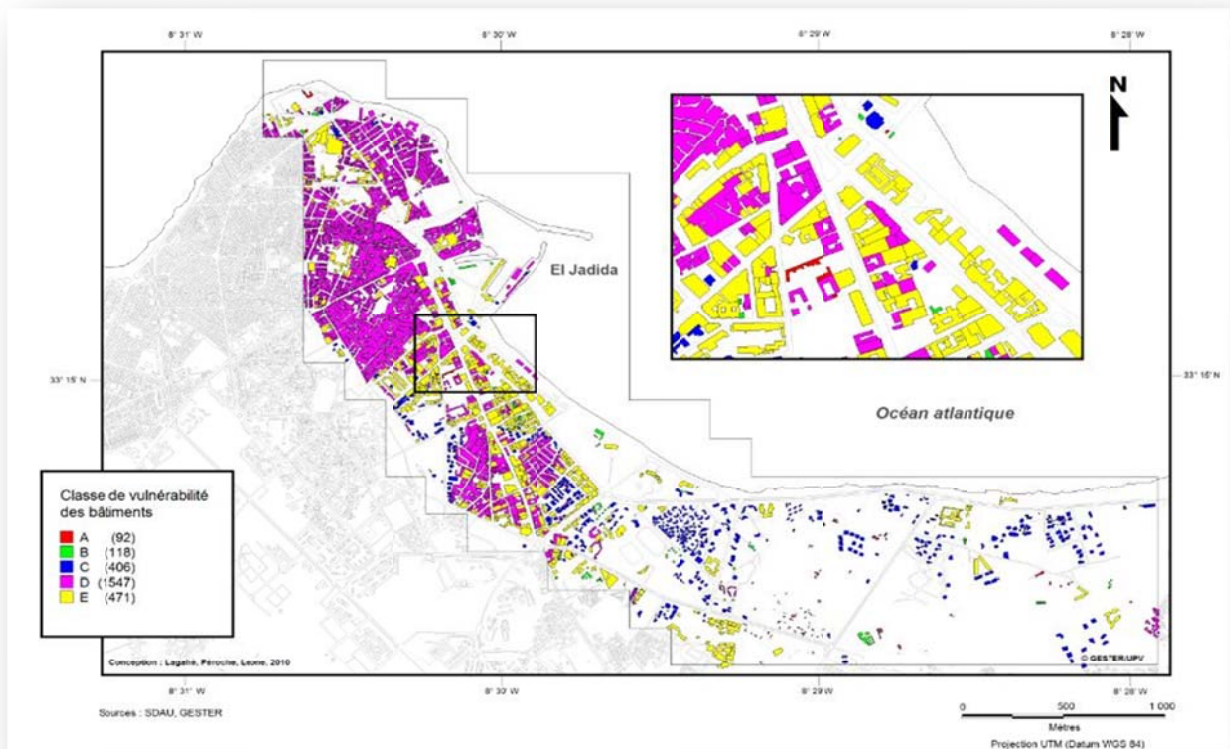


Figure F5 : Classes de vulnérabilité du bâti.

Le critère « grande ouverture » permettant d’apprécier l’étanchéité toute relative du bâtiment a été appliquée seulement pour les rez-de-chaussée, c’est-à-dire sur la partie la plus exposée du bâtiment en cas de tsunami de faible intensité (figure F6). Ce critère a été renseigné de façon binaire (oui / non). Le « oui » s’appliquant à la présence d’au moins une grande ouverture, c’est-à-dire une surface d’au moins 4 m² protégée ou non par une porte, une fenêtre ou une baie vitrée. Cela correspond le plus souvent aux entrées des petits commerces et aux devantures vitrées des cafés. Ainsi ces grandes ouvertures se concentrent préférentiellement le long des grands axes de communication.

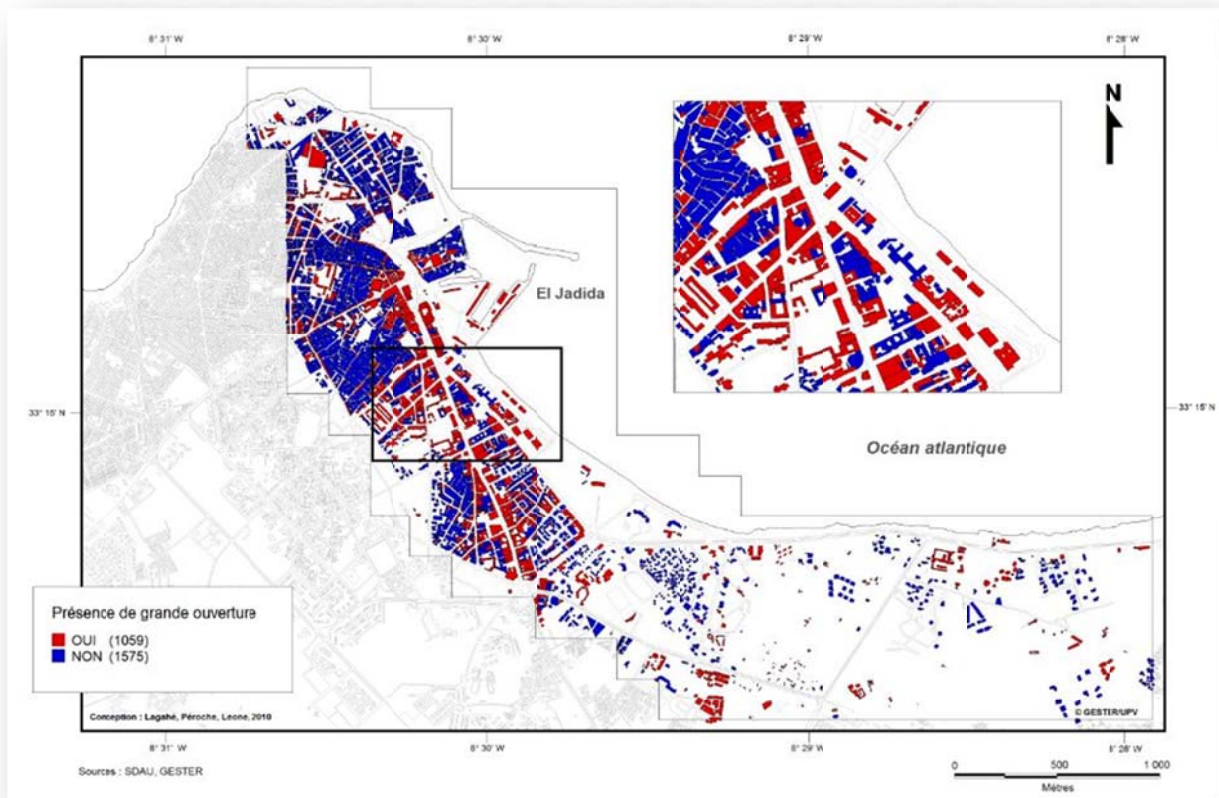


Figure F6 : Localisation des bâtiments possédant au moins une grande ouverture au rez-de-chaussée.

La présence d'un étage est un élément essentiel à connaître pour envisager une fuite vers le haut en cas de tsunami (figure F7). Il a par contre été difficile d'apprécier l'accessibilité vers ces étages refuges depuis les rez-de-chaussée. C'est la raison pour laquelle on doit pour ce critère aussi, se contenter de raisonner en probabilité de mise en sécurité, et donc de survie. L'information recueillie sur le nombre d'étages va ainsi nous permettre dans un second temps d'évaluer la hauteur moyenne de chaque étage et de comparer ces hauteurs avec celles de l'inondation modélisée. La probabilité de survie s'élèvera du moment où l'on pourra faire état d'un pallier refuge au-dessus du niveau maximal des hauteurs d'eau modélisées.

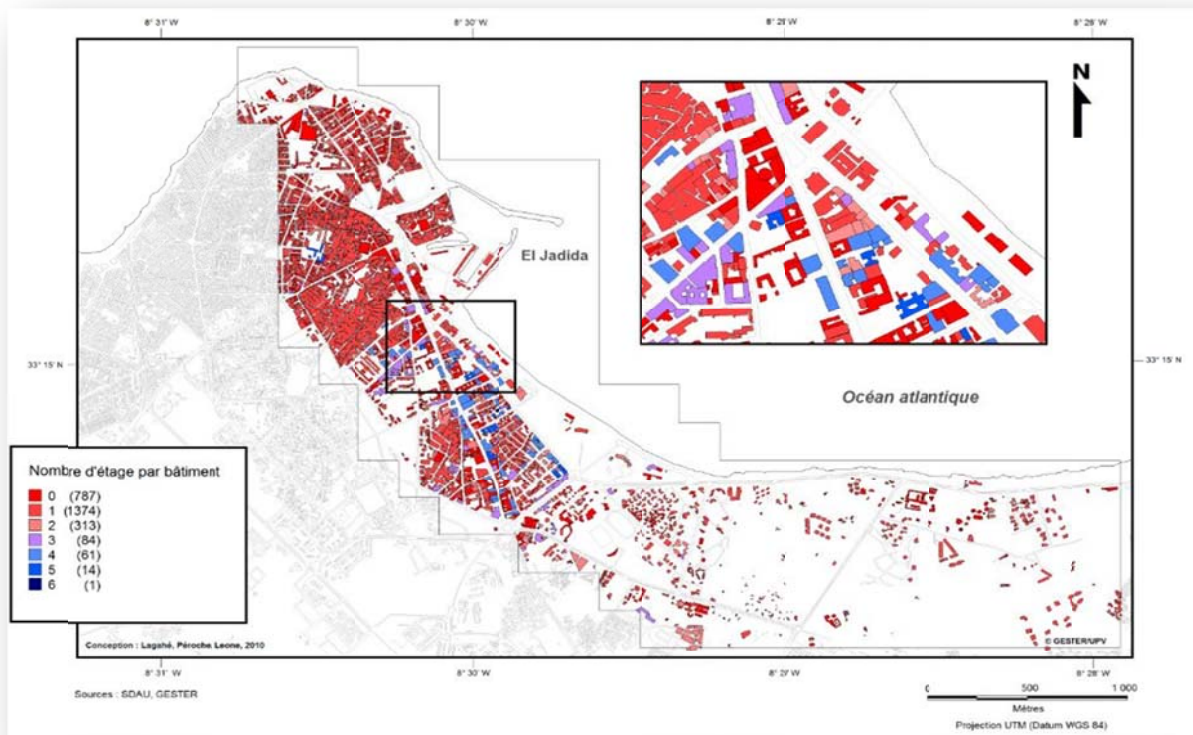


Figure F7 : Nombre d'étages des bâtiments.

La carte de la répartition du nombre d'étages présentée ci-dessus met en évidence une dichotomie entre les zones urbaines nord et sud de la ville. Le nombre d'étages est compris entre 0 et 1 dans le nord tandis qu'il atteint un maximum de 6 étages dans le sud de la zone étudiée. Cette opposition révèle l'existence de constructions plus traditionnelles au nord et plus modernes au sud.

F.3.2 PERSONNES SITUÉES À L'EXTÉRIEUR (VOIES ET ESPACES PUBLICS)

Un individu situé en extérieur sera directement exposé aux flots et verra sa vulnérabilité augmenter avec la charge solide. Celle-ci est représentée par une multitude de débris flottants de toute sorte : mobilier urbain, bateaux, voitures ; auxquels il faut ajouter les débris des constructions détruites en première ligne. Notre modèle ne prenant pas en compte ce dernier aspect, ni la dynamique du transport des débris, nous avons limité l'évaluation au calcul des densités d'objets en place et potentiellement flottants sur chaque secteur. Cette densité a été estimée pour les véhicules par comptage sur l'image QuickBird par tronçon de route et pour les autres objets par simple estimation (figure F8). Nous avons ainsi obtenu 3 classes de densité (faible, moyenne, forte) pour les espaces extérieurs ROUT, CROUF, PARK et ESSO (figure F9).



Figure F8 : Géoréférencement des véhicules en stationnement (vert) et en déplacement (orange) présents sur l'image QuickBird du 15 juillet 2009 à 11h34. Utilité pour le calcul des densités de débris potentiels par tronçon de rue.

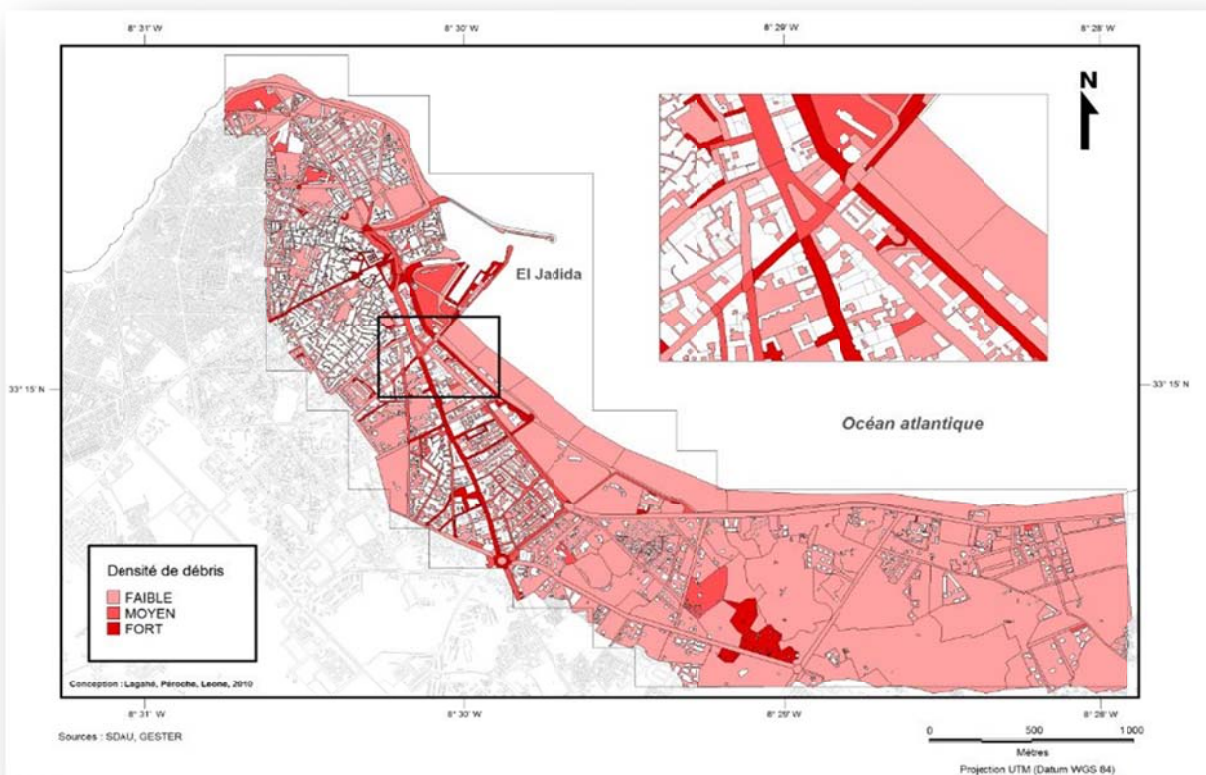


Figure F9 : Densité de débris flottants potentiels.

Les axes de communication et les parkings présentent une forte densité de débris due au nombre important de voitures en mouvement ou en stationnement. Au sud de la plage, on trouve également un autre espace à forte densité de débris potentiels qui correspond à une fabrique de parpaings. L'espace prévu pour la construction des bateaux de pêche près de la citadelle présente également une forte densité de débris potentiels (figure F10).



Figure F10 : Exemple de secteur à forte densité de débris flottants potentiels, à proximité des remparts de la cité Portugaise (Lagahé & Péroche, 2010).

G EVALUATION SPATIO-TEMPORELLE DES ENJEUX HUMAINS SUR EL JADIDA

G.1 LA VARIABLE « ENJEUX » D'UN SCENARIO DE RISQUE

Un scénario de risque peut être modulé en fonction des paramètres de l'aléa mais également des enjeux exposés, représentés dans ce travail par les individus. La mobilité spatio-temporelle de ces personnes (variable « enjeux » de l'équation du risque) a été modélisée sur El Jadida au sein d'un SIG et traitée sous forme d'une cartographie dynamique des densités humaines au pas horaire. Cette étape du scénario a nécessité au préalable de comprendre les modes et rythmes de vie d'une ville arabe, en l'occurrence marocaine. Cette immersion s'est faite durant 3 mois, de février à avril 2010. Les observations et comptages effectués durant cette période, qualifiée de basse saison touristique (BS), ont pu être extrapolés sur la période estivale de forte fréquentation touristique, appelée haute saison dans ce travail (HS).

G.2 PRINCIPAUX MODES ET RYTHMES DE VIE

G.2.1 DES RYTHMES DE VIE GUIDES PAR LA RELIGION (MAROC)

L'expression « monde arabe » est reliée tout d'abord à la langue puis à la culture arabe. On désigne par « Arabe » « une ethnie composée des individus qui parlent une des variantes de la langue arabe, s'identifie à l'histoire et à la culture (...) et ont conscience de leur identité arabe » (Gresh et Vidal in Ait-Chaatal, 2007). La langue arabe est définie comme « un ferment identitaire puissant, d'autant plus que c'est la langue du Coran, de la prière et d'une tradition culturelle très brillante et commune à tous les Arabes » (Mardam-Bey et Sanbar in Ait-Chaatal, 2007). Deux idées fortes ressortent de ces définitions. La culture et la langue arabe sont issues d'un même substrat cependant chaque pays garde ses valeurs identitaires. Enfin la culture arabe est en large partie liée à l'islam. Ces caractéristiques se retrouvent dans les habitudes de vie de la population, notamment aux travers des traditions et des rituels religieux.

Il existe aujourd'hui, un Maroc à « deux vitesses », dont l'un encore basé sur les traditions et l'autre très ouvert sur la modernité. D'après le dernier classement des IDH issu du rapport mondial sur le développement humain de 2009, le Maroc est classé 130^{ème} sur 182. Ce contexte influe sur les rythmes de vie. Bien qu'occidentalisée dans une partie des grandes agglomérations, la population s'attache encore beaucoup aux traditions et surtout à la religion. Cette dernière peut être considérée comme le « métronome de la vie marocaine ».

Le rythme de vie annuel est ponctué par les grands événements religieux comme les moussems et le ramadan. Ces pratiques religieuses occupent toujours une place importante dans le Maroc actuel. Ils incarnent un islam populaire et souvent festif. La célébration de ces fêtes religieuses varie en fonction du calendrier musulman. Le moussem est un rassemblement populaire qui s'opère autour d'un ouali. Cette fête est célébrée à date fixe, généralement une fois par an. Le pays en compte plusieurs centaines lors desquelles ont lieu de nombreuses festivités, des sacrifices d'animaux qui s'accompagnent généralement d'une foire ou d'un marché local (souk). 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 des 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 9h à 15h30 (Conseil Régional du Tourisme Doukkala-Abda, 2008). Le soir les villes du royaume sont très animées notamment par des sorties et promenades en famille.

Les rituels religieux se retrouvent également dans **les rythmes et modes de vie du quotidien**. En effet, la prière est pratiquée 5 fois par jour, tous les jours de la semaine. Les horaires de prière évoluent tout au long de l'année en fonction, là encore, du lever et coucher du soleil. Une flexibilité des horaires est mise en place tous les vendredis pour permettre aux fonctionnaires et salariés d'accomplir la prière dans les mosquées. Il existe environ une mosquée pour 800 habitants (Dalle, 2007). Les hommes et les femmes peuvent aller à la mosquée, cependant on y retrouve une large majorité d'homme.

G.2.2 MOBILITE URBAINE ET RYTHMES DE VIE A EL JADIDA

Il nous a paru utile de décrire les principales activités qui rythment la vie des Jdidis. Cet exercice, forcément réducteur, nous renseigne aussi sur les relations, fonctionnelles ou affectives, qu'entretiennent au quotidien les habitants avec cet espace vécu ou perçu. Lorsque l'on demande aux jdidis si ils aiment leur ville ils répondent : « *C'est une ville calme et tranquille, mais l'été c'est très différent, c'est une autre ville.* » (*Témoignage local*). D'autres témoignages d'habitants vivants dans de grandes villes comme Marrakech soulignent également la quiétude d'El Jadida. C'est particulièrement vrai en basse saison où dominant des rythmes de vie traditionnels même si quelques touches de modernités viennent s'y insérer.

« *Le cœur des territoires bat au rythme du tourisme* » (Terrier, 2009). En revanche, lors de la saison estivale, la ville prend une nouvelle dimension. En ce qui concerne El Jadida, ce phénomène cette citation se vérifie largement. La fréquentation de la ville est totalement différente suivant la période de l'année. Nous allons décrire les rythmes de vie, respectivement, en basse saison (octobre-mai) puis en haute saison haute (juin-septembre).

La ville d'El Jadida est de par sa position géographique, liée à l'économie de la pêche. D'autre part, la longévité des traditions paysannes dans toute la région a marqué l'attachement à l'agriculture. Terrier (2009) explique que « dans une ville la population présente peut varier fortement entre la nuit et les heures ouvrables ». Dans cette étude il insiste sur l'importance de distinguer la population présente de la population résidente. C'est la cas à el Jadida. Dans la journée des mouvements pendulaires se forment. De nombreux paysans qui habitent dans les villages des alentours comme Sidi Bennour, viennent travailler à El Jadida pour la journée. Les étudiants sont également nombreux à faire la navette en bus entre les villages voisins et El Jadida.

Le matin, les épiceries de proximité sont les seuls commerces à ouvrir vers 6h. Les marchands du souk et autres marchés locaux ouvrent généralement vers 9h30. Le dynamisme de la ville bat son plein entre 11h et 13h, en milieu de matinée (**figure G1**). Ces heures concentrent le maximum des flux de personnes mais aussi de véhicules. La sortie des écoles et les marchés ouverts sont les lieux qui centralisent le plus de personnes à ces moments.



Figure G1 : Le marché ouvert de la criée, sur le port d'El Jadida vers 12h.

Entre 12h30 et 14h, les gens prennent leur déjeuner, soit à leur domicile soit dans un des nombreux petits restaurants où l'on sert le plus souvent du poisson frit ou grillé. Vers 14h, la plupart des enfants entrent dans les établissements scolaires et la ville retrouve un certain calme. Les heures de « creux » se situent entre 14h30 et 16h30.

Vers 17h, le rythme de la ville va s'accélérer tout au long de la fin d'après-midi pour s'intensifier en début de soirée. Les enfants finissent l'école entre 17h30 et 18h. Les fonctionnaires et salariés quittent leur lieu de travail environ dans les mêmes tranches horaires. Les flux de circulation s'intensifient et la fréquentation augmente rapidement. Les gens sont dans la rue, ils vont au souk, au super marché, dans les parcs et sur la plage. Les cafés-terrasses se remplissent et les esplanades aussi.

Ce dynamisme intra-urbain va se prolonger jusqu'aux **alentours de 22h30**. Les cafés-terrasse et les marchands ferment petit à petit et les rues se vident.

Ces fluctuations « types » du rythme de vie de la ville sont calquées sur des jours types tels que le lundi, le mardi ou le jeudi. Elles diffèrent nettement le vendredi et les weekends. Le vendredi se passe généralement en famille. La ville prend un rythme plus lent, presque un marchand sur deux est fermé. A contrario le weekend la ville devient très dynamique, le monde afflue et les commerces restent ouverts jusqu'à 23h voir plus tard. Ces variations sont également à nuancer suivant d'autres facteurs, en particulier climatiques. Le vent et le mauvais temps, surtout pendant les mois de janvier à mars, limitent les déplacements à l'extérieur et influencent donc largement la mobilité intra-urbaine

Lors de la saison estivale, la population d'El Jadida est multipliée par 5. Les potentialités touristiques de la ville, ponctuées par les grandes manifestations culturelles et commerciales qui ont lieu le plus souvent en été, expliquent ce phénomène. Les mois de juillet-août, concentrent des animations sur toute la ville. De nombreuses soirées musicales sont organisées sur la plage et au théâtre municipal, ainsi que d'autres activités culturelles, artistiques ou sportives.

Une des manifestations les plus importantes, le moussem de Moulay Abdellah se tient la 1^{ère} semaine d'août de chaque année. Il se déroule à 10 km au sud de la ville, c'est le plus grand moussem de fantasia du Maroc (C.R.T Doukkala-Abda, 2008). Des milliers de visiteurs s'y rendent durant une semaine de festivités.

Le graphique ci-dessous montre l'évolution du taux d'occupation des hôtels classés de la ville tout au long de l'année (figure G2). Il varie peu de janvier à juin, dans une tranche de 10 %. A partir du mois de juin le taux d'occupation des hôtels ne cesse d'augmenter. Il atteint un maximum de 35 % au mois d'août. Or si la population est multipliée par 5 en été, on peut se demander pourquoi les hôtels de la ville sont remplis qu'à 35 % ?

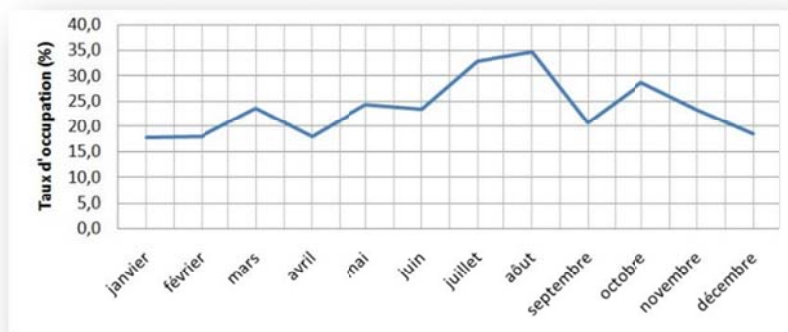


Figure G2 : Evolution de l'occupation des hôtels classés de la ville d'El Jadida 2009
(Source Délégation du tourisme d'El Jadida).

La ville d'El Jadida fut, pendant la période post coloniale, dénommée « plage de la ville de Marrakech ». Le tourisme domestique (interne) qui n'était alors qu'une tendance c'est aujourd'hui renforcé. Cette ville balnéaire, très prisée par les marocains, draine aujourd'hui encore, de grands centres urbains comme Marrakech et Casablanca. Le second graphique rend compte de cette réalité (figure G3).

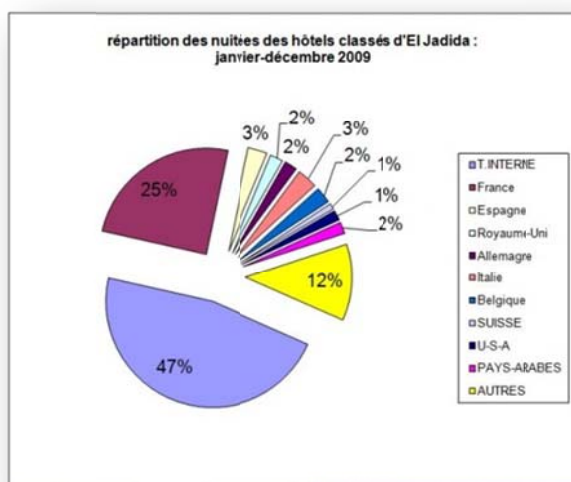


Figure G3 : Répartition des nuitées des hôtels classés d'El Jadida (janvier-décembre 2009).
(Source Délégation du tourisme d'El Jadida)

Cette particularité a des conséquences sur la ville. Les marocains pratiquent le tourisme « chez l'habitant » afin de garder un mode de vie traditionnel durant leurs vacances. Il est d'ailleurs fréquent de voir à l'entrée de la ville des habitants d'El Jadida, des locaux proposer les clés de leur maison aux voitures de touristes. Ce phénomène caractéristique de la ville d'El Jadida permet de comprendre le faible taux de remplissage des hôtels évoqué plus haut.

Entre le mois d'août et septembre, on voit que le taux d'occupation des hôtels diminue progressivement. Cette diminution est due à la fin de la période estivale mais aussi au début du mois de ramadan (du 22 Août au 20 septembre en 2009). Enfin, on voit que le taux d'occupation augmente à nouveau au mois d'octobre. Cette augmentation s'explique par deux événements majeurs. D'une part l'inauguration fin octobre 2009, du grand complexe hôtelier Mazagan, situé sur la côte à proximité de la ville d'El Jadida. D'autre part la tenue du salon du cheval qui a lieu tous les ans à l'hippodrome d'El Jadida.

G.3 TYPOLOGIE DES ESPACES SUIVANT LEUR FONCTION

Notre modèle de mobilité humaine repose sur une typologie des fonctions attribuables à chaque espace de la ville. Cette typologie nous permettra, par extrapolation, d'affecter à chaque espace une densité humaine et un taux de fréquentation à un moment donné. Dans la base SIG, chaque classe est définie par un code. Au total nous avons créé 49 classes fonctionnelles : 28 pour la table BATI, 15 pour la table PLEIN AIR et 6 pour la table VOIE DE COMM (tableau G1). Ces classes renseignent :

- Pour la table BATI : la fonction des étages du bâtiment, la fonction première et la fonction secondaire du rez-de-chaussée (figures G4 et G6) ;
- Pour la table PLEIN AIR : la fonction principale (figure G7) ;
- Pour la table VOIE DE COMM : la fonction principale (figure G8).



Figure G4 : Exemple de bâtiment présentant deux fonctions au rez-de-chaussée.

L'utilisation de ces classes fonctionnelles a soulevé certaines interrogations pour certains types de bâtiments. Il s'est avéré que plusieurs bâtiments étaient inclassables, tels que les hammams. Ces lieux qui s'inscrivent dans la culture du pays, sont très présents dans les villes. Il a donc fallu créer une classe fonctionnelle particulière pour regrouper les hammams (HAM). Il en a été de même pour la classe fonctionnelle qui regroupe les ruelles (RUEL). Cette classe regroupe les routes inférieures à 4 m de large qui caractérisent les médinas marocaines (figure G5). Les ruelles de la médina sont considérées comme des espaces de plein air et non comme des voies de communication, leur étroitesse n'autorisant pas la circulation des voitures. De plus cet espace est un véritable lieu de vie pour les habitants de la médina, il s'apparente plutôt à une cour.



Figure G5 : A : Ruelle de la médina, B : Route de quartier d'habitat traditionnel moderne.

Nous avons également été confrontés à des difficultés de classification, par exemple pour les bâtiments en construction. Ceux en début de construction ont été classés « inhabités » (INAB) car ils ne pouvaient être identifiés correctement. En revanche, ceux en fin de construction ont été classés en fonction de la morphologie du bâti et des panneaux désignant leur vocation future. Il a parfois été nécessaire de différencier certains bâtiments de même classe fonctionnelle. C'est le cas par exemple du centre commercial Marhaba, situé en ville à proximité de la plage. C'est un lieu très vulnérable qui demande une attention particulière. C'est pourquoi nous avons créé une fonction « dérivée » de celle des grandes surfaces et supermarchés (MOL) en MOL_MA qui ne comprend que le centre Marhaba. Il en va de même pour les écoles. La première nomenclature réalisée ne différenciait pas les écoles publiques, des écoles privées, des centres de formation professionnels. Or ces trois espaces présentent des horaires de fréquentation différents. Nous avons donc créé trois nouvelles classes fonctionnelles pour chacun d'eux. Ces classes fonctionnelles particulières ont été créées afin de distinguer des endroits précis de la ville.

Nomenclature pour la table BATI			Nomenclature pour la table PLEIN AIR			Nomenclature pour la table VOIE DE COMM		
Codes des Classes Fonctionnelles	Caractéristiques des batiments regroupés	Nombre de bâtiments	Codes des classes fonctionnelles	Caractéristiques des lieux regroupés	Nombre de bâtiments	Codes des classes fonctionnelles	Caractéristiques des lieux regroupés	Nombre de bâtiments
HTRAD	Maison marocaine traditionnelle	254	SOUK	Marché local, marché ouvert	9	ROUT_1	Route principale	10
HINDIV	maison marocaine moderne	1081	COUR	Cour intérieure, jardin	190	ROUT	Route secondaire	224
HINDIV_V	Villa	331	COUR_EDUC	Cour de récréation	18	CROUF_1	Carrefour principal	3
HCOL	Habitat collectif	330	LOISIR	Parc, terrain de jeu	12	CROUF	carrefour secondaire	31
COLO	Centre de loisir, colonie de vacances	34	CAMP	Camping	1	PARK	Parking, lieu de stationnement	47
INDU	Local industriel, usine, entrepôt	82	ESPC	espace cultivé, champ	12	ESSO	Station essence	8
GARE	Gare routière, ferrovière, aéroport	0	ESPL	Esplanade, promenade	17	Total des bâtiments		323
INAB	Habitat abandonnée, inhabité	189	ESPL_C	rempart de la citadelle	3			
HOT	Hôtel	19	ESPN	Espace naturel	4			
BAR	Café-terrasse, bar	23	PLAGE	Plage	1			
BAR_R	Restaurant	10	RUEL	ruelle < 4m de large	3			
EXPO	Salle d'exposition, musée, lieu touristique	4	DIG	Digue, jetée, quai	3			
ADMI	Service public	48	TVAG	Terrain vague	74			
BANK	assurance, service privé type concessionnaire	23	INDU_SPL	zone industrielle	5			
BANK_B	Banque	9	CIME	Cimetière	2			
EDUC	Etablissement scolaire public maternelle au lycée	27	Total des bâtiments		354			
EDUC_PRIV	Etablissement scolaire privé	10						
EDUC_PRO	Etablissement scolaire de formation professionnelle	6						
MOL	Grande surface, super marché	1						
MOL_MA	Marhaba center	1						
PCOM	Petit commerce, épicerie	86						
PCOM_S	Petit commerce, épicerie, situé dans le quartier du Souk	21						
SANTE	Centre médical	7						
SANTE_H	Hopital d'El Jadida	2						
SECU	Caserne de pompier, poste de police, de sécurité, prison	12						
HAM	Hammam	7						
CULT	Lieu de culte	10						
EVENT	Etablissement recevant ponctuellement du public, salle de réception, salle de spectacle, théâtre, gymnase, salle de sport	7						
Total des bâtiments		2634						

Tableau G1: Typologie des différentes classes fonctionnelles des espaces de vie sur El Jadida.

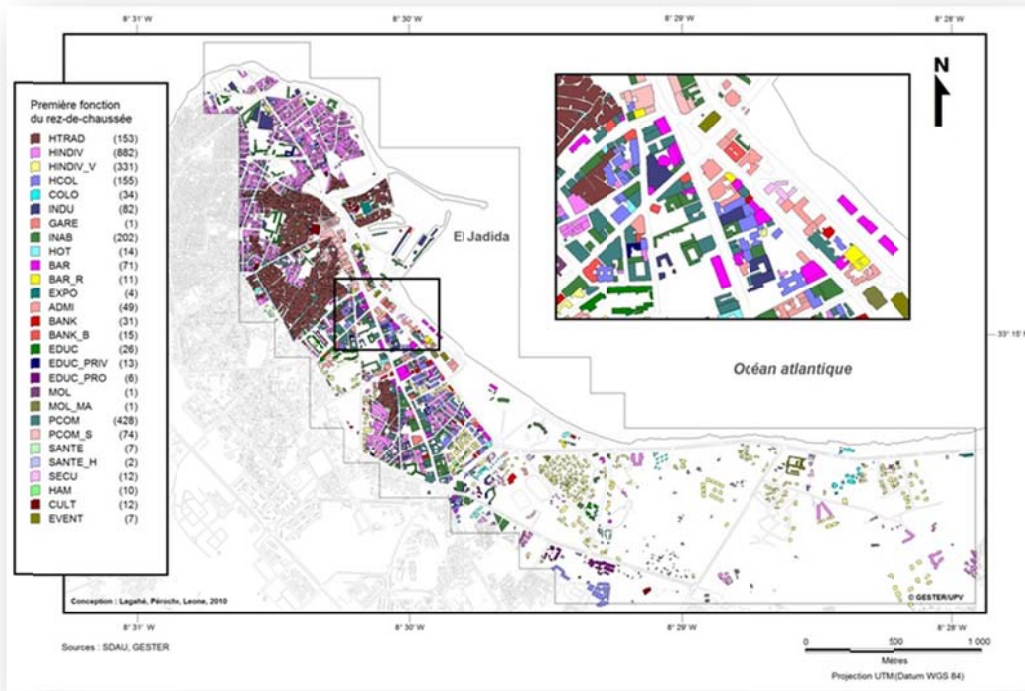


Figure G6 : Typologie des classes fonctionnelles principales des rez-de-chaussée des espaces bâtis.

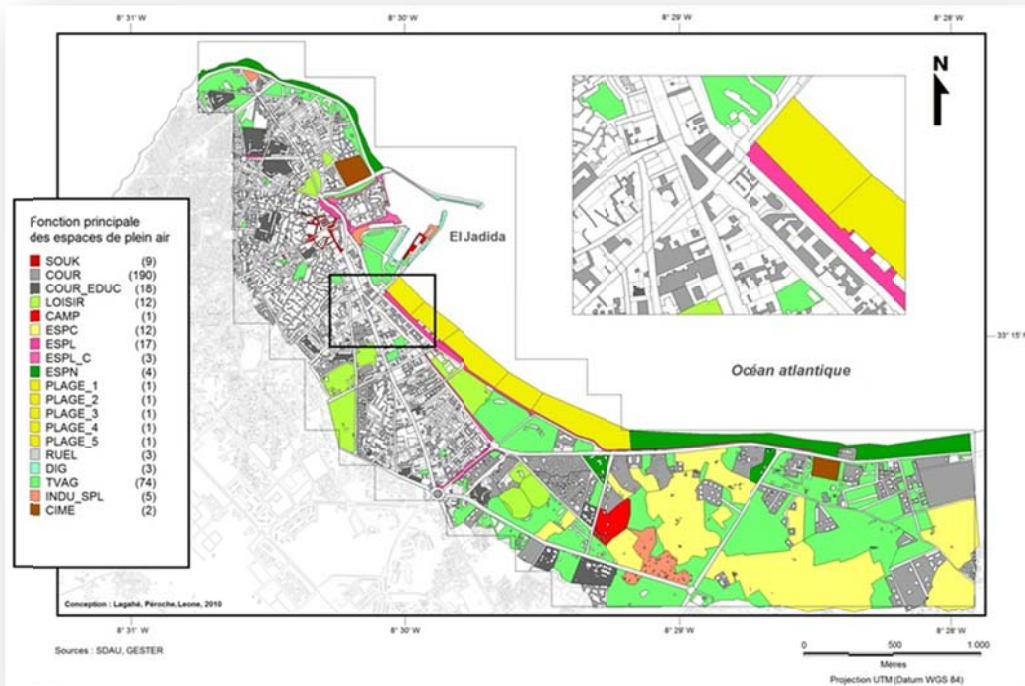


Figure G7 : Typologie des classes fonctionnelles des espaces extérieurs (plein air).

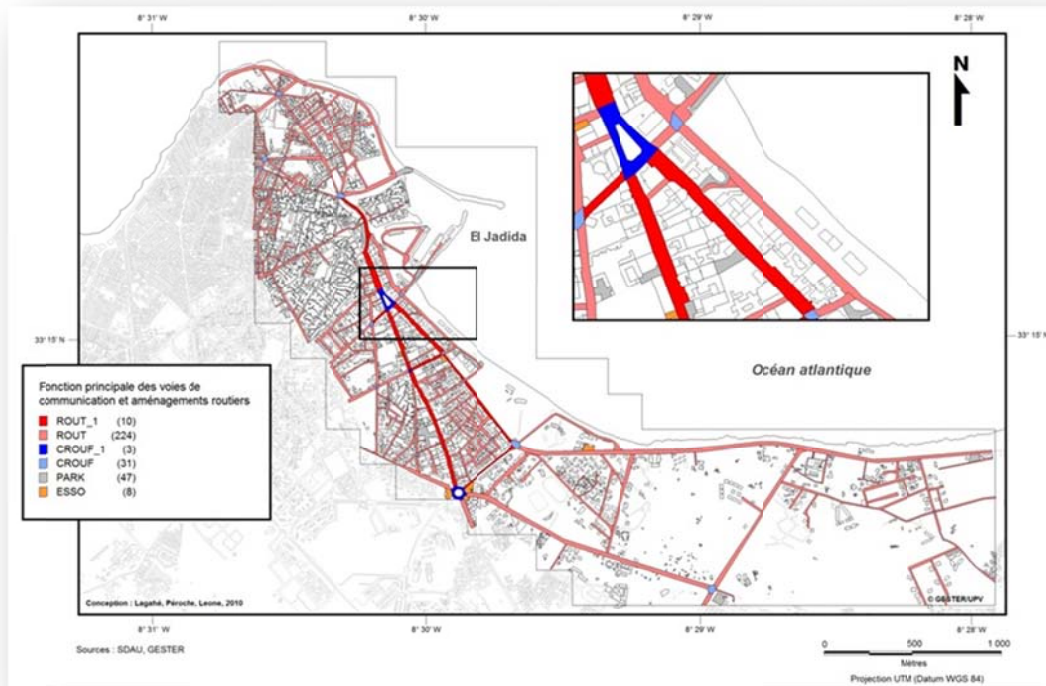


Figure G8 : Typologie des classes fonctionnelles des voies de communication.

G.4 CAPACITE D'ACCUEIL MAXIMALE CREDIBLE (CAMC)

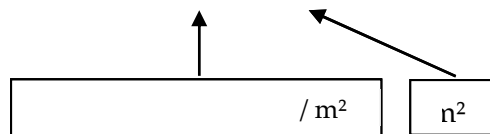
G.4.1 DEFINITION

Chaque polygone de la base de données a été renseigné par une Capacité d'Accueil Maximale Crédible (CAMC) (figure G9). Cette valeur théorique correspond au nombre maximal de personnes susceptibles d'occuper un lieu donné. Suivant les lieux, la CAMC peut être réglementaire, fonctionnelle ou purement théorique. La CAMC réglementaire s'applique à certains lieux recevant du public. Mais au Maroc, ces seuils réglementaires ne sont pas clairement définis et nous avons considéré pour la plupart des lieux publics une capacité maximale fonctionnelle, basée par exemple pour les écoles, sur le nombre total d'élèves inscrits. En l'absence de données statistiques de cette nature, la CAMC a souvent temps été estimée au moyen de comptages lors de moments de très forte affluence.

Les CAMC sont calculées à partir des :

- Densités humaines théoriques (Dh) obtenues par calculs et extrapolations
 - Effectifs obtenus par :
 - Statistiques
 - Comptage
 - Témoignage
- Bien que plus difficile à mettre en œuvre, ces méthodes permettent une meilleure précision dans l'évaluation de la CAMC.

Dans le premier cas : $CAMC = Dh \times Surface$



Dans le second cas, pour un lieu donné : $CAMC = \text{l'effectif maximal du lieu}$

A présent, nous allons détailler l'ensemble des méthodes utilisées pour le calcul des densités humaines théoriques et des effectifs des classes fonctionnelles de la BD. Ces informations ont été obtenues différemment suivant les trois tables.

G.4.2 CAMC DES BATIMENTS

Nous avons estimé les densités humaines théoriques de la table BATI de quatre manières différentes (**tableau G2**) :

1. Par calcul : les statistiques disponibles à l'échelle de la ville ont permis de calculer la densité humaine théorique pour les quatre classes fonctionnelles regroupant les types d'habitat : HINDIV, HINDIV_V, HTRAD et HCOL. Les données de population exploitées proviennent du dernier recensement général marocain (RGPH) de 2004. Nous n'avons pas eu accès aux statistiques détaillées du recensement permettant de différencier les densités de population par quartier. Les données surfaciques moyennes des différents types de logement proviennent de l'agence urbaine d'El Jadida.

2. Par extrapolation : certaines classes fonctionnelles ont été estimées à partir des densités humaines théoriques calculées ci-dessus. On peut citer les classes regroupant les administrations (ADMI) ou encore la classe qui rassemble les services privés (BANK).

3. Par observations de terrain : l'immersion dans le pays permet d'estimer de manière correcte un nombre de personnes maximales. Par exemple les hammams (HAM) sont des espaces totalement fermés et traditionnels. De plus ils sont absents de notre culture, il est donc difficile d'estimer la densité humaine d'un lieu inconnu. En les fréquentant aux heures de pointe nous avons pu appréhender au mieux un nombre maximal de personnes.

4. Par témoignage : par exemple, les mosquées au Maroc sont interdites d'accès aux non musulmans. Seul le témoignage et la mesure d'un tapis de prière permettent l'estimation de la CAMC de cette classe fonctionnelle (CULT).

Pour plus d'exactitude nous avons diminué la densité humaine du rez-de-chaussée des bâtiments de deux classes fonctionnelles : les administrations (ADMI) ainsi que les services privés (BANK). En effet on estime que seul le rez-de-chaussée est accessible au public ; la densité humaine est alors plus forte qu'aux étages.

Les espaces bâtis sont renseignés par trois fonctions différentes : la fonction des étages, une première fonction de rez-de-chaussée et une seconde fonction de rez-de-chaussée. Cette méthode permet non seulement d'identifier les différentes fonctions du bâtiment mais également d'estimer les enjeux humains susceptibles d'être exposés pour une certaine hauteur d'eau.

Calcul de la CAMC du rez-de-chaussée :

$$\text{CAMC_R01_R02} = (\text{DH_R01} \times \text{surface} \times 0,5) + (\text{DH_R02} \times \text{surface} \times 0,5)$$

(Avec DH_R01 : densité humaine de la première fonction de rez-de-chaussée ; DH_R02 : densité humaine de la seconde fonction de rez-de-chaussée).

La surface est multipliée par 0,5 pour les deux fonctions car on considère qu'elles occupent chacune la moitié de la surface du rez-de-chaussée.

Calcul de la CAMC des étages :

$$\text{CAMC_P} = \text{DH_E} \times \text{surface} \times \text{Nb_Etage}$$

(Avec DH_E : densité humaine de la fonction des étages)

La surface au sol du bâtiment est multipliée par le nombre d'étages.

Calcul de la CAMC total du bâtiment :

$$\text{CAMC_TOT} = \text{CAMC_R01_R02} + \text{CAMC_P}$$

Encadré 4 : Principe de calcul de la CAMC des bâtiments à partir des densités théoriques.

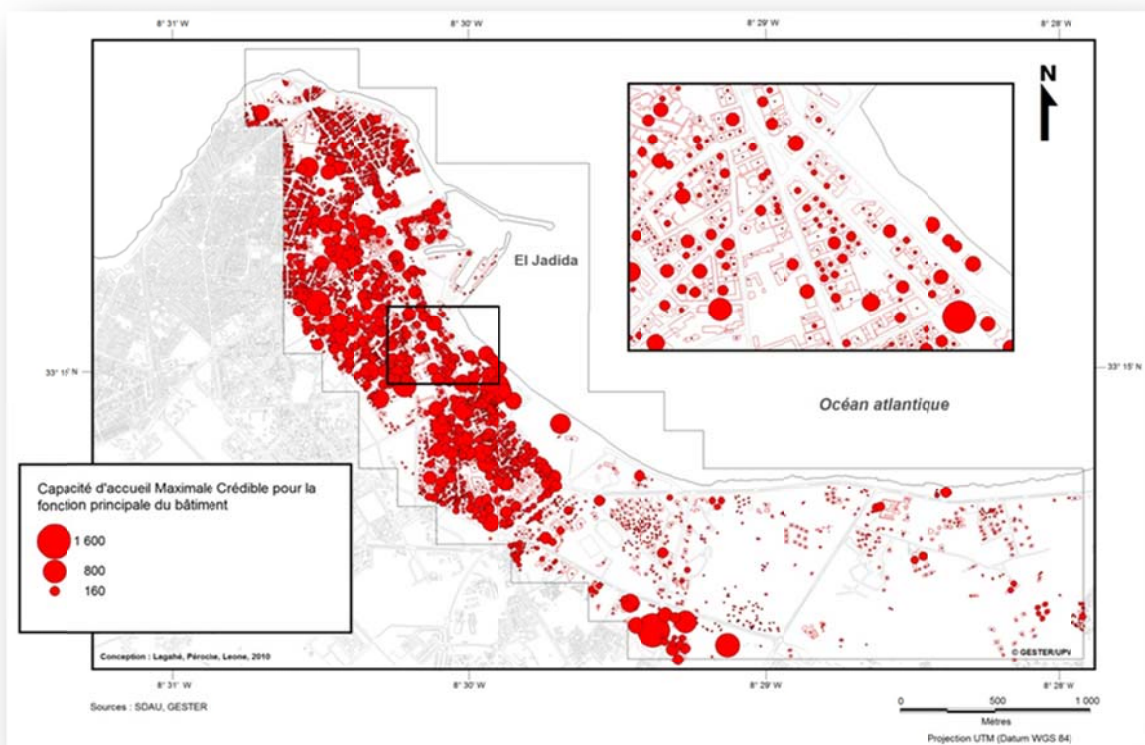


Figure G9 : CAMC des bâtiments (pour fonction principale au rez-de-chaussée).

Les effectifs de la table BATI ont été obtenus par comptage ou au moyen des statistiques disponibles :

1. **Par comptage** : étant donné l'absence de statistiques pour les bars et cafés nous avons compté le nombre de chaises en salle et en terrasse, ce qui correspond en théorie à la CAMC de ces établissements.
2. **Au moyen de statistiques** : celles de la délégation du tourisme ont permis de définir le nombre de lits des hôtels ainsi que le nombre de couverts de certains restaurants de notre zone d'étude. Ces chiffres ont permis d'estimer la CAMC de ces deux classes fonctionnelles, respectivement (HOT) et (BAR_R).

Le calcul des densités humaines ou des effectifs de certains bâtiments a posé certaines difficultés inhérentes à la récolte des données :

Des statistiques difficiles d'accès et pas toujours fiables

L'accès aux statistiques, comme dans la plupart des pays, demande beaucoup de temps, et présente parfois un certain coût. C'est particulièrement vrai au Maroc où nous avons été confrontés à une grande méfiance de la part des autorités marocaines, réduisant toutes nos tentatives à des échecs. Le seul moyen a été d'utiliser nos contacts, évitant ainsi les lourdeurs hiérarchiques internes aux services administratifs. Au final nous avons eu accès aux statistiques du rectorat et de la délégation du tourisme. Cependant, la **fiabilité des statistiques** s'est avérée parfois mauvaise. Nous nous sommes rendus compte, grâce à des témoignages de directeurs d'écoles privées que les statistiques officielles étaient souvent erronées.

Problèmes du comptage

Le comptage du nombre de chaises dans les cafés, les bars et petits snacks s'est avéré difficile. Les patrons et employés se méfiaient de notre présence devant l'enseigne de leur établissement. Le rapport de confiance était difficile à établir et souvent limité par la barrière de la langue.

Le cas des établissements scolaires

Il est compliqué de pénétrer dans l'enceinte d'un établissement, c'est pourquoi l'estimation du nombre d'élèves par bâtiment et par étages a été difficile. L'obtention de ces informations a pris un temps considérable.

Encadré 5 : Quelques difficultés rencontrées sur le terrain pour établir la CAMC des bâtiments.

FONCTIONS		DENSITE HUMAINE THEORIQUE (DH) AU M2	EFFECTIF	REMARQUES	SOURCE DES DONNEES	
S U R F A C E S B A T I M E N T S	HINDIV	HINDIV : Maison marocaine moderne Le nombre d'habitant par ménage équivaut à 4,5. La surface bâtie moyenne d'un logement par parcelle équivaut à 84 m2. Il y a 1 ménage par étage. On a $DH = 4,5 / 84 = 0,05 \text{ personne / m}^2$.	AUCUN	Le nombre d'habitant par ménage est égal à la population de la ville d'El Jadida (156 000) divisée par le nombre de ménages total (34 760). Superficie bâtie moyenne de la région Doukkala Abda pour une maison marocaine "La surface utile est égale au nombre d'étages x la surface bâtie"	Urba_System, 2009; Image Quick Bird, 2009	
	HINDIV	HINDIV_V: villa Le nombre d'habitant par ménage équivaut à 4,5. La surface bâtie moyenne d'un logement par parcelle équivaut à 140 m2. Il y a 2,25 habitants par étage. On a $DH = 2,25 / 140 = 0,01 \text{ personne / m}^2$.		Superficie bâtie moyenne de la région Doukkala Abda pour une villa. Ce calcul considère que toutes maisons de types villas possèdent 1 étage, de ce fait il y aura sous estimation de la densité des villas n'ayant pas d'étages.		
	HTRAD	HTRAD : Maison marocaine traditionnelle Le nombre d'habitant par ménage équivaut à 4,5. La surface bâtie moyenne d'un logement par parcelle équivaut à 84 m2. Il y a 1 ménage par étage. On a $DH = 4,5 / 84 = 0,05 \text{ personne / m}^2$.				
	HCOL	HCOL : Habitat collectif, immeuble Le nombre d'habitant par ménage équivaut à 4,5. La surface d'un appartement moyen est égale à 60 m2. $DH = 4,5 / 60 = 0,07 \text{ personne / m}^2$			La surface d'un appartement moyen a été calculée par rapport à notre immeuble.	Image Quick Bird, 2009
	MOL	MOL : Grande surface, super marché, centre commercial Par extrapolation et observation sur le terrain on a $DH = 0,5 \text{ personne / m}^2$			Les densités qui suivent découlent des calculs des densités HINDIV, HTRAD et HCOL, qui sont calculées à partir de statistiques connues.	Image Quick Bird, 2009
	PCOM	PCOM : Petit commerce, épicerie, marchand Par extrapolation et observation sur le terrain on a $DH = 1 \text{ personne / m}^2$				Image Quick Bird, 2009
	BANK	BANK : Assurance, banque, service privé Par extrapolation, observation sur le terrain et témoignage $DH = 0,3 \text{ personne / m}^2$				Image Quick Bird, 2009
	GARE	GARE : Gare routière, ferrovière, aéroport Par extrapolation, observation sur le terrain et témoignage $DH = 1 \text{ personne / m}^2$			Dans notre zone d'étude seule la gare routière apparaît	Image Quick Bird, 2009
	ADMI	ADMI : service public Par extrapolation, observation sur le terrain et témoignage $DH = 0,3 \text{ personne / m}^2$			Les administrations sont repérables grâce au drapeau marocain	Image Quick Bird, 2009
	CULT	CULT : Mosquée, lieu de culte Par extrapolation et témoignage $DH = 1 \text{ personne / m}^2$				Image Quick Bird, 2009
	COLO	COLO : Centre de colonies de vacances Par extrapolation $DH = 0,5 \text{ personne / m}^2$				Image Quick Bird, 2009
	EXPO	EXPO : Salle d'exposition, musée, lieu touristique Par extrapolation et observation sur le terrain on a $DH = 0,5 \text{ personne / m}^2$				Image Quick Bird, 2009
	HAM	HAM : Hammam Par extrapolation et observation sur le terrain on a $DH = 0,5 \text{ personne / m}^2$				Image Quick Bird, 2009
	SANTE	SANTE : Hopitaux, centre médical Par extrapolation et témoignage $DH = 0,3 \text{ personne / m}^2$				Image Quick Bird, 2009
	INAB	INAB : Habitat abandonné, inhabité 0			0	
HOT	HOT : Hôtel		Comptage ou données statistiques du nombre de lits et du nombre d'employés moyen par établissement	Aucune remarque	Délégation du tourisme, Image Quick Bird, 2009	
INDU	INDU : Logaux industriels, usine, entrepôt		Effectif théorique		Image Quick Bird, 2009	
BAR	BAR : café, bar, restaurant		Comptage du nombre de chaises en terrasse et à l'intérieur de l'établissement, estimation du nombre d'employés moyen par établissement	Pour cette fonction les étages sont le plus souvent des étages intermédiaires (R05).	Image Quick Bird, 2009	
EDUC	EDUC : école, collège, lycée	AUCUNE	Données statistiques sur le nombre d'effectif total et le nombre d'employé moyen par établissement scolaire		Rectorat, image Quick Bird, 2009	
SECU	SECU : Caserne de pompier, poste de police, de sécurité, prison		Nombre d'effectif par établissement	Il n'y a pas de prison dans notre zone d'étude	Image Quick Bird, 2009	
EVENT	EVENT: Etablissement recevant ponctuellement du public, salles de réception, salle de spectacle, théâtre			Cette fonction a la particularité de ne pas avoir de densité propre. Les établissements pourvus de cette fonction sont très vulnérables par leur caractère événementiel.	Image Quick Bird, 2009	

Tableau G2 : Méthodes de calcul des densités humaines théoriques et des effectifs des espaces bâtis.

G.4.3 CAMC DES ESPACES EXTERIEURS (PLEIN-AIR)

Pour 11 des 15 classes fonctionnelles des espaces de plein air, la densité humaine a été déterminée par observation de terrain et extrapolation (tableau G3). Il a fallu estimer le nombre de personnes présentes sur des espaces lors de grands rassemblements.

Les quatre autres classes fonctionnelles (COUR_EDUC, CAMP, ESPC, INDU_PLR) ont été renseignées par un effectif :

- Les cours des écoles : renseignées sur la base de l'effectif de l'école.
- Le camping : les statistiques de la délégation du tourisme nous ont fournis le nombre d'emplacement du camping. Nous avons estimé 4 personnes par emplacement pour obtenir une moyenne.
- Les espaces cultivés nous ont posé problème de par leur surface en général très grande. La densité calculée pour approcher un nombre correct de personnes était beaucoup trop faible, nous avons donc préféré déterminer un effectif de 10 personnes par champ cultivé.
- Les zones industrielles de plein air ont un effectif théorique basé sur l'effectif du bâtiment qu'elles entourent et sur des témoignages.

S U R F A C E S D E P L E I N A I R	CIME : Cimetière	Par extrapolation et observation sur le terrain on a DH = 0,03 personne / m2		Cimetière israéliite	Image Quick Bird, 2009
	LOISIR : Parc, terrain de jeux	Par extrapolation et observation sur le terrain on a DH = 0,30 personne / m2			
	ESPL : Esplanade, promenade	Par extrapolation et observation sur le terrain on a DH = 1 personne / m2			
	SOUK : souk, marché	Par extrapolation et observation sur le terrain on a DH = 2 personne / m2			
	COUR : cour intérieure, jardin interieur	Par extrapolation et observation sur le terrain on a DH = 0,07 personne / m2			
	TVAG : terrain vague , friche industrielle	Par extrapolation et observation sur le terrain on a DH = 0,03 personne / m2			
	SAL : Déchetterie	Par extrapolation et observation sur le terrain on a DH = 0,03 personne / m2			
	ESPN : espace naturel	Par extrapolation et observation sur le terrain on a DH = 0,03 personne / m2			
	RUJEL : rue de la médiina	Par extrapolation et observation sur le terrain on a DH = 0,1 personne / m2			
	PLAGE : Plage	Par extrapolation et observation sur le terrain on a DH = 1 personne / m2			
	COUR_EDUC : Cours des écoles			Effectif de bâtiment de l'école	
	ESPC : Espace cultivé		10 personnes par champs cultivé.		
	CAMP : Camping		Statistique de la délégation du tourisme, nombre d'emplacement x 4 personnes	Délégation du tourisme, image Quick Bird 2009	
	INDU_SPL : zone industrielle		Effectif observation du terrain ou l'effectif du bâtiment		

Tableau G3 : Méthodes de calcul des densités humaines théoriques et des effectifs des espaces extérieurs (de plein air).

G.4.4 CAMC DES VOIES DE COMMUNICATION

Les densités humaines des classes fonctionnelles des voies de communication ont été estimées par extrapolation. Dans l'objectif d'évaluer plus précisément cette densité, nous avons décidé de calculer la proportion moyenne de la largeur d'un trottoir par rapport à la largeur des routes. Ce travail a été réalisé à partir de l'image QuickBird sur 30 rues de la ville. Les trottoirs occupent environ 17 % de l'espace des voies de communication. Ainsi, nous avons pu différencier une surface de route et une surface de trottoir théorique, pour l'ensemble des objets de la table VOIE DE COMM. Nous avons ensuite appliqué une densité de 0,3 personne /m² pour la surface de trottoir et 0,5 personne /m² pour la surface de route (tableau G4).

V o i e s d e c o m m u n i c a t i o n	CROUF : carrefour principaux et secondaires	Surface CROUF_seul	Densité humaine à l'intérieur des véhicules = 0,3 personne / m2			
		Surface CROUF_pieton	Densité humaine à l'extérieur des véhicules (piétons) = 0,5 personne / m2			
	ROUT : principales et secondaires	Surface ROUT_seul	Densité humaine à l'intérieur des véhicules = 0,3 personne / m2			
		Surface Rout_pieton	Densité humaine à l'extérieur des véhicules sur les trottoirs (piétons) = 0,5 personne / m2			
	PARK : Parking		Par extrapolation et observation sur le terrain on a DH = 0,30 personne / m2			
	ESSO : Station essence, garage		Par extrapolation et observation sur le terrain on a DH = 0,30 personne / m2			

Tableau G4 : Méthodes de calcul des densités humaines théoriques des voies de communication.

Les lundi, mardi et jeudi sont les jours représentatifs d'une journée type sur la ville d'El Jadida. Les autres jours de la semaine, les rythmes de vie changent.

- Le **mercredi**, les élèves n'ont pas école. De ce fait, les établissements scolaires qui sont des espaces particulièrement vulnérables sont vides. A contrario, les rues, les cours et les maisons concentrent un plus grand nombre d'enfants.
- Le **vendredi**, les pratiques de la ville diffèrent du reste de la semaine, le rythme de vie est plus lent. Les lieux de cultes attirent plus de fidèles lors des 5 prières de la journée. Les administrations et services privés ferment plus tôt.
- Le **week-end**, les administrations sont fermées, quelques services privés sont ouverts le samedi matin. Les seuls commerces ouverts le dimanche sont les souks en centre-ville. Ils attirent un grand nombre de personnes en fin d'après-midi. Il est essentiel de noter que la ville attire un nombre important de marocains venus des grandes agglomérations voisines durant le week-end. El Jadida est un lieu de ballade apprécié pour sa plage et ses nombreux cafés.

Il faut distinguer la fréquentation de la ville entre la **basse saison** (octobre-mai) et la haute saison (juin-septembre). Ce qui est d'autant plus important pour une ville balnéaire telle qu'El Jadida. Nous avons donc choisi une journée type basée sur des jours de basse saison où le rythme de vie est le même.

Encadré 6 : Les journées types retenus pour mesurer la fréquentation de la ville.

G.5 TAUX ET COURBES DE FREQUENTATION (TF)

G.5.1 DEFINITION

Le taux de fréquentation humaine correspond à la proportion de la CAMC présente à un instant t sur un espace donné. Il est compris entre 0 et 1 (ou 100%). Il a été estimé pour chaque classe fonctionnelle au pas de temps horaire (entre 0 et 24 h) et a été exprimé sous forme de courbes de fréquentation. Au final, la pondération de ces taux par la CAMC ($CAMC \cdot TF$) permet d'estimer par extrapolation le nombre de personnes présentes, sur chaque espace de la ville, heure par heure, pour 3 journées type (**lundi, mardi, jeudi**), en **haute et basse saison**. Ces taux de fréquentation horaires sont estimés ou calculés au moyen de différentes méthodes de comptage de lieux représentatifs de chaque classe fonctionnelle. Ils ont été établis en reportant en priorité les pics et creux de la fréquentation (*extrema*), en intégrant nos connaissances des rythmes urbains, et en interpolant la courbe entre ces quelques points de mesure. Le résultat obtenu est une cartographie dynamique de l'occupation de la ville, exprimée soit en effectif absolu, soit en densité humaine au m^2 .

G.5.2 METHODES DE COMPTAGE

Les courbes de fréquentation ont été construites grâce à l'élaboration d'un protocole de comptage. Cependant, par manque de moyens, ce protocole a été mis en place uniquement pour quatre classes fonctionnelles de la table PLEIN AIR : plage (PLAGE), parcs et espaces de loisirs (LOISIR), marchés et souks (SOUK), esplanade (ESPL) et toutes celles de la table VOIE DE COMM.

Notre connaissance du rythme de vie de la ville d'El Jadida associée à un comptage heure par heure a permis l'élaboration de courbes relativement précises. Par manque de moyens et de temps, le comptage a été effectué sur des « espaces référents ». Les courbes de fréquentation des routes de référence ont ensuite été extrapolées à toutes les routes de la zone d'étude.

La méthode de comptage utilisée se réfère à divers travaux déjà réalisés (Audouit, 2008 ; Robert et al, 2008). Elle est basée sur des techniques simples. Nous avons retenu le procédé de la prise de vue photographique. Le choix du site de la prise de vue est primordial. Il doit permettre de constituer un corpus d'images de qualité couvrant la totalité du site à étudier et de distinguer chaque usager afin d'obtenir des résultats satisfaisants. Il faut donc choisir un site qui surplombe la zone d'étude, avec un angle de vue relativement large. Il convient de faire attention aux horaires d'ouverture et de fermeture du lieu choisi.

Durant les journées types, nous avons fait des vidéos ou photographié les usagers, heure par heure, de 7h du matin à 20h, suivant deux parcours prédéfinis (figure G10). Ces créneaux horaires nous ont permis d'apprécier au mieux les variations intra journalières de la fréquentation urbaine. Les comptages ainsi obtenus sont à prendre comme ordre de grandeur. Ils permettent d'établir les courbes de fréquentation.

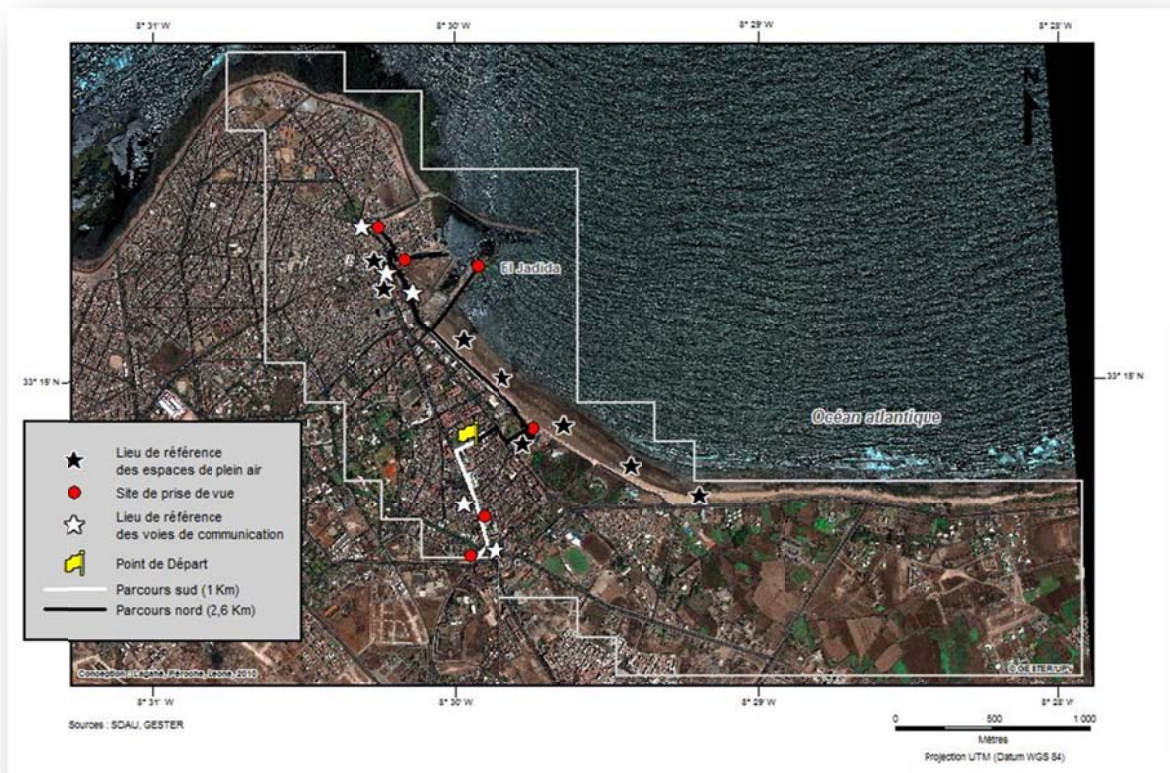


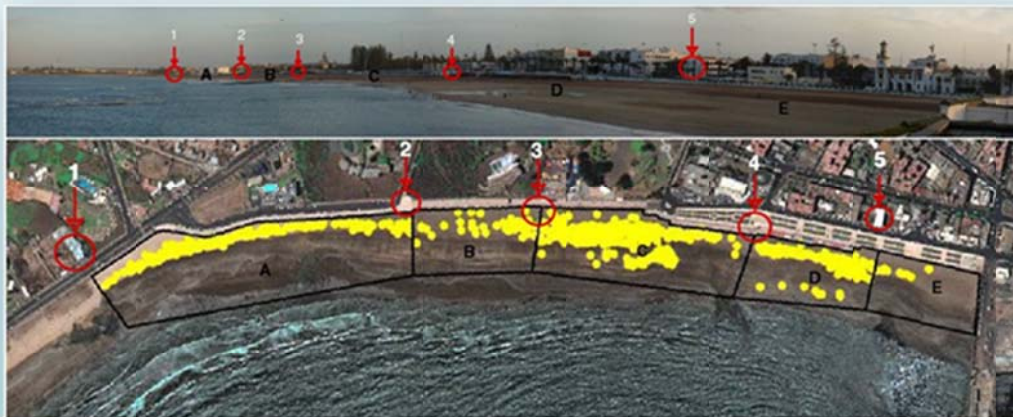
Figure G10 : Tracés des deux itinéraires de prises de vue pour le comptage.

Les courbes hautes saisons offrent une première modélisation du rythme de vie de la ville en été. Cependant, il conviendrait de mettre en place le protocole de comptage sur cette période, afin de mieux en appréhender la réalité. Les limites de cette méthode de comptage sont d'une part : matérielles et météorologiques. Par exemple la tombée de la nuit ou encore la brume sur la plage nuisent à la bonne qualité du rendu photographique. Les conditions météorologiques influent également sur la fréquentation des lieux. D'autre part, cette méthode a permis de construire seulement 13 courbes de fréquentation sur 49. Ces 13 courbes ont des taux de fréquentation obtenus par comptage entre 7h et 20h tandis que les heures restantes ont été obtenues par interpolation.

Etudier la fréquentation des personnes par heure dans une journée permet de mieux connaître les habitudes des usagers et de repérer les heures d'affluence. En prenant des données sur toute la journée, le système est cohérent, ce qui permet de réutiliser les données pour estimer une fréquentation hebdomadaire, mensuelle et saisonnière.

La fréquentation de la plage mérite une attention particulière. Cet espace est certainement le plus vulnérable de la ville. Durant la journée, le nombre d'usagers ne cessent de varier au rythme des marées. La plage prise en compte s'étend sur 1,6 km environ. Le site de prise de vue a été choisi de façon à ce que toute cette plage puisse être photographiée. Il se situe au bout de la jetée sud du port. Dans un souci de précision dans l'analyse de fréquentation intra-journalière de la plage, celle-ci a été découpée en différentes portions. Sur le terrain, nous avons constaté que certaines portions de plage étaient davantage pratiquées par les usagers. Ces différenciations ont été confirmées par comptage des parasols visibles sur l'image QuickBird (points jaunes, figure ci-dessous). L'image montre des discontinuités dans la densité du nombre de personnes. L'image satellite prise en été vers 11h30 du matin permet d'identifier des espaces privilégiés par les estivants. Ces différenciations visibles en été se retrouvent en partie dans les pratiques des usagers durant la basse saison (foot et promenades).

Les parties A, C et D de la plage sont des espaces privilégiés par les usagers. Cette fréquentation préférentielle de la plage peut s'expliquer par la proximité de la ville, des parkings et des infrastructures hôtelières. En revanche les parties B et E sont moins fréquentées car moins accessibles ou trop proche des aménagements portuaires. La rupture de densité de population visible dans la partie B sur l'image QuickBird ne se retrouve pas aussi nettement dans la réalité. Des repères visuels alignés sur les limites des différentes parties de la plage ont dû être établis sur le terrain afin de faciliter le comptage du nombre de personnes (points en rouge sur la figure).



Découpage de la plage en 5 zones de fréquentations différentes

Encadré 6 : Méthode de comptage : le cas de la plage.

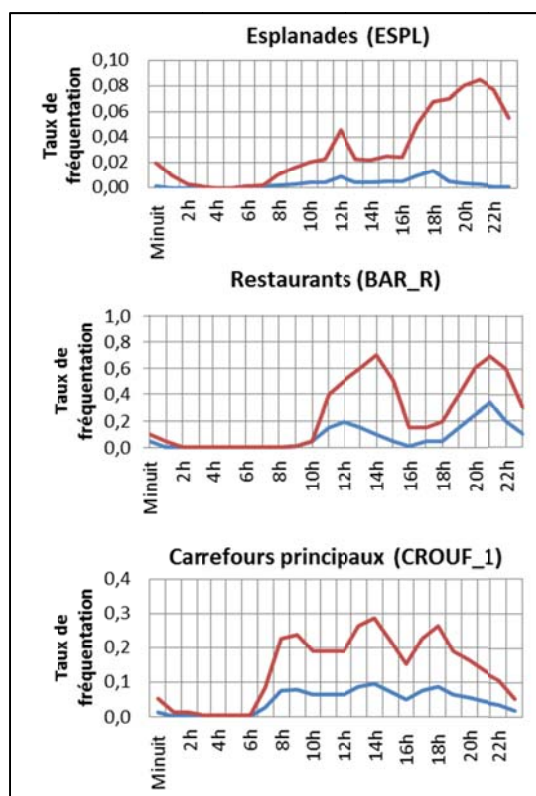


Figure G11 : Exemples de courbes de fréquentation horaire de 3 espaces de vie (en bleu : basse saison ; en rouge : haute saison touristique).

Ces trois graphiques (figure G11) représentent les courbes de fréquentation heure par heure des fonctions restaurant (BAR_R), esplanade (ESPL) et carrefours principaux (CROUF_1) pour la période basse saison (en bleu) et haute saison (en rouge). Les taux de fréquentation pour les espaces de plein air et voies de communication sont souvent très bas, étant donné la grande superficie de ces espaces. Les autres courbes sont en annexe 1.

G.5.3 AMELIORATIONS ET LIMITES DES COURBES DE FREQUENTATION

Afin d'augmenter la précision du modèle de mobilité urbaine, on peut également différencier les classes fonctionnelles par rapport à leur situation dans la ville. Ce travail a été réalisé pour les petits commerces du souk, qui ont des taux de fréquentation très différents des autres petits commerces de la ville. En effet, nous avons constaté que les commerces du souk avaient des horaires distincts, notamment le dimanche. De nombreuses améliorations pourraient être réalisées en ce sens. Cependant, le fait de s'attacher à la précision de la fréquentation de chaque lieu de la ville demande un temps considérable.

Nous avons été confrontés à quelques difficultés dans l'élaboration des courbes de fréquentation de certaines classes fonctionnelles. C'est le cas pour les lieux de culte, les heures de prières variant en fonction de l'heure de levée du soleil. Nous avons donc décidé de prendre en compte un créneau horaire suffisamment étendu qui tienne compte de ces fluctuations.

La construction des courbes de fréquentation relatives aux classes fonctionnelles de la table BATI s'est faite de manière empirique sur la base de témoignages et d'investigations de terrain. Par exemple, le témoignage de certains serveurs de cafés a permis d'estimer précisément les pics et les creux de fréquentation durant une journée. Ces ordres de grandeurs ont fixé les variations générales de la journée. Les heures comprises entre ces *extrema* ont été déterminées par interpolation. Le fait d'interpoler sous-entend d'avoir une bonne connaissance du rythme de vie de la ville. Il convient donc de s'intéresser aux horaires d'ouverture des administrations, des services publics, des écoles, des commerces...qui renseignent sur l'heure à laquelle le bâtiment se remplit et se vide.

Ces courbes permettent de traduire les grandes tendances du rythme de vie de la ville d'El Jadida à travers la modélisation de variabilité spatiale du nombre de personnes, au cours d'une journée.

G.5.4 RESULTATS CARTOGRAPHIQUES

Les étapes précédentes ont permis de quantifier le nombre de personnes théoriques heure par heure pour chaque objet des trois tables. Ces effectifs peuvent être représentés en valeur absolue (figure G12) ou sous forme de cartes de densités, plus adaptées aux traitements qui vont suivre lors de la construction d'indices de risque humain.

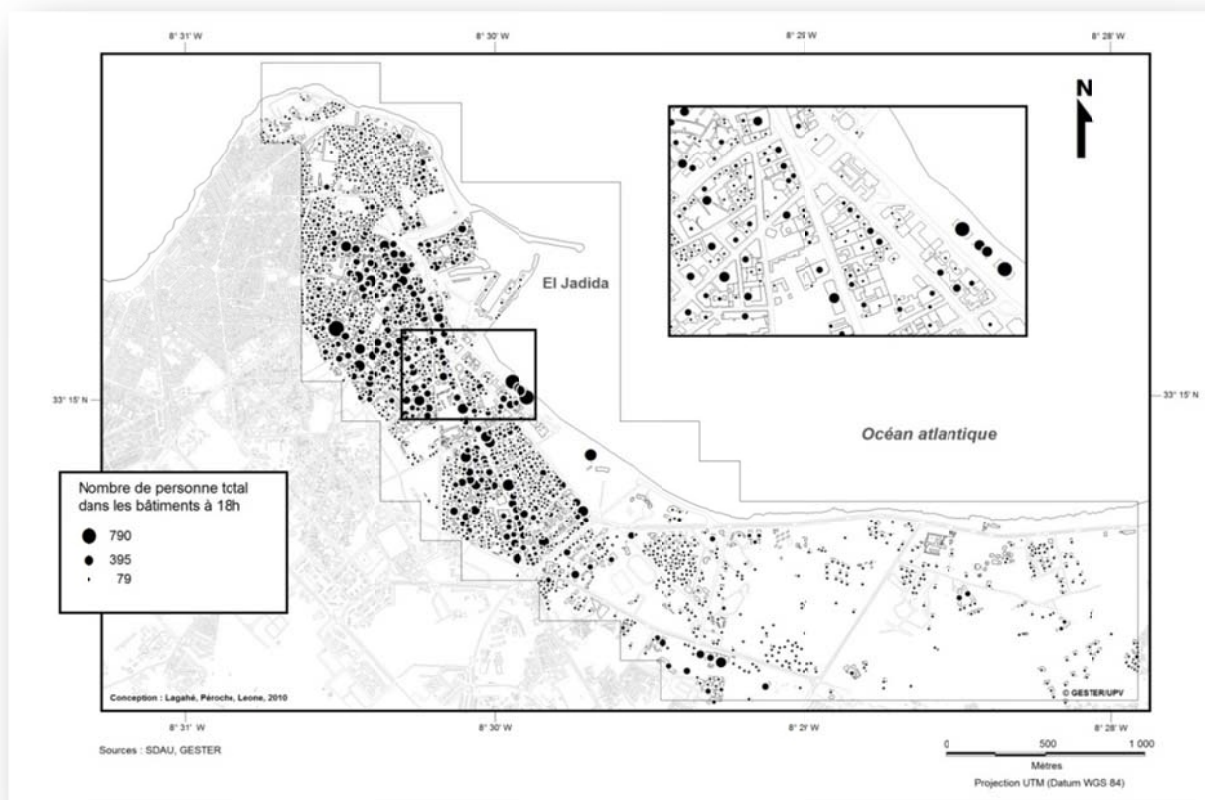


Figure G12 : Modélisation du nombre de personnes occupant un bâtiment à 18h, en basse saison.

Le calcul de la densité humaine de chaque polygone des trois tables a été effectué sous Excel, puis cartographié dans MapInfo (figure G13). Elle permet de visualiser la dynamique d'occupation de la ville au moyen de 48 cartes (24 pour chaque saison). L'ensemble des cartes est visible en annexe 2.

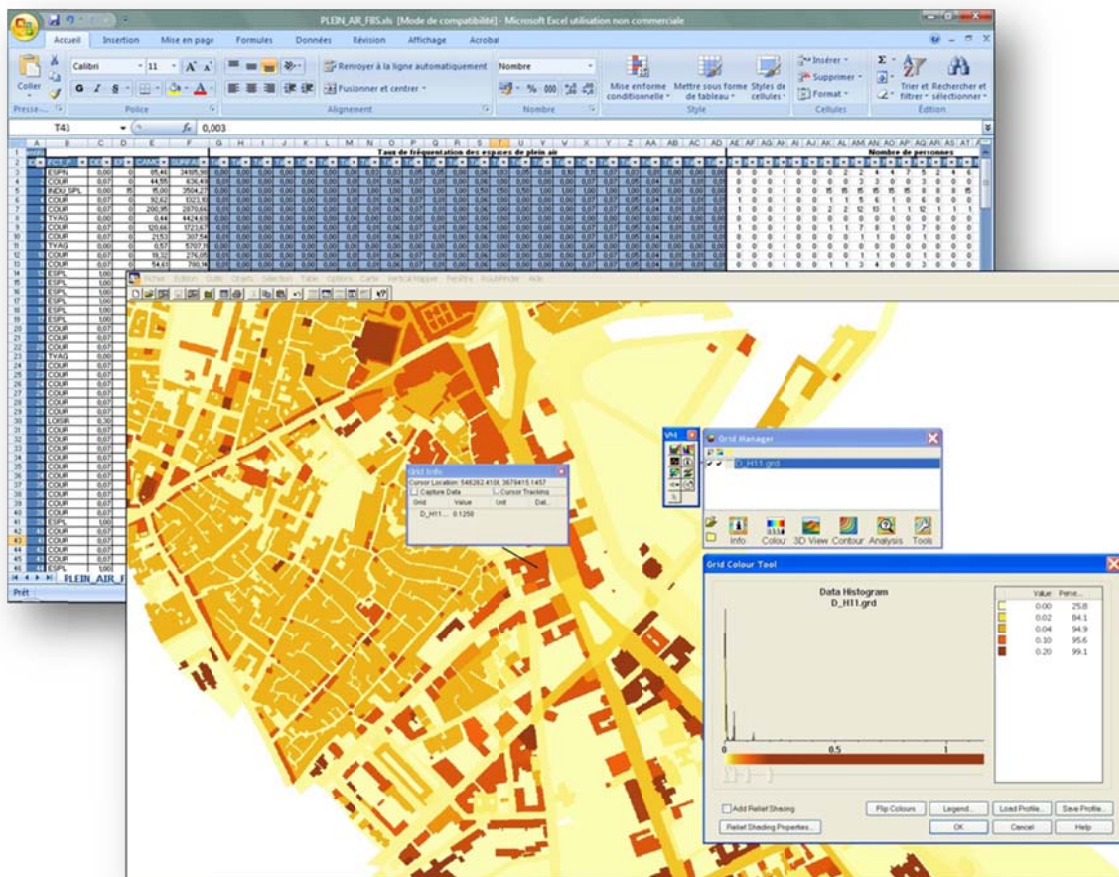


Figure G13 : Traitement des données sous Excel et cartographie sous MapInfo pour la construction des cartes de densité au pas horaire.

G.5.4.1 Analyse des variations horaires

La localisation des individus au moment du tsunami est un des facteurs déterminants de la vulnérabilité humaine. Cette distribution spatiale des personnes évolue tout au long de la journée, c'est pourquoi nous avons réalisé un modèle de mobilité humaine intra urbain. Il permet d'évaluer les enjeux humains heure par heure durant une journée. Nous allons voir à travers quelques exemples ces variations spatio-temporelles (figure G14).

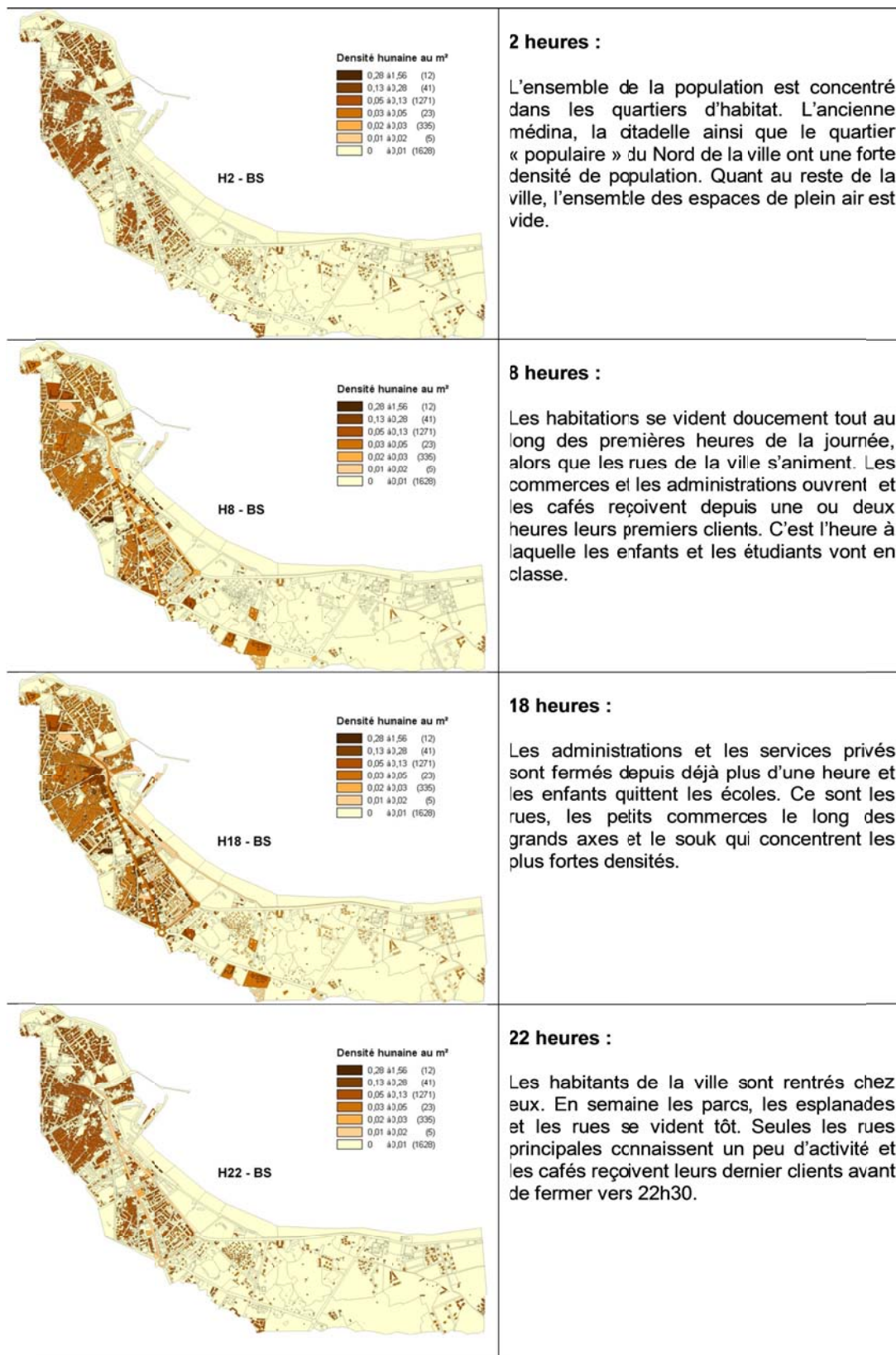


Figure G14 : Comparaison des densités humaines (au RdC pour bâti) pour 4 moments de la journée (basse saison).

L'analyse de ces cartes de densité humaine aux différentes heures d'une journée met en exergue la mobilité des enjeux humains. L'impact d'un tsunami variera suivant le moment de la journée. Lors d'un pic de fréquentation, par exemple à 18h, les individus se rassemblent sur les espaces publics ou sur la plage. La probabilité de pertes humaines sera ainsi plus élevée que si le tsunami frappe la ville vers 2h du matin à un moment où la population se concentre dans les quartiers d'habitats plus éloignés du littoral.

G.5.4.2 Analyse des variations saisonnières

En été la population d'El Jadida est multipliée par 5. L'ensemble des espaces de plein air et des voies de communication présente une densité de population beaucoup plus élevée en journée. C'est particulièrement vrai pour la plage et les routes principales (figure G15).

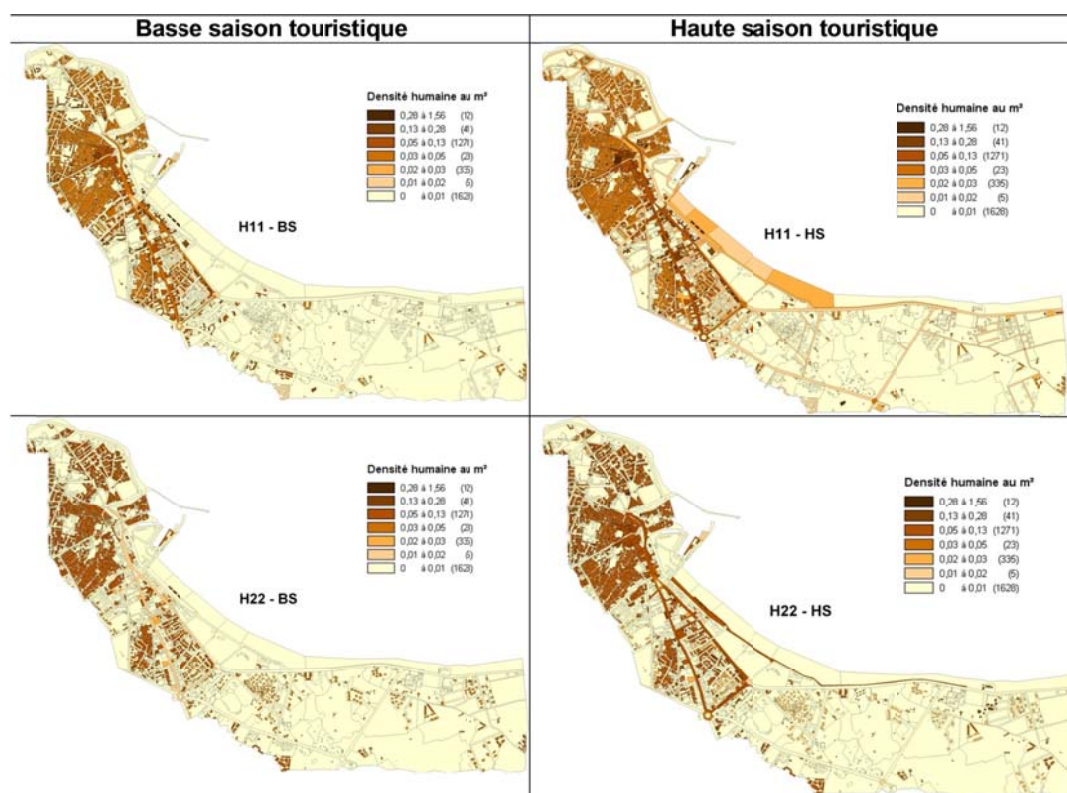


Figure G15 : Comparaison des densités humaines (au RdC pour bâti) suivant les saisons (pour 11h et 22h).

En été, alors que la température diminue progressivement avec le coucher du soleil, les habitants et touristes se baladent sur les esplanades de la ville jusqu'à tard dans la soirée. C'est l'occasion pour les jeunes de se retrouver entre eux, et aux plus âgés d'aller boire un café en terrasse. En hiver par contre les rues sont désertées beaucoup plus tôt.

H CARTOGRAPHIE MULTI-TEMPORELLE DU RISQUE SUR EL JADIDA

H.1 PRINCIPE DU CALCUL DES INDICES DE RISQUE

Dans son acception analytique, le risque se définit comme l'espérance mathématique des pertes potentielles (Leone, 2007). Dans le cadre de cette étude nous avons tenté de quantifier ce risque, non pas pour exprimer un quelconque bilan humain pour les scénarios retenus, ce qui nous paraît totalement illusoire, mais pour analyser sa variabilité spatiale et temporelle sur un espace défini. Cette mesure du risque s'est faite au moyen d'un indice de risque de pertes humaines (exprimé entre 0 et 1), qui conformément à l'expression courante et analytique du risque, combine à la fois des critères d'aléa, de vulnérabilité et d'enjeux.

Les critères d'aléa retenus sont ceux fournis par le modèle d'inondation (vitesse et profondeur). La vulnérabilité est estimée par le biais d'une probabilité de décès (Pd) prenant en compte des relations empiriques entre ces paramètres d'aléa et les principaux critères de vulnérabilité retenus, et les enjeux sont représentés par les effectifs de population. L'Indice de risque humain (IRh) sera obtenu par le produit des probabilités de décès (Pd) et des effectifs de population (Ep) - reconstitués à partir des densités humaines (Dh) - et ramenés entre 0 et 1 par division avec la valeur maximale (Epmax) de notre échantillon, soit :

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

H.2 MATRICES DE PROBABILITES DE DECES

Ces probabilités de décès (Pd) sont définies empiriquement au moyen de différentes corrélations statistiques établies à la faveur de retours d'expérience, entre certains paramètres d'aléa et certains critères de vulnérabilité. Exprimées entre 0 et 1, elles ont été hiérarchisées en 4 classes : **Très forte (1)**, **Forte (0,75)**, **Moyenne (0,50)**, **Faible (0,25)**. La valeur nulle s'appliquant uniquement aux secteurs non inondés. Ces probabilités sont fondamentalement différenciés suivant l'exposition des personnes : à l'intérieur ou à l'extérieur d'un bâtiment. Elles seront rassemblées au sein de matrices qui s'inspirent, dans leur principe de construction, à celles établies par le HR Wallingford (2006) pour les inondations par débordement de cours d'eau.

H.2.1 PERSONNES DE TROUVANT A L'EXTERIEUR D'UN BATIMENT

Les personnes situées à l'extérieur sont plus exposées aux effets 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. Nous avons tenté d'intégrer ces principales composantes de leur vulnérabilité au moyen de matrices de probabilités de décès (**tableau H1**). Le principe de ces matrices est de fixer la probabilité maximale de décès (valeur 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, sans chercher pour le moment à différencier ces individus sur des critères de résistance physique, d'endurance, de préparation psychologique, etc.

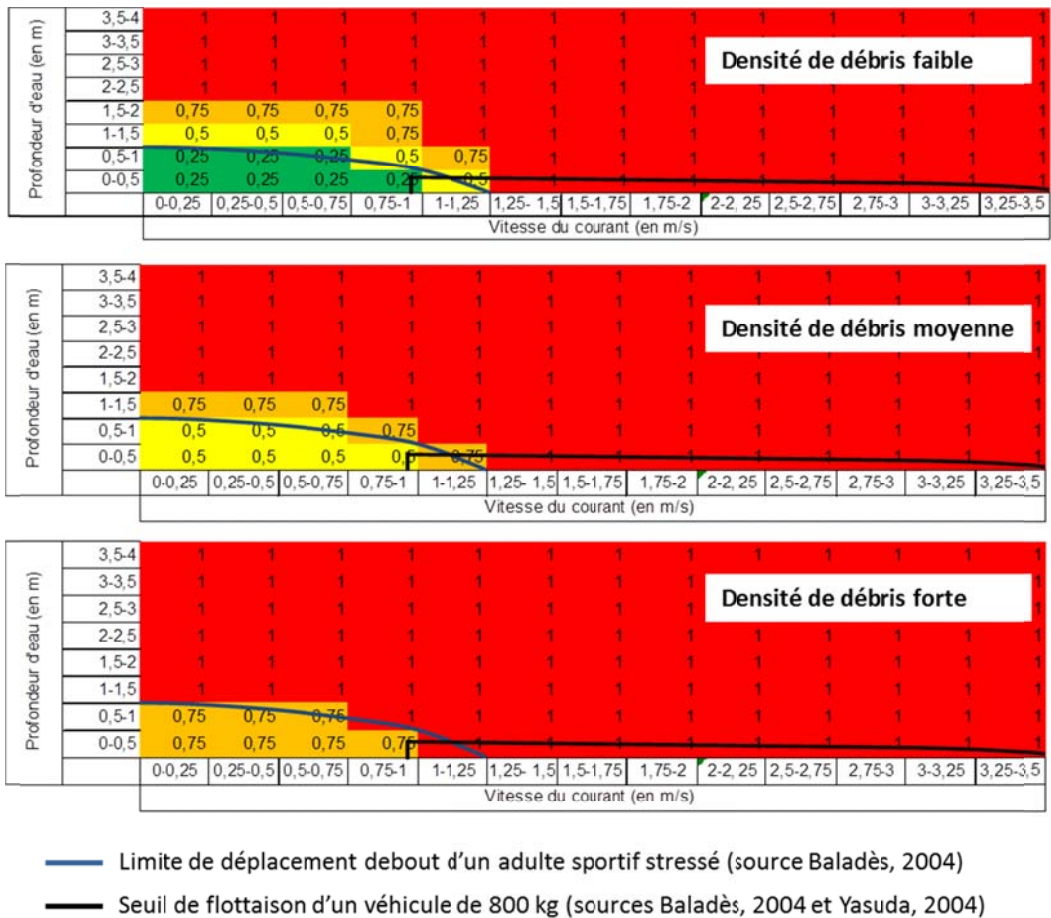


Tableau H1 : Matrices de probabilité de décès (Pd) des personnes se trouvant à l'extérieur (variabilité en fonction des densités de débris flottants potentiels).

Le seuil d'aléa pris en compte pour $P_d \geq 0.5$ 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. Cette courbe empirique est issue d'une étude sur le ruissellement périurbain (Baladès et al., 2004, figure H2). D'après cette étude, 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. Ils varient donc avec la capacité de résistante physique des individus.

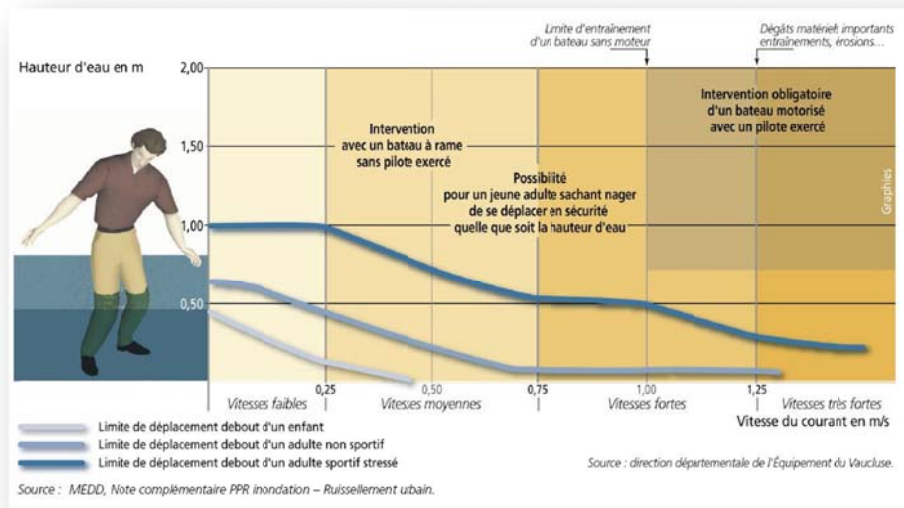


Figure H2 : Limites de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d’eau et de la vitesse du courant (Baladès, 2004 in DDE 84).

Notre matrice de probabilités de décès incorpore également un autre seuil critique qui correspond à la hauteur d’eau à partir de laquelle un véhicule standard de 800 kg peut se mettre à flotter (tableau H2). On peut considérer qu’au-delà de ce seuil, les individus situés à l’extérieur verront leur probabilité de mourir augmenter fortement par effets d’impact. Il en sera de même pour les personnes se trouvant à l’intérieur d’un véhicule et qui seront emportés avec leur véhicule. Le seuil de mise en mouvement a été fixé à 0,30 cm d’eau. Il est également donné par l’étude précédente (Baladès et al., 2004). Ce seuil est en dessous de la valeur de 0,70 cm donnée par une autre étude (Yasuda, 2004) mais sans tenir compte de la vitesse du courant (figure H3).

Pente**	0,1	0,6	1	2	4	5
Hauteur max*	28,3	25,3	23,5	20,3	15,6	13,7
Vitesse***	0,8	1,9	2,3	2,9	3,5	3,6

* en cm - ** en % i.e en cm/m - *** en m/s.

Tableau H2 : Seuils de mise en mouvement par flottaison d’un véhicule de 800 kg ayant une hauteur de caisse de 0,15 m (Baladès, 2004).

Inundation Depth(m)	Inundation Level	Damage Level
~ 0.1	Middle of the tire	Foot break does not work well
0.1 ~ 0.3	Step of the door	Clutch disk broke down of the automatic car
0.3 ~ 0.5	0.2m over the step of the door	Car body starts to flow
0.5 ~ 0.7	Middle of the door	Difficult to open the door
0.7 ~	0.2m over the door	Vehicle may be washed away the flood

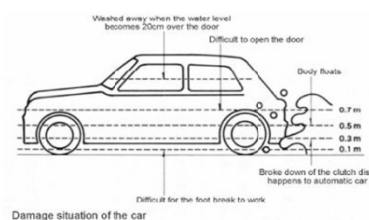


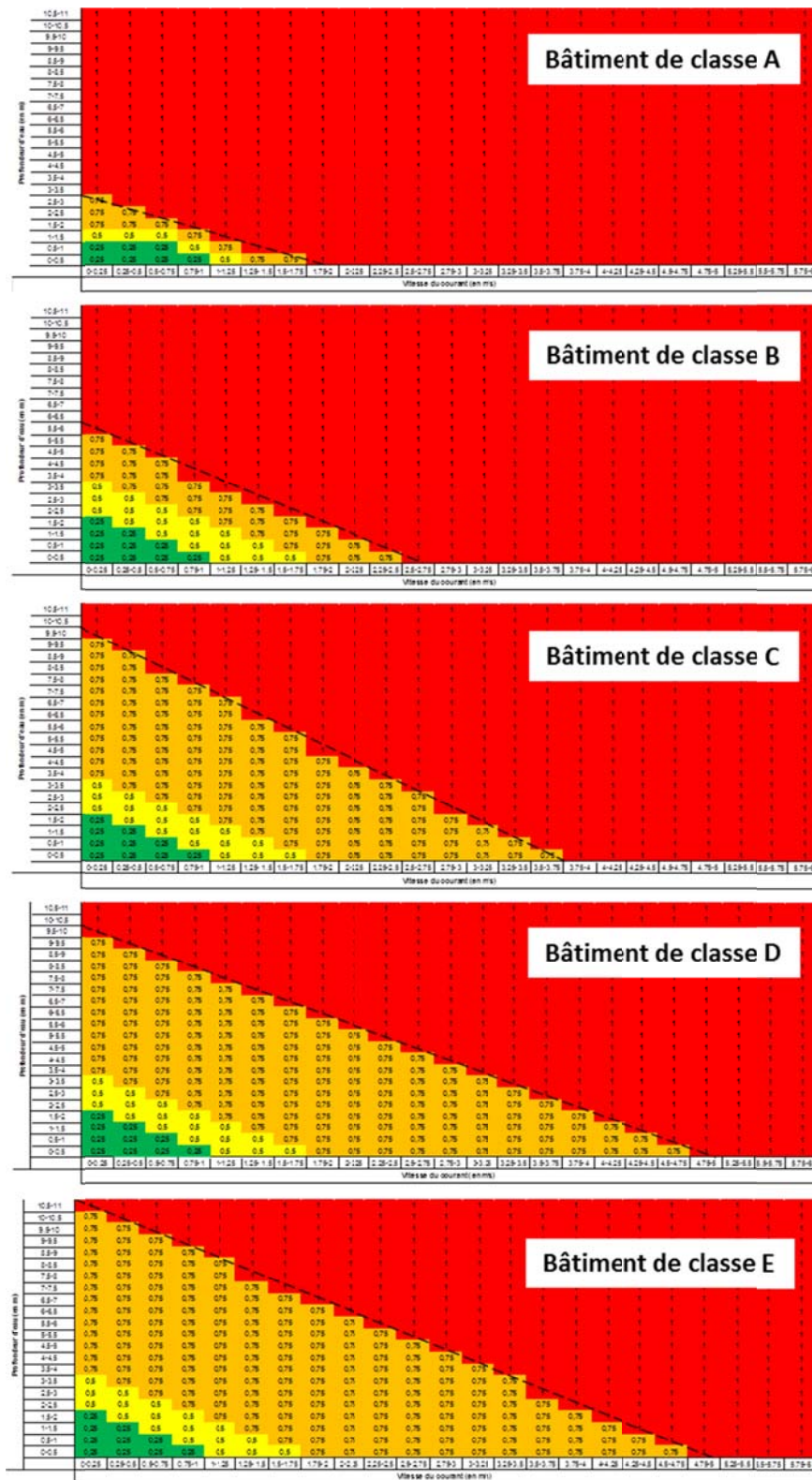
Figure H3 : Endommagement d’un véhicule en fonction de la hauteur d’eau (Yasuda, 2004).

En fonction des classes de densité de débris flottants potentiels, le passage d'une matrice à l'autre s'est fait en suivant les règles de pondération suivante : + 0.25 (max. 1) si la classe de densité de débris est moyenne et + 0.50 si elle est forte.

H.2.2 PERSONNES DE TROUVANT A L'INTERIEUR D'UN BATIMENT

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. On sait que ce niveau de protection va dépendre de la résistance des structures 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 », nous avons construit dans un premier temps une matrice de probabilité de décès par classe de bâtiment (tableau H3). Nous avons dans chaque matrice fait l'hypothèse que la probabilité de décès devenait maximale ($P_d = 1$) à partir de ces seuils. En deçà, ces probabilités ont été établies intuitivement en suivant un gradient fonction des hauteurs et vitesses du courant.

Ces matrices intègrent les seuils de destruction totale (D5) donnés par les courbes de vulnérabilité empiriques construites (Leone, 2010) ou extrapolées (Gauraz, 2009) à partir de nos relevés de dommages effectués après le tsunami de 2004 à Banda Aceh (Indonésie) (figure H3). Le fait d'avoir établi une typologie du bâti d'El Jadida la plus proche de celle réalisée en Indonésie, nous permet ainsi de valoriser cet apprentissage du terrain mené pour la première fois après un tsunami. Ces seuils d'endommagement critique ont donc été fixés à partir des hauteurs d'eau données par ce retour d'expérience. Par contre les vitesses correspondantes ont été estimées à partir d'une autre étude menée par Koshimura (2009). Cet auteur ne différencie pas les bâtiments exposés et donne des probabilités de dommage maximales (proches de 1) pour des vitesses d'eau comprises entre 2 et 6 m/s (figure H4). Ces seuils de destruction totale de chaque classe de bâtiment sont donnés par le tableau H4.



— — — Seuil de destruction totale du bâtiment (sources : Leone, 2010 ; Gauraz, 2009, Koshimura, 2009)

Tableau H3 : Matrices de probabilité de décès (Pd) des personnes se trouvant à l'intérieur des bâtiments (variabilité en fonction de la classe de vulnérabilité du bâti).

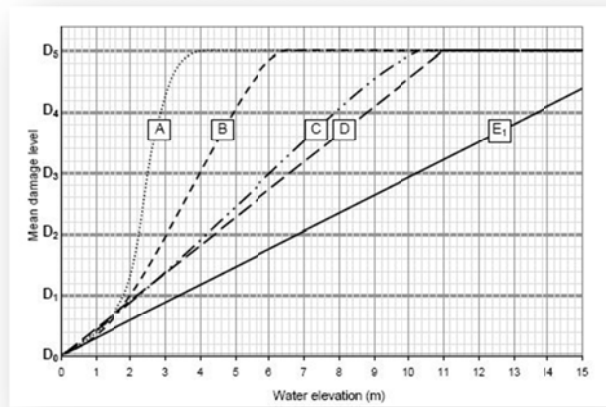


Figure H3 : Courbes d'endommagement moyen des différentes classes de bâtiments en fonction de la hauteur d'eau (Gauraz et al., 2009).

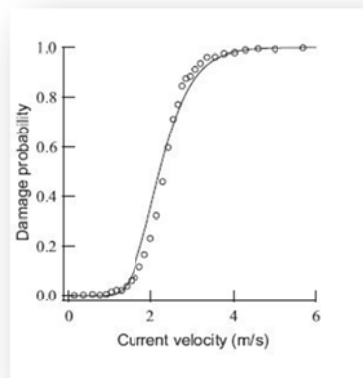


Figure H4 : Courbe de probabilité d'endommagement du bâti en fonction de la vitesse du courant (Koshimura, 2009).

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

Tableau H4 : Seuils de destruction totale de chaque classe de vulnérabilité des bâtiments (sources : Leone, 2010 ; Gauraz, 2009, Koshimura, 2009).

Ces matrices s'appliquent uniquement aux personnes se trouvant au rez-de-chaussée. Elles ont été cependant modulées en fonction de la présence ou non d'un étage refuge au-dessus des hauteurs d'eau modélisées, et de l'existence ou non d'au moins une grande ouverture au RdC. Ainsi, le passage d'une matrice à l'autre s'est fait en suivant les règles de pondération suivantes : + 0.25 (max 1) si présence de grandes ouvertures et - 0.25 si présence d'un étage refuge au-dessus de la hauteur d'eau maximale.

H.3 RESULTATS CARTOGRAPHIQUES

Les cartes de probabilités de décès (Pd) obtenues au moyen des matrices précédentes sont présentées sur la **figure H5**. On peut y différencier les probabilités s'appliquant aux personnes situées à l'extérieur de celles situées à l'intérieur des bâtiments. On peut voir sur la carte de cumul que les probabilités les plus élevées se concentrent logiquement sur la bande littorale et que la cité Portugaise est épargnée grâce à des hauteurs de remparts suffisamment élevées (11 m) pour empêcher la submersion.

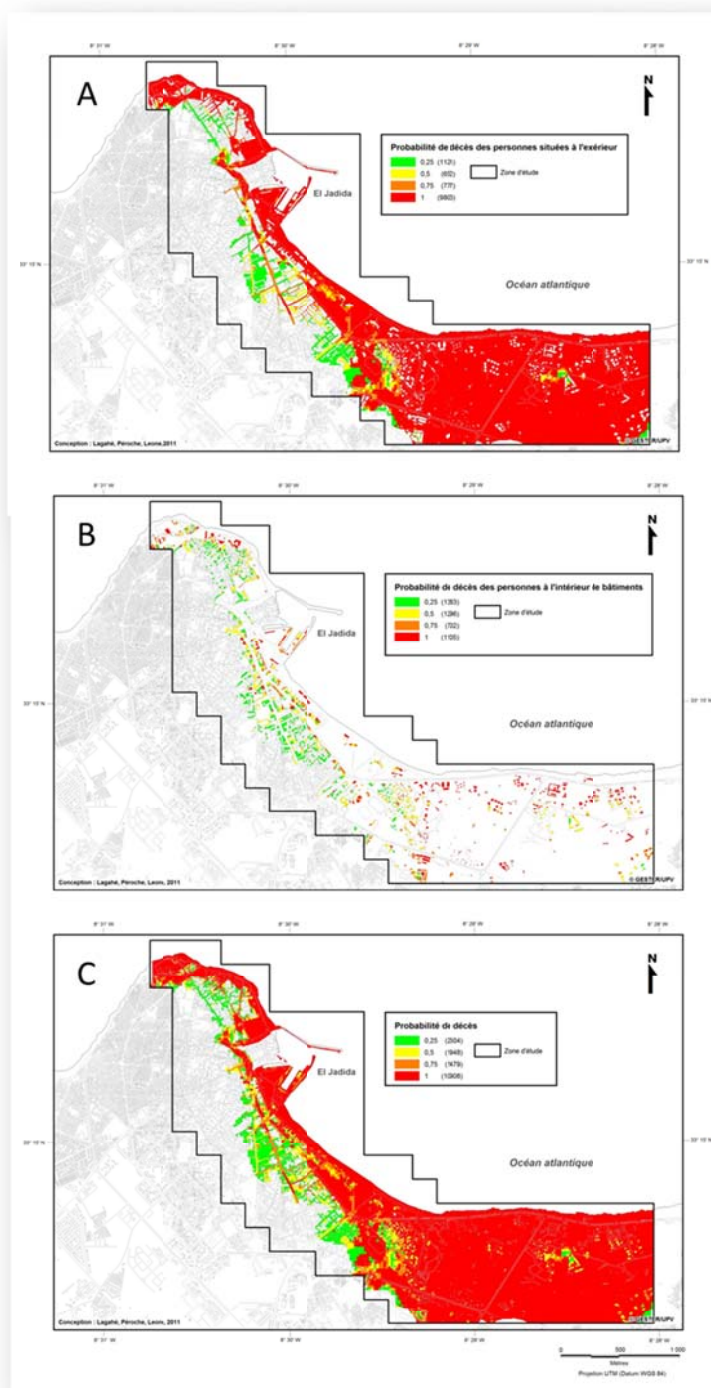


Figure H5 : Probabilités de décès Pd (faible à très forte) s'appliquant aux espaces bâtis (A), aux espaces extérieurs (B) et au cumul des deux espaces (C). Approche multicritère de vulnérabilité pour un scénario d'aléa de référence de type 1755 (source HSF).

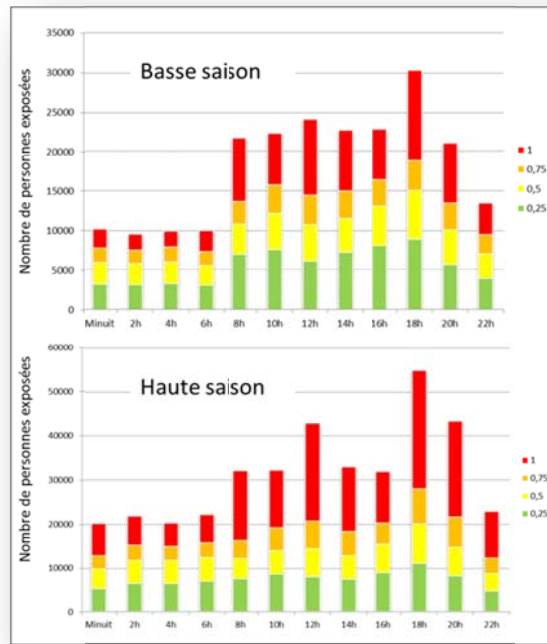


Figure H6 : Répartition des enjeux humains par niveau de probabilité de décès (variabilité bi-horaire pour deux saisons).

Les graphes d'exposition humaine montrent pour les deux saisons des pics à 12h et 18h (figure H6). Cette exposition se prolonge après 18h en haute-saison touristique du fait de la fréquentation accrue du bord de mer le long de l'esplanade. D'une manière générale c'est entre 8h et 22h que le risque est le plus élevé (volume élevé en zones de fortes probabilités de décès).

Sur la base de la définition du risque humain encouru proposée plus haut ($IRh = Pd * Ep/Epmax$), des cartes des indices de risque multi-horaires ont été produites sur toute la zone d'étude. Pour ce faire, l'IRh a été calculé pour chaque espace renseigné par les probabilités de décès et les densités humaines. Ces cartes permettent d'apprécier la variabilité spatio-temporelle du risque humain pour le scénario d'aléa extrême retenu (type 1755). L'objectif n'est point de calculer les pertes en vies humaines, ce qui nous paraît totalement illusoire au stage actuel des connaissances scientifiques, mais de localiser les secteurs à risque élevé, c'est-à-dire ceux sur lesquels on peut s'attendre aux plus fortes probabilités de concentrations de victimes. Ces poches de risque, visibles sur les figure H7 et H8, doivent interpellier les responsables locaux sur les mesures de prévention à apporter : information préventive ciblée, protection rapprochée, système d'alerte, facilitation des évacuations... Ce dernier point mérite d'être étudié en détail. C'est l'objet des deux parties suivantes de notre étude. Une première partie sera consacrée à l'identification et au classement de zones refuges potentielles (verticale ou horizontales). Une autre partie présentera les méthodes et résultats de calcul d'accessibilité pédestre sur graphes permettant d'optimiser la mise en place d'un schéma d'évacuation (routes et zones refuges).

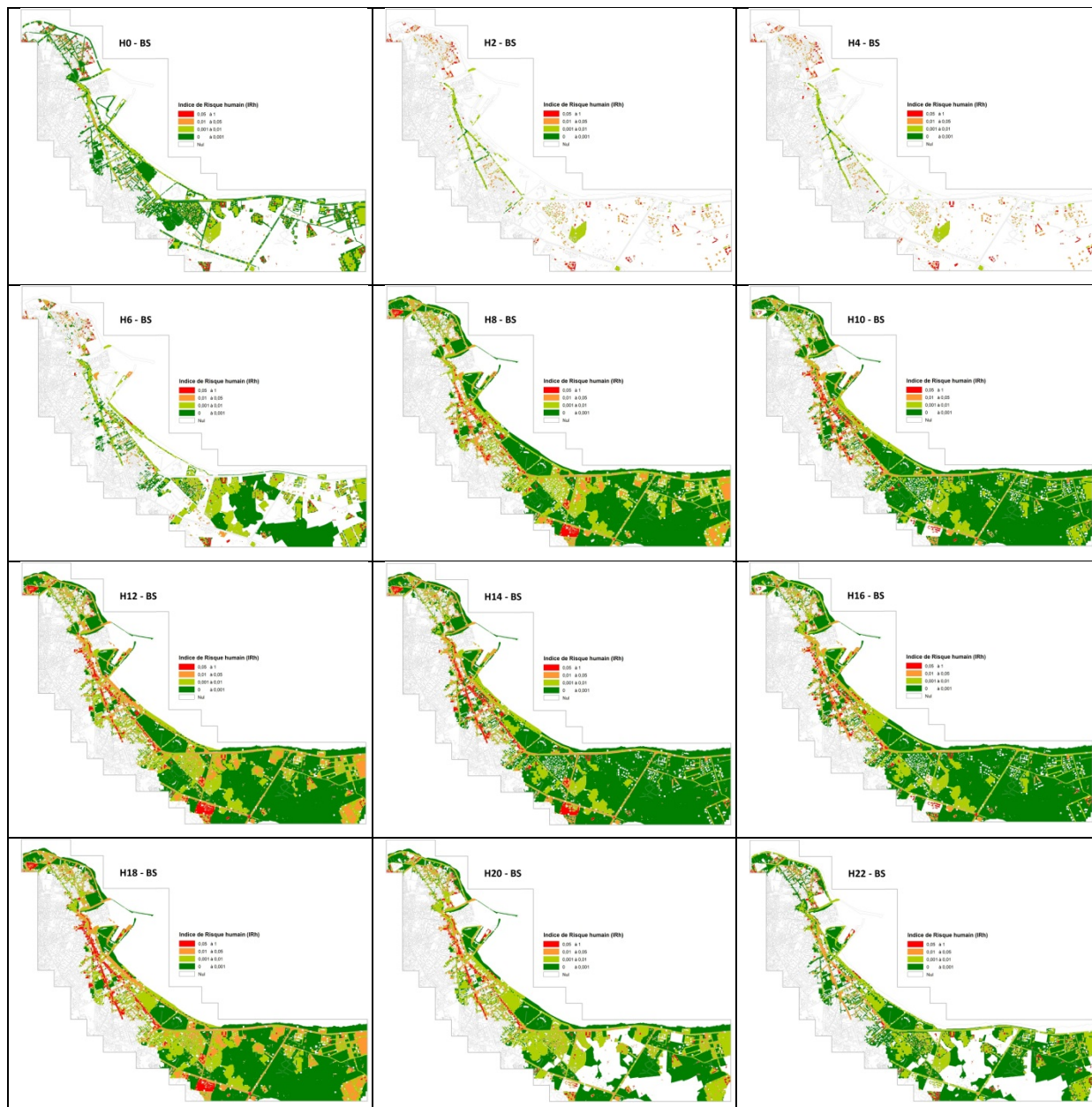


Figure H7 : Indice de risque de pertes humaines (IRh, variabilité bi-horaire, basse-saison).

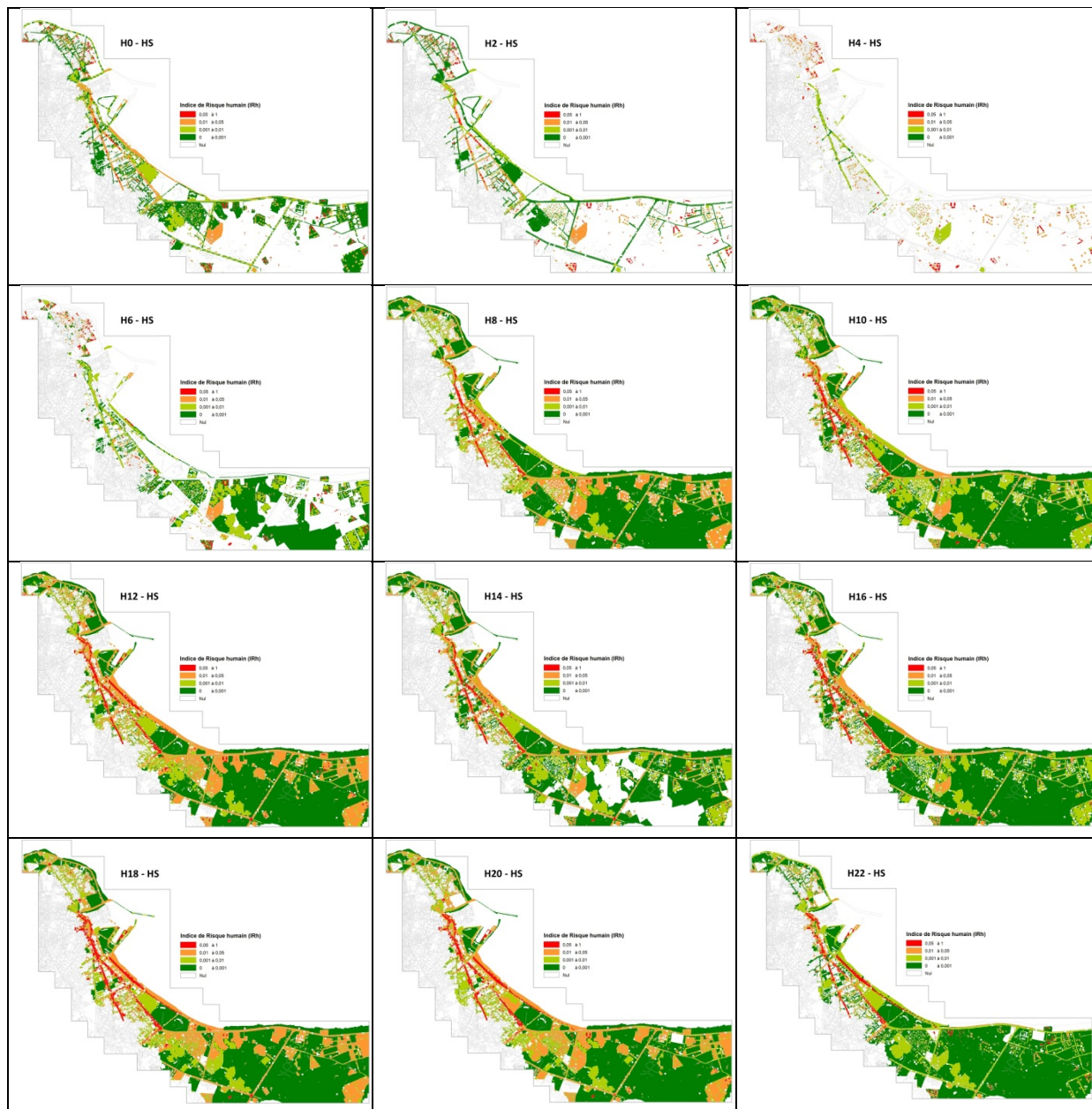


Figure H8 : Indice de risque de pertes humaines (IRh, variabilité bi-horaire, haute-saison).

I DEFINITION DE ZONES REFUGES EN CAS D'EVACUATION

I.1 LA NOTION DE ZONE REFUGE (ZR)

Une zone refuge est un espace de mise en sécurité des personnes assimilable à une zone de regroupement. Les zones refuges 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 : verticales (infrastructures) ou horizontales (topographiques).

Les zones refuges verticales (évacuation par le haut) doivent résister au déferlement des vagues d'un tsunami (FEMA, 2008). A El Jadida, elles sont à aménager dans la classe de bâti de type E et doivent idéalement posséder un accès extérieur (escalier). Généralement implantées en secteur inondable, ces zones refuges doivent posséder 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 refuges topographiques. Mais leur inconvénient majeur apparaît dans une capacité d'accueil limitée avec un risque de refoulement des personnes arrivant trop tard.

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 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. Leur implantation devra ainsi être optimisée en fonction des temps d'accès depuis les zones à risque, tout comme le fléchage des itinéraires permettant de les atteindre en utilisant la signalétique officielle adoptée par la commission océanographie internationale de l'Unesco (figures I1, I2 et I3) (IOC UNESCO, 2011).



Figure I1 : Signalétique officielle d'une zone exposée aux tsunamis adoptée par l'UNESCO (norme ISO 20712-1 : 2008).

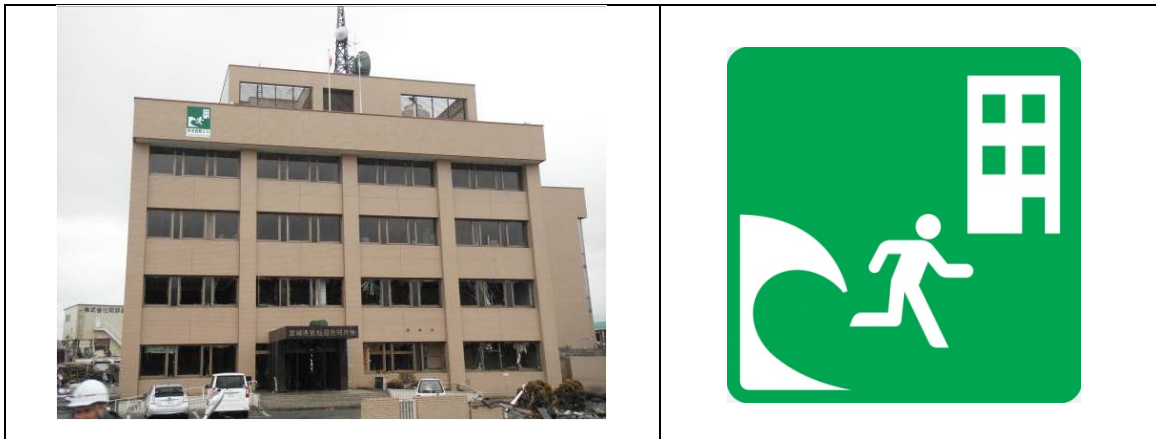


Figure I2 : Exemple de bâtiment faisant office de zone refuge verticale (Kesennuma, Japon, source <http://www.asce.org/>) et signalétique officielle adoptée par l'UNESCO pour signaler une zone d'évacuation verticale (bâtiment) (norme ISO 20712-1 : 2008).



Figure I3 : Exemple de signalement d'itinéraire vers une zone refuge verticale (Japon, source <http://paradoxoff.com/how-japan-has-prepared-for-tsunamis.html>) et signalétique officielle adoptée par l'UNESCO pour signaler une zone d'évacuation horizontale (norme ISO 20712-1 : 2008).

I.2 SELECTION DES ZONES REFUGES A EL JADIDA

Rappelons qu'une zone refuge est un espace accessible hors de danger, situé au dessus du niveau de submersion. A El Jadida, les hauteurs d'eaux maximales modélisées (source tsunamigène HSF) ont été estimées à 9 m par le modèle numérique de propagation COMCOT-Lx de la FFICUL. En prenant une marge de sécurité d'un mètre, tout espace accessible, aménagé et occupable par un groupe de personnes se situant à une altitude supérieure à 10 m, a été identifié comme zone refuge potentielle. Elles sont au nombre de 35 (32 horizontales, 3 verticales). Cette détermination s'est faite sur le terrain par reconnaissance des sites en mars 2011 (figure I4).

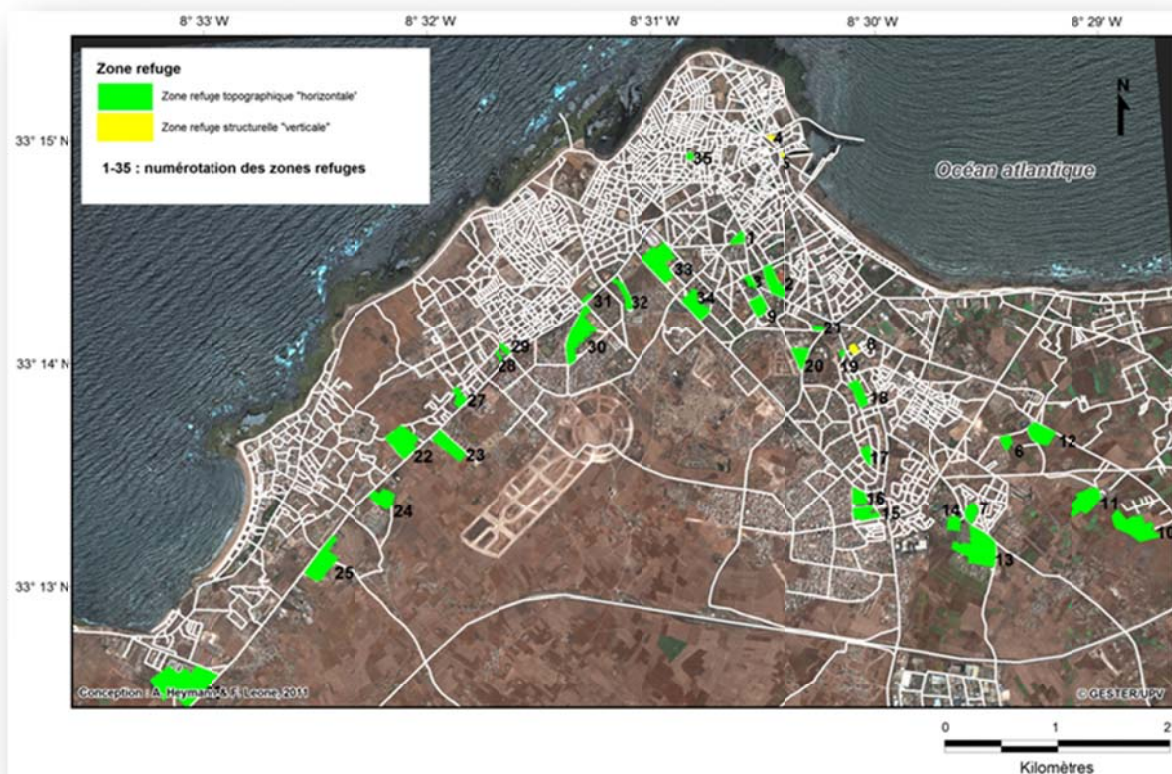


Figure I4 : Zones refuges potentielles identifiées sur El Jadida.

I.3 HIERARCHISATION DES ZONES REFUGES SELECTIONNEES

I.3.1 PRINCIPE DE HIERARCHISATION

Chaque zone refuge identifiée présente des caractéristiques propres permettant de définir son niveau de qualité. Quatre critères ont été retenus pour apprécier ce niveau de qualité : altitude, capacité d'accueil, disponibilité et connectivité. Ces critères interviennent directement dans le processus de mise à l'abri d'un groupe de personnes. Chaque critère a fait l'objet d'une pondération avec code couleur sur une échelle de 1 à 3 :

3 points (très bien)

2 points = (bien)

1 point = (correcte)

Le classement final des zones refuge repose sur la somme des pondérations de chacun des critères retenus. A final, 4 classes de qualité sont proposées et cartographiées selon les codes couleurs suivants :

11-12 points : très bonne

9-10 points : bonne

7-8 points : correcte

5 à 6 points : moyenne

I.3.2 CRITERES DE HIERARCHISATION

L'altitude : d'après le modèle de propagation numérique adopté, l'altitude des zones refuges retenues ne doit pas être en dessous de 10 m. Le choix de l'altitude comme critère de qualité, se justifie par le fait qu'il est possible qu'un futur tsunami dépasse toutes les estimations établies. La probabilité qu'un tsunami dépasse toutes les estimations est certes très faible mais possible. Dans une logique de réduction des risques il est donc préférable de prendre une marge de sécurité. Ainsi, les seuils d'altitude déterminant la pertinence des zones refuges ont été définis de la manière suivante :

Hauteur < 15m

Hauteur = 15 m

Hauteur > 15m

La capacité d'accueil : elle représente le nombre de personnes qu'une zone refuge peut accueillir (figure I5). Pour la définir, nous avons adopté la méthode de comptage de population dite « méthode Jacobs³⁶ ». D'après cette méthode, « dans une foule lâche, ou chaque personne est sans lien de dépendance du corps de ses plus proches voisins, un espace de 10 pieds carrés (0,929 m²) est nécessaire par personne ». Ainsi, la zone refuge la plus grande d'El Jadida peut accueillir jusqu'à 125 942 personnes, contre 513 personnes pour la plus réduite. La capacité d'accueil totale de l'ensemble des zones refuges est estimée à 781 863 personnes pour une ville comptant près de 250 000 personnes hors saison estivale et 750 000 en été. Les classes de capacité d'accueil sont les suivantes :

Capacité d'accueil < 2 000 personnes

2 000 personnes < Capacité d'accueil < 6000 personnes

Capacité d'accueil > 6000 personnes

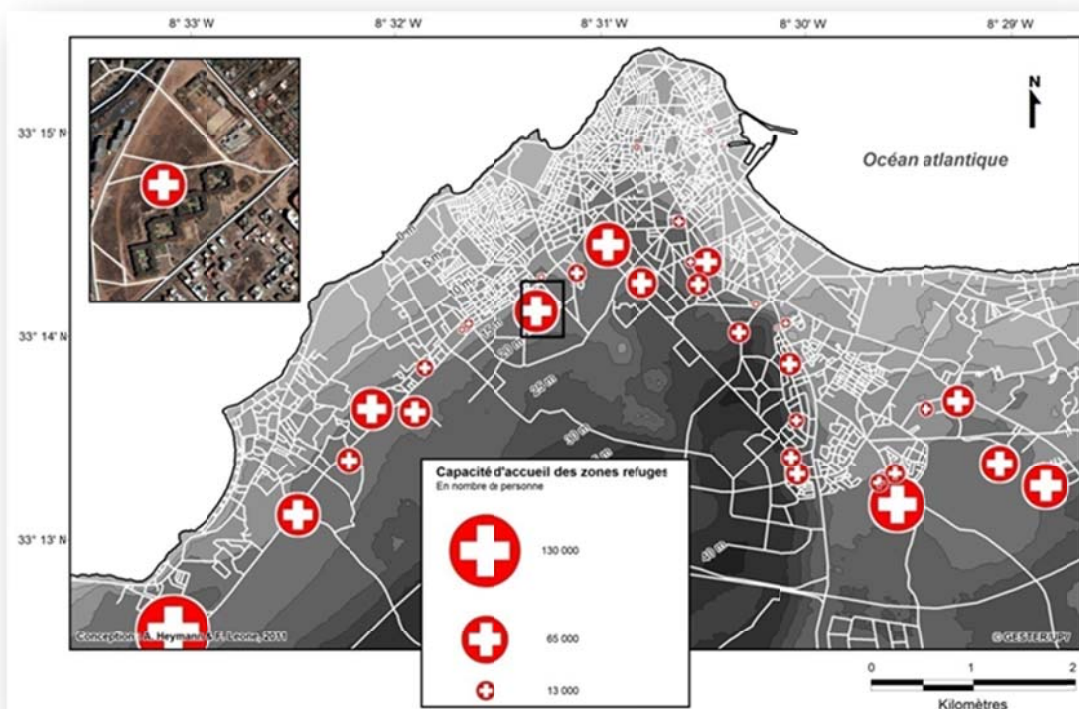


Figure I5 : Capacité d'accueil des zones refuges (en nombre de personnes).

³⁶ Herbet Jacobs (1903-1987), inventeur de la méthode Jacobs utilisée encore aujourd'hui pour réaliser des comptages de foule dense.

La disponibilité : elle est définie par les heures d'ouverture de la zone ainsi que par sa pérennité au cours des années. Le choix de la disponibilité comme critère de qualité est justifié par le fait que plusieurs zones refuges ferment à certaines heures, tandis que d'autres disparaîtront dans les années à venir.

- Les heures d'ouvertures : plusieurs zones refuges comme certains parcs, les remparts portugais ou les galeries commerciales ferment en fin de journée et durant la nuit. Cette fermeture temporaire mais quotidienne dégrade la qualité de ces zones, inutilisables notamment la nuit.

- La pérennité : plusieurs zones refuges sont actuellement implantées sur des espaces amenés à changer de vocation. Ces espaces ouverts peuvent faire l'objet de constructions nouvelles, et même de lotissements entiers, dans une ville qui connaît une très forte croissance urbaine.

La disponibilité durant la journée apparaît comme le premier critère de qualité, puis intervient la disponibilité future. Les classes de disponibilité ont été établies de la façon suivante :

Fermée la nuit

Incertaine

Pérenne et ouverte 24H/24

La connectivité : elle se mesure pour une zone refuge par le nombre de connexion au réseau dans une enveloppe de temps d'accès fixé ici à 30 mn (figure I6). Ce temps correspond approximativement au délai maximal pour rejoindre une zone refuge avant l'arrivée du tsunami. Ce nombre de connexions vers une zone refuge a pu être modélisé grâce au graphe routier construit sur la ville et l'utilisation du logiciel RouteFinder. C'est un très bon critère de qualité de l'accessibilité. Ainsi, une connectivité élevée aura la faculté d'offrir plusieurs itinéraires et de limiter l'enclavement³⁷ de la zone dans l'hypothèse où certains accès seraient bloqués. Trois classes de connectivité ont été définies à partir des seuils suivants :

Connexions < 2000

2000 < Connexions < 4000

Connexions > 4000

Remarque : les zones refuges qui se situent en bordure de zone d'étude ont un nombre de connexions inférieur à la réalité. Cette limite de la méthode de calcul vient du fait qu'il existe plusieurs connexions se trouvant hors du réseau d'étude et qui n'ont pu être comptabilisées.

³⁷ Dans une acceptation large, l'enclavement d'un lieu est la conséquence de sa mauvaise accessibilité, mais l'enclavement est une notion relative car le niveau d'accessibilité d'un lieu s'apprécie par comparaison avec celui des lieux proches ou de même importance. (Chapelon, 2006).

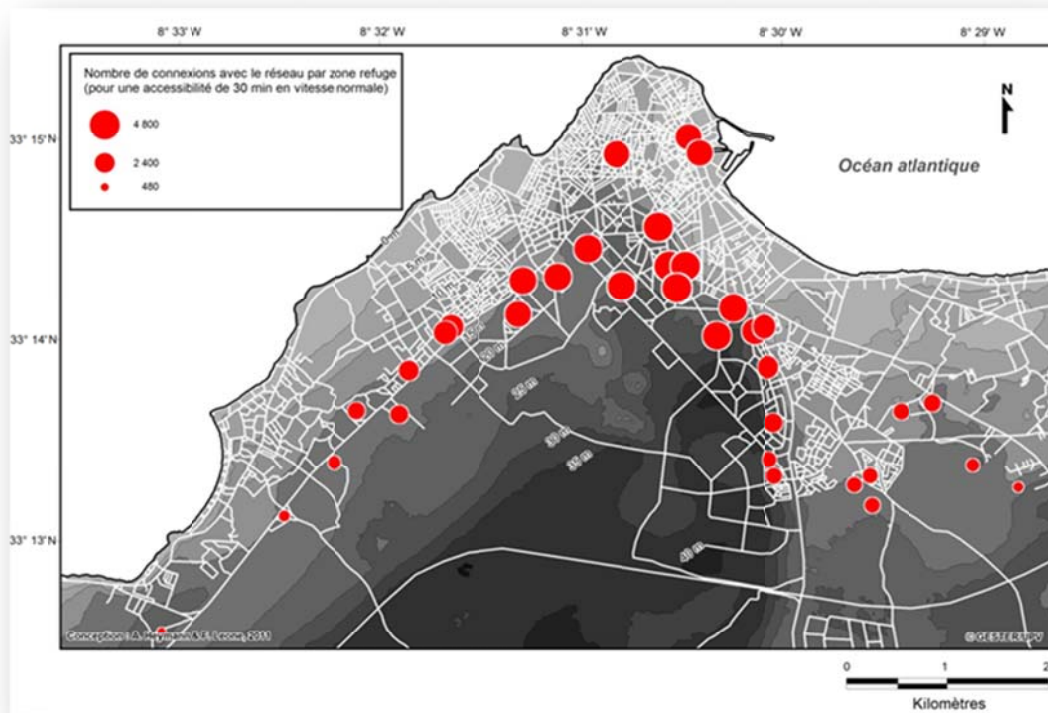




Figure I6 : Connectivité des zones refuges.

I.3.3 RESULTATS DU CLASSEMENT

Le classement final est obtenu par somme des scores de chaque critère. Il permet de définir la qualité de chaque zone refuge. Afin d'aider les décideurs dans leur démarche de prévention, chaque zone refuge potentielle a fait l'objet d'une fiche descriptive susceptible d'être mise à jour (figure I7, annexe 3). Le détail du classement est présenté dans le tableau I1 et cartographié sur la figure I8. Il ressort 6 zones refuges de « très bonne » qualité et qui sont donc à privilégier en priorité. Elles peuvent être complétées par 19 autres zones de « bonne » qualité afin de couvrir l'ensemble du littoral exposé. Par contre 2 zones sont à proscrire, même si elles permettent de protéger un des secteurs les plus vulnérables, mais aussi des plus peuplés. Il s'agit des remparts de la cité portugaise, situés en bordure de médina, et qui pourraient être très vite saturés en cas d'alerte. Ce sont des secteurs très bien identifiés par la population et qui seraient de toute manière spontanément sollicités. Mieux vaut ne pas les signaler en tant que zones refuges et privilégier des itinéraires vers les autres refuges identifiées dans cette étude.

N° ID	Type de zone refuge:	Altitude:	Capacité d'accueil:	Disponibilité:	Connectivité :	Classement :
21	Horizontale	15m	2052 pers 1906 m ²	-Incertaine	4179	9

Informations complémentaires : Surface au sol : terrain vague
Espace non clôturé

Figure I7 : Exemple de fiche descriptive de zone refuge potentielle.

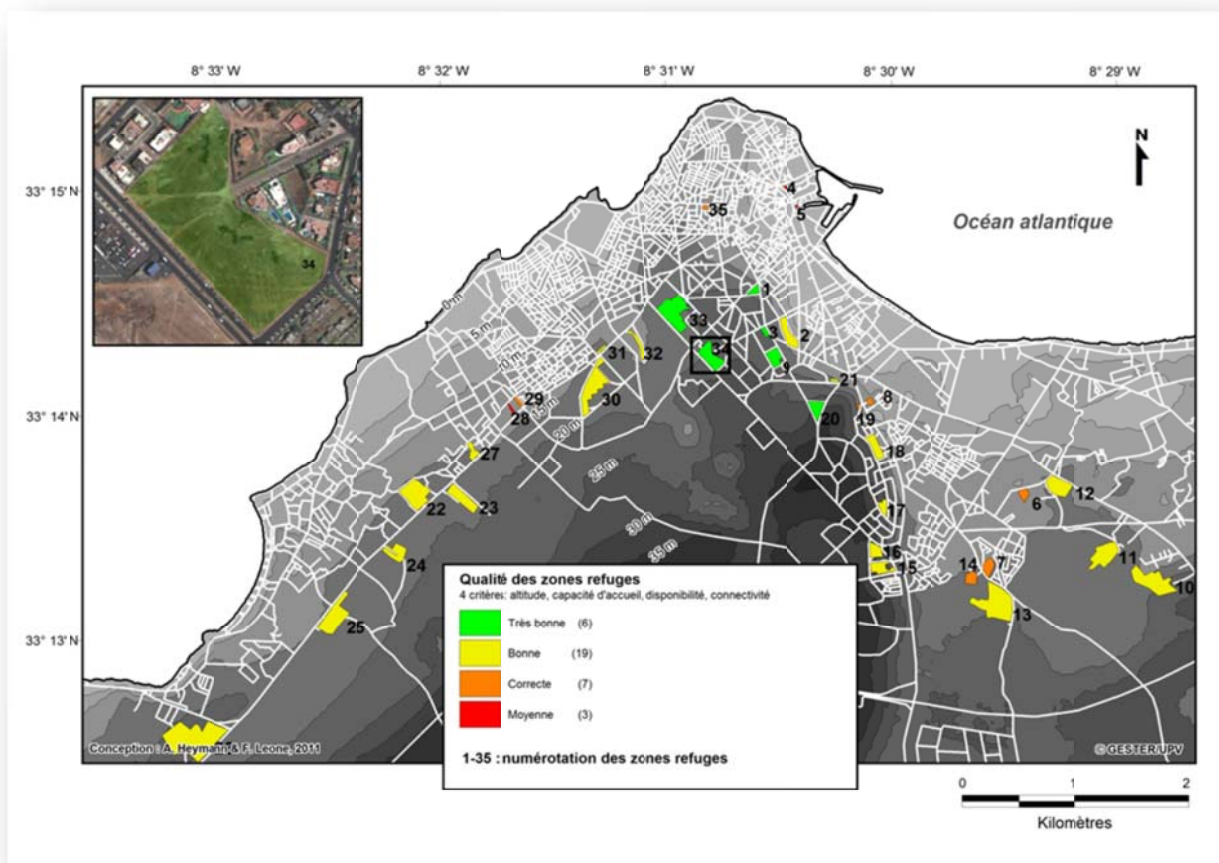


Figure I8 : Hiérarchisation des zones refuges potentielles en fonction de leur qualité (quatre critères).

N° ID	Type de zone refuge:	Altitude:	Capacité d'accueil*:	Disponibilité:	Connectivité :	CLASSEMENT
1	Horizontale	15-20m	5771 pers 5361 m²	-Pérenne	4490	11
2	Horizontale	10-20m	24672 pers 22920 m²	-7h/21h -Pérenne	4440	9
3	Horizontale	20m	4219 pers 3919 m²	-Pérenne	4720	11
4	Verticale	11m	1032 pers 959 m²	-9h/18h -Pérenne	3720	5
5	Verticale	11m	513 pers 477 m²	-9h/18h -Pérenne	3733	5
6	Horizontale	10-15m	7340 pers 6819 m²	Incertaine	1533	7
7	Horizontale	15m	12292 pers 11420 m²	Incertaine	1504	8
8	Verticale	10-25m	3385 pers 3145 m²	-8h/21h -Pérenne	3564	7
9	Horizontale	20m	15608 pers 14500 m²	-Incertaine	4522	11
10	Horizontale	15-20m	54984 pers 51080 m²	-Incertaine	678	9
11	Horizontale	15-20m	38999 pers 36230 m²	-Incertaine	1137	9
12	Horizontale	15m	29357 pers 27440 m²	-Pérenne	1707	9
13	Horizontale	15-20m	75619 pers 70250 m²	-Incertaine	1380	9
14	Horizontale	15m	10775 pers 10010 m²	-8h/18h -Pérenne	1380	7
15	Horizontale	25-30m	16534 pers 15360 m²	-Incertaine	1573	9
16	Horizontale	30m	12347 pers 11470 m²	-Incertaine	1660	9
17	Horizontale	25-30m	7605 pers 7065 m²	-Incertaine	2081	10
18	Horizontale	15-20m	16943 pers 15740 m²	-Incertaine	3001	10
19	Horizontale	15-20m	1121 pers 1041 m²	-Incertaine	3817	8
20	Horizontale	30m	14101 pers 13100 m²	-Incertaine	4175	11
21	Horizontale	15m	2052 pers 1906 m²	-Incertaine	4179	9
22	Horizontale	15-20m	45834 pers 42580 m²	-Incertaine	1707	9
23	Horizontale	15-20m	28084 pers 26090 m²	-Incertaine	1943	9

24	Horizontale	15-20m	20366 pers 18920 m ²	-Incertaine	1316	9
25	Horizontale	15-20m	47836 pers 44440 m ²	-Incertaine	888	9
26	Horizontale	20m	125942 pers 117000 m ²	-Incertaine	510	9
27	Horizontale	15m	9082 pers 8437 m ²	-Incertaine	2412	9
28	Horizontale	10-15m	1974 pers 1834 m ²	-Incertaine	3093	6
29	Horizontale	10-15m	3109 pers 2888 m ²	-P�erenne	3244	7
30	Horizontale	15-20m	49656 pers 46130 m ²	-Incertaine	3680	10
31	Horizontale	15m	2112 pers 1962 m ²	-P�erenne	3972	9
32	Horizontale	15m	9943 pers 9237 m ²	-Incertaine	3993	9
33	Horizontale	15-20m	52820 pers 49070 m ²	-Incertaine	4194	11
34	Horizontale	20-25m	27874 pers 25870 m ²	-Incertaine	4501	11
35	Horizontale	10-15m	1962 pers 1823 m ²	-Pérenne	4068	8

Tableau I1 : Hiérarchisation des zones refuges potentielles en fonction de leur qualité (quatre critères).

J MODELISATION DE L'ACCESSIBILITE DES ZONES REFUGES

J.1 LA NOTION D'ACCESSIBILITE

« 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 » (Bavoux et al., 2005). Mesurer l'accessibilité d'un lieu revient à quantifier la plus ou moins grande facilité avec laquelle ce lieu peut être atteint à partir d'un ou de 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. La vitesse de déplacement ne sera donc pas la même pour chaque type d'accès. 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. D'après Bavoux et al. (2005) 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.

Pour une évacuation en cas de tsunami, l'accessibilité d'une zone refuge sera déterminée par la distance-temps du réseau la 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. 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 créer 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, 2003). Mais l'accessibilité à différents moments de la journée présente un problème synthétique des résultats, car il y aura autant de matrices d'accessibilité que d'instant de mesures, ce qui ne facilite pas la compréhension de l'évolution de l'accessibilité. D'après Chapelon et Bozzani (2003), en croisant les différentes matrices correspondantes sur des mêmes coordonnées x et y , on obtient un graphique comparatif de l'évolution de l'accessibilité aux différents instants mesurés. La prise en compte de l'accessibilité à différents instants est obligatoire dans une analyse de l'accessibilité, mais présente des problèmes de synthèses, qui peuvent être atténués par superposition graphique.

J.2 CALCULER L'ACCESSIBILITE AU MOYEN DE GRAPHES

C'est Euler en 1737 qui est à l'origine de la théorie des graphes. Utilisée aujourd'hui en informatique ou en économie, la théorie des graphes trouve tout particulièrement son intérêt dans les calculs et les représentations graphiques de l'accessibilité d'un territoire. Pour cela, il convient de transformer le réseau en graphe, c'est-à-dire en un objet mathématique composé de sommets et d'arcs. Les sommets (les points) peuvent être associés aux nœuds du réseau, et les arcs (les liaisons entre les points) sont associés aux tronçons routiers.

Les problèmes de cheminement sont des problèmes anciens de la théorie des graphes. Il existe de nombreux algorithmes de recherche des plus courts chemins dans un graphe :

algorithme de Ford (1956), algorithme de Bellman (1958), algorithme de Moore (1957) et Dijkstra (1959) et ses variantes (Dantzig (1960), Whiting & Hillier (1960), algorithme de Floyd (1962) (Leone et al., 2011). Ces derniers appartiennent à la famille des algorithmes matriciels, lesquels permettent de déterminer les plus courts chemins entre tous les couples de sommets du graphe.

Pour réaliser ces calculs sur El Jadida, nous avons utilisé l'application RouteFinder (<http://www.routeware.dk>) dans un environnement SIG MapInfo. Cette application repose utilise l'algorithme de Dijkstra (1959) pour la recherche des plus courts chemins entre les sommets du graphe (figure J1). Ce graphe est constitué ici par l'ensemble du réseau de voies de communications présentes sur notre zone d'étude. Ces voies ont été préalablement digitalisées et classées en plusieurs catégories, afin de pouvoir leur affecter des vitesses de déplacement pédestre spécifiques.



Figure J1: Exemple d'itinéraire (en bleu) généré par RouteFinder selon le plus court chemin (en distance) entre deux points d'un graphe (El Jadida, Maroc).

J.3 MODALITES D'EVACUATION ET CRITERES DE FRICTION

L'évacuation en cas de tsunami doit se réaliser à pied, car il est évident que l'ensemble du réseau routier va se retrouver très vite saturé par le trafic. De plus, les probabilités de décès augmentent dans un véhicule. D'après l'UNESCO (IOC UNESCO, 2008) un accès d'évacuation doit être une voie de communication accessible par tout type de population en suivant le chemin le plus court pour accéder aux zones de regroupement. Les passages étroits ou présentant des obstacles doivent être pris en compte. Afin de définir ces itinéraires et d'optimiser l'implantation des zones refuges, des calculs d'accessibilité sont recommandés.

Plusieurs facteurs liés au réseau d'évacuation vont contraindre son utilisation lors d'une évacuation en cas de tsunami. Chaque type d'accès va imposer sa rugosité, ses irrégularités et inégalités aux flux de personnes. D'après Bavoux et al. (2005), l'ensemble des résistances que les accès vont imposer aux individus s'appellent les frictions. Pour une évacuation en cas

de tsunami, les critères de friction pertinents seront ceux qui viendront influencer sur la vitesse de déplacement et la capacité de flux des individus, sachant que ces deux critères sont souvent liés. Ainsi un accès avec un temps de parcours très lent aura une capacité de flux généralement faible, et inversement.

Après une première prise de connaissance du terrain, les 5 critères de frictions retenus ont été les suivants :

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

Largeur de voie : lors d'une évacuation la largeur des voies influence indirectement les vitesses de déplacement et les capacités de flux. Les personnes vont affluer dans les différentes voies de communication menant aux zones refuges. Cette concentration de personnes diminuera la vitesse de déplacement de chaque individu. Le groupe d'individu sera ralenti de façon proportionnelle au rapport entre la largeur de voie et le nombre de personnes. Pour une même affluence de personnes, une voie de grande largeur bénéficiera d'une vitesse de déplacement plus rapide qu'une voie étroite. Sa capacité de flux sera donc également plus importante. Une largeur de voie importante permet également d'avoir une meilleure visibilité et donc un meilleur sens de l'orientation. La largeur de voie est donc un critère indispensable dans la différenciation des voies d'évacuation.

Revêtement du sol : le revêtement des voies de communication a un impact direct sur la vitesse de déplacement. Dans le cas d'une évacuation planifiée, les personnes prendront l'itinéraire le plus direct pour accéder aux zones refuges. Cet itinéraire peut être composé d'accès aux revêtements défavorables. Le déplacement sur des sols « rugueux » de type sentiers de terre ou d'herbes hautes se fera à une vitesse particulièrement réduite et irrégulière, à l'inverse des revêtements urbains bitumés. La vitesse de déplacement est donc proportionnelle à la qualité du terrain. A noter que la qualité de certains revêtements est directement liée à la météo du moment. Ainsi lors d'épisodes pluvieux les sentiers peuvent se gorger d'eau et devenir impraticables ou provoquer des ralentissements dus aux chutes de personnes. La nature du revêtement du sol se présente donc comme un critère déterminant pour différencier les voies d'évacuation.

Occupation des accès : l'occupation des accès peut gêner la circulation des personnes et modifier les vitesses de déplacement. C'est particulièrement vrai à certains moments de la journée et pour certains lieux de regroupement comme les ruelles commerçantes, les carrefours ou les devantures de magasins. De telles occupations peuvent également provoquer des chutes. Il est donc nécessaire de prendre en compte le taux d'occupation dans la différenciation des voies de communications, en exploitant les données sur la fréquentation horaires des lieux de vie (cartes de densités humaine). Un grand nombre d'études ont cherché à définir une relation entre la vitesse de marche et la densité de piétons (Fruin, 1971 ; Polus *et al.*, 1983, Tanaboriboon & Guyano, 1989, Paris, 2007, Shi *et al.*, 2007 *in* Moussaïd, 2010).

Rq. : D'après Helbing et al. (2006), « un mouvement de foule se crée lorsque la densité est comprise entre 6 et 9 piétons par mètre carré, de gigantesques mouvements de masse se forment ». Pour élargir leur espace vital les individus vont se compresser les uns contre les autres et vont commencer à se bousculer. Avec une telle densité, les pressions physiques exercées vont se propager rapidement de proche en proche pour s'étendre à l'ensemble de la foule. « Des groupes entiers de piétons peuvent être alors déplacés dans une direction aléatoire, perdant même parfois le contact avec le sol. De tels mouvements, dont l'amplitude peut atteindre une dizaine de mètres, sont totalement incontrôlables et peuvent s'avérer mortels ». En 1990, lors d'un pèlerinage en Arabie Saoudite 1426 pèlerins sont morts asphyxiés et piétinés dans un gigantesque mouvement de foule.

Pente du terrain : c'est un facteur important de modulation de la vitesse de déplacement. Par définition, une évacuation face au risque de tsunami implique un dénivelé positif. Il convient donc de moduler la vitesse pédestre en fonction de la pente du terrain. Sur ce point, la bibliographie est beaucoup moins abondante. Les principales expériences citées ont été menées en laboratoire dans le cas d'évacuation de bateaux en détresse (Lee et al., 2003 et 2004). Ces vitesses ont généralement été mesurées sur des courtes distances et dans un couloir incliné. Les valeurs données par Lee et al. (2004) sont sensiblement plus rapides que celles de Bles et al. (2001) (*in* Lee et al, 2004). La pente critique de déplacement pédestre en situation d'évacuation a été estimée autour de 26° (48 %) par Laghi et al. (2006). Dans le cadre de cette étude, la pente du terrain a été prise en compte indirectement en recensant les principaux escaliers (sorties de plages) et ressauts topographiques (montées brutales).

Rétrécissements brutaux : ce sont des points de passages provoquant souvent des engorgements de flux. Ils correspondent généralement aux brusques variations de largeur de voie observables aux portes d'entrée (Cité portugaise par exemple), au niveau des passages entre une avenue et une ruelle (médina par exemple) et aux entrées de nombreuses zones refuges.

Dans notre modèle d'accessibilité, ces deux derniers critères (pente et rétrécissements brutaux) ont été regroupés sous l'appellation « **points de congestion** ». Ils ne constituent généralement qu'une très courte portion de l'itinéraire, mais la capacité de flux y est très faible et peut donc provoquer des engorgements. Les individus y progressent en « goutte à goutte » et l'impact sur la vitesse de déplacement sera très important (figure J2).

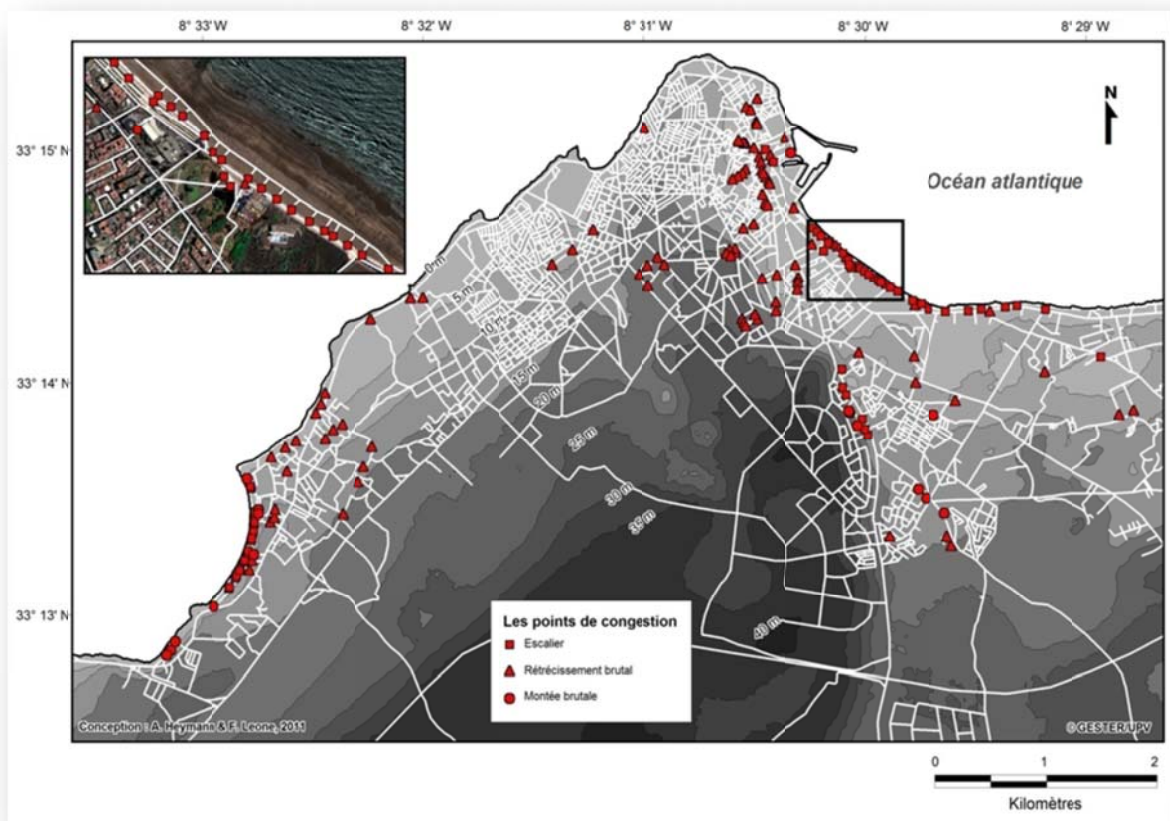


Figure J2 : Les points de congestion du réseau de voies de communication d'El Jadida.

J.4 GRAPHE ET TYPOLOGIE DES ACCES A EL JADIDA

En l'absence de base de données disponible, nous avons dû construire sous SIG le graphe des voies de communication de la ville d'El Jadida. Nous avons pour cela effectué des relevés de terrain (mars 2011) couplés à des travaux de photo-interprétation (image QuickBird), tout en veillant à bien respecter les spécifications topologiques imposées par le logiciel RouteFinder. Les différents critères de frictions retenues pour l'élaboration de notre typologie du réseau ont été les suivants :

Largeur de voie :

- Entre 1 et 6 mètres ;
- Entre 6 et 13 mètres ;
- 13 mètres et plus.

Revêtement du sol :

- Urbain : routes et trottoirs en bitume, goudron ou asphalte ;
- Naturel (hormis sable) : terre battue, gravier, pelouse, herbes hautes ;
- Sable.

Occupation de l'accès :

- Pas d'occupation perturbant la fluidité de l'accès :
- Occupation anthropique (terrasses de café, marchés, véhicules, commerces etc...).

Points de congestion :

- Escaliers ;
- Ressauts topographiques (montée brutale);
- Rétrécissements brutaux.

En se basant sur ces critères, la typologie proposée comporte au total 6 types d'accès (figure J3 et tableau J1) auxquels nous allons appliquer des vitesses de déplacement pédestre variables.

		Critères de frictions		
		Largeur de voie	Revêtement au sol	Occupation de l'accès
Type d'accès	Avenues	13 mètres et plus	Urbain	Variable
	Rues	Entre 6 et 13 mètres	Urbain	Occupation anthropique
	Ruelles (médiina essentiellement)	Entre 1 et 6 mètre	Urbain	Variable
	Sentiers	Variable	Naturel	Pas d'occupation
	Plages	Variable	Sable	Variable
	Points de congestion (escaliers, ressauts, rétrécissements)	Variable	Variable	Variable

Tableau J1 : Typologie des accès (voies de communication et/ou d'évacuation) retenue sur El Jadida et principaux critères de friction s'y rapportant.

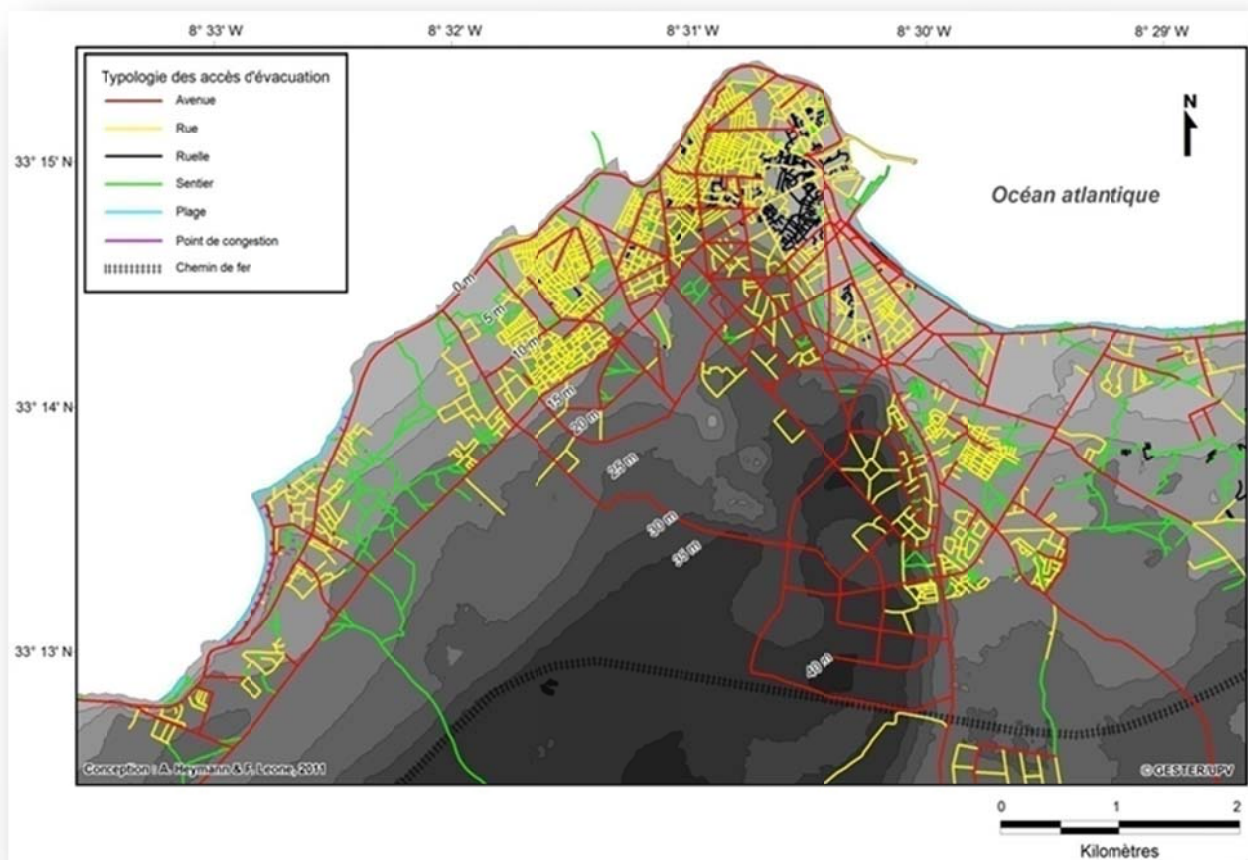


Figure J3 : Graphe des accès (voies de communication et/ou d'évacuation) et typologie propre à El Jadida.

J.5 VITESSES DE DEPLACEMENT PEDESTRE APPLIQUEES

Les vitesses de déplacement des piétons en régime de marche sont assez bien définies 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 mètres par seconde (soit près de 4,7 km/h). Cette valeur est naturellement soumise à une certaine variation. Les valeurs relevées dans la littérature s'étendent de 0,9 m/s à 1,5 m/s (Moussaid, 2010). A partir d'une synthèse des vitesses de déplacement des piétons sur 27 sources différentes, Daamen (2004) donne une valeur moyenne de 1,34 m/s. Quant à lui, Dewi (2010) retient comme vitesse d'évacuation face à un tsunami, une valeur moyenne de 0,751 m/s. Cela correspondrait à la vitesse de déplacement d'un groupe de personnes âgées.

Dans le cas de notre étude, les vitesses de déplacement introduites dans le modèle varient, suivant les types de voies et les moments de la journée choisis, entre 1 et 5,35 km/h (soit 0,28 et 1,49 m/s). Ces vitesses ont été établies expérimentalement sur le site d'El Jadida, suivant plusieurs itinéraires, pour chaque type de voie et aux heures creuses ou pleines. Les premières expérimentations ont été réalisées aux heures creuses (9-11 h), en adoptant une vitesse de marche normale, par des groupes mixtes de 2 ou 3 étudiants se déplaçant sur des distances variant de 500 à 1300 m (figure J4).



Figure J4 : Itinéraires suivis par les groupes de marcheurs pour évaluer les vitesses de déplacement (en heures creuses).

Une seconde expérimentation, effectuée par une seule personne (homme jeune en bonne santé) et sur d'autres itinéraires de 500 m de longueur, a permis d'établir les écarts de vitesses moyennes entre des heures creuses (9-11h) et des heures pleines (18-20 h), en basse saison touristique (mars 2011) (figure J5).



Figure J5 : Itinéraires suivis pour différencier les vitesses de déplacement entre les heures creuses et pleines.

Ces écarts de vitesse calculés sont proches 0,30 km/h pour les rues et les ruelles. Ils sont nuls sur les avenues et ont été estimés pour les sentiers, les plages et les points de congestion, faute de mesures suffisantes (tableaux J2 et J3). Nous avons volontairement et arbitrairement fortement dégradé les vitesses s’appliquant aux points de congestion (0,5 à 1,5 km/h) pour intégrer leurs effets de friction sur le réseau. Les simulations qui suivent, de temps de parcours entre tout point de la ville et les zones refuges, tiennent compte de ces vitesses. Le paramétrage de l’application RouteFinder s’est fait en suivant le mode de calcul par le plus court chemin en temps (mode « Fastest »). L’option de calcul complémentaire « Exact with off road » a été appliquée pour prendre en compte certains secteurs dépourvus de réseau. La vitesse moyenne appliquée dans ces conditions particulières a été fixée arbitrairement à 4,5 km/h (figure J6).

Type de voie	Code (ID)	Vitesses de déplacement aux heures creuses (9-11h) « vitesse normale » (en km/h)	Vitesses de déplacement aux heures pleines (18-20h) « vitesse lente » (en km/h)
Avenue	1	5.35	5.35
Rue	2	5.24	4.94
Ruelle	3	5.19	4.88
Sentier	4	4.5	3.5*
Plage	5	3.7	3*
Points de congestion	6	1*	0.5*

* estimations

Tableau J2 : Vitesses pédestres établies expérimentalement ou estimées pour la modélisation sur El Jadida.

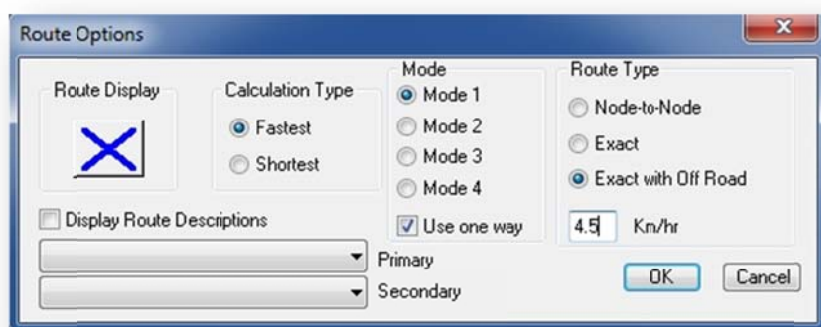


Figure J6 : Options de calcul sélectionnées pour simuler les temps de parcours avec l'outil RouteFinder (capture d'écran).

Type	Code	Vitesse normale : Vitesses de déplacement aux heures creuses (en km/h)	Vitesse lente : Vitesses de déplacement aux heures pleines (en km/h)	Largeur de voie minimum :	Revêtement au sol :	Occupation de l'accès :
Avenue	1	5,35	5,35	13m	Urbain	Variable







Remarques Les avenues sont des doubles voies goudronnées et possèdent des trottoirs ou des bas cotés dégagés.

Type	Code	Vitesse normale : Vitesses de déplacement aux heures de faible fréquentation (en km/h)	Vitesse lente : Vitesses de déplacement aux heures d'affluences (en km/h)	Largeur de voie minimum :	Revêtement au sol :	Occupation de l'accès :
Rue	2	5,24	4,94	Entre 6m et 13m	Urbain	Anthropique



Remarques Les rues ont un revêtement majoritairement goudronné et sont dotées de trottoirs. Beaucoup de petits commerces et véhicules occupent une partie de ces trottoirs. Cette occupation rend les trottoirs moins bien praticables.

Type	Code	Vitesse normale : Vitesses de déplacement aux heures de faible fréquentation (en km/h)	Vitesse lente : Vitesses de déplacement aux heures d'affluences (en km/h)	Largeur de voie minimum :	Revêtement au sol :	Occupation de l'accès :
Ruelle	3	5,19	4,88	Entre 1m et 6m	Urbain	Variable
						
Remarques		Les ruelles sont majoritairement goudronnées et sont surtout présentes dans la medina. En plus d'être étroites, les ruelles sont souvent encombrées d'obstacles de type étalages. Cette occupation des ruelles les rend difficilement praticables.				
Type	Code	Vitesse normale : Vitesses de déplacement aux heures de faible fréquentation (en km/h)	Vitesse lente : Vitesses de déplacement aux heures d'affluences (en km/h)	Largeur de voie minimum :	Revêtement au sol :	Occupation de l'accès :
Sentier	4	4,5*	3,5*	Variable	Naturel	Pas d'occupation
						
Remarques		Les sentiers ont des revêtements variables, terre battue, gravier, pelouse et sont dans des états de praticité variable. Ce qui crée des vitesses de déplacement plutôt lentes et différentes entre sentiers.				




Type	Code	Vitesse normale : Vitesses de déplacement aux heures de faible fréquentation (en km/h)	Vitesse lente : Vitesses de déplacement aux heures d'affluences (en km/h)	Largeur de voie minimum :	Revêtement au sol :	Occupation de l'accès :
Plage	5	3,7	3*	Variable	Sable	Pas d'occupation
						
Remarques		Sable fin ou grossier.				
Type	Code	Vitesse normale : Vitesses de déplacement aux heures de faible fréquentation (en km/h)	Vitesse lente : Vitesses de déplacement aux heures d'affluences (en km/h)			
Point de congestion	6	1*	0.5*			
						
Remarques		Les points de congestions 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.				

Tableau J3 : Typologie descriptive des voies de communication/évacuation d'El Jadida et vitesses pédestres associées (calculées ou estimées) pour la modélisation.

J.6 SCENARIOS D'ACCESSIBILITE MULTI-HORAIRE

J.6.1 LES VARIABLES DES SCENARIOS

Afin d'évaluer la qualité de l'accessibilité de zones refuges, nous avons réalisé plusieurs scénarios faisant varier le nombre de zones refuges, le volume de personnes à évacuer et les vitesses de déplacement (figure J7). Il s'agit de conditions variables de l'accessibilité, et donc d'une phase d'évacuation, qui dépendent très fortement du moment de la journée. C'est le cas pour certaines zones refuges, fermées la nuit, ou pour les densités de population qui ont une forte variabilité horaire, en particulier dans les rues. Ces scénarios d'accessibilité permettront également de différencier les personnes réellement exposées à un tsunami des personnes non exposées, mais forcément concernées par une consigne d'évacuation.

Précisons que ces simulations sur graphe produisent des temps de trajets théoriques et optimaux, calculés suivant les itinéraires les plus courts, vers les zones refuges les plus proches, 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.

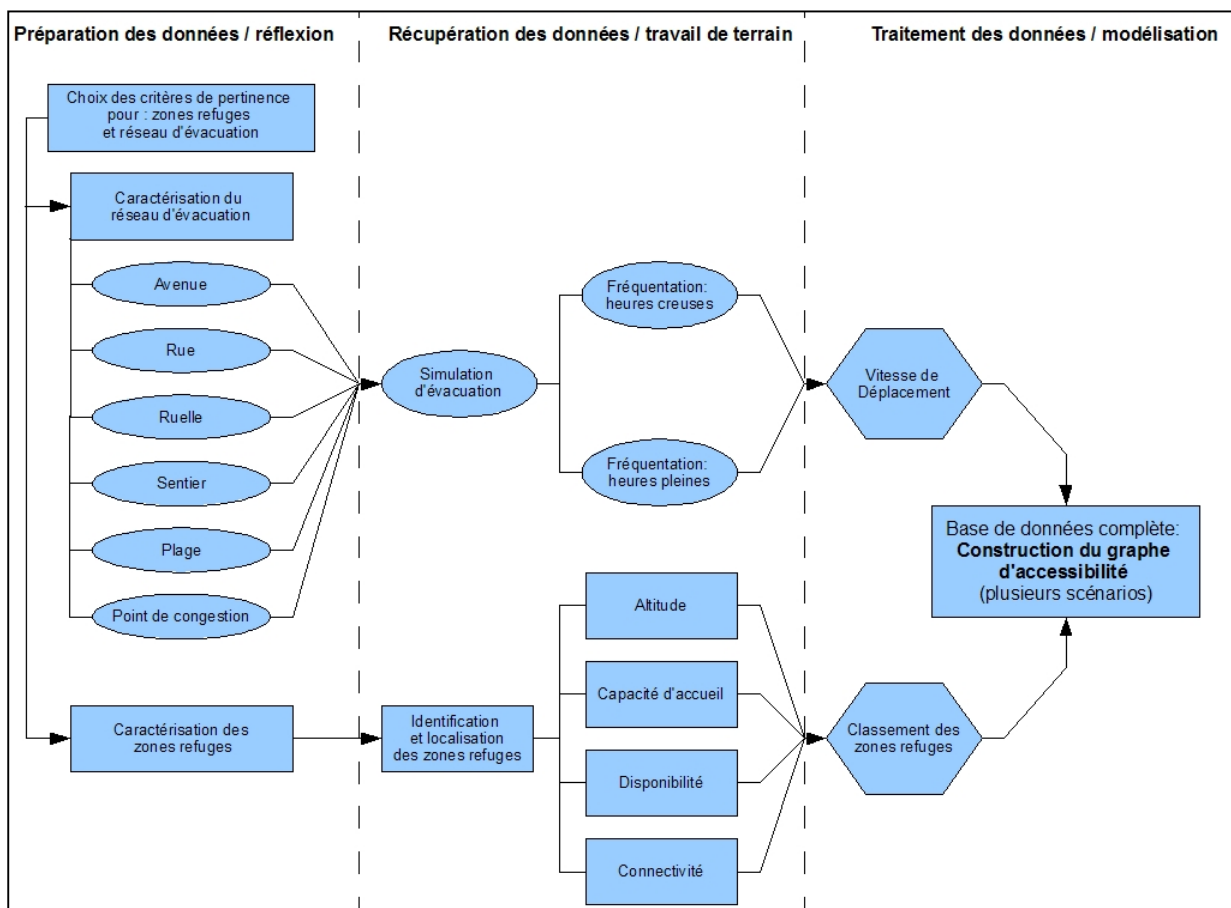


Figure J7 : Synthèse des étapes méthodologiques conduisant à l'élaboration de scénarios d'accessibilité des zones refuges

J.6.2 RESTITUTIONS GRAPHIQUES DES RESULTATS

La représentation cartographique s'avère être un des meilleurs moyens de visualiser les temps et itinéraires de l'accessibilité. Mais il faut pour cela prendre en considération les contraintes liées aux logiciels qui supportent le SIG. Ainsi, MapInfo, couplé à Routefinder, permet de construire deux types de cartes pour représenter des temps et des itinéraires d'accès depuis ou vers les zones refuges :

Cartes en isolignes (isochrones linéaires) : sur ces cartes, les temps d'accès sont représentés en implantation linéaire sur les tronçons routiers. Une variation de couleur est attribuée à chaque classe de temps de trajets pour atteindre chaque extrémité d'un tronçon. Ce type de visualisation est intéressant lorsque les lieux à mesurer se trouvent sur le réseau ou lorsque l'on s'intéresse uniquement à l'accessibilité le long du réseau routier. Ce mode a été retenu pour représenter l'accessibilité sur la zone d'étude élargie, au départ de chaque zone refuge (accessibilité globale).

Cartes en carroyage (isochrones surfaciques) : la méthode consiste à appliquer les temps de trajet à chaque maille d'une grille (ici de 20*20 m). La grille a été construite uniquement sur la zone d'étude réduite ayant fait l'objet du diagnostic de vulnérabilité humaine (accessibilité locale). On a calculé les temps d'accès entre les zones refuges et les centroïdes de chaque maille. Les résultats obtenus sont ensuite discrétisés en classes de couleurs. Cette méthode permet, par le jeu des agrégations spatiales, d'affecter les données de population à ces mailles. Les résultats obtenus peuvent être exportés dans un tableur pour construire des courbes d'accessibilité.

Ces **courbes d'accessibilité** expriment le volume de personnes accessibles depuis les zones refuges au cours du temps, ou autrement dit, le nombre de personnes pouvant atteindre ces zones refuges en fonction du temps. La superposition des courbes permet de comparer plusieurs scénarios, en faisant varier le nombre de zones refuges, le volume de personnes à évacuer ou les vitesses de déplacement.

J.6.3 RESULTATS : ACCESSIBILITE GLOBALE (AG)

L'analyse de l'accessibilité à l'échelle globale (zone d'étude élargie) a pu être traitée au moyen d'isochrones linéaires, pour les quatre scénarios suivants (tableau J4) :

Code du scénario	Moment (basse saison)	Vitesses appliquées	Nombre de zones refuges disponibles (ZR)
AG/SC1	Heure creuse - BS (10h)	Normales	35
AG/SC2	Heure pleine – BS (18h)	Lentes	35
AG/SC3	Heure creuse – BS (4h)	Normales	30
AG/SC4	Heure pleine – BS (18h)	Lentes	25

Tableau J4 : Variables des différents scénarios d'accessibilité globale (AG).

J.6.3.1 AG/SC1 : l'accessibilité en heures creuses : une accessibilité optimale

A El Jadida, en basse saison, 10 h du matin peut être considéré comme une heure creuse avec des rues qui apparaissent peu fréquentées. Les vitesses de déplacement appliquées sur chaque itinéraire seront les normales définies plus haut. Le faible taux de fréquentation de la population ne vient pas altérer les vitesses de déplacement de flux de personnes. Les phénomènes de frictions et d'engorgements sont limités. Toutes les zones refuges sont disponibles (35 au total). Ainsi, ce scénario en heure creuse se rapproche de conditions d'accessibilité optimales (figure J8). Bien que certains accès se situent à 30 minutes de marche, ce qui correspond au seuil limite d'accessibilité, ceux-ci restent en nombre très limité. La grande majorité des accès, notamment en centre-ville, bénéficie d'une accessibilité de moins de 20 minutes vers la zone refuge la plus proche.

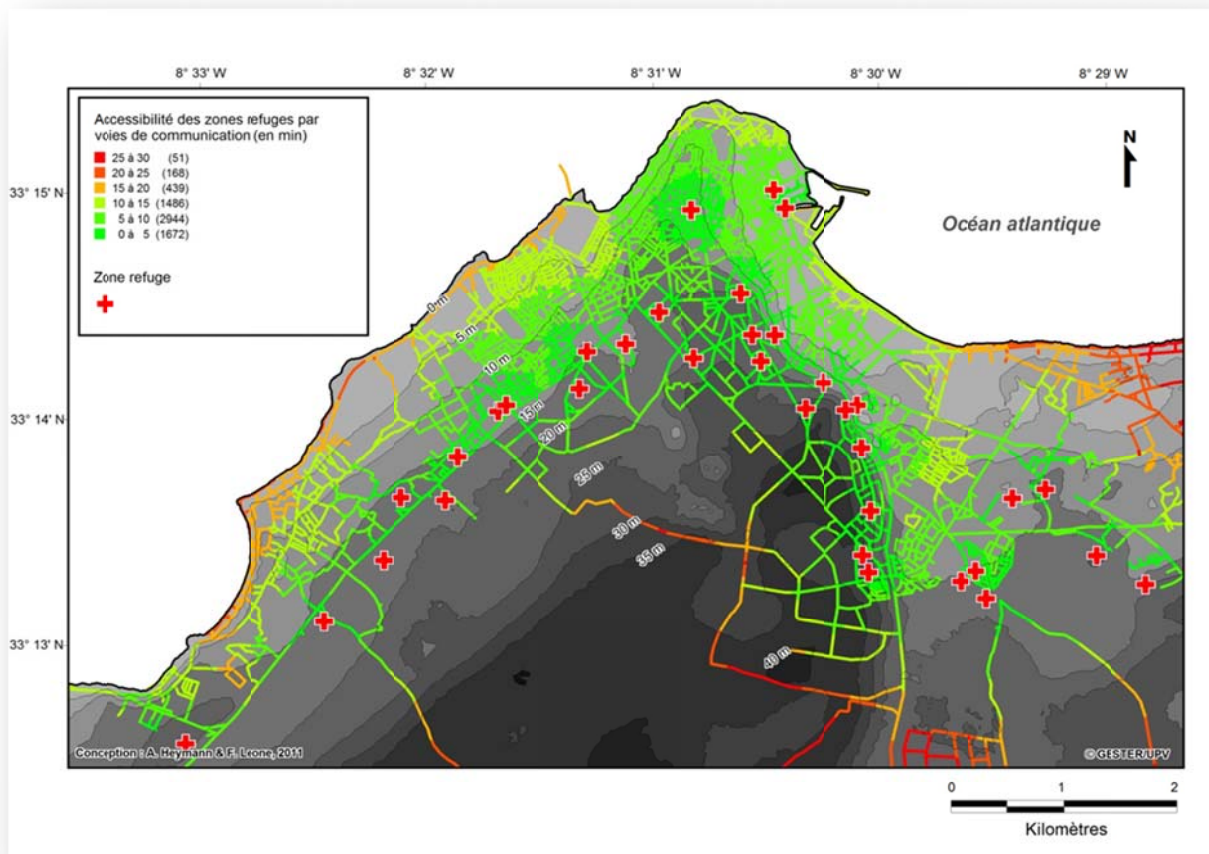


Figure J8 : AG/SC 1 - L'accessibilité des zones refuges à El Jadida en heures creuses (diurne, 10h, BS, 35 ZR) (temps de parcours en mn).

J.6.3.2 AG/SC2 : l'accessibilité en heures pleines

Vers 18 h, l'ensemble des accès du centre-ville se trouvent très fréquentés. Les vitesses de déplacement se voient alors diminuées. Nous avons donc appliqué à ce scénario des vitesses de déplacement dites « lentes », c'est-à-dire dégradées par rapport aux vitesses normales. L'ensemble des zones refuges sont disponibles (35 en tout). A l'ouest de la ville on remarque qu'une dizaine de tronçons présentent un délai d'accessibilité supérieur à 30 min (figure J9). Bien que certains espaces se retrouvent à une distance-temps trop élevée pour se mettre hors

de danger, à 18h l'accessibilité en temps des zones refuges d'El Jadida semble suffisante pour mettre à l'abri la grande majorité de la population.

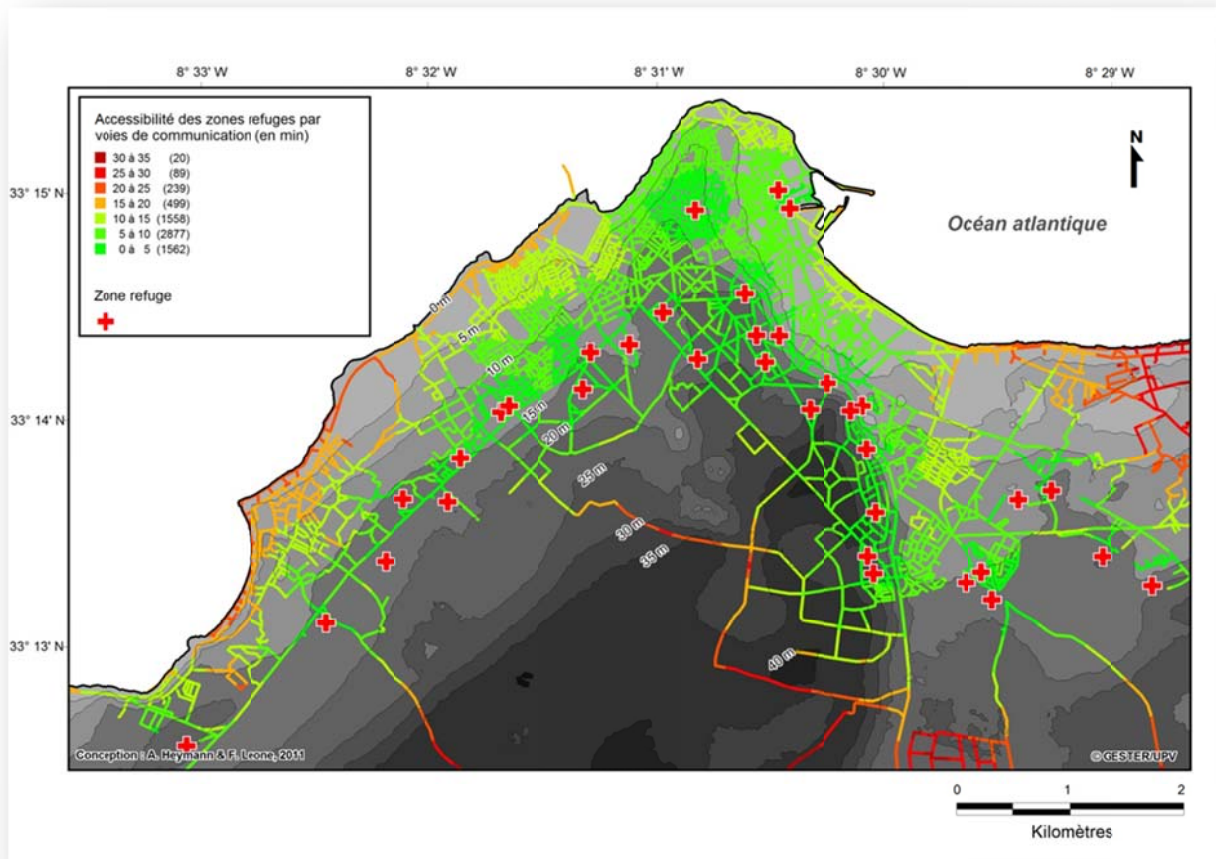


Figure J9 : AG/SC2 - L'accessibilité des zones refuges à El Jadida en heures pleines (diurne, 18h, BS, 35 ZR) (temps de parcours en mn).

J.6.3.3 AG/SC3 : l'accessibilité de nuit

Un tsunami peut se produire de nuit comme de jour. Durant la nuit la fréquentation des rues par la population est très faible. Nous appliquons donc une vitesse de déplacement normale, correspondant à celle des heures creuses (4 h du matin). L'intérêt de réaliser un tel scénario réside dans le fait que plusieurs zones refuges ne sont pas disponibles durant la nuit. 5 zones refuges ferment leurs portes entre 19 h à 8h environ, dont celles de la cité portugaise. Il apparaît alors important de calculer le préjudice induit en termes d'accessibilité. Toutefois l'accessibilité ne se voit que très peu perturbée (figure J10). Ceci s'explique par un nombre suffisant de zones refuges de proximité.

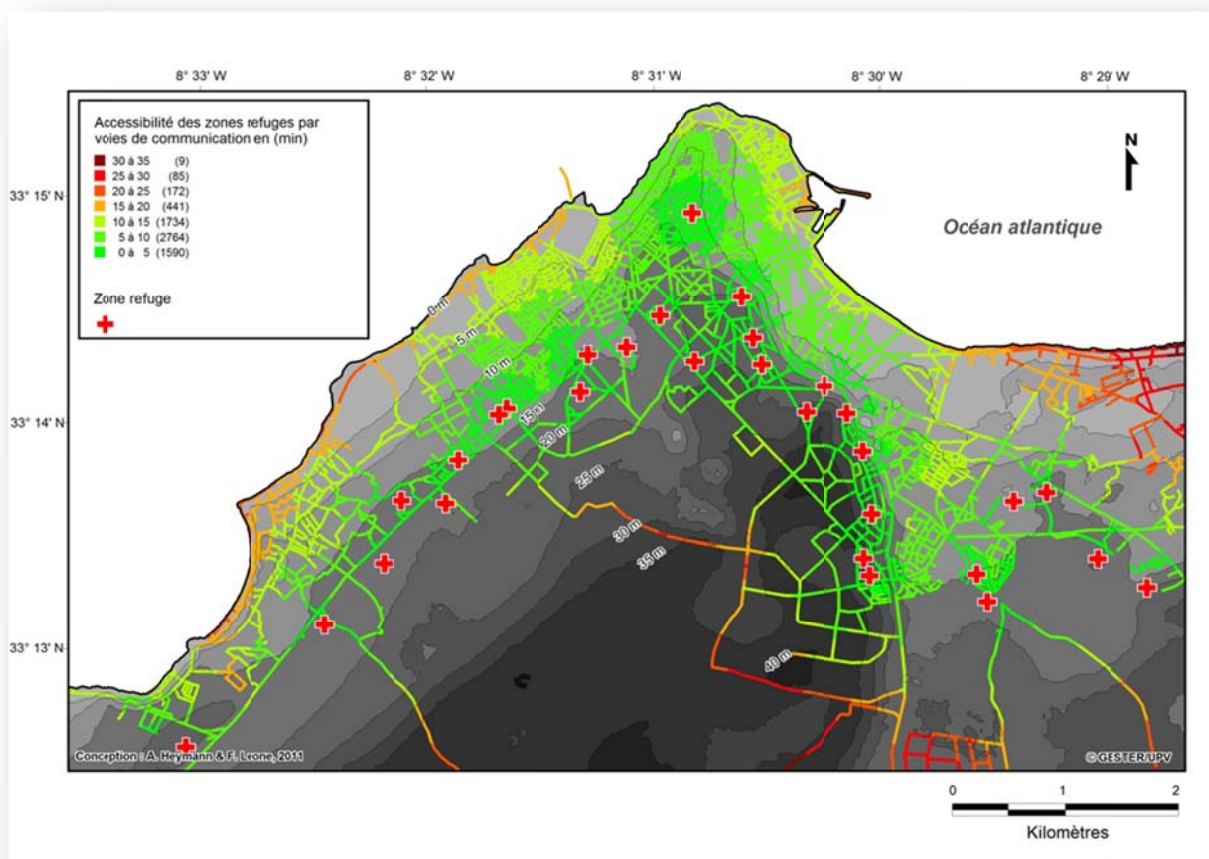


Figure J10 : AG/SC3 - L'accessibilité des zones refuges à El Jadida en heures creuses (nocturne, 4h, BS, 30 ZR) (temps de parcours en mn).

J.6.3.4 AG/SC4 : l'accessibilité en fonctionnement altéré (heures pleines et nombre limité de zones refuges).

L'accessibilité en fonctionnement altéré a été définie à travers un scénario contraignant en termes de disponibilité des zones refuges et de vitesses de mobilité. Ainsi nous avons fait le choix de ne garder que les zones refuges de qualité « très bonne » et « bonne » du classement établi plus haut. Pour un tel scénario le nombre total de zones refuges disponibles est de 25 (10 en moins). Leur indisponibilité peut être due à des contraintes d'aménagements ou à un choix des autorités d'en limiter le nombre. Le but de ce scénario est de tester l'accessibilité dans une vision pessimiste. Dans cet esprit, le calcul de l'accessibilité s'effectue avec des vitesses dégradées correspondant aux heures pleines. Pour un tel scénario, les zones refuges restent accessibles en un temps tout à fait correct depuis la majorité des lieux (figure J11). Mais l'absence de certaines zones refuges provoque un éloignement conséquent pour les individus qui résident, ou qui travaillent, au nord de la ville, ainsi qu'au niveau des plages. Dans ces secteurs, les distance-temps atteignent des valeurs assez critiques de 20 à 25 min.

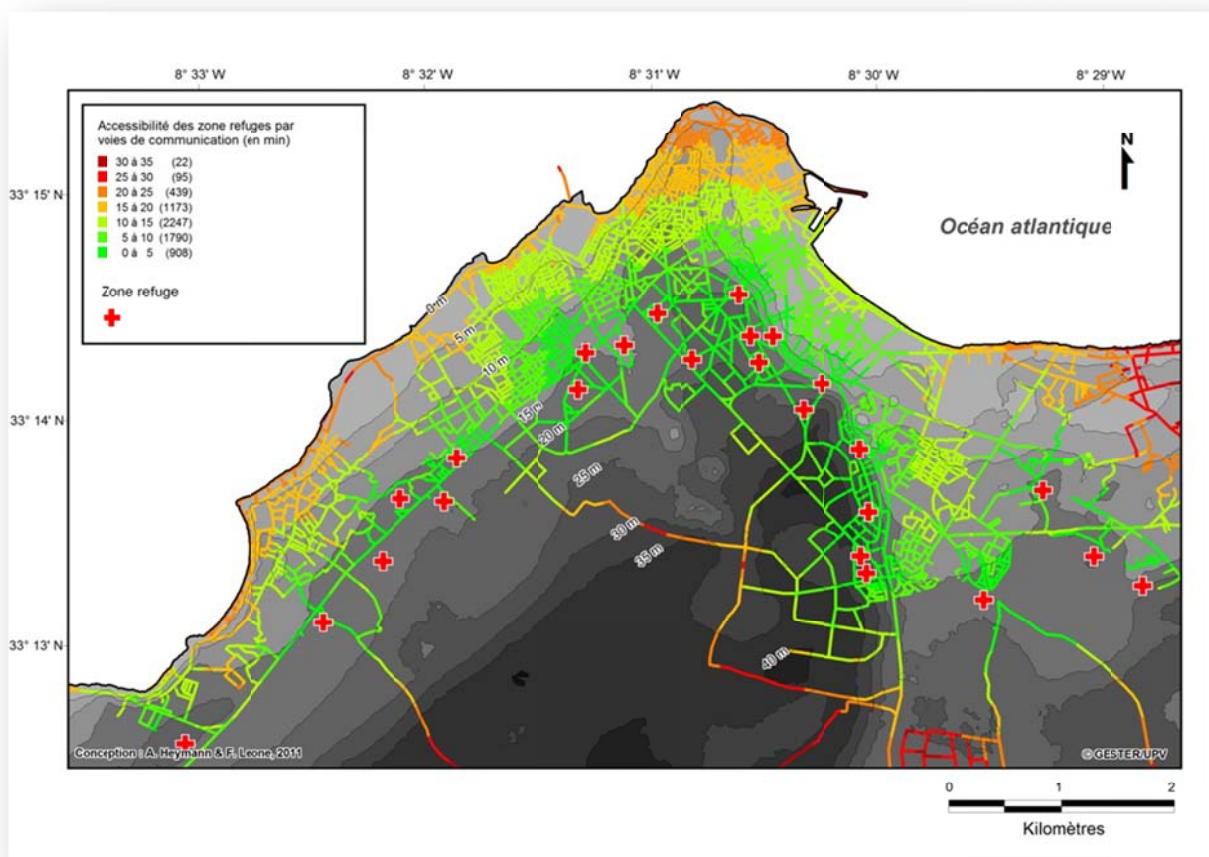


Figure J11 : AG/SC4 - L'accessibilité des zones refuges à El Jadida en fonctionnement altéré (diurne, 18h, BS, 25 ZR) (temps de parcours en mn).

J.6.4 RESULTATS : ACCESSIBILITE LOCALE (AL)

L'analyse de l'accessibilité à l'échelle locale (zone d'étude réduite) a pu être traitée au moyen d'isochrones surfaciques (carroyage), pour les sept scénarios suivants, introduisant également une modulation des effectifs de population à évacuer, des vitesses de déplacement associées et du nombre de zones refuges. Cette analyse a pu bénéficier des données constituées précédemment sur les volumes de personnes présentes à différents moments de la journée. Ces données complémentaires vont permettre de construire des courbes d'accessibilité et d'en tirer des enseignements complémentaires pour la planification d'une évacuation. Ces courbes d'accessibilité différencient les personnes exposées ($P_d > 0$) de l'ensemble des personnes présentes dans la zone d'étude (figure J12).

Les six premiers scénarios conservent des vitesses de déplacement homogènes sur l'ensemble de la zone, c'est-à-dire variables seulement en fonction du type de voie et du moment de la journée (heures creuses ou pleines) (tableau J5). Par contre, le dernier scénario (SC7) introduit une modulation plus détaillée des vitesses qui vont varier localement aussi en fonction des densités de population estimées à proximité du réseau. Pour prendre en compte ces réductions des vitesses liées à l'encombrement potentiel du réseau, nous avons appliqué les classes de vitesse « lentes » (correspondantes aux heures pleines) aux itinéraires recoupant des mailles de plus de 10 personnes, le reste du réseau gardant les vitesses « normales ».

Code du scénario	Moment	Vitesses appliquées	Nombre de zones refuges disponibles
AL/SC1	Heure creuse – BS (4h)	Normales	6
AL/SC2	Heure creuse - BS (10h)	Normales	10
AL/SC3	Heure pleine - BS (18h)	Normales	10
AL/SC4	Heure creuse – HS (4h)	Normales	6
AL/SC5	Heure creuse - HS (10h)	Normales	10
AL/SC6	Heure pleine – HS (18h)	Normales	10
AL/SC7	Heure pleine – HS (18h)	Normales & lentes*	10

* seulement pour les tronçons recoupant des mailles de plus de 10 personnes (soit 0,025 personnes/m²).

Tableau J5 : Variables des différents scénarios d’accessibilité locale (AL).

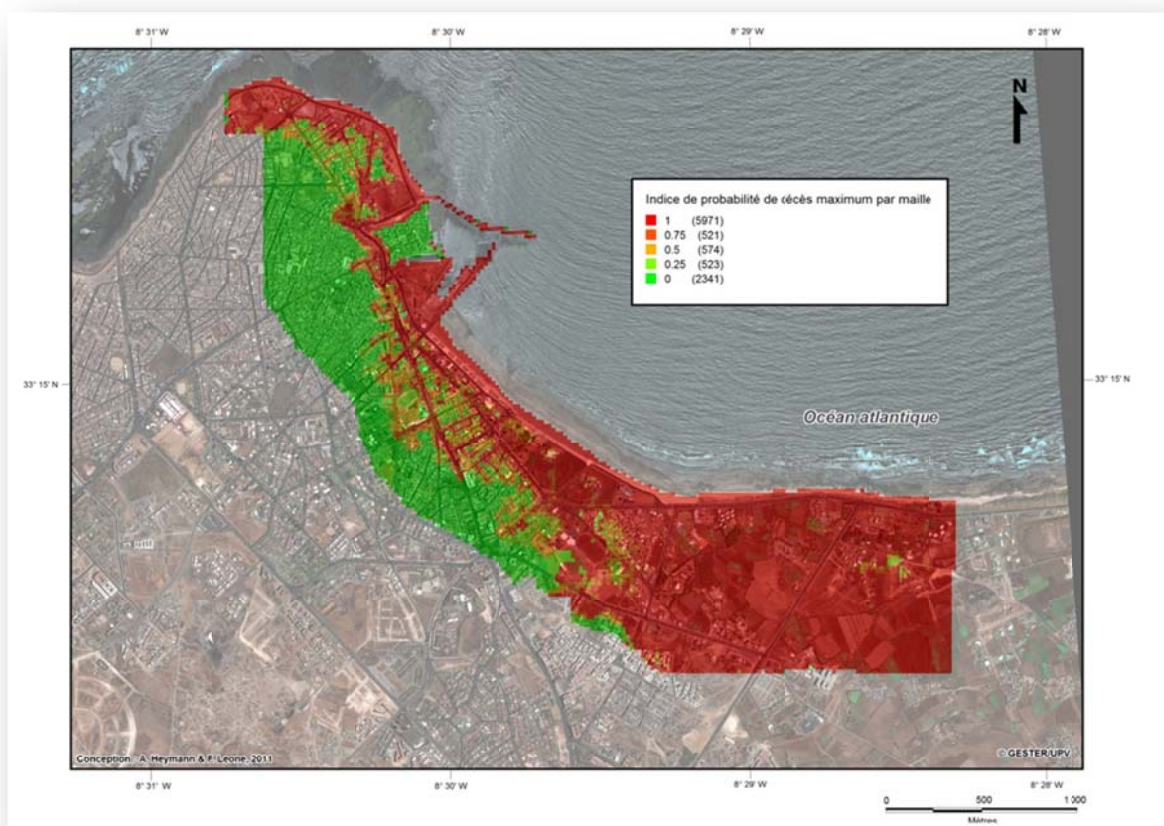


Figure J12 : Zone d’étude retenue pour les scénarios d’accessibilité locale (LA) et différenciation des probabilités de décès.

J.6.4.1 AL/SC1 à SC6 : l'accessibilité multi-temporelle sans prise en compte des densités de population.

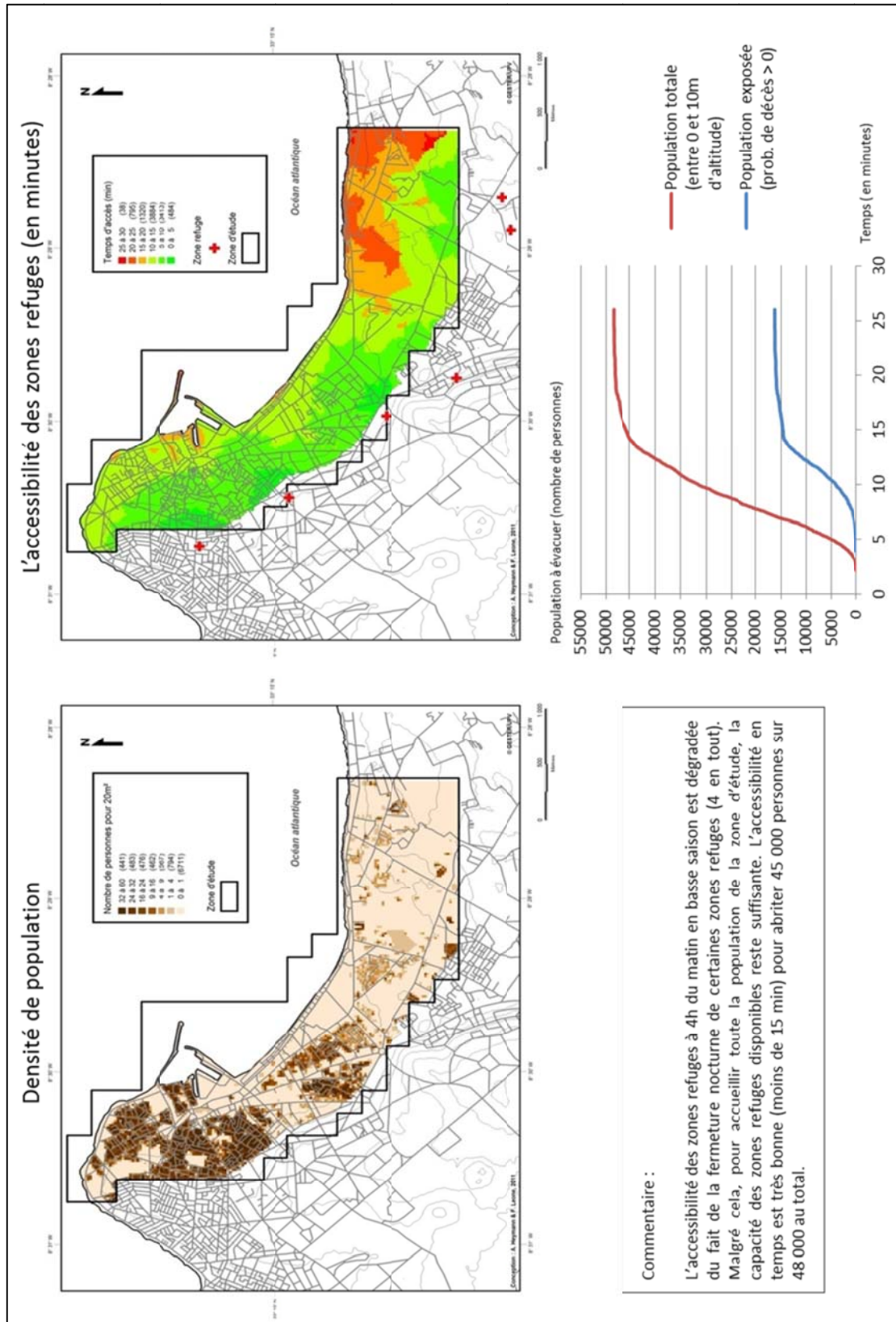


Figure J13 : AL/SC1 - L'accessibilité des zones refuges à El Jadida à 4 h en basse saison.

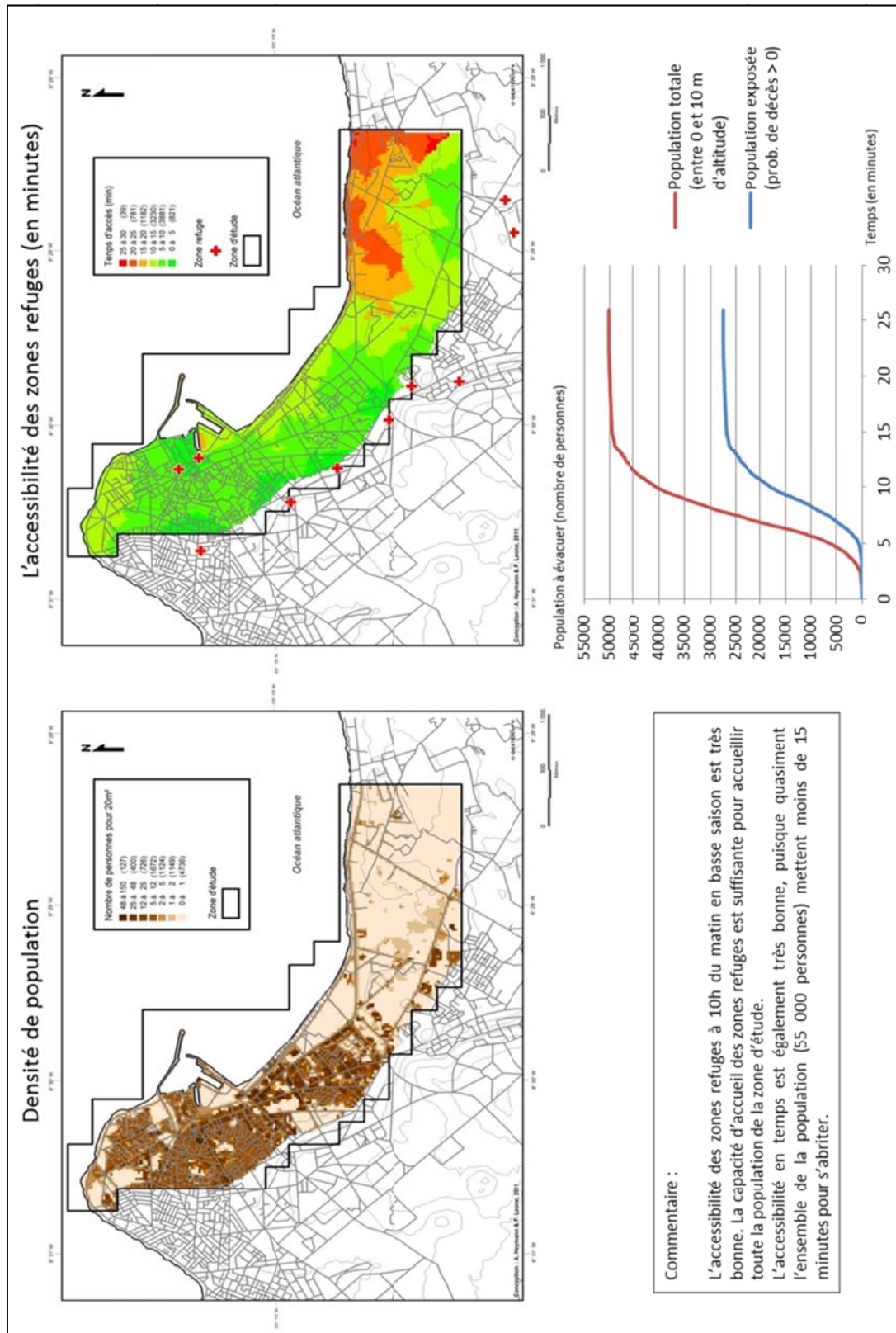


Figure J14 : AL/SC2 - L'accessibilité des zones refuges à El Jadida à 10 h en basse saison.

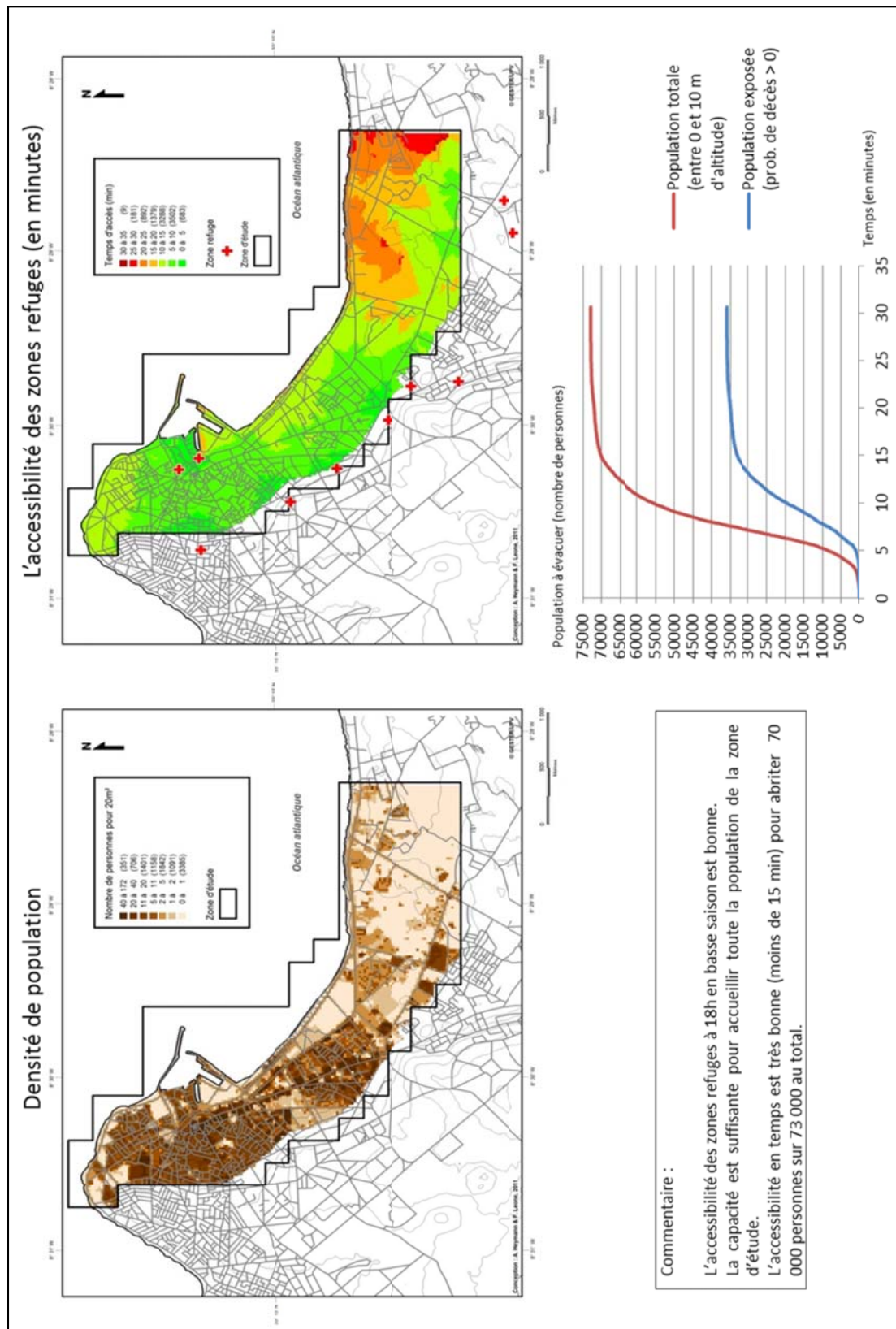


Figure J15 : AL/SC3 - L'accessibilité des zones refuges à El Jadida à 18 h en basse saison.

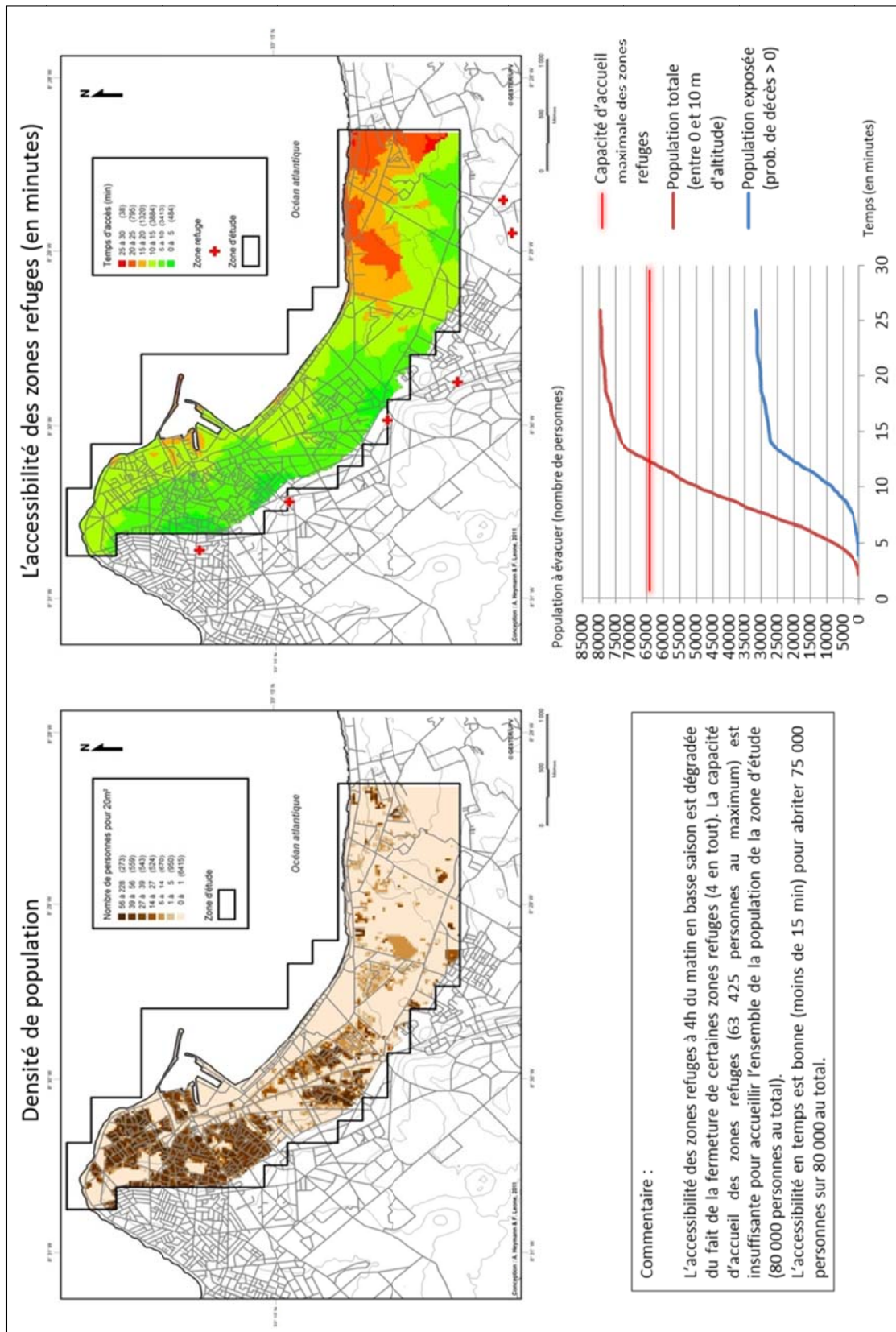


Figure J16 : AL/SC4 - L'accessibilité des zones refuges à El Jadida à 4 h en haute saison.

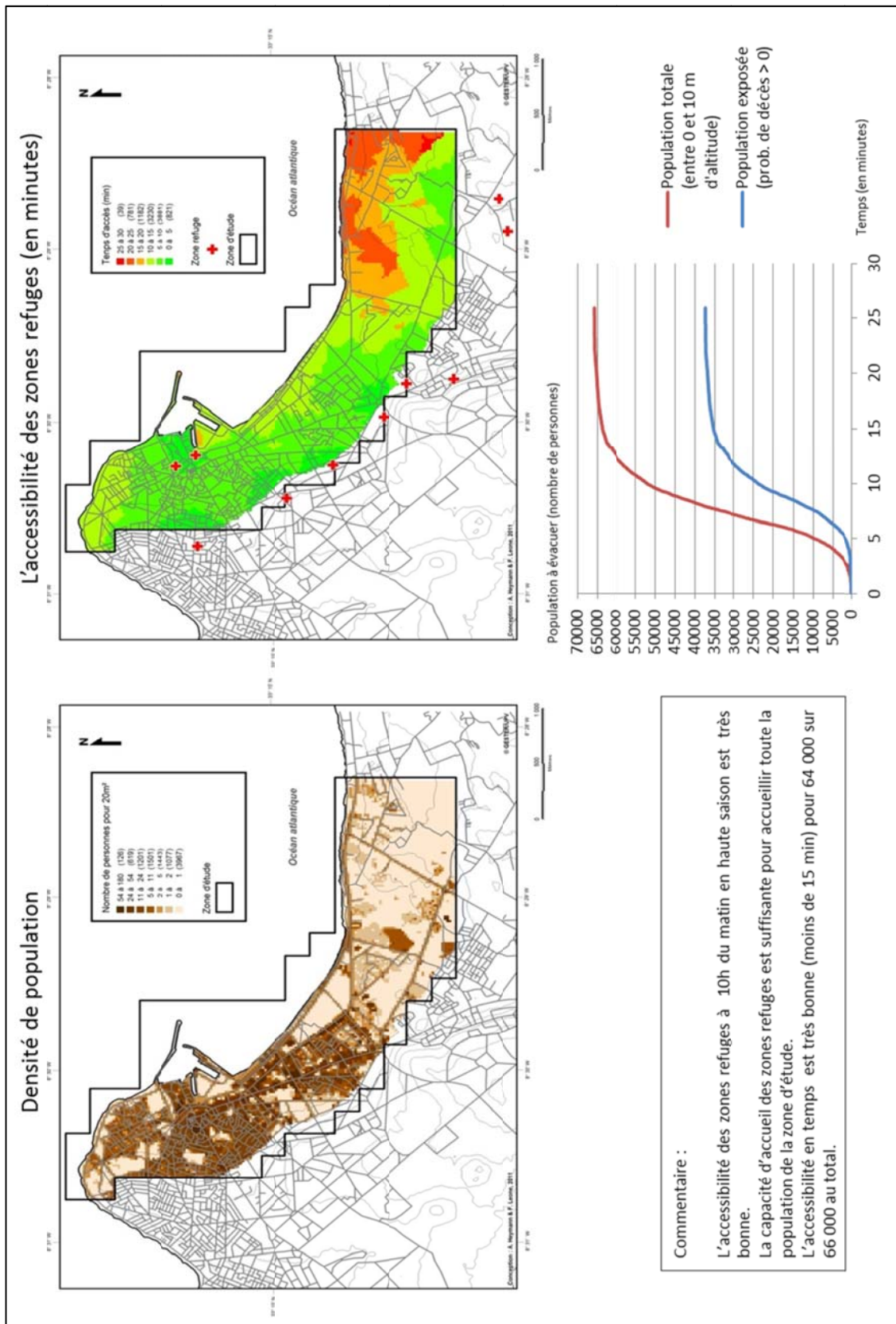


Figure J17 : AI/SC5 - L'accessibilité des zones refuges à El Jadida à 10 h en haute saison.

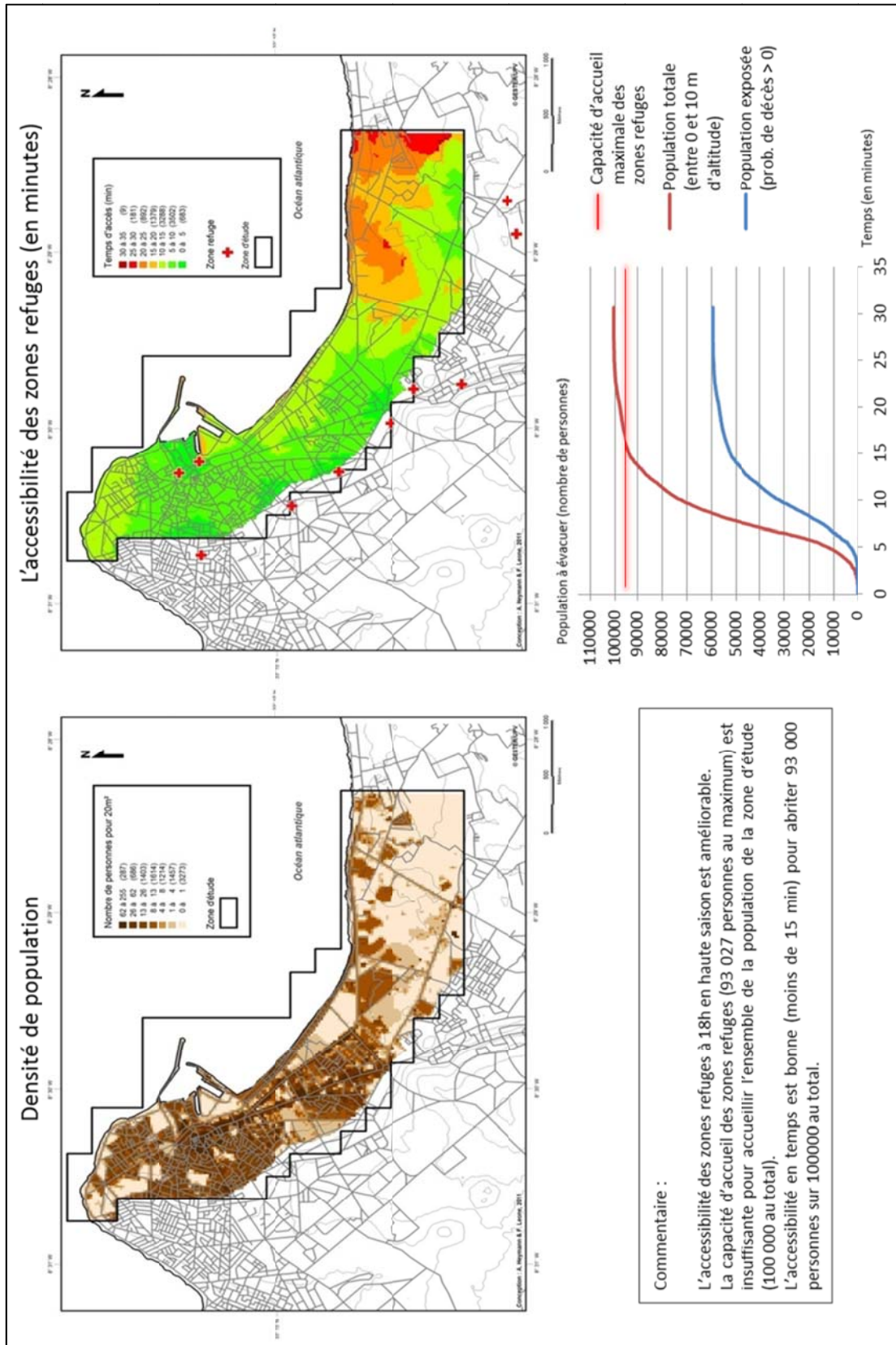


Figure J18 : AL/SC6 - L'accessibilité des zones refuges à El Jadida à 18 h en haute saison.

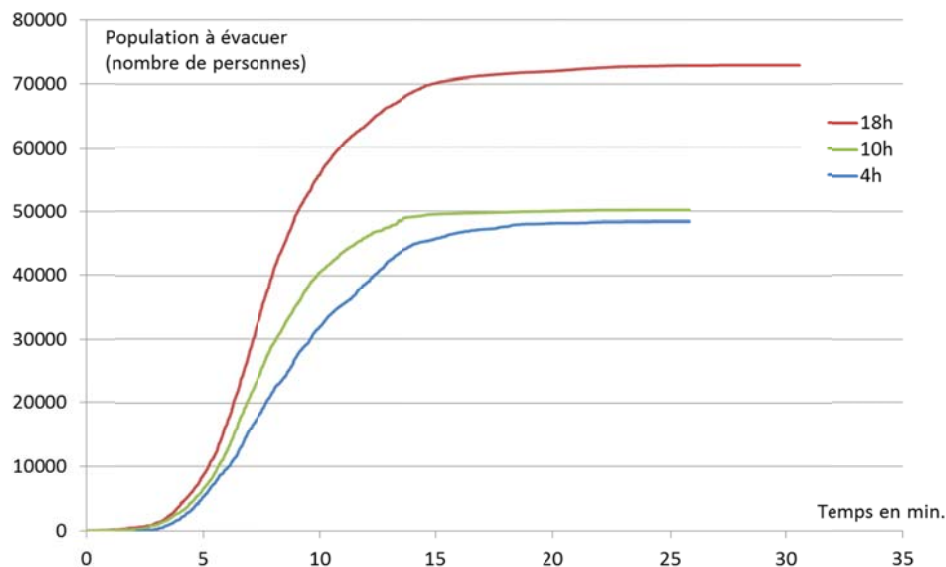


Figure J19 : AG – Courbes d’accessibilité des zones refuges à El Jadida en basse saison.

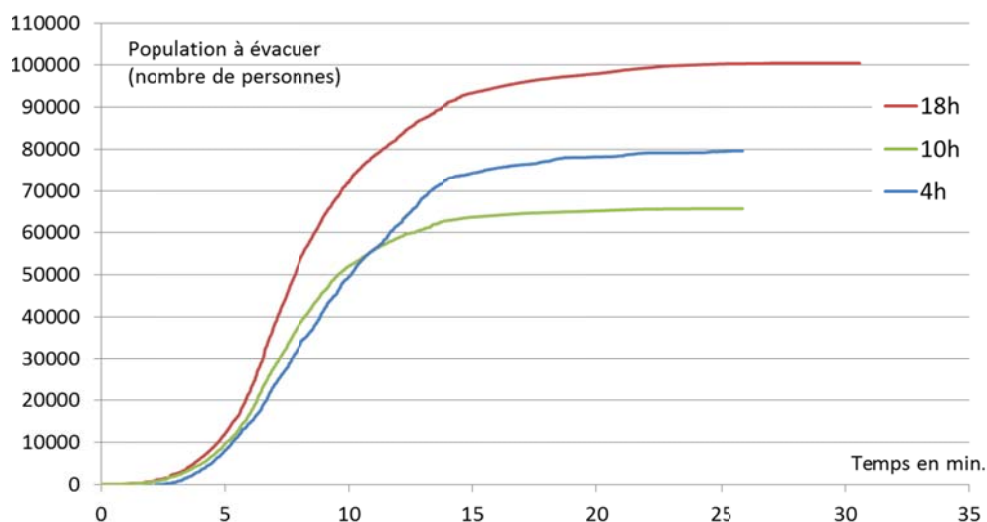


Figure J20 : AG – Courbes d’accessibilité des zones refuges à El Jadida en haute saison.

Suivant les scénarios retenus il faut compter en théorie entre 25 et 30 minutes pour que la population de la zone d’étude atteigne une zone refuge. La superposition des courbes met en évidence une dégradation du temps d’accès pour les scénarios d’évacuation vers 18h (figures J19 et J20). Bien que plus rapides, les scénarios nocturnes sont plus pénalisants pour mettre à l’abri toute la population de la zone d’étude, du fait de l’indisponibilité de 4 zones refuges sur 10 au total - ce qui correspond à une capacité totale des zones refuges réduite d’environ 32 %. C’est le cas en particulier en haute saison vers 4 h du matin avec des zones refuges saturées au bout de 12 minutes environ. Mais on retrouve également une saturation des zones refuges vers 18 h en haute-saison au bout de 15 mn, mais cependant avec moins de personnes non sécurisées qu’à 4 h du matin (7% contre 12%).

J.6.4.2 AL/SC7 : l'accessibilité multi-temporelle avec prise en compte des densités de population.

Dans ce scénario, les accès traversant une maille qui concentre plus de 10 personnes voient leur temps de parcours réduit, avec application d'une vitesse réduite dite « d'heures pleines », tandis que les autres accès conservent une vitesse « normale ». Le scénario présenté ici est établi pour 18h en haute saison. C'est à ce moment que la densité de personnes est la plus importante sur El Jadida. Il s'agit donc d'un scénario maximisant.

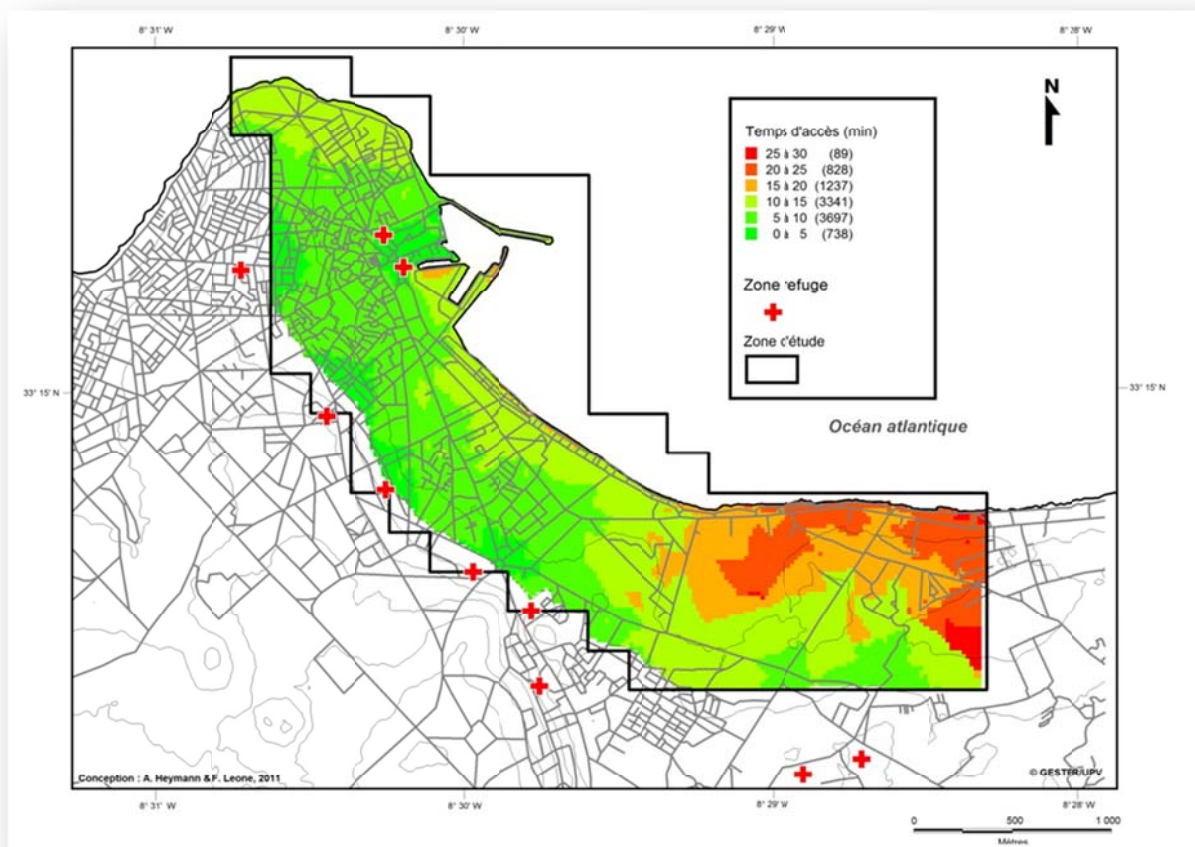


Figure J21 : AL/SC7 - L'accessibilité des zones refuges à El Jadida à 18 h du matin en haute saison (avec modulation des vitesses en fonction de la densité de population à proximité du réseau).

Toutefois le constat est sensiblement le même que pour le scénario local d'accessibilité à 18h en haute saison car les espaces bénéficient d'un réseau d'accès suffisamment dense pour rejoindre les zones refuges dans un délai de moins de 30 minutes.

J.6.5 DISCUSSION

Bien qu'ayant traité l'accessibilité des zones refuges au moyen de différents scénarios, les résultats sont sensiblement identiques. La très grande majorité des espaces bénéficie d'un réseau suffisamment dense et de qualité pour évacuer la zone littorale d'El Jadida (moins de 10 m d'altitude) en 10-15 min en moyenne et 30-35 min au grand maximum. Cette

accessibilité se dégrade lors des scénarios de nuit ou lors des fortes fréquentations humaines (heures pleines en haute saison). Bien qu'en théorie suffisants, ces temps de mise en sécurité demeurent néanmoins très limités dans la pratique pour abriter la totalité de la population avant l'arrivée des premières vagues d'un tsunami de type 1755. Rappelons que nos simulations ne prennent pas en compte les effets de friction liés aux comportements collectifs ou aux profils physiques des personnes sur le réseau, que seuls des modèles de type SMA (systèmes multi-agents) peuvent gérer, mais à grand coûts de réalisation. A **ces temps d'accès vers les zones refuges** (35 minutes max.) doivent être ajoutés les délais de **transmission de l'alerte** montante et descendante (15 minutes ?) et de **réaction des populations** (15 minutes ?), ce qui aboutit à un **temps minimum crédible d'évacuation de 65 minutes à El Jadida**. Ce temps est à mettre en parallèle avec le temps modélisé d'arrivée d'un tsunami de type 1755 qui est de 53 minutes pour El Jadida, ce qui donne un **déficit minimum de 12 minutes** pour mettre toute la population littorale en sécurité avant l'arrivée du tsunami (figure J22). Une fois un système d'alerte régional en service, ce déficit pourra être comblé par une planification locale de l'évacuation dont nous proposons quelques éléments dans la dernière partie de ce rapport.

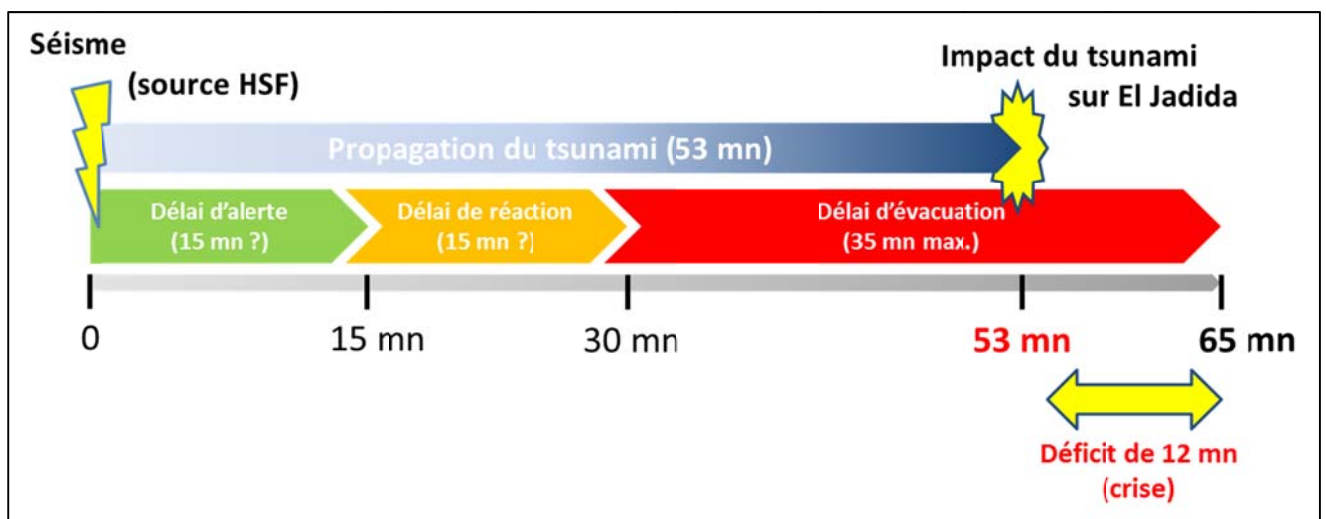


Figure J22 : Déficit théorique de temps disponible (12 mn) pour une évacuation pédestre avant l'arrivée d'un tsunami de type 1755 sur El Jadida (scénario optimiste).

K CONCLUSION : UTILITE DES RESULTATS POUR LA PREVENTION

K.1 CONTRIBUTION A UN NOUVEAU MODELE DE VULNERABILITE HUMAINE

Cette recherche sur le Maroc a permis de développer un nouveau modèle de vulnérabilité humaine qui puisse intégrer au moyen de matrices de décès les connaissances empiriques obtenues lors de retours d'expériences. L'originalité du modèle réside dans la variabilité spatiale et temporelle des enjeux humains établie au moyen de cartes de densités au pas horaire pour deux saisons. Le traitement spatial des données à une résolution très fine (bâti, espaces publics) permet de construire des indicateurs de risque agrégés à différentes échelles spatiales. Cette approche par scénario offre la possibilité d'intégrer les multiples composantes du risque et de déboucher sur des cartographies utiles pour conscientiser le risque et amorcer une démarche préventive avec les autorités locales. Ce modèle de vulnérabilité permet d'estimer et de localiser le nombre de personnes à évacuer pour chaque niveau de danger (d'aléa) suivant le moment de la journée. Ce type d'information est indispensable pour planifier une évacuation, tout autant que la connaissance des temps d'arrivée du tsunami ou des hauteurs d'eau attendues. Les autres informations utiles pour cette planification ont été obtenues par une démarche d'expertise terrain des zones refuges potentielles, tandis que le modèle d'accessibilité de ces zones refuges a permis de valider la pertinence de leur implantation en estimant leur temps d'atteinte et leurs courbes de remplissage. Sur ce point, les deux modèles ont permis de converger, l'un apportant des résultats sur les volumes de personnes, l'autre sur leur accessibilité. Notons par ailleurs que le temps d'accès vers la zone refuge la plus proche constitue un critère de vulnérabilité humaine non négligeable. Le choix d'un modèle d'accessibilité sur graphe est justifié par son faible coût de mise en œuvre, un temps réduit de développement et une faible exigence en ressources informatiques. Il est très adapté à des simulations à l'échelle urbaine ou supra, tandis que pour des simulations plus fines, par exemple à l'échelle d'un quartier ou d'un bâtiment, il serait plus judicieux d'utiliser des modèles de type SMA (Systèmes Multi-Agents), qui présentent l'avantage de gérer des flux dynamiques et des effets de friction sur le réseau, mais avec l'inconvénient d'être beaucoup plus lourds à mettre en œuvre car plus exigeants en données spatiales d'entrées sur les configuration topographique des lieux étudiés.

K.2 EN ATTENDANT UN SYSTEME D'ALERTE REGIONAL

Le Maroc est directement concerné par le risque de tsunami, pourtant il semble peu intégré dans la coopération internationale GIC / SATANEM (Système d'Alerte aux Tsunamis de l'Atlantique Nord-est et de la Méditerranée). Il ne participe que très discrètement aux réunions de la COI de l'UNESCO et ne montre pas de véritable volonté d'engagement dans le développement d'un système d'alerte pour l'atlantique Nord-Est. Pourtant le Maroc est déjà doté d'un système de détection sismique moderne qui permet de détecter rapidement un séisme. Associé à cela, suite à la COI de l'Unesco de décembre 2005, la Maroc a participé en collaboration avec le Portugal, à la mise en place d'un tsunamimètre qui a été installé en août 2007 dans le golf de Cadiz. Toutefois le manque de balises marégraphes dans cette région ne permet pas d'obtenir d'estimation précise. Ce tsunamimètre permet au Maroc d'être alerté en cas de tsunami dans un délai maximum de 15 minutes après le séisme. Ce délai garanti par l'UNESCO, doit être une première étape vers la mise en place de plans de

préparation et d'évacuation en cas de tsunami au Maroc. Or pour le moment, les autorités marocaines ne semblent pas encore suffisamment sensibilisées malgré les enjeux présents.

K.3 VALORISATION ET AIDE A LA PREVENTION

Aucune planification officielle en cas de tsunami n'existe pour le moment au Maroc et c'est la raison pour laquelle, en parallèle des retombées scientifiques du projet MAREMOTI pour le Maroc, nous avons souhaité amorcer sur El Jadida une toute première démarche de prévention en proposant des documents d'aide à la planification d'une évacuation. Ces documents ont été présentés aux autorités marocaines (Gouverneur de la province d'El Jadida en particulier) à l'occasion de la rencontre Géorisque 2012 qui s'est tenue à El Jadida les 14 & 15 février 2012, co-organisée par l'UMR GRED (Université Montpellier 3 & IRD) et le laboratoire de Géosciences Marines & Science du Sol – URAC45 de la Faculté des Sciences El Jadida (session risque tsunami) (figure K1).



Figure K1 : Les participants à la rencontre Géorisque 2012 (El Jadida, Maroc) qui a donné lieu à une présentation des résultats du programme MAREMOTI aux autorités marocaines.

Le document final présenté à l'issue de la rencontre Géorisque 2012 est une proposition de carte des d'itinéraires et des zone refuges à privilégier en priorité sur la ville d'El Jadida, assortie de consignes à suivre en cas d'alerte tsunami (figures K2 et K3). Ces documents, associés aux autres productions cartographiques de notre étude, doivent constituer les premiers supports d'une réflexion locale pour la mise en place d'un plan de préparation en cas de tsunami, qui doit aussi trouver des prolongements sur le terrain par le biais d'une

signalétique adaptée et normalisée, à la fois des zones de danger, des itinéraires d'évacuation à suivre, et des zones refuges à atteindre (figure K4). Mais cette planification d'une évacuation doit être indissociable d'une éducation des populations, afin de développer à la fois une conscience du risque, une capacité de détection de l'arrivée d'un tsunami, et une connaissance des consignes de protection et d'évacuation. Afin de concrétiser ces bonnes pratiques, nous encourageons les autorités locales à mettre rapidement en place un exercice d'évacuation accompagné d'une campagne de sensibilisation de tous les acteurs de la gestion de crise, sans oublier les populations exposées (figure K5).

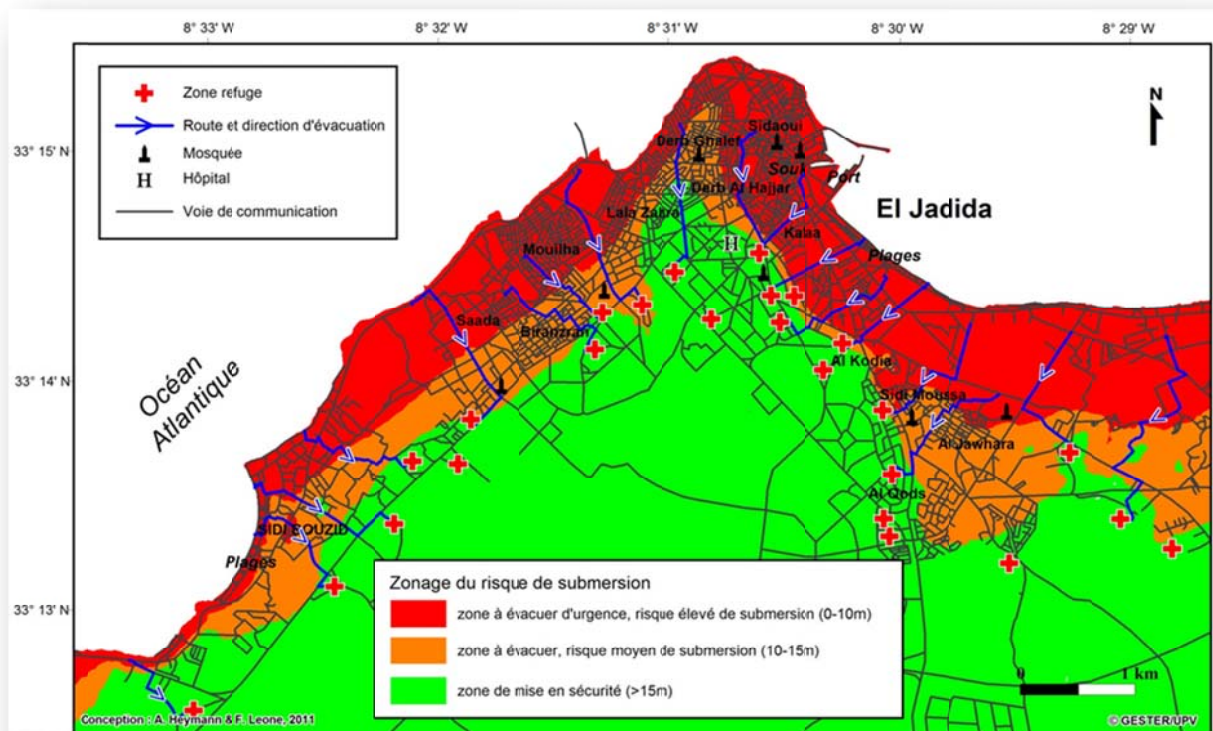


Figure K2 : Proposition de plan d'évacuation en cas de tsunami pour la ville d'El Jadida (Maroc).

Evacuation en cas de tsunami
(consulter la carte d'évacuation)

CONSIGNES D'EVACUATION :

Quand évacuer?

- ✓ Lorsque vous interprétez un signe précurseur
Si vous ressentez un séisme ou si la mer se retire anormalement vous devez commencer à évacuer (certains animaux peuvent adopter des comportements suspects)
- ✓ Lorsque l'alerte est donnée
Soyez attentif à l'alerte donnée par les autorités: sirène, haut parleur, SMS, radio, TV. Dès lors que vous êtes informé de l'alerte, évacuez immédiatement

Où évacuer?

- ✓ Vers les hauteurs, en suivant les panneaux de signalisation
Dirigez vous le plus rapidement possible vers les hauteurs de la ville. Suivez les panneaux de signalisation, ils vous conduiront directement en sécurité dans une zone refuge. Si vous êtes dans un bâtiment solide de plus de 3 étages vous pouvez vous abriter au dernier étage. Prenez connaissance dès à présent des panneaux de signalisation et des différents itinéraires menant aux zones refuges en consultant la carte d'évacuation.

Qu'est ce qu'un tsunami?
Un tsunami est une série de vagues de mer provoquée le plus souvent par un séisme sous marin. A l'approche des côtes la taille des vagues augmente jusqu'à atteindre parfois celle d'un immeuble de 10 étages. Les vagues vont alors s'abattre sur le rivage et inonder les terres sur plusieurs centaines de mètres voir plusieurs kilomètres. Durant la submersion les vagues vont emporter des bateaux, des véhicules, des constructions fragiles et des débris en tout genre, les transformer en projectile. Les dégâts sont alors spectaculaires et le danger de mort immense.

Ce qu'il faut savoir:

- Suite à un séisme, un tsunami peut être en approche des côtes. les premières vagues peuvent déferler sur le rivage seulement quelques minutes après le séisme.
- Un tsunami peut se produire à n'importe quelle heure du jour et de la nuit et à n'importe quelle saison.
- Un tsunami comporte généralement plusieurs vagues espacées de quelques minutes. La première vague est rarement la plus importante.

Le bon comportement à adopter :

- Dès que vous avez pris connaissance de l'arrivée d'un tsunami, rassemblez les gens proches de vous et évacuez directement. Ne prenez aucune affaire personnelle et abandonnez votre activité en cours.
- Evacuez à pied et dans le calme en suivant les panneaux de signalisation.
- Lorsque vous êtes dans une zone refuge ne bloquez pas les entrées pour faciliter la venue d'autres personnes
- Restez en lieu sûr tant que les autorités n'ont pas donné l'autorisation de redescendre vers le rivage.

Figure K3 : Exemple de consignes à diffuser aux populations pour se préparer au risque de tsunami.



Figure K4 : Signalétique officielle adoptée par l'UNESCO pour préparer une évacuation en cas de tsunami (norme ISO 20712-1 : 2008).

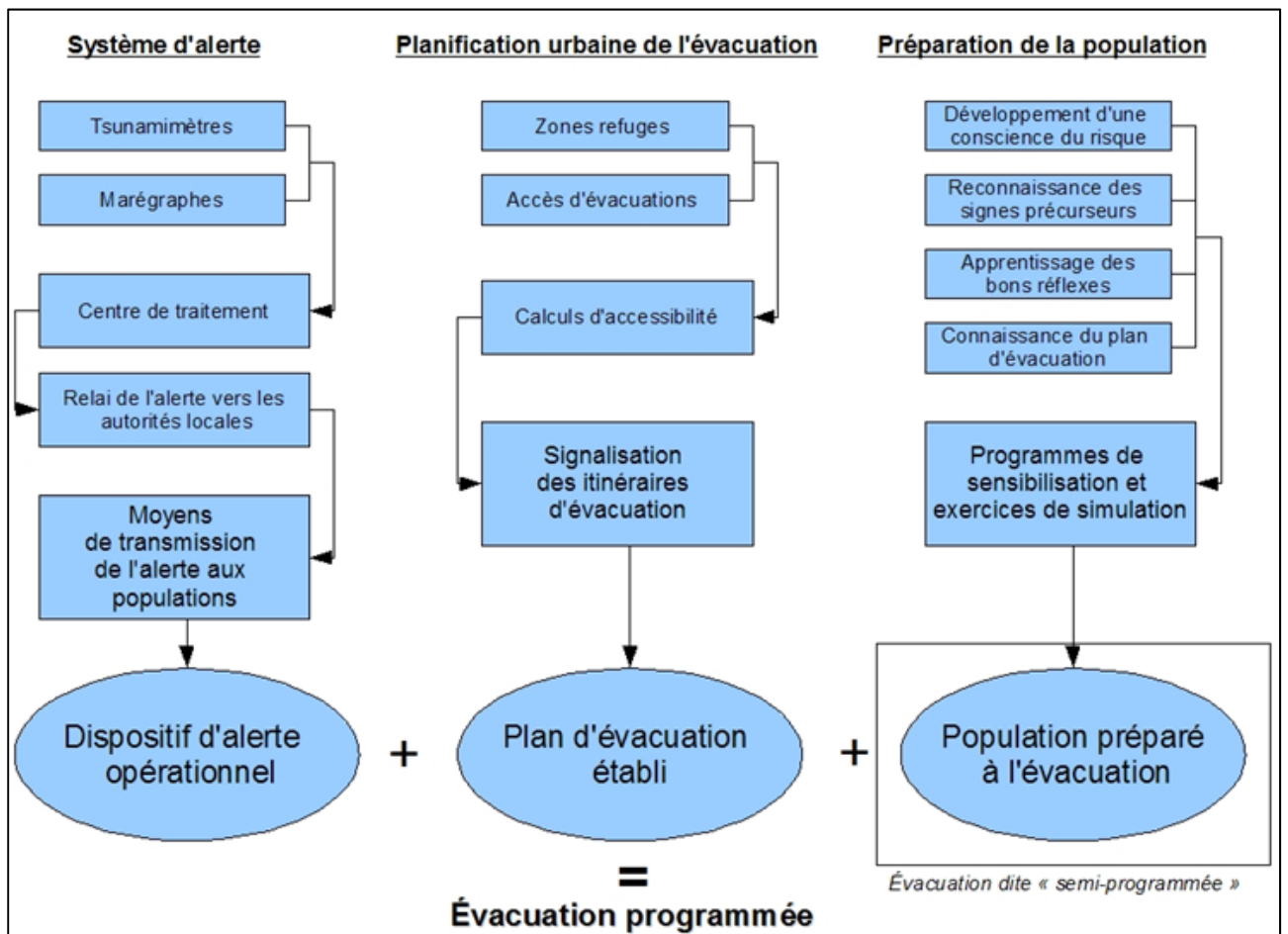


Figure K5 : Les composantes d'un plan de préparation au risque de tsunami (Heymann, 2012).

BIBLIOGRAPHIE

- Appert M. & Chapelon L. (2006) - La vulnérabilité des réseaux routiers urbains face aux risques d'altération, in : *La mise en carte des risques naturels, Géorisque n°2*, collection du laboratoire GESTER, Université Montpellier 3, pp. 47-58.
- Atillah A. (2008) - *Projet SCHEMA : Une nouvelle approche d'évaluation des impacts de tsunami, basée sur l'observation de la terre (exemple de Rabat Salé)*, Centre Royal de Télédétection Spatiale, Rabat (Maroc), 19 p.
- Audouit C. (2008) - *L'étude de la fréquentation et de ses impacts sur le littoral du Languedoc-Roussillon*, Montpellier III, 567 p.
- Baize S. & al. (2004) - *Le séisme d'Al Hoceima (Maroc) de 24 février 2004*, Rapport de la mission AFPS, 65 p.
- Baladès J-D & al. (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, Paris, 64 p.
- Baptista M.A. et Miranda J.M. (2009) - Revision of the Portuguese catalog of tsunamis, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n°9, pp. 25-42.
- Baptista M.A., Miranda J.M., Chiericci F., Zitellini N. (2003) - New study of the 1755 earthquake source based on multi-channel seismic survey data and tsunami modelling, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n°3, pp. 333-340.
- Baptista M.A., Heitor S., Miranda J.M., Miranda P., Mendes-Victor L. (1998) - The 1755 Lisbon earthquake; evaluation of the tsunami parameters, *J. Geodyn.*, n°25, pp. 143-157.
- Bavoux J.J., Beaucire F., Chapelon L., Zembri P. (2005) - *Géographie des transports*, Ed. Armand Colin, Collection U, Paris, 232 p.
- Blanc P.L. (2009) - Earthquakes and tsunami in November 1755 in Morocco: a different reading of contemporaneous documentary sources, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n°9, pp. 725-738.
- C.R.T - Conseil Régional du Tourisme Doukkala-Abda. (2008) - *Destination Doukkala-Abda*, 88 p.
- Cannon (2000) - Vulnerability analysis and Disaster, In : Parker, D. Eds., *Floods*, Routledge, London, 24 p.
- Carabelli R. (1999) - Evolution des vestiges portugais. Quelle intégration dans le Maroc contemporain ?, Thèse de doctorat, Université de Tours.
- Chahid A. et Lekhiar M. (2006) - *El Jadida mémoire*, 2ème édition, Maroc, 144 p.
- Chapelon et Bozzani (2003) - L'intermodalité air-fer en France : une méthode d'analyse spatiale et temporelle », *L'Espace Géographique* , n° 1, pp. 60-76.
- Chapelon L. (2006) - *Politiques de transport et accessibilité* – Mémoire géographie, 268 p.
- Chouquer G. (2008) - *Traité d'archéogéographie, la crise des récits géohistoriques*, Paris, 2008, 200 p.
- Cohen (1990) – ref manquante
- Crocq L., Huberson S., Vraie B., (2009) - *Gérer les grandes crises : sanitaires, écologiques, politiques et économiques*, Edition Odile Jacob, 291 p.
- Daamen W. (2004) - *Modeling Passenger Flows in Public Transport Facilities*, Delft University of Technology, 403 p.
- Dalle I. (2007) - *Maroc : histoire, société, culture*, Ed. La découverte, Paris, 221p.
- Dewi R.S. (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 MSc.
- Dijkstra E. W. (1959) - A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, 1, pp. 269–271.
- Direction Régionale Doukkala-Abda. (2008) - *Monographie de la région Doukkala-Abda*, 91p.
- EEFIT (Earthquake Engineering Field Investigation Team) (2005) - *The 26 December 2004 Indian Ocean Tsunami: A Preliminary Reconnaissance*, Report, 46 p.
- FEMA (2008) - *Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis*, FEMA P646 / June 2008, 176 p.
- Fruin J. (1971) - *Pedestrian Planning and Design*, Metropolitan Association of Urban Design and Environmental Planners, Inc., New York.
- Gaillard J.-C., Clavé E., Vibert O., Azhari, Dedi, Denain J.-C., Efendi Y., Grancher D., Liamzon C.C., Sari D.S.R., Setiawan R. (2008) - Ethnic groups' response to the 26 December 2004 earthquake and tsunami in Aceh, Indonesia, *Natural Hazards*, 47(1), pp. 17-38.
- Garcin M., Preme B., Attanayake N., De Silva U., Desprat J.F., Lenotre N., Pedreros R., Siriwardana C.H.E.R., Weerawarnakula S. (2007) – *Système d'information géographiques sur un site pilote au Sri Lanka*, BRGM, Actes du colloque international pluridisciplinaire « Le Littoral : subir, dire, agir - Lille, France, 16-18 janvier 2008, 12 p.
- Gauraz A.L. (2008), *Elaboration d'indicateurs d'évaluation de la vulnérabilité structurelle aux tsunamis*,
- Gauraz A.L., Valencia N., Koscielny M., Guillaude R., Gardi A., Leone F. & Salaun T. (2009) - Tsunami damages assessment: vulnerability functions on buildings based on field and earth observation survey, In: *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU2009-5785, EGU General Assembly 2009, 1 p.
- Gutscher M.A., Baptista M.A. and Miranda J.M. (2006) - The Gibraltar Arc seismogenic zone (part 2): constraints on a shallow east dipping fault plane source for the 1755 Lisbon earthquake provided by tsunami modelling and seismic intensity, *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2006.02.025.
- Helbing, D., Johansson, A., Mathiesen, J., Jensen M.H., Hansen A. (2006) - Analytical approach to continuous and intermittent bottleneck flows, *Physical Review Letters*, 97, 168001.
- Heymann A. (2011) - *Evacuation en cas de tsunami : modélisation et évaluation de l'accessibilité des zones refuges à El Jadida (Maroc)*, mémoire de Master 1 GCRN (dir. F. Leone), Université Montpellier 3, 141 p.
- HR Wallingford. (2006) – *Flood Risks to people*, FD2321/TR2 Guidance Document, Defra / Environment Agency, Flood and Coastal Defence R&D Programme, Flood Hazard Research Centre, Middlesex University, Risk & Policy Analysts Ltd., 91 p.
- 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) - Fifth Session*, Athens, Greece, 3-5 November, 49 p.
- IOC-UNESCO (2009) - *Tsunami risk assessment and mitigation for the Indian Ocean; knowing your tsunami risk and what to do about it*, IOC Manual and Guides, No 52, Paris, 84 p.
- IOC-UNESCO (2011) - *Reducing and managing the risk of tsunamis*, IOC Manuals and Guides, No 57, Paris, 74 p., unesdoc.unesco.org/images/0021/.../214734e.pdf.
- Kaabouden F., Baptista A., Iben Brahim A., El Mouraouah A., Toto A. (2009) - On the Moroccan tsunami catalogue, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n°9, pp. 1227-1236.
- Knapik A. (2009) - *L'étude des dépôts sableux et rocheux sur la lagune de Sidimoussa*, Mémoire de M1, Université Paris 1, Ch. 2, pp. 44-82.

- Koshimura S., Katada T., Mofjeld H. O., Kawata Y. (2006) - A method for estimating casualties due to the tsunami inundation flow, *Natural Hazards*, 39, pp. 265–274, DOI 10.1007/s11069-006-0027-5
- Koshimura S., Oie T., Yanagisawa H., Imamura F. (2009) - Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, *Coastal Engineering Journal*, Vol. 51, No. 3, pp. 243–273.
- Lagahé E. (2010) - *Caractérisation spatio-temporelle de la vulnérabilité urbaine face au risque de tsunami : le cas d'El Jadida (Maroc): approche humaine*, mémoire de Master 1 GCRN (dir. F. Leone), Université Montpellier 3, 116 p.
- Laghi M., Cavalletti A., Polo P. (2006) - *Evacuation routes tools ArcGIS Toolbox*, Asian Disaster Preparedness Center, 98 p.
- Lee D., Kim H., Park J.H., Park B.J. (2003) - The current status and future issues in human evacuation from ships, *Safety Science*, 41, pp. 861- 876.
- Lee D., Park J-H., Kim H. (2004) - A study on experiment of human behavior for evacuation simulation, *Ocean Engineering*, 31, pp. 931-941.
- Leone F., Vinet F., Denain J.C., Bachri S. (2007) – Développement d'une méthodologie d'analyse spatiale des destructions consécutives au tsunami du 26 décembre 2004 (Banda Aceh, Indonésie). Premiers résultats pour l'élaboration de futurs scénarios de risque – *Géocarrefour*, Vol. 82, n°1-2, (numéro spécial risques et territoires), pp. 77-90.
- Leone F., Deymier J., Chapelon L., Colas A., Jomelli V. (2011) - Risques naturels et accessibilité territoriale : le cas des debris flows dans les Alpes - In : *Actes du Colloque international du GIS Collège International des Sciences du Territoire : « Fonder les sciences du territoire »*, Paris, novembre 2011, pp. 290-296.
- Leone F., Lavigne F., Paris R., Denain J.C., Vinet F. (2010) - A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability, *Applied Geography*, 13 p., doi:10.1016/j.apgeog.2010.07.009.
- Leone F. (2007) - *Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes « naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisque* - HDR, Mémoire, Université Montpellier III, 330 P.
- Leone F & Vinet F. (2006) – *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques*, Géorisques, n°1, coll. de l'Equipe d'Accueil GESTER, Ed. Publications de l'Université Paul-Valéry-Montpellier 3, 141 p.
- Leone F. (2011) - Système d'Information Géographique et Indicateurs de risques naturels en Méditerranée : le projet SIG RINAMED. In : M. Fort & F. Ogé (ed.), *Actes du colloque international « Risques Naturels en Méditerranée occidentale »*, Carcassonne, 16-21 novembre 2009, UMR Prodig, Paris, p. 2-19.
- Maltais D. & Gauthier S. (2008) - *Les catastrophes dites naturelles : un construit social ?*, In : Locat J., Perret D., Turmel D., Demers D. et Leroueil S. : *Comptes rendus de la 4^e Conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion* - Presse de l'Université Laval, Québec, 594 p.
- MATEE (Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement – Département de l'Environnement) (2005) - La Cellule du Littoral. Répartition spatiale de l'occupation du sol au long du littoral. *Bulletin des espaces littoraux*, n° 2, Édité. MATEE/MedWetCoast, Maroc, 12 p.
- Mei C. C. (1983) - *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*, Wiley, New York, 1983.
- Meschinet de Richemond N. et Reghezza M. (2010) - La gestion du risque en France : contre ou avec le territoire ?, *Annales de Géographie*, n°673, pp. 248-267.
- Meunier R. (2008) - *Diagnostic du risque tsunami sur le littoral atlantique marocain : l'exemple de la côte d'El Jadida* - Mémoire de M1 GCRN, Dir. F. Leone, Université Montpellier III, 135 p.

- Mouabid J. (2000) – *L'espace littoral entre El Jadida et Safi (Maroc) développement des activités économique et conséquences écologique*, Thèse de Doctorat : Géographie Bordeaux 3 : 2002, 364 p.
- Moussaïd M. (2010) - *Étude expérimentale et modélisation des déplacements collectifs de piétons*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse III , Paul Sabatier, 225 p.
- Oak Ridge National Laboratory (ORNL) (2008) - *LandScan™ Global Population Database*. Édité. Oak Ridge National Laboratory, URL : <http://www.ornl.gov/landscan>.
- Okada Y. (1985) - Surface deformation due to shear and tensile faults in a halfspace, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, pp. 1135-1154.
- Omira R. (2010) - *Modeling Tsunamis Impact in northwestern Morocco and southwestern Iberia*, Ph.D., Thesis, Ibn Tofail University, Kénitra, Morocco and Dom Luiz Institute of Geophysics, FCUL, Lisbon, Portugal, 207 p.
- Omira R., Baptista M.A., Matias L., Miranda J.M., Catita C., Carrilho F., Toto E. (2009) - Design of a Sea-level Tsunami Detection Network for the Gulf of Cadiz, *Natural Hazard and Earth System Sciences*, n°9, pp. 1327–1338.
- Omira R., Baptista M.A., Miranda J.M., Toto E., Catita C., Catalao J. (2010) - Tsunami vulnerability assessment of Casablanca-Morocco using numerical modelling and GIS tools, *Natural Hazards*, n°54, pp. 75–95, Doi: 10.1007/s11069-009-9454-4.
- ONEM (1997) - MEDGEOBASE. Base de données sur l'occupation du sol du littoral marocain. Édité. Observatoire National de l'Environnement Marocain, URL : www.hcp.ma/file/10558.
- Paradise T.R. (2005) - *Perception of earthquake risk in Agadir Morocco: A case study from a Muslim community*, *Environmental Hazards*, 6, pp. 167–180.
- Péroche (2010) - Caractérisation spatio-temporelle de la vulnérabilité urbaine face au risque de tsunami : le cas d'El Jadida (Maroc): approche structurelle, mémoire de Master 1 GCRN (dir. F. Leone), Université Montpellier 3, 110 p.
- Post J., Wegscheider S., M'uck M., Zosseder K., Kiefl R., Steinmetz T., Strunz G. (2009) - Assessment of human immediate response capability related to tsunami threats in Indonesia at a sub-national scale, *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 9, Issue 4, pp. 1075-1086.
- Rapport de stage de Master 2 GCRN, Université Montpellier 3 (dir. F. Leone), 106 p.
- Robert S. & al. (2008) - *Evaluer et représenter le nombre d'usagers sur une plage urbaine (Les Ponchettes, Nice)*, CNRS, Université d'Aix-Marseille, Avignon, Nice Sophia-Antipolis, 20 p.
- SDAU (Schéma Directeur d'Aménagement Urbain d'El Jadida) (2006) - *Présentation du rapport*, 66 p.
- Sugimoto T. & al. (2003) - A Human Damage Prediction Method for Tsunami Disasters Incorporating Evacuation Activities, *Natural Hazards*, 29: 585–600, 16 p.
- Terrier C. (2009) - Distinguer la population présente de la population résidente, *Courrier des statistiques*, pp. 63-70
- Texier P. (2009) - *Vulnérabilité et réduction des risques liés à l'eau dans les quartiers informels de Jakarta*, Thèse, Université Paris 1, pp. 9-29.
- Troin J. F. (2002) - *Maroc, Régions, Territoires*, Maisonneuve & Larose, Tarik, Urbama, 502 p.
- Valencia N., Gardi A., Gauraz A, Leone F., Guillaude R. (2011) - New tsunami damage functions developed in the framework of SCHEMA project: application to European-Mediterranean coasts, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2835–2846, doi:10.5194/nhess-11-2835-2011.
- Veyret Y. (2004) - *Géographie des risques naturels en France*, Ed. Hatier, Paris. 251 p.
- Vidal L. (2005) - *Mazagão, la ville qui traversa l'Atlantique : du Maroc à l'Amazonie (1769-1783)*, Aubier, Paris, 314 p.

Yasuda T., Hiraishi T. (2004) - *Experimental Study of Tsunami Inundation in Coastal Urban*,
Proceedings of the Fourteenth International Offshore and Polar Engineering
Conference, Toulou , France, May 2004, pp. 740-746.