



**HAL**  
open science

# Evaluation du risque tsunamique sur le littoral atlantique marocain

Samira Mellas

► **To cite this version:**

Samira Mellas. Evaluation du risque tsunamique sur le littoral atlantique marocain. Histoire. Université Paul Valéry - Montpellier III; Université Chouaïb Doukkali. Faculté des sciences (El Jadida, Maroc), 2012. Français. NNT : 2012MON30067 . tel-00826963

**HAL Id: tel-00826963**

**<https://theses.hal.science/tel-00826963>**

Submitted on 31 May 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Thèse en cotutelle

Présentée par

**SAMIRA MELLAS**

Pour obtenir le grade de

**Docteur de l'Université Paul Valéry - Montpellier 3**

Spécialité Géographie – Aménagement

et le grade de

**Docteur de l'Université Chouaib Doukkali El Jadida**

Spécialité Géosciences Marines

# Evaluation du risque tsunamique sur le littoral atlantique marocain

Soutenue publiquement à El Jadida le 03 décembre 2012  
devant le jury composé de :

**Khalid Mehdi**, Professeur, Université Chouaib Doukkali, EL Jadida, Maroc

**Frédéric Leone**, Professeur, Université Montpellier 3, France

**Bendahhou Zourarah**, Professeur, Université Chouaib Doukkali, EL Jadida, Maroc

**Mohamed Sahabi**, Professeur, Université Chouaib Doukkali, EL Jadida, Maroc

**Franck Lavigne**, Professeur, Université Paris 1 Pantheon-Sorbonne, France

**Ahmed Ajjane**, Professeur, Université Chouaib Doukkali, EL Jadida Maroc

**Hélène Hébert**, Ingénieur-chercheur HDR, expert tsunami au CEA/DASE, France

**Raphael Paris**, Chargé de Recherche CNRS - HDR, Université Clermont-Ferrand, France

**Président**

**Directeur de thèse**

**Directeur de thèse**

**Rapporteur**

**Rapporteur**

**Rapporteur**

**Examinatrice**

**Examineur**

**« On ne peut certes pas éviter la catastrophe mais au moins limiter les dégâts,  
essentiellement humains, par la prévention et la préparation »**

*Emmanuel Dierkx de Casterlé, ancien représentant résidant au Maroc du P.N.U.D.*

## Remerciements

Le moment de rédiger ces quelques lignes, m'est particulièrement agréable car je voudrais exprimer tous mes remerciements aux personnes ayant contribué de près ou de loin à cette recherche.

En premier lieu, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Messieurs Boumediene Tanouti et Yahya Boughaleb, respectivement, Président de l'université Chouaib Doukkali et Doyen de la Faculté des Sciences d'El Jadida, et Monsieur Jean Marie Miossec le président de l'Université Paul-Valéry - Montpellier 3 lors de ma première inscription en thèse et Madame Anne Fraïsse, Présidente actuelle, pour l'intérêt qu'ils ont porté au projet MAREMOTI et le soutien scientifique et logistique qu'ils ont mis à notre disposition lors de l'organisation de la 8<sup>ème</sup> édition du colloque Géorisque à El Jadida en 2012.

Mes vifs remerciements et ma gratitude vont ensuite à mes directeurs de thèse.

Le professeur **Bendahhou Zourarah** pour avoir dirigé mon travail depuis le D.E.S.A. et pendant mes années de thèse. J'ai apprécié ses qualités humaines en particulier sa capacité à me faire confiance et à me responsabiliser sur les sujets qu'il m'a confiés pendant ces années de travail. Je le remercie chaleureusement pour son encadrement continu, ses encouragements permanents et son soutien inestimable tout au long de ces années de recherche.

Le professeur **Frédéric Leone** qui m'a encadré tout au long de ce travail au sein de l'équipe UMR GRED. Il m'a fait découvrir le monde des risques, m'a intégré dans une équipe dynamique et m'a considéré dès le départ comme une collaboratrice sur laquelle on pouvait compter. Au-delà des aspects professionnels, je n'oublierai pas aussi de le remercier pour ses qualités humaines, sa grande compréhension, son hospitalité et son respect.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude aux membres du jury qui ont bien voulu consacrer à ma thèse une partie de leur temps. Les professeurs **Mohammed Sahabi**, **Franck Lavigne** et **Ahmed Ajjane** qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être rapporteurs de ma thèse. Je remercie également Madame **Hélène Hébert** et Messieurs **Khalid Mehdi** et **Raphael Paris** pour avoir accepté d'examiner mon rapport.

Ce travail de recherche est mené dans un cadre partenarial sous la direction du professeur Frédéric Leone de l'UMR GRED. Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont pris une part active dans la réalisation de ce travail. Je pense tout particulièrement à :

Mathieu Péroche, Emilie Lagahé, Monique Gherardi, Anthony Heymann, Jean-Philippe Chereh, Jean-Charles Denain, Nancy Meschinet de Richemond, Nicolas Meunier de l'UMR GRED.

Rachid Omira et Maria- Ana Baptista du Laboratoire de géophysique de Lisbonne pour leur accueil et la modélisation de l'aléa tsunami au Maroc.

Franck Lavigne, Alexandre Sahal et Aurélia Knapik, de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne et Delphine Grancher de CNRS Meudon.

Raphael Paris et Paul-Edgard Genet du Laboratoire GEOLAB de l'Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand

Maria Freitas, Cesar Andrade, Vera Lopez, Anabela Cruces et Célia Lee du centre de géologie de l'université de Lisbonne.

Par simple plaisir, je remercie Monsieur Christian Carruesco, de l'Université de Bordeaux I (en retraite), pour ses encouragements et son soutien.

L'évaluation du risque de tsunami au Maroc, que ce soit à l'échelle régionale ou fine, a été réalisée grâce à l'acquisition et le traitement de données diverses qui ont nécessité l'implication de nombreux acteurs. Je tiens donc à remercier tout particulièrement :

Madame Saida Bourous, Chef de Service - Bases de Données Environnementales, au Secrétariat d'Etat Chargé de l'eau et de l'Environnement, Département de l'Environnement, pour la base de données sur l'occupation du sol littoral MEDGEOBASE.

Monsieur Abdelouahed Fikrate ainsi que tout le personnel de la Direction de l'Aménagement du Territoire national (DAT) à Rabat, pour leur collaboration et les documents et bases de données transmis.

Madame Fatiha Oraiche, chef de Service - Système de Gestion Routier à la Direction des routes à Rabat, pour la base de données « réseau routier marocain ».

Monsieur Driss Inani, directeur de l'Agence Urbaine d'El Jadida pour son soutien et sa collaboration.

Merci aux financeurs de cette étude : Le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique du Maroc (CNRST), le projet MAREMOTI, l'Agence Universitaire de Francophonie (AUF), le programme volubilis MA/04/101 et le programme LagMar du REMER. A cette occasion, je tiens à remercier très sincèrement Monsieur Benchater gestionnaire des bourses, missions et invitations au service de coopération et d'action culturelle (SCAC) de l'ambassade de France à Rabat pour sa gentillesse et ses aides nombreuses.

Mes remerciements s'adressent également à tous les membres de l'UMR GRED et l'IRD que j'ai pu croiser lors de mes séjours à Montpellier, pour leur accueil et leur soutien avec une mention spéciale à **Monique Gherardi**.

Et j'ai également une pensée très forte pour Madame **Anne-Marie Barthez** (ainsi que toute sa famille et ses voisines) pour m'avoir hébergée durant mes séjours à Montpellier. Elle a été un soutien indéfectible. Loin de ma famille, elle a été une épaupe sur laquelle je me suis si souvent reposée.

Je souhaite adresser des remerciements particuliers à Madame Samira Khatmi, Chef de Service de la Recherche Scientifique et des Relations Internationales à la présidence de l'Université Chouaïb Doukkali pour sa gentillesse, son aide et l'intérêt qu'elle a porté à mon travail.

Tous les membres côtoyés du département de Géologie de l'université Chouaib Doukkali, ont toujours été disponibles et très compréhensifs à mon égard. C'est pour moi l'occasion de remercier très sincèrement : les professeurs Kh. Mehdi, A. Aajjane, B. Ouajhain, A. Fekkak, ainsi que l'ensemble du personnel de l'administration de la Faculté des Sciences d'El Jadida.

Je dis grand merci à Saliha, Ahmed, Chouaib, Adnane, Abdelouahed, Khalid, Driss, Mehdi, Kaoutar, Nadia et aux autres doctorants du LGMSS pour leur amitié et tous les instants de détente partagés ensemble.

En fin, Merci à **mes parents**, mes sœurs et mes frères ainsi que toute ma famille que j'aime, pour leur soutien sans faille et qui m'ont laissé vivre ma passion jusqu'au bout.

...Si j'ai oublié quelqu'un, je le prie de me pardonner. Il y a tant de personnes qui sont intervenues dans ma vie pendant ces dernières années.

## Résumé

Ce travail a pour objectif d'évaluer le risque de tsunami sur le littoral atlantique marocain au moyen d'une approche intégrée, menée sur la base de scénarios de risque, multiscalaires, combinant de la modélisation numérique de l'alea, une évaluation spatiotemporelle des enjeux, et des critères de vulnérabilité physique et humaine.

L'étude s'articule en deux phases. Une première phase consiste à évaluer à l'échelle régionale, l'exposition du littoral atlantique marocain au risque de tsunami, en développant une démarche méthodologique de mesure de l'exposition au risque de tsunami basée sur une cartographie intégrant des paramètres d'alea issus de la modélisation numérique d'un tsunami similaire à celui de 1755 et des bases de données régionales sur l'occupation du sol. Elle aboutit à un jeu de géo-indicateurs de risques agrégés sur plusieurs mailles territoriales (communale et mailles de 5 km de côté) qui permet de dresser une analyse comparative de ce risque à l'échelle du Maroc.

Une seconde phase porte sur le risque de pertes humaines en cas de tsunami majeur sur la ville d'El Jadida, exprimé au moyen de géo-indices de risque. La vulnérabilité humaine y est exprimée par une probabilité de décès. Ces probabilités sont données par des matrices fondées sur les données de la submersion marine issues de la modélisation numérique et des critères de vulnérabilité déterminés au moyen de courbes d'endommagement empiriques. Les indices de risque obtenus intègrent la variabilité spatio-temporelle de la répartition de la population au pas horaire pour deux saisons.

Les résultats cartographiques permettent de visualiser avec précision le niveau de risque pour les personnes, sous la forme d'une cartographie dynamique du risque.

Cette étude contribue à une meilleure appréciation du risque de tsunami sur le littoral atlantique marocain à travers la mesure de ses impacts potentiels. Elle débouche sur des cartographies utiles destinées aux autorités marocaines, dont le but est de servir de support à une démarche préventive passant en premier lieu par une éducation des populations et la mise en place de systèmes d'alerte et d'évacuation en cas de tsunami.

## Mots clés

Risque naturel, Tsunami, Scénarios, Modélisation, Indices de risque, Vulnérabilité, SIG, Prévention, Maroc, El Jadida.

## Abstract

This work aim to assess the risk of tsunami along the Moroccan Atlantic coast. The approach is based on the risk scenario which combines the hazard numerical modelling, spatio-temporal, stakes and criteria of the physical and human vulnerability.

This study consists firstly in assessing the exposure of the Moroccan Atlantic coast to tsunami risk at the regional scale. The approach based on coupling the numerical modeling of hazard of tsunami similar to 1755 and regional land use database.

It provide a set of geo-risk indicators aggregated in several meshes on the ground (municipal grid square with side of 5km), make possible to draw a comparative analysis of the risk across Morocco.

Secondly it involves the risk of loss of life in case of major tsunami at the city of El Jadida, expressed in terms of geo-risk indices. Human vulnerability is expressed by a probability of loss of life. These probabilities are given by matrices based on data from marine submersion numerical modeling and vulnerability criteria determined through empirical curves damage. Risk indices obtained include the spatio-temporal distribution of the population, in the hourly step for two seasons.

The mapping results enable us to visualize accurately the level of risk to people by dynamic maps.

This study contributes to a better understanding of tsunami hazard on the Moroccan Atlantic littoral through the extent of its potential impacts. It leads to useful maps for the Moroccan authorities, whose aim is to provide support through a preventive approach in the first place by educating people and the establishment of early warning systems and evacuation in case of tsunami.

**Key-Words:** Natural risk, Tsunami, Scenario, Modelling, risk indices, vulnerability, GIS, Prevention, El Jadida, Morocco.

## Avant propos

Ce travail de thèse de Doctorat mené en cotutelle entre l'université Chouaib Doukkali d'El Jadida (Maroc) et l'université Paul Valéry - Montpellier 3 (France), a été soutenu en partie par le projet MAREMOTI (MAREgraphie, observations de tsunamis, mOdelisation et études de vulnérabilité pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée occidentale, <http://www.maremoti.fr/>). Ce projet de recherche, financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche française) et piloté par le Département d'Analyse, Surveillance, Environnement (DASE) du CEA (Commissariat à l'Energie Atomique), a impliqué dix partenaires, dont l'UMR GRED (Gouvernance, Risques, Environnement & Développement, ex EA GESTER) associé au Laboratoire de Géosciences Marines et Sciences du Sol d'El Jadida – URAC 45, durant trois ans. Il avait pour but de réaliser des études et de développer des bases de données et des outils pré-opérationnels nécessaires au nouveau centre régional d'alerte aux tsunamis en Méditerranée occidentale et Atlantique nord-est, dans le cadre du système d'alerte coordonné par l'UNESCO.

La contribution de l'UMR GRED a essentiellement porté sur un volet ‘ ‘ **Estimations des Vulnérabilités**’ ’.

Cette thèse a été financée par plusieurs sources. C'est le CNRST (Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique du Maroc) qui a assuré la bourse mensuelle de recherche durant la période de la thèse (d12/002, 2008-2011). Par ailleurs, le projet MAREMOTI a apporté un cadre collaboratif international pour mener à bien cette thèse tout en apportant le financement d'un stage à Lisbonne (modélisation) et des séjours à Montpellier. Cette thèse a été également bénéficiaire de l'appui financier de l'AUF (Agence Universitaire de la Francophonie) en 2011-2012. En fin, plusieurs séjours à Montpellier ont été financés par les programmes de coopération scientifique Franco-Marocaine, Volubilis MA/101/04 et LagMar du Réseau National des Sciences et Technique de la Mer (REMER).

## Sommaire

Remerciements .....	3
Résumé .....	6
Abstract .....	7
Avant propos .....	8
Sommaire .....	9
Introduction générale.....	13
Partie I : Evaluation et modélisation de l'aléa tsunami au Maroc.....	20
Introduction .....	20
Chapitre 1 <sup>er</sup> : L'aléa tsunami .....	21
1.1. Définition .....	21
1.2. Origines du phénomène .....	21
1.3. Propagation et effets sur les côtes .....	24
1.4. La surveillance et l'alerte aux tsunamis .....	25
1.5. Contexte sismotectonique - tsunamigène du Maroc .....	28
1.5.1. La zone tsunamigène du Golfe de Cadix .....	31
1.6. Source volcanique- tsunamigène .....	33
1.7. Conclusion du 1 <sup>er</sup> chapitre .....	34
Chapitre 2 : Historique des tsunamis au Maroc atlantique : approche documentaire.....	36
2.1. Introduction.....	36
2.2. Historique du tsunami sur le littoral atlantique.....	37
2.2.1. Tsunami de 382 .....	37
2.2.2. Tsunami du 22 mai 881 .....	38
2.2.3. Tsunami du 1 <sup>er</sup> novembre 1755 (cf, 2.3) .....	38
2.2.4. Tsunami du 31 mars 1761 .....	38
2.2.5. Tsunami du 25 novembre 1941 .....	38
2.2.6. Tsunami du 28 février 1969.....	39
2.2.7. Tsunami du 26 mai 1975.....	39

2.3.	Le cas du tsunami de 1755 au Maroc.....	41
2.4.	Le tsunami de 1755 à El Jadida .....	46
2.4.1.	Corpus documentaire examiné par Leone et al., 2012 .....	46
2.5.	Conclusion du 2 <sup>e</sup> chapitre .....	57
	Chapitre 3 <sup>e</sup> : Indices sédimentaires : Approche géomorphologique .....	58
3.1.	Introduction.....	58
3.2.	Caractéristiques des dépôts de tsunami.....	58
3.3.	Témoignages sédimentaires de tsunamis sur le littoral atlantique marocain. ....	60
3.3.1.	Les washovers du complexe lagunaire Oulidia –Sidi Moussa.....	60
3.1.1.1.	Le washover de Oualidia .....	62
3.1.1.2.	Le washover de Sidi-Moussa.....	67
3.3.2.	Les dépôts de la région Tanger – Assilah .....	71
3.3.2.1.	Le chantier Al Houara .....	72
3.3.2.2.	Les dépôts du marais maritime de Tanger.....	74
3.3.3.	Les blocs de la région de Rabat (Mhammdi et al.2008).....	77
3.4.	Traces sédimentaires du tsunami de 1755 sur les côtes européennes.....	79
3.5.	Conclusion du 3 <sup>e</sup> chapitre .....	81
	Chapitre 4 <sup>e</sup> : Modélisation numérique d’un tsunami de référence : Le tsunami de 1755 .	83
4.1.	Introduction.....	83
4.2.	Méthode de simulation.....	84
4.2.1.	Le choix d’un scénario d’aléa .....	84
4.2.2.	Code de simulation .....	87
4.3.	Données topo- bathymétriques et constitution des MNTS/MNES .....	89
4.2.1.	A l’échelle régionale .....	89
4.3.1.1.	Données bathymétriques.....	89
4.3.1.2.	Données topographiques.....	89
4.3.1.3.	Construction des grilles MNT .....	89
4.2.2.	A l’échelle locale.....	91
4.3.2.1.	Les données topographiques.....	91
4.3.2.2.	Les relevés bathymétriques .....	91
4.3.2.3.	Construction des grilles nécessaires aux simulations .....	92
4.3.2.4.	Constitution du MNE.....	92
4.3.2.5.	Constitution du MNE_ 1755.....	94

4.3.2.6. Construction de référentiels «trait de côte » et « fond communal ».....	95
4.4. Résultats de la simulation .....	98
4.4.1. Zonage régional .....	98
4.4.2. Zonage local.....	101
4.3. Conclusion du 4 <sup>e</sup> chapitre .....	104
Conclusion de la 1 <sup>ère</sup> partie.....	105
Partie II. La mesure du risque : Approche multi-scalaire .....	107
Introduction : Notion de scénarios de risque.....	107
Chapitre 5 <sup>e</sup> : Les indicateurs d'exposition du littoral atlantique marocain au risque de tsunami .....	109
5.1. Introduction.....	109
5.2. Les enjeux sur le littoral atlantique marocain .....	110
5.2.1. Aperçu historique sur l'occupation du littoral marocain.....	110
5.2.2. Enjeux humains - urbains .....	111
5.2.3. Enjeux industriels.....	116
5.2.4. Enjeux portuaires.....	117
5.2.5. Enjeux touristiques .....	119
5.2.6. Enjeux hydrologiques et agricoles .....	122
5.2.7. Enjeux patrimoniaux .....	122
5.3. Caractériser l'occupation du littoral atlantique marocain au moyen des bases de données existantes.....	124
5.3.1. La base MEDGEOBASE - Maroc sur l'occupation du sol.....	124
5.3.2. La base LandScan 2008.....	127
5.4. Choix d'un maillage territorial de référence.....	129
5.5. Résultats cartographiques .....	130
Chapitre 6 <sup>e</sup> : Les indices de risque humain à El Jadida.....	135
6.1. Introduction.....	135
6.2. Présentation de la ville d'El Jadida .....	135
6.2.1. Contexte historique .....	135
6.2.2. Contexte géographique.....	138

6.3.	Evaluation de la vulnérabilité humaine sur la ville d'El Jadida.....	143
6.3.1.	La vulnérabilité humaine <i>a posteriori</i> : les enseignements des retours d'expérience.....	143
6.3.1.1.	Facteurs physiologiques .....	143
6.3.1.2.	Facteurs géographiques .....	145
6.3.1.3.	Facteurs psycho-sociologiques .....	146
6.3.1.4.	Facteurs socio-culturels .....	148
6.3.1.5.	Facteurs socio-économiques.....	149
6.3.2.	Zone de diagnostic de vulnérabilité et le SIG .....	150
6.3.3.	Critères d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments .....	154
6.3.4.	Proposition d'une typologie du bâti propre à El Jadida .....	159
6.3.5.	Critères d'évaluation de la vulnérabilité humaine.....	166
6.3.5.1.	À l'intérieur d'un bâtiment .....	166
6.3.5.2.	A l'extérieur.....	169
6.3.6.	Evaluation spatio-temporelle des enjeux humains sur El Jadida .....	173
6.3.6.1.	Principaux modes et rythmes de vie .....	173
6.3.6.2.	Classes fonctionnelles.....	176
6.3.6.3.	Taux de fréquentation.....	178
6.3.6.4.	Analyse des variations horaires .....	180
6.4.	Les indices de risque humain .....	185
6.4.1.	Principe du calcul .....	185
6.4.2.	Matrices de probabilité de décès des individus en fonction de la hauteur d'eau et la vitesse du courant.....	185
6.4.2.1.	A l'intérieur d'un bâtiment .....	186
6.4.2.2.	A l'extérieur d'un bâtiment .....	190
6.4.3.	Résultats cartographiques.....	193
	Conclusion de la 2 <sup>ème</sup> partie .....	199
	Conclusions et recommandations.....	201
	Bibliographie.....	208
	Liste de figures.....	223
	Liste des tableaux.....	231
	Annexes.....	232
	Annexe 1 .....	233
	Annexe 2 .....	237

## Introduction générale

En moins d'une décennie, deux tsunamis majeurs ont profondément marqué les esprits par le nombre de victimes et l'ampleur des dégâts générés. En 2004, dans l'océan Indien, un séisme, de magnitude de 9,3 (Lavigne et al., 2011) au large de l'Indonésie, a provoqué un tsunami qui a touché les pays d'Asie du Sud et dans une moindre mesure les côtes orientales de l'Afrique. Le nombre de victimes est estimé à 227 898 morts (source USGS).

En 2011, le 11 mars, la côte nord-est de l'île de Honshū au Japon, est ravagée par un tsunami dévastateur dû à un séisme de magnitude 8,9 (source USGS). On y déplore plus de 20 000 morts (source EMDAT/CRED) et le déclenchement d'un accident nucléaire majeur à la centrale de Fukushima Daiichi.

L'ampleur des effets est le résultat de trois facteurs : la puissance extrême du phénomène, le manque ou l'insuffisance en matière de prévention et de protection au regard de cet événement et l'intense urbanisation des zones littorales. Ces dernières sont parmi les plus importantes quant à la production et à la distribution de populations et des activités socio-économiques. Leurs nombreuses fonctions donnent lieu à des modes de développement et à des usages extrêmement variés. La nature et l'ampleur des dégâts causés par un tsunami dépendent pour beaucoup des caractéristiques spécifiques de chaque région côtière, ainsi que de sa configuration, de son usage et de son développement urbain (UNESCO, 2008).

Au cours de ces dernières décennies, au Maroc, la vulnérabilité de la bande côtière s'est accentuée avec une forte anthropisation du littoral, sans prise en compte particulière de la problématique tsunami dans les programmes de planifications territoriales (SDAU, SRAT et Plans d'Aménagement).

En 1755 déjà, le tsunami consécutif au tremblement de terre de Lisbonne a causé des dégâts importants dans un grand nombre de villes marocaines, entre Tanger et Agadir, et tué environ 1 000 personnes sur les côtes. De nos jours, au regard de l'augmentation sans équivalent des enjeux, l'occurrence du même événement constituerait un risque nettement plus important, tant en termes de vies humaines que de destruction de biens et d'infrastructures.

Dans son acception la plus commune le risque est défini comme le produit d'un aléa et d'un enjeu vulnérable (Figure 1) :

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

Le terme aléa recouvre à la fois le phénomène naturel (le tsunami pour notre étude) potentiellement destructeur et l'expression de ce potentiel sous la forme d'une probabilité. Les enjeux sont définis par les biens et les personnes exposées directement ou indirectement aux aléas. Ils se caractérisent par une vulnérabilité qui reflète la fragilité des biens, des personnes, des systèmes sociaux, des territoires face aux aléas, et leur éventuelle capacité à se restaurer, s'améliorer après un dommage (résilience) (Leone et al., 2010).

L'évaluation du risque revient donc à évaluer, qualifier voire quantifier, et surtout spatialiser ses différentes composantes (Leone, 2007).



Figure 1. Exemple qui illustre les composantes du risque : le tsunami du Japon 2011

Ce travail a pour objectif d'évaluer le risque de tsunami sur le littoral atlantique marocain au moyen d'une approche intégrée, menée sur la base de scénarios de risque, multiscalaires, combinant de la modélisation numérique de l'aléa, une évaluation spatiotemporelle des enjeux, et des critères de vulnérabilité physique et humaine (Figure 2).

Cette étude contribue à une meilleure appréciation du risque de tsunami sur le littoral atlantique marocain à travers la mesure de ses impacts potentiels. Elle débouche sur des cartographies utiles destinées aux autorités marocaines, dont le but est de servir de support à

une démarche préventive passant en premier lieu par une éducation des populations et la mise en place de systèmes d'alerte et d'évacuation en cas de tsunami.

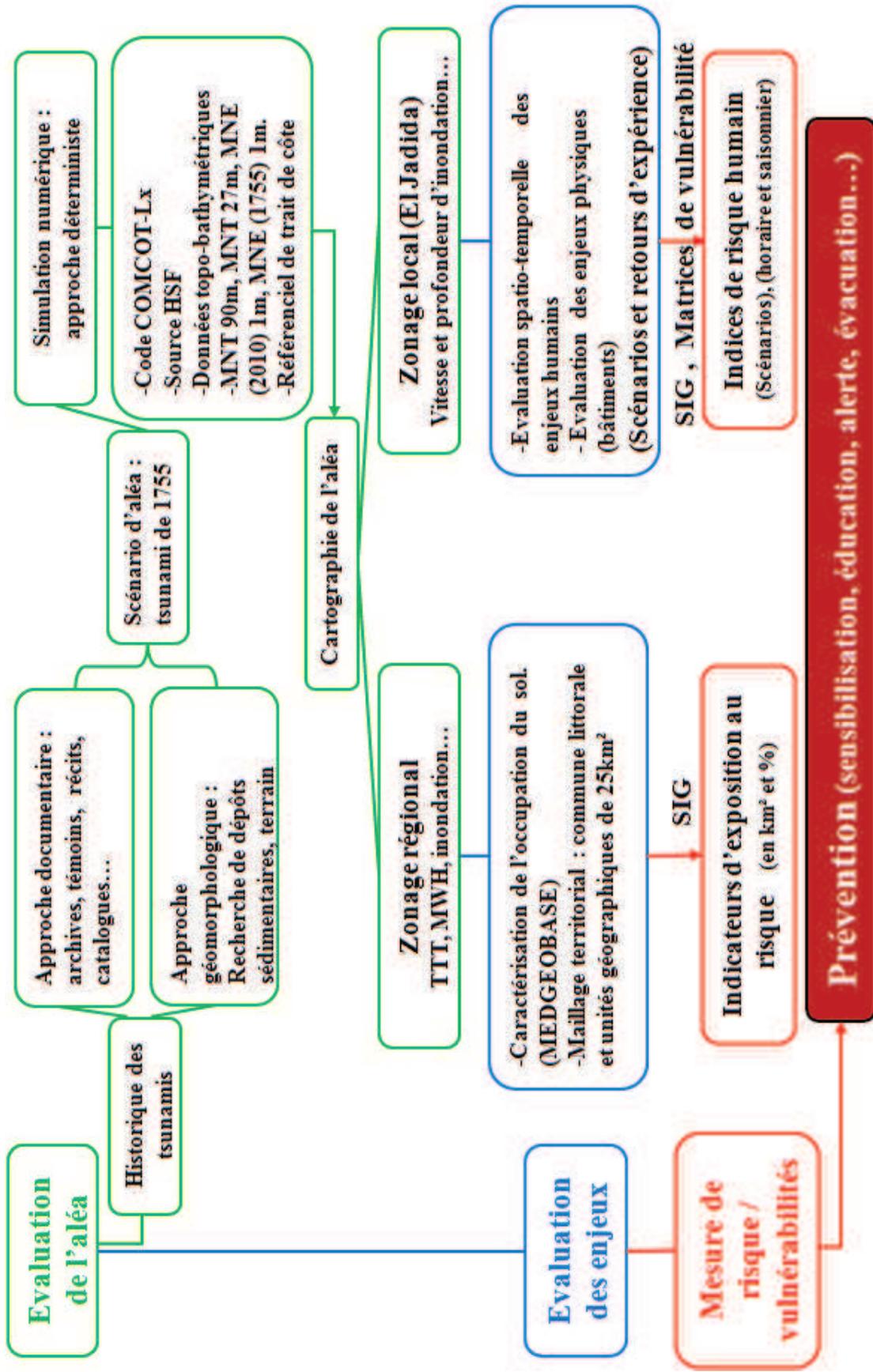


Figure 2. La démarche de recherche adoptée.

Ainsi, ce manuscrit se décompose en deux parties et 6 chapitres :

La première partie a comme objectif de définir l'aléa tsunami au Maroc. Dans un premier temps (chapitre 1) nous avons jugé utile de définir le phénomène, ses origines, ses caractéristiques hydrodynamiques et son comportement à la côte, ainsi que le mode opérationnel d'un système d'alerte aux tsunamis avant de nous intéresser aux facteurs qui font du Maroc un pays exposé au tsunami en étudiant le contexte sismotectonique - tsunamigène. Le deuxième chapitre consiste à reconstituer l'historique des tsunamis au Maroc-atlantique. Il s'agit de constituer, sur la base des documents et témoignages historiques, un inventaire et une caractérisation des événements tsunamis ayant pu affecter les côtes atlantiques marocaines. Le troisième chapitre concerne la recherche des marqueurs sédimentaires de paléotsunamis sur le terrain. Nous présentons dans un premier temps les caractéristiques de dépôts de tsunamis et les critères qui permettent de les distinguer des autres dépôts, ensuite les travaux réalisés sur ces dépôts au Maroc.

Cette évaluation préliminaire de l'aléa tsunami au Maroc nous permettra de choisir un scénario d'aléa de référence pour la simulation (chapitre 4). Il s'agit de l'événement du 1er novembre 1755, dit de Lisbonne. Les simulations numériques ont été réalisées avec le code COMCOT-Lx de la FFCUL partenaire du programme MAREMOTI. La source sismique tsunamigène retenue est la *Horseshoe fault* du golfe de Cadiz (HSF, Garcia 2003). La modélisation produite depuis cette source a permis d'obtenir deux 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 deux supports MNT 27m et MNE (de 2010 et proche de 1755) 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.

Les résultats de ces simulations ont permis de confronter les résultats issus de la modélisation aux observations historiques.

La deuxième partie répond à notre objectif principal d'évaluer, quantifier et spatialiser le risque de tsunami sur le littoral atlantique marocain.

Elle s'articule autour de deux chapitres. Le 5<sup>e</sup> chapitre consiste à évaluer l'exposition territoriale du littoral atlantique marocain au risque de tsunami, en développant une démarche

méthodologique de mesure de l'exposition au risque de tsunami basée sur une cartographie intégrant des critères d'aléa issus de la modélisation numérique d'un tsunami identique à celui de 1755 et des bases de données régionales inexploitées sur l'occupation du sol. Elle aboutit à un jeu de géo-indicateurs de risque agrégés sur plusieurs mailles territoriales (communale et mailles de 5 km de côté) qui permet pour la toute première fois de dresser une analyse comparative de ce risque à l'échelle du Maroc. L'autre enjeu de ce travail est d'évaluer et de spatialiser ce risque à l'échelle régionale en valorisant les bases de données existantes, tant pour définir l'extension spatiale de l'aléa (submersion marine) que les éléments exposés du territoire ; et,

Le 6<sup>e</sup> chapitre consiste à évaluer le risque de pertes humaines en cas de tsunami majeur à une échelle fine à travers l'exemple de la ville d'El Jadida, un pôle urbain émergent sur l'océan atlantique où les enjeux stratégiques sont les plus concentrés sur le littoral, au moyen de géo-indices de risque. La vulnérabilité humaine y est exprimée par une probabilité de décès. Ces probabilités sont données par des matrices fondées sur les données de la submersion marine issues de la modélisation numérique et des critères de vulnérabilité déterminés au moyen de courbes d'endommagement empiriques. Les indices de risque obtenus intègrent la variabilité spatio-temporelle de la répartition de la population au pas horaire pour deux saisons.

Cette analyse fine du risque a été réalisée par Leone et al., 2012 sur la ville d'El Jadida en tentant de compléter les modèles de vulnérabilité développés dernièrement sur Casablanca dans le cadre du projet NEAREST (Omira et al., 2010) et Rabat-Salé au sein du projet SCHEMA (Attilah et al., 2011). Ce nouveau modèle s'intéresse à la vulnérabilité des populations situées à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments. Les principales évolutions portent sur l'intégration du bâti et des ouvrages de protection côtière dans la modélisation de la submersion. Le modèle prend en compte également les vitesses d'inondation et les débris flottants potentiels. Il intègre les densités de population au pas horaire et des matrices de probabilités de décès basées sur la résistance et l'étanchéité des bâtiments, et les capacités de mise en protection des individus.

Cette approche a priori (ou prospective) de la vulnérabilité entre dans la notion de scénario de risque. Les résultats cartographiques permettent de visualiser le niveau de risque pour les personnes, sa variabilité spatiale et temporelle, au sein de la ville d'El Jadida. On obtient ainsi une cartographie dynamique du risque.

Enfin, nous terminons ce mémoire par la présentation des conclusions générales, des limites de l'approche ainsi que des perspectives et des recommandations.



## **Partie I : Evaluation et modélisation de l'aléa tsunami au Maroc.**

### **Introduction**

Les observations historiques, lorsqu'elles sont fiables, constituent un outil de premier plan dans l'analyse rétrospective du risque de tsunami (Kaabouben et al., 2009). En effet, elles sont aptes à fournir des informations sur la taille, le nombre de vagues, la limite d'inondation, l'intensité, la durée, mais aussi sur les impacts environnementaux, les dégâts humains et matériels, la représentation et la perception des événements passés et permettent de déterminer la source d'un événement donné dans une zone déterminée (Simoes *et al.*, 1992; Mendes *et al.*, 1999; Dawson et Stewart, 2007). Intégrés dans les modélisations numériques, ces renseignements permettent par la suite d'établir des scénarios plus fiables, mais aussi des cartes d'aléa, de vulnérabilité, d'évacuation et à termes de risque plus justes (Jaffe et Gelfenbaum, 2002).

Ces informations sont traditionnellement collectées auprès des archives, des centres de documentation, des bibliothèques privées ou publiques, etc... Elles peuvent être complétées par la recherche de dépôts des paléotsunamis sur le terrain (archives sédimentaire) afin de corrélérer des événements et de pouvoir remonter plus loin dans le temps (Roger, 2011 ; Leone et al., 2010).

## Chapitre 1<sup>er</sup> : L'aléa tsunami

### 1.1. Définition

Le terme "tsunami" désigne universellement le phénomène correspond à une série de vagues océaniques pouvant atteindre de grandes amplitudes et ayant été provoquée par de brutales perturbations de la couche d'eau de l'océan (Branlard, 2005). Le terme est dérivé d'un mot Japonais qui signifie littéralement "vague portuaire" (tsu, port et nami, port). Il est utilisé pour la première fois dans un rapport daté du 2 décembre 1611 dans lequel un serviteur du seigneur Japonais Tokugawa Ieyasu raconte l'arrivée de vagues géantes dans un port après le séisme de Sanriku (Cartwright et Nakamura, 2008).

### 1.2. Origines du phénomène

Chaque événement qui entraîne un déplacement significatif du plancher océanique cause aussi le déplacement d'un volume d'eau équivalent, qui peut donner naissance à un tsunami. Bien qu'ils soient généralement associés aux séismes, les tsunamis peuvent aussi être déclenchés par de nombreux autres types de phénomènes, incluant les glissements de terrain sous-marins ou terrestres, les éruptions volcaniques sous-marines et terrestres, les explosions et même les impacts des bolides (ex. astéroïde, météore, comète) (Clague, 2001; Paine, 1999).

La majorité des tsunamis ayant eu un impact plus ou moins fort et sur une grande région ont été générés par des **séismes** (Roger, 2011 ; Synokis, 2004 ; Satake et Tanioka, 1999). La plupart des séismes sont provoqués par des mouvements le long des failles associées aux frontières des plaques lithosphériques sur l'asthénosphère. Souvent, ces séismes ont lieu dans les zones de subduction, à faibles profondeurs (moins de 70km), lieux où la plaque océanique s'enfonce sous la plaque continentale (Figure 3).

Les importantes forces de compressions présentes entre les différentes plaques, permettent à la couche terrestre d'emmagasiner de l'énergie. Au cours d'une rupture sismique celle-ci se libère et est transmise au fond de l'océan.

Toutefois, seuls les séismes dont le foyer et la surface de rupture de la faille sont situés sous l'océan, et créant une perturbation verticale (normale ou inverse) de la surface de l'eau sur une grande surface sont à l'origine de tsunami. En effet, d'important séismes en océan mais non dirigés selon la verticale ne provoquent pas de tsunami.

L'océan est considéré comme une mince couche se mettant en mouvement sur l'ensemble de son épaisseur. Cette déformation est considérée comme instantanée car la vitesse de rupture de la faille est environ dix fois supérieure à la vitesse de propagation des ondes.

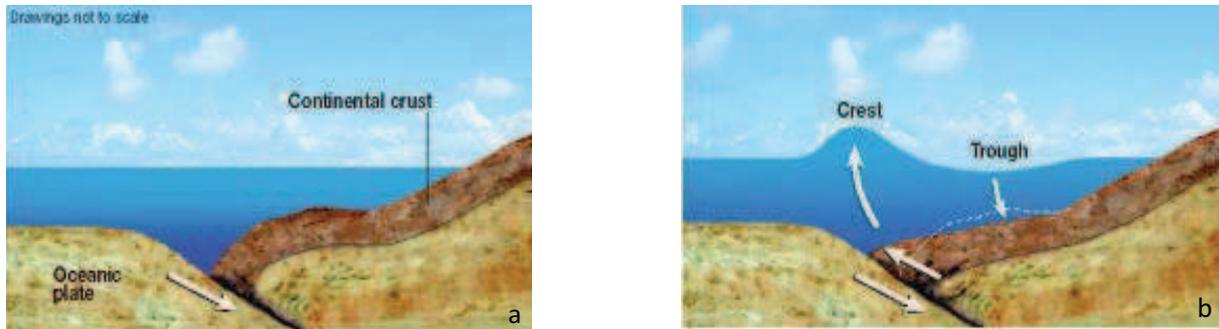


Figure 3. Initiation d'un tsunami d'origine sismique dans un contexte de subduction. (a. avant le séisme ; b. pendant le séisme) (<http://www.scribd.com/doc/100662840/Tsunami-Eth-YUEN, 2012>)

Les **glissements de terrain** sous-marins ou aériens, s'ils sont suffisamment volumineux sont susceptibles, autant que les mouvements co-sismiques, de générer des tsunamis.

Les glissements de terrain tsunamigéniques sont souvent associés aux séismes ou aux éruptions volcaniques, mais pas toujours. Le plus souvent, les tsunamis sont déclenchés le long des parois de canyons sous-marins, dont les flancs s'écroulent de temps à autres.

Les tsunamis résultant de glissements de terrain peuvent être très destructeurs, mais ils sont limités géographiquement. En effet, si la déformation verticale peut dépasser quelques dizaines de mètres, les dimensions horizontales impliquées (de quelques centaines de mètres en général) excèdent rarement la dizaine de kilomètres, et de ce fait les vagues du tsunami sont relativement de courte longueur d'onde.

En 1998, un événement catastrophique a amené les scientifiques à porter attention aux tsunamis générés par des glissements de terrain sous-marin. Le soir du vendredi 17 juillet 1998, environ 20 minutes après un fort séisme régional, trois vagues importantes ont inondé la côte d'Aitape en Papouasie-Nouvelle-Guinée.

Des vagues d'une hauteur de 10 à 15 m ont complètement détruit trois villages, à un point tel qu'il n'en restait presque plus de trace. Quelque 2200 personnes ont perdu la vie, 1000 ont été grièvement blessées, tandis que 10 000 personnes ont perdu leur foyer (International Tsunami Survey Team, 1998).

Au départ, les experts ne comprenaient pas que de si grandes vagues puissent être produites par un séisme modéré (de magnitude 7,1) et que la vague soit si concentrée, la majeure partie

de son énergie étant dirigée vers un secteur étroit de la côte. Après des enquêtes approfondies à la suite de l'événement, la plupart des scientifiques croient maintenant que le tsunami a été causé par un glissement de terrain ou un affaissement sous-marin, qui avait vraisemblablement été déclenché par le premier séisme. Cette constatation a alerté les communautés du monde entier de la possibilité que des tsunamis catastrophiques puissent être déclenchés par un mouvement de masse gravitaire sous-marin, et ce, même sans qu'il y ait rupture de faille (International Tsunami Survey Team, 1998).

Bien que rares, les tsunamis déclenchés par **les volcans** sont parmi les plus spectaculaires. En 1490 avant J.-C., l'éruption et l'effondrement du volcan Santorin, au large de la côte sud-est de la Grèce, ont engendré un tsunami qui a décimé la majeure partie des colonies minoennes de la mer Égée. On spéculé que la légende de l'Atlantide pourrait bien être basée sur ce désastre. Plus récemment, le 26 août 1883, une des plus importantes éruptions volcaniques de l'histoire est survenue en Indonésie, entraînant l'effondrement du cratère de Krakatoa et la formation de vagues de tsunami d'une hauteur de 40 m. Quelque 300 villes et villages ont été détruits, causant la mort de près de 40 000 personnes sur les îles de Java et de Sumatra (COI/UNESCO, 2001).

Les tsunamis générés par des **chutes de météorites** sont les plus rares : leur taille devant être suffisamment importante pour résister à l'entrée dans l'atmosphère terrestre, ils sont de loin les plus dévastateurs (Weiss et Wünnemann, 2007 ; Sahal, 2011). Aucun exemple n'a été vécu (heureusement) à ce jour, mais de nombreux cratères témoignent d'impacts ayant pu générer des tsunamis il y a 65 Millions d'années dans la péninsule du Mexique, à la fin du crétacé (Branlard, 2005).

Les **météo-tsunamis** sont des vagues océaniques semblables à celles d'un tsunami dues à l'avancée rapide d'un front de pression atmosphérique qui se déplace au-dessus d'eaux peu profondes à peu près à la même vitesse que les vagues, ce qui en permet le couplage. Ce phénomène est assez bien connu et présent de manière récurrente dans certaines régions du monde (Baléares, Mer Adriatique, Japon, etc) (Roger, 2011).

### 1.3. Propagation et effets sur les côtes

Le tsunami se propage à partir de la région d'origine sous la forme d'une série de vagues. Sa vitesse dépend de la profondeur de l'eau et, en conséquence, les vagues subissent des accélérations ou des décélérations selon que la profondeur du fond marin au-dessus duquel elles passent croît ou décroît. De ce fait, le sens de propagation de la vague varie également et l'énergie de la vague peut être focalisée ou délocalisée. En haute mer, les vagues peuvent progresser à des vitesses allant de 500 à 1 000 kilomètres par heure (IOC/UNESCO, 1999).

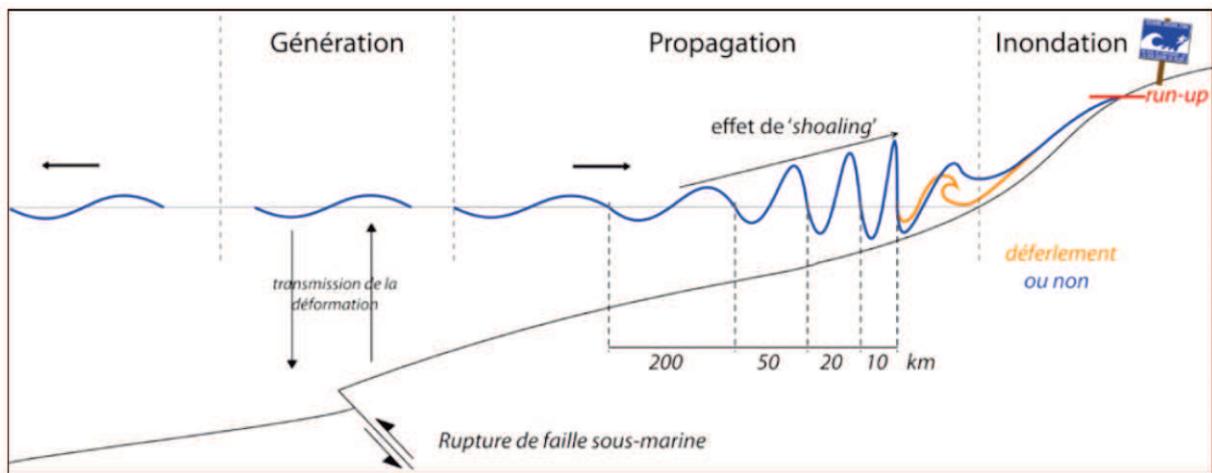


Figure 4. Génération, propagation et interaction avec la côte pour un tsunami généré par un séisme. Deux types de comportement au rivage sont proposés, avec ou sans déferlement.

(Roger, 2011)

À l'approche des côtes, la vitesse du tsunami et la longueur d'onde décroissent mais son amplitude augmente (*shoaling effect*) avec la diminution de profondeur (Figure 4). Il se produit alors un transfert entre l'énergie cinétique (de vitesse) déclinante et l'énergie potentielle (hauteur de la vague) grandissante. Des modalités de ce transfert dépendent les caractéristiques du tsunami à la côte, sa propagation dans les terres et sa capacité destructrice (Lavigne et al., 2011).

Dans certains cas, le tsunami provoque seulement une inondation relativement bénigne des régions côtières basses, submergeant les terres comme une marée qui monte rapidement. Dans d'autres, il déferle tel un mascaret – un mur vertical d'eau turbulente qui peut être très destructeur (IOC/UNESCO, 2005). Il faut souligner que de nombreuses vagues destructrices peuvent se succéder pendant plusieurs heures, les plus importantes n'étant pas forcément les premières.

Dans la plupart des cas, il se produit également une baisse du niveau de la mer, avant l'arrivée des vagues du tsunami ou entre deux crêtes, qui entraîne un recul de la ligne de côte allant parfois jusqu'à plus d'un kilomètre. Enfin, des courants forts et inhabituels accompagnent parfois les tsunamis, même petits (IOC/UNESCO, 2005).

#### 1.4. La surveillance et l'alerte aux tsunamis

Le concept de système d'alerte aux tsunamis a fortement alimenté les discussions dans les jours qui ont suivi la catastrophe de 2004 dans l'Océan Indien (Ozer et al., 2005). En effet, suite à ce tsunami, la communauté internationale, par le biais de l'UNESCO qui gère le système d'alerte de l'océan Pacifique (PTWS) depuis les années 1960, a décidé de doter les trois autres bassins océaniques d'un système d'alerte aux tsunamis (Roger, 2011 ; Courteau, 2007) : le Caribbean TWS pour les Caraïbes (CTWS), l'Indian Ocean TWS pour l'Océan Indien (IOTWS) et le North-east Atlantic and Mediterranean TWS pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée (NEAMTWS)(Figure 5).

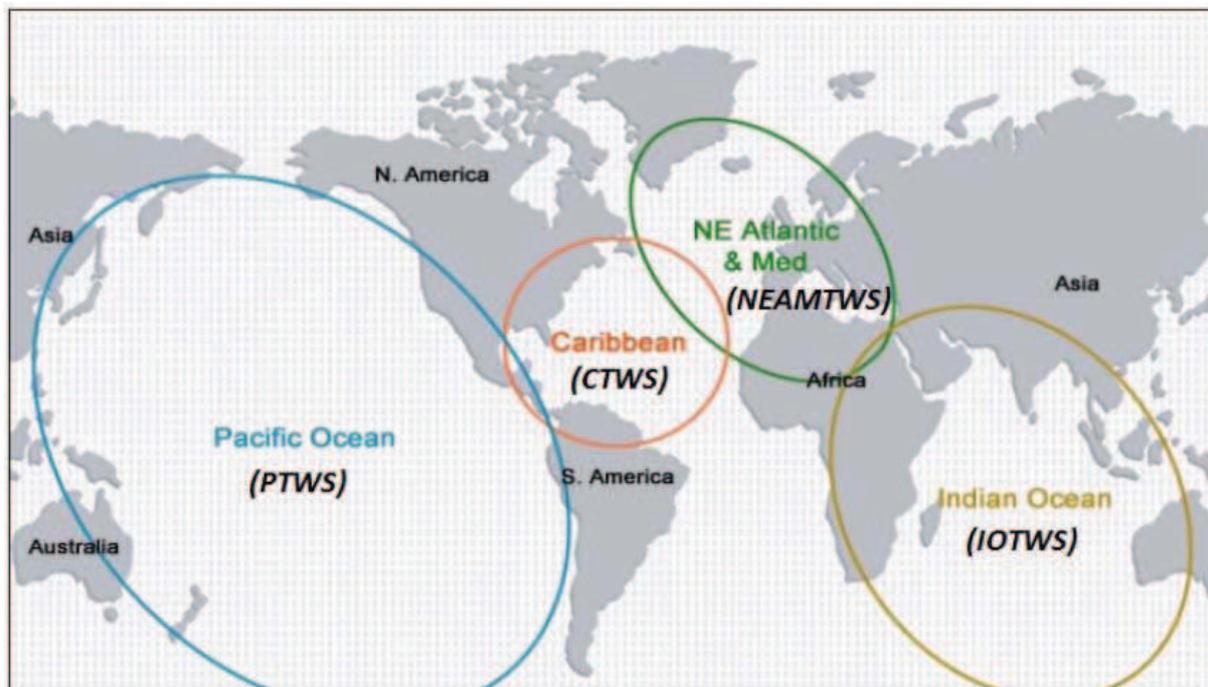


Figure 5. Les quatre systèmes d'alerte aux tsunamis de la COI/UNESCO. Source : IOC/UNESCO.

De tels systèmes d'alerte sont conçus pour détecter un tsunami quand la vague est encore loin des rivages et pour avertir assez tôt la population concernée afin de sauver des vies. Leurs

aspects opérationnels comportent deux types de réseaux de surveillance, sismologique et de mesure du niveau de la mer, et des centres d'alerte.

Le réseau de sismomètres permet de localiser l'épicentre et le foyer d'un tremblement de terre et de mesurer sa magnitude afin de déterminer si ce dernier peut provoquer un tsunami (Courteau, 2007). Au large, les tsunamimètres prennent le relai de l'information en détectant les variations de grande longueur d'onde caractéristiques des tsunamis (Sahal, 2011). Ce sont des capteurs de pression développés par la NOAA à partir de 1997 sous le nom de bouées « DART/ Deep Ocean-Assessment and Reporting of Tsunami » (Figure 6), positionnés au fond de la mer à des endroits stratégiques (à proximité des zones de subduction, loin des zones potentiellement instables de point de vue gravitaire etc...) et reliés à une bouée équipée d'émetteur/récepteur pour la transmission des informations en temps réel (Roger, 2011 ; Gonzales et al., 1998). En fin, les marégraphes situés à terre apportent des informations quand aux effets enregistrés à la côte. Situés généralement dans les ports, ils permettent de suivre en temps réel les effets d'un tsunami à la côte lorsque les marégraphes sont communicants (liaison satellite), et que leur pas d'échantillonnage est suffisamment précis (min). Les informations recueillies par les marégraphes peuvent être suivis en temps réel par n'importe qui ayant un accès à Internet (Sahal, 2011).

Quant aux centres d'alerte, ils ont pour objectifs opérationnels de diffuser, dès la détection d'un événement sismique potentiellement tsunamigène, des messages aux autorités de sécurité civile ainsi qu'aux autres centres d'alerte nationaux du bassin océanique. Les messages indiquent les caractéristiques du séisme, les heures d'arrivée du tsunami estimés à partir de modèles et permettent aussi de suivre la propagation réelle du tsunami en reportant les observations des tsunamimètres et des marégraphes côtiers présent dans le bassin.

Un opérateur de permanence 24h/24 est chargé de signaler un risque de tsunami à partir de l'analyse des mesures transmises en permanence et en temps réel par un réseau complet de stations sismiques et de marégraphes.

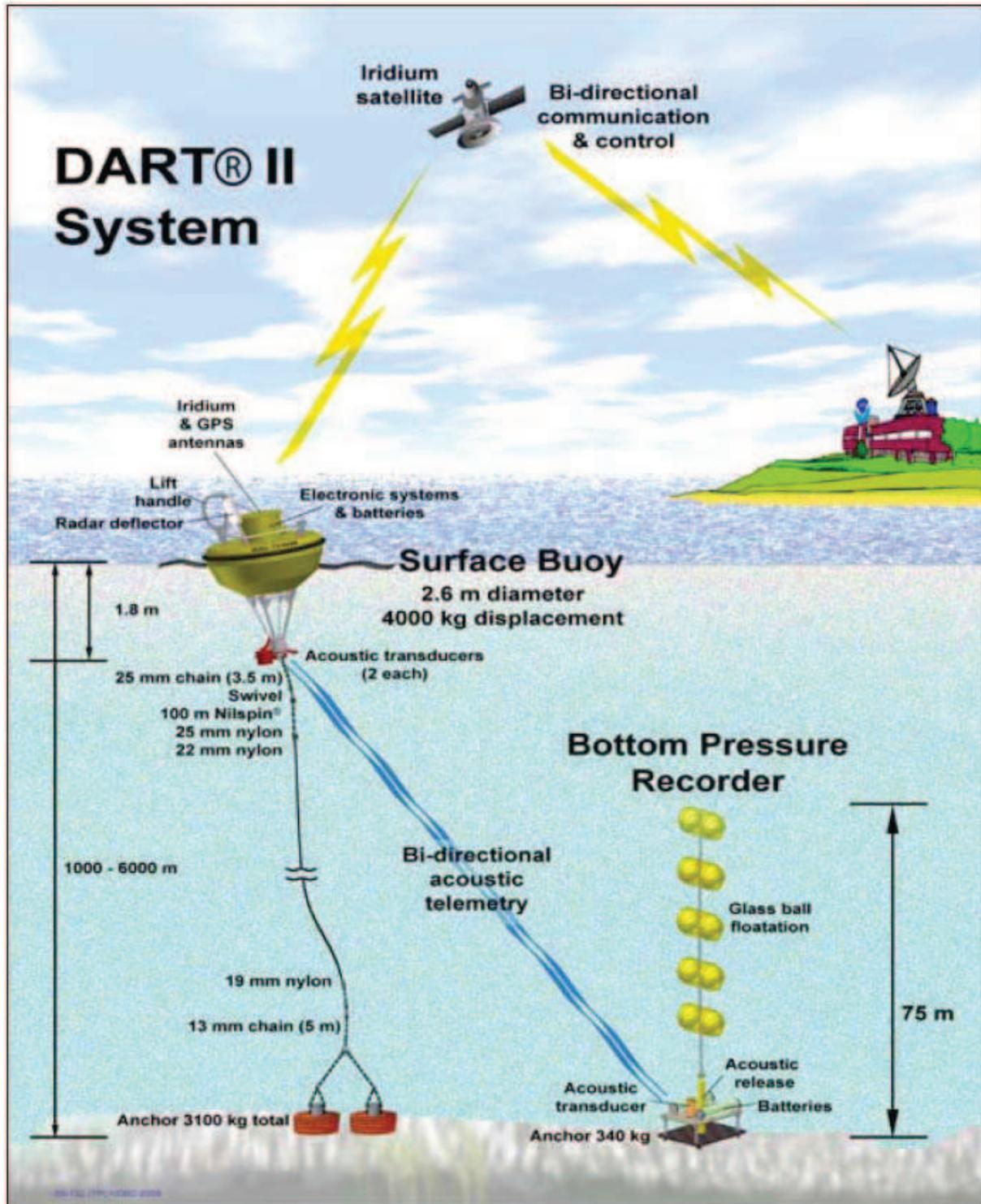


Figure 6. Schéma explicatif du fonctionnement du système DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis), DART® (Source, NOAA, <http://www.noaanews.noaa.gov/stories2005/images/tsunami-dart-system2.jpg>)

### 1.5. Contexte sismotectonique - tsunamigène du Maroc

Le Maroc se trouve dans un domaine de collision - correspondant au rapprochement des plaques tectoniques Africaine et Eurasienne. Bien qu'assez lent, 0.5 cm/an au niveau du détroit de Gibraltar (El Alami et al., 2005 ; Minster et al., 1974), ce rapprochement est en partie accommodé à travers une activité sismique modérée (Udias et al., 1976 ; Ben Sari, 1978 ; Frogneux, 1980 ; Cherkaoui, 1991 ; Ramdani, 1991 et Hatsfeld et al., 1993) qui s'étend le long de la zone de fracture Açores- Gibraltar et marque la limite entre les deux plaques par des séismes de magnitude souvent supérieure à 6 (Hatzfeld, 1978 & Cherkaoui, 1991).

Dans sa partie ouest, cette limite de plaques semble être bien définie par l'alignement de la sismicité et la bathymétrie. Il s'agit d'un système transformant de décrochement dextre qui s'étend entre la zone de triple jonction (Amérique du nord, Ibérie et Afrique) aux Açores et le golfe de Cadix (extrémité ouest de l'arc de Gibraltar) (Fernandes, 2004). Le système Açores – Gibraltar est distensif à l'Ouest, dans les Açores, et compressif à l'Est à partir du banc de Gorringe. Entre les deux s'étend la faille transformante Gloria (Gonzalez, 2001).

Dans la partie qui s'étend du golfe de Cadix jusqu'à l'Ouest de l'Algérie, il est difficile de délimiter de véritable frontière entre l'Ibérie et l'Afrique. Elle est souvent dessinée comme une large bande qui comprend le golfe de Cadix, le Rif, les Bétiques et la mer d'Alboran. Cette bande est de plus en plus étroite en allant vers l'Est (Tell algérien). Il s'agit d'une zone de confrontation intercontinentale entre l'Afrique et l'Ibérie, où la situation frontalière entre l'Afrique, l'Ibérie et les autres blocs, est encore moins précise. Cette situation est conditionnée en gros, par un régime compressif général NNW-SSE lié à la convergence générale Afrique – Eurasie (Bufoin et al., 1988; Jimenez-Munt et al., 2001; Negrodo et al., 2002; Henares et al., 2003) (Figure 7).

Au sein de ce régime compressif et à part l'extension dans la zone de triple jonction Afrique – Ibérie – Amérique aux Açores, une distension dans la mer d'Alboran d'origine très controversée s'impose. Cette extension du bassin d'Alboran est responsable de la forte complexité géométrique de la frontière entre les plaques en convergence (Tahayt, 2008).

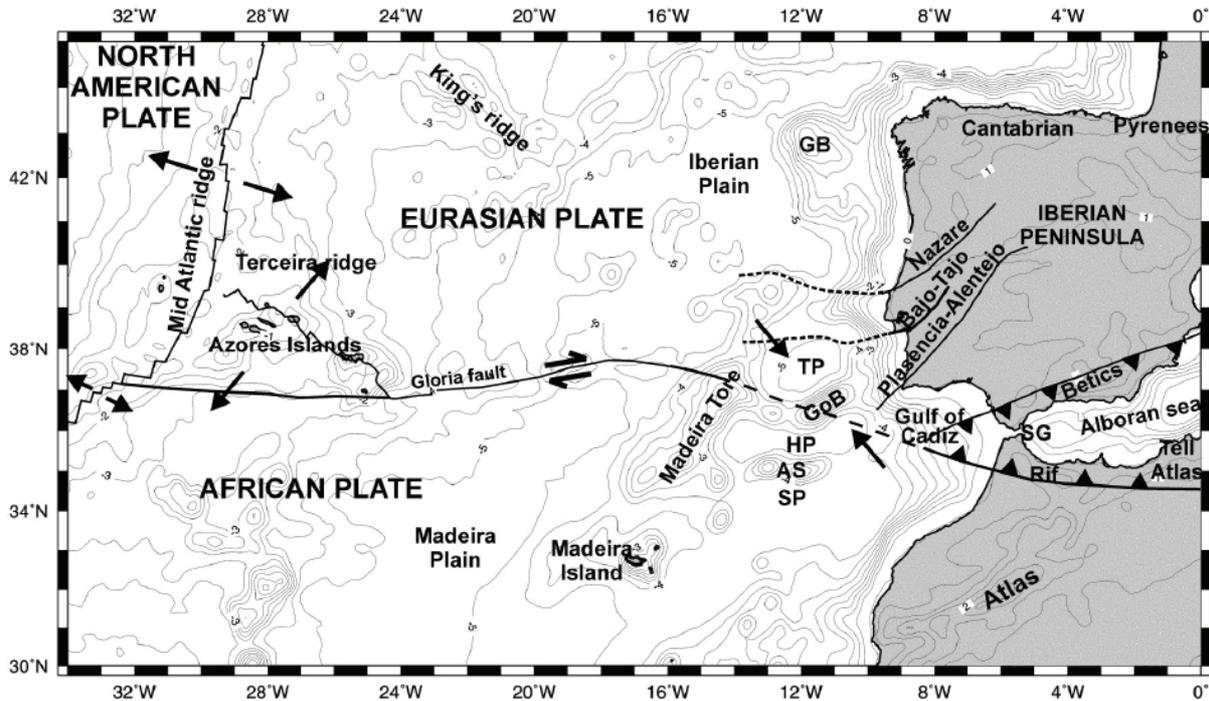


Figure 7. La limite des plaques Afrique - Eurasie dans sa partie occidentale (Jiménez-Munt et al, 2001) (GB: Galicia Bank; TP: Tagus Plain; GoB: Goringe Bank; HP: Horseshoe Plain; AS: Ampere Seamount; SP: Seine Plain; SG: Strait of Gibraltar).

La sismicité dans la région est souvent associée à la convergence entre les deux plaques africaine et eurasiennne (Figure 8). Pendant que cette sismicité s'aligne parfaitement sur la limite de ces plaques dans sa partie Ouest (système Açores-Gibraltar), elle devient plus complexe dans la région dite Ibéro-Maghrébine en général (Tahayt, 2008).

La région des Açores est généralement caractérisée, par des séismes de magnitude modérée et de faible profondeur (<30km). L'activité sismique la plus importante est concentrée le long du rift médio-océanique et le nord de la zone de fracture des Açores, alors que la partie Est est pratiquement inactive. Depuis 1920, seulement deux séismes, de magnitude  $M_s \sim 7$ , sont enregistrés au niveau de cette zone, celui du 8 mai 1939 dont l'épicentre est localisé à l'est de l'île de Santa Maria et du 1er janvier 1980 où l'épicentre est situé entre les îles de Terceira et Graciosa (Buforn et al., 2004; Borges et al., 2007).

La zone centrale, entre les latitudes  $23^{\circ}W$  et  $11^{\circ}W$ , commence par la faille de Gloria (GF), habituellement considérée comme une extension Est de la zone de fracture des Açores. Cette zone à faible activité sismique, a connu des séismes de forte magnitude comme en 20 mai

1931 ( $M_s = 7,1$ ), 25 novembre 1941 ( $M_s = 8,4$ ) et 25 mai 1975 ( $M_s = 7,9$ ) (Buform et al., 2004; Borges et al., 2007).

L'alignement de la sismicité le long du système Açores-Gibraltar est perturbé à partir du Golfe de Cadix où la sismicité commence à être plus dense et diffuse avec de très gros séismes comme ceux du 1er novembre 1755 ( $M_w = 8,5/8,7$ , Martinez-Solares et López Arroyo, 2004) ou du 28 février 1969 ( $M_w = 7,8/8,0$ , Grandin et al., 2007). Ces séismes sont connus pour avoir été à l'origine de deux tsunamis d'ampleurs différentes (un télétsunami dévastateur dans le premier cas et un petit tsunami dans le deuxième).

Dans la région bético-rifaine – Mer d'Alboran, la sismicité modérée à forte s'avère se concentrer au niveau de la marge nord africaine avec des séismes comme ceux d'Al Hoceima du 24 février 2004) ( $M_w = 6,3$  Tahayt, 2008), de Jibel ( $M_s \geq 6,6$  les 21 et 22 août 1856), Ech Chelf ( $M_s = 6,8$  le 9 septembre 1954 et  $M_s = 7,3$  le 10 octobre 1980), Zemmouri-Boumerdès ( $M_w = 6,8$  le 21 mai 2003) en Algérie (Hrbi et al., 2010 ; Hamdache et al., 2010), ou le séisme d'Almeria en Mer d'Alboran le 22 septembre 1522 ( $M_w$  estimé à 6,5 Gracia et al., 2006 in Roger, 2011).

Dans cette région, on trouve une sismicité ponctuée de séisme de magnitude supérieure à 6, présentant tous types de mécanismes au foyer (allant d'un régime compressif à l'est vers un régime décrochant à l'ouest en mer d'alboran), tout du long de la zone de collision entre les plaques africaine et eurasiennne. Ces séismes sont localisés en milieu marin (Boumerdès en 2003) ou à proximité (El Asnam en 1954 et 1980) et sont donc capables de générer des tsunamis par simple transmission de la déformation cosismique à la masse d'eau sus-jacente ou voisine (Okal et Synolakis, 2003 in Roger, 2011). Comme ce fût le cas lors du séisme d'Almeria de 1522 qui serait à attribuer à la faille décrochante (avec une légère composante verticale) de Carboneras, potentiellement capable de générer des séismes de magnitude  $M_w = 7,2$  (Gracia et al., 2006 ; Reicherter et Hubscher, 2007 in Roger, 2011), et celui de Boumerdès de 2003, enregistré en de nombreux endroits de Méditerranée occidentale, sur la côte algérienne et aux Baléares (Sahal *et al.*, 2009).

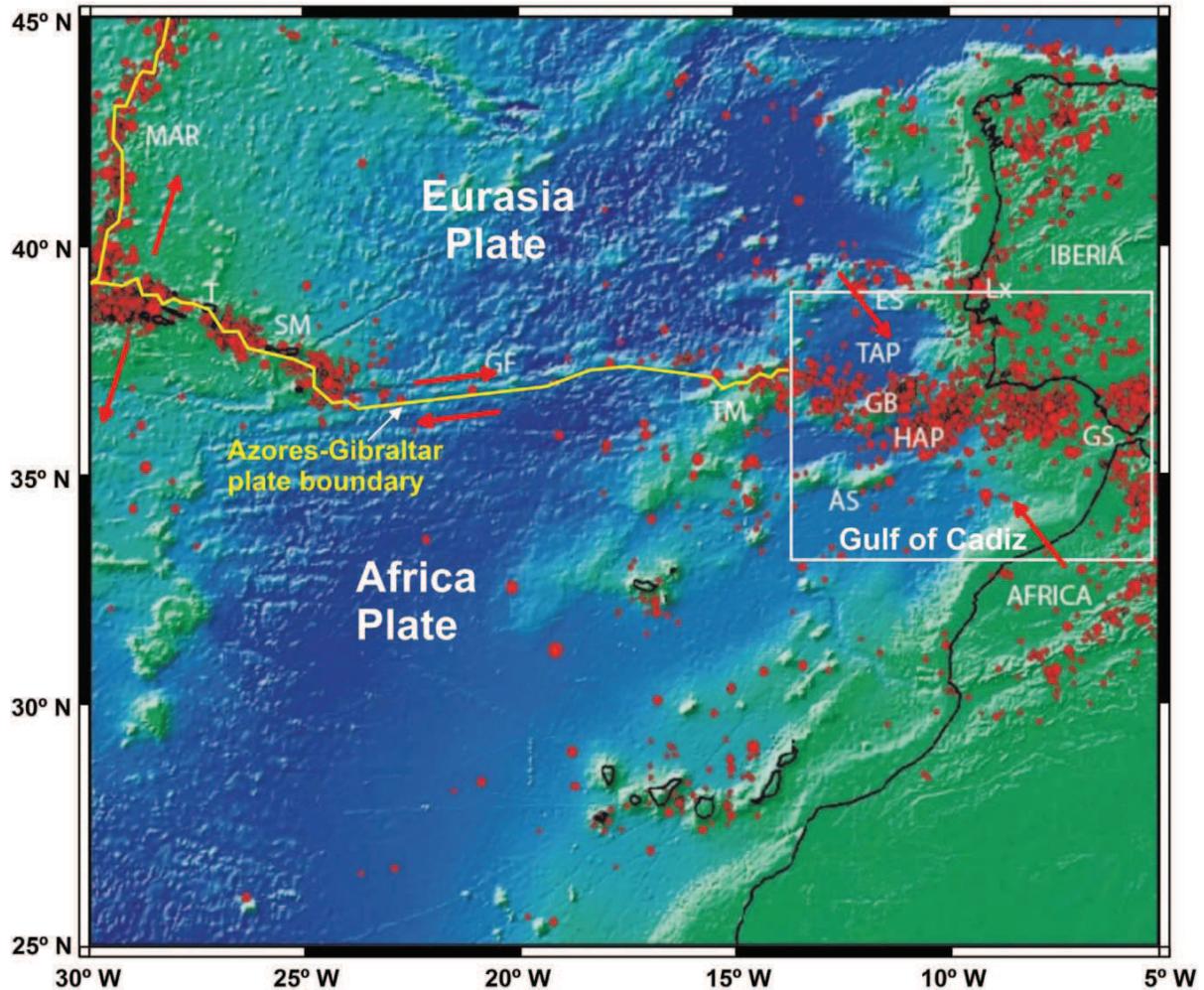


Figure 8. La sismicité (points rouges) et la limite des plaques (ligne jaune) de la zone des Azores – Gibraltar. Données Sismiques du catalogue ISC de la période 1970-2007 et magnitudes supérieures à 3.

(*T*, Terceira Island; *HAP*, Horseshoe Abyssal Plain; *TAP*, Tagus Abyssal Plain; *GF*, Gloria Fault; *SM*, S. Miguel Island; *MAR*, Mid-Atlantic Ridge; *AS*, Ampere Seamount; *GB*, Goringe Bank; *ES*, Estremadura Spur; *GS*, Gibraltar Straight (adapted from Miranda et al.(2008) in Omira, 2010)).

### 1.5.1. La zone tsunamigène du Golfe de Cadix

Le Golfe de Cadix est considéré comme l'une des zones tsunamigènes les plus importantes dans l'océan Atlantique.

Compris entre, d'une part les plateformes ibérique et marocaine, et d'autre part les plaines abyssales du Fer à Cheval et de Seine (Figure 8), le Golfe de Cadix se caractérise par une bathymétrie irrégulière et une morphologie concave vers le SW, héritage de son histoire géologique complexe (Heezen et Johnson, 1969; Roberts, 1970; Mélières, 1974; Malod, 1982 in Hanquiez, 2006) (Figure 9).

La marge du Golfe de Cadix est caractérisée par un plateau continental étroit de 30 à 40 km de large et une pente moyenne de 0.2 à 0.4°. La rupture de pente est située à une profondeur moyenne de 120 m (Heezen et Johnson, 1969 in Lobo, 2000). La pente continentale se divise en trois provinces (Nelson et al., 1993 in Hanquiez, 2006): 1) la pente supérieure (2-3°) formant une ceinture étroite entre 130 et 400 m de profondeur d'eau ; 2) la pente médiane située entre 400 et 1200 m de profondeur d'eau. Sur les parties SE et NW de cette pente, deux terrasses larges et horizontales (pente < 1°) sont localisées entre 400 et 700 m de profondeur d'eau. Entre les terrasses, plusieurs rides curvilignes étroites (3 à 40 km de longueur) et raides (jusqu'à 30°) d'origine diapirique (Maldonado et Nelson, 1999), ainsi que des vallées (1 à 3 km de largeur) orientées NE/SW à EW entaillent la pente. De nombreux volcans de boue ont été également identifiés aux alentours de ce complexe de rides et de vallées (Kenyon et al., 2000; Pinheiro et al., 2003; Somoza et al., 2003) ; 3) la pente inférieure entre 1200 et 2000 m de profondeur d'eau. Cette partie de la pente, fortement inclinée (2-4°), est incisée par des vallées étroites de direction NE/SW dans sa partie septentrionale, et caractérisée dans sa partie méridionale par de petites dépressions similaires aux mini-bassins observés dans le Golfe du Mexique (Diegel et al., 1995; Prather, 2000).

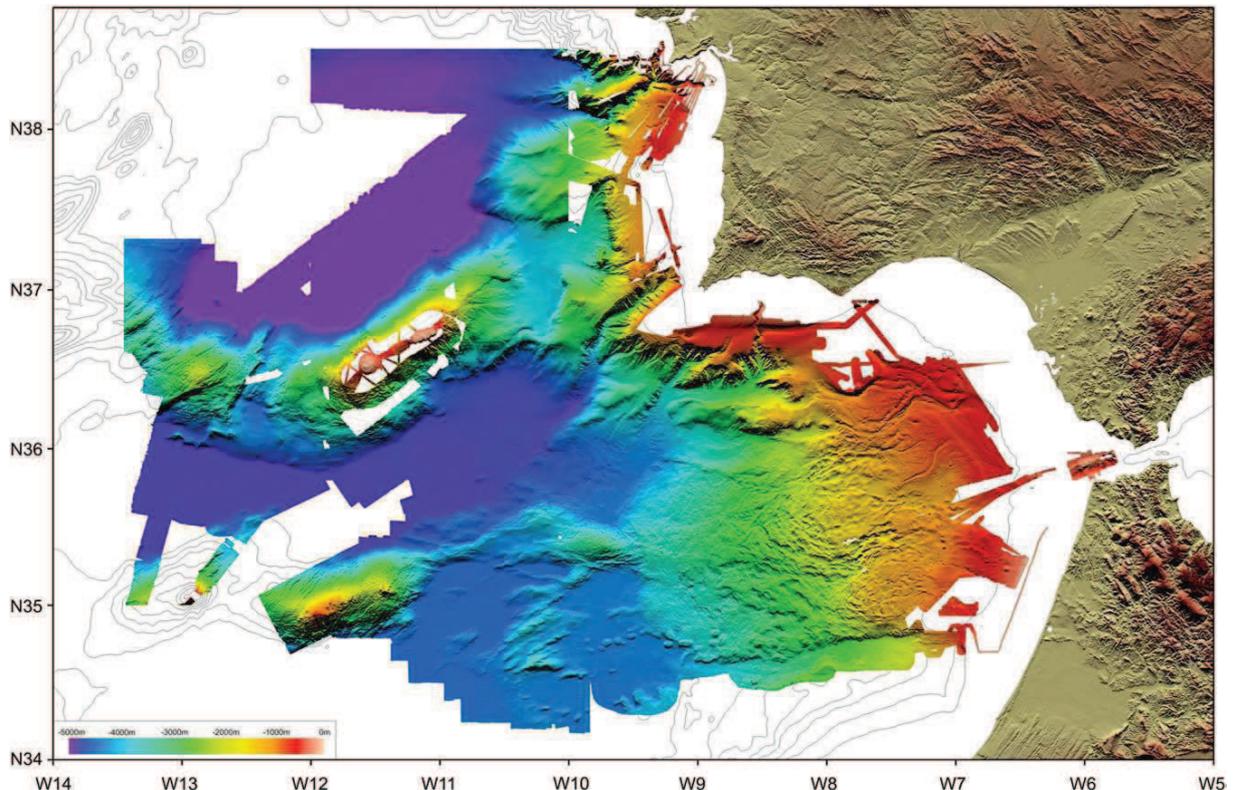


Figure 9. La compilation bathymétrique multifaisceaux SWIM du golfe de Cadix. (Zitellini, et al., 2009)

L'histoire tectonique complexe du Golfe de Cadix est gouvernée par l'orogénèse alpine. Cette zone, structurellement limitée par les failles transformantes Açores-Gibraltar au Nord et par les ceintures alpines du Sud de l'Europe et du Nord de l'Afrique, est à cheval sur les frontières des plaques lithosphériques Africaine et Ibérienne (Touccane, 2005). Elle est délimitée dans sa partie orientale par l'arc orogénique de Gibraltar (Maldonado et al, 1999). La rotation anti-horaire de l'Afrique par rapport à l'Europe est à l'origine, au Miocène tardif (-10 Ma) de la mise en place d'un olistostrome (Maldonado et al., 1999). Cette structure est interprétée comme un prisme d'accrétion en relation avec une subduction océanique active sous Gibraltar. Une plaque lithosphérique originaire du domaine Atlantique du Golfe de Cadix, à pendage Est, s'étend depuis l'Ouest d'Alboran jusque sous la région de Grenade (Gutscher et al., 2002). Au fur et à mesure des phases tectoniques, de l'ouverture du Détroit de Gibraltar et des variations des taux de subsidence du Golfe de Cadix, cette zone a connue plusieurs régimes océanographiques et conditions de dépôts (Maldonado, 1999 ; Lobo, 2000). Le Golfe de Cadix, par sa tectonique complexe est une région à forte activité sismique - tsunamigène, comme le démontrent les puissants séismes de février 1969 (magnitude 7,9) et de Lisbonne en 1755 (magnitude 8,7) (Zitellini et al., 1999, in Hanquiez, 2002).

### **1.6. Source volcanique- tsunamigène**

Une autre source possible de tsunamis proche évoquée récemment par certains auteurs, très médiatisée mais sujette à polémique est d'origine volcanique. Il s'agit du volcan Cumbre Vieja situé sur l'île de Palma aux Canaries

Ce volcan est le plus récent. En 125 000 ans, il a eu une croissance rapide. Il domine la mer de 2 000 m et le fond de l'Atlantique de 6 000 m. Il est long de 20 km et large de 15 km seulement ; ses flancs plongent dans la mer selon un angle dépassant par endroit les 30°. Lors de l'éruption de 1949, le flanc ouest s'est affaissé de 4 m ; il est depuis en équilibre précaire au-dessus de l'océan.

Lors d'une future grosse éruption, il pourrait provoquer un glissement de flanc induisant un tsunami de grande amplitude qui atteindrait les côtes marocaines en 1h30 (Ward *et al.*, 2001) (Figure 10).

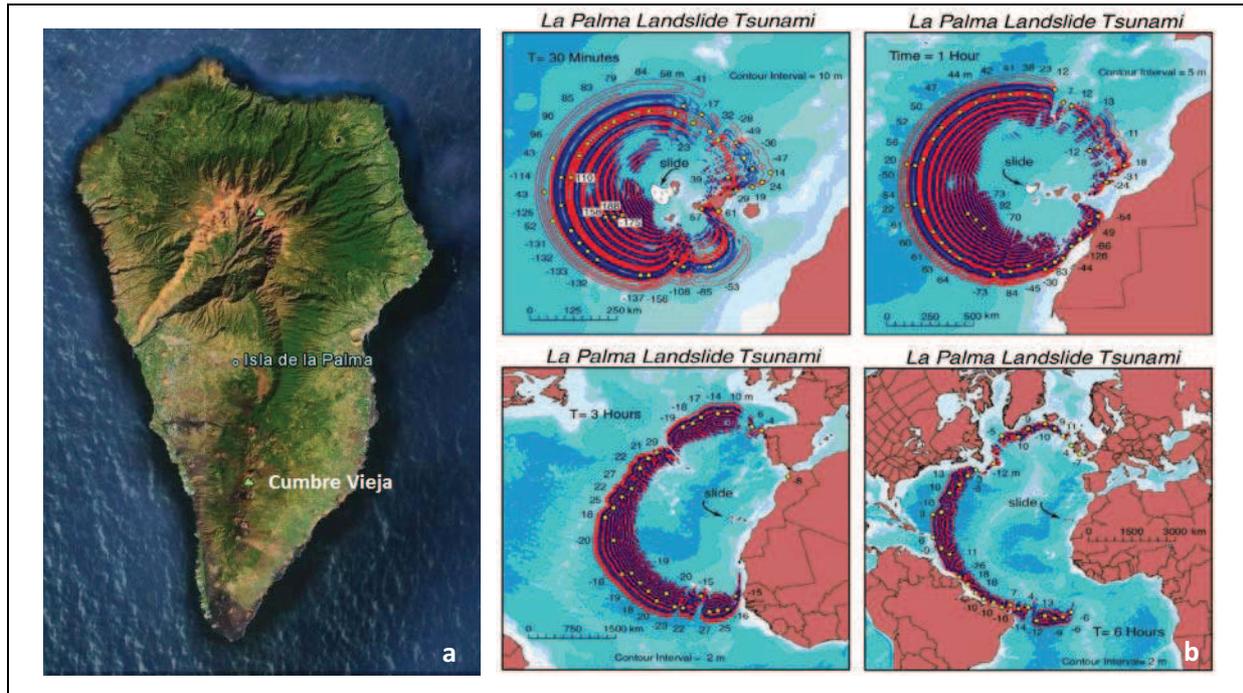


Figure 10. a) Image de l'île de Palma est l'avant-dernière île volcanique née du point chaud des Îles Canaries (juste avant El Hierro : 1,12 Ma). b) Modélisation numérique de la propagation du mégatsunami causé par une possible éruption volcanique de la Palma aux îles Canaries (Chiffres positifs = hauteur des crêtes en m, Chiffres négatifs = creux des vagues en m) (Ward et al., 2001).

### 1.7. Conclusion du 1<sup>er</sup> chapitre

Plusieurs événements sont susceptibles d'engendrer un tsunami : séismes sous-marins, glissements de terrains, éruption volcanique sous-marine, chute de météorites...mais la majorité ont une origine sismique.

Les séismes tsunamigènes qui menacent les côtes marocaines se produisent essentiellement dans la mer d'Alboran en Méditerranée occidentale, mais surtout au niveau du golfe de Cadix sur l'océan atlantique.

La connaissance des tsunamis historiques, par la recherche de témoignages historiques ou par la recherche de dépôts sédimentaires associés, constitue la base de toute évaluation de l'aléa en vue de l'établissement d'un scénario de référence.



## Chapitre 2 : Historique des tsunamis au Maroc atlantique : approche documentaire

### 2.1. Introduction

C'est en 1985 que les travaux de recherche sur l'historique du tsunami au Maroc ont été entamés. Le contexte est un projet d'une centrale électrique de l'Office national de l'Electricité (ONE du Maroc) devant être créée entre Safi et Essaouira. Le travail de recherche s'est conclu par la soutenance de la thèse de l'historienne Touria El Mrabet, sur les «grands tremblements de terre dans la région maghrébine et leurs conséquences sur l'homme et son environnement» avec un grand chapitre sur le tsunami (thèse écrite en arabe).

En 1991, El Alami et al., ont réalisé une autre étude sur les tsunamis au Maroc pour la période 1901-1986, avec une estimation du potentiel destructeur des événements. Dans cette étude El Alami et al., ont souligné l'importance des zones sources du sud-ouest du Portugal pour l'Atlantique et de la mer d'Alboran pour la Méditerranée.

Une révision du catalogue des séismes qui ont affecté les côtes marocaines et une partie de l'Espagne pour la période 1045-2005 a été proposée par Pelaez et al (2007). Ce catalogue mentionne des séismes dont l'épicentre se situe au large et dont la magnitude est supérieure à 6, ce qui en fait des événements en théorie tsunamigéniques (Genet, 2011).

Enfin, Kaabouben et al (2009) ont proposé un catalogue complet et exhaustif des tsunamis ayant affecté le Maroc, tant dans le domaine atlantique que méditerranéen. Ce catalogue est construit sur le modèle de celui du GITEC (Genesis and Impact to Tsunamis in the European Community) en se basant sur les études précédentes, sur les observations historiques, sur des témoignages écrits contemporains et sur des données disponibles dans les pays voisins notamment le Portugal et l'Espagne. Pour les événements plus récents, survenus au cours du XX<sup>e</sup> siècle, figurent entre autres, ceux détectés par les marégraphes.

D'autres catalogues internationaux sont disponibles également en ligne sur internet comme par exemple celui du GIC/SATANEM (*le groupe intergouvernemental de coordination du système d'alerte aux tsunamis de l'Atlantique Nord-est et de la Méditerranée*) et de la NOAA (*The National Oceanic and Atmospheric Administration*). 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.

## 2.2. Historique du tsunami sur le littoral atlantique

Selon Kaaboulen et al. (2009), sept tremblements de terre sont répertoriés de façon certaine pour avoir donné lieu à des tsunamis propagés jusqu'aux côtes atlantiques marocaines, et plusieurs autres séismes de façon plus douteuse (Tableau 1). Il s'agit des événements de 382, 881, 1755, 1761, 1941, 1969 et 1975 apr. J.-C.

Tableau 1. Catalogue des tsunamis probables ayant touchés les côtes marocaines (D'après Kaaboulen et al, 2009)

Year	Month	Day	Hour	Min	Longitude	Latitude	Source Area	Mw	Reliability	Source
<b>382</b>	–	–	–	–	–10 00	36.00	South West Iberia	–	2	3,4
<b>881</b>	5	22		–			West Mediterranean	–	4	1
<b>1522</b>	9	22	10	–	–02.66	36.97	West Mediterranean	6.5	4	1
<b>1680</b>	10	9	7	–	–04.60	36.80	West Mediterranean	6.8	4	1
<b>1733</b>	–	–	–	–	–	–	West Mediterranean		0	19
<b>1755</b>	11	1	10	16	–10 00	36.50	South West Iberia	8.7	4	1,3,5,6,7,8
<b>1761</b>	3	31	12	15	–13.00	34.50	Gloria Fault	8.5	3	2,9
<b>1790</b>	10	9	1	15	–00.60	35.70	West Mediterranean	6.7	1	1
<b>1856</b>	8	21	21	30	+05.72	36.83	West Mediterranean	–	0	20
<b>1941</b>	25	11	18	04	–18.98	37.42	Gloria Fault	8.2	4	6,10
<b>1969</b>	2	28	2	40	–10.57	36.01	South West Iberia	7.9	4	11,12,13,14,15,16,17
<b>1975</b>	5	26	9	11	–17.56	35.98	Gloria Fault	7.9	4	11,18
<b>1980</b>	10	10	12		+01.68	36.28	West Mediterranean	5.8	0	20
<b>2003</b>	5	21	18	44	+03.08	36.80	West Mediterranean	7.0	0	21, 22, 23

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) Kaaboulen 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).

### 2.2.1. Tsunami de 382

Le tsunami de 382 généré par le tremblement de terre ressenti dans toute la Méditerranée orientale, aurait occasionné un tsunami jusqu'à sur la cote sud-ouest du Portugal et celle du Maroc. Toutefois, cette supposition ne s'appuie aujourd'hui sur aucune description locale précise (Kaaboulen et al., 2009).

### 2.2.2. Tsunami du 22 mai 881

D'après El Mrabet (2005), la localisation épacentrale du séisme se trouve probablement en mer d'Alboran, le tremblement de terre fut suivi par un tsunami qui aurait atteint le sud de la côte d'Andalousie en Espagne, et probablement aussi la côte nord et nord ouest- du Maroc.

### 2.2.3. Tsunami du 1<sup>er</sup> novembre 1755 (cf, 2.3)

### 2.2.4. Tsunami du 31 mars 1761

Ce tsunami est dû à un séisme de magnitude probablement proche de 8,5, avec un épicentre dans le golfe de Cadix. D'après les témoignages historiques, le tsunami généré aurait non seulement affecté les côtes portugaises, mais il aurait aussi atteint le nord de l'Europe et les îles antillaises de la Barbade. Même si à ce jour, aucun témoignage n'a été retrouvé concernant les observations du tsunami au niveau du Maroc, vu son ampleur, le tsunami a aussi très vraisemblablement dû atteindre la côte ouest (Kaaboulen et al., 2009).

### 2.2.5. Tsunami du 25 novembre 1941

Le tsunami du 25 novembre 1941 consécutif au séisme de  $M_w = 8,2$ , localisé en Atlantique, au niveau de la faille de Gloria, correspond à un tsunami transocéanique. Il a été enregistré depuis le Maroc jusqu'aux côtes anglaises ainsi qu'au niveau des côtes des États-Unis. Concernant le Maroc, l'amplitude des vagues enregistrées par les marégrammes a été de 0,25 m à Casablanca (Figure 11) et de 0,45 m à Essaouira (Mogador), (Kaaboulen et al., 2009).

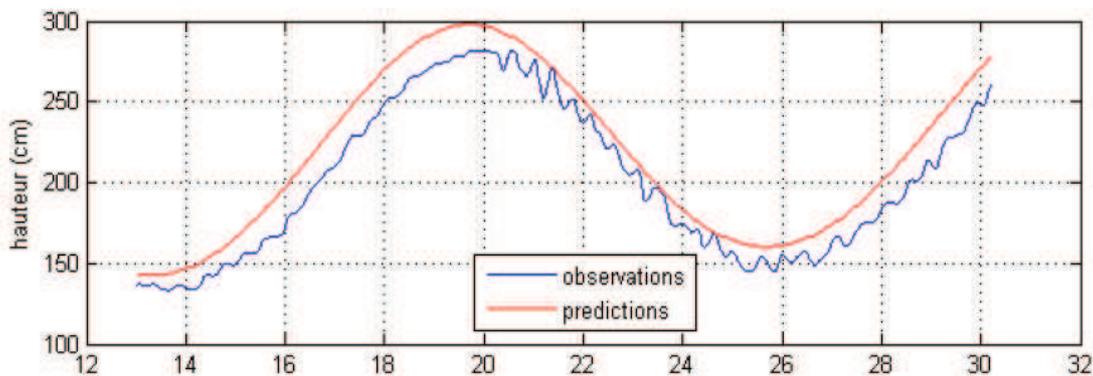


Figure 11. Marégramme illustrant l'enregistrement du tsunami de 25/11/1941 par le marégraphe de Casablanca (jetée transversale). (source : Delencre, 2009)

### **2.2.6. Tsunami du 28 février 1969**

Le 28 février 1969, un violent séisme de magnitude 7.3 sur l'échelle de Richter, qui avait son épïcêtre dans la même région que celui de 1755, a été ressenti sur une surface d'environ 1300 km de rayon, des îles Canaries, bien que le foyer ait été situé à plus de 200 km du cap Saint-Vincent (Portugal) et à 400 km des côtes marocaines, le séisme a causé des dégâts et des victimes au Portugal, en Espagne et au Maroc (UNESCO, 1971).

Au Maroc, la secousse fut fortement ressentie sur toute la côte atlantique et, survenant en pleine nuit, causa une alarme générale ; les fortes pluies qui étaient tombées pendant les trois jours précédant le séisme avaient détrempe le sol et les maisons de briques séchées ; plusieurs constructions s'écroulèrent : on compta 2 morts et 8 blessés à Salé, 1 mort à Safi, 1 blessé à Casablanca et 1 à Mohammedia, 2 morts et 7 blessés dans la région de Marrakech. Pendant plusieurs nuits, dans la plupart des villes marocaines, une forte proportion des habitants a évité de dormir dans les maisons (UNESCO, 1971).

Un mini-tsunami a été enregistré à Casablanca, se propageant à une vitesse d'environ 600km/h, la première vague a atteint le port quarante minutes après le séisme ; l'amplitude maximale mesurée est de 1,20 mètre. Ce tsunami a également été signalé, mais avec une amplitude moindre, dans le golfe de Cadix, aux îles Canaries et à Lagos (Portugal). (UNESCO, 1971)

### **2.2.7. Tsunami du 26 mai 1975**

Ce tsunami est dû à un séisme de magnitude Mw 7,9, localisé en Atlantique au niveau de la faille de Gloria. Bien que ressenti au niveau des îles des Açores jusqu'aux cotes du Portugal à celles du nord du Maroc, son amplitude est restée relativement faible, 0,76 m aux Açores (Faial), 0,04 m à Ceuta, (Kaaboulen et al., 2009).



Cette carte (Figure 12) localise les sources tsunamigènes qui figurent dans les trois catalogues. 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.

Deux événements retiennent particulièrement notre attention. Celui de 1er 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 événements les mieux renseignés par les archives et les mieux décrits dans la littérature.

### **2.3. Le cas du tsunami de 1755 au Maroc**

Le 1<sup>er</sup> novembre 1755, la ville de Lisbonne fut détruite par un séisme d'une magnitude proche de 8,7 sur l'échelle de Richter (Baptista et al., 2003), auquel s'ajouta un tsunami, noyant la ville basse et le port, et un incendie, allumé par l'effondrement de maisons sur leurs foyers domestiques, qui fit rage pendant une semaine (Blanc, 2008).

Le séisme et le tsunami du 1<sup>er</sup> novembre 1755 constituent, jusqu'à ce jour, l'évènement « naturel » le plus fort, le plus impressionnant et le plus destructeur que l'Europe ait connu (Chester, 2001 ; Quenet, 2005). Ils ont 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'évènement 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 27-28 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 (Leone et al., 2012). D'après les témoignages contemporains, le séisme de Lisbonne de 1755 a été ressenti, non seulement au Portugal, mais dans toute l'Europe et dans une partie de l'Afrique. Il s'est propagé avec une violence à peu près égale au Portugal et au Maroc. A Meknès qui a particulièrement souffert du séisme (d'où son appellation par les historiens marocains « tremblement de terre de Maknassa Ez Zaytouna »), Mr En Naciri (historien marocain) a écrit dans Kitab el Istiqsa<sup>1</sup>: « En 1169 de l'hégire, se produisit le grand tremblement de terre au Maghreb, qui détruisit presque complètement Meknassa Ez Zaytouna (Meknès) et fit un nombre incalculable de morts. Parmi les esclaves seulement, il mourut près de 5.000 personnes ». La porte de bab Mansour subit un effet de tassement violent sur les deux colonnes de marbre qui l'encadraient. La réplique du 18 novembre rendit la ville inhabitable ; la mosquée de la Kasbat fut rasée et près de 10.000 personnes moururent. De grandes fissures, qui découpent encore les interminables murs en pisé de Meknès, remontent à cette époque. L'une d'elles, largement entrebaillée, sépare en deux tronçons le Bordj-Meckouk. Les ruines de Volubilis ont été également éprouvées par ce tremblement de terre (Figure 13b).

Selon El Qadiri dans Nashr el Mathani<sup>2</sup>: « A Fès, comme à Meknès, presque tous les édifices furent détruits, en particulier la grande mosquée et 3.000 personnes périrent sous les ruines. Des gens à Fès démolirent leurs maisons de crainte de les voir s'effondrer sur eux ».

A Marrakech, une secousse violente renversa une quantité d'édifices et provoqua le débordement de l'Oued Tensift dont les eaux entrèrent par les portes de la ville et noyèrent une grande partie de la population. Un gouffre considérable s'ouvrit à huit lieux de la ville et engloutit une agglomération composée, d'après le Vice - Préfet Apostolique des missions des Pères Franciscains, de 5 000 habitants et de 6 000 soldats.

Les effets de ce séisme touchèrent également le site de Rabat-Salé, à la Tour Hassan, il reste des rochers fissurés témoins de ce désastre (Figure 13a).

---

<sup>1</sup> En Naciri: "Kitab el Istiqsa li akhbar dowal el Maghrib el aqsa". (Histoire des dynasties marocaines depuis les Idrissides jusqu'aux Alaouites). En six volumes. Trad. Colin, Hamet, En Naciri et Fumey; Archives marocaines; t. 31, 32, 33, 34, 9 et 10; Paris 1925, 1927, 1934, 1936, 1906 et 1907.

<sup>2</sup> Al Qadiri: "Nashr el matani li'ahl qarn el hadi ashar wa'thani ashar". Trad. Graulle, Maillard et Michaux-Bellaire; Archives Marocaines; t. 21 et 24; Paris 1913 et 1917.

1 & 2 Sur le site de Mr Cherkaoui Taj Eddine, <http://www.everyoneweb.com/mtcherkaoui/>



Figure 13. Sites affectés par le séisme de 1755, a) Mosquée Hassan à Rabat, b) Volubilis

Quand au tsunami, il a été observé sur le pourtour du Golfe de Cadiz (Portugal, Espagne et Nord du Maroc). Il aurait causé des dégâts considérables dans un grand nombre de villes marocaines, entre Tanger et Agadir, et tué environ 1 000 personnes sur les côtes. Le train d'onde a parcouru tout le bassin atlantique pour aller 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. La vague la plus destructrice fut observée le long des côtes du sud et des côtes ouest du Portugal, du Golfe de Cadiz 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.

Le tsunami de 1755 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 (Leone et al., 2012).

Un travail de compilation et d'analyse des recueils historiques sur ses effets a été réalisé par un certain nombre de chercheurs (El Mrabet, 2005 ; Kaabouben et al., 2009 ; Baptista et Miranda, 2009 ; Blanc, 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 14).

Parmi les villes atlantiques marocaines les plus affectées par le tsunami de 1755 sont citées notamment :

- **Tanger**, certains témoignages indiquent une submersion des remparts de la ville, ce qui correspondrait à un run-up d'une quinzaine de mètres, et une profondeur maximale de

l'inondation de plus de 2 km. Néanmoins, Blanc en 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 Tanger. Elle ne serait que de 1,5 m à 2 m de plus au Sud sur la côte marocaine.

- **Assilah**, l'essentiel des dégâts serait dû à la vibration sismique. Selon Mrabet (2005), le run-up (hauteur maximale de l'eau à terre) serait de 3m environ, et la profondeur maximale du champ inondé, supérieure à une centaine de mètres. L'inondation aurait atteint la moitié de la ville (Blanc, 2009). Le tsunami aurait détruit un bateau de marchandise, celui-ci aurait été emporté à environ 120 m à l'intérieur des terres, soit par les portes de la cité, inondées par les flots, soit par une brèche creusée dans les murailles.
- **Salé**, les principaux dommages générés par le tsunami sont le naufrage de trois bateaux traversant l'estuaire du fleuve Bouregreg, la noyade de 200 personnes (probablement les marins sur les bateaux), une caravane avec plusieurs chameaux lourdement chargés emportée par les flots. Une grande quantité de poissons morts ont été trouvés à l'intérieur de la ville. Selon Mrabet (2005), la profondeur maximale d'inondation serait d'environ 2000 m.
- **Safi**, certaines descriptions laissent supposer un run-up de 15 m et une profondeur d'inondation de plus d'1 km. Cependant, selon Blanc (2009), les seuls dommages qui puissent être directement liés au tsunami sont des débris flottants, des poissons morts dans les rues et la destruction de bateaux. Par contre, il est difficile de dire si la destruction des nombreuses maisons a été due directement au séisme ou au tsunami généré.

Tableau 2. Reconstitution des hauteurs d'eau à la côte du tsunami de 1755 et sources utilisées par Kaabouben et al. (2009).

Site	Run-up	Référence
Assilah	<b>3m</b>	Sylvanus, 1755 & El Mrabet, 1991
El Jadida	<b>23m</b>	El Mrabet, 1991
Rabat-Salé	<b>4m</b>	El Mrabet, 1991
Safi	<b>15m</b>	Anonymous, 1755 ; Anonymous, 1756 & Fowke, 1756
Tanger	<b>15m</b>	Gazette D'Amsterdam, 1756 ; Debrach, 1946 & El Mrabet, 1991

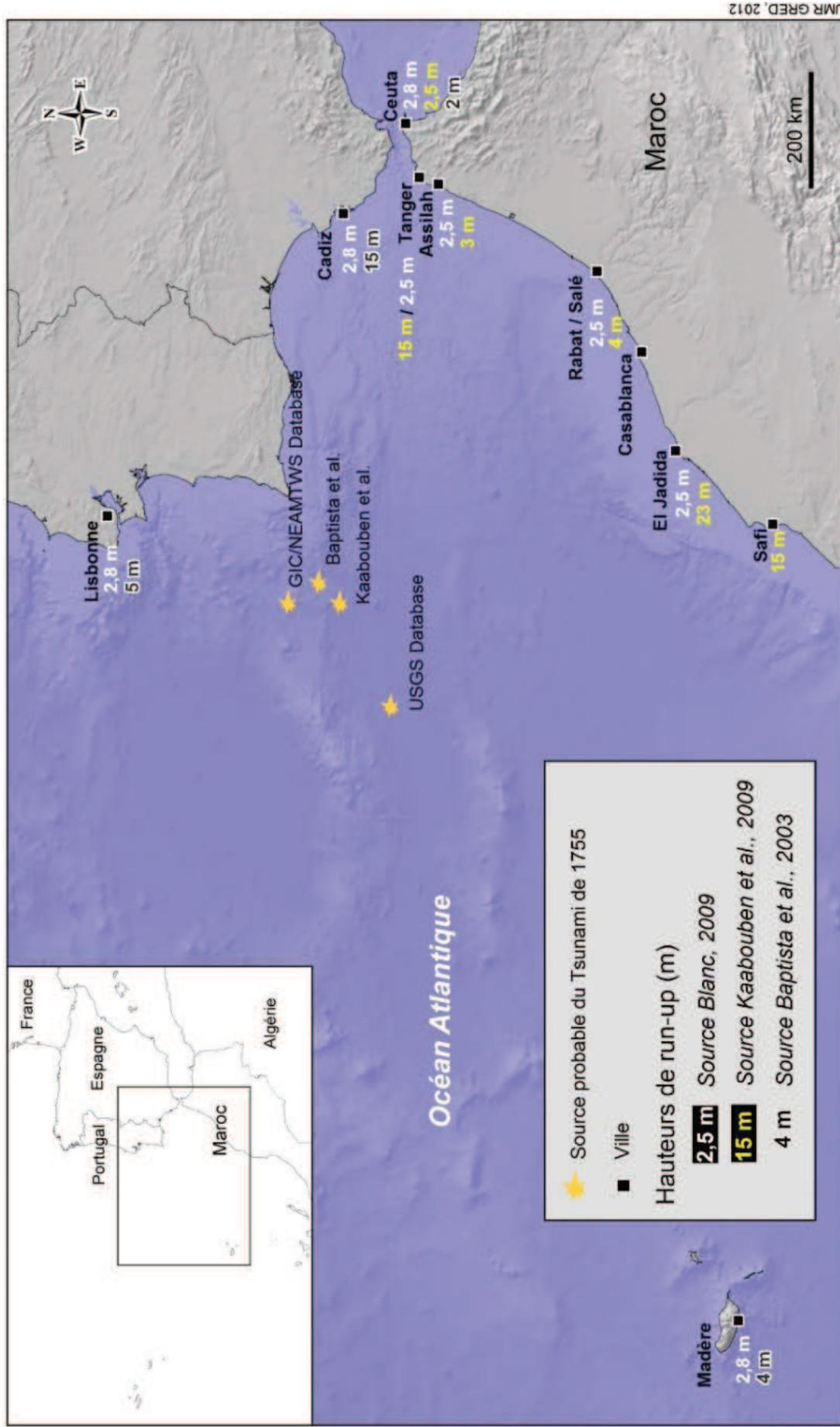


Figure 14. Confrontation des sources et des témoignages historiques sur les effets du tsunami du 1er novembre 1755 (Leone et al., 2012).

## 2.4. Le tsunami de 1755 à El Jadida

En ce qui concerne la ville d'El Jadida, où notre étude à l'échelle locale sera focalisée, Leone et al., 2012 ont réanalysé les principales sources documentaires initiales disponibles (en français, anglais, espagnol et portugais), dont celles traitées par Blanc (2009).

### 2.4.1. Corpus documentaire examiné par Leone et al., 2012

- **Le rapport sur Mazagan 1755** (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. « *Rapport sur le grand tremblement de terre survenu dans la Place (dans le sens place forte) de Mazagan le 1er 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...*

*...L'aube du 1<sup>er</sup> 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 insistance 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...*

*...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 de Leone et al. (2012) 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.

- **La lettre de Meknès du 8 novembre 1755, suivie de la lettre de Tetouan du 24 novembre 1755** (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 labours 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 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.

### 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.

*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 de Leone et al. (2012) 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<sup>er</sup> 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 particulier<sup>3</sup>) 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-

---

<sup>3</sup> C'est aussi cette question politique sensible qui occupe l'essentiel de la lettre de Soyris, diplomate officieux.

estimée dans le contexte culturel de l'époque, car elle structure la vision hiérarchique et chrétienne du monde largement partagée par les européens du XVIIIe 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.

- **La 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.

#### 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 downgrading 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

*« ...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 présent 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 Safi, d'où j'aurai l'avantage de vous écrire plus amplement.*

*J'ai l'honneur d'être... »*

**Commentaire de Leone et al. (2012) 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 Moulay Ismail c'est-à-dire la paix avec la 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 (2009<sup>4</sup>), 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'Eglise et les rois chrétiens sont les garants se traduit également par l'opposition entre l'action<sup>5</sup> des soldats portugais (qui réagissent à l'événement en prenant d'autres risques) et la passivité<sup>6</sup> 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.*

---

<sup>4</sup> 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.

<sup>5</sup> connotée positivement.

<sup>6</sup> connotée négativement.

**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 (24,36 m), 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 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.)

- **Trois 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 XVIIIe 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.

*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<sup>er</sup> 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**<sup>7</sup>, 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 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 vomi 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 gens**<sup>8</sup>, continuèrent à nous

---

<sup>7</sup> C'est nous qui soulignons.

<sup>8</sup> C'est nous qui soulignons.

*inquiéter, faisant leur possible pour nous empêcher la corvée de bois que nous allions couper aux buissons voisins, ce dont nous avons 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 Alcaidem’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 de Leone et al. (2012) 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), 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 certainement le fils du gouverneur). Le « rapport Mazagan » 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 « naturel<sup>9</sup> » 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 obligé<sup>10</sup> ; 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

---

<sup>9</sup> 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<sup>e</sup> 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.

<sup>10</sup> Il ne faut pas oublier que la publication d'un récit dans la *Gazette de Lisbonne* en 1756 est soumise à autorisation.

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.

- **D'autres documents ont été également consultés par Leone et al., (2012)** : Extraits du Journal Historique sur les Matières du Tems, Paris, 1755-1773, Extraits de l'ouvrage de Pereira de Sousa, 1919, Extraits des Actes de la Royal Society de Londres, 1757-1758... 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 1er novembre 1755 ont été diffusées en Europe, à travers les copies successives et/ou croisées (parfois entachée d'erreurs de transcription ou de traduction) (Leone et al., 2012).

## 2.5. Conclusion du 2<sup>e</sup> chapitre

Malgré les récents efforts de compilation des sources historiques, la documentation mentionnant des observations directes de tsunamis au Maroc reste relativement rare. Pourtant, les tsunamis sont un phénomène exceptionnel, leur trace écrite demeure donc extrêmement réduite, éparse et fragmentaire à travers le temps et l'espace (Scheffers et Kelletat, 2003). Il apparaît donc qu'en l'absence de données historiques fiables et d'informations suffisantes sur les événements passés, le recours à l'étude des dépôts peut s'avérer intéressant dans le sens où celle-ci permet une compréhension, une reconstitution et une connaissance des tsunamis anciens et présents, qui sont essentiels à la détermination de la période de récurrence et de la force des séismes qui les ont provoqués (Jaffe et Gelfenbaum, 2002).

## Chapitre 3<sup>e</sup> : Indices sédimentaires : Approche géomorphologique

### 3.1. Introduction

Les tsunamis sont des phénomènes de haute énergie capables, en un bref instant, de mobiliser et transporter des volumes considérables de sédiments marins et côtiers pour ensuite les déposer à l'intérieur des terres. Ces dépôts, définis sous le terme de tsunamites, constituent un enregistrement des événements historiques ou observés, ainsi que des paléo-tsunamis (Paris et al. 2011). En effet, ces dépôts possèdent des caractéristiques particulières dont l'étude permet d'obtenir des informations précieuses sur les mécanismes de transport et de dépôt au cours d'un tsunami et d'estimer l'ampleur et la récurrence des séismes tsunamigéniques.

### 3.2. Caractéristiques des dépôts de tsunami

Les dépôts de tsunamis furent alors présentés comme des sédiments d'origines diverses (dunes, plages) (Morton *et al*, 2007) variant des argiles aux blocs plurimétriques (Mhammdi *et al*. 2008), en passant par des sables fins à grossiers disposés en couches plus ou moins épaisses de l'ordre de 25 cm (Pendergast, 2006 ; Morton *et al*, 2007). Ils sont généralement riches en bioclastes (fossiles marins, coquilles, fragments de coraux, de *beachrock* concassés) (Dawson et Shi, 2000 ; Pendergast, 2006 ; Rhodes *et al*, 2006), et présentent également des fragments de sols, de plantes et de bois, témoins de la force et de l'énergie considérable du phénomène (Lavigne et Paris, 2011 ; Pendergast, 2006) (Figure 15). Ils reposent en discontinuité sur le substratum (Pendergast, 2006), présentant parfois des formes d'érosion (Lavigne et Paris, 2011). Ils présentent en général un granoclassement normal (Jaffe et Gelfenbaum, 2002 ; Prengergast, 2006 ; Shanmugam, 2006 ; Morton *et al*, 2007), plus rarement inverse (Rhodes *et al*, 2006 ; Morton *et al*, 2007) ou aucun granoclassement (Morton *et al*, 2007). Leur stratification interne présente une alternance de lits fins et grossiers (Morton *et al*, 2007) ainsi que des discordances (liées à l'arrivée et retrait des vagues) voire la présence de couche de boue intercalée (Morton *et al*, 2007) avec en général des unités inférieures plus grossières (Paris *et al*, 2009). Des figures d'imbrication parfois présentes indiquent des paléo-courants dirigés à la fois vers la terre et vers la mer, ainsi que des oscillations (Lavigne et Paris, 2011). Les sables présentent en général un mauvais tri ou un classement modéré (Dawson et Shi, 2000 ; Paris *et al*, 2004). Enfin, ils sont étendus à toutes les côtes d'accumulation affectées par le tsunami sur plusieurs centaines de mètres voire kilomètres à l'intérieur des terres (Morton *et al*, 2007); leur épaisseur et leur taille moyennes décroissent

généralement en fonction de l'altitude et de la distance par rapport à la côte (*landward* et *upward fining*) (Paris et al., 2011; Jaffe et Gelfenbaum, 2002 ; Shi et Smith, 2003 ; Dawson *et al*, 2004 ; Prendergast, 2006 ; Etienne et Paris, 2007).

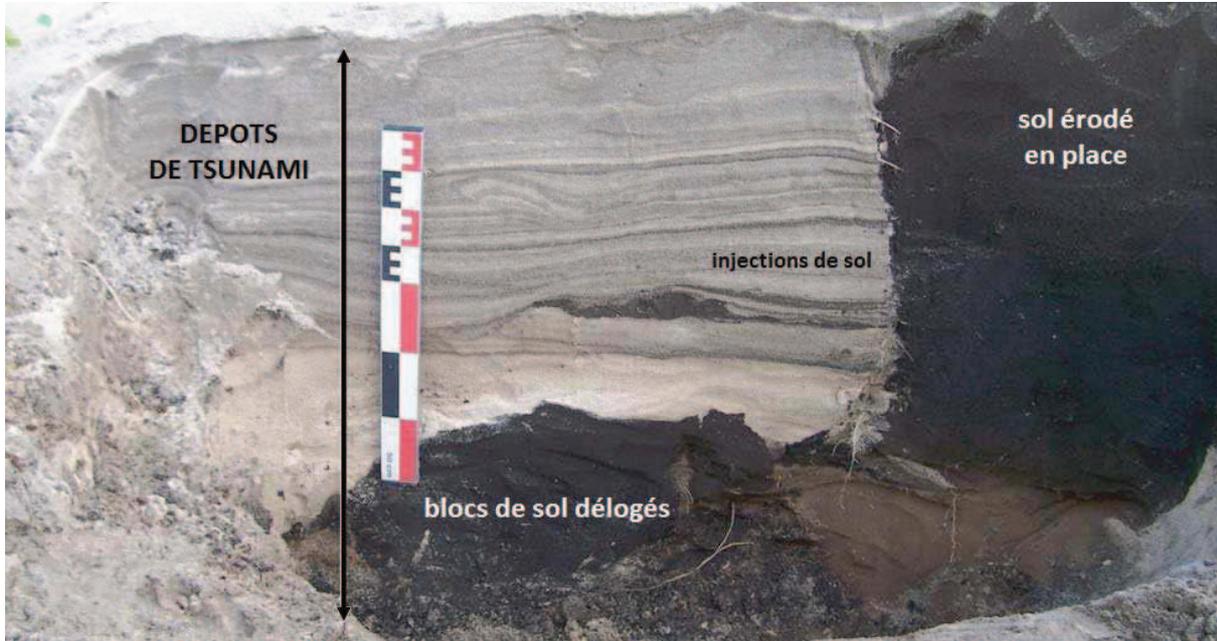


Figure 15. Dépôt de tsunami près des dunes de Lampuuk, montrant des structures effilées et des clastes décimétriques de sol. (Paris et al., 2011)

Distinguer les dépôts de tsunami des autres types de dépôts comme les tempestites par exemple, est une véritable gageure en géomorphologie littorale, notamment le long des côtes affectées par les deux types de phénomènes (Tableau 3). Cette distinction est cruciale dans les études de dépôts de tsunami car la confusion peut induire en erreur et fausser les ouvertures des travaux en termes d'analyse rétrospective du risque.

Tableau 3. Différentes caractéristiques et critères de distinction des dépôts de tempêtes et de tsunamis retrouvés dans la littérature. (Genet, 2011 d’après Kortekaas et Dawson, 2007)

<b>Critère</b>	<b>Tsunamite</b>	<b>Tempestite</b>
<b>Morphologique</b>	- Washover fan en arrière du littoral brisé.	- Idem
<b>Stratigraphique</b>	- Couches fines à l’intérieur des terres, deviennent discontinues. - Particules fines à l’intérieur des terres. - Contact érosif avec le sol. - Large extension à l’intérieur des terres.	- Couches fines à l’intérieur des terres. - Idem - Idem - Relativement moins large extension à l’intérieur des terres.
<b>Sédimentologique</b>	- Peut transporter et déposer des blocs.  - Une ou plusieurs séquences de fines au sommet du dépôt. - Dépôt parfois homogène. - Présence de clastes de sol. - Imbrication bidirectionnelle. - Tri hétérogène (peu à très mal trié).	- Accumulations de blocs : plages à blocs, cordons de blocs en haut de falaise. - Fines au sommet ou dépôt homogène.  - Absence de clastes de sol. - Imbrication unidirectionnelle. - Dépôt relativement mal trié.
<b>Géochimique</b>	- Forte présence d’éléments géochimiques d’origine marine mais aussi continentale (backwash)	- Signature surtout marine
<b>Paléontologique</b>	- Bioclastes marins - Grande diversité (origine marine et eaux saumâtres) - Fragments de plantes - Présence de charbons	- Idem - Moins grande diversité  - Charbons non mentionnés.

### **3.3. Témoignages sédimentaires de tsunamis sur le littoral atlantique marocain.**

#### **3.3.1. Les washovers du complexe lagunaire Oulidia –Sidi Moussa**

Dans certains cas, il arrive que les vagues, des tempêtes ou des tsunamis, franchissent “phénomène d’overwash” le cordon dunaire, qui protège d’habitude les littoraux, et en particulier les lagunes, des marées hautes de vives-eaux et déposent les sédiments qu’elles transportaient à l’intérieur des terres formant ainsi un «cône de débordement de tempête» ou ‘washover’, témoignage original des évènements de forte énergie (*Matias et al, 2008*).

La signature particulière qu'il représente est renforcée par le fait qu'il n'y a pas de phénomène de retour des vagues à la mer (Sedgwick et Davis, 2003). La présence des washovers dépend de la topographie locale, des conditions marines, de l'orientation des vagues par rapport à la côte et de la bathymétrie. Leur stratigraphie interne montre des couches de sables contenant des fragments de coquilles, alternant avec des couches de vase (dans le cas d'une lagune) ou de boue par exemple. Leur conservation est fonction de la distance à la mer et de la fréquence des événements à forte dynamique (Sedgwick et Davis, 2003).

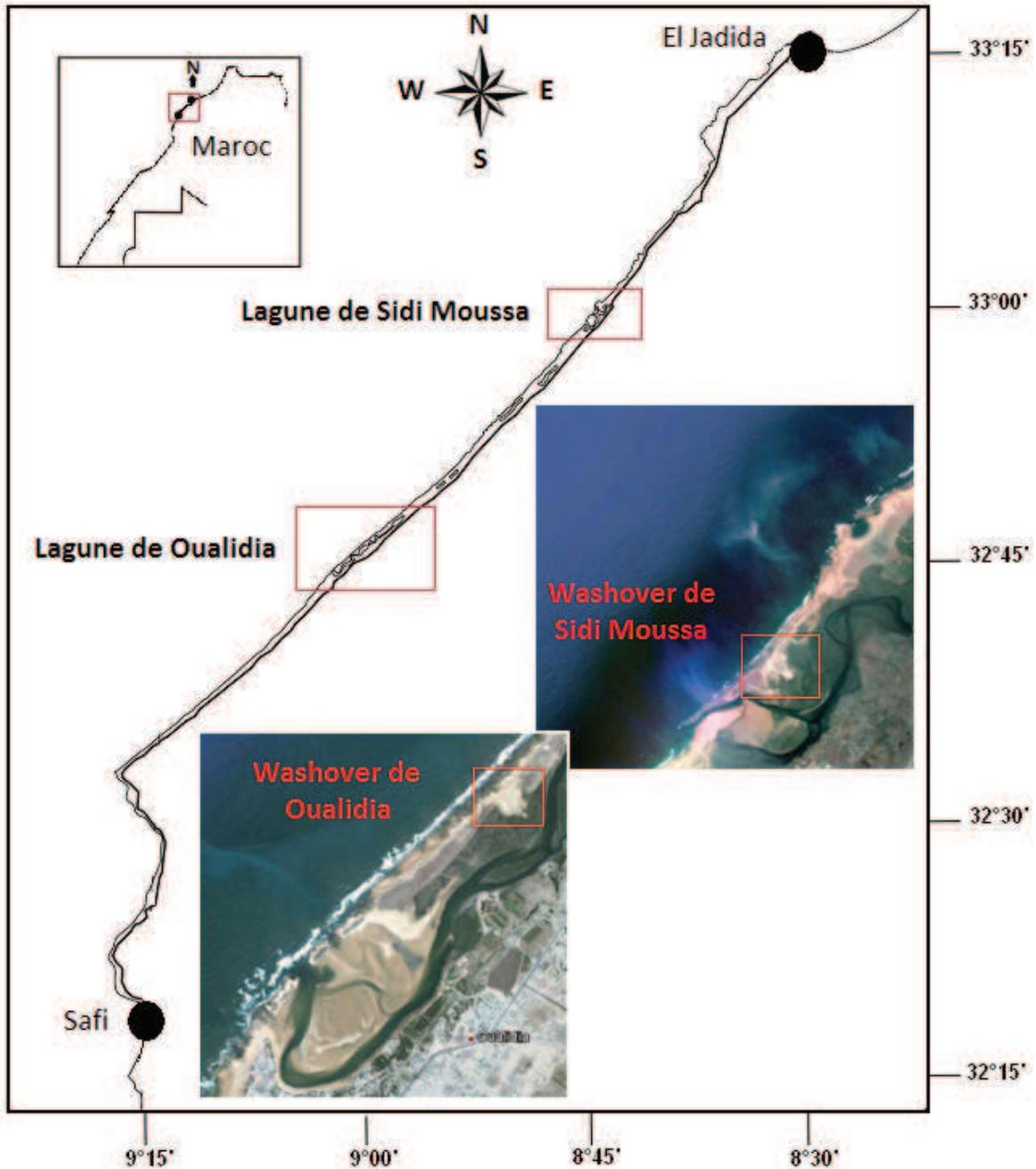


Figure 16. Localisation des washovers du complexe lagunaire Sidi Moussa - Oualidia

### 3.1.1.1. Le washover de Oualidia

Les premiers travaux sur les dépôts de tsunami ont été menés par l'équipe du Laboratoire de Géosciences Marines et Sciences du Sol d'El Jadida en collaboration avec le centre de géologie de Lisbonne. Ces travaux ont été poursuivis dans le cadre du projet MAREMOTI. Ils concernent un épandage sableux type "washover fan" déposé à environ 900 m au Nord de la passe septentrionale de la lagune de Oualidia à environ 75km au sud d'El Jadida (Figure 16). Notre objectif est de caractériser ce Washover, déterminer les mécanismes de sa mise en place et sa relation avec une tempête exceptionnelle ou un tsunami.

Il s'agit d'un dépôt très meuble composé de sables moyens à grossiers, riche en bioclastes d'environ 200 m de large pour 120 à 130 m de profondeur en direction de la lagune et parsemé par des galets de tailles différentes. Une estimation des volumes mobilisés pourraient être de l'ordre de 40.000 à 70.000 m<sup>3</sup> selon l'épaisseur du prisme sableux (épais de 1 à 2 mètres). Ce dépôt sableux, remobilisé depuis la plage, a vraisemblablement franchit l'ancien cordon dunaire.

Deux carottes (*washC1 et washC2*) et une tranchée de 2 mètres de profondeur ont été effectuées et une vingtaine d'échantillons de sédiments de surface et de la plage ont été prélevés afin de caractériser toute l'étendue du washover (Figure 17).

Les sondages ont été réalisés avec un carottier à succion de type Van der Staay jusqu'à 2m de profondeur et une tarière équipée d'une tête standard de type Edelman et des rallonges de 1m pour chacune permettant d'échantillonner jusqu'à 5 m de profondeur si besoin et possibilité.

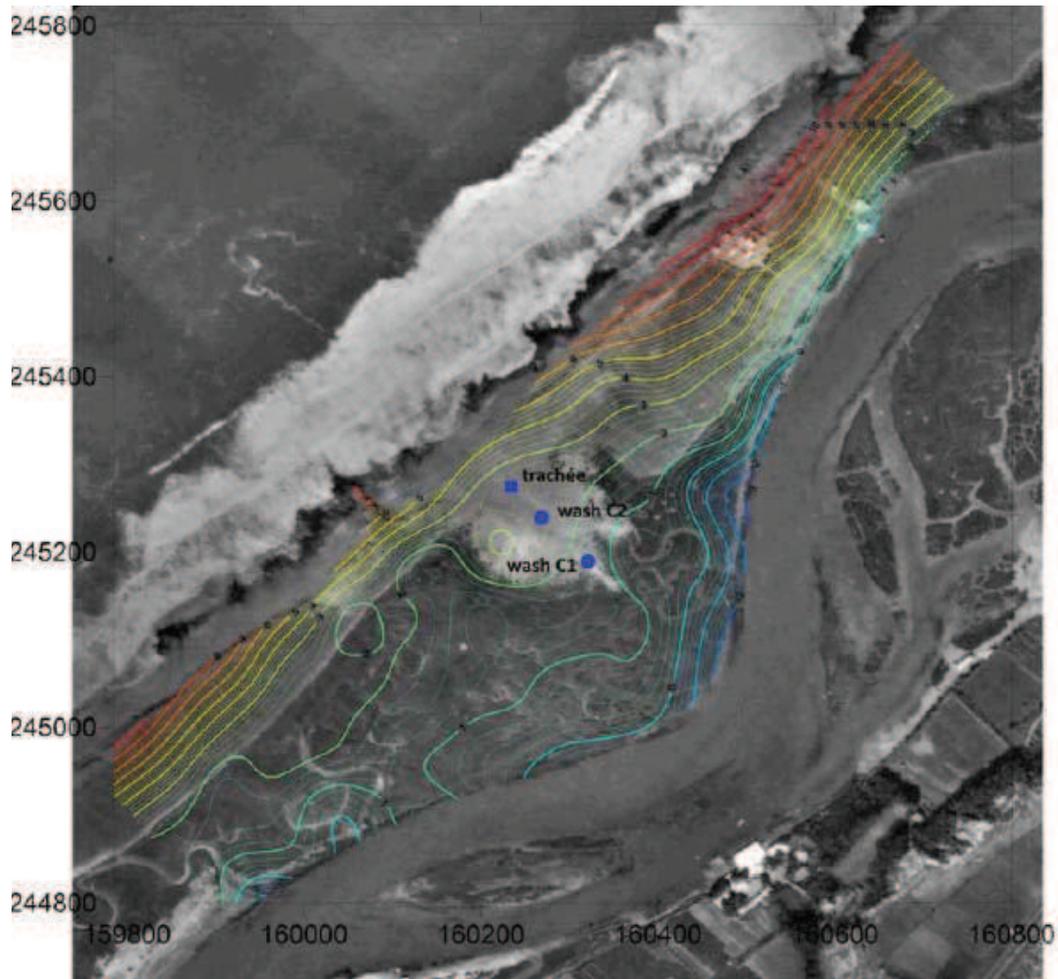


Figure 17. Localisation des carottages et de la tranchée effectuées sur le washover de Oualidia.

La carotte sédimentaire *washC1* présentée ici a été prélevée au niveau de la partie la plus distale du washover, d'une longueur de 190 cm. L'analyse sédimentologique et micropaléontologique (foraminifères) a permis de distinguer 3 unités lithostratigraphiques (Figure 18) :

L'unité inférieure **A** (89 - 190cm), Cette unité est composée de sable moyen à grossier, carbonaté ( $\text{CaCO}_3 > 80\%$ ), peu vaseux, modérément à mal trié, avec une faible teneur en matière organique (M.O.  $< 3\%$ ). Elle est dominée par les espèces marines *Cibicides lobatulus*, *Elphidium crispum* et *Beccarii ammoniac* mais moins abondamment. Ce sont des espèces robustes capables de résister à de longues distances de transport (Leorri et al, 2010).

L'unité **B** (37 - 89 cm), cette unité est subdivisée en deux sous-unités:

La sous-unité **BI** (60 - 89cm) constituée de sable vaseux à la base qui devient vase sableuse vers le sommet, (le sable est fin et bien trié). La teneur des CaCO<sub>3</sub> est inférieure à celle de l'unité A (30-60%), par contre la teneur en MO a augmenté légèrement (3-4%). Dans cette sous-unité on trouve les mêmes espèces identifiées dans l'unité A (*C. lobatulus*, *A. Beccarii*, et *E. Crispum*) avec la présence de *Haynesina Germanica*, espèce typique d'eau saumâtre.

La sous-unité **BII** (37 - 60cm) composée de vase organique (7-10% OM), avec de faibles teneurs en CaCO<sub>3</sub> (6-12%) et en sable. Elle est fortement dominée par des espèces agglutinantes, principalement *Jadammina macrescens*, bien que la présence de *C. Lobatulus* est toujours significative (Leorri et al., 2010).

L'unité supérieure **C** (0 - 37cm), Cette unité se compose de sable moyen à grossier, carbonaté (CaCO<sub>3</sub> > 85%), bien trié, sans MO. L'assemblage des foraminifères est dominé par *C. lobatulus*, *A. Beccarii* et *E. Crispum*, et moins abondamment des miliolidès (comme *subrotunda Miliolinella* et *Massilina* spp.) (Leorri et al., 2010).

La plage actuelle est constituée de sable similaire à celui de l'unité C, sable moyen, propre et bien trié avec une teneur de CaCO<sub>3</sub> supérieure à 90%. Les foraminifères présents sont *E. crispum*, *C. lobatulus* et *A. beccarii*, avec une faible abondance de *subrotunda Miliolinella*.

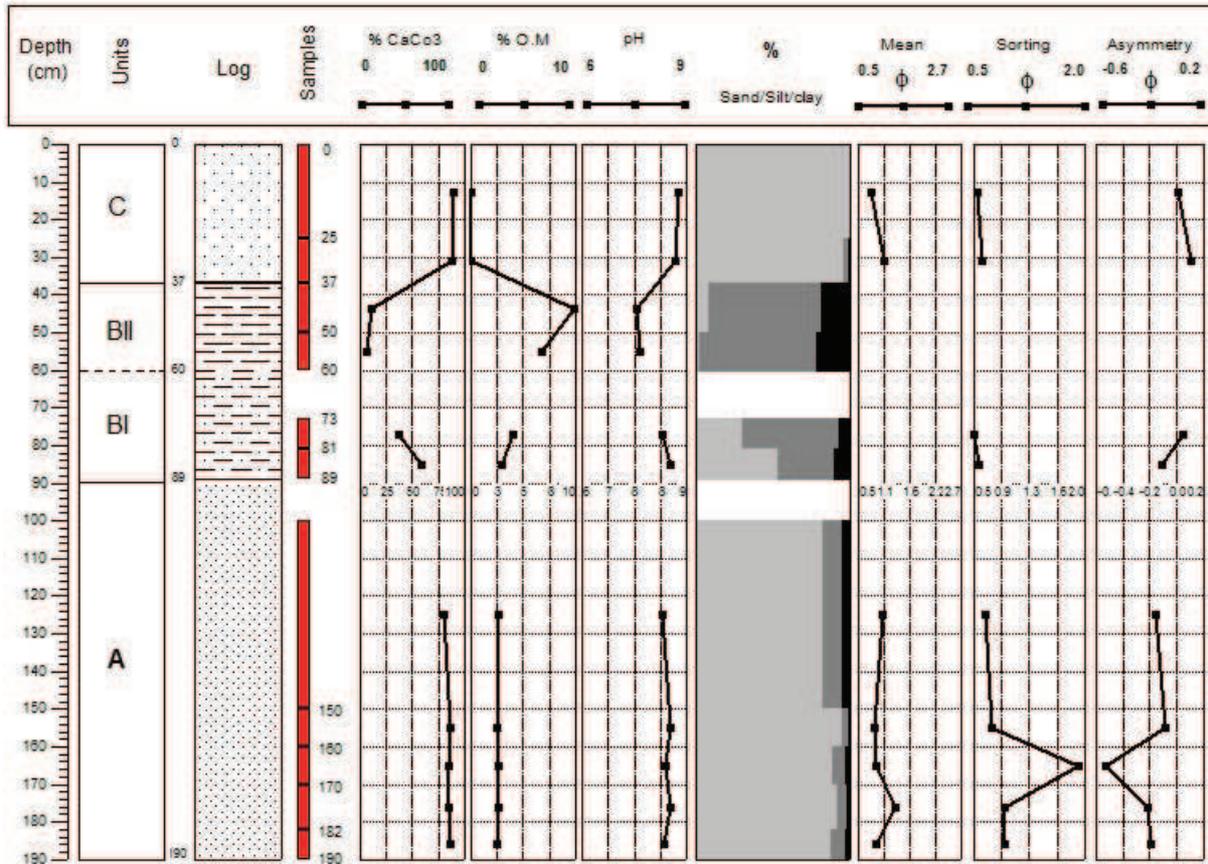


Figure 18. Variation verticale des paramètres de texture, composition et unités lithostratigraphiques de la carotte Wash C1.

Ces résultats montrent que les sédiments accumulés dans la partie ouest de la lagune de Oualidia représente le confinement et l'envasement progressifs de la lagune (Annexe 1).

La base de la carotte (unité A) témoigne d'un milieu de dépôt de forte énergie connecté à la mer ouverte, peut-être correspondant à un chenal subtidal ou à un replat sableux intertidal, sous une influence marine complète.

L'unité B indique un changement net du milieu de dépôt avec des conditions plus restrictives et moins énergétiques, ce qui peut représenter une évolution vers le développement d'un replat boueux peu profond, ce qui implique un processus d'envasement généralisé de la lagune, les sédiments d'origine continentale redistribués par les courants de marée dans un environnement confiné.

Ce dépôt de faible énergie a été brusquement interrompu par le dépôt du washover (Unité C) lors d'un événement de haute énergie.

La deuxième carotte *washC2* d'une longueur de 260 cm, a été effectuée dans la partie moyenne de la structure, elle représente une lithostratigraphie similaire à celle du *washC1*.

**La tranchée** a été creusée à l'extrémité ouest du washover, elle montre une séquence de 200 cm de sable grossier au sommet et moyen vers la base, coquillé (très coquillé entre 120 et 140 cm), avec la présence de petits galets à 80 cm et 150cm de profondeur.

L'analyse des accumulations de part et d'autre de la lagune de Oualidia a également mis en évidence l'existence de dépôt de galets de tailles variées, plaqués aux niveaux des falaises vives du cordon (Figure 19). Un grand nombre de ces galets sont sub-arrondis ou peu anguleux et témoignent d'une érosion par des houles. Une origine fluviale peut être totalement écartée, puisque notre site est totalement déconnecté de tout système de drainage. Une origine éolienne est également impossible, vu leur taille qui va jusqu'à 1 m.

Ces galets carbonatés qui ne peuvent provenir d'aucunes formations géologiques continentales et/ou littorales pourraient être issus de l'érosion des affleurements rocheux jurassico- crétacés de la plate forme adjacente (Cirac et al., 1979) et seraient mis en place lors d'un événement exceptionnel (tempête ou tsunami).



Figure 19. Photographies des dépôts de galets identifiés dans la lagune de Oualidia.

### 3.1.1.2. Le washover de Sidi-Moussa

Dans le cadre du projet MAREMOTI, nous avons réalisée une autre étude en collaboration avec l'université Paris 1, dans le cadre du Master 1 de Aurélia Knapik (2009), dans la lagune de Sidi Moussa à 33 km au sud d'El Jadida et à 36 km au Nord de la lagune de Oualidia. Cette étude a montré la présence d'un second washover fan à environ 1 km au Nord de la passe principale (Figure 16), charrié vers la terre qui serait donc passé par-dessus le cordon dunaire. Il s'agit d'un dépôt composé de sables très grossiers, coquillés, sur une longueur de 150 m derrière le cordon dunaire, et 130 m de large, ce qui ce qui représente une surface totale d'environ 15 à 18 000 m<sup>2</sup>, éloigné de la lagune et protégé de la mer par le cordon dunaire haut de 5 à 6 m en son point le plus bas. Ce washover aurait été mis en place par un processus marin à forte énergie, tempête ou tsunami. Cette hypothèse fut renforcée par la présence unique d'une vingtaine de blocs sur cet épandage sableux, de volumes importants, imbriqués, semblant eux aussi résulter d'un tsunami ou d'une tempête exceptionnelle. Afin de répondre à cette question, six carottes ont été effectuées, cinq quadrillant l'épandage de sable et la sixième se trouvant à l'extérieur (Figure 20).

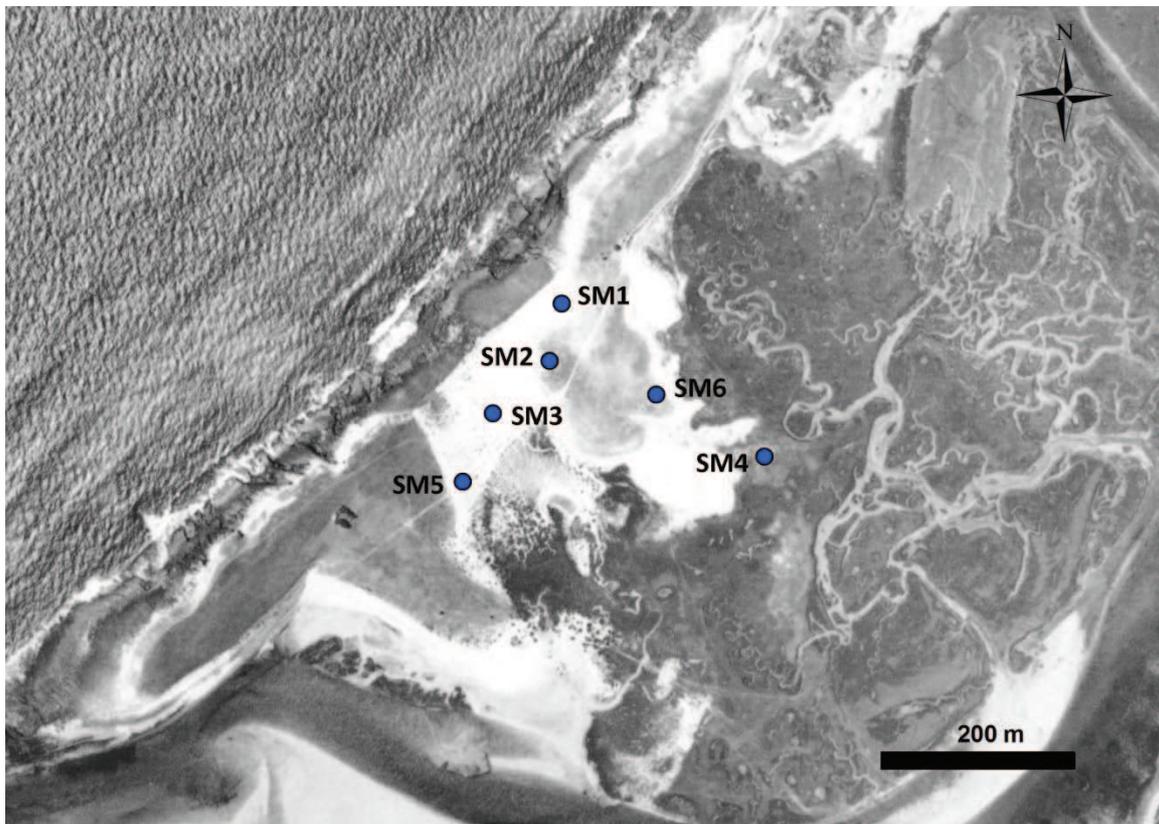


Figure 20. Localisation des carottes réalisées sur le washover de Sidi Moussa.

La carotte SM1 (longue de 115 cm) est composée, du sommet à la base, d'une unité de sables très grossiers, de 40 cm d'épaisseur, de couleur beige au sommet et plus foncée à partir de 20-30 cm. Elle contient de nombreuses coquilles et fragments de beach-rock cassés. Cette unité repose sur une couche plus importante de vase sablonneuse, de 75 cm d'épaisseur. Sa couleur est ocre -entre 40-50 cm et 95-115 cm- et devient plus grise en profondeur -entre 50-95 cm-. Ce niveau est non coquillé (sauf les 10 premiers cm).

La carotte SM2 (70 cm) est formée de deux unités de sable. Une unité supérieure, de 30 cm d'épaisseur, identique à celle de SM1 et une unité inférieure (30- 70 cm) contenant du sable moins grossier, peu coquillée, de couleur plus brune et à texture plus argileuse. Cette dernière repose sur un socle dur, ce qui fait l'originalité de cette carotte.

Les carottes SM3 (125 cm), SM5 (103 cm) et SM6 (230 cm) présentent également une première unité de sables très grossiers, très coquillée, de couleur ocre pour SM5 et beige clair à brun pour SM3 et SM6. L'épaisseur est de 10 cm pour SM3 et SM5, et de 90 cm pour SM6. Cette unité est suivie par une autre unité de sables moyens, peu ou pas coquillée, ocre pour SM5 et brune à ocre pour SM3 et SM6. Son épaisseur varie considérablement, de 15 cm pour SM3, et dépassant les 90 cm pour SM5 et 110cm pour SM6.

La carotte SM6 présente une troisième unité de sable moyen à fin, peu coquillée, de couleur ocre et de 20 cm d'épaisseur. La carotte SM3 montre une unité de vase brune à ocre non coquillée de 70 cm d'épaisseur (de 25 à 95cm). Celle-ci repose sur une dernière unité de sables moyens à fins, non coquillée, de couleur ocre.

La carotte SM4 (180 cm), prélevée en dehors de l'épandage sableux, présente une lithostratigraphie originale par rapport aux autres carottes. A son sommet, elle possède une unité de sable fin à moyen, peu ou pas coquillé, de couleur ocre à beige, épaisse de 55 cm. Elle repose sur une unité de sable grossier, très coquillée, de couleur beige-brune et mesurant 115 cm (Figure 21).

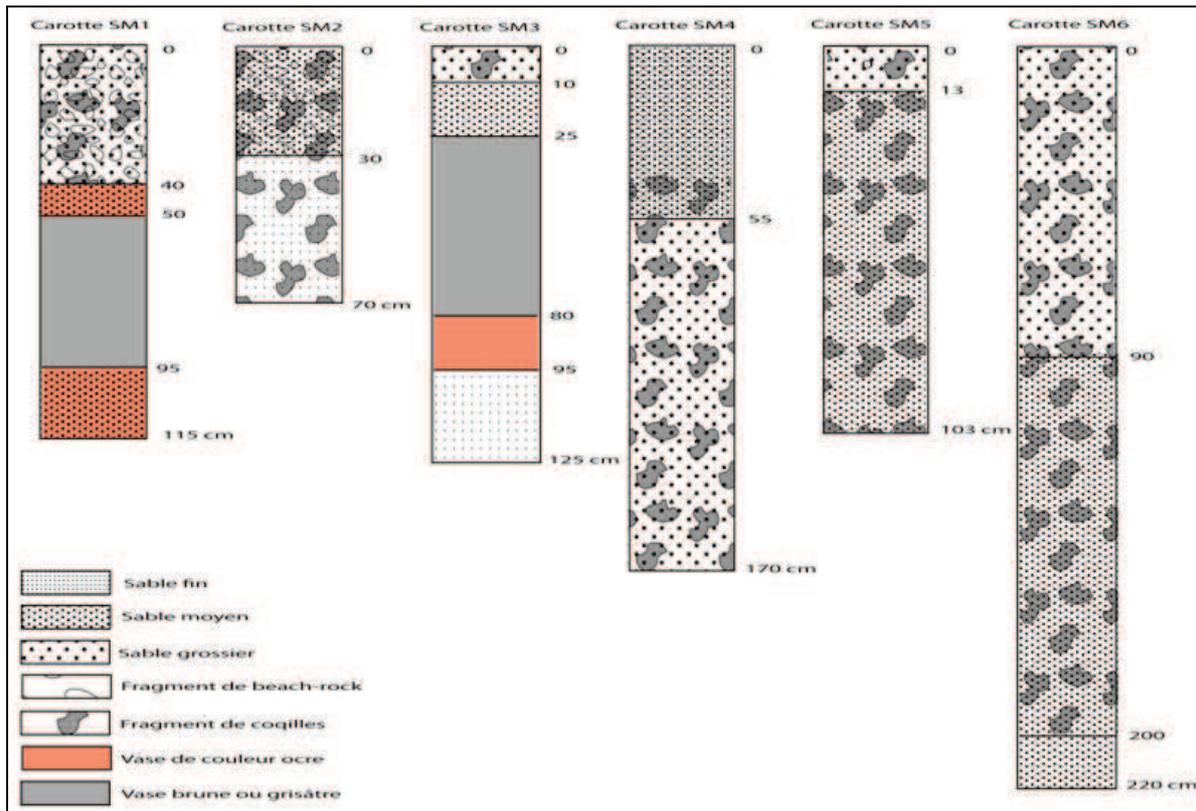


Figure 21. La lithostratigraphie des six carottes prélevées sur l'épandage sableux de la lagune de Sidi Moussa.

L'analyse sédimentologique de ces carottes a montré qu'elles sont constituées de deux à quatre unités de sables et de vase.

A leur base, une unité de vase non coquillée, de couleur ocre à grisâtre, correspondrait à un environnement lagunaire typique de slikkes.

Par la suite, un événement de forte énergie (tempête ou tsunami) aurait érodé le *beach-rock* qui était alors recouvert, comme les dunes latérales actuelles, d'une épaisse couche (2-3m) de sable fin peu ou pas coquillé. Ce dernier a alors été déposé derrière le cordon dunaire, formant ainsi un *washover*. Cette unité mesurant entre 10 et 110 cm d'épaisseur suivant les carottes, indique une succession d'au moins trois vagues : cela signifierait donc qu'une partie seulement de cette unité résulte du tsunami tandis que le reste de l'unité a été déposé par des tempêtes successives. Enfin à leur sommet, les cinq carottes de l'épandage ont prouvé qu'il s'agissait bien d'un dépôt typique de *washover* : la présence de l'unité supérieure, épaisse de 10 à 40 cm, composée de sables très grossiers et très coquillée, certainement originaire du proche plateau continental, a été plus simple à interpréter. Les analyses granulométriques ont également révélé une succession de deux ou trois vagues marquées par une surimposition de couches d'une dizaine de cm d'épaisseur marquant une alternance de lits fins et grossiers.

Leur distribution platykurtiques et leur granoclassement normal dans une couche organisée suivant un granoclassement inverse ont laissé penser qu'il s'agissait d'un dépôt de tsunami. Mais, ce dernier, affleurant à la surface, et présentant une couche aussi épaisse, semblait alors plutôt correspondre quant à lui à un dépôt de tempête. Sa mise en place aurait été favorisée par l'érosion préalable du *beach-rock* après le tsunami.

L'épandage sableux de Sidi Moussa était original dans la mesure où il présentait également des blocs parsemés sur le sable. Cette présence de blocs est originale et unique à cet épandage puisque sur toute la lagune de Sidi Moussa, aucun autre dépôt de ce type n'a été observé. On comptabilise un total de vingt blocs répartis inégalement sur l'ensemble de l'épandage sableux (Figure 22): une quinzaine d'entre eux, isolés ou en amas, sont localisés entre 0 et 20 mètres à l'arrière du *beach-rock* tandis que les cinq autres sont isolés entre 25 et 150 m à l'arrière du cordon dunaire. La plupart présentent une forme allongée de type parallélépipède, dont l'axe principal (axe A), mesurant entre 0,65 et 3,5 mètres, est orienté parallèlement au rivage, suivant une orientation NE/SO. De plus, des formes d'imbrication O/E ont été observées sur de nombreux blocs. Leur volume est important, compris entre 0,23 et 9,0 m<sup>3</sup>, tandis que leur masse est impressionnante, atteignant les 23 tonnes pour le plus important.



Figure 22. Exemples de blocs identifiés dans la lagune de Sidi Moussa

Ces blocs sont probablement issus du *beach-rock* affleurant. Ne pouvant résulter de l'action de la gravité du fait de la faible hauteur du cordon dunaire (5 à 6 mètres par rapport au niveau de la mer, mais 1 à 2 mètres par rapport à l'épandage sableux), seule l'action marine peut expliquer leur présence.

Se pose alors la question des processus de transports et de dépôts aptes à provoquer ce type de dépôt : considérant l'importance de la taille de ces blocs, de plusieurs mètres de long, seul un événement à forte énergie telle qu'une tempête ou un tsunami semble en être à l'origine de leur mise en place.

### **3.3.2. Les dépôts de la région Tanger – Assilah**

La campagne de recherche de dépôts sédimentaires consécutifs à des tsunamis que nous avons réalisé en collaboration avec l'université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand (Master 1 de Paul-Edgard Genet en 2011), dans le cadre du projet MAREMOTI, a mis en évidence d'autres sites propices à la conservation et l'enregistrement des dépôts de tsunamis, notamment sur le littoral nord atlantique marocain entre Tanger à Assilah (Figure 23).

Cette zone est susceptible d'avoir été gravement touché par le tsunami de 1755 étant situé au plus près de l'épicentre du séisme (200km à 400km en fonction des emplacements proposés) et en face de la côte d'Algarve où des études ont montré que les dépôts de cet événement sont enregistrés dans les séquences sédimentaires (Genet, 2011 et Cunha et al, 2009).

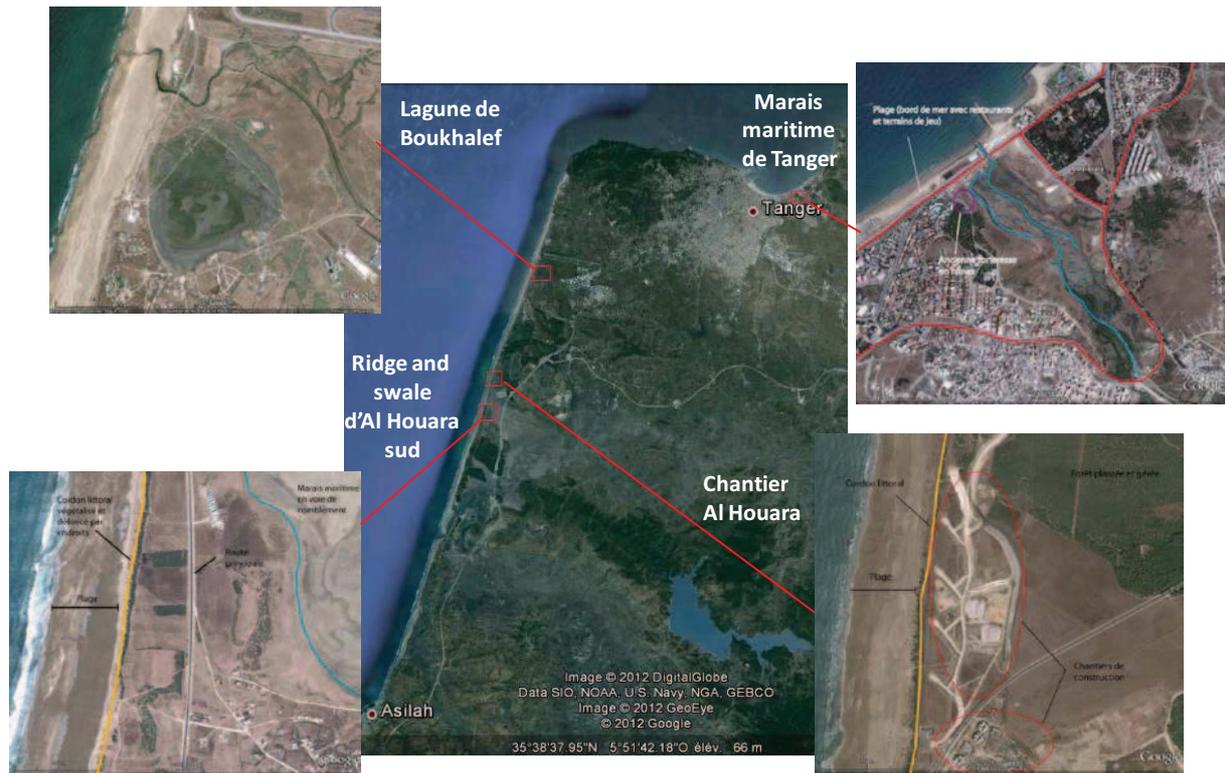


Figure 23. Localisation des sites de sondage entre Tanger et Assilah (images Google Earth)

La prospection sur la lagune de Boukhalef et le ridge and swale d'Al Houara n'a pas mis à jour de dépôts remarquables. Cependant, au niveau du chantier Al Houara et le marais maritime de Tanger des niveaux sableux ont attiré notre attention.

### 3.3.2.1. Le chantier Al Houara

Le dépôt du chantier Al Houara est un niveau sableux intercalé dans une coupe mise à jour par les travaux du chantier.

Dans la coupe de la figure 24, on retrouve le remblai sur une épaisseur d'environ 50 cm, puis le niveau sableux sur une épaisseur de 20cm (entre -50 cm et -70 cm), intercalé entre le remblai et le sol argileux noirâtre avec lequel il a un contact discordant et érosif par endroits (couleur plus noire). Le sol recouvre quant à lui un niveau à galets.

Les caractéristiques de ce dépôt sont similaires à celles de nombreuses tsunamites. La signature marine attestée par la présence de fragments de coquilles dans le dépôt, les passées argileuses et la structure laminée sont aussi des marqueurs significatifs, au même titre que les clastes de sol retrouvés dans ce niveau sableux (Genet, 2011).

Les analyses granulométriques ont mis en évidence une moyenne à mauvaise qualité de tri des différents faciès du dépôt, qui est le reflet d'un transport court suivi d'un dépôt rapide, ce qui permet d'émettre l'hypothèse du dépôt de ces sédiments par un agent de forte énergie avec des variations d'intensité, ce qui n'écarte pas la possibilité des vagues de tsunami. La distribution des grains du dépôt du chantier Al Houara va des sables fins à grossiers selon les faciès (Figure 25), qui composent en majorité les dépôts de tsunami sableux (Genet, 2011).

L'observation morphoscopique des échantillons montre que le dépôt est constitué d'un mélange de sables de dune et de sables de plage, par la proportion d'éléments plutôt arrondis et mat (caractéristiques de la dune, avec une signature éolienne) et d'éléments émoussés-luisants (caractéristiques de la plage) avec des apports extérieurs (remaniement possible de sédiments marins ou côtiers). De plus, l'observation morphoscopique a permis d'identifier des bioclastes marins tels que des gastéropodes, fragments de bivalves et algues encroûtantes (*Coralline algae*) présents dans le dépôt et qui attestent de sa signature marine (Genet, 2011).



Figure 24. Le dépôt du chantier Al Houara dans son contexte (Genet, 2011)



Figure 25. Les différents faciès du dépôt du chantier Al Houara (Genet, 2011).

Bien qu'un certain nombre de caractéristiques remarquables du dépôt du chantier Al Houara nous permettent d'argumenter en faveur de son origine tsunamigénique, certaines limites se posent à cette identification. Premièrement, le niveau sableux n'a été retrouvé que dans une seule coupe sur l'ensemble du chantier, ce qui pose la question de son absence sur les autres coupes situées à quelques dizaines de mètres et de même orientation. La partie supérieure du dépôt a-t-elle été remaniée lors des travaux d'aménagement du chantier ? Une prospection plus approfondie semble indispensable à une étude plus complète de ce dépôt (Genet, 2011).

### 3.3.2.2. Les dépôts du marais maritime de Tanger

Situé à l'intérieur même de Tanger, à l'extrémité est du noyau urbain, ce marais maritime est une vaste surface plane entre deux versants urbanisés, au débouché d'un oued dont les sédiments grossiers sont captés par un piège à sédiment (Figure 26). Il est traversé par plusieurs chenaux et couvert d'une végétation éparse. Ce site a pour avantage de se prolonger suffisamment à l'intérieur des terres pour offrir des possibilités de sondage sur un long transect, ainsi que d'être situé au cœur de la ville (Genet, 2011).



Figure 26. Localisation des points de sondage sur le site marais maritime de Tanger (Image Google Earth) (Genet, 2011)

La stratigraphie du marais maritime montre un niveau argilo-sableux brun à fine stratification verticale caractérisée par une structure en feuillets alternant éléments fins et plus grossiers, indiquant des changements de la dynamique fluviale des chenaux de marée qui parcourent le site. Ce niveau argilo-sableux brun recouvre un niveau plus fin d'argiles et limons de couleur grise, sans variations notables (Figure 27) (Genet, 2011).

Les sondages TA3 (1m de niveau argilo-sableux brun) et TA5 (1m75 du même niveau argilo-sableux brun) n'ont pas donné de résultats intéressants. Les niveaux sableux mis à jour sont parfois intercalés dans les couches stratigraphiques et se retrouvent à plusieurs occurrences sur des épaisseurs de 5cm (TA2-60 et TA2 -80) et de 20cm (TA2 -200 à -220), ou sur une plus grande épaisseur à la base des carottes (TA1 et TA4) (Genet, 2011).

Les niveaux sableux retrouvés sur les carottages TA1 (TA1-150cm), TA4 (-195 à -250cm) et TA2 (TA2 -200 à -220cm) sont susceptibles de correspondre au même dépôt, en raison des variations de la topographie et des vitesses de sédimentation dans le marais maritime. Les deux niveaux sableux retrouvés entre -60 et -65cm et entre -80 et -85cm sur le carottage TA2 ne sont pas retrouvés sur les carottages effectués plus proche de la ligne de rivage, et correspondraient à des événements plus récents et de plus faible ampleur (Genet, 2011).



Figure 27. Découverte de dépôt dans un carottage à la tarière dans le site marais maritime de Tanger (Genet, 2011).

Les analyses granulométriques des échantillons correspondant au dépôt retrouvé sur TA1 et TA4 ont mis en évidence une augmentation de la qualité de tri des éléments avec la profondeur pour le dépôt TA4, ainsi qu'un granoclassement inverse (augmentation de la proportion de particules fines avec la profondeur). Ce granoclassement inverse, également retrouvé sur les échantillons TA2 (pour le dépôt situé entre -200 et -220cm) indique une forte turbulence de l'agent de transport de ces sédiments. Ce n'est pas une caractéristique systématique des dépôts de tsunamis, qui sont généralement caractérisés par une tendance au *fining upward*. Cependant, en raison de la situation du marais maritime, encadré par deux versants, il est possible que les vagues de tsunamis ait été canalisées et auraient déposé ces éléments avec une turbulence exacerbée par le contexte topographique. De même, on peut également émettre l'hypothèse d'une crue importante des chenaux de marée qui parcourent le site, les crues étant également caractérisées par la turbulence qui se traduit dans ce granoclassement inverse (Genet, 2011).

Cependant, les observations morphoscopiques écartent cette hypothèse, les échantillons analysés sur ce site ayant tous une signature marine attestée par le pourcentage d'émoussés luisants et la présence de nombreux bioclastes et marqueurs (charbons, fragments de bois). Si l'on considère que les niveaux sableux retrouvés le plus en profondeur sur les trois carottages TA1, TA2, et TA4 correspondent au même dépôt, les bioclastes marins retrouvés (gastéropodes, bivalves) et les marqueurs présents (fragments de bois et charbons), constituent des arguments solides pour son identification en tant que tsunamite (Genet, 2011).

Si l'on accepte les valeurs de 15m de run-up et d'inondation des terres sur plus de 2km proposées par les sources historiques (Kaabouben et al, 2009) pour la ville de Tanger lors du tsunami de 1755, le dépôt le plus épais qui est retrouvé sur les carottes TA1, TA2 et TA4 pourrait être lié à cet événement. Les sondages TA3 et TA5 s'étant avérés difficiles à partir d'une certaine profondeur avec les moyens de sondages dont nous disposons, il est impossible d'affirmer la présence ou l'absence de ce dépôt plus loin à l'intérieur des terres (Genet, 2011).

En ce qui concerne les deux niveaux sableux retrouvés sur la carotte TA2 entre -60 et -65cm et entre -80 et -85cm, ils pourraient être liés aux événements plus récents et de plus faible intensité survenus en 1969 (séisme de magnitude  $M_w=7.9$ ) et en 1975 (séisme de magnitude  $M_w=7.9$ ) qui n'auraient inondé qu'une partie du marais maritime (au niveau de TA2), ce qui expliquerait leur absence des autres carottages. Ils pourraient également avoir été déposés par des ondes de tempêtes exceptionnelles, les analyses granulométriques et morphoscopiques n'ayant pas écarté cette hypothèse. Ils comportent également une signature marine attestée par le mélange d'éléments marins et d'apports extérieurs et la présence de bioclastes (gastéropodes et bivalves). Ces deux dépôts sont donc possiblement des tsunamites liées à des événements récents de faible intensité (les tsunamis de 1969 et 1975) ou des tempestites, étant donné leur faible extension sur le site, leur épaisseur, et leur absence des autres carottages (Genet, 2011).

### **3.3.3. Les blocs de la région de Rabat (Mhammdi et al.2008)**

Suite à l'évènement de 2004, une première recherche a été organisée à Rabat en 2007 (Figure 28). En effet, dès 1957, Gigout avait localisé, sur les 40 km de plages rocheuses et sableuses qui s'étendent du Sud-ouest de Rabat jusqu'à la plage de Skhirat, des dizaines de blocs qu'il avait attribués à des tempêtes (Mhammdi et al.2008).

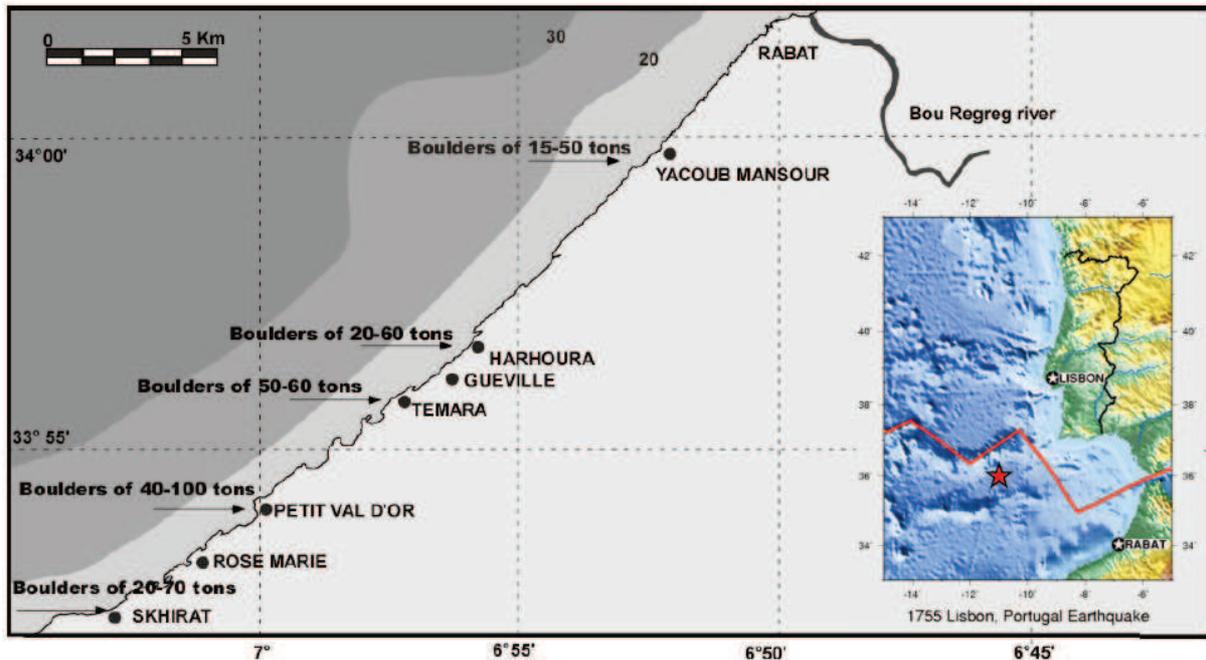


Figure 28. Carte présentant les différents sites d'étude des blocs supposés liés au tsunami de 1755 dans la région de Rabat (Mhammdi *et al*, 2008)

Ces derniers présentent des masses et des volumes très variables mais aussi très importants suivant les différents sites étudiés : ne faisant que quelques tonnes sur les plages de sables fins, ils dépassent la centaine de tonnes à proximité des falaises dont ils sont originaires. Les distances à la côte les plus grandes observées sont de l'ordre de 300 m. Ces blocs semblent provenir des falaises mortes situées le long de la côte (Mhammdi *et al*, 2008). Les axes les plus longs mesurent 8,2 m. Tandis que certains blocs sont petits et en tas (Harhoura), d'autres sont imbriqués (train d'imbrication à Témara et Harhoura) voire retournés comme au Petit val d'or. Les imbrications montrent que le transport s'est fait perpendiculairement au trait de côte, présentant un sens du courant orienté SE/NO (Figure 29). Une datation absolue des vermines retrouvées sur les blocs attestent d'un évènement récent, violent et à très forte énergie, compris entre 100 et 400 ans BP. Ainsi, les premiers éléments, même très qualitatifs, montrent qu'une tempête ne peut être à l'origine de ces dépôts, semblant tous provenir d'un même évènement. Afin d'en être certain, des forces d'arrachement et de transport ont été calculés par Mhammdi *et al* (2008): ils démontrent eux aussi que seul un tsunami tel que celui de 1755 est capable de les avoir transportés et déposés.



Figure 29. Exemples de blocs rencontrés sur le littoral au Sud de Rabat (Mhammdi et al, 2008).

### 3.4. Traces sédimentaires du tsunami de 1755 sur les côtes européennes

Depuis les années 1990, plusieurs études de dépôts de tsunami ont été menées dans certaines régions européennes. Les dépôts les mieux préservés et les plus importants ont été identifiés à Boca do Rio, près de l'Algarve, au sud du Portugal (Hindson et Andrade, 1999) (Figure 30). En effet, près de l'embouchure du fleuve, des dépôts sédimentaires, constitués de sables fins coquillés et de sables plus grossiers ont été retrouvés jusqu'à 1 km à l'intérieur des terres (Hindson et al, 1996). Cette couche, épaisse de 45 cm, est intercalée entre des couches de boue et d'argile, dont les bases sont érodées. Les carottes effectuées présentent un granoclassement normal, avec des sédiments plus grossiers au niveau de la base et un classement vertical et horizontal net, marquant les variations rapides des flux hydrodynamiques. Les changements dans la texture des sédiments sont le témoignage des changements de direction (réflexion et backwash). L'étude des sables semble montrer qu'ils proviennent de la barrière marine (avant-dune) : les chercheurs ont alors conclu à un dépôt de

tsunami, marquant un changement rapide et brutal dans le processus de sédimentation observée dans les couches inférieures (vase) (Hindson et Andrade, 1999). Une datation par thermoluminescence a permis de valider cette hypothèse : dès lors, ces dépôts seraient le résultat du tsunami de 1755.



Figure 30. Exemples de dépôts découverts à Rio Formosa au Sud du Portugal près du Tage (Source : Hindson et Andrade, 1999)

Un épandage sableux, trouvé derrière le cordon dunaire de la lagune étudiée près de Rio Formosa, montre également qu'un événement de forte amplitude et à forte énergie a été capable de transporter de grandes quantités de sables au-delà du cordon dunaire (Andrade, 1992 ; Dabrio et al, 1998), sur près de 200 m. Ce washover est constitué de sables fins à grossiers présentant de nombreuses coquilles. L'observation de cartes topographiques réalisées en 1700 montre que ce washover n'existait pas à cette époque : suite à la datation absolue, les chercheurs conclurent à un tsunamite déposé lors de l'évènement de 1755.

Des washovers similaires ont été retrouvés près de Valdelagrana, dans le sud de l'Espagne. Ils mesurent 350 à 400 m de long sur 200 à 300 m de large, et sont composés de sables fins, disposés en plusieurs couches dont l'épaisseur totale varie entre 50 et 60 cm.

Présents sur une distance trop grande pour avoir été déposés par une tempête (de 1,5 m de hauteur dans cette région en moyenne), leur datation absolue a permis de montrer qu'ils provenaient sans doute du tsunami de 1755.

En Espagne, Whelan et Kelletat (2005) se sont récemment intéressés à la présence de nombreux blocs observés au niveau du Cap de Trafalgar (Figure 31). Ces derniers, longs de

plus d'un mètre, présentent un axe principal parallèle au rivage. Possédant des volumes importants (plusieurs dizaines de m<sup>3</sup>), ils présentent également des figures d'imbrication, dont 70% sont perpendiculaires à la direction du transport. D'autre part, la présence de barnacles et vermines à leur surface invite à penser que ces derniers ne sont pas récents. La comparaison avec leur environnement montre qu'ils ont été déposés par un même évènement marin à forte énergie, sur près de 200 m. Leur datation absolue a alors montré qu'ils résultaient probablement du tsunami de 1755, les vagues ayant atteint des hauteurs comprises entre 10 et 19 m (Whelan et Kelletat, 2005).



Figure 31. Exemple de blocs imbriqués de 1 à 10 tonnes au sud de Trafalgar en Espagne.  
(Source : Whelan et Kelletat, 2005)

Des dépôts de ce tsunami auraient même été découverts et étudiés aux îles Scilly, au Sud de l'Angleterre (Banerjee et al, 2001), témoignant de l'étendue et de la force de l'évènement. Les carottages réalisés montrent l'existence d'une couche de sable marin fin, d'une épaisseur de 70 cm, intercalée entre deux couches de vase. Sa datation absolue révèle qu'il s'agirait d'un dépôt du tsunami de 1755.

### 3.5. Conclusion du 3<sup>e</sup> chapitre

Si l'évènement de 1755 est l'un des plus importants de l'histoire sismique européenne et de loin le plus destructeur qui ait touché les côtes marocaines, il existe un nombre conséquent de travaux sur des dépôts retrouvés en Espagne (Luque et al, 2001; Whelan et Kelletat, 2005 ;

Morales et al, 2008 ; Ruiz et al, 2005), et au Portugal (Abrantes et al, 2008 ; Cuhna et al, 2009 ; Hindson et al, 1996 ; Scheffers et Kelletat, 2005). Pourtant, en ce qui concerne le Maroc, très peu d'études ont été réalisées à l'heure actuelle (Mellas, 2007 ; Knapek, 2009, Genet, 2011 et Mhammdi et al., 2008). Aucun dépôt de tsunami, identique à 1755, n'a pu clairement être identifié. La datation C-14 d'un dépôt sableux intercalé entre les vases, sur la rive sud de la lagune de Oualidia, donne un âge  $2275 \pm 35$  BP. Ce qui est compatible avec le tsunami d'âge « Romain » (216-218 BC) signalé par Luque et al. (2002) et Silva et al. (2005), qui était donc probablement d'échelle régionale comme celui de 1755 (Paris, Projet Marémoti).

L'absence de dépôts n'est certes pas une preuve d'absence, mais quand elle se répète sur des sites pourtant très favorables mais protégés par un cordon dunaire de plus de 3m de haut, elle prône en faveur d'une révision à la baisse des hauteurs de vagues sur les côtes sud marocaines (Paris, Projet Marémoti).

## **Chapitre 4<sup>e</sup> : Modélisation numérique d'un tsunami de référence : Le tsunami de 1755**

### **4.1.Introduction**

La modélisation est la représentation d'un système par un autre, plus facile à appréhender. Il peut s'agir d'un système physique ou mathématique. Le modèle sera alors analogique ou numérique.

La modélisation analogique consiste à construire un système physique qui reproduit plus ou moins un phénomène que l'on souhaite étudier. L'observation du comportement du modèle permet de tirer des enseignements sur le phénomène d'intérêt.

La modélisation numérique, développée depuis les années 1960, consiste à construire un ensemble de fonctions mathématiques décrivant le phénomène. Elle repose sur la programmation de modèles théoriques ou mathématiques (intégration des équations du mouvement, d'équations différentielles, etc...) qui sont adaptés aux moyens numériques. En modifiant les variables de départ, on peut ainsi prédire les modifications du système physique. Dans le cas des études de tsunamis, la modélisation numérique permet d'évaluer simplement l'aléa et de proposer, sur la base d'analyses sismotectoniques, des scénarios crédibles dans des zones où les données historiques sont incomplètes (Hébert et al., 2011).

La modélisation de tsunami consiste à reproduire des événements passés selon une approche déterministe ou en imaginer de nouveaux. Elle comprend trois phases distinctes : 1) la génération du tsunami, 2) la propagation au large et 3) l'interaction des ondes avec le plateau continental et l'inondation de la côte (Roger, 2011).

## 4.2. Méthode de simulation

La méthode de modélisation numérique des tsunamis utilisée dans cette étude a été réalisée par R. Omira et M-A. Baptista de la FFCUL (Foundation of the Faculty of Sciences of the University of Lisbon) partenaires du programme MAREMOTI.

### 4.2.1. Le choix d'un scénario d'aléa

La méthode est basée sur une approche déterministe (par la reproduction d'un événement passé). Dans ce contexte, un scénario d'aléa identique à celui du 1er novembre 1755 a été choisi pour modéliser le tsunami. La source exacte du séisme demeure encore à ce jour incertaine. Quatre zones sources impliquant 5 failles potentiellement tsunamigènes sont généralement évoquées dans la littérature pour cet événement majeur (Figure 32) :

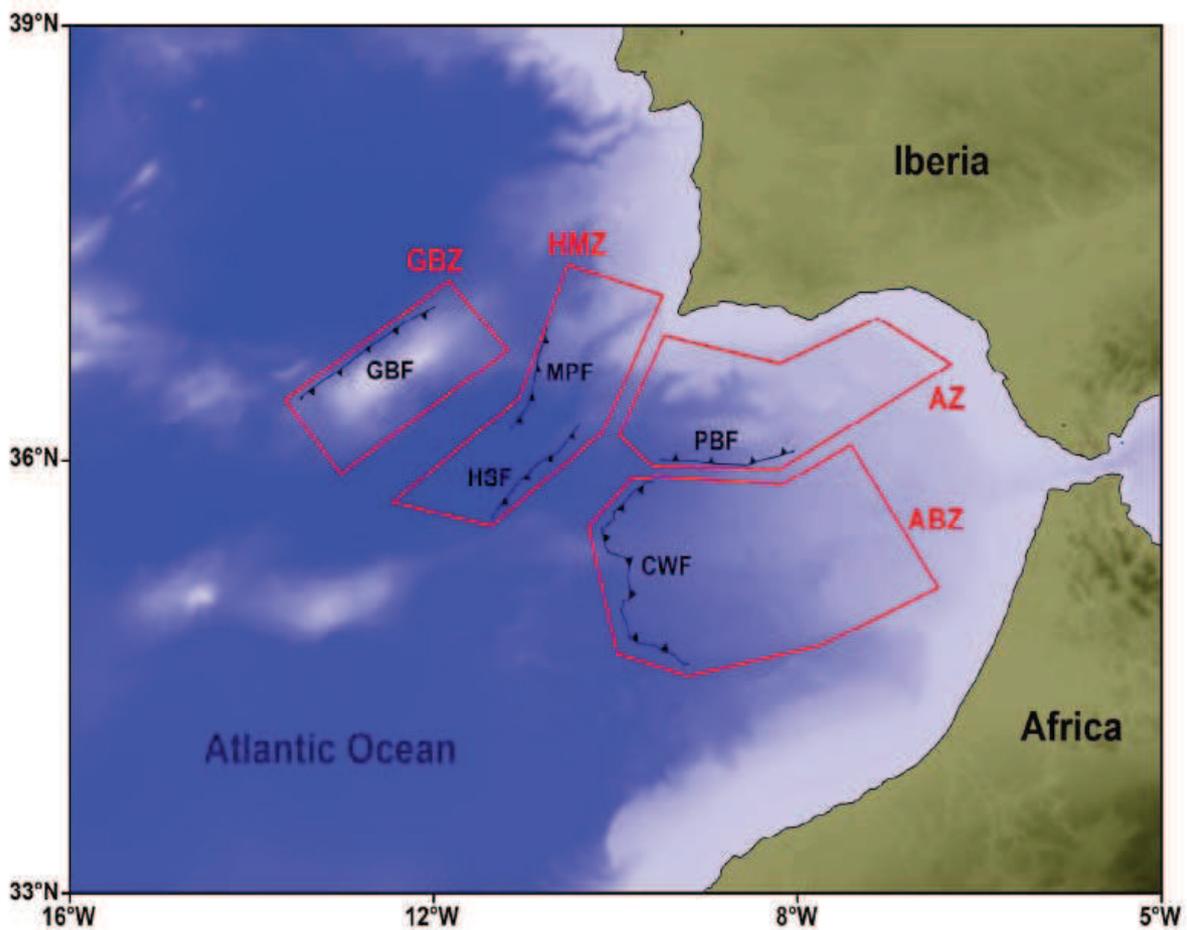


Figure 32. Zones potentielles de sources tsunamigènes avec leurs failles associées dans le Golfe de Cadiz (Omira, 2009)

Les polygones rouges représentent les quatre régions sources : GBZ: Goringe bank zone; HMZ: Horseshoe/Marques de Pombal zone; AZ: South Algarve zone and ABZ: Alboran wedge Slab zone. Les lignes noires représentent les cinq failles associées à chaque zone : GBF: Goring Bank fault; MPF: Marques de Pombal fault, HSF: Horseshoe fault, PBF: Portimao Bank fault and CWF: Cadiz Wedge fault.

A partir de ce zonage, Omira et al. (2009) ont modélisé les tsunamis générés par chacune de ces sources. La figure 34, qui représente les résultats de cette modélisation, montre que la source HSF (*Horseshoes Fault*), proposée par Gracia et al. (2003), est celui qui impacte le plus durement les côtes atlantiques marocaines, elle génère le tsunami le plus énergétique et c'est cette source qui a été retenue pour notre simulation. Ses paramètres sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 4. Paramètres de la faille retenue pour modéliser le tsunami du 1<sup>er</sup> Novembre 1755

Nom du Scenario	L (km)	l (km)	Coordonnées de l'épicentre		D (km)	Slip (m)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	$\mu$ (Pa)	Mw
			Long.	Lat.							
HSF (Gracia et al., 2003)	165	70	-9.890	36.574	4.0	12.0	42.1	35	90	$4.5 \cdot 10^{10}$	8.5

**L** : longueur de la faille, **l** : largeur de la faille, **Long.** : Longitude de l'épicentre, **Lat.** : Latitude de l'épicentre, **D** : Profondeur de l'eau à l'aplomb de la faille (km), **Slip** : rejet, **Strike** Direction du plan de faille, **Dip** : Plongement, **Rake** : pendage,  $\mu$  Module de cisaillement, **Mw** : magnitude.

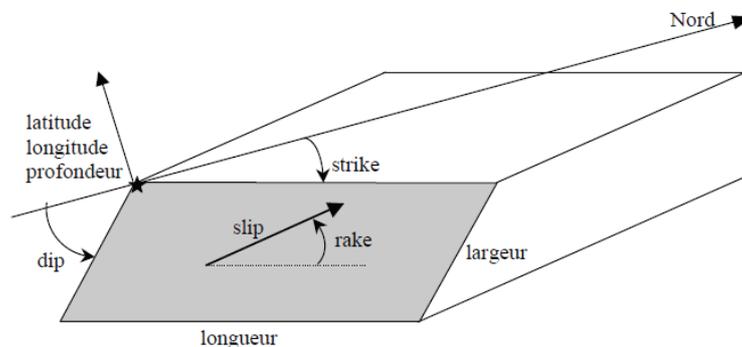


Figure 33. Définition des paramètres de faille. L'étoile représente l'origine du repère d'Okada, donné en latitude, longitude et profondeur (Piatanesi, 1999).

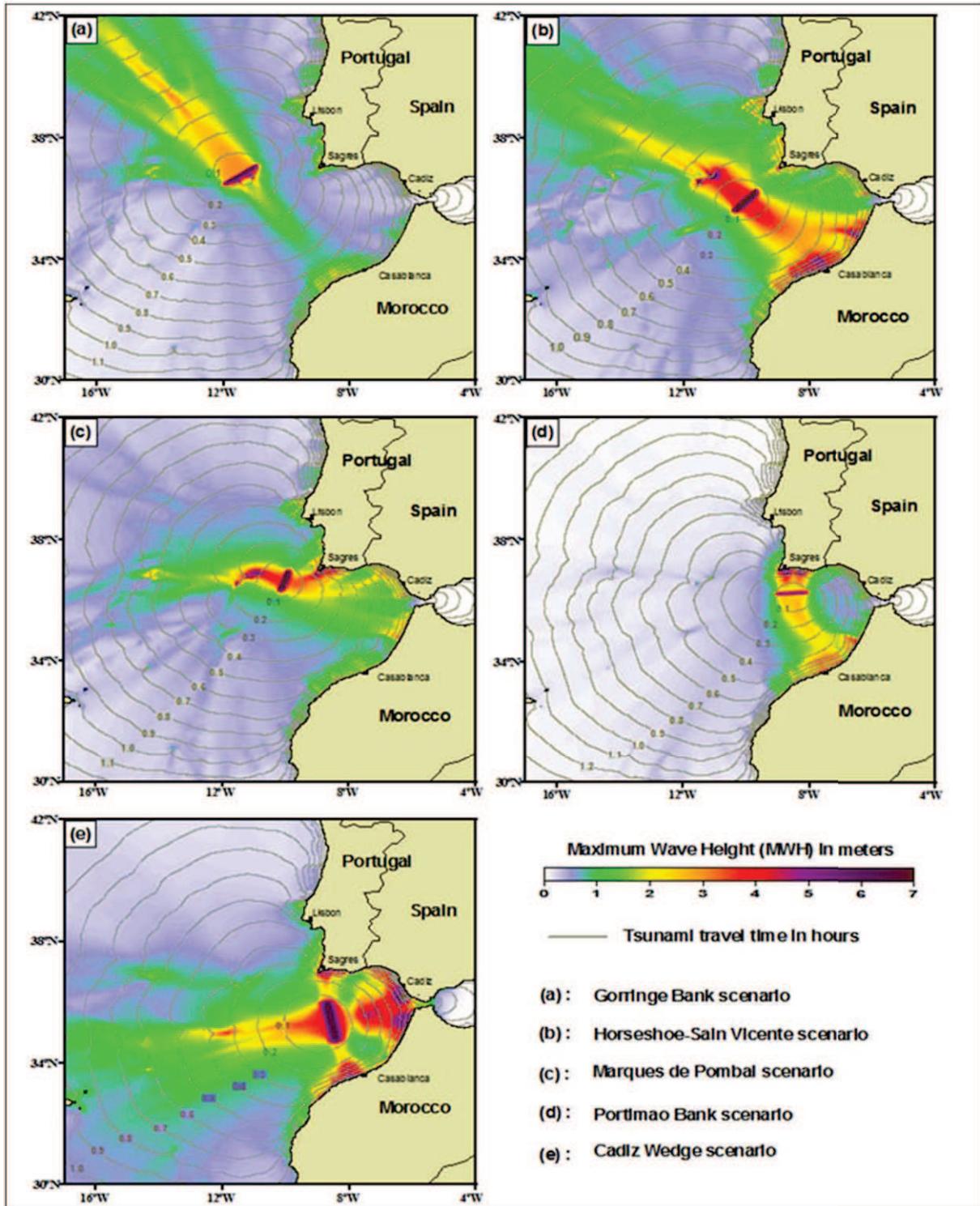


Figure 34. Modèles de propagation de tsunami pour différentes sources sismiques du golfe de Cadiz (temps de parcours en heures et hauteurs maximales de vagues en m) (Omira et al., 2009).

#### 4.2.2. Code de simulation

Les simulations numériques du tsunami effectuées dans le cadre de ce travail ont été réalisées avec le code COMCOT (*Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model*) (Liu *et al.*, 1994) modifié par l'équipe de FFCUL (Foundation of the Faculty of Sciences of the University of Lisbon) dans le cadre des projets européens TRANSFER et NEAREST.

Ce modèle consiste dans un premier temps à calculer la déformation initiale (Figure 35) associée à une rupture sismique en faisant appel aux algorithmes développés par Okada (1985) qui correspondent à la méthode couramment utilisée par les différents modèles (la théorie demi-espace élastique). Ces algorithmes permettent de calculer la déformation du plancher océanique à partir des caractéristiques de la faille à l'origine du séisme. Le tsunami initial est ensuite déduit en admettant que l'intégralité de cette déformation est instantanément transmise à la surface de l'eau.

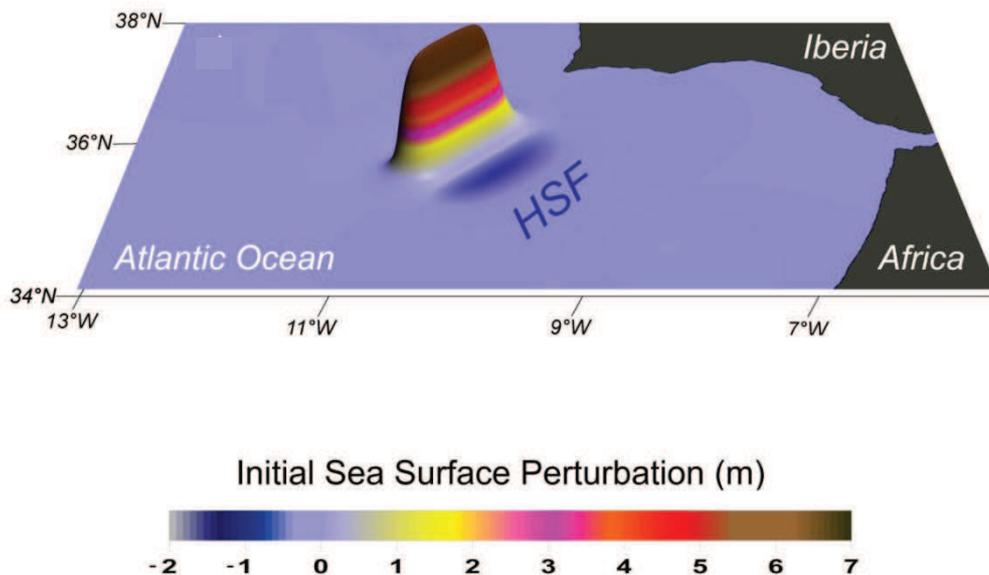


Figure 35. La déformation initiale de la surface d'eau pour le scénario de HSF (Omira, 2010)

Le calcul de la propagation (Figure 36) se fait ensuite par la résolution des équations de l'hydrodynamique de Navier Stocks selon les approximations linéaires et non-linéaires "Shallow water" ou « eau peu profonde » en utilisant un schéma numérique aux différences-finies, en coordonnées sphériques ou cartésiennes, dans un système de grilles imbriquées.

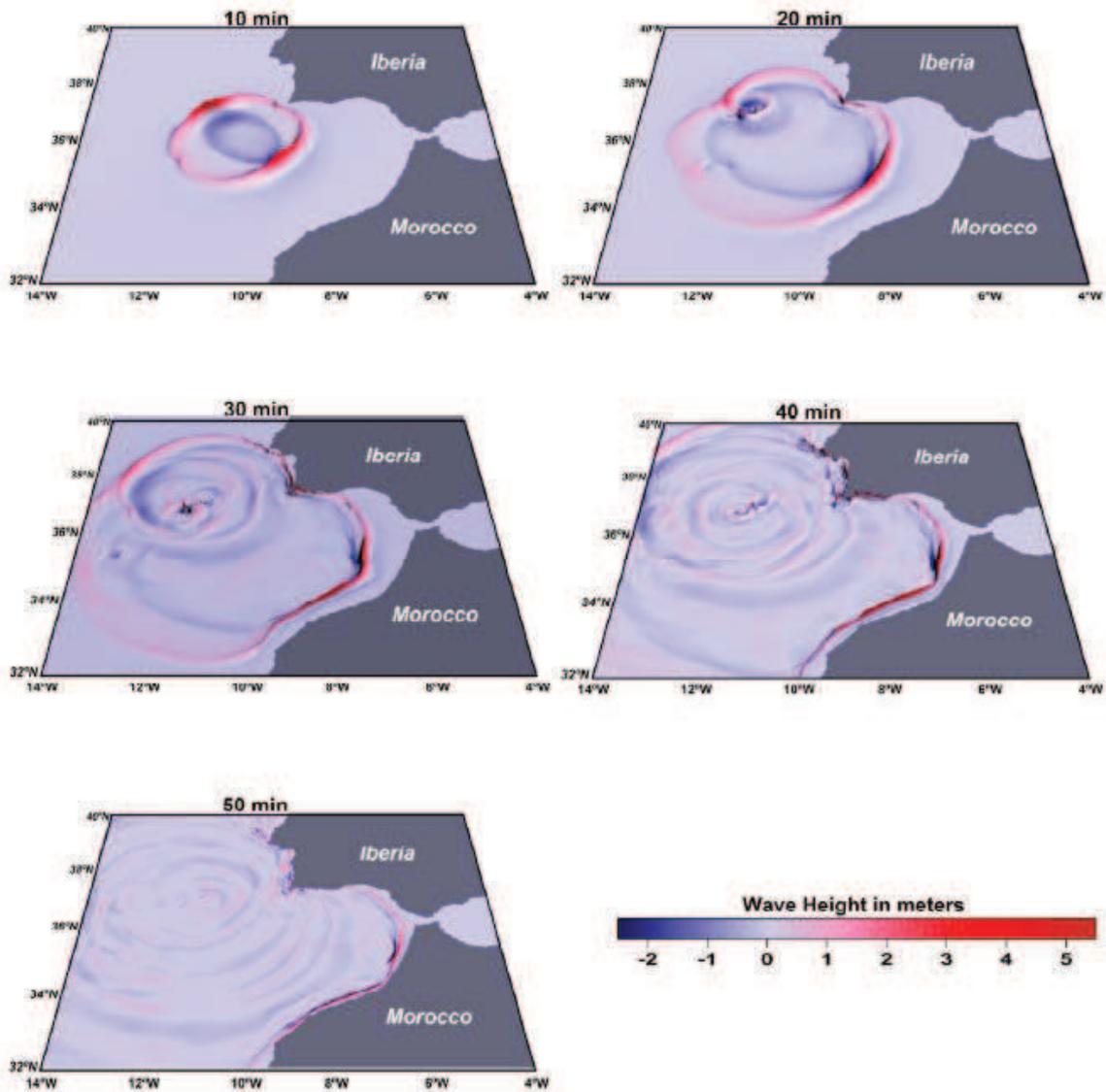


Figure 36. Simulation de la propagation, depuis la zone épiscopale, du tsunami dans la région du Golfe de Cadix, (scénario HSF) (Omira, 2010)

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. 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-up* et vitesses d'écoulement. Le principe de calcul des *run-up* est d'extrapoler dans les mailles sèches les quantités calculées dans les mailles voisines mouillées.

### **4.3. Données topo- bathymétriques et constitution des MNTS/MNES**

Ce chapitre présente les différentes données bathymétriques et topographiques utilisées dans cette étude et la méthode utilisée pour construire les MNTs et MNES nécessaires à notre simulation.

#### **4.2.1. A l'échelle régionale**

##### **4.3.1.1. Données bathymétriques**

Les données bathymétriques utilisées proviennent de la base de données internationale GEBCO. GEBCO, General Bathymetric Chart of the Oceans, est soutenu par l'Organisation Hydrographique Internationale (IHO), par les Nations Unies (UNESCO) ainsi que par la Commission Océanographique Intergouvernementale (IOC). Les informations bathymétriques résultent d'une compilation à l'échelle du globe de sondages bathymétriques et de données issues de l'altimétrie satellitale. Elles sont délivrées gratuitement et sont accessibles à l'adresse suivante <http://www.gebco.net/>.

##### **4.3.1.2. Données topographiques**

Les données topographiques des côtes marocaines sont issues de la base de données **SRTM** (Shuttle Radar Topography Mission, maillage de 3'', soit environ 90 m). Elles sont disponibles, après traitement par le International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), à l'adresse suivante : <http://srtm.csi.cgiar.org>.

##### **4.3.1.3. Construction des grilles MNT**

Ces données topo- bathymétriques ont permis de construire des grilles à 400 et 100m.

La grille\_ 100m a été réalisée à l'aide des outils SIG, en combinant les données de GEBCO avec celles de SRTM, puis exportée sur Surfer. Les étapes suivies pour la réalisation du MNT et l'ensemble des calculs sont les mêmes que celles décrites pour l'échelle locale.

Le MNT régional (Maroc atlantique) (Figure 37) 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 notre équipe. 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 selon une triangulation par interpolation linéaire. 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.

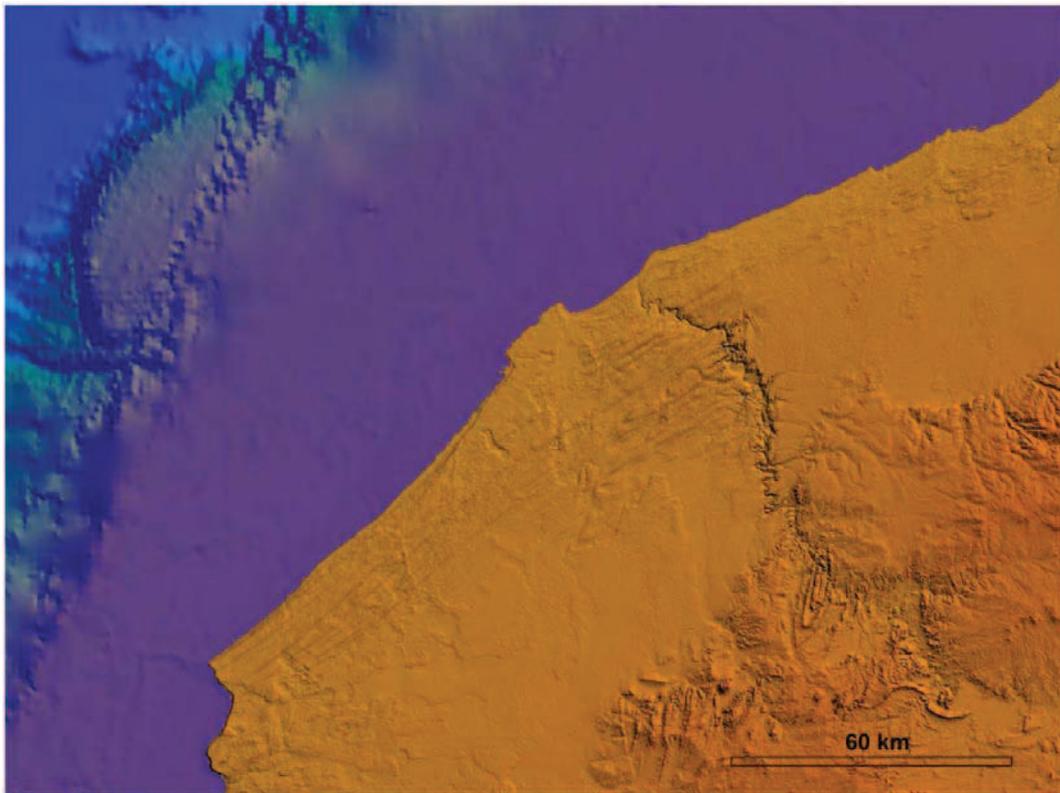


Figure 37. Extrait du MNT régional (topo SRTMv2 /bathy GEBCO) produit sur le littoral atlantique marocain.

#### 4.2.2. A l'échelle locale

La construction du MNT d'El Jadida a été soutenue par une documentation cartographique importante :

##### 4.3.2.1. Les données topographiques

Elles ont été obtenues auprès du SDAU-El Jadida (2004) et sont issues des levés DGPS récoltés sous format de points côtés dont les coordonnées sont d'une très bonne précision. Ce jeu de points est enrichi par des points digitalisés le long des courbes de niveaux 5, 10, 15, 25, 30 et 35m de la carte topographique au 1/50 000 et par des points digitalisés en haut de plage et le long de l'esplanade. Nous voulions être en mesure de matérialiser l'obstacle à la submersion représenté par la topographie de l'esplanade.

##### 4.3.2.2. Les relevés bathymétriques

Ils ont été réalisés à partir de la carte marine d'El Jadida (Source SHOM).

Tous ces points ont été agrégés en un seul jeu de points utilisé pour construire un MNT de haute résolution (27 x 27m) définissant la surface topographique du site (Figure 38).

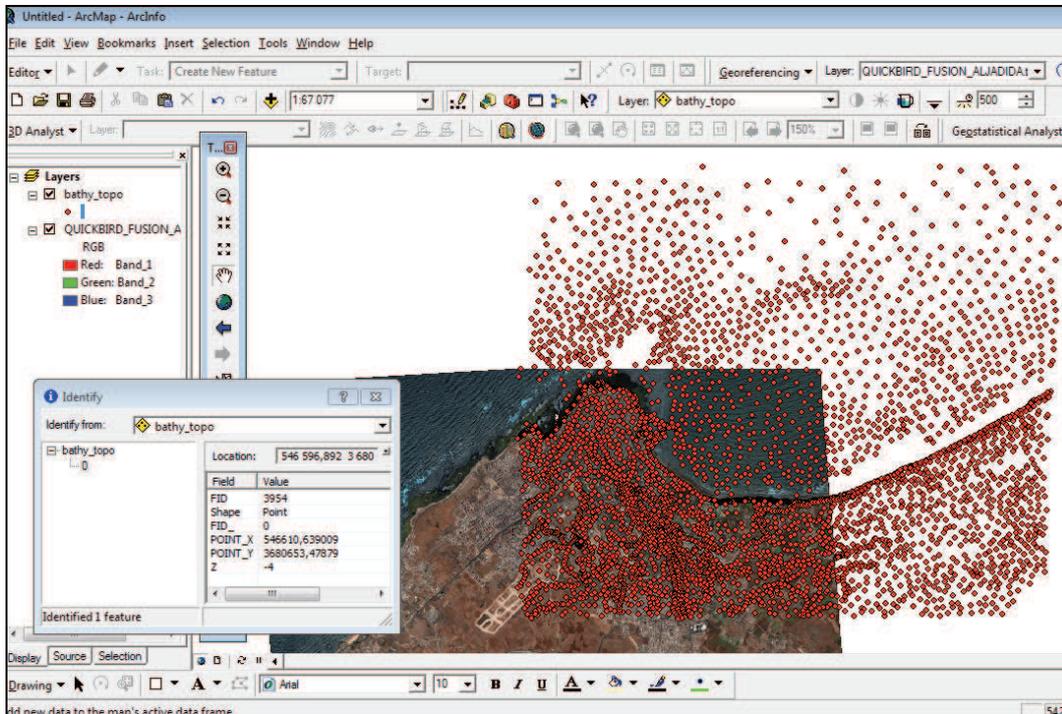


Figure 38. Ensemble des points côtés en X, Y, Z. surimposé à l'image satellite Quickbird. Ce jeu de points Bathy\_topo comprend des mesures bathymétriques et altimétriques (Leone et al., 2012).

#### 4.3.2.3. Construction des grilles nécessaires aux simulations

La modélisation de tsunamis sur les zones côtières nécessite un maillage fin pour tenir compte des fortes irrégularités de la bathymétrie et évaluer précisément les zones inondables. Par contre la modélisation loin des côtes ne requiert pas une telle précision. Le code de calcul COMCOT a donc été implémenté avec l'option d'usage d'une grille emboîtée, basée sur le principe : modélisation de la propagation d'un tsunami avec une faible résolution lorsque l'on se situe loin des côtes, et modélisation avec une résolution de la grille de plus en plus fine dès lors que le tsunami se rapproche du littoral.

L'ensemble des calculs a été effectué sur des grilles exprimées en coordonnées métriques Mercator universel (ellipsoïde WGS84).

Les différentes sources de données topo-bathymétriques ont été utilisées pour construire les grilles nécessaires aux calculs dont les maillages sont de 800 m x 800 m, 200 m x 200 m (compilation GEBCO) et 27 m x 27 m pour les plus fins (jeu de points côté au pas de 27 m (Figure 38)).

Le MNT\_27 m a été fabriqué en utilisant le logiciel Surfer (Golden Software) grâce à la méthode de triangulation par interpolation linéaire.

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 ensuite les prévoir 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.

#### 4.3.2.4. Constitution du MNE

Dans le cadre de ces simulations, le secteur de la ville d'El Jadida a été également choisi pour tester des modèles de submersion marine mettant en relief la vulnérabilité des zones bâties. Pour mener à bien une telle modélisation, il semble important de pouvoir intégrer sur le MNT, de manière cohérente, les données structurantes telles que les bâtiments, les quais, l'esplanade et les digues (Figure 39). Dans la base de données SDAU\_ El Jadida, l'information concernant ces objets est représentée sous forme vecteur. Pour pouvoir être utilisées dans la constitution du MNE, il est impératif d'effectuer une conversion de type vectoriel vers matriciel c'est - à - dire de générer deux GRIDs ; un GRID donnant l'élévation du bâti et un

autre donnant les altitudes des digues, quais et esplanade, au **pas de 1m** pour mieux exploiter l'information sur les hauteurs de ces objets.

La résolution finale envisagée pour le MNE est de **1m**, donc il serait illusoire de vouloir générer un MNT à une telle résolution à partir du jeu de points côtés qui a été constitué pour cette étude. Il a donc été décidé de réaliser dans un premier temps un MNT au pas de 27m, par krigeage, résolution proche de GDEM.

L'information topographique obtenue au pas de **27m** a été ramenée au pas de **1m** par une méthode de reprojexion (interpolation bilinéaire). Le **MNT\_1m** ainsi généré reproduit à l'identique l'information donnée par le MNT original.

L'élaboration du **MNE** nécessite une suite de combinaisons GRIDs (**Hauteur\_Bâti\_1m**, **alti\_quais\_digues\_esplanade\_1m** et **MNT\_1m**). Ces combinaisons (ajout, multiplication, ...) se faisant pixel à pixel, ne sont possibles que pour des rasters ayant la même emprise, le même nombre de pixels et la même résolution.

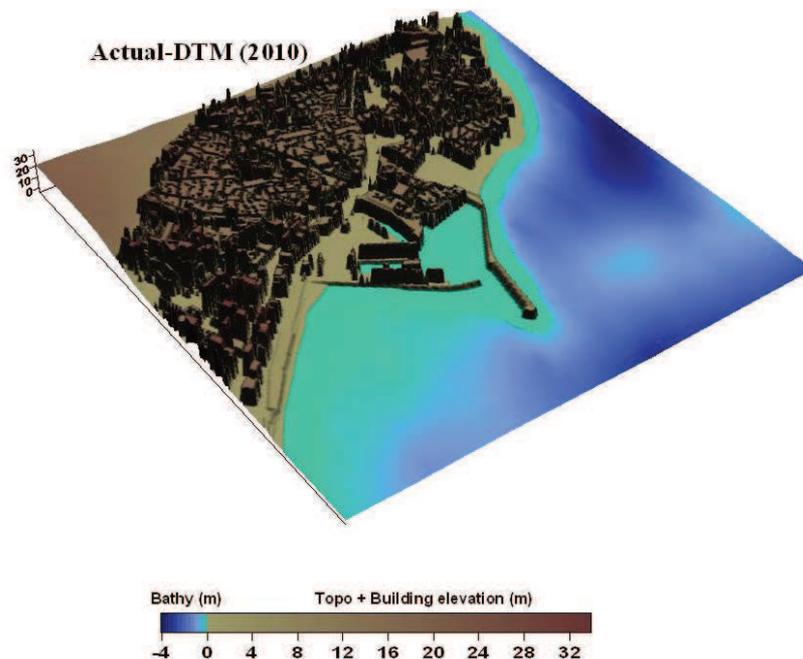


Figure 39. MNE de 2010 (Omira et al., 2011)

Cette prise en compte d'objets géographiques peut influencer le comportement de la simulation d'inondation, qui est un phénomène très dépendant du terrain. Les résultats peuvent alors varier considérablement selon que l'on utilise un MNT classique ou un MNT enrichi (MNE).

#### 4.3.2.5. Constitution du MNE\_1755

Dans le cadre de cette étude la réalisation d'un MNE\_1m proche de 1755 a été proposée pour comparer les différentes données historiques disponibles avec les résultats de la simulation. Les informations concernant l'occupation de la zone et le trait de côte ont été tirées de différentes gravures d'époque et en particulier d'un plan de la cité Portugaise géométriquement exact datant de 1753 (Figure 40b). 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 41).

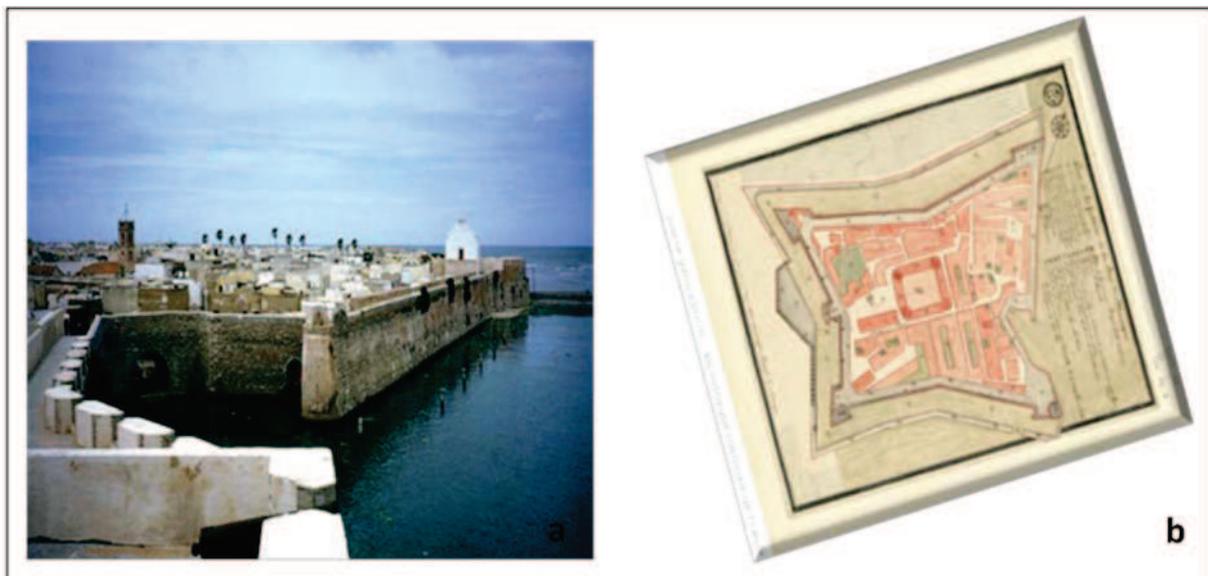


Figure 40. a) Vue actuelle de la citadelle d'El Jadida depuis le haut du rempart sud en bord de mer, b) Plan de la forteresse de Mazagan de 1753 (source gallica.bnf.fr).

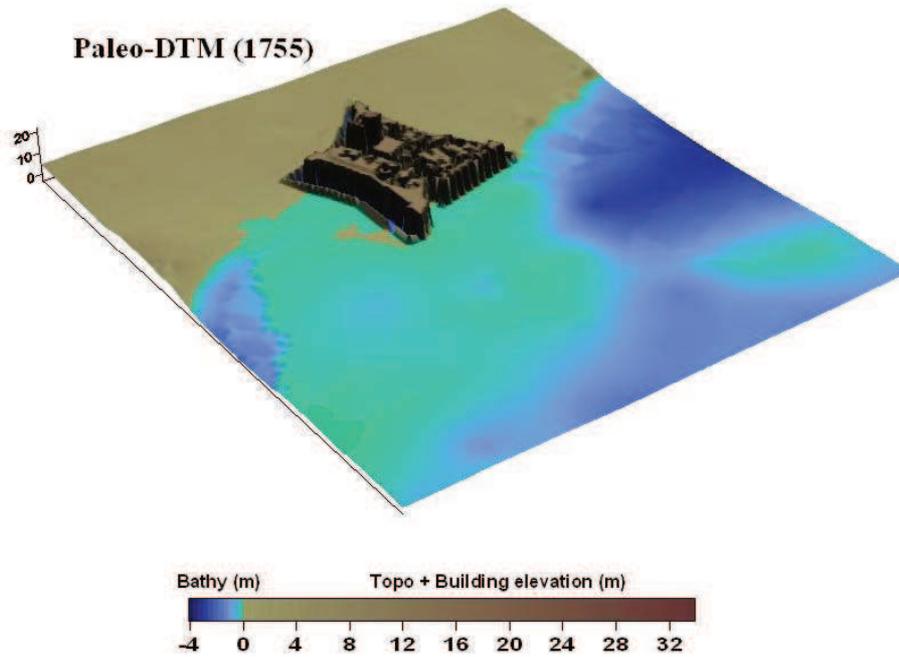


Figure 41. Le MNE de 1755 (Omira et al., 2011)

#### 4.3.2.6. Construction de référentiels «trait de côte » 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 *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 42).

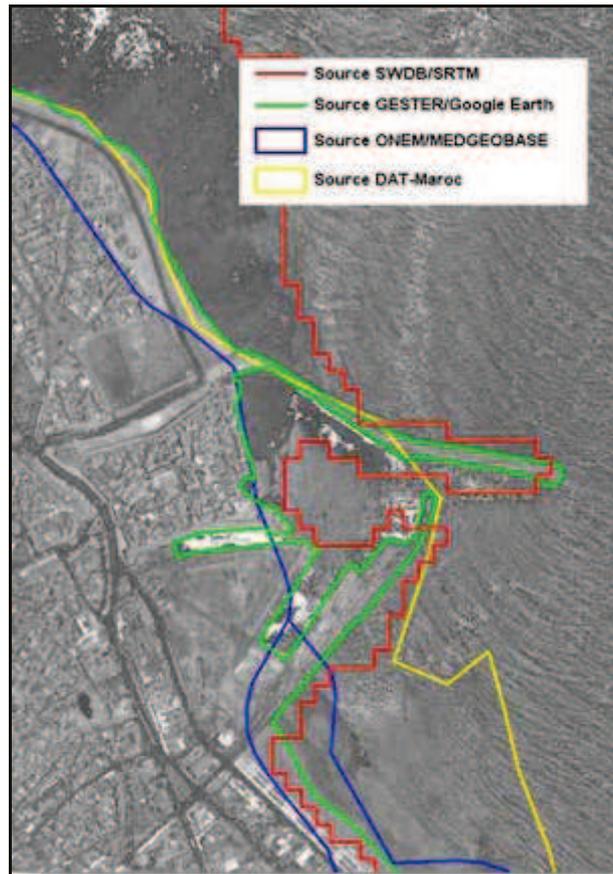


Figure 42. Confrontation des différents traits de côte disponibles à l'échelle du Maroc. Illustration des écarts sur la ville d'El Jadida (Leone et al., 2012).

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. Le trait de côte a été numérisé manuellement en suivant soit la ligne de démarcation entre le sable mouillé et le sable sec, soit le pied des côtes rocheuses ou de l'urbanisation (Figure 43). L'outil multi-date 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 été numérisés, entre Sidi Ifni au Sud d'Agadir et Ceuta au Nord.

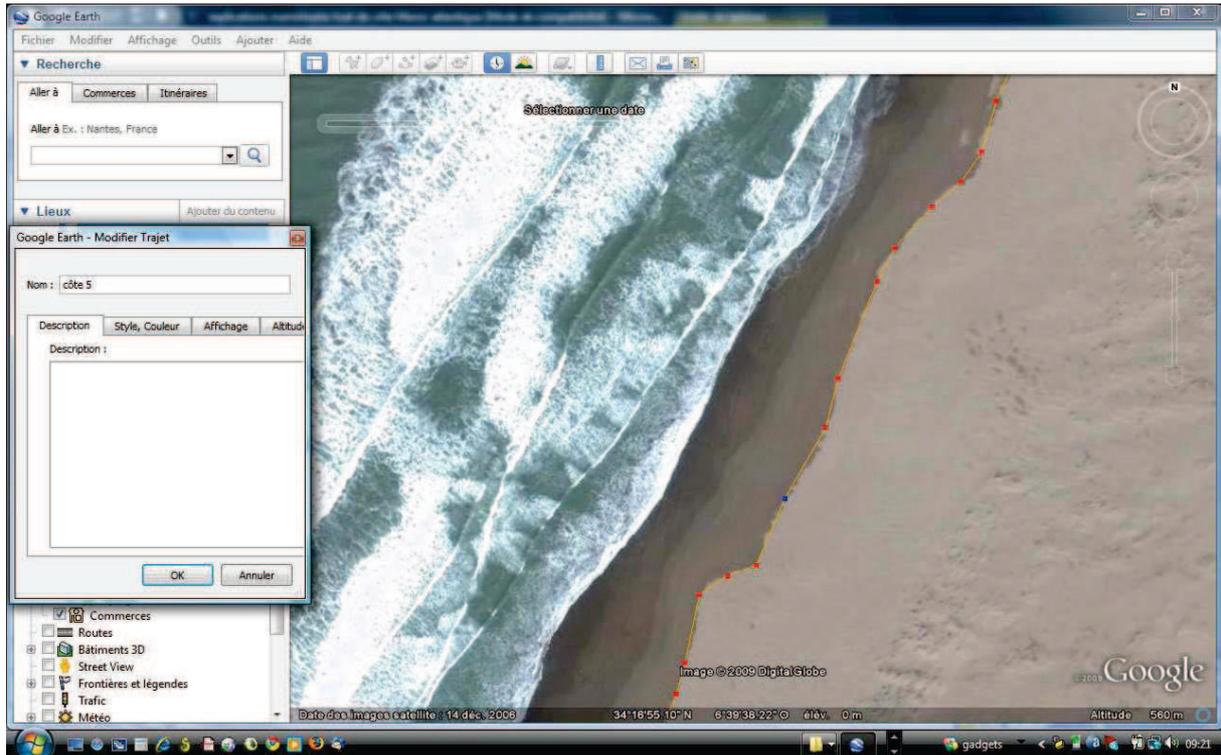


Figure 43. Exemple de numérisation suivant la ligne de démarcation entre sol mouillé et sol sec (Leone et al., 2012).

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.

#### **4.4. Résultats de la simulation**

La simulation numérique du scénario de référence (1755), depuis la source HSF, a permis d'obtenir deux zonages de submersion marine de résolution croissante en faisant varier les supports altimétriques des modèles :

- zonage régional sur tout le littoral marocain atlantique sur support MNT SRTM à 90m.
- zonage local à El Jadida sur deux supports MNT 27m et MNE (de 2010 et proche de 1755) 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.

##### **4.4.1. Zonage régional**

A l'échelle régionale la simulation donne des temps d'arrivée compris entre 51 mn (Rabat) et 66 mn (Ceuta) sur le littoral marocain étudié (Figure 44).

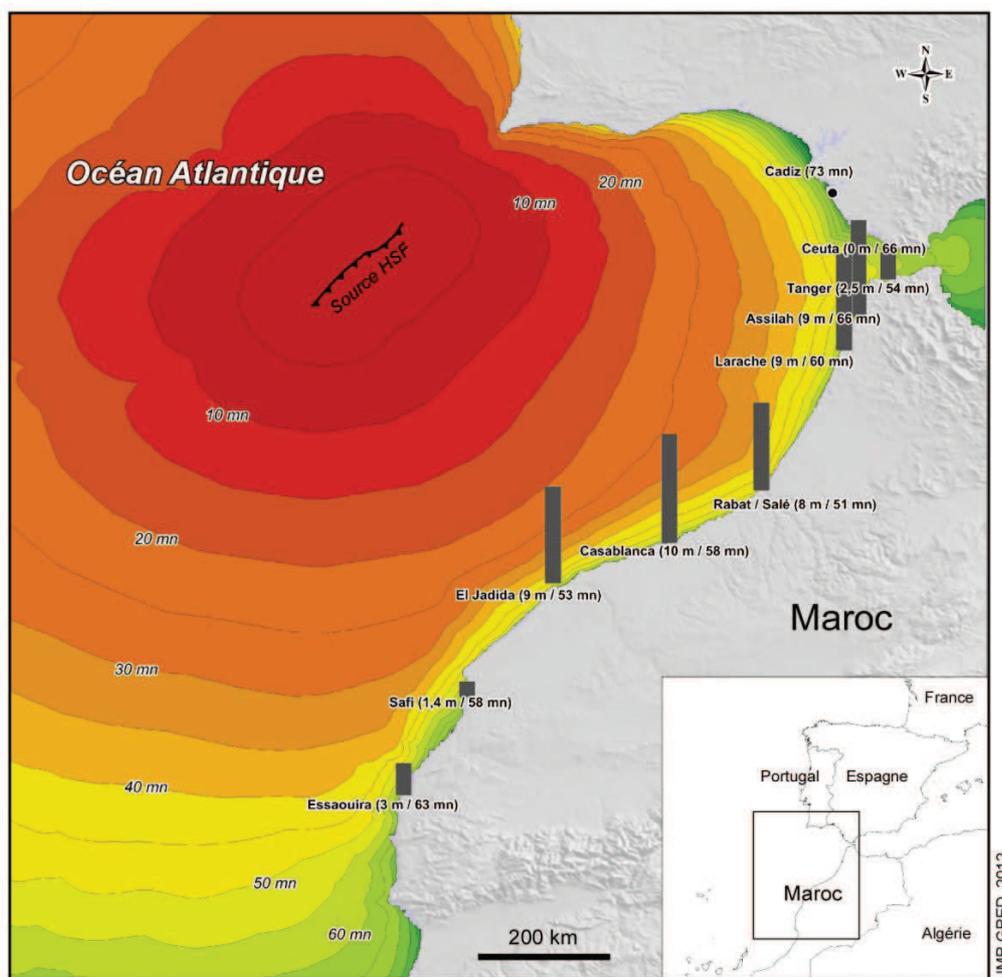


Figure 44. Temps de trajet (TTT, en minutes) et hauteurs de vague maximales à la côte (MWH, en mètres) modélisées pour un tsunami de source HSF (type 1755) (Mellas et al., 2012).

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 Bouselham 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 45) (Mellas et al., 2012).

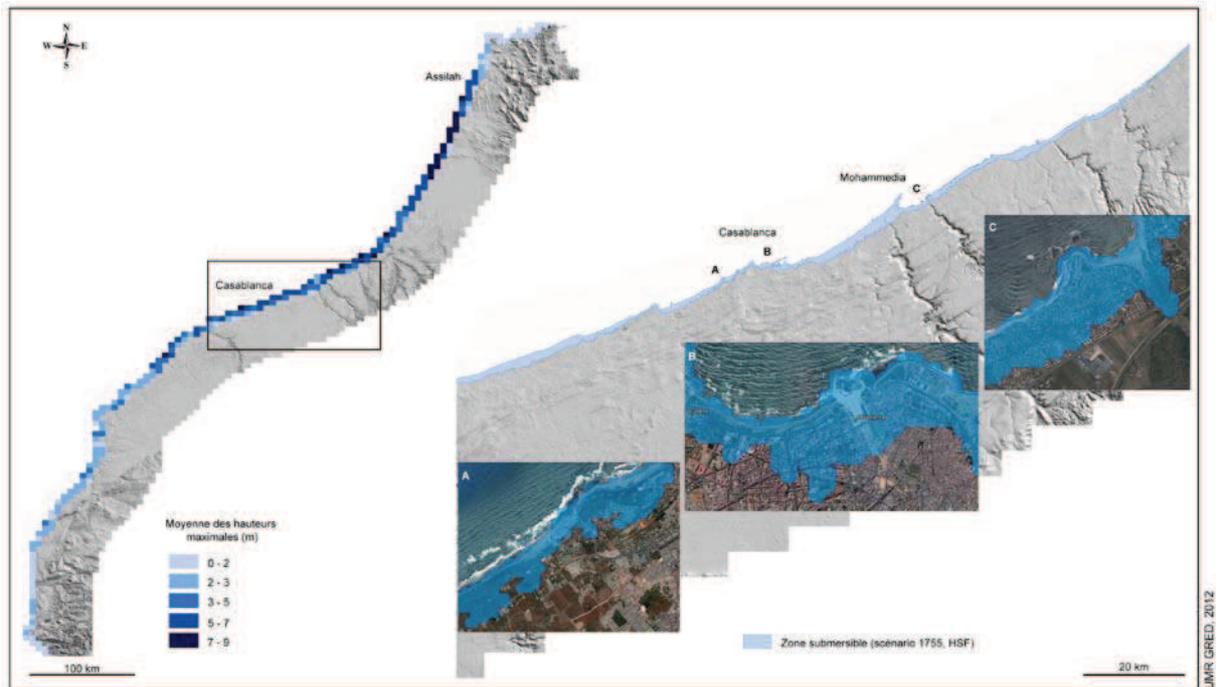


Figure 45. Hauteurs moyennes des vagues maximales et enveloppe de submersion modélisées pour un tsunami de source HSF (type 1755) (Mellas et al., 2012).

#### 4.4.2. Zonage local

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 (Figure 46).

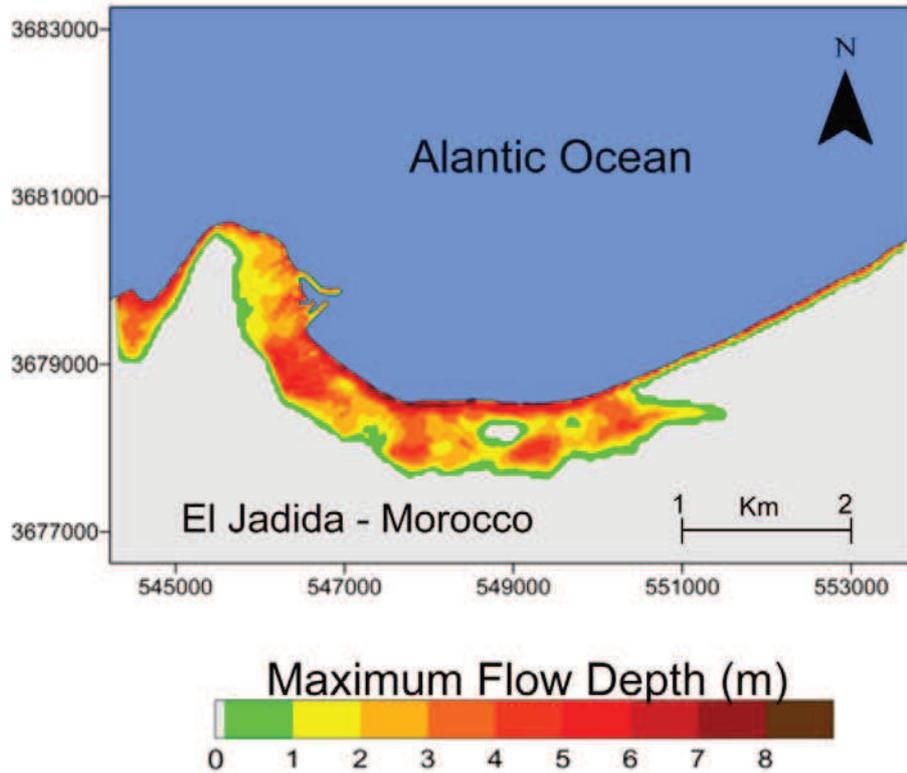


Figure 46. Profondeurs d'inondation sur El Jadida. Modélisation locale sur MNT 27 m de résolution.

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.

La modélisation d'un tsunami généré par un séisme similaire à celui de 1755 ( $M_w = 8.5$ ) vient d'être affinée localement sur la ville d'El Jadida en considérant un trait de côte et une bathymétrie proches des conditions de 1755. Elle a donné des hauteurs maximales proches de 6 m (Figure 47, Omira et al., 2011 sous presse). Ces résultats permettent d'écartier 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).

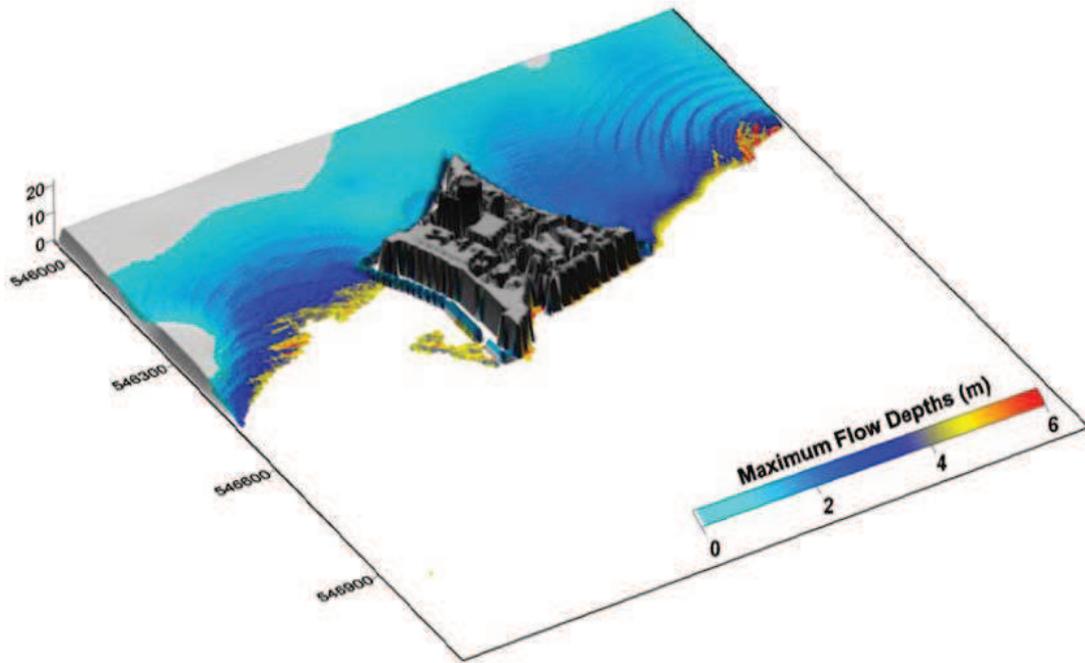


Figure 47. Modélisation fine des profondeurs d'eau maximales sur la ville de Mazagan (1755)  
Omira et al., 2011 sous presse.

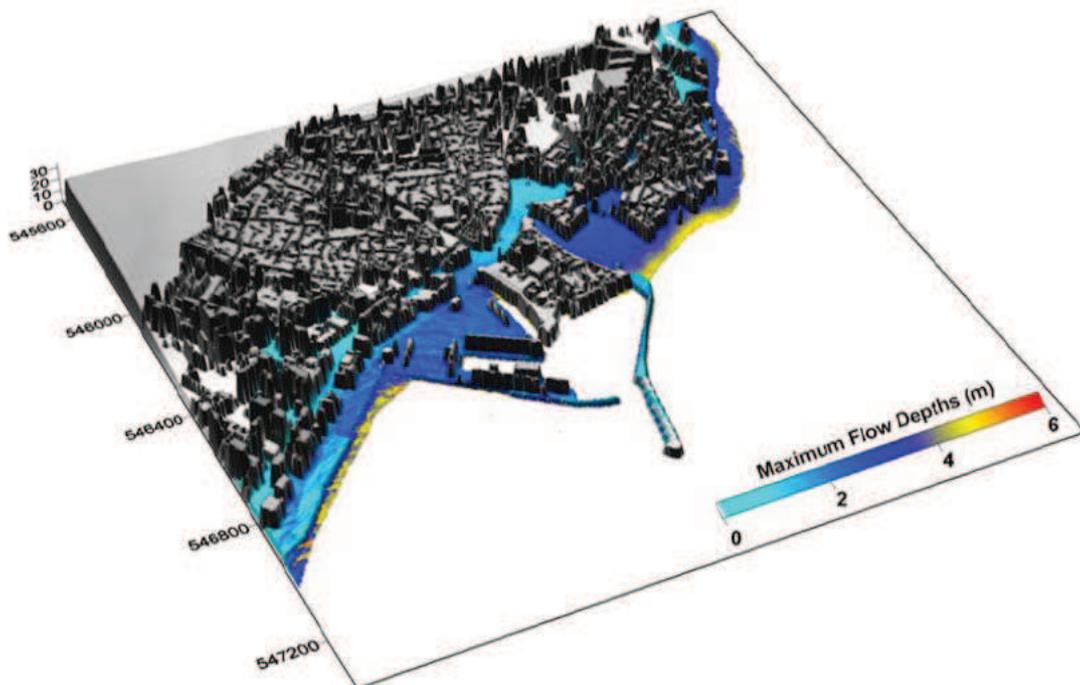


Figure 48. Modélisation fine des profondeurs d'eau maximales sur la ville d'El Jadida (2010)  
Omira et al., 2011 sous presse.

Ce modèle d'inondation local sur MNE (Figure 47, 48 et 49) donne une inondation plus réaliste que sur MNT (Figure 46). 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.

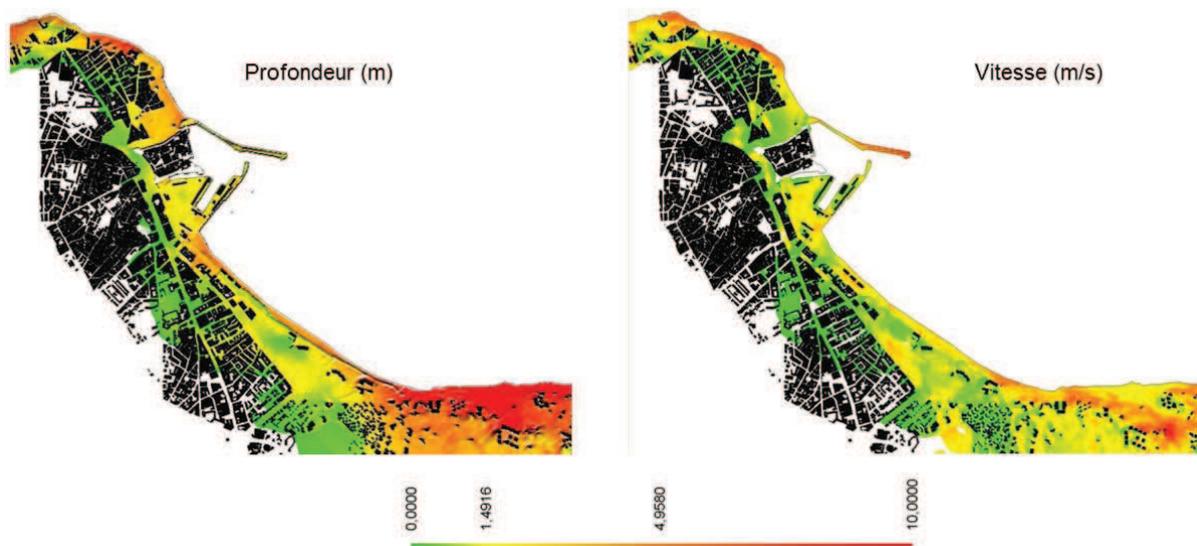


Figure 49. Hauteurs (épaisseurs) et vitesses d'inondation maximales sur El Jadida. Modélisation locale sur MNE de 5 m de résolution (1755, source HSF).

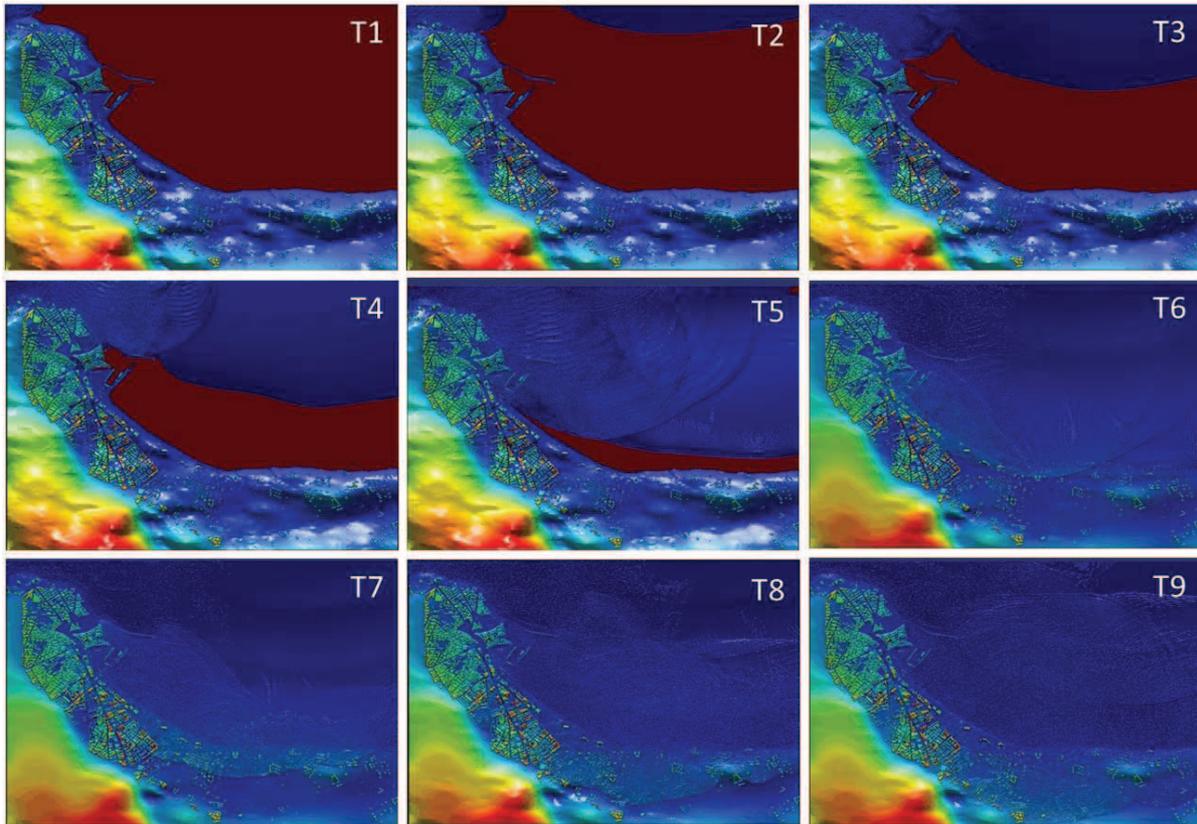


Figure 50. Modélisation dynamique de l'inondation sur El Jadida. Modélisation locale sur MNE de 5 m de résolution (1755, source HSF) (Leone et al., 2012).

### 4.3. Conclusion du 4<sup>e</sup> chapitre

A partir d'un scénario d'aléa (1755) choisi pour son caractère majorant vis-à-vis des côtes atlantiques marocaines, la modélisation numérique nous a permis de disposer d'éléments généraux sur le niveau d'exposition potentielle des côtes atlantiques marocaines et d'identifier les zones où l'onde du tsunami aura *a priori* plus tendance à s'amplifier de manière à mettre en danger les enjeux littoraux.

Il s'agit d'un scénario extrême, déterministe et à faible probabilité, mais qui a le mérite de reproduire un évènement historique connu et donc mieux perçu. A ce titre, la simulation donne des valeurs de hauteurs de vagues supérieures aux témoignages historiques mais qui restent acceptables au regard des nombreuses incertitudes qui demeurent, tant du côté des témoignages historiques que des paramètres du modèle de tsunami (localisation de la source, son fonctionnement, bathymétrie au large et proche des côtes, etc.). Les résultats de notre modélisation sur Rabat-Salé (Hmax. 8 m) sont par ailleurs comparables à ceux obtenus par Renou et al. (2011) sur cette même zone (Hmax. 8-9 m).

## **Conclusion de la 1<sup>ère</sup> partie**

L'étude historique montre que le littoral atlantique marocain a été plusieurs fois touché par des tsunamis d'origine sismique. Le tsunami le plus destructeur et le plus documenté est celui associé au séisme de Lisbonne de 1755. Pourtant, les données historiques disponibles ne permettent pas de déterminer ses caractéristiques exactes du fait du manque de fiabilité des témoignages et du manque de traces sédimentaires relatives à cet événement sur le littoral atlantique marocain.

La modélisation numérique de cet événement est le seul moyen qui permet de reconstituer ses effets et d'évaluer la fiabilité des témoignages historiques. Ce qui sert ensuite à la réalisation des cartes d'aléa permettant d'apprécier l'exposition future des côtes marocaines au risque de tsunami et de réaliser des analyses de vulnérabilités.



## Partie II. La mesure du risque : Approche multi-scalaire

### Introduction : Notion de scénarios de risque

Notre étude concernant le risque de tsunami sur le littoral atlantique marocain a pour but l'évaluation et la prévention. Le phénomène étant extrêmement complexe, sa modélisation (chapitre 4) reste hermétique et utilisable pour les experts, mais pas de façon directe pour les décideurs et le public. Les cartes d'aléa, que nous avons obtenu, expriment seulement des niveaux de menaces potentielles et négligent les autres composantes fondamentales de l'équation du risque que sont les enjeux présents et leur niveau d'endommagement potentiel (Leone, 2007).

Dans une perspective d'aide à la décision, il est impératif de donner un maximum d'informations sur le phénomène et ses impacts potentiels surtout humains. Nous devons donc développer des outils d'aide à l'évaluation et à la décision compréhensibles par un large public. Un de ces outils est constitué par les **scénarios du risque**, base indispensable pour la formulation de politiques et des plans de gestion du risque.

Selon Leone (2007), ces scénarios sous-entendent la possibilité de moduler les risques de pertes potentielles en faisant varier tant dans l'espace que dans le temps les composantes des aléas (extension, enchaînement, probabilité d'occurrence, magnitude, durée) et des enjeux (localisation, nature, fonction d'endommagement ou de vulnérabilité, valeur, probabilité de présence). D'après cette définition le scénario peut se décliner suivant des variables relatives à l'aléa et aux enjeux, ou encore suivant la prise en compte des facteurs de vulnérabilité (Figure 51).

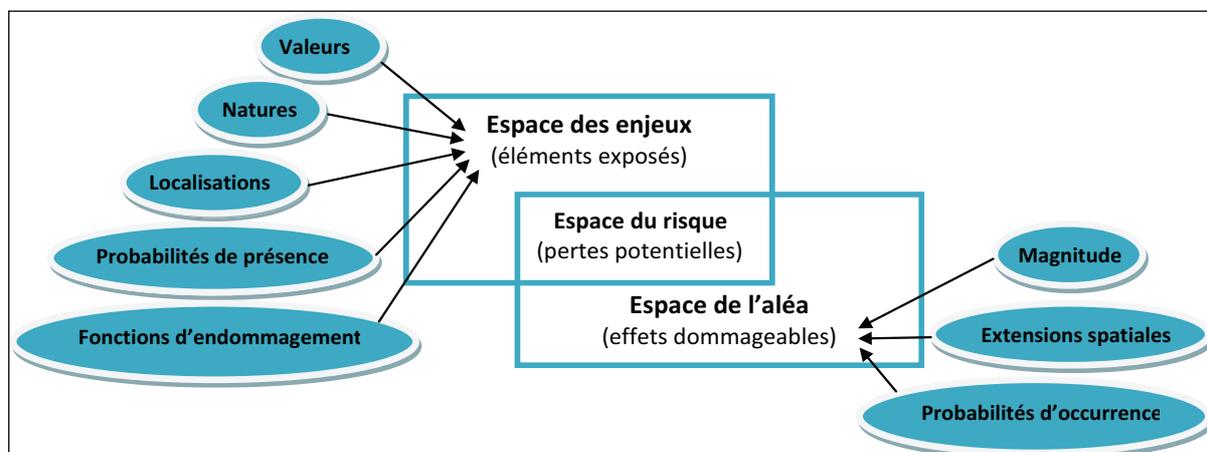


Figure 51. Les composantes et variables d'un scénario de risque spatialisé (Leone, 2007).

Dans notre démarche par scénarios à l'échelle fine, nous allons prendre en compte les variables d'aléa (développées dans le 4<sup>ème</sup> chapitre), d'enjeux et de certains facteurs de vulnérabilité caractérisés par des critères sélectionnés lors du diagnostic de terrain, pour élaborer des scénarios de risque humain en cas d'un futur tsunami majeur sur la ville d'El Jadida.

Dans cette troisième partie nous allons d'abord évaluer, l'exposition territoriale du littoral atlantique marocain au risque de tsunami au moyen d'indicateurs d'exposition au risque (chapitre 5), puis le risque de pertes humaines en cas de tsunami majeur sur la ville d'El Jadida selon une approche intégrée basée sur des scénarios de risque (chapitre 6).

## **Chapitre 5<sup>e</sup>: Les indicateurs d'exposition du littoral atlantique marocain au risque de tsunami**

### **5.1. Introduction**

Le passage de la mesure du risque à sa mise en carte doit nécessairement prendre une forme synthétique et simplifiée garantie par la notion d'indicateur (Leone et al., 2007). Un indicateur se définit comme une variable, basée sur des mesures, que l'on peut utiliser pour représenter plus simplement une situation souvent complexe. On peut construire de simples indices d'exposition qui reposent sur une quantification des enjeux pour une zone d'aléa de référence, qui se distinguent des indices de risques multicritères combinant des indicateurs d'aléa, d'enjeux et de vulnérabilités (Leone, 2008).

Ces indicateurs doivent obéir à un certain nombre de critères de qualité qui assurent leur pérennité et leur valeur scientifique ou opérationnelle : qualité, validation, disponibilité, homogénéité (spatiale et de format) et traçabilité des données entrantes ; reproductibilité dans le temps pour permettre des mises à jour régulières et suivre leurs évolutions (Leone et Pagneux, 2009). Les indicateurs d'exposition reposent sur une quantification des enjeux directs inclus dans les enveloppes d'extension spatiale de phénomènes probables. En matière de risque tsunami, de tels indicateurs d'exposition ont déjà été produits à l'échelle régionale sur les littoraux de la Méditerranée (Leone, 2011), des Antilles (Leone et Deymier, 2012) ou de la côte Nord-Ouest des Etats-Unis (Wood, 2009).

Ce chapitre propose une démarche méthodologique et un premier jeu d'indicateurs, agrégés sur plusieurs mailles territoriales, pour estimer l'exposition territoriale du littoral atlantique marocain au risque de tsunami. Elle repose sur une cartographie intégrant des critères d'aléa issus de la modélisation numérique du scénario de référence (le tsunami de 1755) et le couplage de bases de données jusqu'alors inexploitées, sur l'occupation du littoral.

## 5.2. Les enjeux sur le littoral atlantique marocain

### 5.2.1. Aperçu historique sur l'occupation du littoral marocain

Jusqu'au début du XXe siècle, le Maroc était un pays continental articulé autour de ses deux grandes capitales traditionnelles (Fès et Marrakech, avec temporairement Meknès). L'axe économique et politique principal du Royaume reliait Fès et Marrakech par le pied de l'Atlas puis se divisait en deux branches allant vers Tanger et vers Oujda et l'Algérie. Aussi longtemps que les transports maritimes furent peu performants, cette géographie continentale se maintint sans grands changements. Mais avec l'importance croissante des échanges internationaux et l'avantage relatif des transports maritimes, qui imposaient de gagner les côtes les plus proches, le système commença à s'infléchir vers la région de Casablanca. Signataire de traités de commerces avec l'Espagne dès la fin du XVIII<sup>e</sup>, cette petite ville devint la porte de sortie des produits agricoles de la Chaouïa et prit progressivement de l'importance, pour atteindre au début du XXe siècle la taille de 25.000 habitants (dont 1000 étrangers). Cette évolution prit une forme décisive "lorsque Lyautey, jouant encore ici les dés de la fortune, fit de Casablanca la grande porte des affaires économiques" en décidant la construction du port. Cela coïncidait avec le développement rapide des premières exportations vraiment "pondéreuses", les phosphates, qui assureront pendant des décennies (et jusqu'à nos jours) l'essentiel du trafic du nouveau port.

Le coup fut pour ainsi dire doublé par la décision de transférer la capitale de Fès à Rabat, la même année 1912. Dès lors, la capitale économique et la capitale politique infléchirent les réseaux terrestres et la liaison Marrakech-Fès, toujours primordiale se fit désormais par la côte, traversant le plateau des phosphates et la Chaouïa, au Sud et évitant les marécages du Gharb en restant sur la rive gauche (Rabat-Meknès et Rabat- Kénitra- Sidi Kacem- Fès). Cette organisation s'imposa jusque vers 1990, période où la progression des transports routiers rétablira l'intérêt de la liaison côtière Rabat-Tanger et la traversée du Détroit. Les nouveaux ports (Jorf Lasfar et Tanger Méditerranée) confirment aujourd'hui cette nouvelle géographie (SOFA, 2005) (Figure 52).



Figure 52. L'armature urbaine du Maroc (source : DAT 2007).

### 5.2.2. Enjeux humains - urbains

Le déplacement du centre de gravité du pays de l'intérieur vers le littoral atlantique, qui a eu lieu sous le Protectorat, a entraîné une mutation brutale de la structure de l'espace national. Il a déclenché un phénomène de concentration démographique sur le littoral, l'atlantique en particulier, qui s'est accéléré depuis les années 50. En effet, la population littorale représentait en 2010 plus de 54,7 % de la population totale du Maroc, contre 49 % en 1971 (Figure 53). Durant ces trois décennies cette population a été multipliée par 2,3 contre 2,1 pour l'ensemble

du Maroc. Le littoral atlantique concentre à lui seul 46,2 % de la population du Maroc sur seulement 14 % du territoire national (HCP, 2010a). La population urbaine de cette façade n'a cessé de croître depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle. Le taux d'urbanisation représentait 69 % en 2010. Cette urbanisation est marquée par le poids particulier de l'axe Kénitra - El Jadida qui concentre 67,5 % de la population urbaine du littoral atlantique sur près de 230 km (HCP, 2010a).

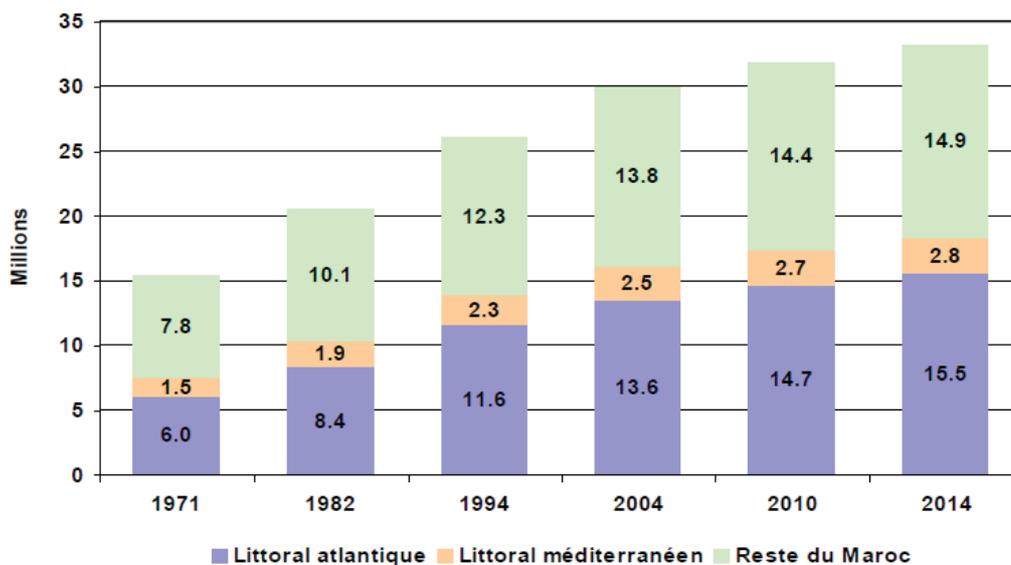


Figure 53. Evolution de la population littorale depuis 1971 (HCP, 2010a)

Sur le littoral atlantique, on retrouve les plus grandes villes du pays : Casablanca, Rabat-Salé, Tanger, Tétouan, Larache, Kénitra, Mohammadia, Safi, Agadir ; Laâyoune. Ces agglomérations côtières sont en pleine expansion et assurent l'essentiel de la croissance urbaine. Leur forte attractivité les transforme en direction privilégié de l'exode rural et les conduit à déborder de leur périmètre traditionnel. C'est ce qui explique le 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 (MATEE, 2005).

Depuis 1990, le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) publie chaque année un rapport sur le développement humain. Ce rapport classe les pays du monde en fonction de leur Indice de Développement Humain (IDH). L'IDH est un indice composite fondé sur trois critères majeurs : l'espérance de vie, le niveau d'éducation et le niveau de vie. P. Pigeon et R. d'Ercole (1999) reconnaissent cet indice comme marqueur de la vulnérabilité.

Or, plus l'IDH est faible plus la vulnérabilité est forte, une carte de la pauvreté d'un pays est, selon la croix Rouge, le meilleur indicateur de la vulnérabilité globale d'une population et la pauvreté n'est pas réductible au seul revenu, elle révèle bien souvent une privation des besoins essentiels en matière de santé, ce qui contribue à alourdir les pertes humaines en cas de catastrophe. Une éducation insuffisante, l'analphabétisme constitue un autre facteur aggravant la vulnérabilité.

Avec un IDH de 0.582, le Maroc continue à être classé comme un pays à revenu moyen à faible, et ceci malgré les efforts de développement significatifs entrepris depuis l'indépendance en 1956. De plus, les indicateurs de base du développement social au Maroc sont inférieurs à ceux observés parmi les pays de même niveau de revenu moyen (*indicateur d'espérance de vie à la naissance est 72.2 ans, indicateur des années pressenties de scolarisation est 4.4, indicateur du revenu par tête d'habitant (à parité de pouvoir d'achat en dollars) est 4.196*). Ces valeurs classent le Maroc au 130<sup>e</sup> rang parmi les 187 pays pour lesquels l'IDH a été calculé en 2011.

Cette « performance médiocre » (RDH50, 2006) est largement attribuée à des déficits significatifs en matière de santé et d'éducation. De plus, ce déficit de développement s'explique par une combinaison de facteurs, tels que le faible niveau de développement hérité à la fin de la période coloniale française et espagnole (1912-1956), le fort taux d'accroissement démographique observé jusqu'à très récemment, des politiques sociales souvent inefficaces, un effort traditionnel d'investissement essentiellement en zone urbaine aux dépens du monde rural, ainsi que de faibles taux d'accroissement économique (RDH50, 2006).

Au cours de la dernière décennie le Maroc a consenti des efforts considérables pour réduire la pauvreté. Entre 2001 et 2007, le taux de pauvreté relative a diminué, passant de 15,3% à 8,9% à l'échelle nationale. Par milieu de résidence, cette baisse est plus notable en milieu rural (de 25,1% à 14,4%) qu'en milieu urbain (de 7,6% à 4,8%) (HCP, 2010b).

En termes d'effectifs, 2,8 millions d'individus vivent encore au-dessous du seuil de pauvreté en 2007. Néanmoins, plus de 1,7 million en sont sortis et 1,2 million ont échappé à la vulnérabilité au cours de la période 2001-2007 (HCP, 2010b). Dans ces progrès, il est certain

que l'impact de l'Initiative Nationale pour le Développement Humain (INDH<sup>11</sup>) a été d'une portée significative malgré le caractère récent de sa mise en œuvre, la pauvreté a baissé plus rapidement dans les communes rurales ciblées par cette initiative. Entre 2004 et 2007, la pauvreté a baissé dans ces communes de 36% à 21% (Abdedine, 2012).

Concernant les communes du littoral atlantique, la carte de la classification des communes par niveau de pauvreté, publiée en 2007 (Figure 54), montre des situations très variées en termes de pauvreté (situations dégradées, moyennes et bonnes) et que, globalement :

- **les communes littorales du Sud** se trouvent dans des situations plutôt bonnes,
- **l'axe Kénitra – Agadir** connaît des taux élevés de population vivant en dessous du seuil de pauvreté, sauf dans les communes de Casablanca et Rabat – Salé, où le niveau de richesse d'une fraction de la population tire les statistiques vers le haut,
- **la péninsule tingitane (de Kénitra à Tétouan)** est une zone très contrastée où cohabitent des situations à la fois bonnes, moyennes et dégradées.

---

<sup>11</sup> **INDH** : Initiative Nationale pour le Développement Humain est un programme de développement novateur au Maroc, lancé en 2005 par le roi, et qui a pour objectif la réduction de la pauvreté, l'exclusion sociale et la précarité en particulier dans les zones rurales.

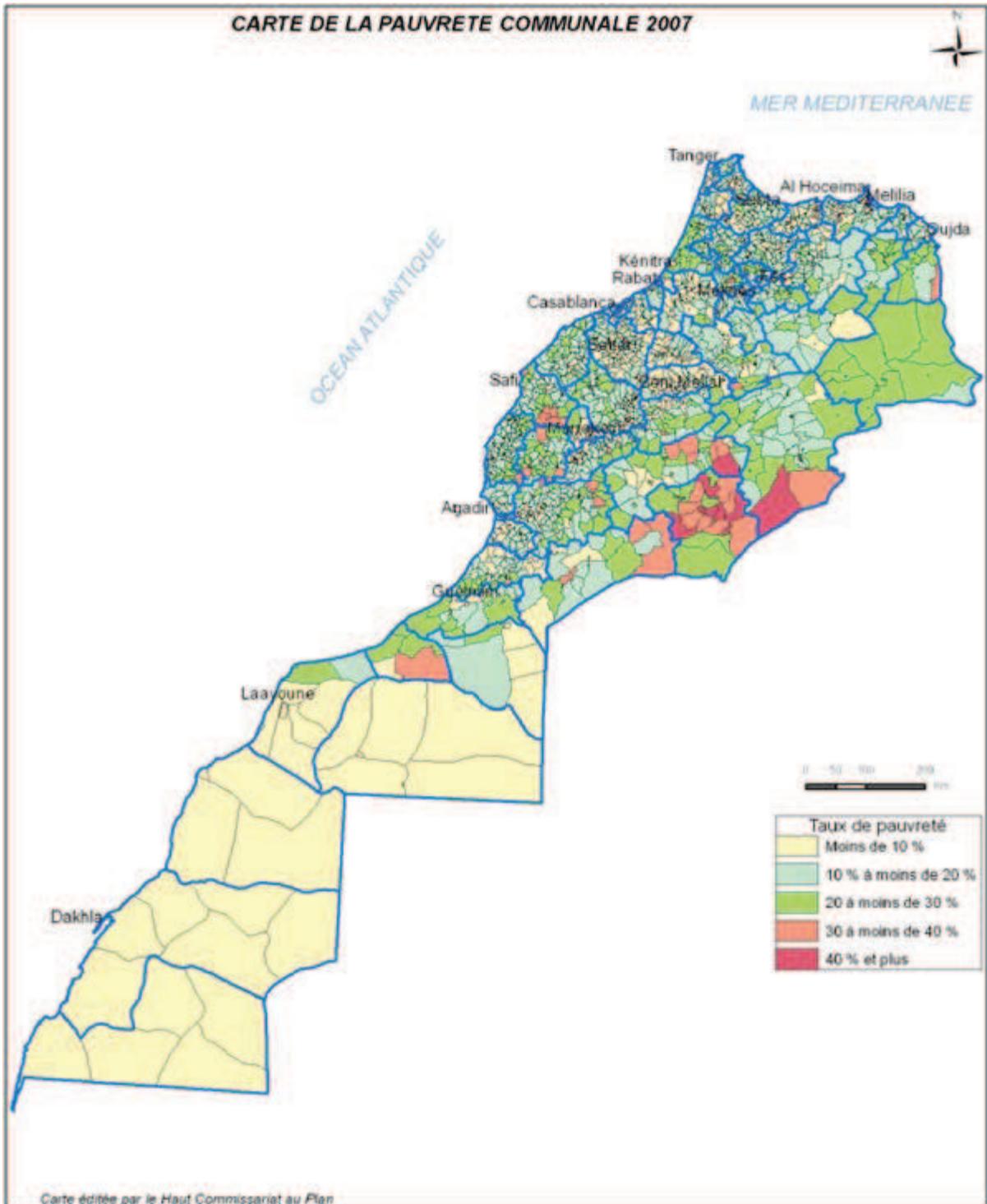


Figure 54. Carte de pauvreté communale du Maroc - 2007 (HCP, 2010b)

### 5.2.3. Enjeux industriels

En dépit des efforts importants déployés par les pouvoirs publics pour inciter à la décentralisation de l'industrie, le littoral atlantique demeure l'espace d'attraction par excellence des investissements industriels. Il abrite 77% des installations industrielles et 80% des emplois dans le pays, surtout le long de l'axe Kénitra- El Jadida.

La suprématie industrielle de cet axe peut être mesurée au niveau du poids et de la structure de l'appareil productif de ses villes. Cette région majeure abrite en effet, aujourd'hui, l'essentiel des industries modernes du pays, sur 2000 Km<sup>2</sup>, soit 0,28 % du territoire : 60 % des unités de production et près des 70% des emplois industriels. Elle dispose d'un tissu productif très diversifié et d'une gamme de production assez complète (Kaioua, 2005).

Le grand Casablanca, premier foyer industriel du pays, est au cœur de ce dispositif. À elles seules, la Wilaya de Casablanca, les préfectures de Mohammedia et Nouaceur rassemblent 36% des industries du pays, pour 45% des emplois (Figure 55) et la moitié du chiffre d'affaire industriel généré. Le reste de l'emploi industriel est concentré sur les principales agglomérations du pays (DAT, 2007).

L'agglomération commande et anime d'intenses mouvements de flux industriels à l'échelle du littoral atlantique moyen et du pays tout entier. Toutes les industries y sont présentes avec une prédominance des secteurs du textile, de la mécanique et l'électronique, de la chimie et de l'agro-industrie. La grande industrie, qu'il s'agisse des hydrocarbures (raffinerie de Mohammedia traitant plus de 75% des importations en pétrole brut du pays), des complexes de production de l'acide phosphorique (Jorf Lasfar à El Jadida), se trouve ainsi directement implantée dans cette zone.

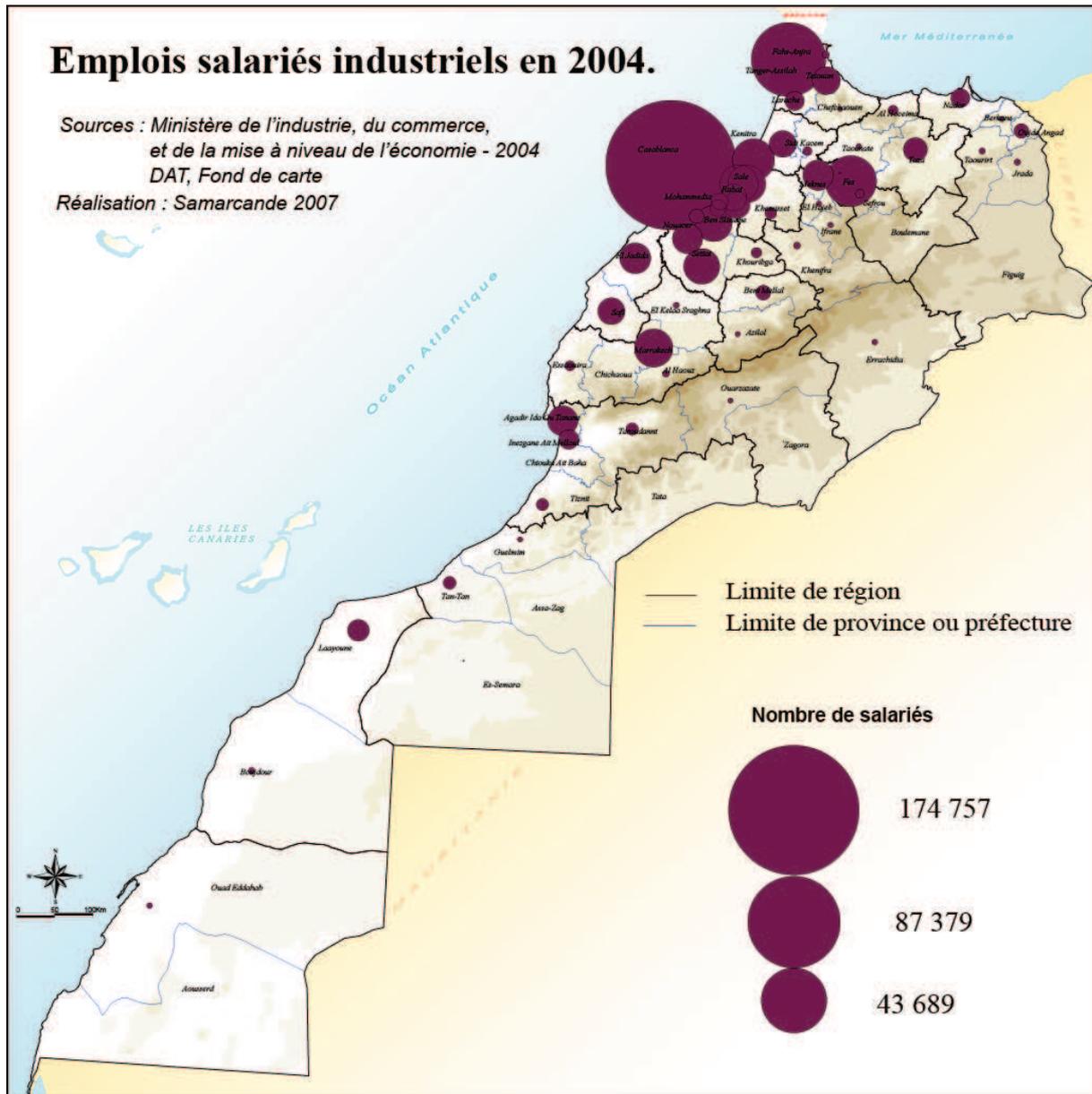


Figure 55. Répartition des emplois salariés industriels au Maroc en 2004 (DAT, 2007)

#### 5.2.4. Enjeux portuaires

Le Maroc dispose de deux façades maritimes : une façade méditerranéenne et une façade atlantique, pour un total de près de 3500 km de côtes. L'appareil portuaire marocain compte 38 ports dont (Figure 56):

- 13 ports ouverts au commerce extérieur (Nador, Al Hoceima, Tanger, Tanger-Med, Kénitra, Mohammedia, Casablanca, Jorf Lasfar, Safi, Agadir, Tantan, Laâyoune et Dakhla) ;

- 10 ports de pêche à vocation régionale (Ras Kebdana, El Jebha, M'diq, Larache, Mehdia, El Jadida, Essaouira, Sidi Ifni, Tarfaya et Boujdour) ;
- 9 ports de pêche à vocation locale (Cala Iris, Sidi Hssaine, Chmaala, Fnideq, Ksar Sghir, Assilah, Salé, Souiria Lakdima et Imesouane) ;
- 6 ports de plaisance (Saidia, Kabila, Marina Smir, Bouregreg, Sables d'or et Marina d'Agadir).

Ce sont des équipements d'une importance capitale puisque près de 98% du commerce extérieur marocain transite par les ports. En 2011, les ports du Maroc ont traité un trafic global de 96 millions de tonnes (4,3 millions de Passagers, 73,8 MT trafic domestique, 20,6 MT produits énergétiques, 22,9 MT phosphates et dérivés...) (source : ministère d'équipement et de transport).

Bien que le Maroc n'ait pas été épargné par l'aléa tsunami, révélé par plusieurs témoignages historiques, voire géomorphologiques (partie I), ni l'occurrence éventuelle d'un tel événement d'échelle planétaire ni la crise nucléaire au Japon ne semblent décourager le gouvernement marocain dans son ambition de lancer à l'horizon 2020 la construction de sa première centrale nucléaire sur le littoral atlantique entre Safi et d'Essaouira (Amar, 2011). Il s'agit donc d'une centrale qui aura une puissance estimée de 700 à 1.000 mégawatts.

La part du nucléaire dans le bouquet énergétique serait de 7% à l'horizon 2020. En 2020, 42% de la puissance électrique seront d'origine renouvelable, selon les prévisions de la Fédération de l'énergie. L'éolien s'accapare la part du lion dans le bouquet énergétique futur du Maroc avec une croissance qui devrait atteindre facilement 14% d'ici 2015. Le solaire, pour sa part, franchira le seuil psychologique de 5% dans 4 ans, pour s'établir à 14% en 2020, toujours selon la FE (Bouhrara, 2011).

Les parts du charbon et de l'hydraulique devraient logiquement diminuer au fur et à mesure que l'énergie renouvelable gagnera du terrain. Les prévisions de la FE montrent que la puissance électrique d'origine hydraulique devrait chuter à 14 % en 2020, alors qu'elle était de 29 % en 2008. Idem pour le charbon dont la contribution à la production de l'énergie reculera de 4 points d'ici 2020 (Bouhrara, 2011).

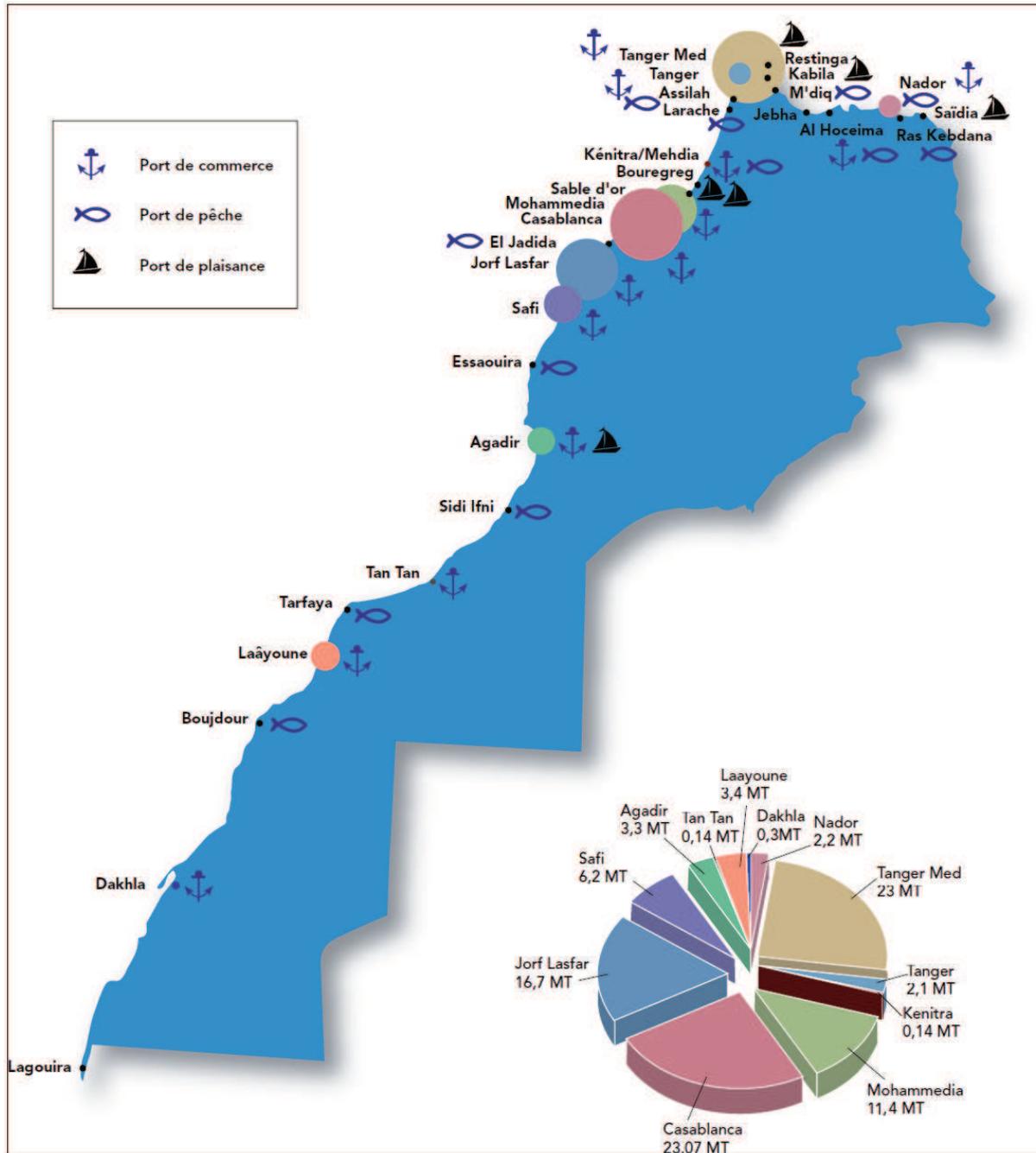


Figure 56. Carte des ports du Maroc et leurs trafics 2010 (source : ministère d'équipement et de transport. [www.mtpnet.gov.ma/](http://www.mtpnet.gov.ma/))

### 5.2.5. Enjeux touristiques

Le secteur touristique est considéré au Maroc comme un secteur prioritaire de l'économie nationale depuis les années 60, et est devenue ces dernières années une importante source de revenus et la seconde source de devises du pays ; grâce à un volume croissant de touristes reçus et de complexes touristiques.

La majorité des touristes étrangers et nationaux est attirée par les séjours au bord de la mer, les tours opérateurs commercialisant de préférence les produits balnéaires. De ce fait et

malgré la diversité des produits touristiques marocains, on assiste à une concentration progressive dans l'espace de l'offre et de la demande et à un basculement du tourisme marocain vers le littoral. Ce dernier concentre 51% de la capacité litière et 54% de nuitées touristiques (HCP, 2010a).

Le littoral atlantique occupe par ailleurs 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 (MATEE, 2005).

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 politique de développement touristique volontariste susceptible de déclencher une dynamique de développement durable et intégré, il s'agit de la «vision 2010» (INEA, 2008). Cette stratégie retient un positionnement offensif sur le balnéaire et la réalisation de six nouvelles stations tout en visant la consolidation des stations balnéaires existantes. Ces dernières seront mises en place dans le cadre du « plan Azur » avec la réalisation de six complexes et la création de 120 000 lits dont 85 000 lits hôteliers. Parmi les stations projetées, cinq sont situées sur le littoral atlantique. Il s'agit de la station Port Lixus, près de Larache, à Khmis Sahel, de la station Mazagan, près d'El Jadida, à El Haouzia, de la station Mogador, à Essaouira, de la station Taghazout, entre Agadir et le Cap Guir et de la station de Plage Blanche, au Sud de Guelmim. La station Saïdia-Mediterrania est située sur la côte méditerranéenne, à proximité de la frontière algérienne (Figure 57).

La Vision 2010 a déclenché une dynamique importante pour le développement du secteur, qui a enregistré des résultats positifs sur le plan de l'investissement, du transport aérien et de la promotion. Ces avancées se sont traduites par des performances touristiques appréciables, notamment en termes d'arrivées (9.3 millions de visiteurs en 2010 correspondent à un écart de 7% par rapport aux 10 millions de touristes ciblés par la vision).

Dans une logique de continuité, le Maroc souhaite se doter d'une approche stratégique qui délivre une vision prospective du secteur touristique à horizon 2020, à travers la construction d'une offre solide, différenciée, diversifiée et équilibrée.

La nouvelle stratégie sectorielle « Vision 2020 » vise à consolider les acquis de la vision 2010 et le tourisme marocain dans son rôle de moteur du développement économique, social et culturel du Maroc, et à hisser le Maroc parmi les 20 premières destinations touristiques mondiales à l'horizon 2020, tout en s'imposant comme une destination de référence en matière de développement durable sur le pourtour méditerranéen. La poursuite du positionnement offensif sur le balnéaire est assurée par l'achèvement du nouveau Programme Azur 2020.

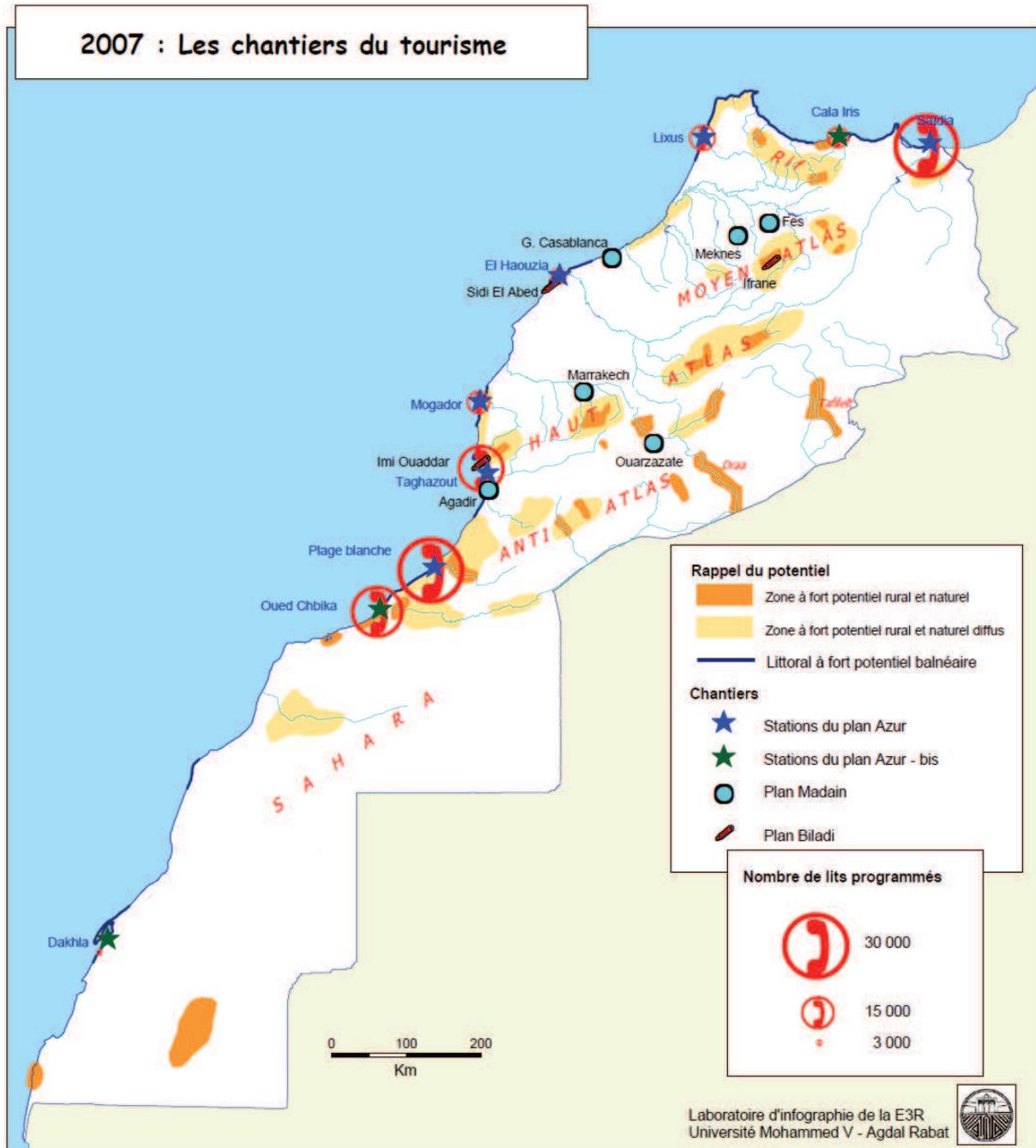


Figure 57. Les grands chantiers touristiques au Maroc - 2007 (Berriane, 2007)

### **5.2.6. Enjeux hydrologiques et agricoles**

Le littoral atlantique recèle des ressources en eau très importantes. Il est le point d'aboutissement des principaux réseaux hydrauliques du pays, parmi eux, deux grands fleuves sont permanents : le Sebou et l'Oum Rabia, 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, comme beaucoup d'autres oueds sahariens.

A eux seuls, les trois grands fleuves : le Sebou, le Bouregreg et l'Oum Rabia, totalisent le tiers de l'ensemble du potentiel hydrique 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 (MATEE, 2005).

A côté de ces grands périmètres agricoles, on retrouve au niveau du littoral atlantique, des zones dites Oulja : il s'agit d'une bande étroite constituée de terres sablonneuses, faciles à travailler, 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 vers les grands centres urbains côtiers (MATEE, 2005).

Ainsi il apparaît que les plaines littorales de la façade atlantique, grâce à la douceur de leur climat, à la relative abondance des précipitations sont ainsi devenues le principal grenier du Maroc moderne (MATEE, 2005).

### **5.2.7. Enjeux patrimoniaux**

Partout, le littoral marocain abrite des vestiges de l'histoire civilisationnelle du pays. Ces vestiges, lorsqu'ils sont préservés, présentent un intérêt scientifique, culturel et touristique

particulier, l'essentiel étant représenté par les sites archéologiques (préhistoriques, antiques, islamiques) et les médinas. Il est intéressant de souligner également la valeur patrimoniale et paysagère des nombreux mausolées et cimetières parsemant le littoral marocain (INEA, 2008).



Figure 58. La grande Mosquée Hassan II à Casablanca

*La Grande Mosquée Hassan II figure parmi les plus grands bâtiments religieux au monde ; L'ensemble du site couvre environ 9 ha dont les deux tiers sont implantés sur mer. La salle de prière principale peut accueillir 25 000 personnes tandis que 80 000 fidèles environ peuvent se regrouper dans l'enceinte générale. La mosquée abrite d'autre part un centre coranique, une bibliothèque et un musée.*

On relève également vers Tanger l'intérêt des remparts de la médina d'Asilah et les grottes d'Hercule. La côte Nord-orientale montre peu de vestiges archéologiques, lesquels sont cependant très intéressants, notamment ceux Al Mazamma/Ajdir, de Nakûr et de Ghasasa.

Sur la côte Ouest, il faut signaler trois sites de grand intérêt situés au niveau du détroit de Gibraltar : Ksar Sghir, Oued Lyam et Belyounech. L'archipel d'Essaouira, quant à lui, revêt une importance archéologique particulière car il abrite non seulement des vestiges grecs, phéniciens et romains mais aussi d'anciens bastions portugais qui datent des XVIIème et XVIIIème siècles. (INEA, 2008)

### **5.3. Caractériser l'occupation du littoral atlantique marocain au moyen des bases de données existantes**

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.

#### **5.3.1. 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 km<sup>2</sup> 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 59). 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 (Mellas et al., 2012).

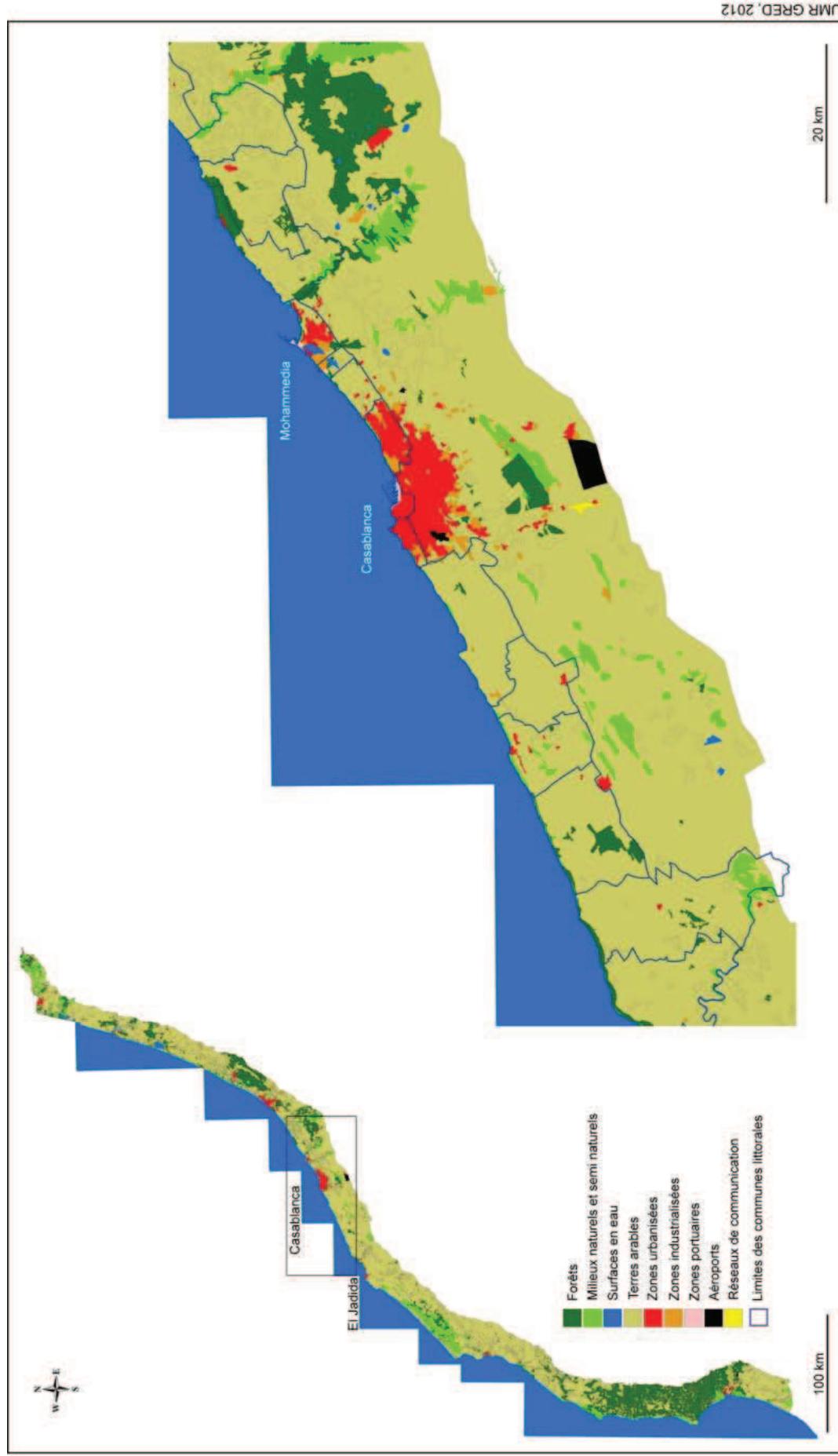
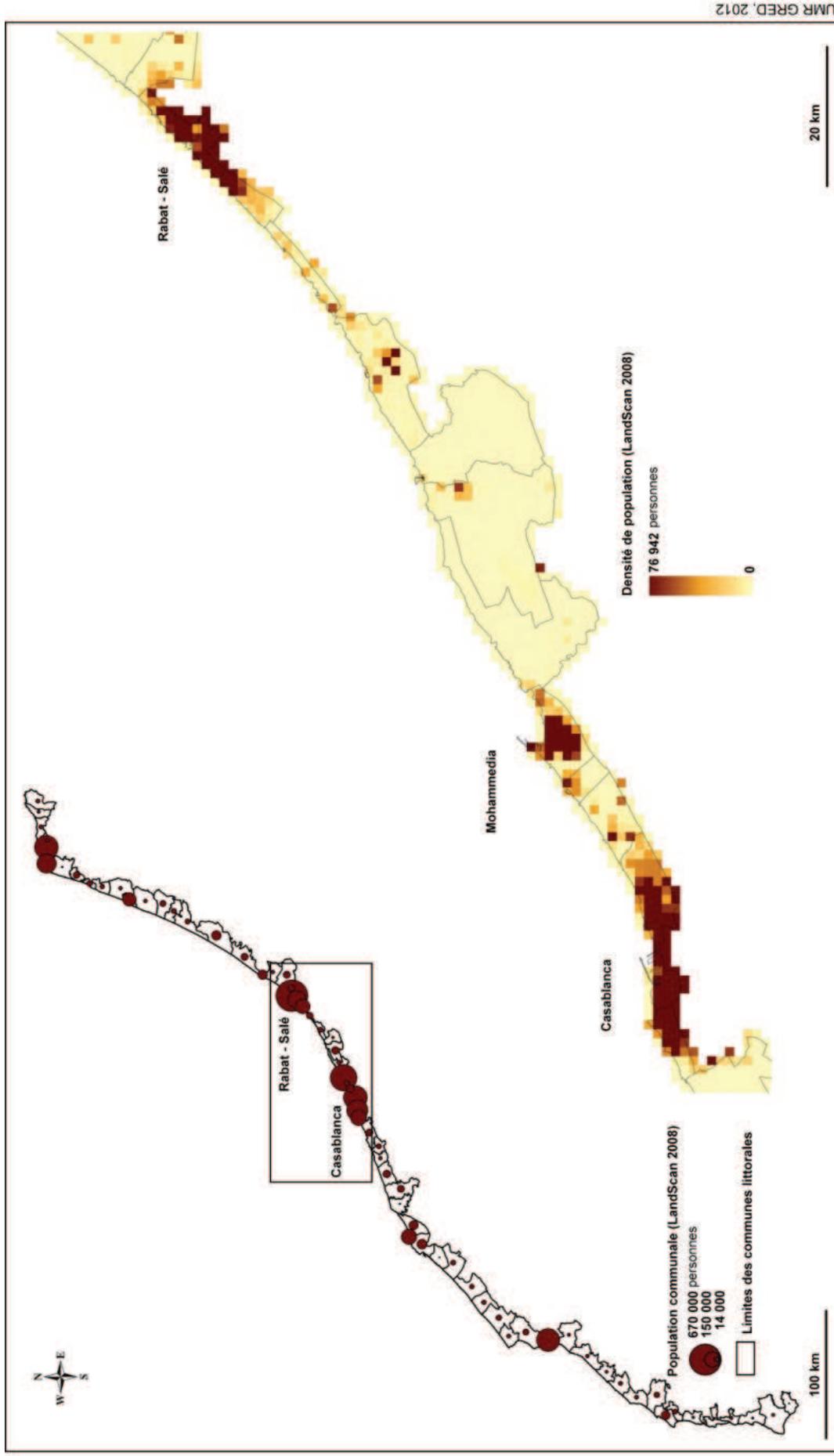


Figure 59. Extraits de la base de données MEDGEOBASE/Maroc sur le littoral atlantique (typologie simplifiée de l'occupation du sol selon 9 classes) (Mellas et al., 2012).

### 5.3.2. 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 km<sup>2</sup>, ce qui autorise une grande précision dans l'affichage des enjeux humains (Figure 60). 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, 2008). 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 (Mellas et al., 2012).



UMR GRED, 2012

Figure 60. Extraits de la base de données Landscan 2008 sur le littoral atlantique du Maroc (population) (Mellas et al., 2012).

#### **5.4. Choix d'un maillage territorial de référence**

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.

## 5.5. Résultats cartographiques

Les indicateurs d'exposition à la submersion par tsunami ont été exprimés en valeur absolue et/ou relative (annexe 2). 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 61, 62 et 63).

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 de 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 km<sup>2</sup> 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 km<sup>2</sup> 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 (Omira *et al.*, soumis).

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.

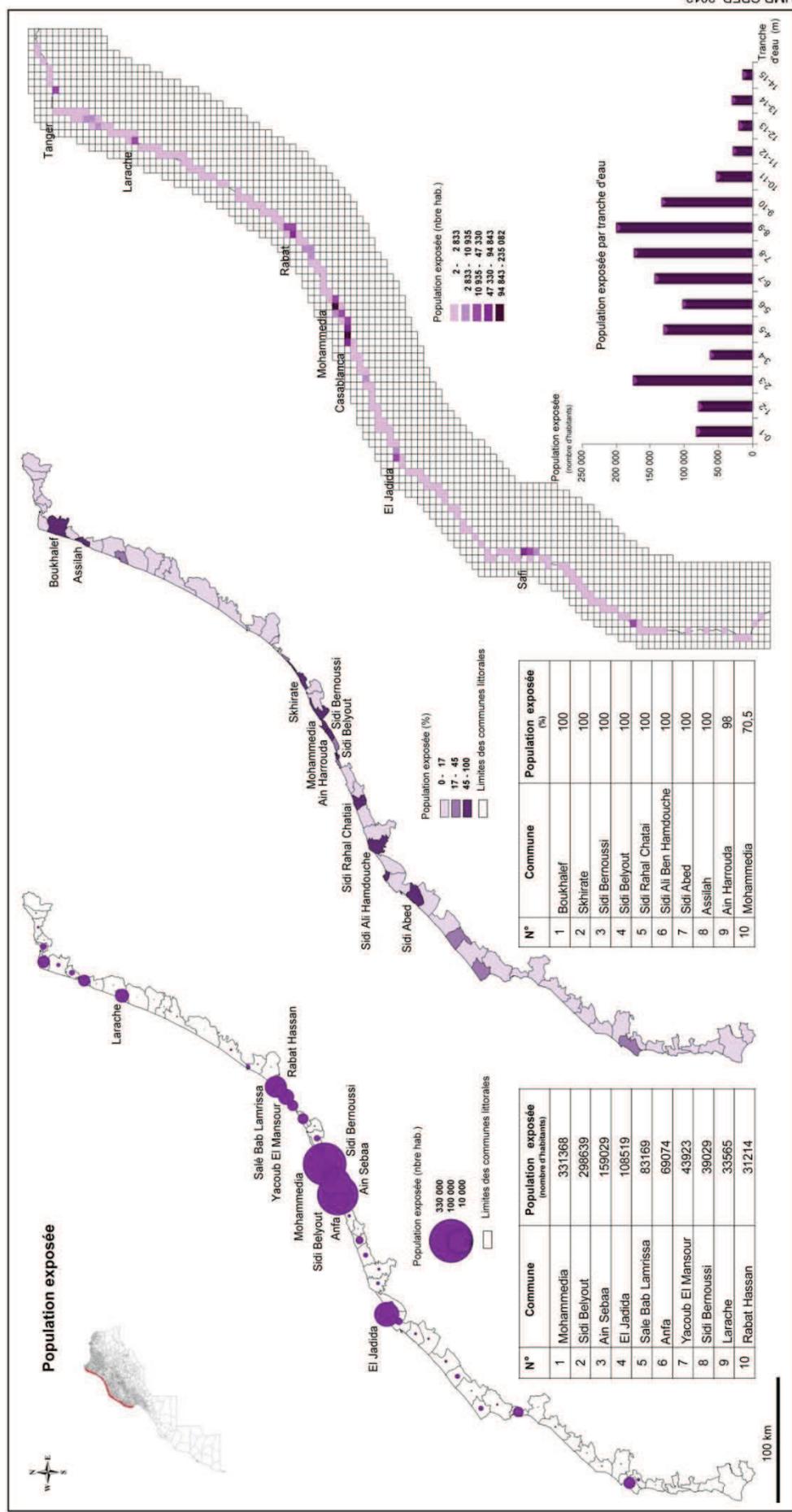


Figure 61. Indicateurs d'exposition humaine à la submersion marine par tsunami (scénario type 1755, source HSF).

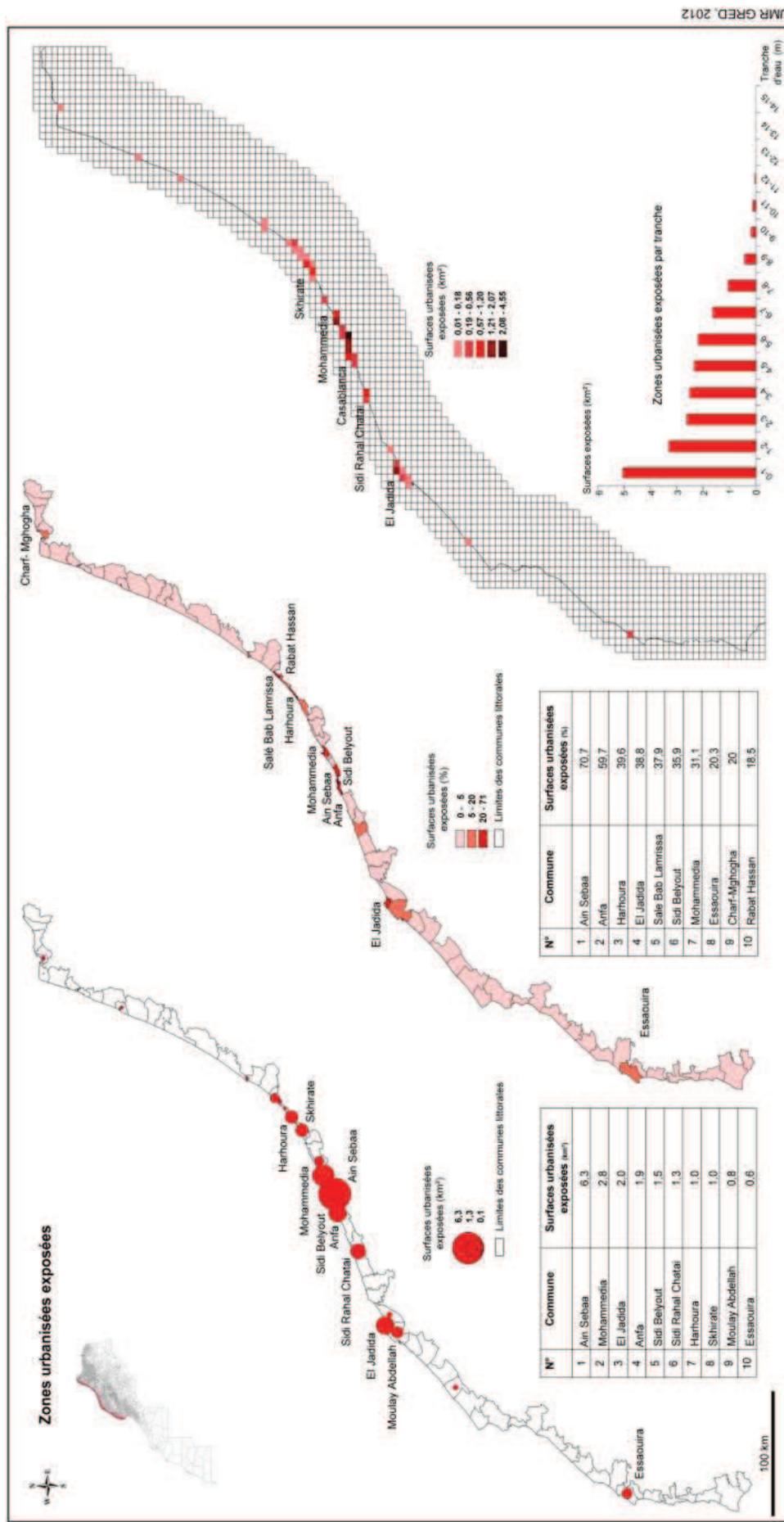


Figure 62. Indicateurs d'exposition urbaine à la submersion marine par tsunami (scénario type 1755, source HSF).

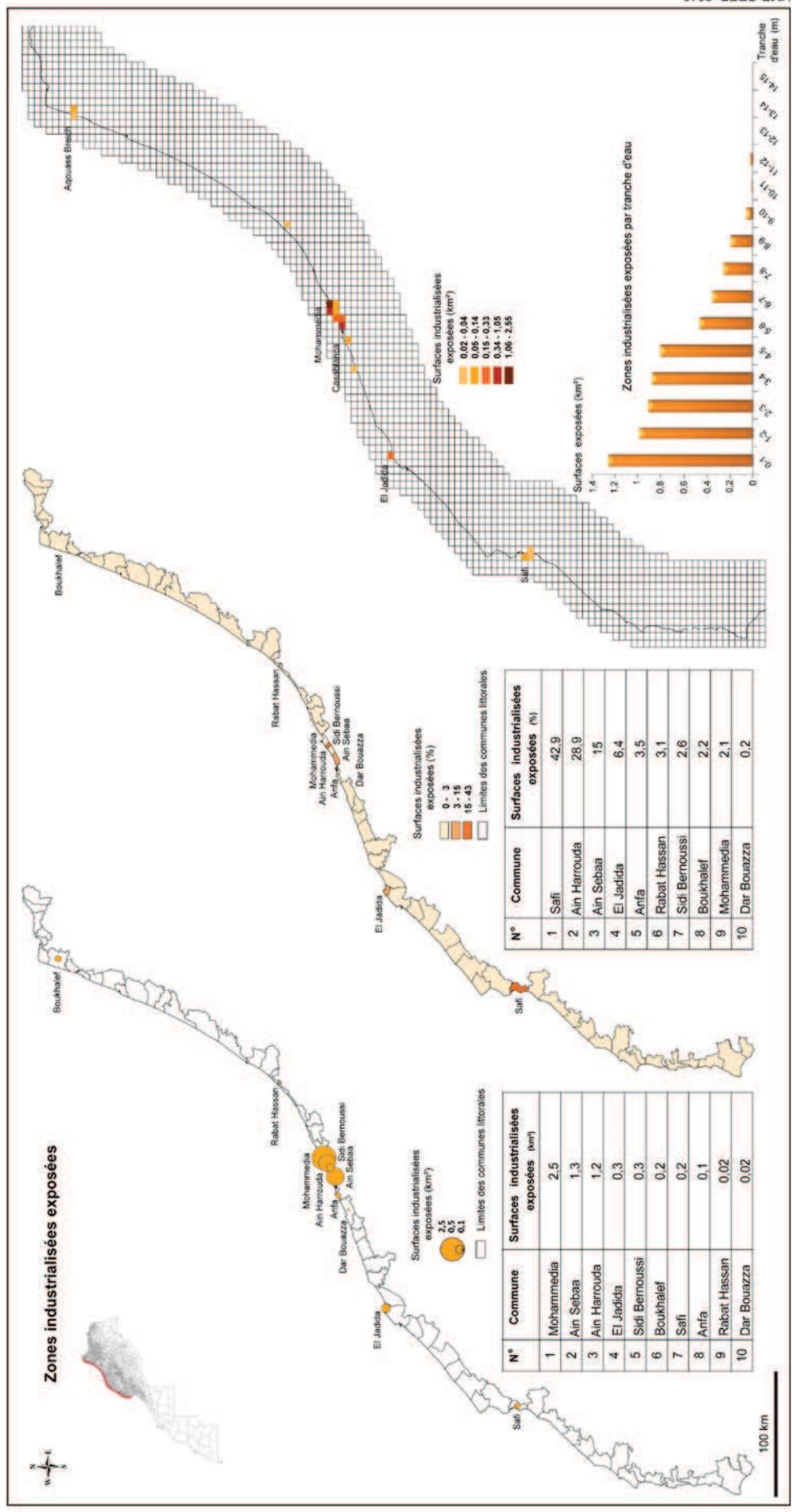


Figure 63. Indicateurs d'exposition industrielle à la submersion marine par tsunami (scénario type 1755, source HSF).



## Chapitre 6<sup>e</sup> : Les indices de risque humain à El Jadida

### 6.1. Introduction

Ce chapitre consiste à évaluer, quantifier et spatialiser le risque de pertes humaines en cas de tsunami majeur sur El Jadida au moyen de géo-indices de risque. La vulnérabilité y sera traitée en tant qu'une propension à subir l'endommagement (Leone, 2007), dont les valeurs seront données par des matrices de probabilités de décès, fondées sur les données de la submersion marine issues de la modélisation numérique couplée à la répartition spatio-temporelle des individus exposés au pas horaire. Ces matrices sont adaptées à l'environnement des personnes en intégrant les facteurs de vulnérabilité extrinsèques qui s'appliquent. Elles intègrent en particulier les courbes de fragilité du bâti développées par Leone et al., en 2010 après le tsunami de 2004 en Indonésie. Cette approche *a priori* (ou prospective) de la vulnérabilité entre dans la notion de scénario de risque et de modélisation des pertes potentielles. Il en résulte des cartes indiciaires permettant de visualiser le niveau de risque pour les personnes, sa variabilité spatiale et temporelle, au sein de la ville d'El Jadida. On obtient ainsi une cartographie dynamique du risque (Leone et al., 2012).

### 6.2. Présentation de la ville d'El Jadida

#### 6.2.1. Contexte historique

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<sup>ème</sup> et 13<sup>ème</sup> siècles. Le géographe Chérif Al Idrissi évoque dans un de ses livres, paru à la moitié du 12<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> siècle que la ville va connaître son réel essor.

En 1502, les Portugais s'installèrent pour la première fois sur le site de Mazagan en 1502, placé sous protectorat de la couronne portugaise dès 1486. Le nom de Mazagan apparaît dans

des documents arabes et étrangers depuis le XI<sup>e</sup> siècle, prononcé «Mazagão<sup>12</sup> » en portugais. La seule construction sur le site fut d'abord une tour appelée El-Brija. Après quelques années d'occupation passées dans des constructions temporaires, les Portugais décidèrent de construire une citadelle (1514) conçue par les frères Francisco et Diogo de Arruda qui travaillèrent aussi sur des fortifications de médinas marocaines. En 1541, après la perte d'Agadir, les Portugais décidèrent d'agrandir la citadelle et de construire des fortifications. De 1541 à 1548, la ville de Mazagan connut un développement rapide, avec la construction d'ensembles religieux, d'une grande importance à cette époque de confrontations religieuses. À la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, les fortifications abritaient quatre églises et plusieurs chapelles (UNESCO, 2004).

Après plus de deux siècles et demi d'occupation, la période lusitanienne de Mazagan, dernière des forteresses portugaises au Maroc, prit fin en 1769. Suite au traité de paix signé avec le sultan Sidi Mohamed Ben Abdallah (1757- 1790), les Portugais furent contraints de quitter la place par la porte de la Mer dans la plus grande hâte sans emporter aucun de leurs biens ; ils trouvèrent cependant le temps de miner l'entrée principale du fort qui explosa lorsque les Marocains forcèrent l'entrée. Ces explosions firent de nombreuses victimes parmi les Marocains et provoqua la destruction du bastion du Gouverneur et d'une grande partie du rempart. La ville resta vide pendant près d'un demi-siècle ; on l'appela al-Mahdouma, « la ruinée ». Au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, le sultan Moulay Abderrahman ordonna au pacha de la région de relever les parties détruites des fortifications (dans un style quelque peu différent du reste), de construire une mosquée et de restaurer l'ancienne ville portugaise. Le nom de Mazagan fut interdit et la ville s'appela «al Jadida», «la Nouvelle» ou «la Neuve» (UNESCO, 2004).

---

<sup>12</sup> 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).

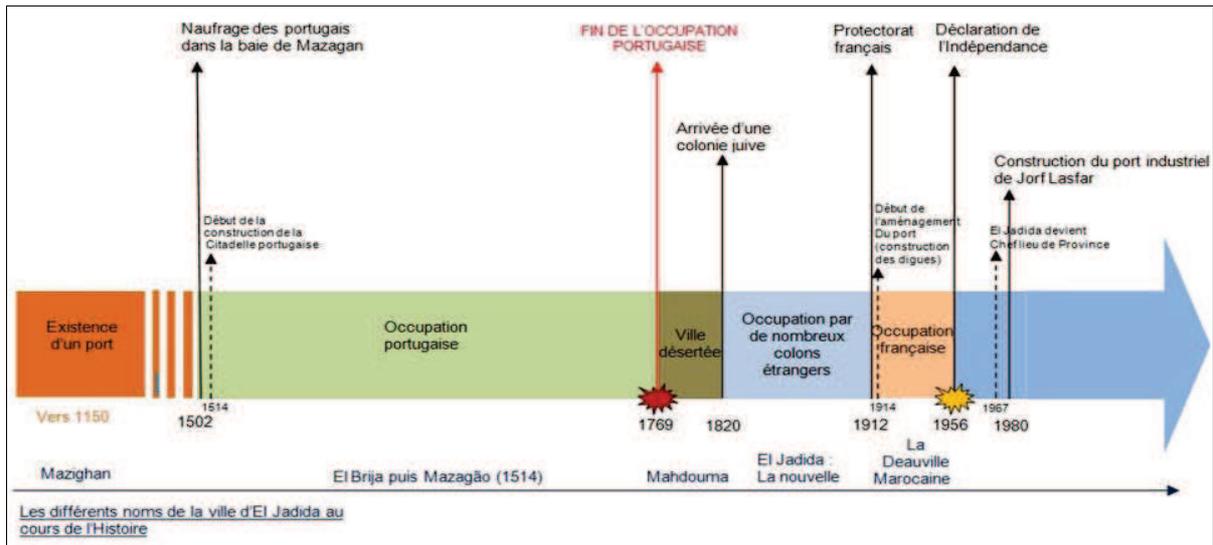


Figure 64. Frise chronologique des grands événements historiques de la ville d'El Jadida (sources : Chahid et Lekhiar, 2006 ; Direction Régionale Doukkala-Abda., 2008). (Leone et al., 2012)

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 64). 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<sup>e</sup> 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.

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.

### **6.2.2. Contexte géographique**

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 régions<sup>13</sup> du Maroc. Elle est composée de quatre provinces, d'El Jadida, de Sidi Bennour, de Safi et de Youssoufia ; les deux premières provinces correspondent à la région historique de Doukkala et les deux dernières, approximativement, à celle d'Abda (Figure 65). Ces quatre provinces sont subdivisées en 10 communes urbaines et 78 communes rurales (Direction Régionale Doukkala-Abda, 2009). Située au Sud de la plaine centrale, sur la côte atlantique, la région Doukkala-Abda s'étale 13285 km<sup>2</sup> (Selon le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement), soit 1.9% de la superficie totale du Maroc, pour une population de 2,07 millions d'habitants, soit 6,5% de la population nationale (Direction Régionale Doukkala-Abda, 2008 ; MHUAE, 2009). La région est à prédominance rurale. La population urbaine représente en 2008, 37.1% de l'ensemble de la population de la région.

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-

---

<sup>13</sup> 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).

Sidi Moussa, la succession de grandes falaises continues entre le Cap Beddouza et Safi (Zourarah, 2002 in Knapik, 2009).

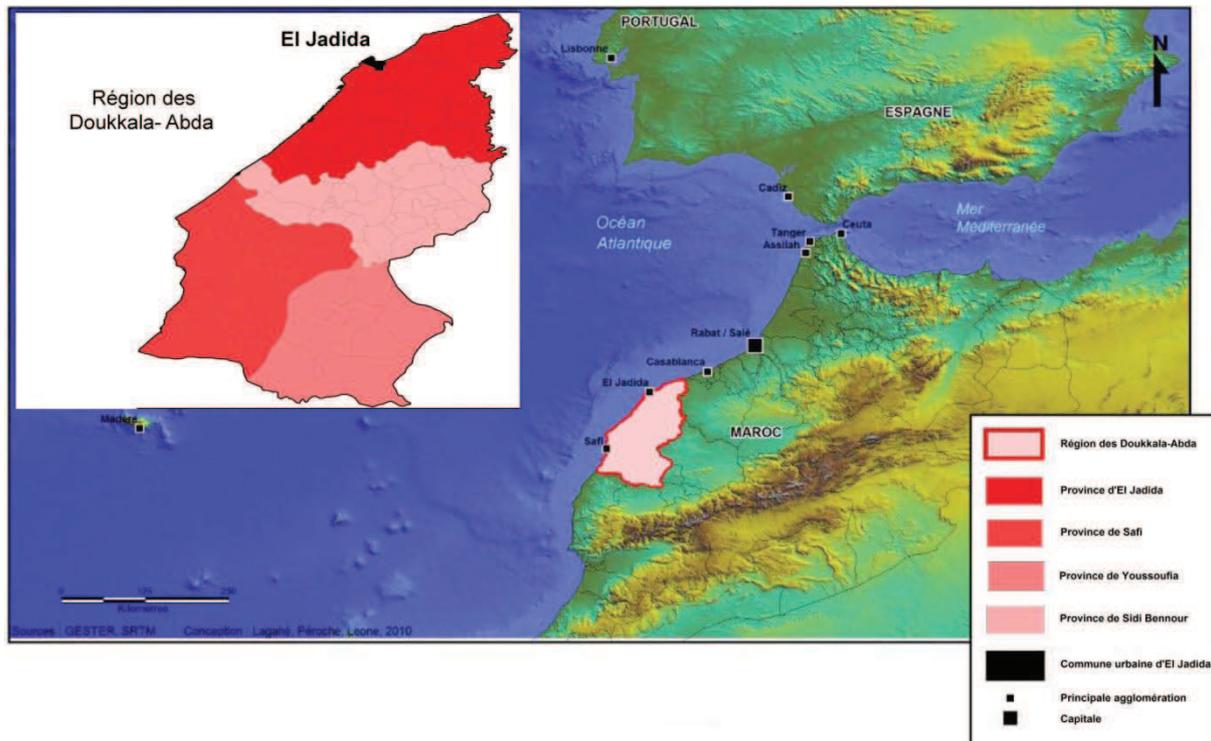


Figure 65. Découpage administratif de la région des Doukkala-Abda (Leone et al., 2012).

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. / km<sup>2</sup>, contre 42,1 hab. / km<sup>2</sup> 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 66). 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).

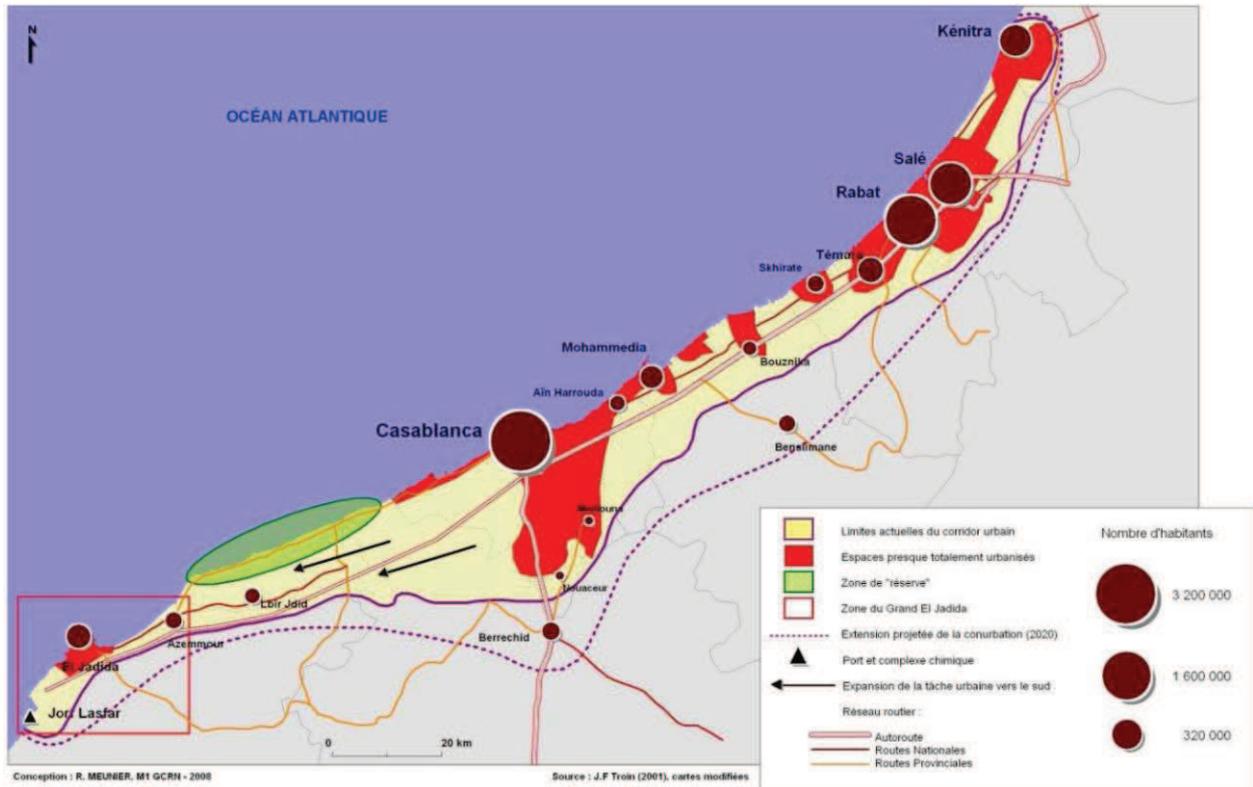


Figure 66. L’insertion du Grand El Jadida dans le corridor urbain moyen atlantique (d’après Troin, 2002).

A une autre échelle la ville d’El Jadida joue un rôle important au sein du grand El Jadida (Figure 67). 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 trois 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.

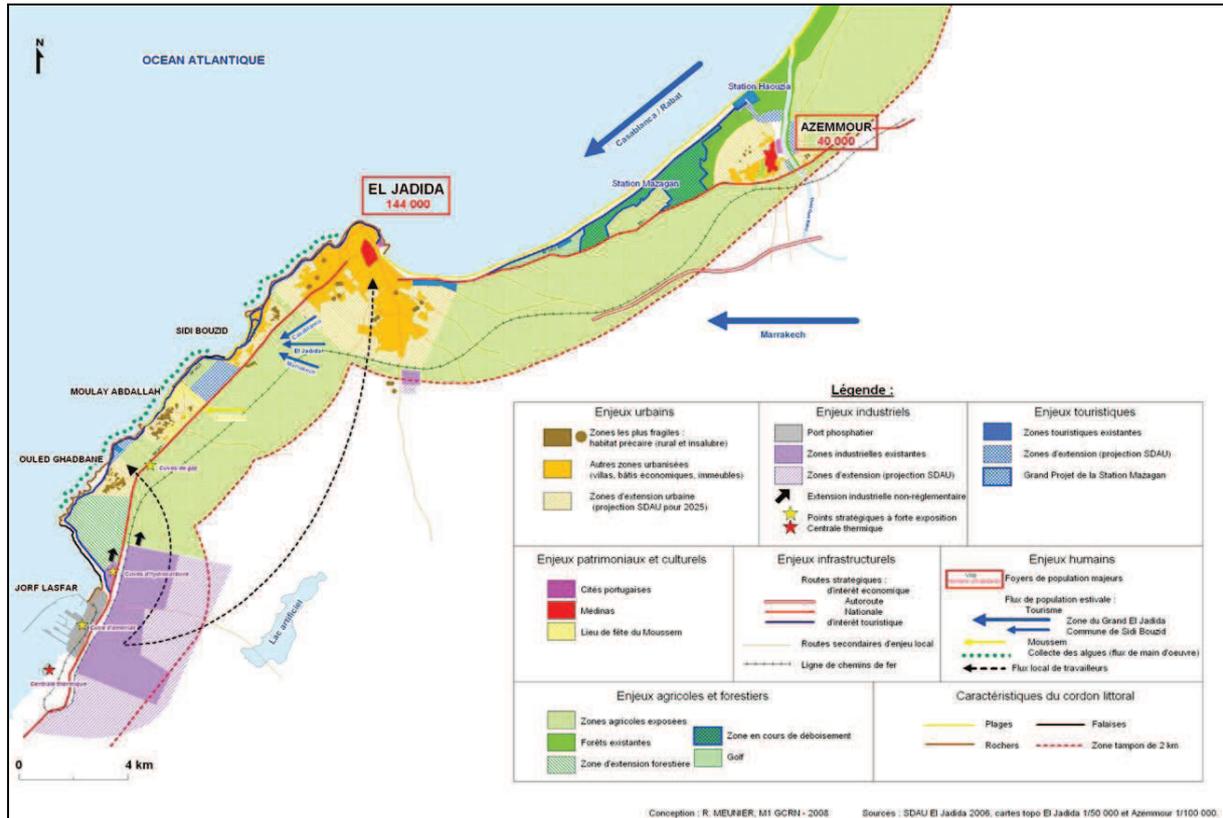


Figure 67. Les principaux enjeux littoraux du Grand El Jadida (d'après SDAU, 2006).

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.

### 6.3. Evaluation de la vulnérabilité humaine sur la ville d'El Jadida

Ce chapitre 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). La vulnérabilité y sera considérée comme une propension à subir l'endommagement. Sa caractérisation repose sur l'analyse des interactions entre différents facteurs, à la fois intrinsèques aux individus, mais également extrinsèques (ou environnementaux) (Leone et al., 2012).

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 (Leone et al., 2012).

#### 6.3.1. La vulnérabilité humaine *a posteriori* : les enseignements des retours d'expérience

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.

##### 6.3.1.1. Facteurs physiologiques

A la lumière de ces différents retours d'expérience il apparait 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 68 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.

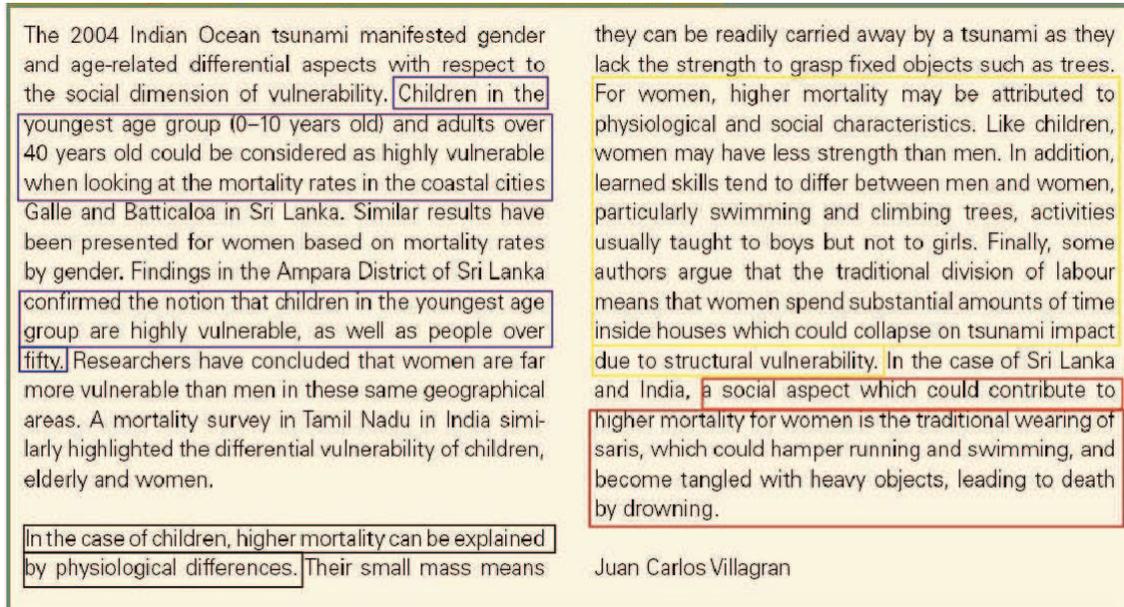


Figure 68. Les différences physiologiques et sociales entre les « genres » dans la vulnérabilité sociale (IOC-UNESCO, 2009).

*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 69).



Figure 69. Importance du flot de débris du tsunami de 2004 à Banda Aceh (source vidéo Internet).

#### 6.3.1.2. Facteurs géographiques

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 1, témoignage 1).

Par exemple le tsunami du 26 décembre 2004 a eu lieu en période de Noël, au moment où de nombreux touristes se 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.

### 6.3.1.3. 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 nombres de vies (Encadré 1, 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 eu 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 J.C. Gaillard (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](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 1. 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) appelle 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.

#### 6.3.1.4. 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'irrédentisme (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 70).

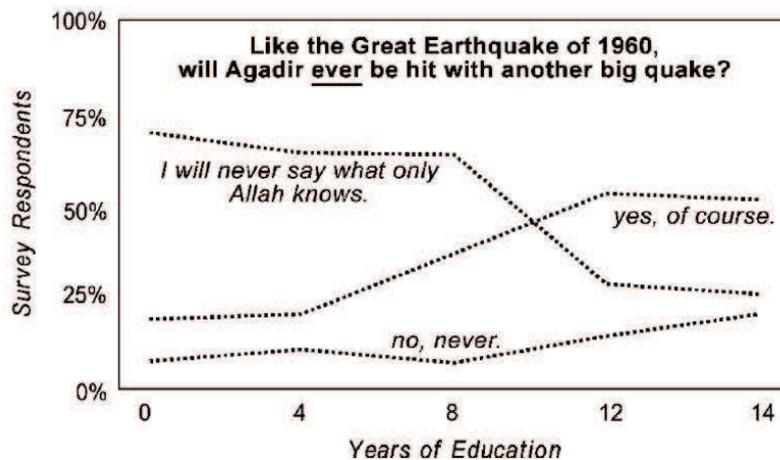


Figure 70. Perception du risque au travers de l'éducation (Paradise, 2005).

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.

#### 6.3.1.5. Facteurs socio-économiques

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 5). 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. Or ces derniers influencent largement les facteurs liés à l'individu.

Tableau 5. Principaux facteurs de vulnérabilité humaine (individu) et critères d'évaluation associés (Leone et al., 2012)

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

### 6.3.2. Zone de diagnostic de vulnérabilité et le SIG

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 NW-SE (Figure 71). 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).

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 km<sup>2</sup>. 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.

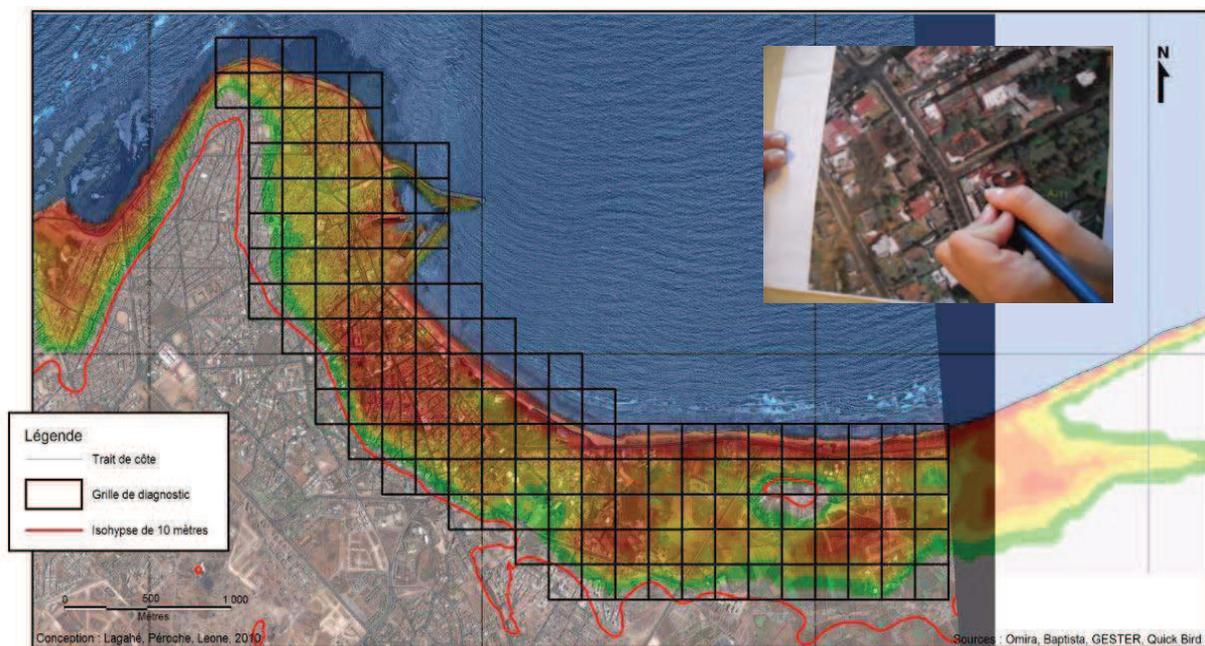


Figure 71. Zone de diagnostic de vulnérabilité comprise dans l'enveloppe de l'inondation (tsunami de 1755, source HSF).

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 (Figure 72 et 73) : 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.

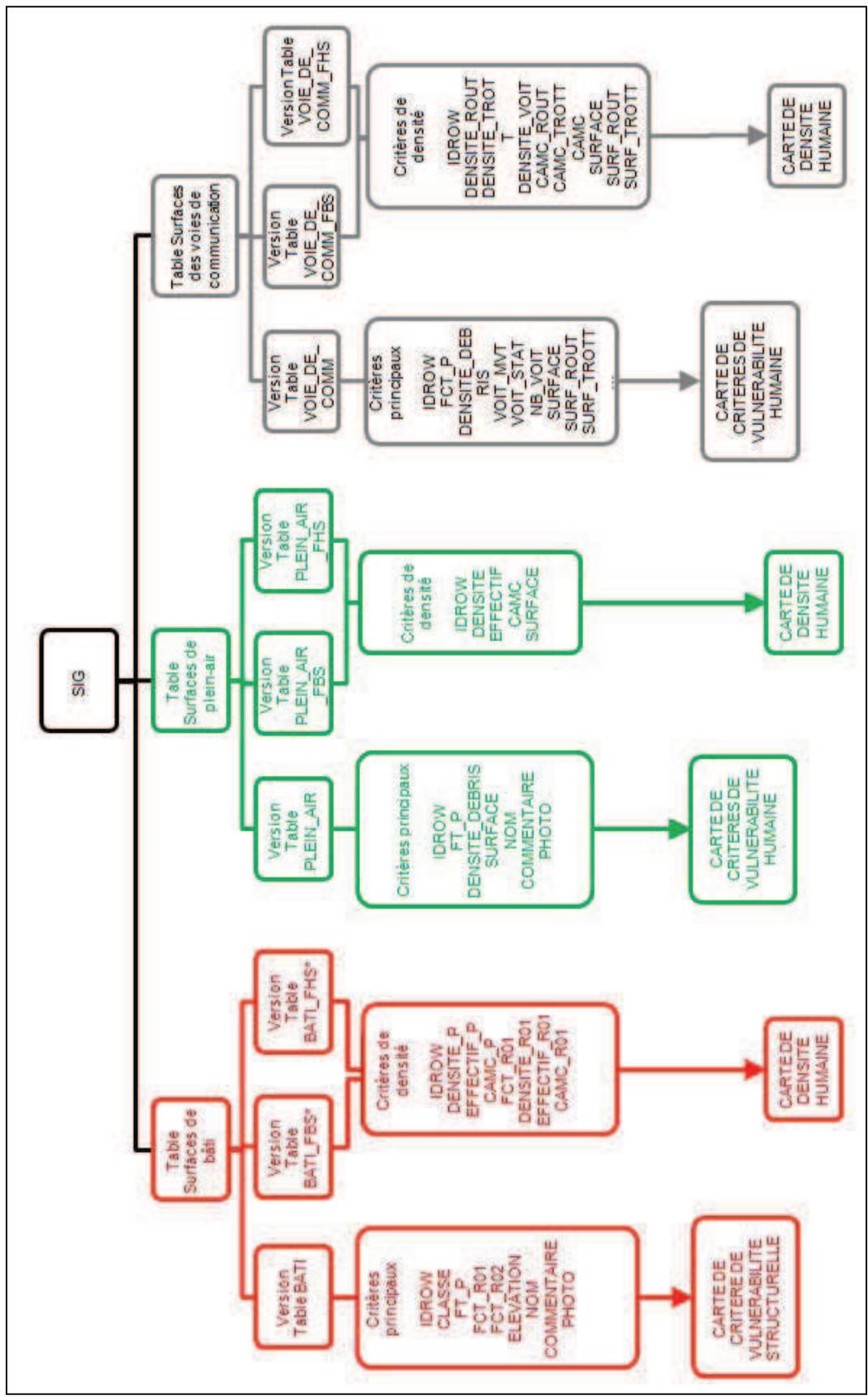


Figure 72. Structure générale du SIG développé sur El Jadida (FHS: Fréquentation Haute Saison, FBS: Fréquentation Basse Saison). (Leone et al., 2012).

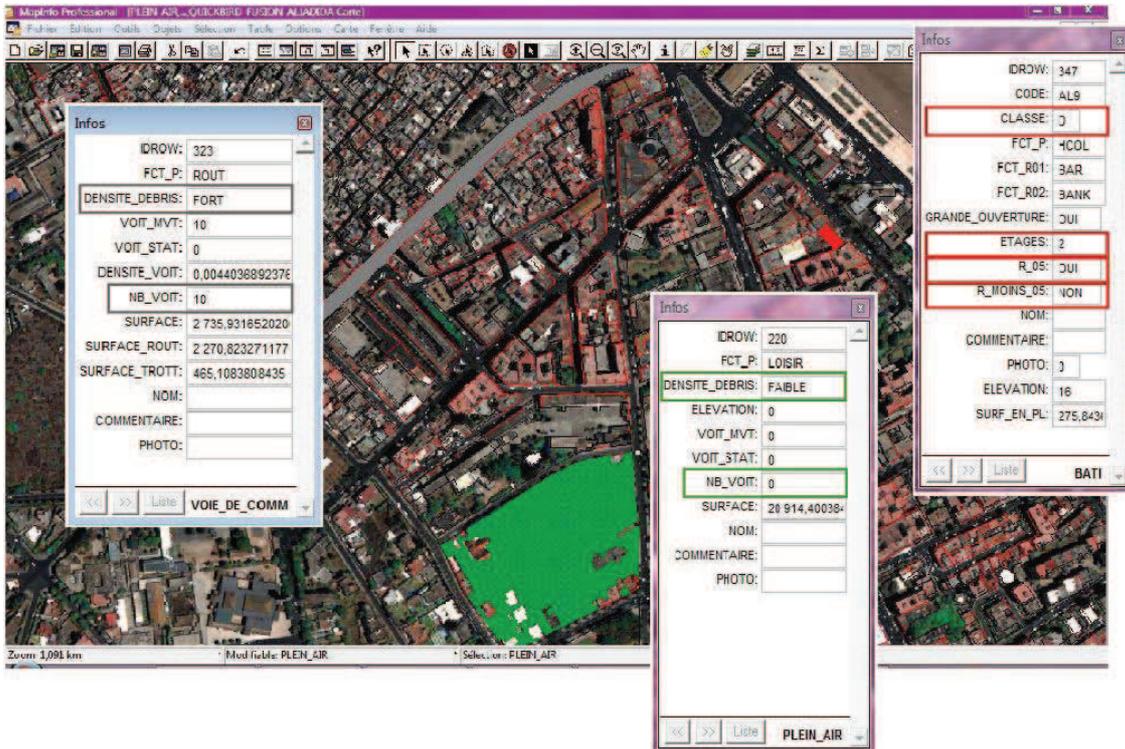


Figure 73. Capture d'écran du SIG et critères de vulnérabilité humaine renseignés pour chaque type d'espace (Leone et al., 2012).

### 6.3.3. Critères d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments

Dans le cadre du retour d'expérience sur le tsunami de décembre 2004 en Indonésie, Leone et al. (2010) ont développé une démarche méthodologique reproductible permettant l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments. Ils ont mis au point une typologie simplifiée des bâtiments en fonction de leur vulnérabilité structurelle, dépendante de la qualité architecturale et des matériaux utilisés pour leur construction (Tableau 6).

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).

Tableau 6. Classification du bâti indonésien selon 5 classes de vulnérabilité décroissante (Leone et al., 2010).

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

Une classification du bâti existante pré-catastrophe a été établie en 5 classes de vulnérabilité décroissante. Ces classes sont déduites du diagnostic d'endommagement établi après plusieurs phases de validation de terrain (Leone et al., 2010).

Les dommages quant à eux sont 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 7).

Tableau 7. Typologie des dommages définis en Indonésie (Banda Aceh). (Leone et al., 2010).

Modes et niveaux d'endommagement du bâti (tsunami - Banda Aceh)						
	D0	D1	D2	D3	D4	D5
<b>Critères d'identification terrain</b>	Aucun dommage ou dommages imperceptibles un an après	Domages négligeables à légers sans affectation des structures (mobilier, abords et toitures abîmés, débris déposés dans les bâtiments)	Domages importants mais sans affectation des structures (murs et cloisons défoncés ou perforés, fenêtres et portes arrachées, toitures partiellement arrachées)	Domages aux structures pouvant affecter la stabilité du bâtiment (fracturation des piliers, effondrement partiel des planchers)	Domages lourds aux structures avec effondrement partiel du bâtiment	Destruction totale du bâtiment avec ou sans arasement
<b>Photo terrain</b>						
<b>Classe de bâti illustrée</b>	A	C	C	B	C	B
<b>Visibilité aérienne</b>	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
<b>Photo aérienne</b>						
<b>Niveau de récupération</b>	Bâtiments habitables			Bâtiments à évacuer mais réparables		Bâtiments irrécupérables

L'exploitation statistique des dommages a permis la construction des toutes premières courbes d'endommagement du bâti en milieu urbain (Figure 74). 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.

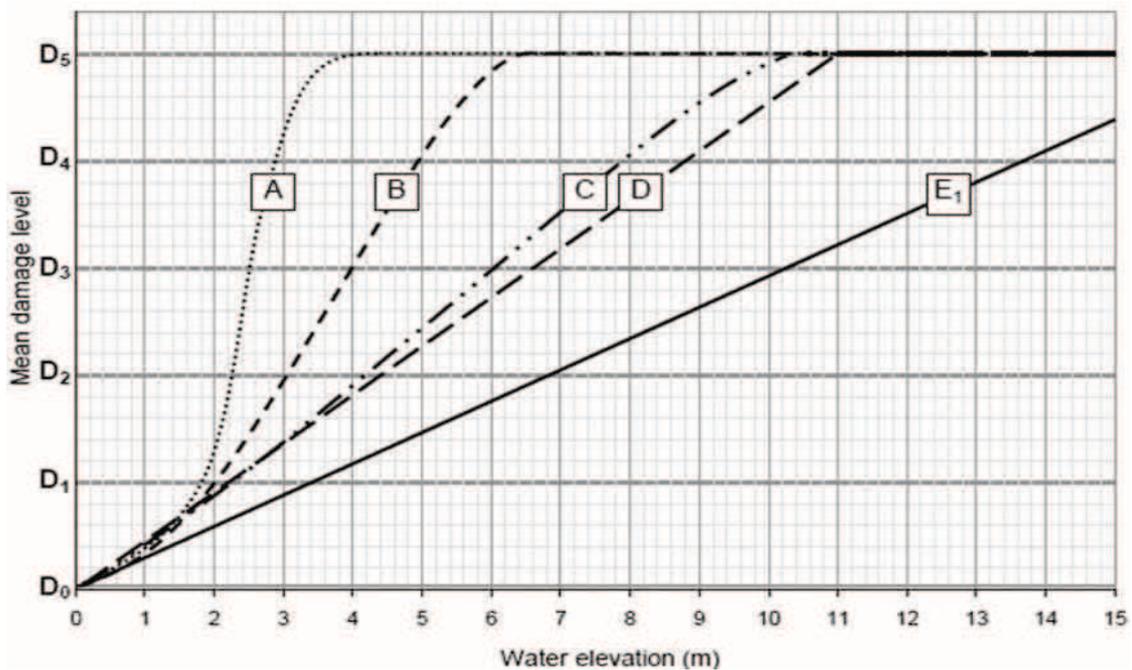


Figure 74. Courbes de vulnérabilité de cinq classes de bâtiments (A, B, C, D, E) exprimant le niveau moyen des dommages (D0 à D5) en fonction de la hauteur de submersion d'un tsunami (Gauraz et al., 2009).

*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.*

Dans le cadre d'un autre retour d'expérience mené 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.

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 75).

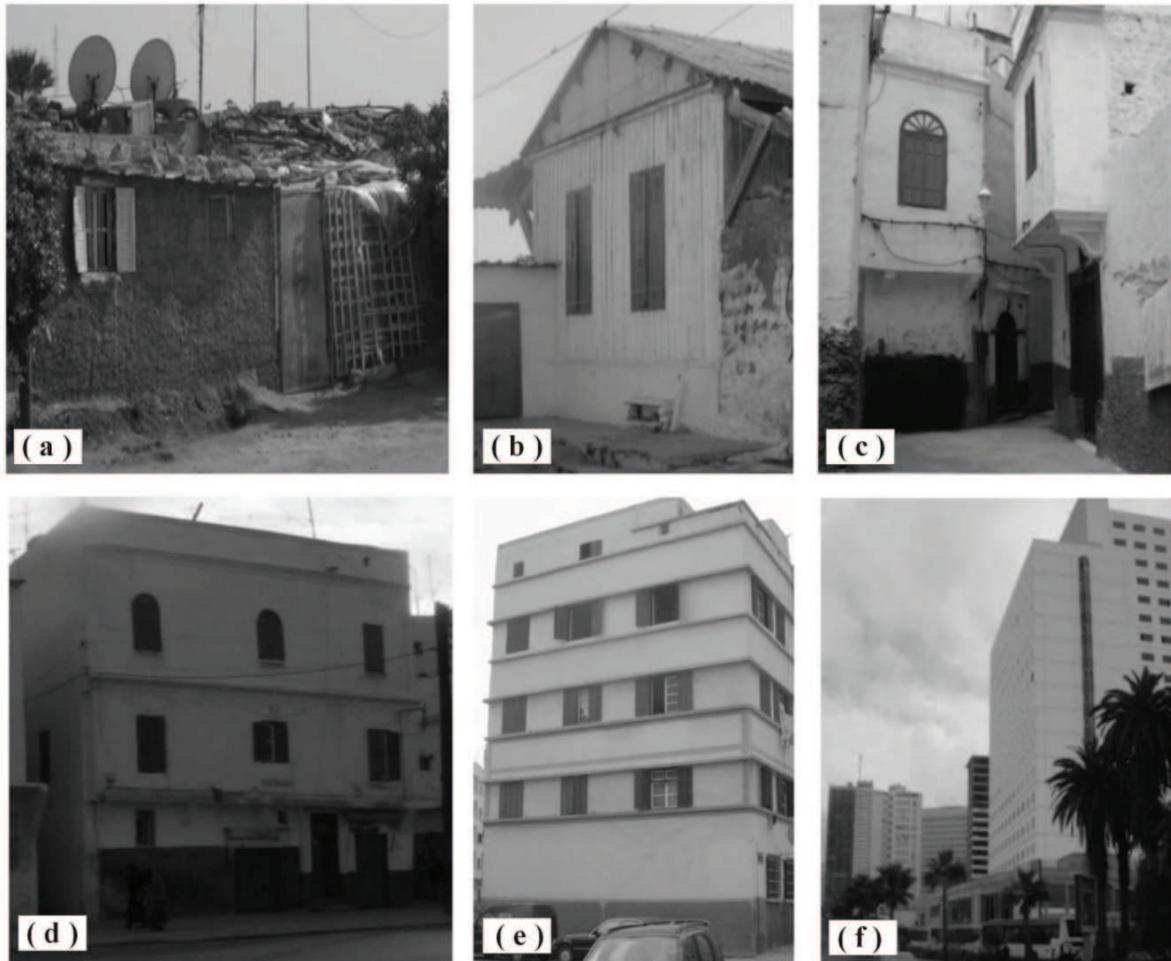


Figure 75. Typologie du bâti définie sur le port de Casablanca (Omira et al., 2009).

*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 parasismique, 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 marocaines.

#### **6.3.4. Proposition d'une typologie du bâti propre à El Jadida**

Cette typologie est basée 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 citées en haut 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. Ont été sélectionnés en fonction de leur facilité d'identification sur le terrain. Ainsi nous avons tenu compte des éléments suivants :

- le type de matériaux utilisé pour la maçonnerie : à travers leur capacité de résistance, 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 ;

- le nombre d'étage influence la charge verticale du bâtiment. Ainsi plus le nombre d'étages est élevé, plus les murs sont résistants et donc moins vulnérables aux pressions latérales. De plus, les gros édifices sont solidement renforcés ;

- une estimation de la taille des structures porteuses (poteaux <20 cm ou pas) Suite à l'expertise systématique de l'endommagement du bâti en Indonésie par Leone et al (2006), ils ont constaté que tous poteaux en béton armé inférieur ou égal à 20 cm de diamètre ont été sectionnés pour une hauteur d'eau comprise entre 3 et 6 m ;

- une distinction entre structure calculée et auto-construction : Beaucoup de constructions privées sont réalisées sans prendre en compte de simples règles de l'art, aucun bureau d'étude, ni architecte n'a participé à la construction. La main d'œuvre, pas toujours professionnelle, est facilement soumise aux méthodes de constructions traditionnelles. Les dispositions constructives ne sont pas respectées. De plus, les matériaux de construction ne sont pas souvent de bonne qualité. Au regard de cette brève description, le critère selon lequel un bâtiment est auto-construit ou calculé permet en soi d'établir son degré de solidité.

Un autre point très important de notre typologie relève de la propriété architecturale du bâtiment. On distingue les bâtiments qui sont isolés de ceux qui sont accolés ou en bloc. Un bâtiment isolé est beaucoup plus vulnérable car il va subir une pression hydrodynamique et hydrostatique de toutes parts. De plus, les formes irrégulières ou asymétriques favorisent les contraintes locales dans les angles et l'instabilité du bâtiment (Gauraz, 2008).

Tableau 8. Typologie structurelle du bâti à El Jadida (Leone et al., 2012)

Type de bâtiment	Isolé			Accolé	
	A	B	C	D	E
<b>Classes</b>					
<b>Critère d'identification terrain</b>	Auto-construct en pierre sèche ou matériaux de récupération. Construction légère de plein pied, bâti non rigide ou semi-rigide.	Auto-construction, de plein pied ou 1 étage, bâti maçonnerie (briques) à structure légère comportant des poteaux $\leq 20 \times 20$ cm	Structure calculée et renforcée (poteaux $> 20$ cm), architecture sophistiquée très souvent étage	Auto-construction, de 1 à 2 étages, structure moyennement renforcée (poteaux $> 20$ cm), plusieurs poteaux $\leq 20 \times 20$ cm, géométrie simple	Structure calculée et renforcée (poteaux $> 20$ cm), géométrie simple, bâtiments de grande taille multi-étages
<b>Vue terrain</b>					
<b>Exemple de bâtiments (adapté de la nomenclature du RGP, 2004)</b>	En périphérie : construction précaire (bidonville, douar, habitat rural périphérique), en ville : kiosques, ateliers	maison marocaine traditionnelle	villa moderne ou ancienne villa coloniale restaurée, parfois service privée (école privée, banque...)	maison marocaine traditionnelle et médina, maison marocaine moderne, anciens équipements publics, petites et anciennes mosquées	Immeuble, équipements publics, locaux de bureaux, de l'hôtellerie ou industriels récents, ancienne grande mosquée et mosquée récente

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 8). 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.

**Classe 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 76 a). 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 76b) (Leone et al., 2012).



Figure 76. a. Habitat informel en périphérie de la ville, b. Téléboutique en centre-ville (Lagahé & Péroche, 2010).

**Classe 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 (Figure 77) (Leone et al., 2012).

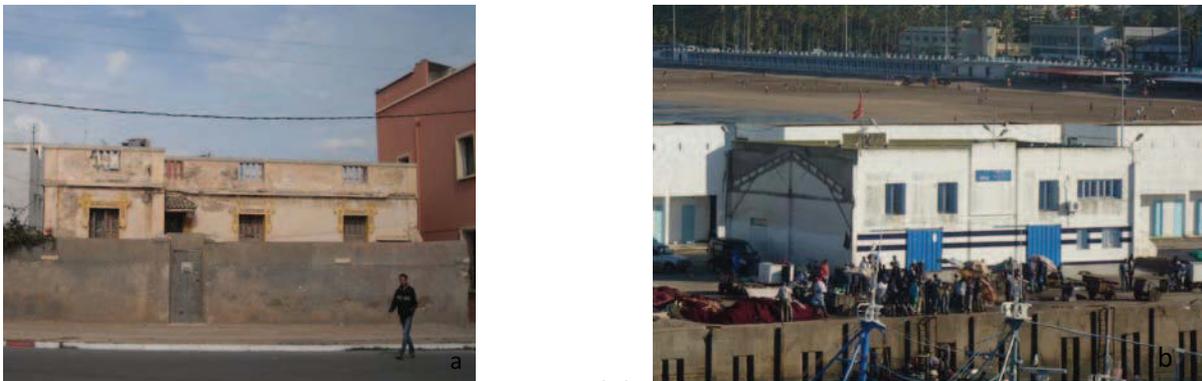


Figure 77. a. Construction individuelle, b. Bâtiment isolé sur le port (Lagahé & Péroche, 2010).

**Classe C** correspond à une habitation individuelle, isolée du type villa (Figure 78). 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 m<sup>2</sup>. 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 (Leone et al., 2012).



Figure 78. Villa moderne (Lagahé & Péroche, 2010).

**Classe 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 79).

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 79. Habitat traditionnel marocain moderne (Lagahé & Péroche, 2010).

**Classe E** caractérise des bâtiments collectifs de très bonne conception avec des structures en béton armé renforcées et calculées (Figure 80). 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 tsunami potentiel.



.....



Figure 80. a. Bâtiment administratif, b. Habitat collectif avec petits commerces en rez-de-chaussée (Lagahé & Péroche, 2010).

### 6.3.5. Critères d'évaluation de la vulnérabilité humaine

En ce qui concerne la vulnérabilité humaine, nous avons retenu la répartition spatiale des individus à l'arrivée d'un tsunami. Plus précisément il s'agit de savoir, dans un premier temps, si l'individu se trouve : à l'intérieur ou à l'extérieur d'un bâtiment. Lorsque l'individu est à l'intérieur d'un bâtiment, il convient de prendre en compte le nombre d'étages du bâtiment, la présence d'étage intermédiaire ou encore la présence d'une grande ouverture. Ces critères sont inhérents aux critères de vulnérabilité du bâti. En revanche, lorsque l'individu est à l'extérieur du bâtiment, il est important de prendre en compte la densité de débris potentiels flottants.

#### 6.3.5.1. À l'intérieur d'un bâtiment

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 81). 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 (Leone et al., 2012).

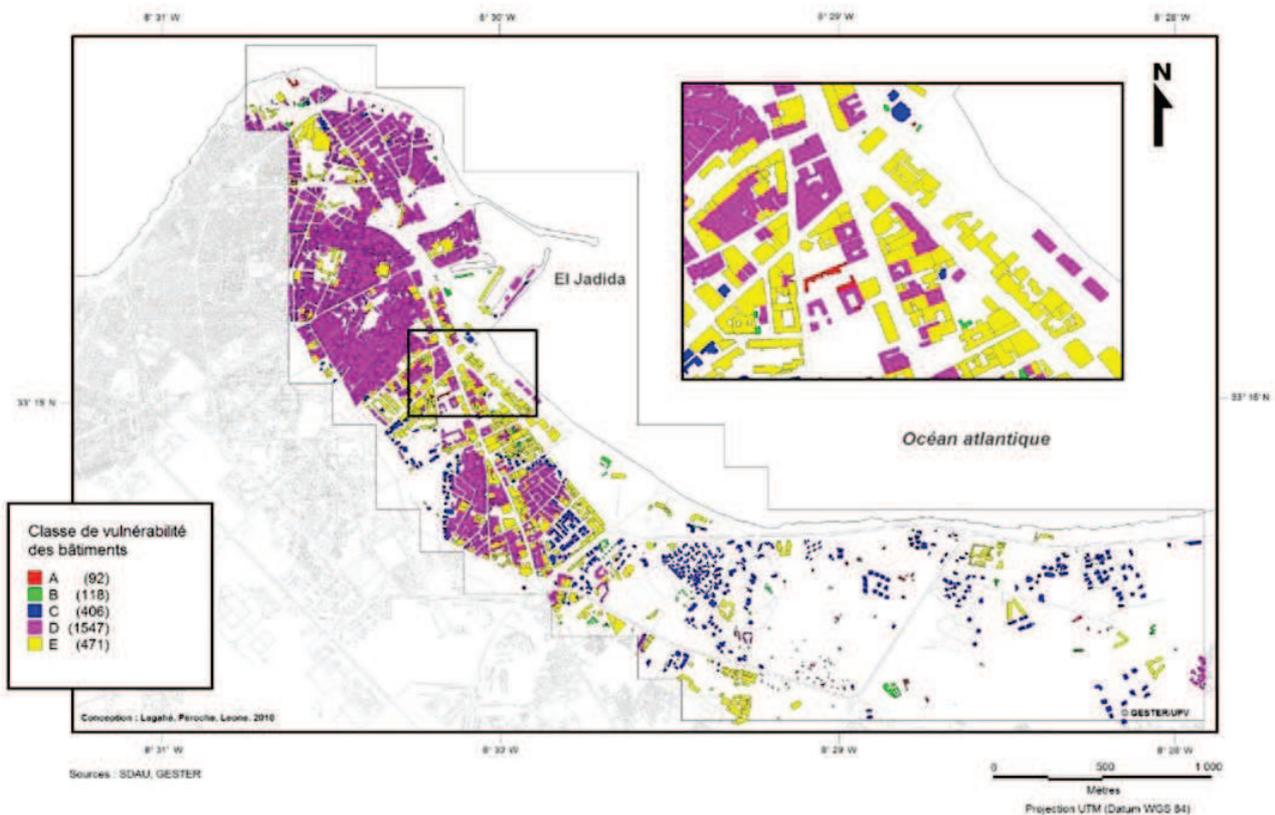


Figure 81. Classes de vulnérabilité du bâti. (Leone et al., 2012)

a) Présence de grandes ouvertures au rez-de-chaussée

Les retours d'expériences ont montré que la présence de grandes ouvertures au rez-de-chaussée, était un critère qu'il ne fallait pas négliger, lors de l'arrivée d'un tsunami. Une étude de l'USGS (2005) expose à l'aide de photos, quels peuvent être les dégâts engendrés par un tsunami notamment sur des habitations munies de grandes ouvertures au rez-de-chaussée. Sur notre zone d'étude les grandes ouvertures ont été définies par rapport à une longueur supérieure à une porte de garage. Ce sont par exemple les larges entrées des petits commerces et boutiques ou encore la devanture vitrée des cafés. Les portails ne sont pas considérés comme des grandes ouvertures, car ils sont souvent l'entrée d'un parking souterrain, bien moins vulnérable que les vitrines de restaurants ou de commerces (Figure 82).

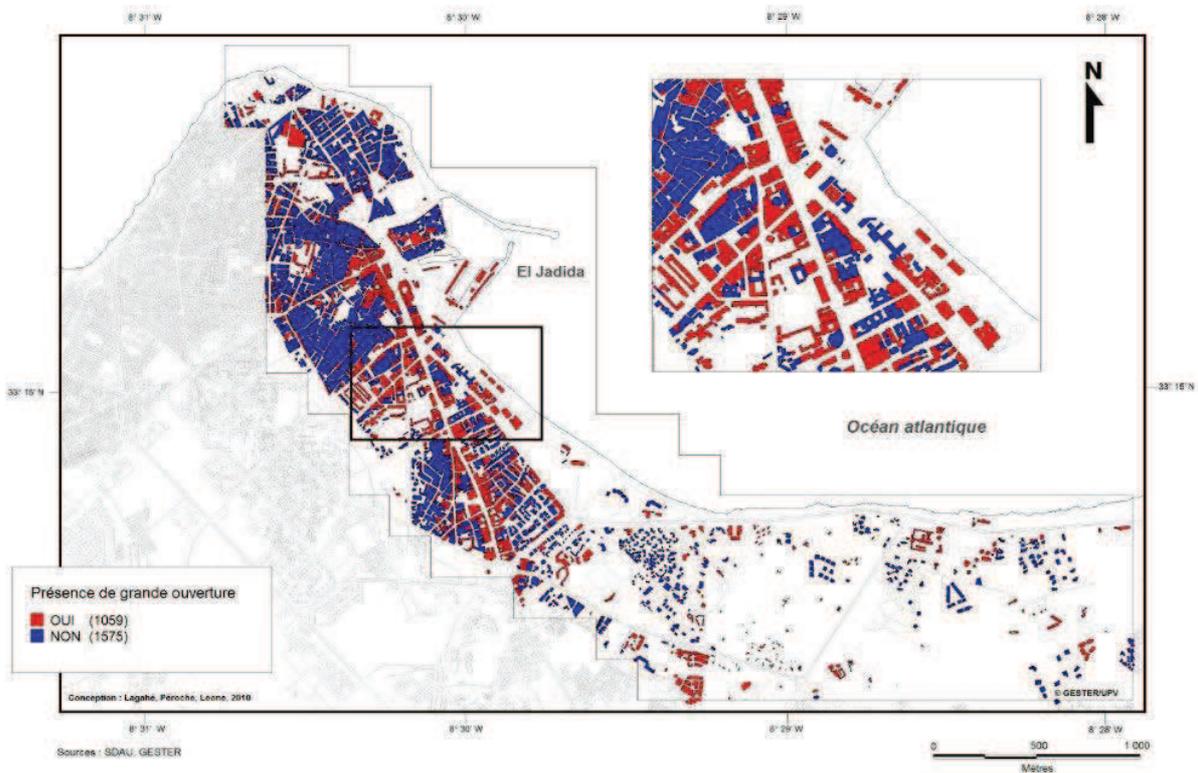


Figure 82. Carte de localisation des bâtiments avec des grandes ouvertures. (Leone et al., 2012)

*On observe facilement sur la carte ci-dessus que la présence des grandes ouvertures se situe surtout le long des grands axes de communication, là où se concentrent petits commerces, cafés-terrasses, restaurants et autres marchands.*

Ces deux critères qui concernent la vulnérabilité d'une personne située dans un bâtiment au rez-de-chaussée, sont déterminants lors de l'arrivée du tsunami. Les personnes les plus vulnérables sont celles qui seront au rez-de-chaussée avec des grandes ouvertures, sans la possibilité d'accéder à un étage.

b) le nombre d'étages

Il s'agit d'un élément essentiel à connaître puisque les étages constituent des espaces refuges. La présence d'étages dans un bâtiment permet à une personne de s'y réfugier. Lorsqu'un individu fuit une vague de tsunami, il peut se repérer aux bâtiments à étages. Il peut par exemple courir vers des structures recevant du public comme des centres commerciaux, ou des restaurants. Dans ces bâtiments, l'étage est facilement accessible, à la différence d'un petit commerce qui peut être indépendant de la structure dans laquelle il semble s'imbriquer. Dans cette configuration, l'individu doit sortir dans la rue afin de trouver un endroit où se réfugier. Ce dernier cas de figure n'est pas pris en compte dans les critères sélectionnés, car il était impossible de savoir s'il y avait un lien quelconque entre les pièces du rez-de-chaussée et le reste du bâtiment.

Suivant les scénarios, les étages considérés comme espaces refuges peuvent varier. Si le tsunami atteint des hauteurs d'eau maximales (*i.e.* 8 m sur le front de mer), on peut penser que les personnes ne pourront s'abriter qu'à partir du deuxième étage.

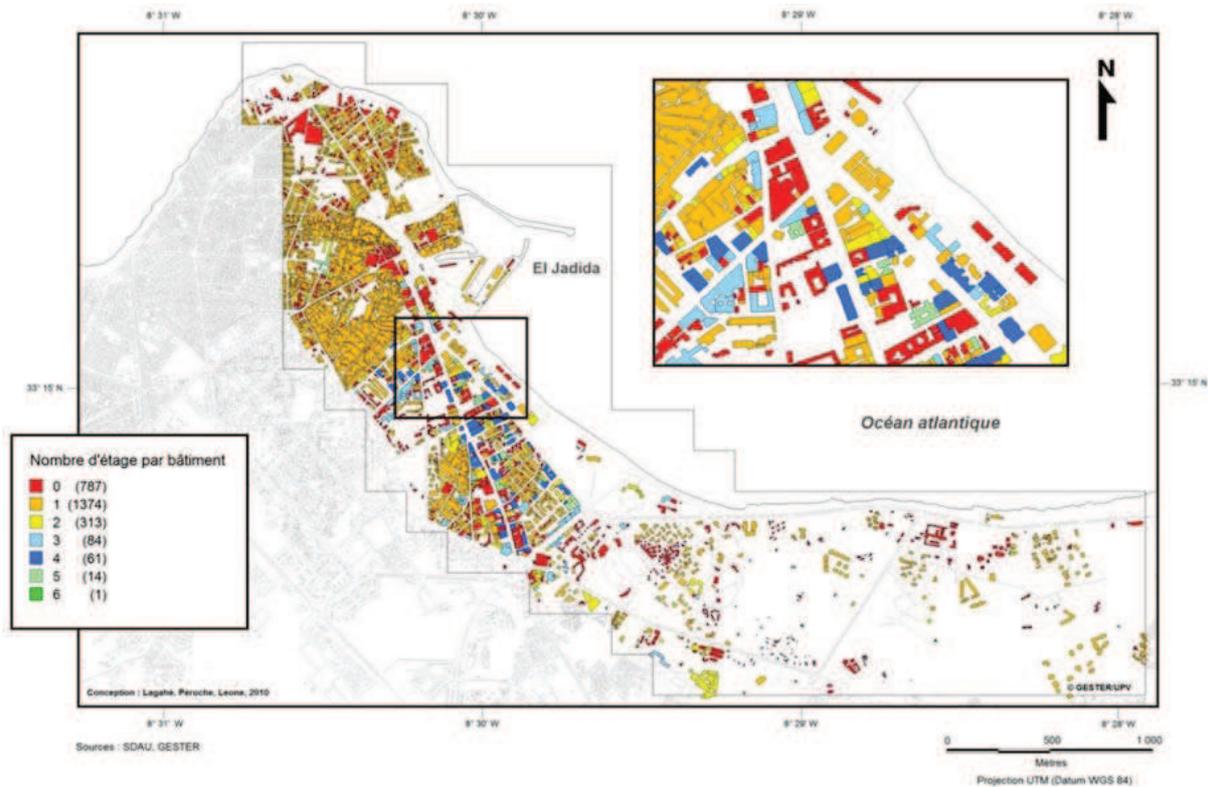


Figure 83. Carte du nombre d'étages. (Leone et al., 2012)

*La carte de la répartition du nombre d'étages présentée ci-dessus (Figure 83) met en exergue une dichotomie entre la partie urbaine nord et la partie urbaine sud de la ville. Dans le nord urbain de la ville, le nombre d'étages varie entre 0 et un étage tandis qu'au sud ce nombre atteint le maximum de 6 étages. Cette opposition révèle l'existence de constructions plus traditionnelles au nord et plus modernes au sud.*

Nous venons de voir que la prise en compte du rez-de-chaussée du bâtiment était primordiale lorsque l'individu est à l'intérieur de celui-ci.

### 6.3.5.2. A l'extérieur

a) Lorsque l'individu est à l'extérieur, sa vulnérabilité varie en fonction de la hauteur et de la vitesse de l'eau (Figure 84). Ce graphique issu d'une étude réalisée par les services de l'État français sur la capacité de résistance des individus face à une lame d'eau plus ou moins haute et plus ou moins rapide dans un contexte d'inondations. Ce travail a contribué au développement des matrices de résistance des individus aux submersions par des tsunamis dans les espaces de plein air.

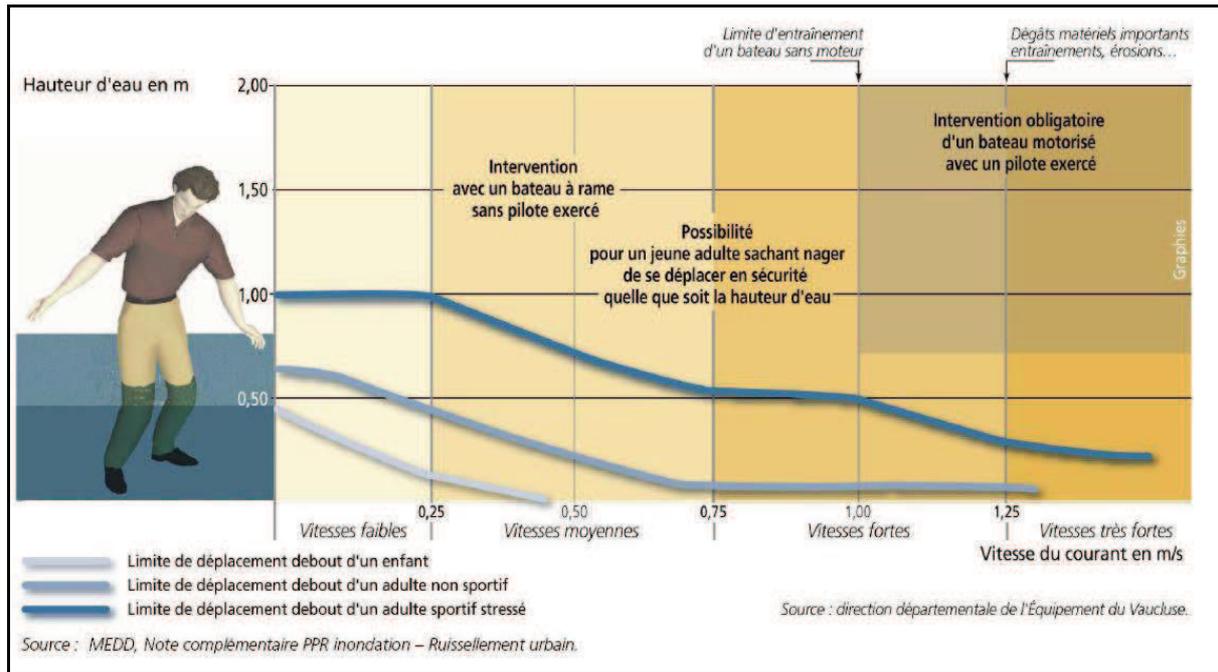


Figure 84. Possibilités de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d’eau et de la vitesse d’écoulement (Source : Baladès, 2004)

*La limite de déplacement debout d’un enfant ne dépasse pas les 50 cm d’eau, elle est comprise entre des vitesses de 0 à 0,25 m/s. La limite de déplacement debout d’un adulte non sportif peut atteindre les 75 cm d’eau et est comprise entre des vitesses de 0 à 1,25 m/s. enfin la limite de déplacement debout d’un adulte sportif stressé peut aller jusqu’à une hauteur d’eau d’un mètre et varie entre des vitesses allant de 0 à plus de 1,25 m/s.*

La corrélation entre les vitesses calculées lors du tsunami de 2004 et la limite de déplacement des personnes, permet de mettre en évidence l’importance des vitesses du flot du tsunami. On voit bien sur le graphique, que même un jeune adulte sachant nager à une vitesse comprise entre 2 et 5 m/s, ne pourrait pas être sauf.

### **b) la densité de débris potentiels flottants**

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 85). Nous avons ainsi obtenu 3 classes de densité (faible, moyenne, forte) pour les espaces extérieurs ROUT, CROUF, PARK et ESSO (Figure 86).



Figure 85. 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 (Leone et al., 2012).

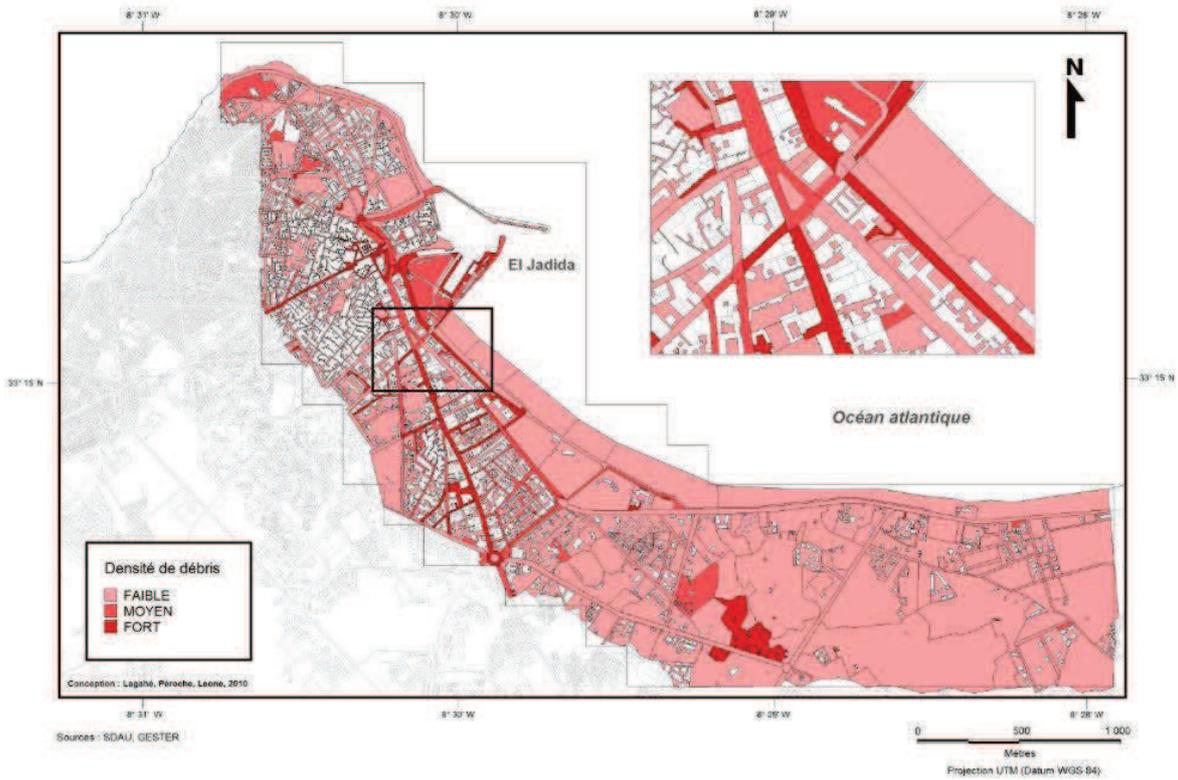


Figure 86. Carte de densité de débris flottants potentiels (Leone et al., 2012)

Les axes de communication et les parkings ont une forte densité de débris due au nombre important de voitures en mouvement et stationnées. Au sud de la plage, l'espace de plein air présente une forte densité de débris correspond à une fabrique de parpaings. Par exemple, l'espace prévu à la construction des bateaux de pêche près de la citadelle, a une forte densité de débris (Figure 87).



Figure 87. Exemple de secteur à forte densité de débris flottants potentiels, à proximité des remparts de la cité Portugaise (Lagahé & Péroche, 2010).

### 6.3.6. Evaluation spatio-temporelle des enjeux humains sur El Jadida

#### 6.3.6.1. Principaux modes et rythmes de vie

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 dans «Le cœur des territoires bat au rythme du tourisme» 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 le 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 88). 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 88. Le marché ouvert de la criée, sur le port d'El Jadida vers 12h (Leone et al., 2012).

**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 ville prend une nouvelle dimension. Terrier (2009) met en exergue à travers cette citation que la fréquentation de certaines villes change radicalement suivant la saison touristique. En ce qui concerne la ville d'El Jadida, ce phénomène se vérifie largement. La population 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<sup>ère</sup> 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 89). 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 89. Evolution de l’occupation des hôtels classés de la ville d’El Jadida 2009 (Source Délégation du tourisme d’El Jadida) (Leone et al., 2012).

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 90).

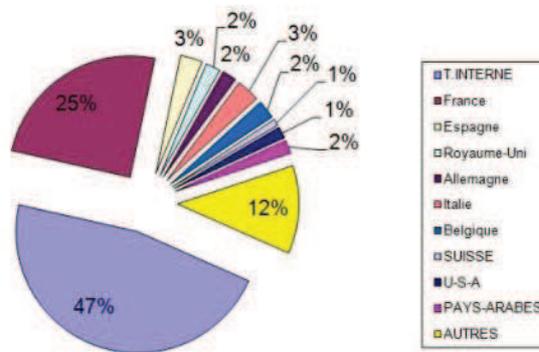


Figure 90. Répartition des nuitées des hôtels classés d’El Jadida (janvier-décembre 2009). (Source Délégation du tourisme d’El Jadida)

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 évènements 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.

### 6.3.6.2. Classes fonctionnelles

L'élaboration de classes fonctionnelles de chaque espace de la ville (Figures 91, 92 et 93) est une des étapes essentielle à la construction d'un modèle de mobilité humaine intra-urbain. 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 9).

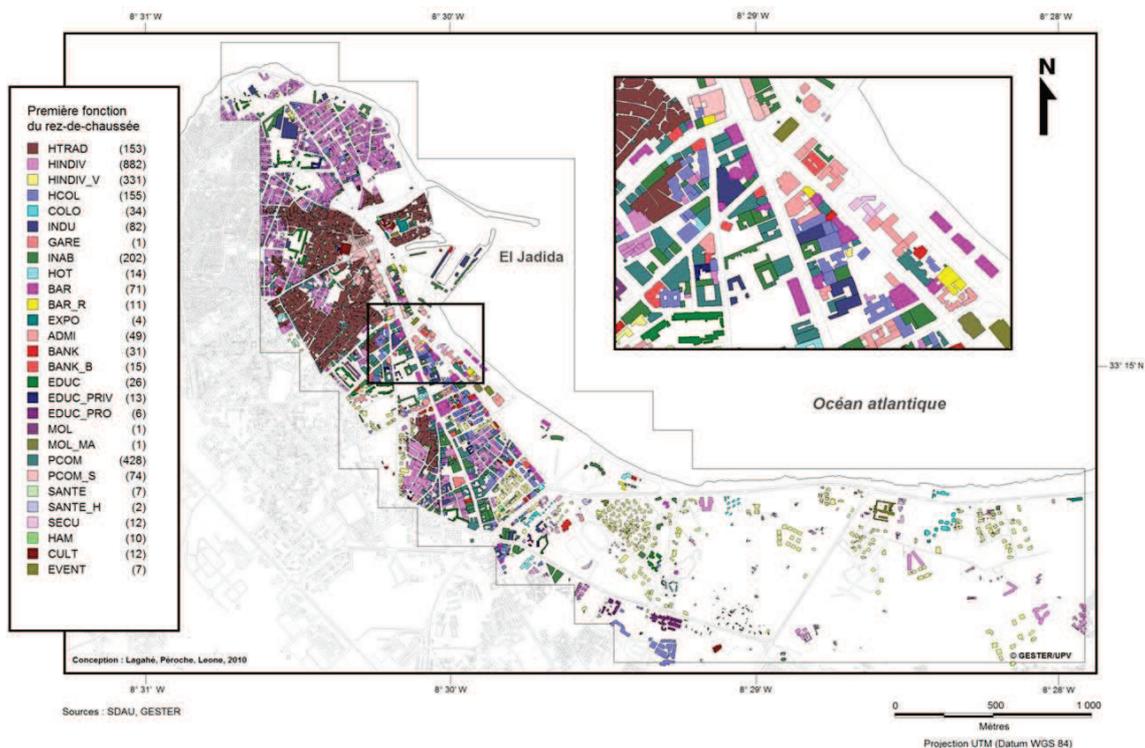


Figure 91. Carte de la fonction première du rez-de-chaussée des espaces bâtis (Leone et al., 2012)

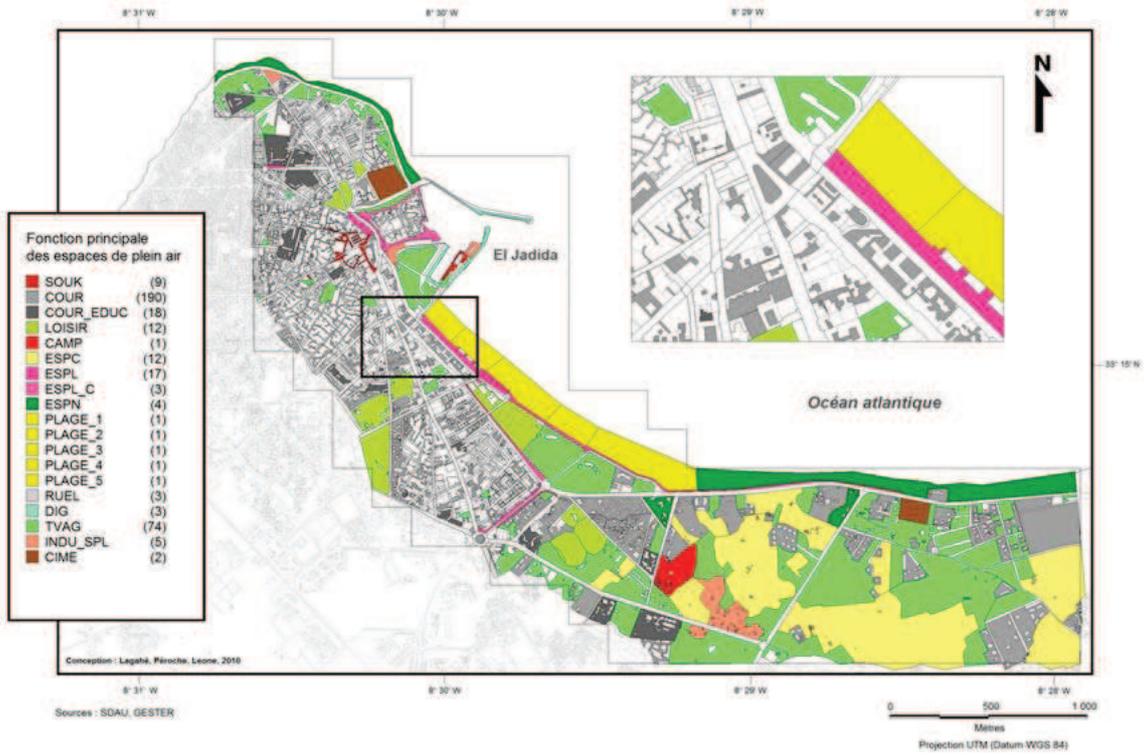


Figure 92. Typologie des classes fonctionnelles des espaces extérieurs (plein air) (Leone et al., 2012).

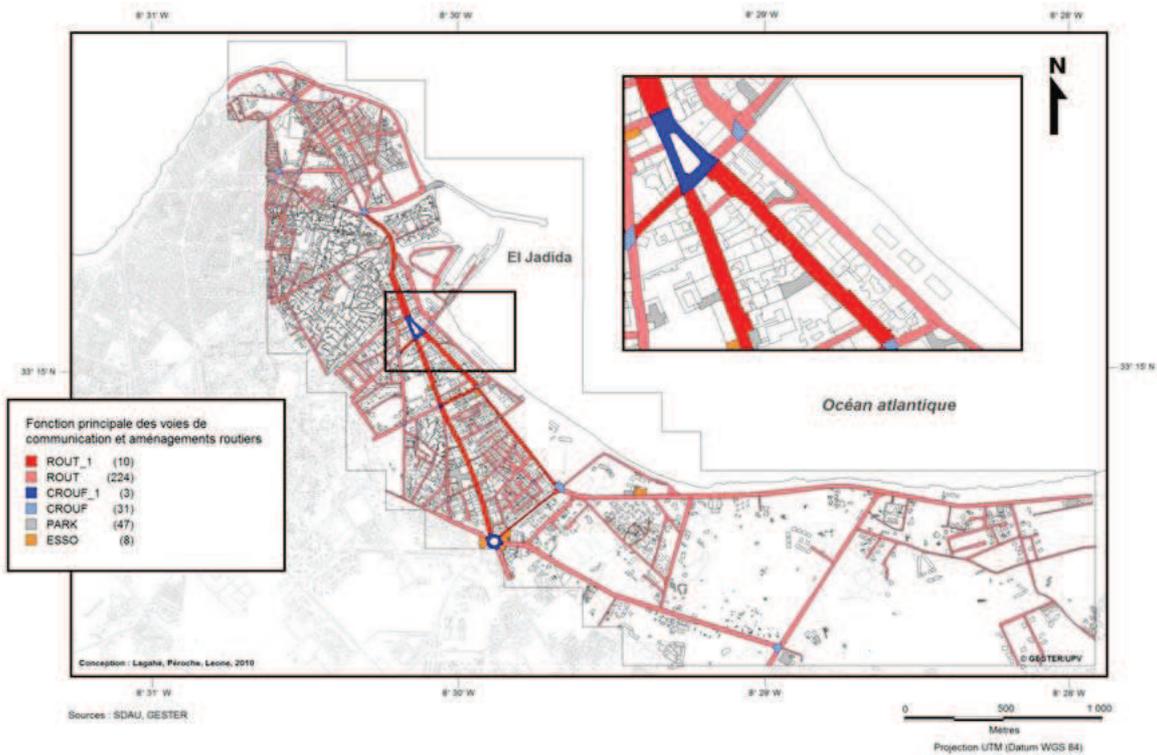


Figure 93. Typologie des classes fonctionnelles des voies de communication (Leone et al., 2012)

Tableau 9. Typologie des différentes classes fonctionnelles des espaces de vie sur El Jadida (Leone et al., 2012)

Nomenclature de la table BATI			Nomenclature de la table VOIE DE COMM		
Codes des Classes Fonctionnelles	Caractéristiques des bâtiments regroupés	Nombre de bâtiments	Codes des classes fonctionnelles	Caractéristiques des lieux regroupés	Nombre de bâtiments
HTRAD	Maison marocaine traditionnelle	254	ROUT_1	Route principale	10
HINDIV	Maison marocaine moderne	1081	ROUT	Route secondaire	224
HINDIV_V	Villa	331	CROUF_1	Carrefour principal	3
HCOL	Habitat collectif	330	CROUF	carrefour secondaire	31
COLO	Centre de loisir, colonie de vacances	34	PARK	Parking, lieu de stationnement	47
INDU	Local industriel, usine, entrepôt	82	ESSO	Station essence	8
GARE	Gare routière, ferroviaire, aéroport	0	<b>Total des bâtiments</b>		<b>323</b>
INAB	Habitat abandonnée, inhabité	189			
HOT	Hôtel	19			
BAR	Café-terrasse, bar	23			
BAR_R	Restaurant	10			
EXPO	Salle d'exposition, musée, lieu touristique	4			
ADMI	Service public	48			
BANK	Assurance, service privé type concessionnaire	23			
BANK_B	Banque	9			
EDUC	Etablissement scolaire public maternelle au lycée	27			
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			
<b>Total des bâtiments</b>		<b>2634</b>			

Nomenclature de la table PLEIN AIR		
Codes des classes fonctionnelles	Caractéristiques des lieux regroupés	Nombre de bâtiments
SOUK	Marché local, marché ouvert	9
COUR	Cour intérieure, jardin	190
COUR_EDUC	Cour de récréation	18
LOISIR	Parc, terrain de jeu	12
CAMP	Camping	1
ESPC	espace cultivé, champ	12
ESPL	Esplanade, promenade	17
ESPL_C	rempart de la citadelle	3
ESPN	Espace naturel	4
PLAGE	Plage	1
RUEL	ruelle < 4m de large	3
DIG	Digue, jetée, quai	3
TVAG	Terrain vague	74
INDU_SPL	zone industrielle	5
CIME	Cimetière	2
<b>Total des bâtiments</b>		<b>354</b>

### 6.3.6.3. Taux de fréquentation

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.

La Capacité d'Accueil Maximale Crédible (CAMC) correspond au nombre de personnes maximum plausible en un lieu donné de notre zone d'étude (Figure 94). Cette information une fois pondérée par le taux de fréquentation, permettra à terme de quantifier les enjeux humains heure par heure.

Les CAMC sont calculées à partir de :

- Densité humaine théorique (DH) obtenue par calculs et extrapolation

$$\text{CAMC} = \text{DH} (\text{Nombre de personnes} / \text{m}^2) \times \text{Surface} (\text{m}^2)$$

- Effectifs obtenus par : Statistiques, Comptage, Témoignage

$$\text{CAMC} = \text{l'effectif maximal du lieu}$$

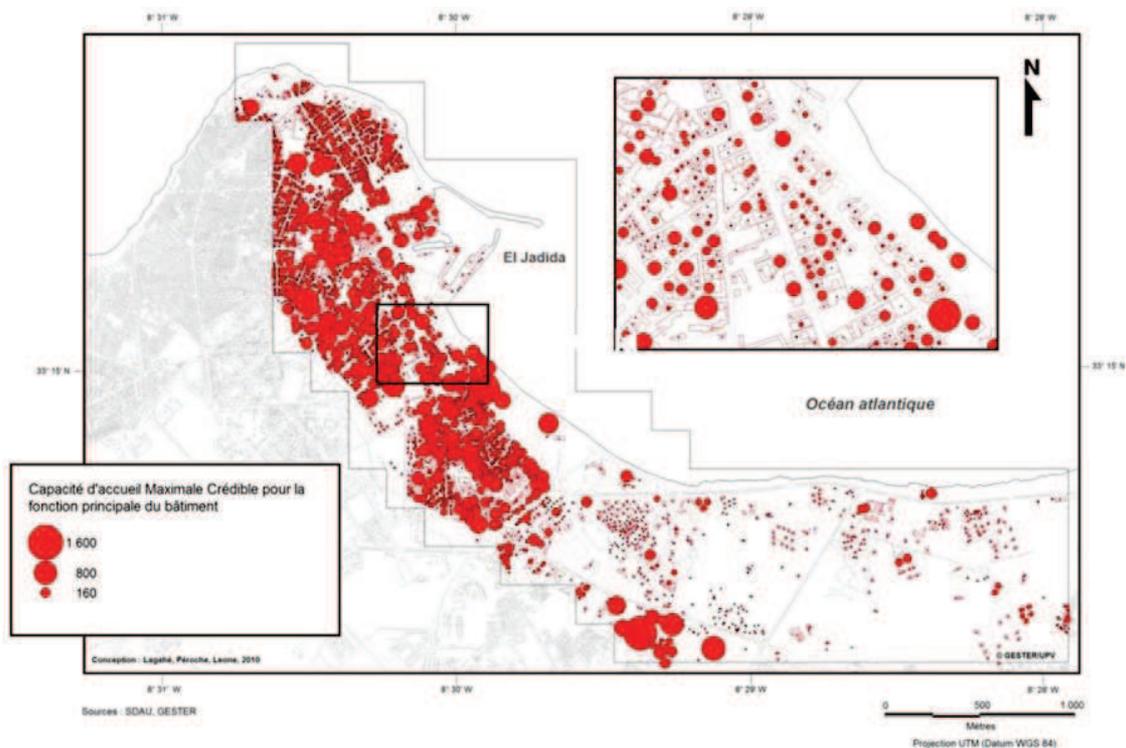


Figure 94. Capacité d'accueil maximale crédible (CAMC) : cas des bâtiments (nombre de personnes) (Leone et al., 2012)

Le taux de fréquentation correspond à la proportion de la CAMC présente à un instant t. Il est compris entre 0 et 1. Il est évalué pour chaque heure de la journée et sert à construire les courbes de fréquentation de chaque classe fonctionnelle. Au final, la pondération de ces taux par la CAMC permet d'estimer le nombre de personnes présent, dans chaque espace de la ville, heure par heure (Figure 95).

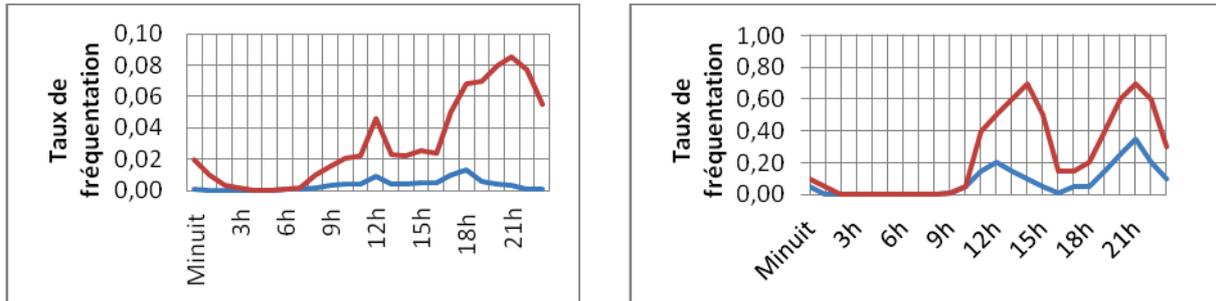


Figure 95. Courbes de fréquentation des esplanades (ESPL). Courbes de fréquentation des restaurants (BAR\_R) (Leone et al., 2012).

Ces deux graphiques représentent les courbes de fréquentation heure par heure des fonctions : esplanade (ESPL) et restaurant (BAR\_R) 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 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 ou sous forme de cartes de densités, plus adaptées aux traitements qui vont suivre lors de la construction d'indices de risque humain.

#### 6.3.6.4. 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 96).

##### a) Le moment de la journée

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 au travers de quelques exemples quelles sont les variations de déplacement intra-urbain au cours d'une journée.

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 mort des personnes sera alors plus importante que si le tsunami a lieu à 2h du matin où la population se concentre dans les quartiers d'habitats.

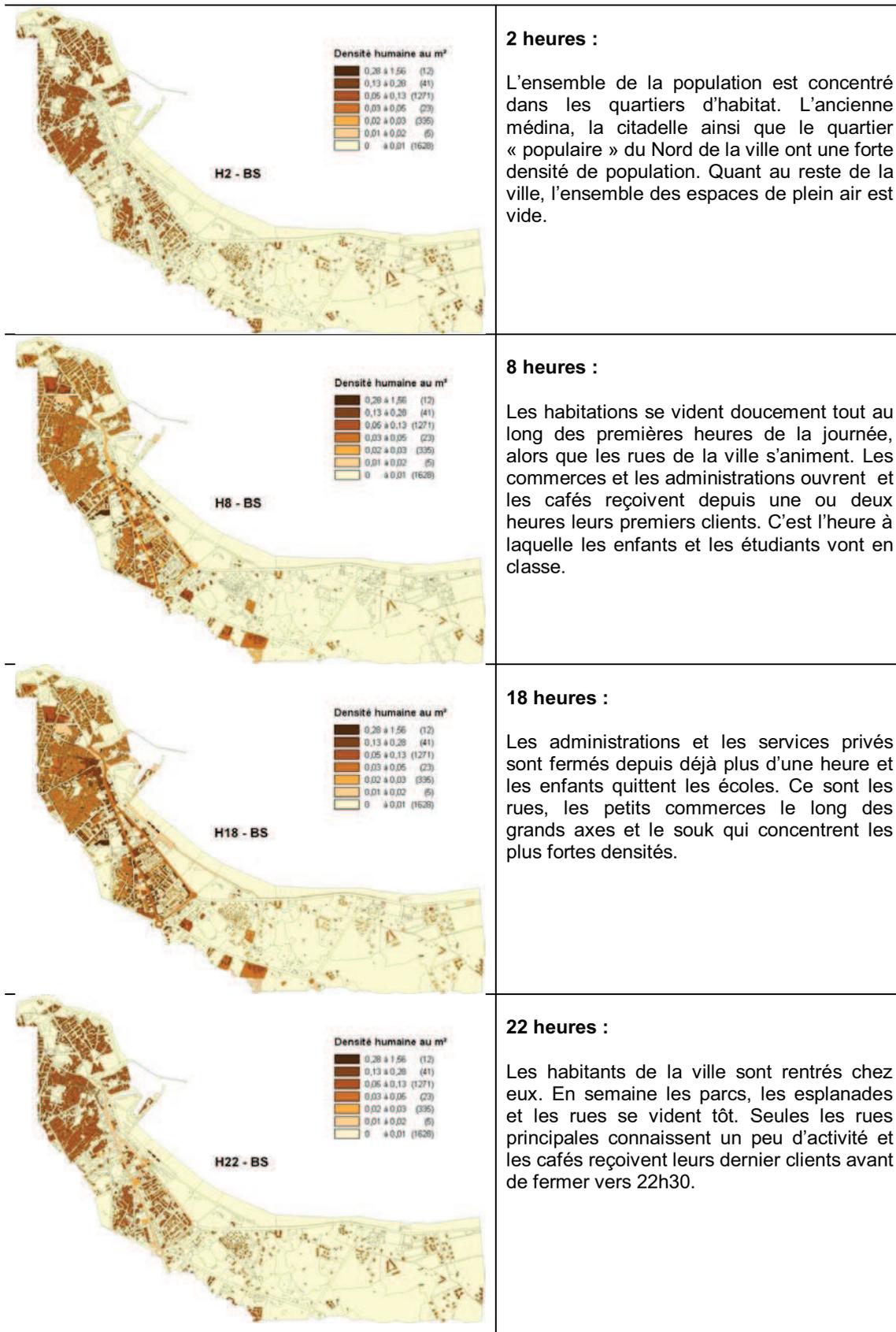


Figure 96. Comparaison des densités humaines (au RdC pour bâti) pour 4 moments de la journée (basse saison). (Leone et al., 2012)

b) La saisonnalité

En été la population d'El Jadida est multipliée par 5. L'ensemble des espaces de plein air et des voies de communication a une densité de population beaucoup plus élevée en journée. On le constate particulièrement pour la plage et les routes principales (Figure 97).

En été, alors que la température diminue progressivement avec le couché 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.

Lors de la période estivale, la ville connaît un surcroît de population conséquent. Terrier (2009) énonce que « la population des territoires varie tout au long de l'année par le double mouvement des visiteurs qui viennent y séjourner et des habitants qui partent en voyage ». Il met en évidence les variations de la population dues à la fréquentation touristique. Ce constat est d'autant plus vrai pour la ville d'El Jadida qui accueille de nombreux touristes en été. Si un tsunami a lieu à cette période, un plus grand nombre de personnes sera exposé au phénomène. La forte densité humaine augmente les enjeux humains et de ce fait la probabilité de pertes humaines.

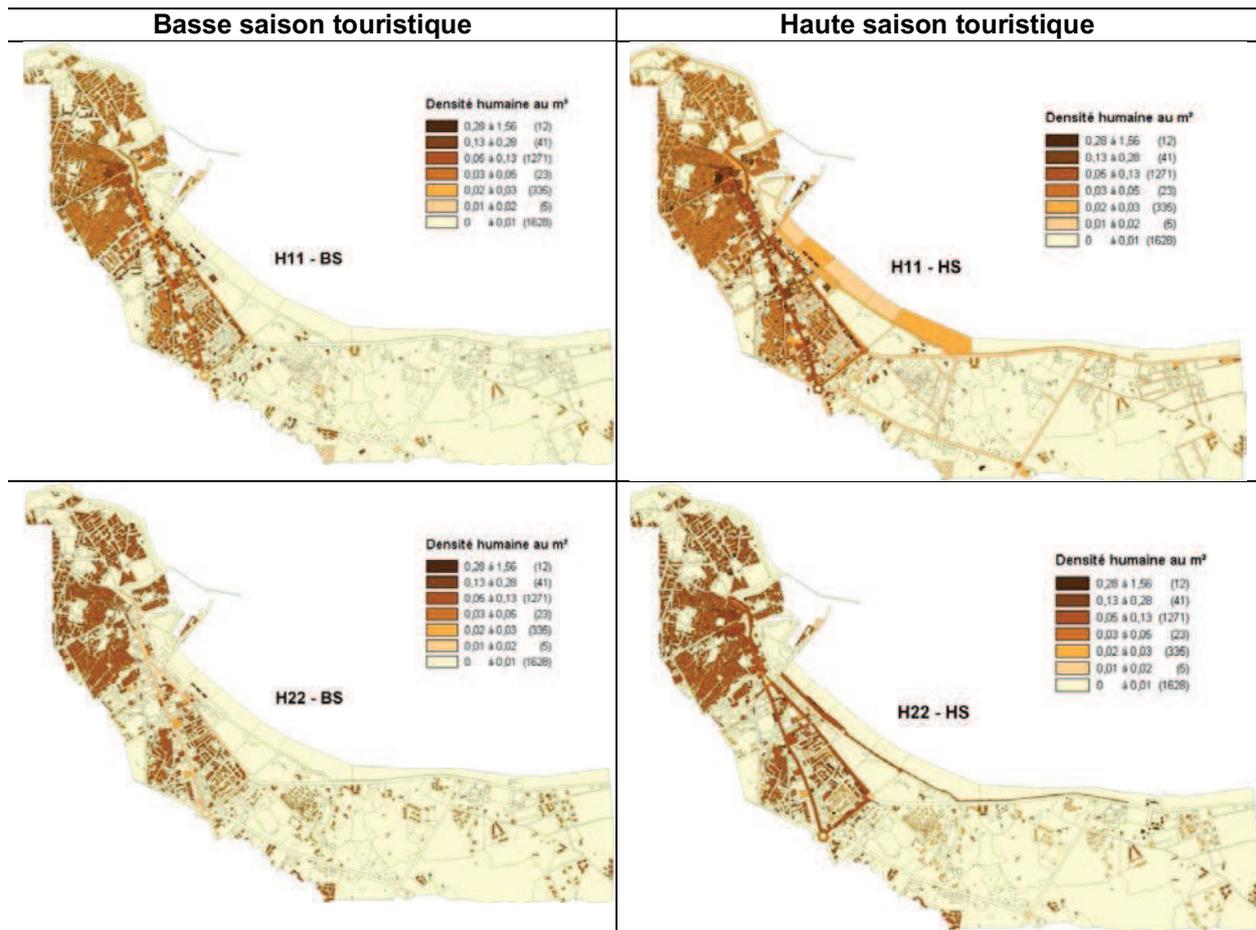


Figure 97. Comparaison des densités humaines (au RdC pour bâti) suivant les saisons (pour 11h et 22h). (Leone et al., 2012)

## 6.4. Les indices de risque humain

### 6.4.1. Principe du calcul

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 (Leone, 2012).

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 (Leone, 2012):

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

### 6.4.2. Matrices de probabilité de décès des individus en fonction de la hauteur d'eau et la vitesse du courant

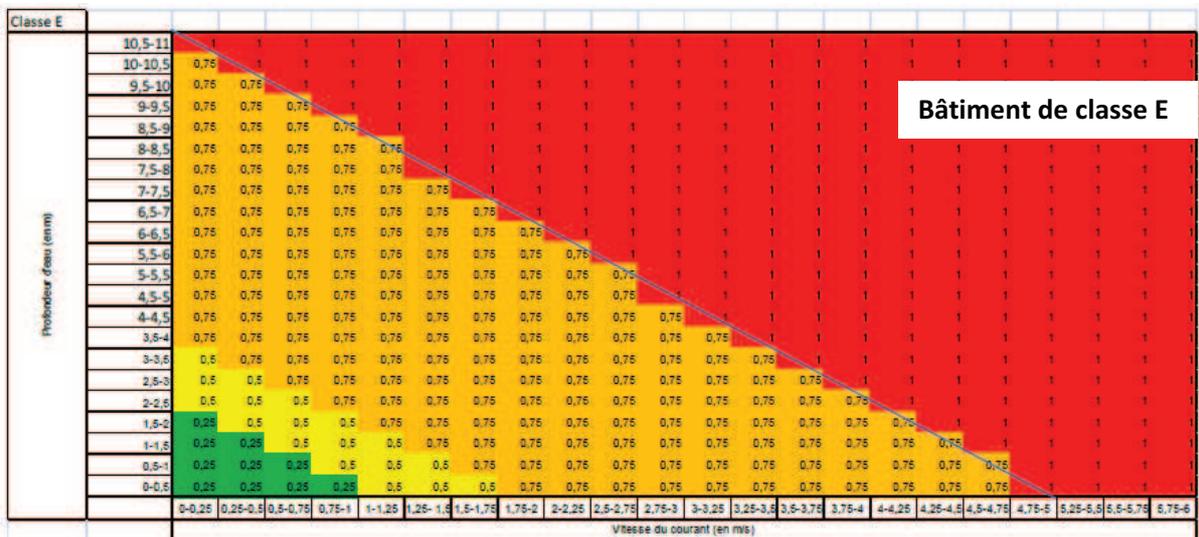
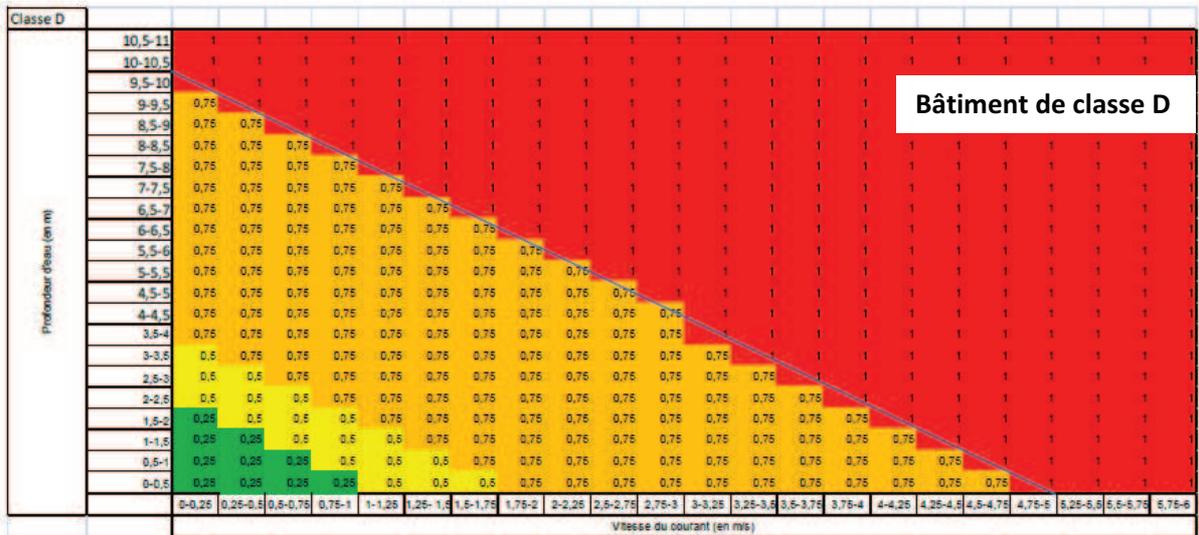
Ces probabilités de décès (**Pd**) sont définies empiriquement au moyen de différentes corrélations statistiques établies à la faveur de retours d'expérience, entre certains paramètres d'aléa et certains critères de vulnérabilité. Exprimées entre 0 et 1, elles ont été hiérarchisées en 4 classes : **Très 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 (2009) pour les inondations par débordement de cours d'eau (Leone, 2012).

#### 6.4.2.1. A l'intérieur d'un bâtiment

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 10). 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 (Leone, 2012).

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 relevés de dommages effectués par Leone et al., après le tsunami de 2004 à Banda Aceh (Indonésie) (Figure 74). 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 98). Ces seuils de destruction totale de chaque classe de bâtiment sont donnés par le tableau 11 (Leone, 2012).





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

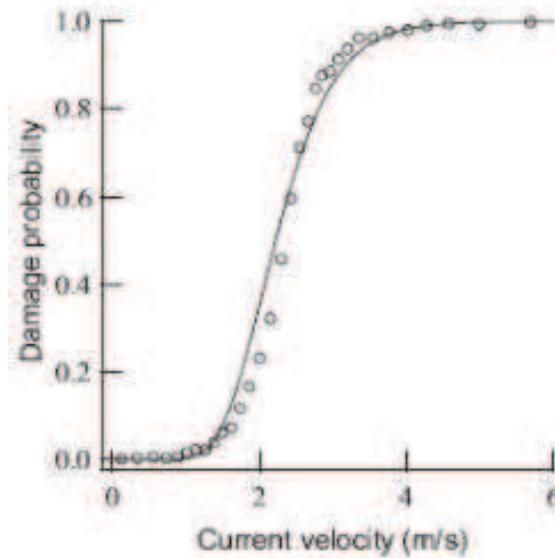


Figure 98. Courbe de probabilité d'endommagement du bâti en fonction de la vitesse du courant (d'après Koshimura, 2009).

Tableau 11. Seuils de destruction totale de chaque classe de vulnérabilité des bâtiments (sources : Leone, 2010 ; Gauraz, 2009, Koshimura, 2009).

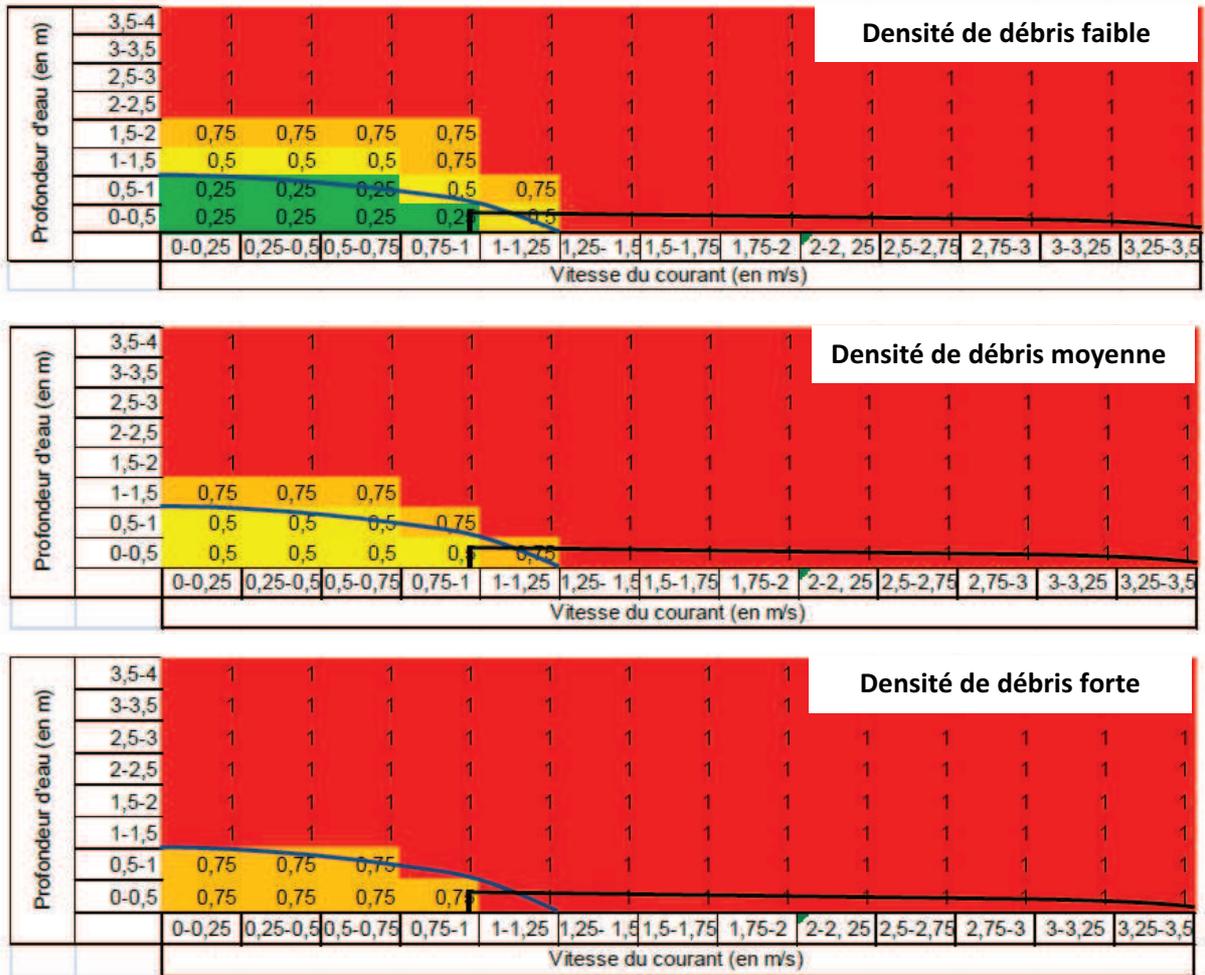
Classe	Hauteur d'eau (m)	Vitesse d'eau (m/s)
<b>A</b>	3	2
<b>B</b>	6	2-3.5
<b>C</b>	10	3.5-4
<b>D</b>	11	4-6
<b>E</b>	>11	>6

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.

#### **6.4.2.2. A l'extérieur d'un bâtiment**

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 12). 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 (Leone, 2012).

Tableau 12. Matrices de probabilité de décès (Pd) des personnes se trouvant à l'extérieur (variabilité en fonction des densités de débris flottants potentiels) (Leone et al. 2012)



- Limite de déplacement debout d'un adulte sportif stressé (source Baladès, 2004)
- Seuil de flottaison d'un véhicule de 800 kg (sources Baladès, 2004 et Yasuda, 2004)

Le seuil d'aléa pris en compte pour  $Pd \geq 0.5$  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 84). 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 (Leone, 2012).

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 13). 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 99).

Tableau 13. Seuils de mise en mouvement par flottaison d'un véhicule de 800 kg ayant une hauteur de caisse de 0,15 m (Source : Baladès, 2004).

<b>Pente</b> (% i.e cm/m)	<b>0.1</b>	<b>0.6</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Hauteur max</b> (cm)	28.3	25.3	23.5	20.3	15.6	13.7
<b>Vitesse</b> (m/s)	0.8	1.9	2.3	2.9	3.5	3.6

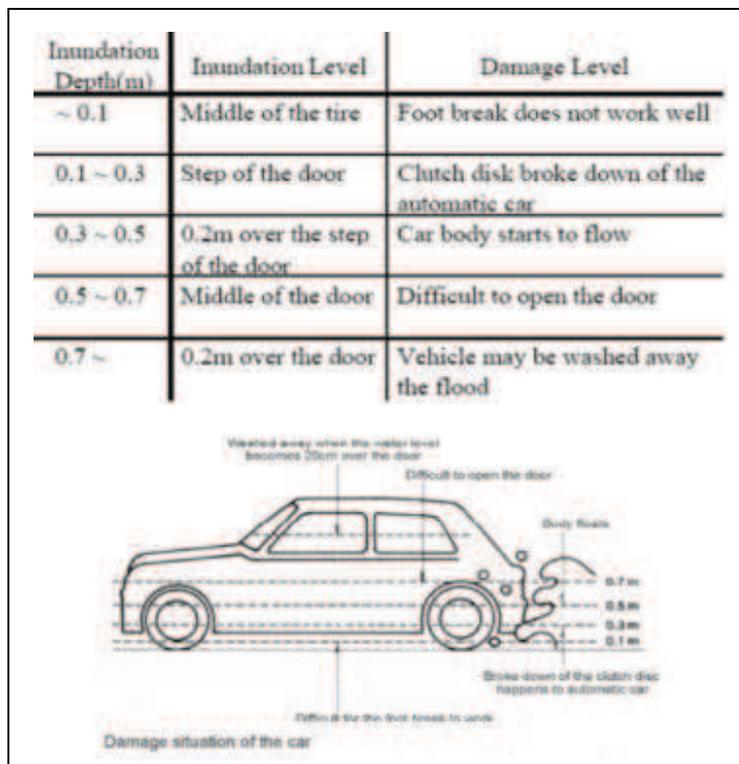


Figure 99. Endommagement d'un véhicule en fonction de la hauteur d'eau (Yasuda, 2004).

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.

### 6.4.3. Résultats cartographiques

Les cartes de probabilités de décès (Pd) obtenues au moyen des matrices précédentes sont présentées sur les figures 100, 101 et 102. 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 (Leone, 2012).

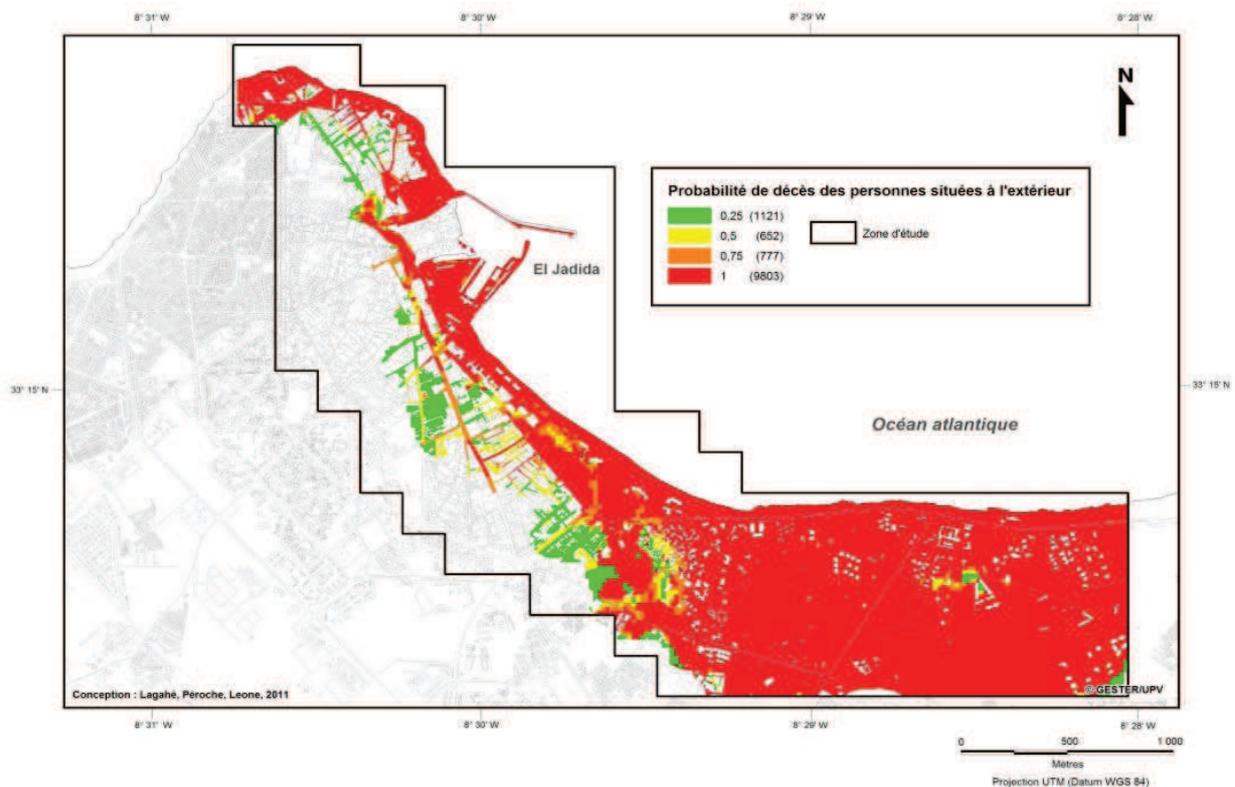


Figure 100. Probabilités de décès **Pd** (faible à très forte) s'appliquant aux espaces bâtis, Approche multicritère de vulnérabilité pour un scénario d'aléa de référence de type 1755 (source HSF) (Leone et al. 2012).

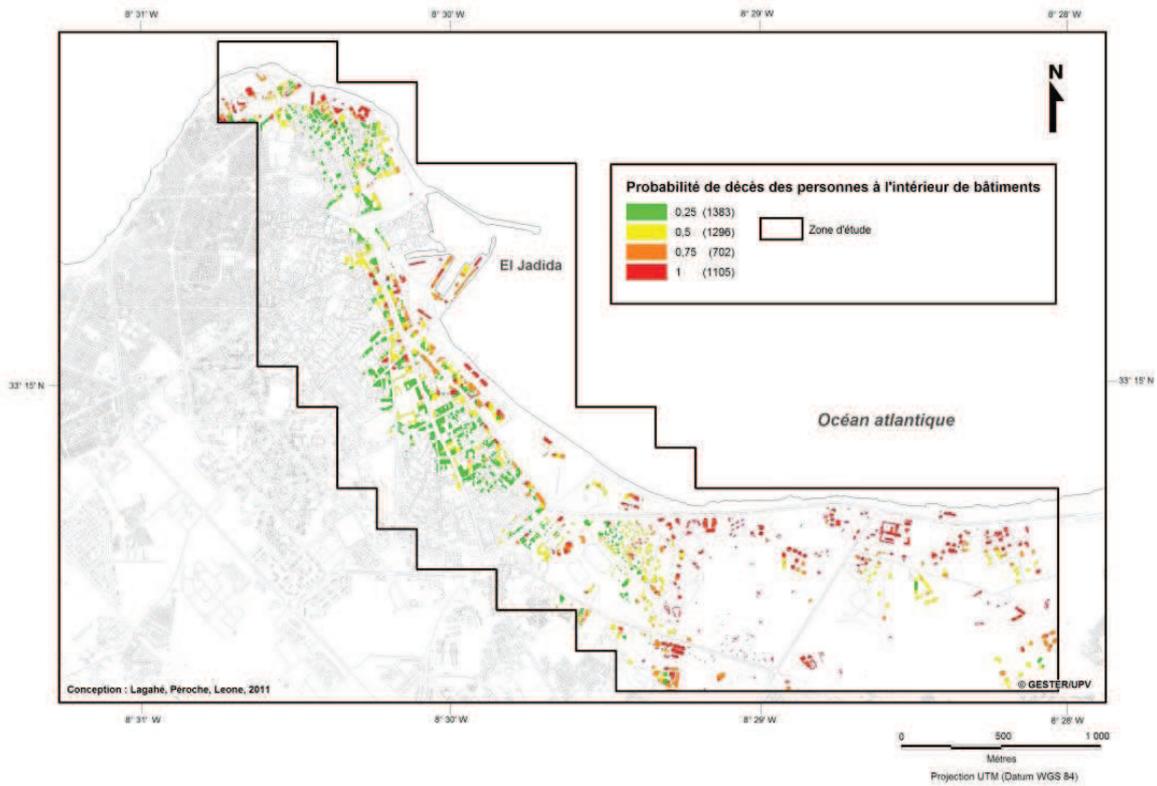


Figure 101. Probabilités de décès  $P_d$  (faible à très forte) s'appliquant aux espaces extérieurs. Approche multicritère de vulnérabilité pour un scénario d'aléa de référence de type 1755 (source HSF) (Leone et al. 2012).

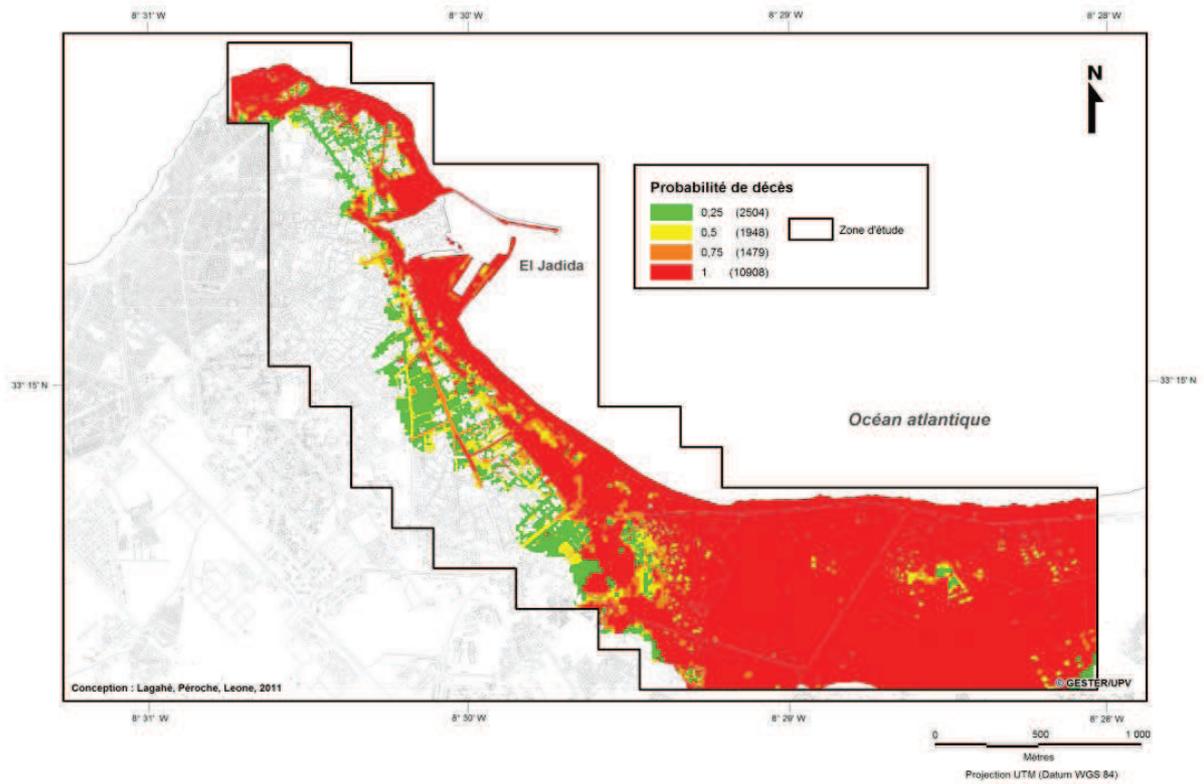


Figure 102. Probabilités de décès  $P_d$  (faible à très forte) s'appliquant au cumul des deux espaces. Approche multicritère de vulnérabilité pour un scénario d'aléa de référence de type 1755 (source HSF) (Leone et al. 2012).

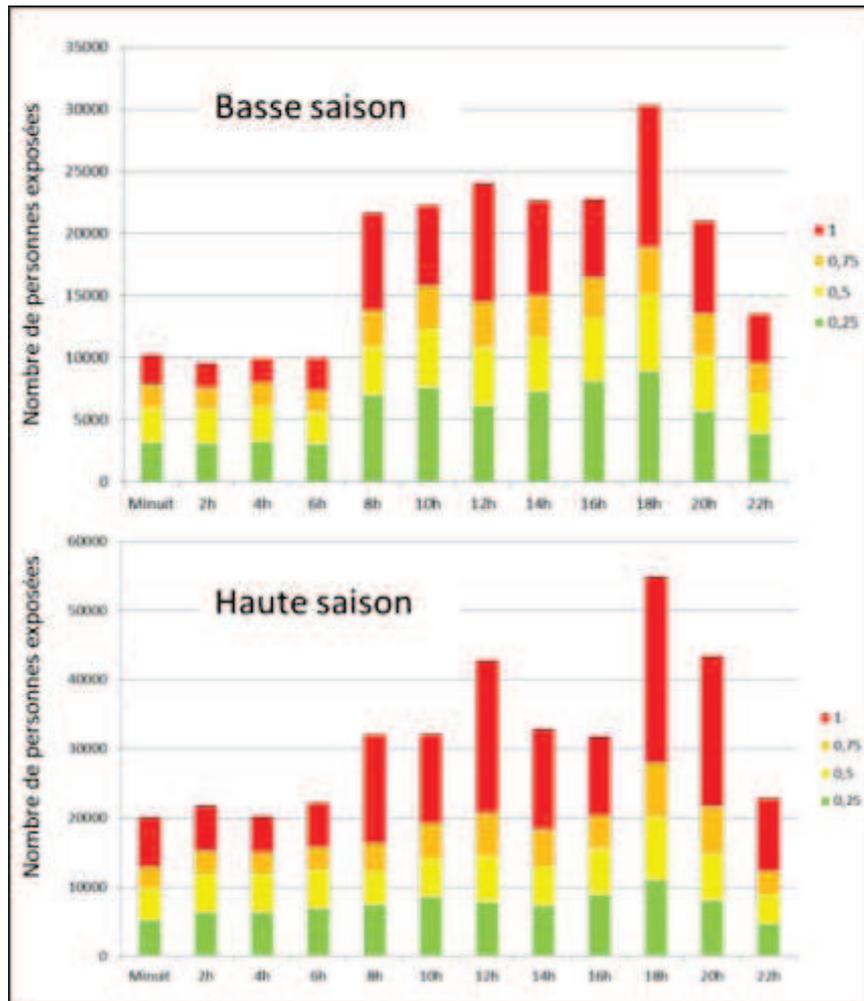


Figure 103. Répartition des enjeux humains par niveau de probabilité de décès (variabilité bi-horaire pour deux saisons) (Leone et al. 2012).

Les graphes d'exposition humaine montrent pour les deux saisons des pics à 12h et 18h (Figure 103). 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) (Leone, 2012).

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 figures 104 & 105, doivent interpeller les responsables locaux sur les mesures de prévention à apporter : information préventive ciblée, protection rapprochée, système d'alerte, facilitation des évacuations...(Leone, 2012).

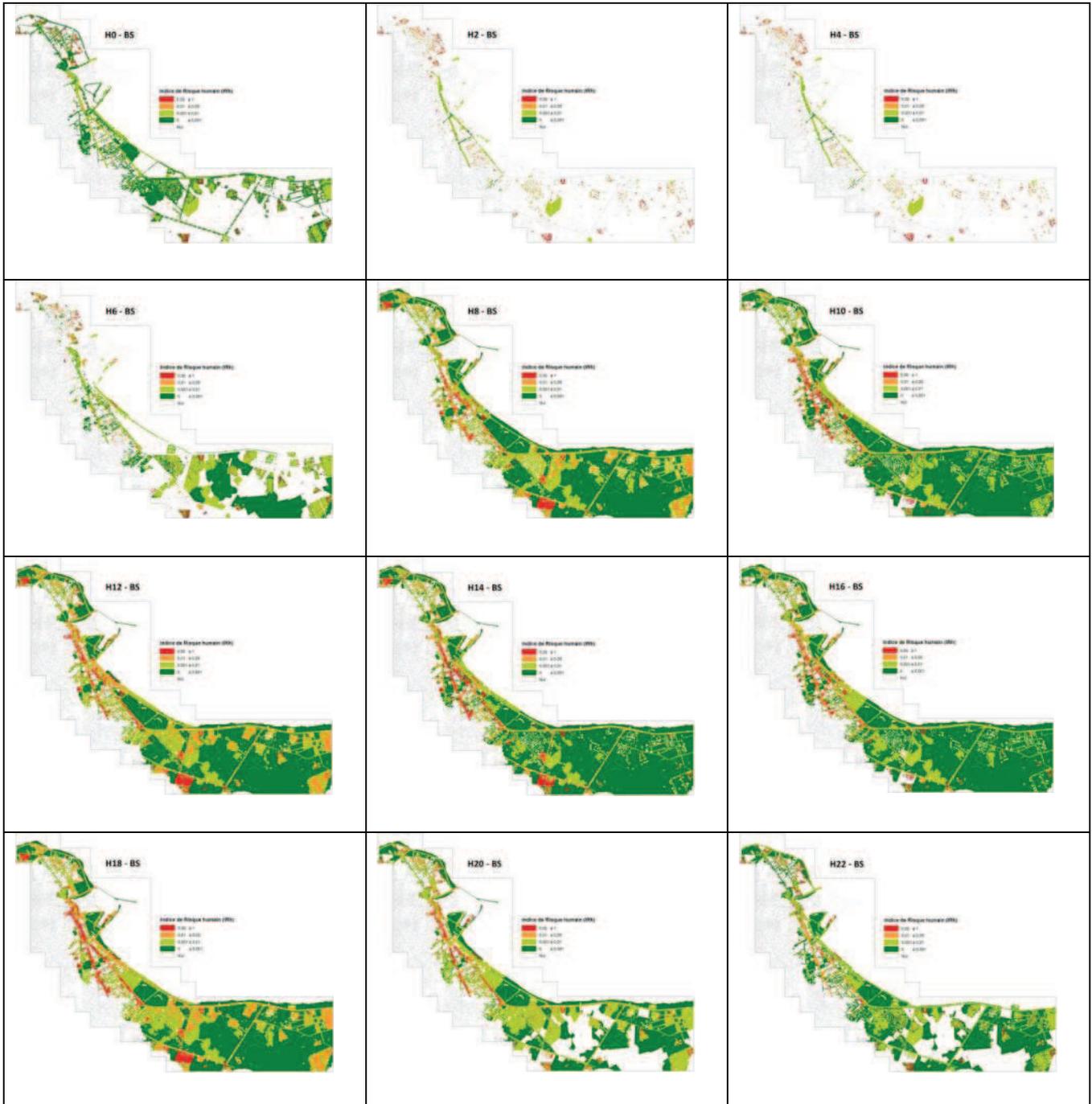


Figure 104. Indice de risque de pertes humaines (IRh, variabilité bi-horaire, basse-saison) (Leone et al. 2012).

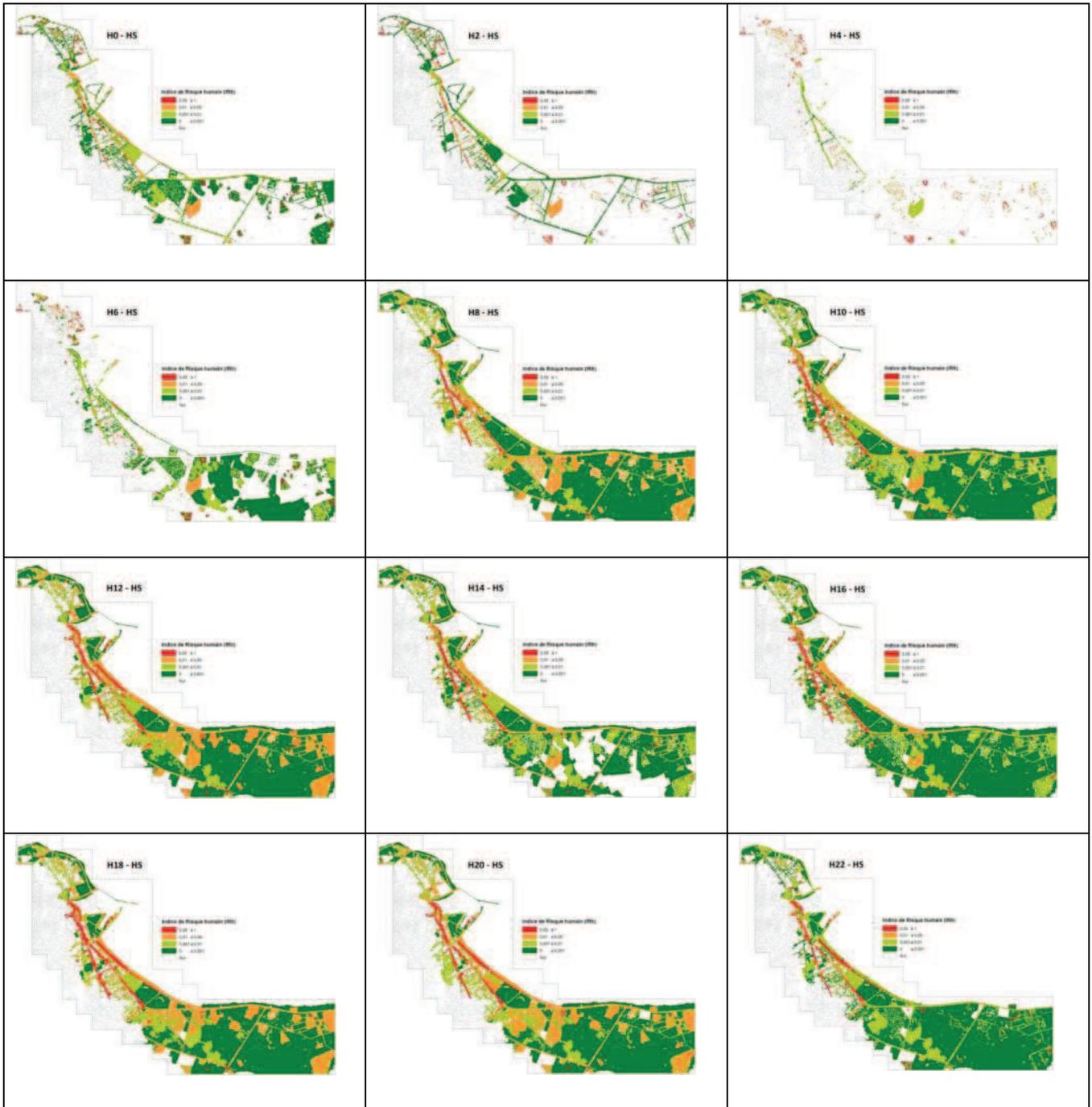


Figure 105. Indice de risque de pertes humaines (IRh, variabilité bi-horaire, **haute-saison**) (Leone et al. 2012)

## Conclusion de la 2<sup>ème</sup> partie

Notre démarche d'étude, parce qu'elle a pris sérieusement en considération la question posée par la décision en matière de politique publique de prévention des risques, permet la production de connaissances et de cartes mieux adaptées aux pratiques et aux besoins des décideurs.

Le jeu de géo-indicateurs obtenu permet de comparer l'exposition territoriale à l'échelle du Maroc. Les résultats sont agrégés sur plusieurs mailles territoriales et sont exprimés en valeurs absolues ou relatives afin d'offrir le plus grand éventail cartographique aux décideurs. L'exposition est plus forte sur le corridor urbain médio-atlantique Rabat-El Jadida.

La démarche par scénario de risque a permis une évaluation intégrée du risque de tsunami à El Jadida, mettant en relief les forts enjeux humains et structurels de la ville, et aboutissant à une quantification du risque de pertes humaines potentielles.

La qualité de ces cartes est non seulement dépendante de la connaissance des enjeux et des fonctions de vulnérabilité, mais aussi des indications sur la submersion (hauteur, vitesse,..) engendrée par le tsunami.



## Conclusions et recommandations

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans une approche intégrée d'évaluation du risque de tsunami sur le littoral atlantique marocain, avec : l'étude de l'historique des tsunamis, la recherche de témoignages sédimentaires sur le terrain, la modélisation numérique d'un scénario de référence, et la proposition d'une démarche d'évaluation de vulnérabilité, d'exposition et d'impacts pour un tsunami majeur et son application à des fins de sensibilisation et d'information préventive .

L'étude historique indique que l'aléa tsunami est probable sur le littoral atlantique marocain. Le peu de documents disponibles et le manque de témoignages sédimentaires ne permettent pas d'évaluer l'aléa.

La modélisation numérique d'un tsunami similaire à celui de 1755 est une première rendue possible grâce à la coopération maroco-franco-portugaise instaurée au sein de l'ANR MAREMOTI qui a soutenu ce travail.

La simulation numérique de ce tsunami depuis la source HSF donne des temps d'arrivée compris entre 51 mn (Rabat) et 66 mn (Ceuta) sur le littoral marocain (53 mn sur El Jadida). La valeur la plus importante d'inondation est atteinte dans la lagune Moulay Bouselham au Nord avec près de 6 km de pénétration (1km à El Jadida avec une vitesse entre 0 à 10 m/s). 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 (9m) et Assilah et Rabat / Salé.

Ces résultats ont 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. Ils 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.

La modélisation à échelle fine de l'aléa sur la ville d'El Jadida 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 a été complété par la modélisation des temps et des itinéraires d'évacuation vers plusieurs zones refuges de la ville dans le cadre du projet MAREMOTI (Heymann, 2011 et Leone et al., 2012). Ce travail va contribuer à la planification d'une gestion de crise locale, dernière étape du système d'alerte régional en cas de tsunami (Figure 106).

Ce système d'alerte régional SATANEM (Système d'Alerte aux Tsunamis de l'Atlantique Nord-est et de la Méditerranée) est en cours d'installation selon la recommandation de l'UNESCO de janvier 2005. Pourtant, le Maroc semble peu intégré dans le Groupe International de Coordination (GIC) du SATANEM. Il ne participe que très discrètement aux réunions de la Commission Océanographique Internationale (COI) de l'UNESCO et ne montre pas de véritable volonté d'engagement dans le développement de ce système d'alerte. Cependant, 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, le 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 golfe 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. Or, ce réseau de surveillance et d'alerte est inutile si les autorités et la population ne savent pas comment réagir en cas d'alerte. Il doit donc s'accompagner par la mise en place de plans de préparation et d'évacuation en cas de tsunami au Maroc.

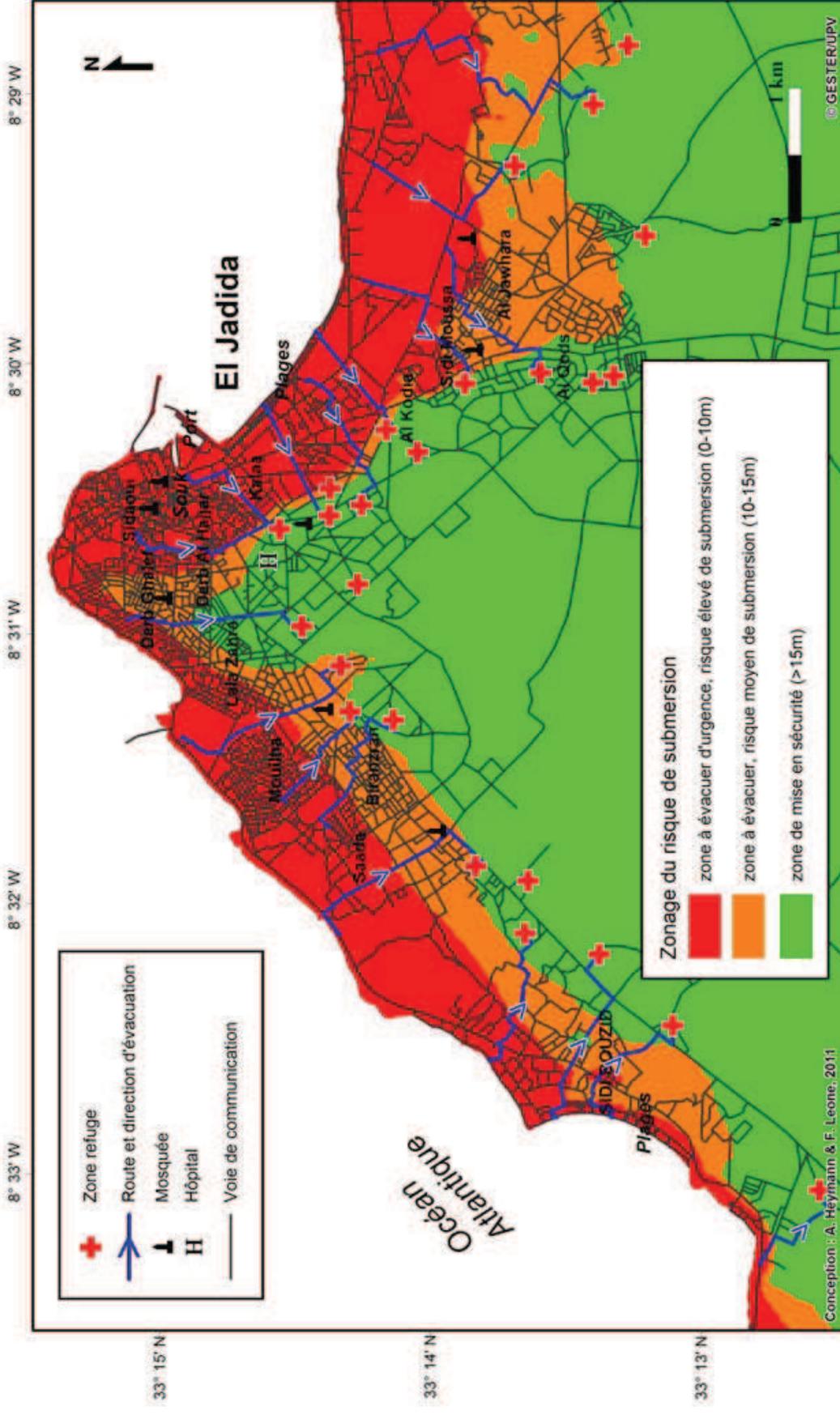


Figure 106. Proposition de plan d'évacuation en cas de tsunami pour la ville d'El Jadida (Maroc) (Heymann, 2011 et Leone et al., 2012).

Notre approche d'évaluation du risque de tsunami au Maroc développée dans le cadre du projet MAREMOTI possède un certain potentiel opérationnel. Néanmoins, elle présente des limites et quelques incertitudes, à chacune de ses étapes, qu'il convient de souligner en vue de futures améliorations.

L'insuffisance et le manque de fiabilité des données historiques sur les événements tsunamigènes ayant affecté le Maroc constituent la limite la plus importante dans l'évaluation de l'aléa. Dès lors, des études approfondies aussi bien sur la connaissance des événements passés (sources historiques), qu'un travail de prospection sur l'ensemble des côtes marocaines sur les dépôts de tsunamis en exploitant les résultats de la modélisation numérique (Roger, 2011) pour mieux cibler les zones à explorer à condition qu'elles soient non antropisées et d'utiliser un matériel et des techniques récentes, permettraient une meilleure analyse et précision des résultats.

La précision des paramètres de la source retenue et la qualité des données topobathymétriques sont des facteurs limitants de la modélisation numérique du fait de la non prise en compte des structures sous-marines qui peuvent influencer le comportement du tsunami (la forme, la perte d'énergie par réflexion, l'amplification, le déferlement, ...)

La question du choix des scénarios peut être largement débattue : choix d'un scénario maximisant l'aléa à très faible récurrence avec le 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 pré-calculés pour envisager des mesures de prévention adaptées à chaque situation. Ce travail est en cours dans le cadre du développement du système d'alerte régional où plus de 5000 propagations de tsunami sont modélisés (Omira *et al.*, 2012).

La démarche utilisée pour évaluer les enjeux nécessite une mise à jour de la base de données sur l'occupation du littoral atlantique, en intégrant d'autres enjeux stratégiques comme les infrastructures routières. La modélisation des pertes d'accessibilité à l'échelle régionale via l'atteinte de ces infrastructures est l'une des perspectives de ce travail.

Le modèle de vulnérabilité humaine d'El Jadida, demande aussi une mise à jour régulière de la répartition de population, en tenant en compte de la dynamique urbaine de la ville. L'accès

à des statistiques de densité de population et de la capacité maximale de certains bâtiments publics plus détaillées permet un gain de précision.

La démarche proposée (*à l'échelle fine*) s'intéresse plus particulièrement aux enjeux humains à l'impact direct du tsunami. On peut envisager une extension de l'échelle temporelle, en s'intéressant aux conséquences indirectes et à la résilience des sociétés (Sahal, 2011). On peut aussi élargir la méthode spatiale au niveau d'El Jadida ou à d'autres sites fortement exposés comme Mohammedia et Ain Sebaa.

Les autres enjeux stratégiques sociaux, économiques et infrastructurels n'ont pas été évalués. Plusieurs perspectives peuvent être envisagées. On peut imaginer la réalisation des indices de pertes (ou des matrices d'endommagement) de biens nécessaires à l'exercice des activités industrielles, commerciales et touristiques et de perte en termes de chiffres d'affaire et d'emploi associés. Parmi les biens les plus endommagés en cas de tsunami, ce sont les bateaux amarrés dans les ports. En cas de variation soudaine et forte du niveau de la mer, les amarres très rapidement tendues à rompre se brisent, libérant les bateaux. Ceux-ci vont se percuter ou toser sur les aménagements portuaires ou sur le fond. Les variations de niveaux liées aux flux et aux reflux provoquent des forts courants à l'intérieur des ports (Terrier et al., 2012). L'une des perspectives est de chiffrer les bateaux amarrés dans les ports afin d'évaluer les pertes potentielles.

Concernant les enjeux infrastructurels et fonctionnels on peut évaluer la destruction des réseaux (routier, d'électricité, d'alimentation en eau...) et la perte d'accessibilité en cas de tsunami.

Selon le Cadre d'Action de Hyogo<sup>14</sup> 2005-2015 : « Chaque État a la responsabilité de prendre des mesures efficaces pour réduire les risques et protéger ses populations, ses infrastructures et son patrimoine national des conséquences des catastrophes ». La gestion du risque de tsunami dépasse le cadre de compétence d'une commune et des autorités locales, elle rentre plutôt dans la politique de l'état en matière de gestion des ressources naturelles et d'aménagement des zones côtières dans un objectif du développement durable. Ce qui suppose une réflexion commune sur les démarches à suivre pour prévenir et gérer ce risque. Dans ce cadre, nous recommandons les mesures suivantes :

- Etablir des cartes d'aléa (en utilisant la modélisation numérique) qui serviront à évaluer le risque et à établir des plans et cartes d'évacuation pour toute les communes littorales exposées, en exploitant les résultats obtenus dans le cadre du projet MAREMOTI et des retours d'expérience.
- Créer une base de données commune sur les tsunamis au Maroc (comme celle créée par le BRGM sur les tsunamis en France) en rassemblant toutes les données disponibles historiques à l'échelle nationale et internationale et la rendre accessible aux individus et aux services qui en ont besoin à des fins de recherche et d'atténuation. Dans ce cadre, il faut encourager et soutenir les activités de recherche sur les tsunamis (recherche de témoignages sédimentaires...) et toutes les questions relatives, susceptibles d'améliorer l'atténuation des risques.
- Le contrôle de l'aménagement du territoire est de première importance : il faut éviter l'implantation dans les zones identifiées comme exposées au déferlement des tsunamis, de certaines installations de lieux de rassemblement ou d'installation mettant des enfants, des personnes âgées ou des personnes handicapées en danger. Il faut prendre des précautions spécifiques pour l'installation d'infrastructures nécessaires durant les crises (hôpitaux, pompiers, protection civile, la police, etc.) (IOC/UNESCO, 1999).  
Il faut appliquer les normes parasismiques aux nouveaux bâtiments (résistance au déferlement des vagues, fondations consolidées, etc.) pour minimiser les dommages dus aux tsunamis; Les installations industrielles (comme la raffinerie de Mohammedia et la

---

<sup>14</sup> La 2ème conférence mondiale sur la réduction des désastres qui a été organisée à KOBE Hyogo (Japon) en Janvier 2005,

centrale nucléaire projetée au sud de Safi) susceptibles d'aggraver une catastrophe imputable à un tsunami en laissant fuir ou en répandant des matériaux inflammatoires ou dangereux devraient, soit être renforcées contre le risque de tsunami, soit situées en dehors des zones inondables. Les installations touristiques concentrent souvent à proximité du front de mer de nombreuses personnes qui n'ont parfois pas la moindre idée de ce qu'est un tsunami. Elles devraient donc obligatoirement mettre au point des procédures spéciales visant à informer et évacuer leurs hôtes en cas de tsunami (IOC/UNESCO, 1999).

- Améliorer la couverture stratégique des instruments de mesure du niveau de l'eau (marégraphes,...) et la qualité des signaux qu'ils enregistrent à des fins à la fois de recherche et d'alerte.
- Elaborer un programme pédagogique permettant d'éduquer, former et sensibiliser la population, les gestionnaires des situations d'urgence et les décideurs.
- Etablir des plans de secours communaux spécifiques aux tsunamis au cas où, les mesures préventives et d'évacuation seraient mises en échec ou dépassées.
- Enfin, vu la gravité de ce type de risque majeur, il est utile de prévoir des exercices de simulation de mise en œuvre de ces plans d'urgence pour les intervenants dans la gestion de la crise, y compris les volontaires.

## Bibliographie

- Abdedine H. (2012). La problématique de la pauvreté au Maroc. [http://www.tanmia.ma/article.php?id\\_article=30229](http://www.tanmia.ma/article.php?id_article=30229)
- Abrantes F., Alt-Epping U., Lebreiro S., Voelker A., Shneider R. (2008). Sedimentological record of tsunamis on shallow-shelf areas: The case of the 1969 AD and 1755 AD tsunamis on the Portuguese Shelf off Lisbon. *Marine Geology* 249, pp 283-293.
- Amar A. (2011). Le Japon ravive la peur d'un tsunami au Maroc. *Slate Afrique*. <http://www.slateafrique.com/947/apres-japon-maroc-redoute-punition-divine>
- Andrade C. (1992). Tsunami generated forms in the Algarve barrier islands (South Portugal). *Science of Tsunami Hazards*, vol. 10, n°1, pp. 21-35.
- 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.
- 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.
- Banerjee D., Murray A.S. et Foster I.D.L. (2001). Scilly Isles, UK: optical dating of a possible tsunami deposit from the 1755 Lisbon earthquake. *Quaternary Science Review*, n°20, pp. 715-718.
- 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., 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.
- 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.
- Bavoux J.J., Beaucire F., Chapelon L., Zembri P. (2005). *Géographie des transports*, Ed. Armand Colin, Collection U, Paris, 232 p.
- Ben Sari D. (1978). *Connaissance géophysique du Maroc*. Thèse d'Etat ; Univ. Grenoble ; 262 p ; plus fig.
- Berriane M. (2007). Suivi de la stratégie méditerranéenne pour le développement durable Promouvoir un tourisme durable au Maroc Etude nationale du Maroc. Plan Bleu Centre d'Activités Régionales. 87p.

- Bezzeghoud M., Borges J. F., Caldeira B., Buform E., Udias A. (2008). Seismic activity in the Azores Region in the context of the western part of the Eurasia-Nubia plate boundary. International Seminar on Seismic risk and rehabilitation on the 10th Anniversary of the July 9 1998 Azores Earthquake, Azores – Portugal.
- Blanc P.L. (2008). The tsunami in Cadiz on 1 November 1755: A critical analysis of reports by Antonio de Ulloa and by Louis Godin. C.R Geoscience, n°340, pp. 251- 261.
- 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.
- Borges J. F., Bezzeghoud M., Buform E., Pro C. and Fitas A. (2007). The 1980, 1997 and 1998 Azores earthquakes and its seismotectonic implications. Tectonophysics, 435, 37-54.
- Bouhrara I. (2011). Energie nucléaire : Une option maintenue !. [http://www.financenews.press.ma/portail/?tmpl=component&print=1&option=com\\_content&id=6196](http://www.financenews.press.ma/portail/?tmpl=component&print=1&option=com_content&id=6196)
- Branlard E. (2005). Description et modélisation des tsunamis. Rapport TIPE. 48 p.
- Buform E., Bezzeghoud M., Udias A., Pro C. (2004). Seismic sources on the Iberia-African plate boundary and their tectonic implications. Pure Appl Geophys 161:623–626
- Buform E., Udias A., Mezcua J. (1988). Seismicity and focal mechanisms in south Spain. Bull. Seismol. Soc. Am. 78, 2008–2224.
- 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.
- Cartwright J.H.E., Nakamura H. (2008). Tsunami: a history of the term and of scientific understanding of the phenomenon in Japanese and Western culture. Notes and Record of the Royal Society, 62, 151-166. Doi: 10.1098/rsnr. 2007.0038.
- Chahid A. et Lekhiar M. (2006). El Jadida mémoire, 2ème édition, Maroc, 144 p.
- Chapelon L. (2006). Politiques de transport et accessibilité – Mémoire géographie, 268 p.
- Cherkaoui T- E. (1991). Contribution à l'étude de l'aléa sismique au Maroc. Thèse de l'Université Joseph Fourier ; Grenoble ; 246p.
- Cherkaoui T- E. Les effets du séisme du 1<sup>er</sup> novembre 1755 au Maroc. <http://www.everyoneweb.com/mtcherkaoui/> (Sismicité et aléa sismique du Maroc).

Chester D. K. (2001). The 1755 Lisbon Earthquake. *Progress in Physical Geography*, n°25, vol.3, pp.363-383.

Chouquer G. (2008). *Traité d'archéogéographie, la crise des récits géohistoriques*, Paris, 2008, 200 p.

Cirac P., Faugeres J.C et Gayet J. (1979). Résultats préliminaires d'une reconnaissance sédimentaire du plateau atlantique marocain. *Bull.Inst. géol. Bassin d'Aquitaine*, Bordeaux, 25, p.69- 81.

Courteau, R. (2008). *Rapport sur l'évaluation et la prévention du risque du tsunami sur les côtes françaises en métropole et outre-mer*. Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques. 2008, n°488/117, 168 p.

Crocq L., Huberson S., Vraie B., (2009). *Gérer les grandes crises : sanitaires, écologiques, politiques et économiques*, Edition Odile Jacob, 291 p.

Cuhna P.P., Buylaert J.P., Murray A.S., Andrade C., Freitas M.C., Fatela F., Muhna J.M., Martins A.A., Sugisaki S. (2009). Optical dating of clastic deposits generated by an extreme marine coastal flood: The 1755 tsunami deposits in the Algarve (Portugal). *Quaternary Geochronology*: 1-7.

Daamen W. (2004). *Modeling Passenger Flows in Public Transport Facilities*, Delft University of Technology, 403 p.

Dabrio C.J., Goy J.L. et Zazo C. (1998). The record of the tsunami produced by the 1755 Lisbon earthquake in Valdenagrana spit (Gulf of Cadiz, southern Spain), *Geogaceta*, n°23.

Dalle I. (2007). *Maroc : histoire, société, culture*, Ed. La découverte, Paris, 221p.

DAT (2007). *Etude sur la faisabilité de mise en place de plates-formes logistiques multimodales de fret au Maroc. Rapport de diagnostic. Diagnostic du fonctionnement des réseaux de transport et développement économique des espaces de croissance*. 262p.

Dawson A. et Shi S. (2000). Tsunami Deposits. *Pure appl. Geophys.*, n°157, pp. 875-897.

Dawson A. et Stewart I. (2007). Tsunami geoscience . *Progress in Physical Geography*, vol. 31, n°6, pp. 575-590.

Dawson A., Lockett P. et Shi S. (2004).Tsunami hazards in Europe. *Environment International*, n°30, pp. 577-585.

Dawson A.G. , Foster I.D.L., Shi S., Smith D.E. and Long D. (1991).The identification of tsunami deposits in coastal sediment sequences. *Sciences of Tsunami Hazards*, vol. 9, n°1, pp. 73-82.

Delencre G. (2009). *Recueil d'enregistrements marégraphiques historiques de tsunamis et premières analyses. Projet MAREMOTI (Tâche 1 : Marégraphes et observations du niveau de la mer contenant des signaux de tsunamis)*. Rapport de stage ENSIETA 2e année. 71 p.

- 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.
- Diegel, F. A., Karlo, J. F., Schuster, D. C., Shoup, R. C. and Tauvers, P. R. (1995). Cenozoic Structural Evolution and tectono-Stratigraphic Framework of the Northern Gulf Coast Continental Margin. in: M. P. A. Jackson, D. G. Roberts and S. Snelson (eds.), *Salt tectonics: a global perspective*. AAPG Memoir 65, 109-151.
- 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.
- El Alami S.O. et Tinti S. (1991). A preliminary evaluation of the hazards in the Moroccan coasts, *Science of Tsunami Hazards*, vol.9, n°1, pp. 31-38.
- El Alami S. O., Tadili B. A., Cherkaoui T.-E., Ramdani M. (2005). L'alea sismique et l'aménagement du territoire des provinces du nord du Maroc. *Revue AFN Maroc*. N°1.
- El Mrabet A.T. (2005). The great earthquakes in the Maghreb region and their consequences on man and environment, Rabat, CNRST-LAG-RABAT-MOROCCO, 2005
- Etienne S. et Paris R. (2007). Les littoraux volcaniques. Une approche environnementale. Clermont-Ferrand, Presses Universitaires Blaise Pascal, 226 p.
- FEMA (2008). Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, FEMA P646 / June 2008, 176 p.
- Fernandes, R. (2004). Present-day kinematics at the Azores Gibraltar plate boundary as derived from GPS observations. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Frogneux M. (1980). La sismicité marocaine. Etude des paramètres à la source des séismes proches. Thèse 3ème cycle; Univ. Grenoble ; 131 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, Rapport de stage de Master 2 GCRN, Université Montpellier 3 (dir. F. Leone), 106 p.

Gauraz A.L., Valencia N., Koscielny M., Guillande 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.

Genet P. (2011). Signature sédimentaire des tsunamis sur la côte atlantique marocaine entre Tanger et Larache et implications en terme de risque. Mémoire master 1 Géoenvironnement. Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand. 95p.

González F. I., Milburn H.B., Bernard E.N., Newman J. (1998). Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART). Brief Overview and Status Report. In Proceeding of the International Workshop on Tsunami Disaster Mitigation, 19-22 January 1998, Tokyo, Japan. <http://www.ndbc.noaa.gov/dart/brief.shtml>

Gonzalez L. F. (2001). La cinématique de l'Atlantique Nord : la question de la déformation intraplaque. Ph.D. thesis, Université de Bretagne Occidentale.

Gràcia E., Pallas R., Solo J.I., Comas M., Moreno X., Masana E., Santanach P., Diez S., Garcia M., Danobeitia J. (2006). Active faulting offshore SE Spain (Alboran Sea): implications for earthquake hazard assessment in the Southern Iberian Margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 241, 734-749.

Gràcia E., Danobeitia J., Vergés J., and the Parsifal T. (2003). Mapping active faults offshore Portugal (36°N-38°N): implications for seismic hazard assessment along the southwest Iberia margin, *Geology*, 31, 83-86.

Grandin R., Borges J.F., Bezzeghoud M., Caldeira B., Carrilho F. (2007). Simulations of strong ground motion in SW Iberia for the 1969 February 28 (Ms= 8.0) and the 1755 Novembre 1 (M~8.5) earthquakes – II. Strong ground motion simulations. *Geophys. J. Int.*, 71, 1144-1161.

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.

Hamdache M., Pelaez J.A., Talbi A., Lopez Casado C. (2010). A unified catalog of main earthquakes for Northern Algeria from A.D. 856 to 2008. *Seismological Research Letters*, 81 (5), 732-739.

Hanquiez V. (2006). Processus sédimentaires et activité de la Veine d'Eau Méditerranéenne au cours du Quaternaire terminal dans le Golfe de Cadix. Thèse de doctorat de l'Université BORDEAUX I. 374 p

Harbi A., Peresan A., Panza G.F. (2010). Seismicity of Eastern Algeria: a revised and extended earthquake catalogue. *Natural Hazards*, 54, 724-747.

Hatzfeld D. (1978). Etude sismotectonique de la zone de collision ibéro-maghrébine. Thèse d'Etat; Univ. Grenoble, 281 p.

Hatzfeld D., Caillot V., Cherkaoui T.-E, Jebli H. et Medina F. (1993). Microearthquake seismicity and fault plane solutions around the Nekor strike-slip fault, Morocco. *Earth Planet. Scien. Lett.* ; 120; pp: 31-41.

HCP (2010b). Carte de la pauvreté 2007. Haut Commissariat au Plan. 122pp. [http://omdh.hcp.ma/Carte-de-la-pauvrete-2007\\_a185.html](http://omdh.hcp.ma/Carte-de-la-pauvrete-2007_a185.html)

Hébert H., Brunstein D., Loevenbruck A., Sladen A., Roger J., Schindelé F., Lavigne F., Vautier F., (2011). Modélisation numérique du tsunami dans les districts de Banda Aceh et Lhok Nga. In F. LAVIGNE et R. PARIS. *Tsunarisque*. Paris, France: Publications de la Sorbonne, 2011, pp 59-76

Heezen, B.C. and Johnson, G.L. (1969). Mediterranean under-current and microphysiography west of Gibraltar. *Bulletins de l'Institut Oceanographique de Monaco*, 67: 1-97.

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.

Hindson R.A. et Andrade C. (1999). Sedimentation and hydrodynamic processes associated with the tsunami generated by the 1755 Lisbon Earthquake. *Quaternary International*, n°56, pp. 27-38.

Hindson R.A., Andrade C., Dawson A. (1996). Sedimentary Processes associated with the tsunami generated by the 1755 Lisbon earthquake on the Algarve Coast, Portugal. *Phys. Cham. Earth*, vol. 21, n°12, pp. 57-63.

International Tsunami Survey Team (ITST) (1998). Preliminary Report on the Tsunami Caused by the Sissano Earthquake at West Sepik. PNG on 17 July 1998.

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](http://unesdoc.unesco.org/images/0021/.../214734e.pdf).

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.

Jaffe B.E. et Gelfenbaum G. (2002). Using tsunami deposits to improve assessment of tsunami risk , solution to coastal disasters 02. *Conference Proceedings, ASCE*, pp. 836-847.

Jimenez-Munt I., Fernandez M., Torne M., Bird P. (2001). The transition from linear to diffuse plate boundary in the Azores-Gibraltar region: results from a thin-sheet model. *Earth Planet. Sci. Lett.* 192, 175–189.

- Jiménez-Munt I., M. Fernández, M. Torne, P. Bird, (2001). The transition from linear to diffuse plate boundary in the Azores-Gibraltar region: results from a thin-sheet model. *Earth. And Planetary Sci. Lett.*, 192, 175-189.
- 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.
- Kaioua A. (2005). Accès aux services de base dans l'axe Kenitra-Jorf Lasfar dans une perspective d'aménagement du territoire. GT6-10 231.
- Kenyon, N., Akhmetzhanov, A. and Ivanov, M. (2000). Multidisciplinary study of geological processes on the North East Atlantic and Western Mediterranean margins. Preliminary results of geological and geophysical investigations during the TTR-9 cruise of R/V "Professor Logachev", June-July 1999. Intergovernmental Oceanographic Commission technical series, 102 pp.
- 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.
- Kortekaas S., Dawson A.G. (2007). Distinguishing tsunami and storm deposits: An example from Martinhal, SW Portugal. *Sedimentary Geology* 200, pp 208-221.
- 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.
- Laurenti A. (2011). Approche de l'aléa tsunami sur les Alpes-Maritimes par l'historique des événements. <http://www.azurseisme.com>
- Lavigne F., Paris R., Grancher D., Wassmer P., Flohic F., De Coster B., Leone F., Gunawan T., Fachrizal, Setiawan A., Syahnan, Triyono R., Cahyadi R., Daniel Brunstein, Christopher Gomez Ch., Sri Hadmoko D. (2011). Le tsunami du 26 décembre 2004 : chronologie et reconstitution de la catastrophe dans la région de Banda Aceh. In F. Lavigne et R. Paris. *Tsunamis*. Paris, France: Publications de la Sorbonne, 2011, pp 27-48.
- 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. (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. (2007). Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes « naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisque - HDR, Mémoire, Université Montpellier III, 330 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.

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-RISKMAT-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.

Leone F., De Richemond N. et Vinet F. (2010). Aléas naturels et gestion des risques. Ed. PUF, Collection L, Géographie, Paris, 288 p.

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., 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.

Leorri E., Freitas M.C., Zourarah B., Andrade C., Mellas S., Cruces A., Griboulard R. Lopes V. (2010). Multiproxy approach to characterize an overwash deposit: Oualidia lagoon (Moroccan Atlantic coast). *Geogaceta*, 48, 23-27 pp.

- Liu P L-F, Cho Y-S, Yoon S B, Seo S N (1994). Numerical simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii. In *Recent Developments in Tsunami Research*, M I El-Sabh (ed) Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, pp 99–115.
- Lobo, F. J., Hernández-Molina, F. J., Somoza, L., Rodero, J., Maldonado, A. and Barnolas, A. (2000). Patterns of bottom current flow deduced from dune asymmetries over the Gulf of Cadiz shelf (southwest Spain). *Marine Geology* 117(3-4), 139-154.
- Luque L., Lario J., Civis J., Silva P.G., Zazo C., Goy, Dabrio C.J. (2002). Sedimentary record of a tsunami during Roman times, Bay of Cadiz, Spain. *Journal of Quaternary Science* 17 (5-6): 623-631.
- Luque L., Lario J., Zazo C., Goy J.L., Dabrio J.L. et Silva P.G. (2001). Tsunami deposits as paleoseismic indicators: examples from the Spanish coast. *Acta Geologica Hispanica*, vol. 36, n°3-4, pp. 197-211.
- Maldonado A. and Nelson C. H. (1999). Interaction of tectonic and depositional processes that control the evolution of the Iberian Gulf of Cadiz margin. *Marine Geology* 155(1-2), 217-242.
- Maldonado, A. (1985). Evolution of the Mediterranean Basins and a Detailed Reconstruction of the Cenozoic Paleooceanography. in: R. Margalef (eds.), *Western Mediterranean, Key Environments*, Pergamon Press, Oxford, 17-60.
- Malod J. A. (1982). Comparaison de l'évolution des marges continentales au Nord et au Sud de la Péninsule Ibérique. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 235 pp.
- 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 4e Conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion* - Presse de l'Université Laval, Québec, 594 p.
- Martinez Solares JM, Lopez Arroyo A., Mezcuca J. (1979). Isoseismal map of the 1755 Lisbon earthquake obtained from Spanish data. *Tectonophysics* 1979; 65 (3): 301-13.
- 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, Édit. MATEE/MedWetCoast, Maroc, 12 p.
- Matias A., Ferreira O., Vila-Concejo A., Garcia T. et Alveirinho Dias J. (2008). Classification of washover dynamics in barrier islands. *Geomorphology*, n°97, pp. 655-674.
- Mei C. (1983). *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*, Wiley, New York, 1983.
- Mélières F. (1974). Recherches sur la dynamique sédimentaire du Golfe de Cadix (Espagne). Thèse d'état de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, 235 pp.

Mellas S. (2007). Le washover de la lagune de Oualidia : tsunamite ou tempestite?, Mémoire de DESA, Université Chouaïb Doukkali, faculté des sciences d'El-Jadida, 71 p.

Mellas S., Leone F., Omira R., Gherardi M., Baptista M-A., Zourarah B., Péroche M. et Lagahé E. (2012). Le risque tsunamique au Maroc : modélisation et évaluation au moyen d'un premier jeu d'indicateurs d'exposition du littoral atlantique. *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, 2012, volume VI. Pp 119-139.

Mendes V.L., Baptista M.A., Miranda J.M., Miranda P.M.A. (1999). Can hydrodynamic modelling of tsunami contribute to seismic risk assessment? *Phys. Chem. Earth*, vol. 24, n°2, pp. 139-144.

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.

Mhammdi N., Medina F., Kelletat D., Ahmamou M.F. et Aloussi L. (2008). Large boulders along the rabat coast (Morocco); possible emplacement by the november, 1st, 1755 A.D. tsunami. *Science of Tsunami Hazards*, 2008, vol. 27, n°1, pp. 17-32.

Morales J.A., Borrego J., San Miguel E.G., Lopez-Gonzales N. et CARRO B. (2008). Sedimentary record of recent tsunamis in the Huelva Estuary (southwestern Spain), *Quaternary Science Review*, n°27, pp. 734-746.

Moratti G., Piccardi L., Vannucci G., Belardinelli M. E., Dahmani M., Bendkik A., Chenakeb M. (2003). The 1755 Meknes earthquake (Morocco): field data and geodynamic implications. *Journal of Geodynamics* 36, 305–322.

Morton R., Gelfenbaum G. et Jaffe B.E. (2007). Physical criteria for distinguishing sandy tsunami and storm deposits using modern examples. *Sedimentary Geology*, doi: 10.1016/j.sedgeo.2007.01.003

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.

Negredo, A. M., Bird, P., Sanz de Galdeano, C., Buforn, E. (2002). Neotectonic modeling of the Ibero-Maghrebian region. *J. Geophys. Res.* 107 (B11), doi :10.1029/2001JB000743.

Nelson C. H., Baraza J. and Maldonado A. (1993). Mediterranean undercurrent sandy contourites, Gulf of Cadiz, Spain. *Sedimentary Geology* 82(1-4), 103 -131.

Oak Ridge National Laboratory (ORNL) (2008). LandScan™ Global Population Database. Édit. 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.
- Okal E.A., Synolakis C.E. (2003). A theoretical comparison of tsunamis from dislocations and landslides. *Pure and Applied Geophysics*, 160, 2177-2188.
- 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., Leone F., Mellas S., Matias L., Zourarah B., Miranda J.M., Carrilho F., and Cherel J-P.. Performance of Coastal Sea-defense Infrastructure in Morocco against Tsunami Threat - Lessons learned from the Japanese March, 11, 2011 Tsunami. Article soumis, nhess-2012-461.
- 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.
- 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.
- ONEM (1997). MEDGEOBASE. Base de données sur l'occupation du sol du littoral marocain. Édit. Observatoire National de l'Environnement Marocain, URL : [www.hcp.ma/file/10558](http://www.hcp.ma/file/10558).
- Ozer P. et Florence De Longueville F. (2005). Tsunami en Asie du Sud-Est : retour sur la gestion d'un cataclysme naturel apocalyptique . *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, article 321, mis en ligne le 14 octobre 2005, consulté le 24 septembre 2012. URL : <http://cybergeo.revues.org/3081> ; DOI : 10.4000/cybergeo.3081
- Paradise T.R. (2005). Perception of earthquake risk in Agadir Morocco: A case study from a Muslim community. *Environmental Hazards*, 6, pp. 167–180.
- Paris R., Lavigne F., Wassmer P. et Sartohadi J. (2007). Coastal sedimentation associated with the December, 26, 2004, tsunami in Lhog Nga, west Banda Aceh (Sumatra, Indonesia). *Marine Geology*, vol.238, pp. 93-106.
- Paris R., Wassmer P., Sartohadi J., Lavigne F., Barthomeuf B., Desgages E., Grancher D., Baumert Ph., Vautier F., Brunstein D. et Gomez Ch. (2009). Tsunamis as geomorphic crisis: lessons from the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga, west Banda Aceh (Sumatra, Indonesia). *Geomorphology*, vol. 104, pp. 59-72.
- Paris R., Wassmer P., Sartohadi J. et Lavigne F. (2011). Étude sédimentologique des dépôts de tsunami du 26 décembre 2004 à Lhok Nga, ouest de Banda Aceh. In F. Lavigne et R. Paris. *Tsunarisque*. Paris, France: Publications de la Sorbonne, 2011, pp. 111-126.

Pelaez JA, Chourak M, Tadili B, Ait Brahim L, Hamdache M, Casado LC, Solares JM, Martinez JM. (2007). A catalogue of main moroccan earthquakes from 1045 to 2005. *Seismological Research Letters* 78. pp 614-621.

Péroche M. (2010). Caractérisation spatio-temporelle de la vulnérabilité urbaine face au risque de tsunami : le cas d'El Jadida (Maroc): approche structurale, mémoire de Master 1 GCRN (dir. F. Leone), Université Montpellier 3, 110 p.

Piatanesi A. (1999). Caractérisation des sources sismiques par étude des tsunamis. Thèse de doctorat, Institut de Physique du Globe de Paris. 185p.  
[www.earth-prints.org/bitstream/2122/5284/.../PhD\\_thesis\\_Piatanesi.pdf](http://www.earth-prints.org/bitstream/2122/5284/.../PhD_thesis_Piatanesi.pdf).

Pigeon P. et D'Ercole R. (1999). L'expertise internationale des risques dits naturels : intérêt géographique. *Annales de Géographie*, Vol. 108 (608), pp 339-357.

Pinheiro, L. M., Ivanov, M. K., Sautkin, A., Akhmanov, G., Magalhaes, V. H., Volkonskaya, A., Monteiro, J. H., Somoza, L., Gardner, J. M., Hamouni, N. and Cunha, M. R. (2003) – Mud volcanism in the Gulf of Cadiz: results from the TTR-10 cruise. *Marine Geology* 195(1-4), 131-151.

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.

Prather B. E. (2000). Calibration and visualization of depositional process models for abovegrade slopes: a case study from the Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology* 17(5), 619-638.

Prendergast A. (2006). Echoes of Ancient Tsunamis. *Ausgeo News*, n°83, 4p.

Quenet G. (2002). La terre tremble à Lisbonne . *L'Histoire*, n°268, pp.N.I.

Ramdani M. (1991). Etude sismotectonique du Nord du Maroc. Thèse es Sciences ; Faculté des Sciences, Univ. Mohammed 1 ; Oujda ; 248 p.

Rapport national sur les Objectifs du Millénaire pour le Développement (2009). (2) : HCP, Enquête nationale sur les niveaux de vie des ménages, 2007.

RDH50 (2006). Rapport de développement humain, (Chapitre III, p. 2), Haut commissariat au plan (HCP Maroc).

Reicherter K., Hubscher C. (2007). Evidence of a seafloor rupture of the Carboneras Fault Zone (southern Spain): relation to the 1522 Almeria earthquake? *Journal of Seismology*, 11, 15-26.

Rhodes B., Tuttle M., Horton B., Doner L., Kelsey H., Nelson A., Cisternas M. (2006). Paleotsunami Research. *EOS*, vol. 87, n°21, pp. 205-209.

Roberts, D. G. (1970). The Rif-Betic orogen in the Gulf of Cadiz. *Marine Geology* 9, 31-37.

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.

Roger J. (2011). Tsunamis générés par des séismes au niveau de la zone de collision entre les plaques africaines et eurasiennes : Etudes de cas pour l'évaluation du risque tsunami en Méditerranée occidentale et Atlantique nord. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie. 347p.

Ruiz F., Rodriguez-Ramirez A., Caceres L.M., Vidal J.R., Carretero M.I., Abad M., Olias M., Pozo M. (2005). Evidence of high-energy events in the geological record: Mid-holocene evolution of the southwestern Doñana National Park (SW Spain). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol.* 229, pp 212– 229.

Sahal A. (2011). Le risque tsunami en France : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque. Thèse de doctorat de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. 314 p.

Santos A., Koshimura S. & Imamura F. (2009). The 1755 Lisbon Tsunami: Tsunami Source Determination and its Validation. *J. of Disaster Research*, vol 4, n°1, 41

Scheffers A. et Kelletat D. (2005). Tsunami relics on the coastal landscape west of Lisbon. *Science of Tsunami Hazards*, vol. 23, n°1, pp. 3-17.

SDAU (Schéma Directeur d'Aménagement Urbain d'El Jadida) (2006). Présentation du rapport, 66 p.

Sedgwick P.E. et Davis R.A (2003). Stratigraphy of washover deposits in Florida: implications for recognition in the stratigraphic record. *Marine Geology*, n°200, pp. 31-48.

Shanmugam G. (2006). The Tsunamite Problem. *Journal of Sedimentary Research*, vol. 76, n°5, pp. 718-730.

Shi S. et Smith D.E. (2003). Coastal tsunami geomorphological impacts and sedimentation processes: case studies of modern and prehistorical events. International conference on Estuaries and coasts, November 9-11 2003, Hangzhou, China.

Silva P.G., Borja F., Zazo C., Goy J.L., Bardají T., De Luque L., Lario J., Dabrio C.J. (2005). Archaeoseismic record at the ancient Roman City of Baelo Claudia (Cádiz, south Spain). *Tectonophysics* 408 (1-4): 129-146.

Simoes J. S., Afilhado A. et Mendes Victor L. (1992). Assessing the tsunami risk instrumental and historical records. *Science of Tsunami Hazards*, vol. 19, n°1, pp. 3-9.

SOFA (2005). Étude du Schema d'Organisation Fonctionnelle et d'Aménagement de l'aire métropolitaine centrale CASABLANCA-RABAT. Rapport de première phase. Direction de l'aménagement du territoire (DAT).

Somoza, L., Díaz-del-Río, V., León, R., Ivanov, M. K., Fernandez-Puga, M. C., Gardner, J. M., Hernández-Molina, F. J., Pinheiro, L. M., Rodero, J., Lobato, A., Maestro, A., Vázquez, J. T., Medialdea, T. and Fernandez-Salas, L. M. (2003). Seabed morphology and hydrocarbon

seepage in the Gulf of Cadiz mud volcano area: Acoustic imagery, multibeam and ultra-high resolution seismic data. *Marine Geology* 195, 153-176.

Sugimoto T. & al. (2003). A Human Damage Prediction Method for Tsunami Disasters Incorporating Evacuation Activities, *Natural Hazards*, 29: 585–600, 16 p.

Tahayt A. (2008). Apport des mesures de la géodésie spatiale dans l'étude des déformations tectoniques actuelles dans la Méditerranée occidentale. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier & l'Université Abdelmalek Essaâdi, Tétouan 231pp

Terrier C. (2009). Distinguer la population présente de la population résidente. *Courrier des statistiques*, pp. 63-70

Terrier M., Monfort D., Lambert J., Le Roy S., Pedreros R. & Sedan O. (2012). Méthode d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis de faible à moyenne intensité : application à la côte d'Azur (France). Publié dans "Fifth International Tsunami Symposium (ISPRA-2012)". Tsunami Society International 3-5 Sept. 2012, Joint Research Centre, Ispra, Italy

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.

Thiebot E., Gutscher M.A. (2006). The Gibraltar Arc seismogenic zone (part 1): Constraints on a shallow east dipping fault plane source for the 1755 Lisbon earthquake provided by seismic data, gravity and thermal modeling. *Tectonophysics* 426, 135-152

Troin J. F. (2002). Maroc, Régions, Territoires. Maison neuve & Larose, Tarik, Urbama, 502 p.

Udias A., Lopez Arroyo A. & Mezcua J. (1976). Sismotectonic of the Azores- Alboran région. *Tectonophysics* ; 31 ; pp : 259-289.

UNESCO (2008). Préparation aux tsunamis, guide d'information à l'intention des responsables de la planification en cas de catastrophe. COI/UNESCO, Manuels et Guides N°49 29p.

UNESCO (1971). Résumé annuel d'information sur les catastrophes naturelles, N°4 :1969, Paris 1971. 71 p.

Valencia N., Gardi A., Gauraz A, Leone F., Guillande 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.

Wallingford H.R. (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.

Weiss, R. et Wünnemann, K. (2007). Large waves caused by oceanic impacts of meteorites. In A. KUNDU. *Tsunami and Nonlinear Waves*. Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 237-261.

Whelan F. et Kelletat D. (2005). Boulder deposits on the southern Spanish Atlantic coast: possible evidence for the tsunami of Lisbon 1755 ?. *Science of Tsunami Hazards*, vol. 23, n°3, pp. 3-16.

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

Zitellini, N., Chierici, F., Sartori, R. and Torelli, L. (1999). The tectonic source of the 1755 Lisbon earthquake and tsunami. *Annali di Geofisica* 42(1), 49-55.

Zitellini, N., Gracia, E., Matias, L., Terrinha, P., Abreu, M. A., DeAlteriis, G., Henriët, J. P., Dañobeitia, J. J., Masson, D. G., Mulder, T., Ramella, R., Somoza, L., and Diez, S. (2009). The quest for the Africa–Eurasia plate boundary west of the Strait of Gibraltar, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 280, 13–50, 2009.

## Liste de figures

Figure 1. Exemple qui illustre les composantes du risque : le tsunami du Japon 2011 .....	14
Figure 2. La démarche de recherche adoptée.....	16
Figure 3. Initiation d'un tsunami d'origine sismique dans un contexte de subduction. (a. avant le séisme ; b. pendant le séisme) ( <a href="http://www.scribd.com/doc/100662840/Tsunami-Eth-YUEN, 2012">http://www.scribd.com/doc/100662840/Tsunami-Eth-YUEN, 2012</a> ) .....	22
Figure 4. Génération, propagation et interaction avec la côte pour un tsunami généré par un séisme. Deux types de comportement au rivage sont proposés, avec ou sans déferlement. (Roger, 2011) .....	24
Figure 5. Les quatre systèmes d'alerte aux tsunamis de la COI/UNESCO. Source : IOC/UNESCO.....	25
Figure 6. Schéma explicatif du fonctionnement du système DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis), DART® (Source, NOAA, <a href="http://www.noaanews.noaa.gov/stories2005/images/tsunami-dart-system2.jpg">http://www.noaanews.noaa.gov/stories2005/images/tsunami-dart-system2.jpg</a> ).....	27
Figure 7. La limite des plaques Afrique - Eurasie dans sa partie occidentale (Jiménez-Munt et al, 2001) (GB: Galicia Bank; TP: Tagus Plain; GoB: Goringe Bank; HP: Horseshoe Plain; AS: Ampere Seamount; SP: Seine Plain; SG: Strait of Gibraltar).....	29
Figure 8. La sismicité (points rouges) et la limite des plaques (ligne jaune) de la zone des Azores – Gibraltar. Données Sismiques du catalogue ISC de la période 1970-2007 et magnitudes supérieures à 3. ....	31
Figure 9. La compilation bathymétrique multifaisceaux SWIM du golfe de Cadix. (Zitellini, et al., 2009).....	32
Figure 10. a) Image de l'île de Palma est l'avant-dernière île volcanique née du point chaud des Îles Canaries (juste avant El Hierro : 1,12 Ma). b) Modélisation numérique de la propagation du mégatsunami causé par une possible éruption volcanique de la Palma aux îles Canaries (Chiffres positifs = hauteur des crêtes en m, Chiffres négatifs = creux des vagues en m) (Ward et al., 2001). ....	34
Figure 11. Marégramme illustrant l'enregistrement du tsunami de 25/11/1941 par le marégraphe de Casablanca (jetée transversale). (source : Delencre, 2009).....	38
Figure 12. Carte de situation des sources des tsunamis ayant touché les côtes atlantiques marocaines (D'après Kaabouben et al (2009) ; NOAA online Database ; GIC/SATANEM). (Leone et al.2012) .....	40
Figure 13. Sites affectés par le séisme de 1755, a) Mosquée Hassan à Rabat, b) Volubilis....	43
Figure 14. Confrontation des sources et des témoignages historiques sur les effets du tsunami du 1er novembre 1755 (Leone et al., 2012). ....	45

Figure 15. Dépôt de tsunami près des dunes de Lampuuk, montrant des structures effilées et des clastes décimétriques de sol. (Paris et al., 2011).....	59
Figure 16. Localisation des washovers du complexe lagunaire Sidi Moussa - Oualidia.....	61
Figure 17. Localisation des carottages et de la tranchée effectuées sur le washover de Oualidia. ....	63
Figure 18. Variation verticale des paramètres de texture, composition et unités lithostratigraphiques de la carotte Wash C1.....	65
Figure 19. Photographies des dépôts de galets identifiés dans la lagune de Oualidia. ....	66
Figure 20. Localisation des carottes réalisées sur le washover de Sidi Moussa. ....	67
Figure 21. La lithostratigraphie des six carottes prélevées sur l'épandage sableux de la lagune de Sidi Moussa. ....	69
Figure 22. Exemples de blocs identifiés dans la lagune de Sidi Moussa.....	70
Figure 23. Localisation des sites de sondage entre Tanger et Assilah (images Google Earth) 72	72
Figure 24. Le dépôt du chantier Al Houara dans son contexte (Genet, 2011).....	73
Figure 25. Les différents faciès du dépôt du chantier Al Houara (Genet, 2011). ....	74
Figure 26. Localisation des points de sondage sur le site marais maritime de Tanger (Image Google Earth) (Genet, 2011).....	75
Figure 27. Découverte de dépôt dans un carottage à la tarière dans le site marais maritime de Tanger (Genet, 2011). ....	76
Figure 28. Carte présentant les différents sites d'étude des blocs supposés liés au tsunami de 1755 dans la région de Rabat (Mhammdi <i>et al</i> , 2008).....	78
Figure 29. Exemples de blocs rencontrés sur le littoral au Sud de Rabat (Mhammdi et al, 2008).....	79
Figure 30. Exemples de dépôts découverts à Rio Formosa au Sud du Portugal près du Tage (Source : Hindson et Andrade, 1999).....	80
Figure 31. Exemple de blocs imbriqués de 1 à 10 tonnes au sud de Trafalgar en Espagne. (Source : Whelan et Kelletat, 2005).....	81
Figure 32. Zones potentielles de sources tsunamigènes avec leurs failles associées dans le Golfe de Cadiz (Omira, 2009).....	84
Figure 33. Définition des paramètres de faille. L'étoile représente l'origine du repère d'Okada, donné en latitude, longitude et profondeur (Piatanesi, 1999).....	85

Figure 34. 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).....	86
Figure 35. La déformation initiale de la surface d'eau pour le scénario de HSF (Omira, 2010) .....	87
Figure 36. Simulation de la propagation, depuis la zone épiscopale, du tsunami dans la région du Golfe de Cadix, (scénario HSF) (Omira, 2010) .....	88
Figure 37. Extrait du MNT régional (topo SRTMv2 /bathy GEBCO) produit sur le littoral atlantique marocain. ....	90
Figure 38. Ensemble des points côtés en X, Y, Z. surimposé à l'image satellite Quickbird. Ce jeu de points Bathy_topo comprend des mesures bathymétriques et altimétriques (Leone et al., 2012).....	91
Figure 39. MNE de 2010 (Omira et al., 2011) .....	93
Figure 40. a) Vue actuelle de la citadelle d'El Jadida depuis le haut du rempart sud en bord de mer, b) Plan de la forteresse de Mazagan de 1753 (source gallica.bnf.fr). ....	94
Figure 41. Le MNE de 1755 (Omira et al., 2011) .....	95
Figure 42. Confrontation des différents traits de côte disponibles à l'échelle du Maroc. Illustration des écarts sur la ville d'El Jadida (Leone et al., 2012). ....	96
Figure 43. Exemple de numérisation suivant la ligne de démarcation entre sol mouillé et sol sec (Leone et al., 2012). ....	97
Figure 44. 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) (Mellas et al., 2012).....	99
Figure 45. Hauteurs moyennes des vagues maximales et enveloppe de submersion modélisées pour un tsunami de source HSF (type 1755) (Mellas et al., 2012). ....	100
Figure 46. Profondeurs d'inondation sur El Jadida. Modélisation locale sur MNT 27 m de résolution.....	101
Figure 47. Modélisation fine des profondeurs d'eau maximales sur la ville de Mazagan (1755) Omira et al., 2011 sous presse.....	102
Figure 48. Modélisation fine des profondeurs d'eau maximales sur la ville d'El Jadida (2010) Omira et al., 2011 sous presse.....	102
Figure 49. Hauteurs (épaisseurs) et vitesses d'inondation maximales sur El Jadida. Modélisation locale sur MNE de 5 m de résolution (1755, source HSF). ....	103

Figure 50. Modélisation dynamique de l'inondation sur El Jadida. Modélisation locale sur MNE de 5 m de résolution (1755, source HSF) (Leone et al., 2012). .....	104
Figure 51. Les composantes et variables d'un scénario de risque spatialisé (Leone, 2007)..	107
Figure 52. L'armature urbaine du Maroc (source : DAT 2007).....	111
Figure 53. Evolution de la population littorale depuis 1971 (HCP, 2010a).....	112
Figure 54. Carte de pauvreté communale du Maroc - 2007 (HCP, 2010b) .....	115
Figure 55. Répartition des emplois salariés industriels au Maroc en 2004 (DAT, 2007).....	117
Figure 56. Carte des ports du Maroc et leurs trafics 2010 (source : ministère d'équipement et de transport. <a href="http://www.mtpnet.gov.ma/">www.mtpnet.gov.ma/</a> ).....	119
Figure 57. Les grands chantiers touristiques au Maroc - 2007 (Berriane, 2007).....	121
Figure 58. La grande Mosquée Hassan II à Casablanca .....	123
Figure 59. Extraits de la base de données MEDGEOBASE/Maroc sur le littoral atlantique (typologie simplifiée de l'occupation du sol selon 9 classes) (Mellas et al., 2012).....	126
Figure 60. Extraits de la base de données Landsat 2008 sur le littoral atlantique du Maroc (population) (Mellas et al., 2012).....	128
Figure 61. Indicateurs d'exposition humaine à la submersion marine par tsunami (scénario type 1755, source HSF).....	131
Figure 62. Indicateurs d'exposition urbaine à la submersion marine par tsunami (scénario type 1755, source HSF).....	132
Figure 63. Indicateurs d'exposition industrielle à la submersion marine par tsunami (scénario type 1755, source HSF).....	133
Figure 64. Frise chronologique des grands évènements historiques de la ville d'El Jadida (sources : Chahid et Lekhiar, 2006 ; Direction Régionale Doukkala-Abda., 2008). (Leone et al., 2012).....	137
Figure 65. Découpage administratif de la région des Doukkala-Abda (Leone et al., 2012)..	139
Figure 66. L'insertion du Grand El Jadida dans le corridor urbain moyen atlantique (d'après Troin, 2002).....	141
Figure 67. Les principaux enjeux littoraux du Grand El Jadida (d'après SDAU, 2006). .....	142
Figure 68. Les différences physiologiques et sociales entre les « genres » dans la vulnérabilité sociale (IOC-UNESCO, 2009).....	144

Figure 69. Importance du flot de débris du tsunami de 2004 à Banda Aceh (source vidéo Internet). ..... 145

Figure 70. Perception du risque au travers de l'éducation (Paradise, 2005). ..... 148

Figure 71. Zone de diagnostic de vulnérabilité comprise dans l'enveloppe de l'inondation (tsunami de 1755, source HSF). ..... 151

Figure 72. Structure générale du SIG développé sur El Jadida (FHS: Fréquentation Haute Saison, FBS: Fréquentation Basse Saison). (Leone et al., 2012). ..... 153

Figure 73. Capture d'écran du SIG et critères de vulnérabilité humaine renseignés pour chaque type d'espace (Leone et al., 2012). ..... 154

Figure 74. Courbes de vulnérabilité de cinq classes de bâtiments (A, B, C, D, E) exprimant le niveau moyen des dommages (D0 à D5) en fonction de la hauteur de submersion d'un tsunami (Gauraz et al., 2009). ..... 156

Figure 75. Typologie du bâti définie sur le port de Casablanca (Omira et al., 2009). ..... 158

Figure 76. a. Habitat informel en périphérie de la ville, b. Téléboutique en centre-ville (Lagahé & Péroche, 2010). ..... 162

Figure 77. a. Construction individuelle, b. Bâtiment isolé sur le port (Lagahé & Péroche, 2010). ..... 163

Figure 78. Villa moderne (Lagahé & Péroche, 2010). ..... 164

Figure 79. Habitat traditionnel marocain moderne (Lagahé & Péroche, 2010). ..... 165

Figure 80. a. Bâtiment administratif, b. Habitat collectif avec petits commerces en rez-de-chaussée (Lagahé & Péroche, 2010). ..... 165

Figure 81. Classes de vulnérabilité du bâti. (Leone et al., 2012) ..... 166

Figure 82. Carte de localisation des bâtiments avec des grandes ouvertures. (Leone et al., 2012). ..... 167

Figure 83. Carte du nombre d'étages. (Leone et al., 2012). ..... 169

Figure 84. Possibilités de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (Source : Baladès, 2004). ..... 170

Figure 85. 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 (Leone et al., 2012). ..... 171

Figure 86. Carte de densité de débris flottants potentiels (Leone et al., 2012) ..... 172

Figure 87. Exemple de secteur à forte densité de débris flottants potentiels, à proximité des remparts de la cité Portugaise (Lagahé & Péroche, 2010). ..... 172

Figure 88. Le marché ouvert de la criée, sur le port d’El Jadida vers 12h (Leone et al., 2012). ..... 173

Figure 89. Evolution de l’occupation des hôtels classés de la ville d’El Jadida 2009 (Source Délégation du tourisme d’El Jadida) (Leone et al., 2012). ..... 175

Figure 90. Répartition des nuitées des hôtels classés d’El Jadida (janvier-décembre 2009). (Source Délégation du tourisme d’El Jadida) ..... 175

Figure 91. Carte de la fonction première du rez-de-chaussée des espaces bâtis (Leone et al., 2012)..... 176

Figure 92. Typologie des classes fonctionnelles des espaces extérieurs (plein air) (Leone et al., 2012)..... 177

Figure 93. Typologie des classes fonctionnelles des voies de communication (Leone et al., 2012)..... 177

Figure 94. Capacité d’accueil maximale crédible (CAMC) : cas des bâtiments (nombre de personnes) (Leone et al., 2012) ..... 179

Figure 95. Courbes de fréquentation des esplanades (ESPL). Courbes de fréquentation des restaurants (BAR\_R) (Leone et al., 2012)..... 180

Figure 96. Comparaison des densités humaines (au RdC pour bâti) pour 4 moments de la journée (basse saison). (Leone et al., 2012) ..... 182

Figure 97. Comparaison des densités humaines (au RdC pour bâti) suivant les saisons (pour 11h et 22h). (Leone et al., 2012) ..... 184

Figure 98. Courbe de probabilité d’endommagement du bâti en fonction de la vitesse du courant (d’après Koshimura, 2009)..... 189

Figure 99. Endommagement d’un véhicule en fonction de la hauteur d’eau (Yasuda, 2004). ..... 192

Figure 100. Probabilités de décès Pd (faible à très forte) s’appliquant aux espaces bâtis, Approche multicritère de vulnérabilité pour un scénario d’aléa de référence de type 1755 (source HSF) (Leone et al. 2012). ..... 193

Figure 101. Probabilités de décès Pd (faible à très forte) s’appliquant aux espaces extérieurs. Approche multicritère de vulnérabilité pour un scénario d’aléa de référence de type 1755 (source HSF) (Leone et al. 2012). ..... 194

Figure 102. Probabilités de décès Pd (faible à très forte) s’appliquant au cumul des deux espaces. Approche multicritère de vulnérabilité pour un scénario d’aléa de référence de type 1755 (source HSF) (Leone et al. 2012). ..... 195

Figure 103. Répartition des enjeux humains par niveau de probabilité de décès (variabilité bi-horaire pour deux saisons) (Leone et al. 2012). ..... 196

Figure 104. Indice de risque de pertes humaines (IRh, variabilité bi-horaire, basse-saison) (Leone et al. 2012). ..... 197

Figure 105. Indice de risque de pertes humaines (IRh, variabilité bi-horaire, haute-saison) (Leone et al. 2012) ..... 198

Figure 106. Proposition de plan d'évacuation en cas de tsunami pour la ville d'El Jadida (Maroc) (Heymann, 2011 et Leone et al., 2012). ..... 203

Figure 107. Indicateurs d'exposition surfacique (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami. .... 238

Figure 108. Indicateurs d'exposition humaine (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami. .... 239

Figure 109. Indicateurs d'exposition urbaine (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami. 240

Figure 110. Indicateurs d'exposition industrielle (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami. .... 241

Figure 111. Indicateurs d'exposition portuaire (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami. .... 242

Figure 112. Indicateurs d'exposition des terres arables (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami. .... 243

Figure 113. Indicateurs d'exposition forestière (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami. .... 244

Figure 114. Indicateurs d'exposition naturelle (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami. .... 245

Figure 115. Indicateurs d'exposition des surfaces en eau (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami. .... 246

Figure 116. Indicateurs d'exposition humaine (en %) à la submersion marine par tsunami. 247

Figure 117. Indicateurs d'exposition urbaine (en %) à la submersion marine par tsunami. .. 248

Figure 118. Indicateurs d'exposition industrielle (en %) à la submersion marine par tsunami. .... 249

Figure 119. Indicateurs d'exposition portuaire (en %) à la submersion marine par tsunami. 250

Figure 120. Indicateurs d'exposition des terres arables (en %) à la submersion marine par tsunami. .... 251

Figure 121. Indicateurs d'exposition forestière (en %) à la submersion marine par tsunami.	252
Figure 122. Indicateurs d'exposition naturelle (en %) à la submersion marine par tsunami.	253
Figure 123. Indicateurs d'exposition de surfaces en eau (en %) à la submersion marine par tsunami. ....	254
Figure 124. Indicateurs d'exposition surfacique (en %) à la submersion marine par tsunami .....	255
Figure 125. Indicateurs d'exposition humaine (en %) à la submersion marine par tsunami .	256
Figure 126. Indicateurs d'exposition urbaine (en %) à la submersion marine par tsunami...	257
Figure 127. Indicateurs d'exposition industrielle (en %) à la submersion marine par tsunami .....	258
Figure 128. Indicateurs d'exposition portuaire (en %) à la submersion marine par tsunami.	259
Figure 129. Indicateurs d'exposition des terres arables (en %) à la submersion marine par tsunami .....	260
Figure 130. Indicateurs d'exposition forestière (en %) à la submersion marine par tsunami	261
Figure 131. Indicateurs d'exposition naturelle (en %) à la submersion marine par tsunami.	262
Figure 132. Indicateurs d'exposition des surfaces en eau à la submersion marine par tsunami .....	263

## Liste des tableaux

Tableau 1. Catalogue des tsunamis probables ayant touchés les côtes marocaines (D'après Kaabouben et al, 2009).....	37
Tableau 2. Reconstitution des hauteurs d'eau à la côte du tsunami de 1755 et sources utilisées par Kaabouben et al. (2009). .....	44
Tableau 3. Différentes caractéristiques et critères de distinction des dépôts de tempêtes et de tsunamis retrouvés dans la littérature. (Genet, 2011 d'après Kortekaas et Dawson, 2007).....	60
Tableau 4. Paramètres de la faille retenue pour modéliser le tsunami du 1 <sup>er</sup> Novembre 1755	85
Tableau 5. Principaux facteurs de vulnérabilité humaine (individu) et critères d'évaluation associés (Leone et al., 2012) .....	150
Tableau 6. Classification du bâti indonésien selon 5 classes de vulnérabilité décroissante (Leone et al., 2010). .....	155
Tableau 7. Typologie des dommages définis en Indonésie (Banda Aceh). (Leone et al., 2010). .....	155
Tableau 8. Typologie structurelle du bâti à El Jadida (Leone et al., 2012).....	161
Tableau 9. Typologie des différentes classes fonctionnelles des espaces de vie sur El Jadida (Leone et al., 2012) .....	178
Tableau 10. 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) (Leone et al. 2012).	187
Tableau 11. Seuils de destruction totale de chaque classe de vulnérabilité des bâtiments (sources : Leone, 2010 ; Gauraz, 2009, Koshimura, 2009).....	189
Tableau 12. Matrices de probabilité de décès (Pd) des personnes se trouvant à l'extérieur (variabilité en fonction des densités de débris flottants potentiels) (Leone et al. 2012) .....	191
Tableau 13. Seuils de mise en mouvement par flottaison d'un véhicule de 800 kg ayant une hauteur de caisse de 0,15 m (Source : Baladès, 2004). .....	192

## **Annexes**

## Annexe 1



GEOGACETA, 48, 2010

## Multiproxy approach to characterize an overwash deposit: Oualidia lagoon (Moroccan Atlantic coast)

*Caracterización multidisciplinar de un depósito de overwash: laguna costera de Oualidia  
(costa Atlántica marroquí)*

Eduardo Leorri <sup>(1)</sup>, M. Conceição Freitas <sup>(2)</sup>, Bendahhou Zourarah <sup>(3)</sup>, César Andrade <sup>(2)</sup>, Samira Mellas <sup>(3)</sup>, Anabela Cruces <sup>(2)</sup>, Roger Griboulard <sup>(4)</sup> and Vera Lopes <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Department of Geological Sciences, East Carolina University, Graham Building, Room 101, Greenville, NC, 27858, USA. leorrie@ecu.edu  
<sup>(2)</sup> Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Centro e Departamento de Geologia, Campo Grande, 1749-016, Lisboa, Portugal. cfreitas@fc.ul.pt; candrade@fc.ul.pt; acruces@fc.ul.pt; verapalopes@gmail.com  
<sup>(3)</sup> Department of Geology, Faculty of Sciences, El Jadida, Morocco. zourarah@gmail.com; mell.2006@hotmail.fr  
<sup>(4)</sup> Université de Bordeaux 1, Avenue des Facultés, 33405 Talence, France. r.griboulard@epoc.u-bordeaux1.fr

## RESUMEN

Se han analizado muestras sedimentológicas y micropaleontológicas de un sondeo realizado en el extremo sur oeste de la laguna costera de Oualidia (Marruecos). Los resultados obtenidos muestran una secuencia de relleno que presenta una evolución desde materiales submareales con influencia marina hasta que la zona se colmata y aparece un medio marismeo. La zona intermedia de la secuencia presenta materiales arenosos con influencia marina que se hacen mas restringidos, como indica el predominio de materiales fangosos y foraminíferos típicos de ambientes salobres. Esta secuencia está truncada en el techo por la presencia de un depósito de overwash. Mientras que este depósito pueda diferenciarse netamente de los materiales infrayacentes, es imposible concluir que esta combinación de técnicas pueda utilizarse para identificar depósitos de tormenta en el registro fósil. Los resultados obtenidos, sugieren, sin embargo, que este tipo de depósitos podrían diferenciarse en secuencias continuas de depósitos marismeos y por tanto podrían proporcionar información relevante de la frecuencia e intensidad de tormentas ocurridas en el pasado. Esos estudios han de tener en cuenta, sin embargo, otros aspectos sindeposicionales, como son la bioturbación o la preservación de las capas sedimentarias.

**Key words:** Overwash deposits, Oualidia lagoon, sedimentology, foraminífera, Atlantic coast.

Geogaceta, 48 (2010), 7-10  
ISSN: 0213-683X

Fecha de recepción: 15 de febrero de 2010  
Fecha de revisión: 21 de abril de 2010  
Fecha de aceptación: 28 de mayo de 2010

## Introduction

Under the current climatic scenario of global warming, it is expected an increase in storminess along the coastal areas of the North Atlantic Ocean. To this factor, we have to add rising sea-levels, with global estimates of + 0.6 (IPCC, 2007) to > 1 m (e.g. Rahmstorf, 2007; Parry, 2000) by the end of the 21<sup>st</sup> century in worst-case scenarios. This is expected to have a large impact in coastal barriers. As a result, there is a growing interest in erosion and deposition processes along these areas. In fact, recent storm events inducing barrier breaching and retrogradation have demonstrated the economic impacts of these events and the need to better understand the driving processes (Hippensteel and Martin, 1999). Storms are major agents in coastal evolution

and this is even more critical in barrier coasts (Andrade *et al.*, 2004).

If storminess increases over time, one possible result in coastal areas is triggering or enhancement of roll-over, added by multiple barrier breaching and this, in a rising sea level scenario, could have a dramatic impact in those areas. Geological studies of these deposits could help to improve our understanding of the long-term variability of the storm frequency and magnitude that apparently has been changing over the last 150 years (Hippensteel and Martin, 1999; Andrade *et al.*, 2004).

In this study, we analyze the sedimentological and micropaleontological signatures of the Oualidia washover (Moroccan Atlantic coast) and sediments beneath, in order to provide insights into the back-barrier depositional processes, including storm-generated overwash,

aiming to improve our present-day ability to identify signatures of such events in the sedimentary geological record.

## Study area

Oualidia lagoon is located on the North Atlantic Ocean (32°40'42"N-32°47'07"N and 8°52'30"W-9°02'50"W; Fig. 1). The lagoon is 7 km long and 0.5 km wide and its elongation follow the general southwest-northeast trend of the coastline. One major inlet (150 m wide and 2 m deep) allows water exchanges with the ocean and tides are conveyed by one meandering main channel (2 m mean depth) that further divides into small creeks feeding lagoonal marshes. The general morphology is controlled by a Plio- Quaternary abandoned cliff running along the eastern margin of the lagoon and at the seaward

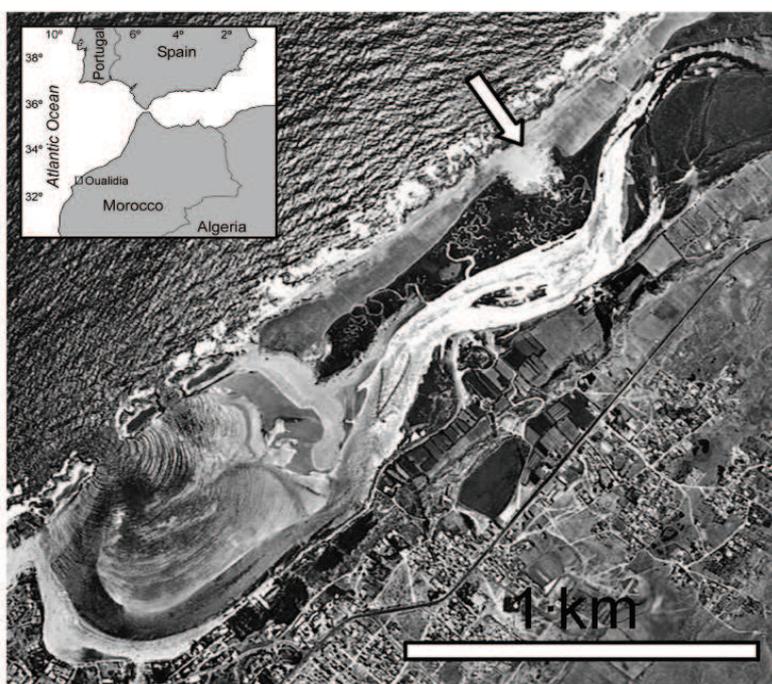


Fig. 1.- Location map and aerial photograph. The arrow indicates the sampling area.

Fig. 1.- Mapa de localización y fotografía aérea. La flecha indica la zona de muestreo.

margin by a laterally discontinuous outcrop of aeolianite (Zourarah *et al.*, 2007), partly covered by an active beach-foredune system. The washover described in this study includes a corridor lowering the foredune ridge and a sandy lobe invading the lagoonal high marsh (Fig. 1).

#### Materials and Methods

Coring of the Oualidia washover and sediments beneath was undertaken using a combination of Edelman and gauge augers and a van der Staay suction corer down to ca 2 m below surface. The sediments were described in the field for color, texture, nature and geometry of contacts and fossil contents. Present-day beach samples were also collected. Upon returning to the laboratory samples were processed for sedimentological and foraminifera analysis. Sedimentological studies (12 samples) included grain size analysis (sediment coarser than 63  $\mu\text{m}$  by sieving and the undersized fraction using a Malvern laser particle analyzer), pH was calculated by an electrometric method, determination of the organic matter content (OM) by loss of weight on ignition and determination of the  $\text{CaCO}_3$  content (correspondent to

bioclasts) using an Eikelkamp calcimeter. The dimensional and sorting classification of sand follows the classification of Friedman and Sanders (1978).

Thirteen samples of the Oualidia core and two modern beach samples were analyzed for foraminiferal content. Samples were sieved through a 1 mm sieve (to remove large organic fragments) and through a 63  $\mu\text{m}$  sieve to wash and remove clay and silt material. Tests were picked until a representative number of more than 300 individuals was obtained, and then studied under a stereoscopic binocular microscope using reflected light. The total number of samples analysed was 15, and more than 4500 foraminifera were identified.

#### Results and Discussion

Figure 2 and 3 summarize sedimentological and foraminiferal results.

The study of the core allowed to identify three main lithostratigraphic units, with contrasting texture (mean grain size, sorting and sand/mud ratio), bioclastic and organic matter content (Fig. 2).

Lower unit A (89-190 cm depth) - this unit is made of coarse to medium slightly muddy carbonate sand ( $\text{CaCO}_3 > 80\%$ ), moderately to poorly sorted, with low OM content (< 3%).

Unit B (37-89 cm depth) - this Unit may be sub-divided in two sub-Units:

Sub-Unit B\_I (60-89 cm depth) consists of muddy sand at the base grading upward to sandy mud (the sand component being fine and well sorted). The  $\text{CaCO}_3$  content is lower (30 to 60%) and OM values slightly increase (3 to 4%).

Sub-Unit B\_II (37-60 cm depth) consists of organic (OM 7 to 10%) mud, with the lowest values of both  $\text{CaCO}_3$  (6 to 12%) and sand in the whole core.

Upper unit C (0-37 cm depth) - this unit is made of clean medium to coarse, well sorted carbonate ( $\text{CaCO}_3 > 85\%$ ) sand, with low OM (< 3%) content.

The present-day beach is made of clean, carbonate (94%  $\text{CaCO}_3$ ), medium and very well sorted sand.

Similarly, micropaleontological data suggest 4 foraminiferal assemblage zones (FAZs) matching the lithostratigraphic units (Fig. 3).

FAZ\_IV (89-190cm depth) - this zone is dominated by the allochthonous species (i.e., open marine foraminifera) *Cibicides lobatulus* and *Elphidium crispum* with lesser abundances of *Ammonia beccarii*. Those are robust species that can be transported long distances. FAZ\_III (60-89 cm depth) is dominated solely by *C. lobatulus* accompanied by *A. beccarii*, *E. crispum* and *Haynesina germanica*. The main difference between FAZIV and FAZ\_III is the presence of *H. germanica* that is a typical species from brackish waters.

FAZ\_II (37-60 cm depth) is highly dominated by agglutinant species, mainly *Jadammina macrescens*, although *C. lobatulus* is still significant.

On top of FAZ\_II, FAZ\_I (0-37 cm depth), is dominated by *C. lobatulus*, *A. beccarii*, *E. crispum* with lesser abundances of milioids (e.g., *Miliolinella subrotunda* and *Massilina* spp.).

Samples recovered from the modern beach environment showed a dominance of the allochthonous species *E. crispum*, *C. lobatulus* and *A. beccarii*, with lesser abundances of milioids (e.g., *Miliolinella subrotunda*). This assemblage is similar to that described in FAZ\_I (washover), differing in the relative presence of *E. crispum* and *Miliolinella subrotunda* (greater in the beach deposits).

Sedimentological and paleoecological results indicate that sediment accumulated

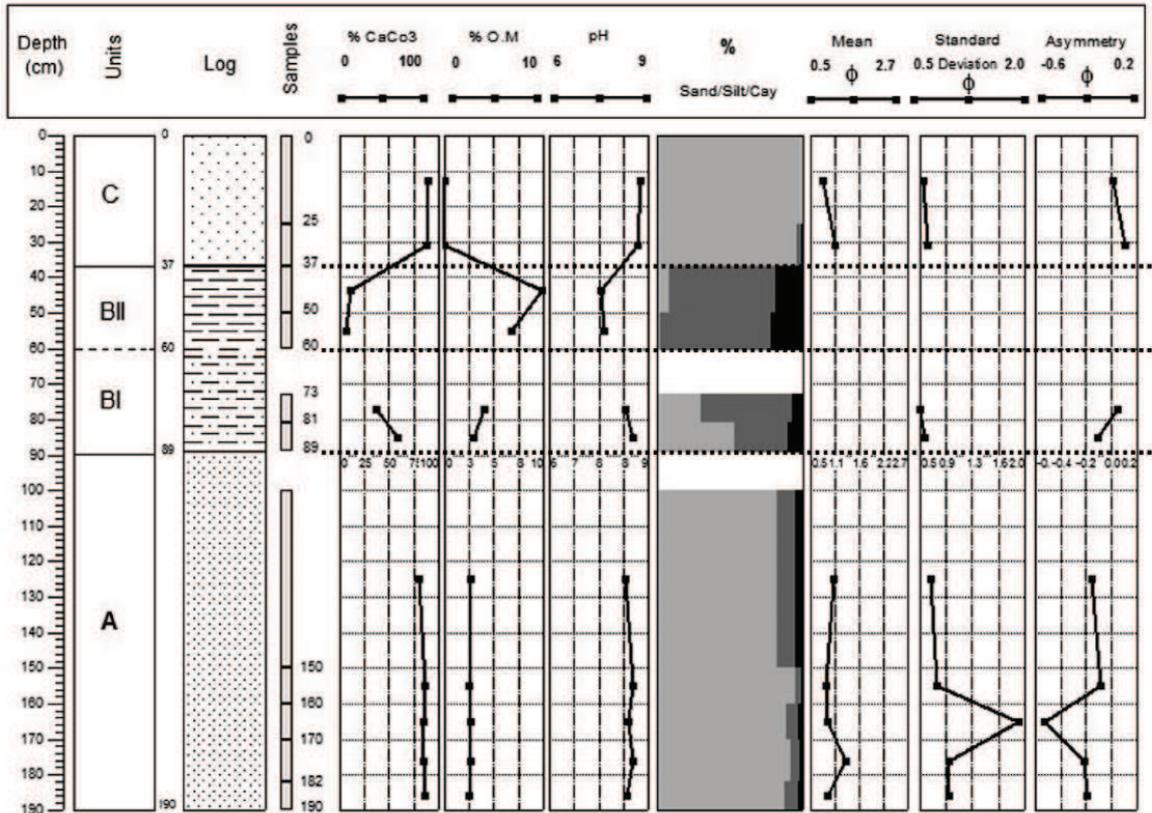


Fig. 2.- Core units, Log, CaCO<sub>3</sub> (%), organic matter (%), pH, relative abundance of sand, clay and silt and sedimentological parameters analyzed.

Fig. 2.- Unidades identificadas en el sondeo, Log, CaCO<sub>3</sub> (%), material orgánica (%), pH, abundancia relativa de arena, arcillas y limos y parámetros sedimentológicos analizados.

in the south west part of the Oualidia lagoon represents a progressively shallowing and infilling lagoon, with open-marine coarser sediments at the base that became finer and typical of a more restricted environment towards the top, culminating with salt marsh sediments as the accommodation space was reduced, on top of which the overwash deposit is found.

The base of the sequence (Unit A and FAZ\_IV) is dominated by coarse carbonate sand with allocthonous foraminifera; broken tests and angular grains are common, indicating a highly energetic depositional environment connected to the open sea, possibly corresponding to a subtidal channel or to an intertidal sand flat, under full marine influence. Sub-unit B\_I and FAZ\_III indicate a clear environmental change. Muddy sediment together with the presence of *H. germanica* indicate restricted conditions, that could represent evolution towards a mud flat developing

at a higher elevation in relation to the tidal frame. The sequence ends up with marsh deposits (Sub-unit B\_II and FAZ\_II) implying a generalized process of silting up, sediments of terrestrial origin being essentially redistributed by tidal currents in a confined environment. Marsh sediments currently dominate the surrounding area and here are represented by highly organic clayey silt with the presence of *Jadammina macrescens*.

A clear sedimentological disruption marks the transition between the marsh sediments and the overwash deposit (Unit C and FAZ\_I). This deposit is strongly similar in sedimentological and micropaleontological terms to the beach deposits and its position on top of marsh sediments strongly indicates in the stratigraphic record its association with a catastrophic event (e.g., storm).

The combined use of micropaleontological and sedimentological proxies to deconvolve former sedimentological

environments is a very powerful technique that has been intensively applied. Furthermore, foraminifera alone have been proposed as indicators of overwash deposits (Hippensteel and Martin, 1999). From this study, however, it is apparent that, besides some marked differences between the overwash deposits and the shallow subtidal and intertidal deposits, this technique does not allow to definitively differentiate both deposits at the present and further proxies should be used. On the other hand, in areas of extensive development of marsh environments over extended periods of time, this technique could provide an insight into the frequency and intensity of storms represented by these deposits. These studies would require, however, well-developed chronological framework and fully understand of other depositional factors such as bioturbation and preservation of the sedimentary layers.

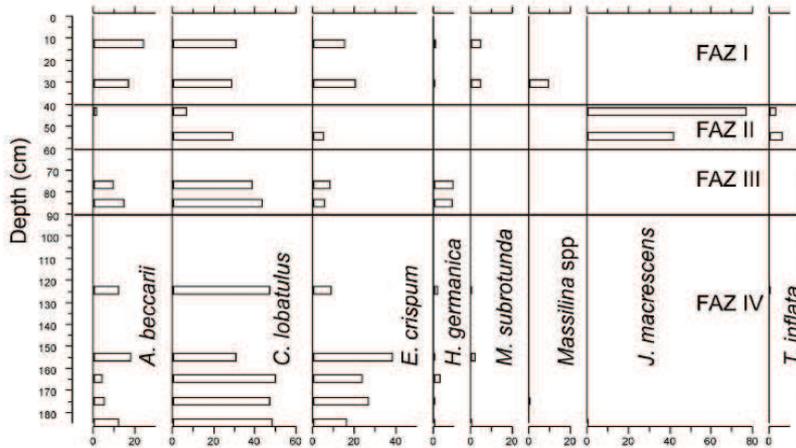


Fig. 3.- Main foraminiferal species relative abundances with depth (cm). FAZ – foraminiferal assemblage zones.

Fig. 3.- Distribución de las abundancias relativas de las especies principales de foraminíferos según la profundidad (cm).

**Conclusions**

A combined sedimentological and micropaleontological approach has allowed to identify the environmental evolution of the southwest area of the Oualidia lagoon that ranges from subtidal open marine to restricted marsh sediments in a filling upward sequence, covered by overwash deposits.

This technique has been proved useful to identify overwash deposits based on their unique characteristics. However, in order to identify overwash deposits in the fossil record those have to

be deposited within continuous marsh sequences, since at the present they cannot be definitively differentiate from shallow subtidal to intertidal deposits.

**Acknowledgements**

We gratefully thank Dr Fatela for his comments and suggestions that have improve greatly the original manuscript. This is a contribution to IGCP Project 495 and Northwest Europe working group of the INQUA Commission on Coastal and Marine Processes. This is a contribution of the Departamento de

Geodesia de la Sociedad de Ciencias Aranzadi and Grupo de investigación Harea (Grupos de investigación del Sistema Universitario Vasco GIC07/32-IT-332-07).

**References**

Andrade, C., Freitas, M.C., Moreno, J., Craveiro, S.C. (2004). *Marine Geology*, 210, 339-362.

Friedman, G., and Sanders, J. (1978). *Principles of Sedimentology*. Wiley, New York.

Hippensteel, S.P. and Martin, R.E. (1999). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 149, 115-125.

IPCC (2007). In: *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge. 385-432.

Parry, M. (2000). *Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe: The Europe ACACIA Project*. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK.

Rahmstorf, S. (2007). *Science* 315, 368-370.

Zourarah, B., Maanan, M., Carruesco, C., Aajjane, A., Mehdi, K., Freitas, M.C. (2007). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 72, 359-369.

**Annexe 2**

**Indicateurs d'exposition du littoral atlantique marocain au risque de tsunami**

**1. Indicateurs d'exposition par commune littorale en km<sup>2</sup>**

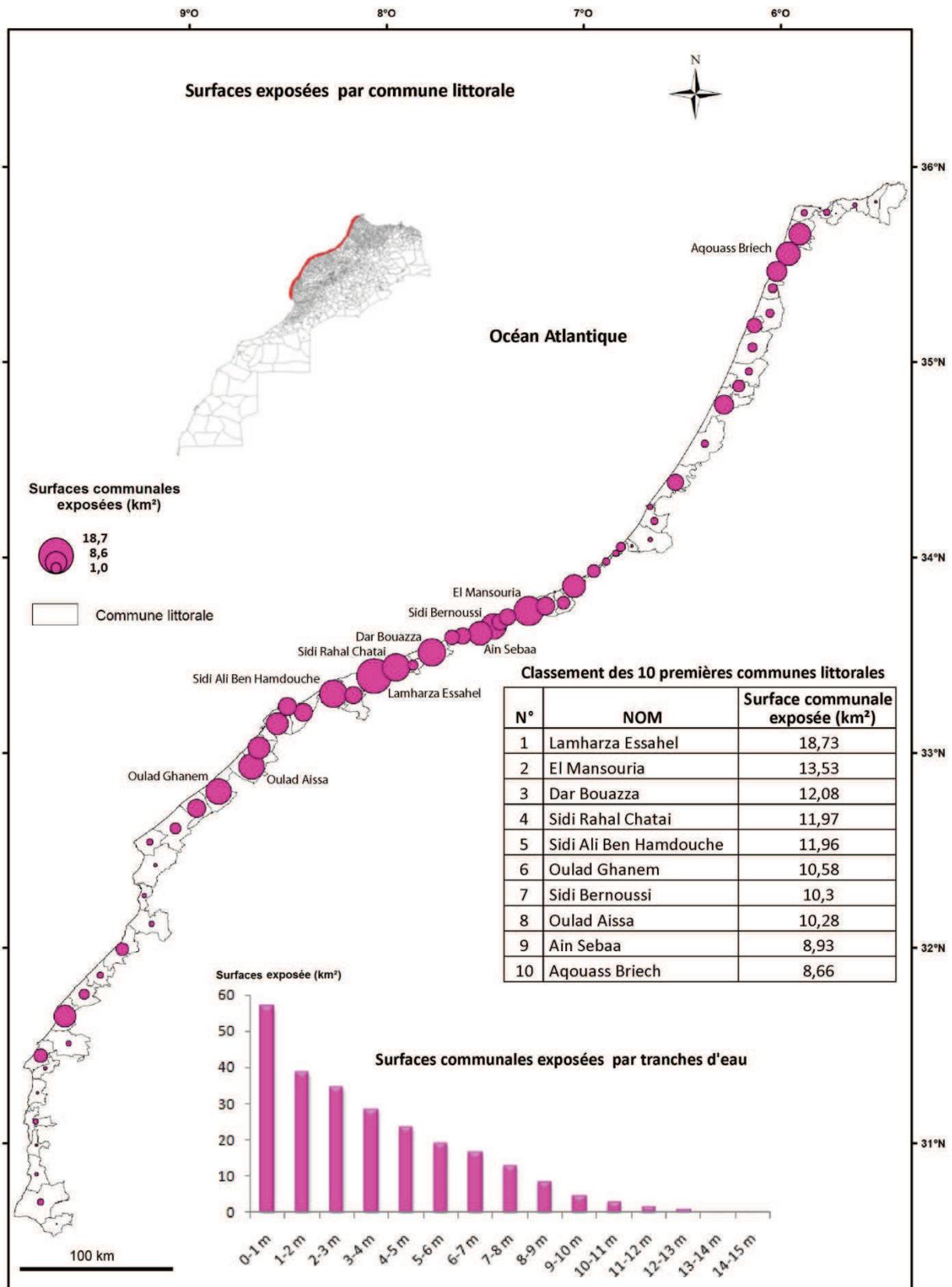


Figure 107. Indicateurs d'exposition surfacique (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami.

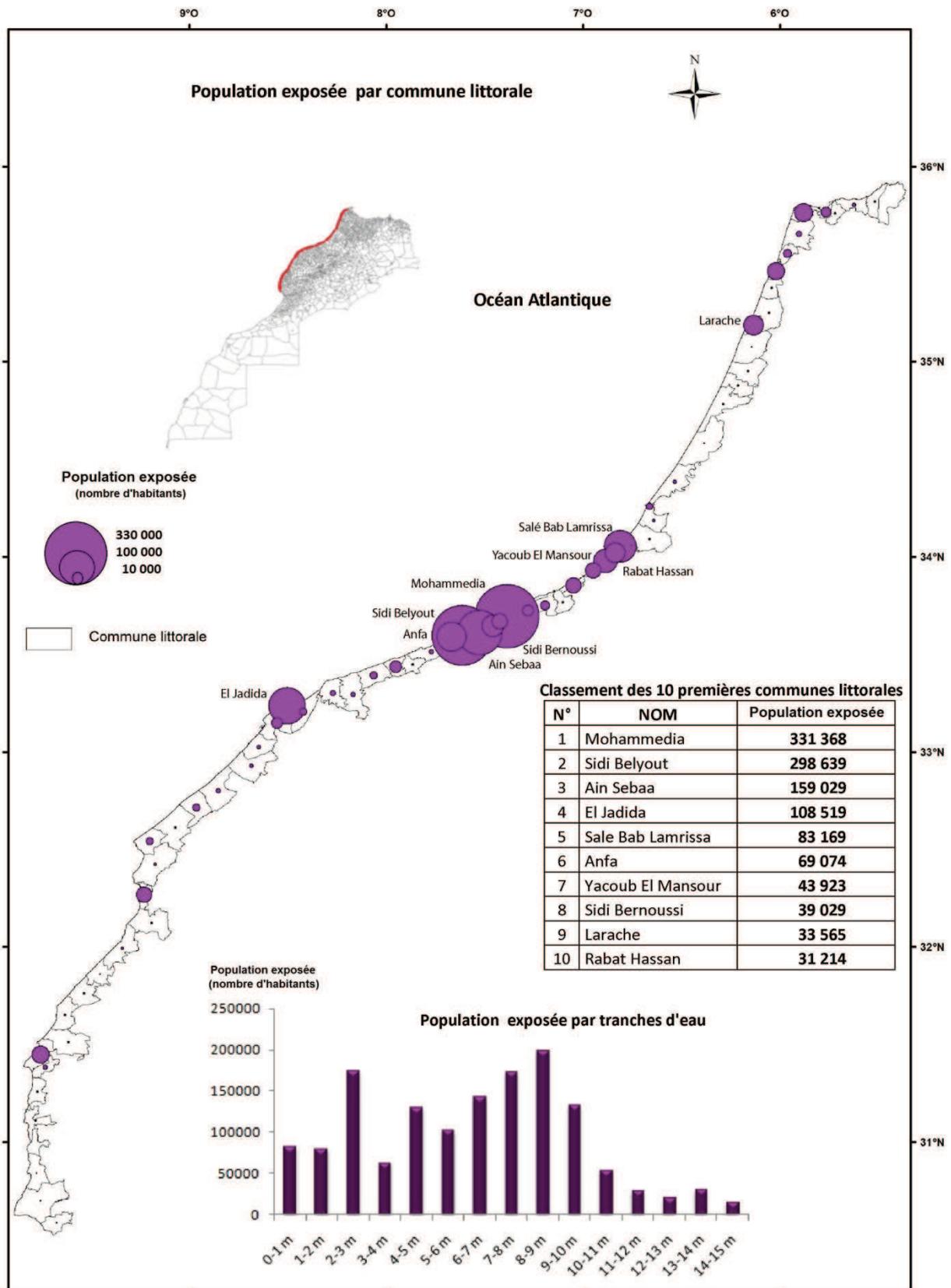


Figure 108. Indicateurs d'exposition humaine (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami.

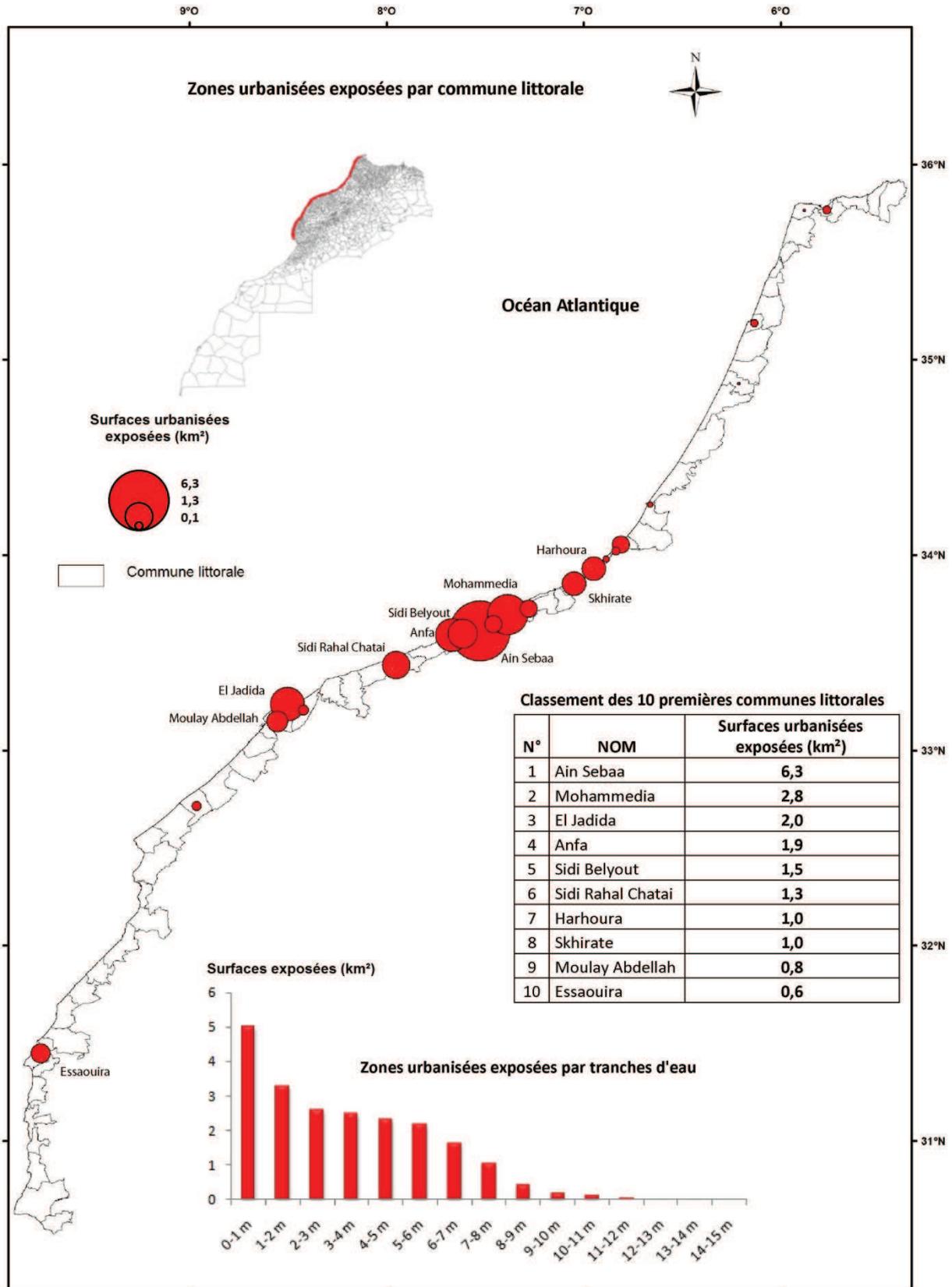


Figure 109. Indicateurs d'exposition urbaine (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami.

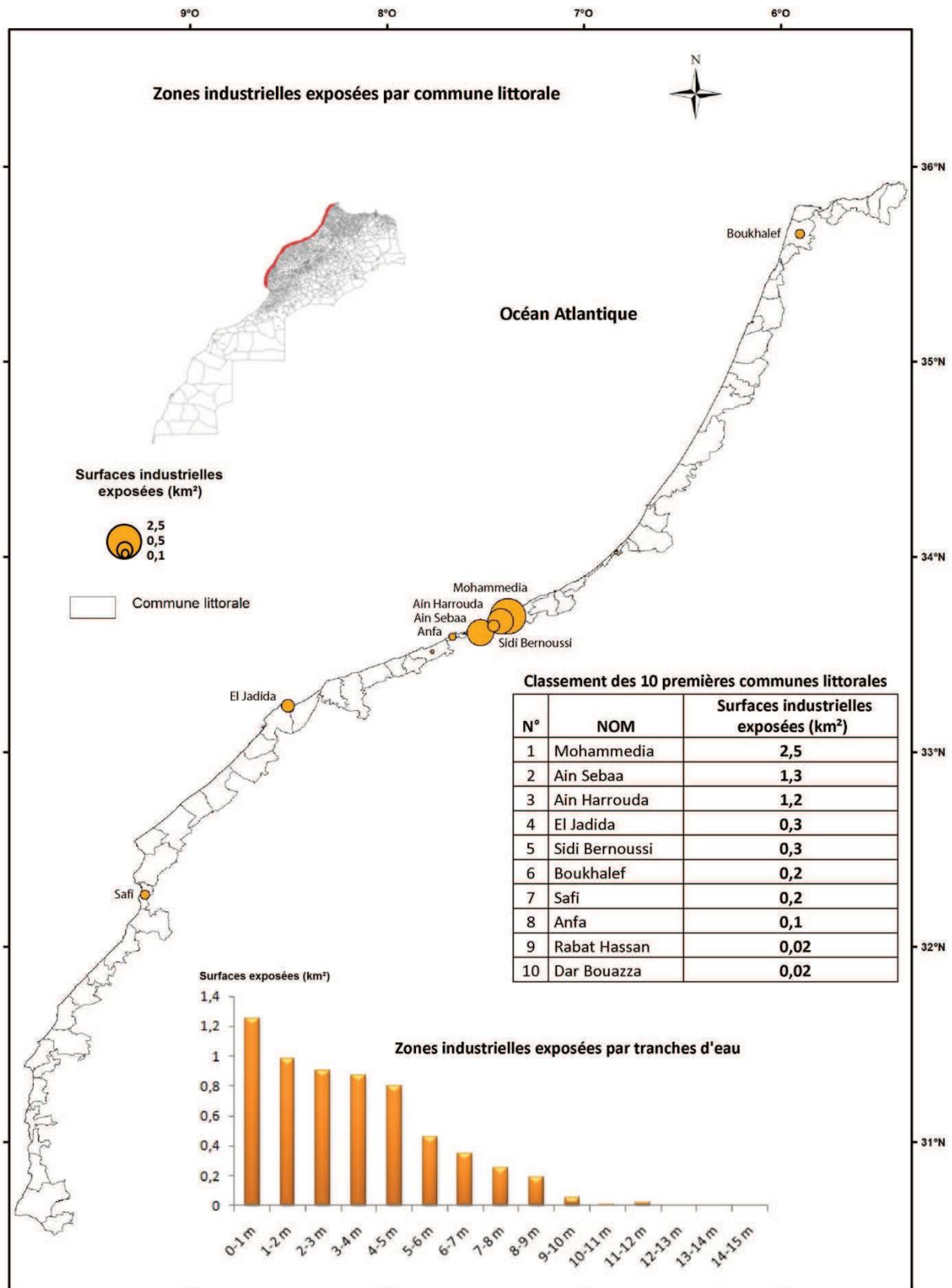


Figure 110. Indicateurs d'exposition industrielle (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami.

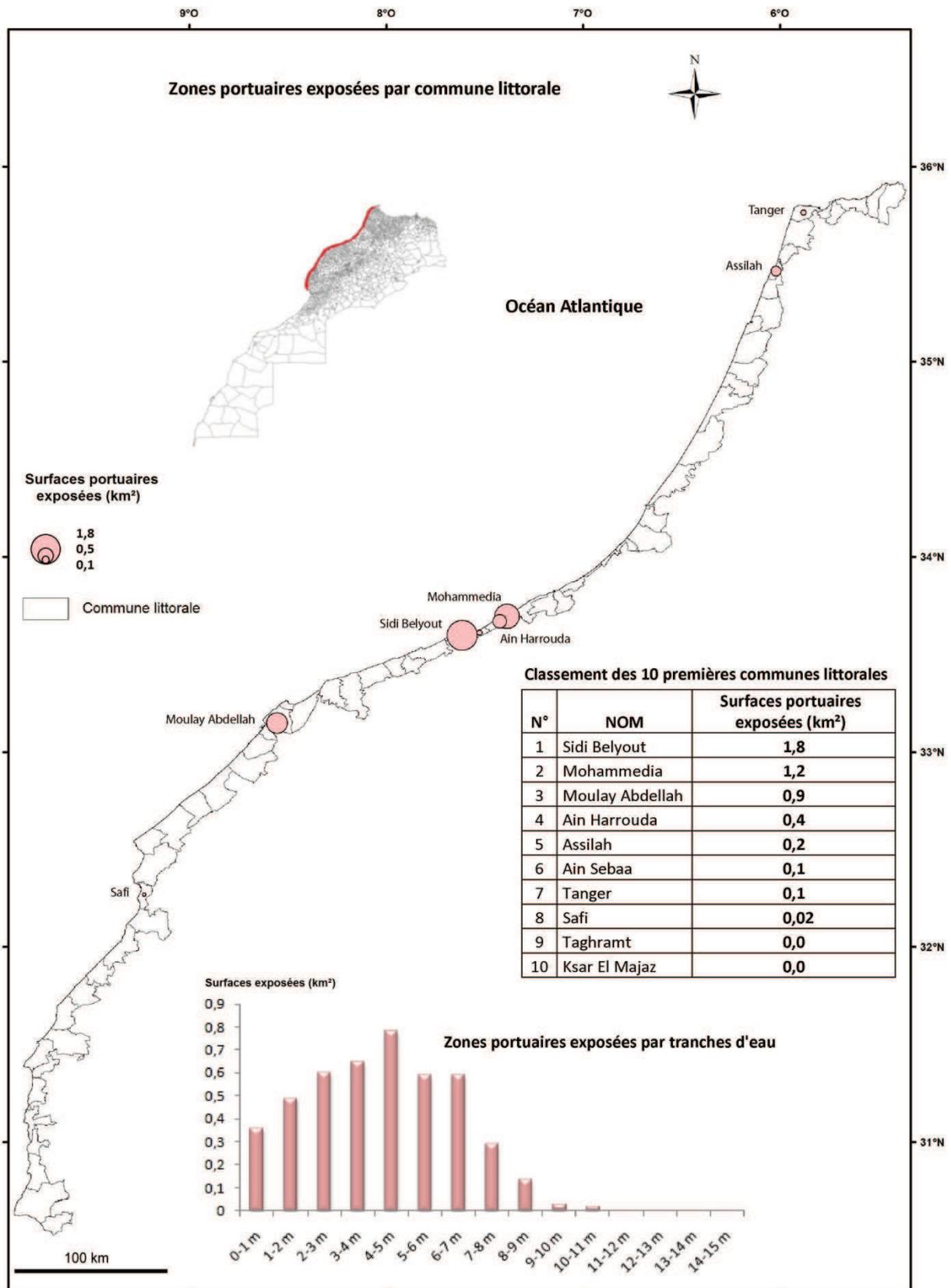


Figure 111. Indicateurs d'exposition portuaire (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami.

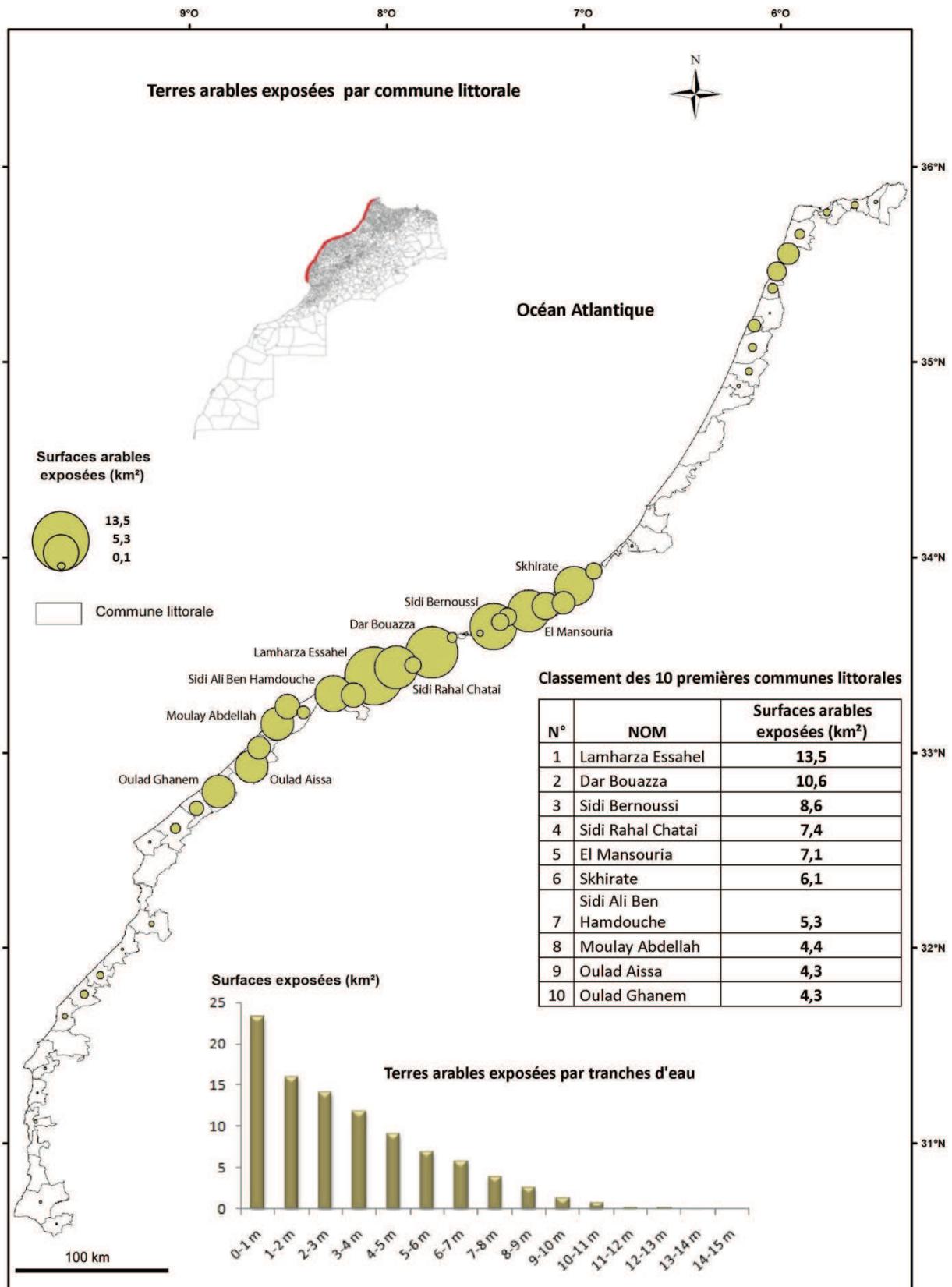


Figure 112. Indicateurs d'exposition des terres arables (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami.

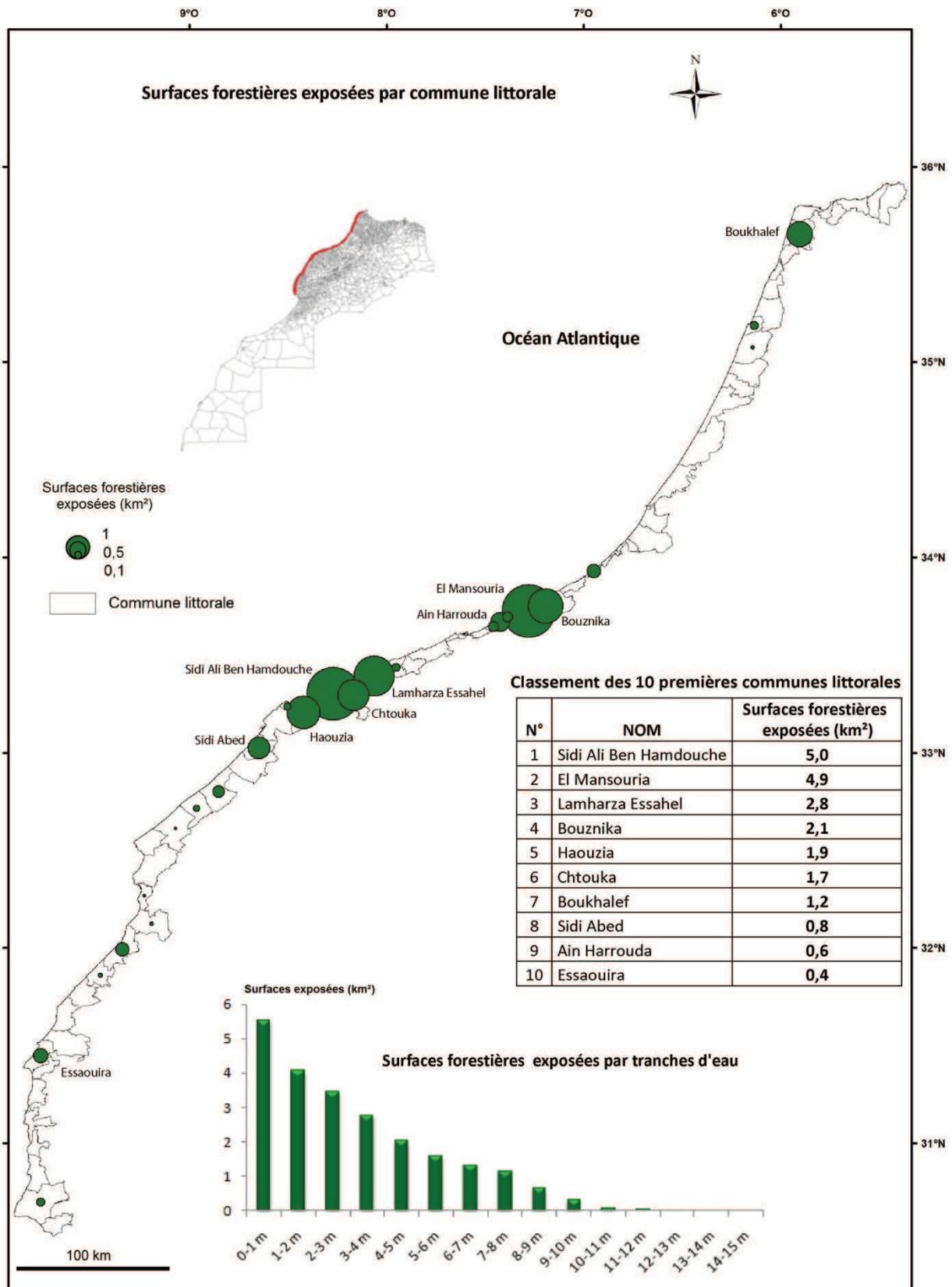


Figure 113. Indicateurs d'exposition forestière (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami.

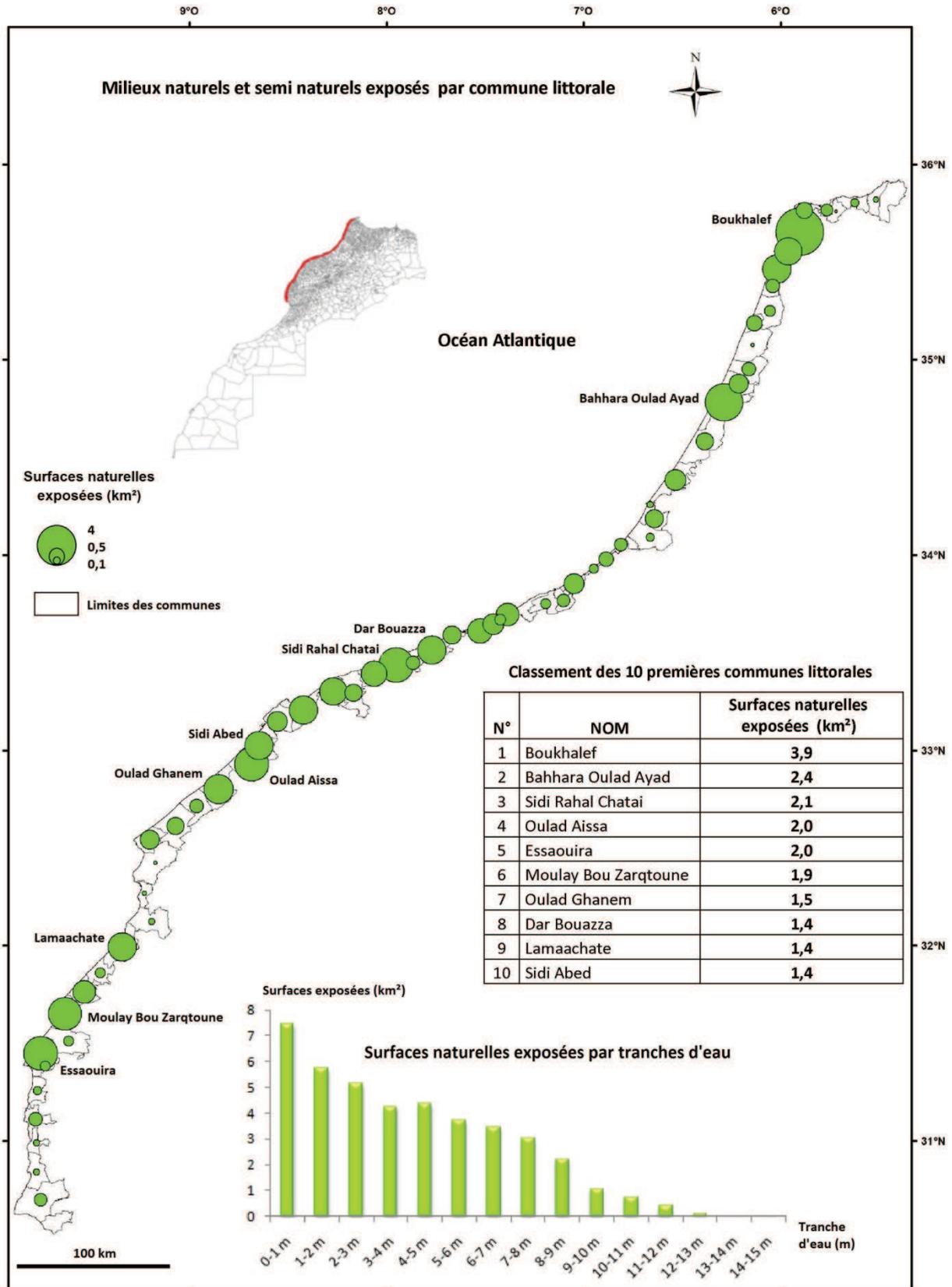


Figure 114. Indicateurs d'exposition naturelle (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami.

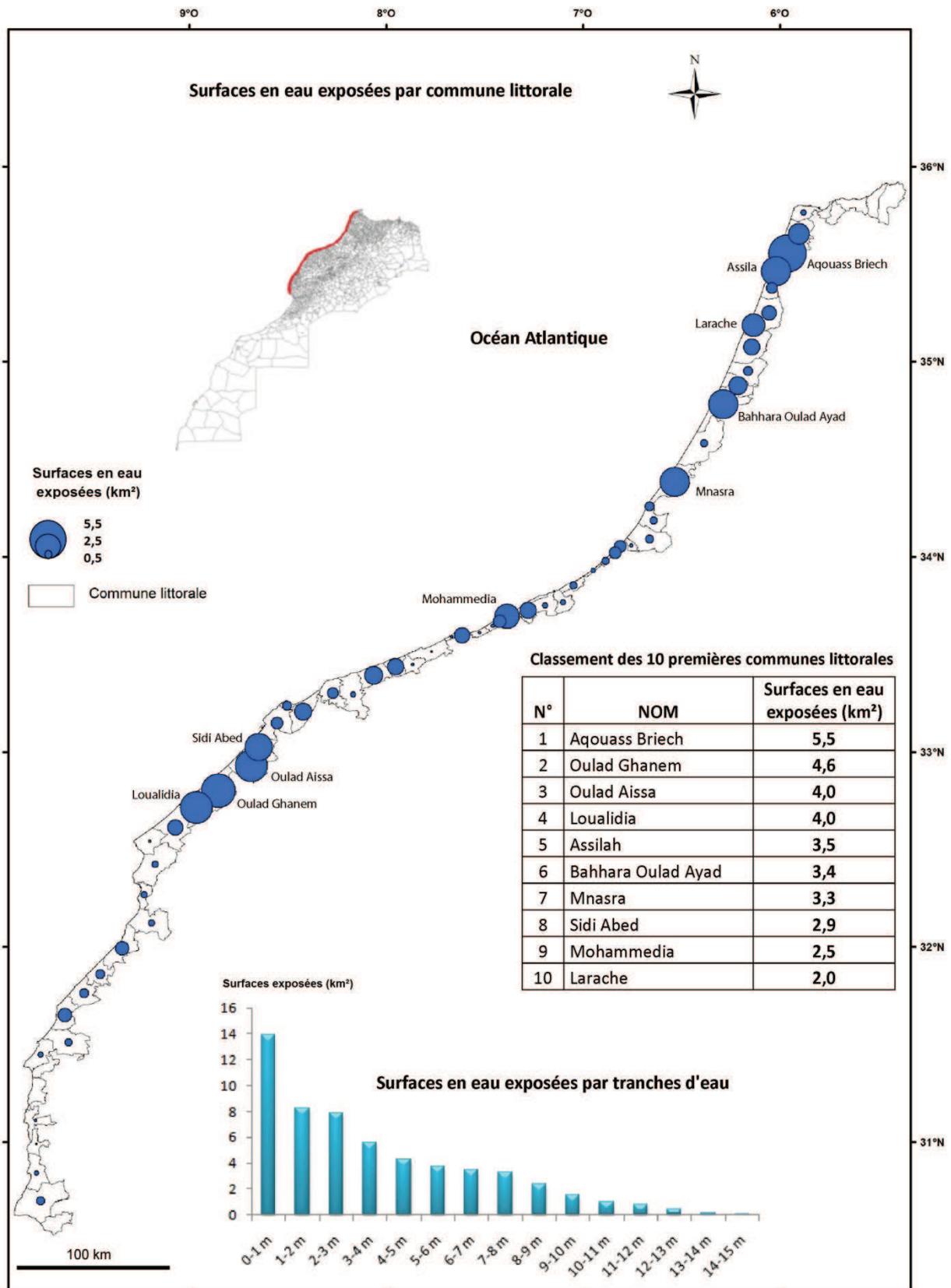


Figure 115. Indicateurs d'exposition des surfaces en eau (en km<sup>2</sup>) à la submersion marine par tsunami.

7.1.1. Indicateurs d'exposition par commune littorale en %

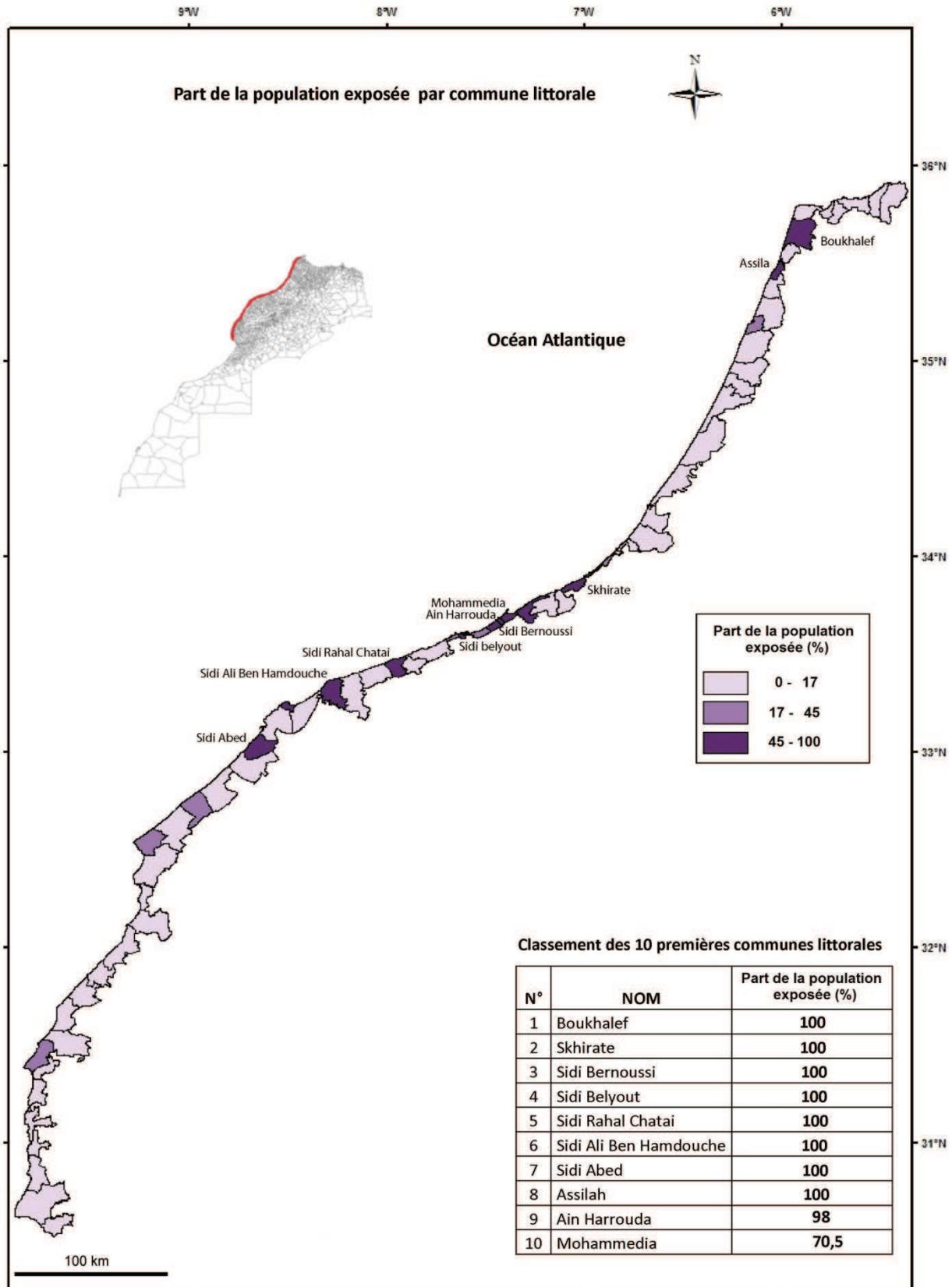


Figure 116. Indicateurs d'exposition humaine (en %) à la submersion marine par tsunami.

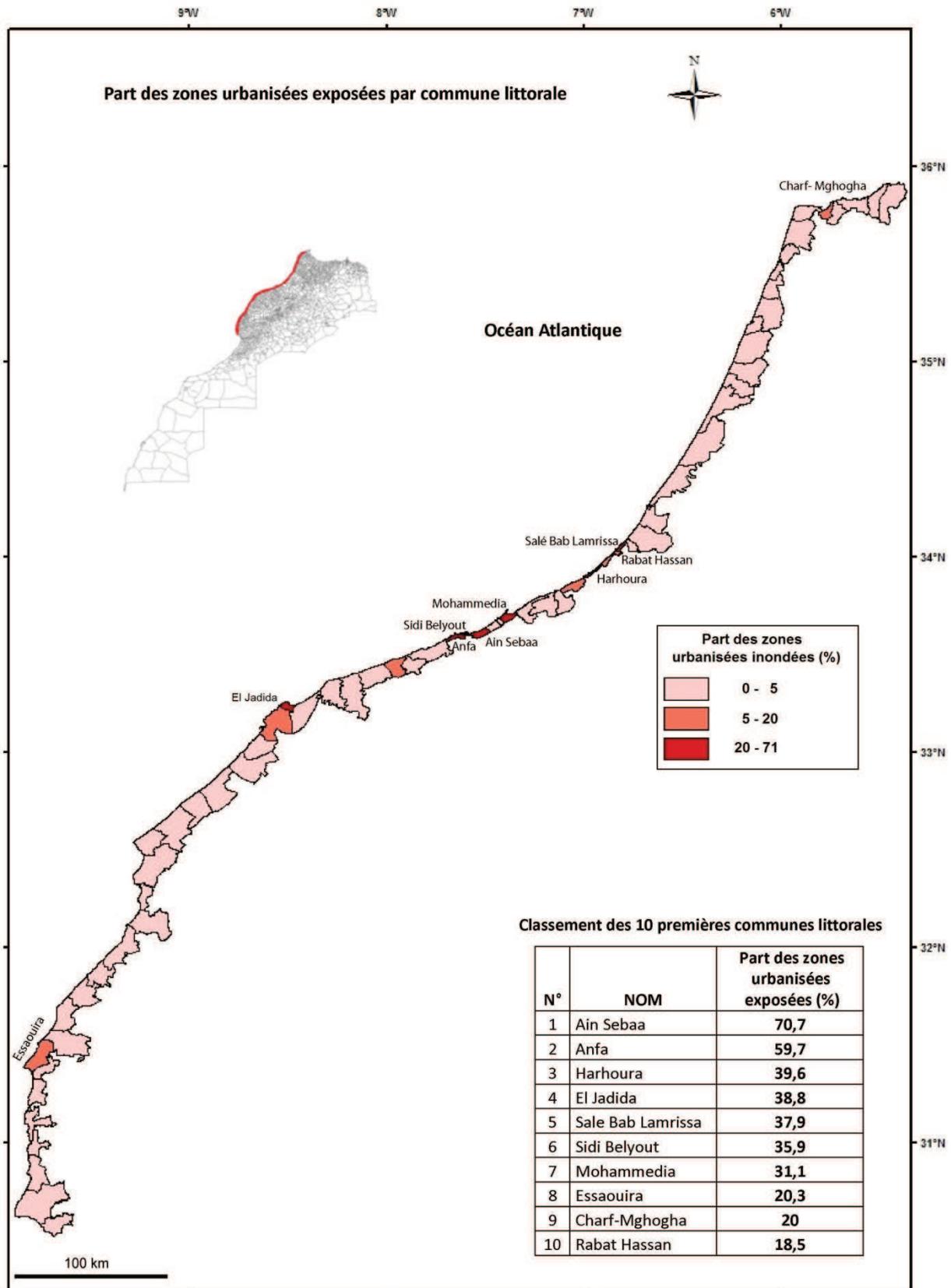


Figure 117. Indicateurs d'exposition urbaine (en %) à la submersion marine par tsunami.

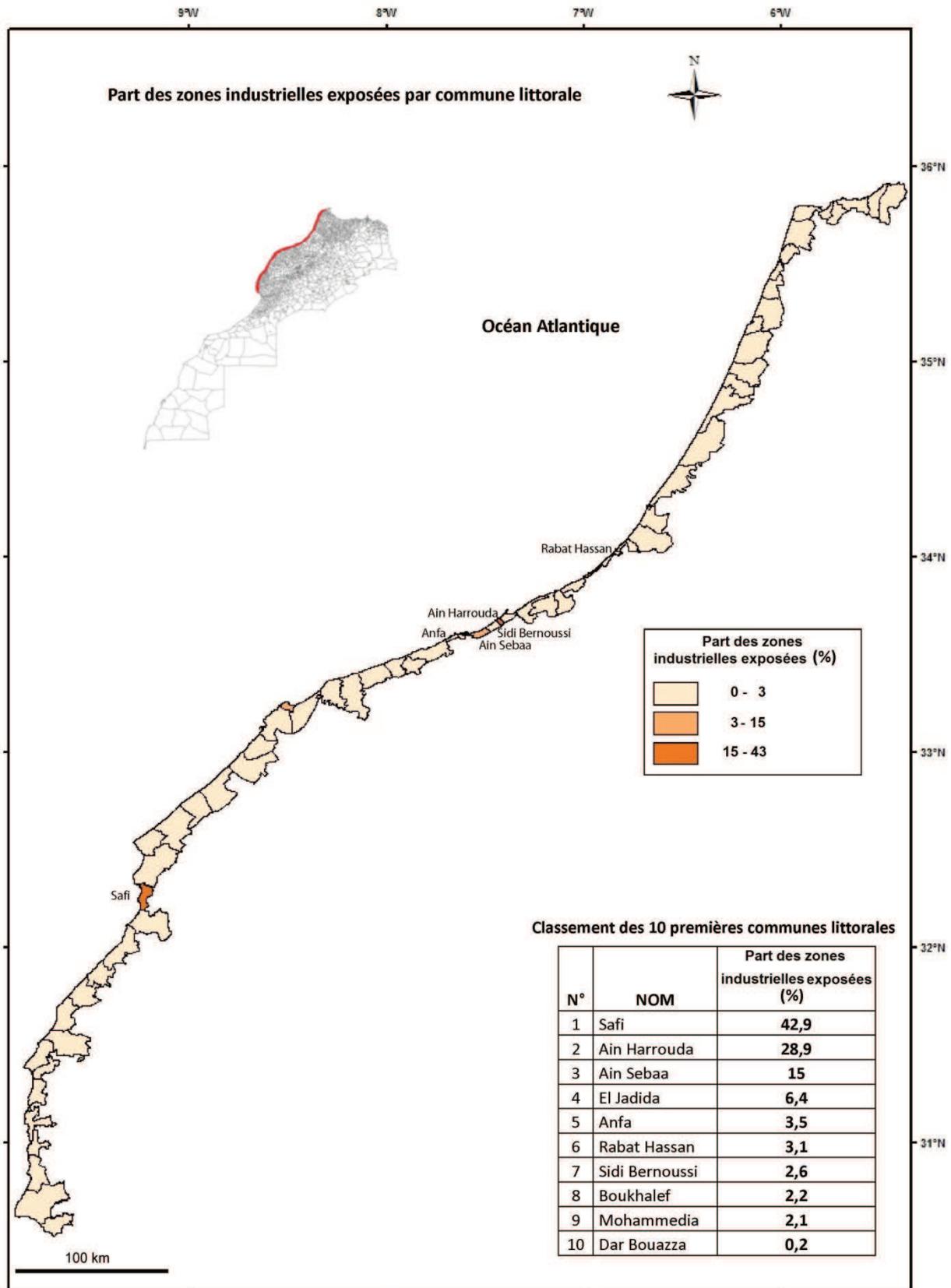


Figure 118. Indicateurs d'exposition industrielle (en %) à la submersion marine par tsunami.

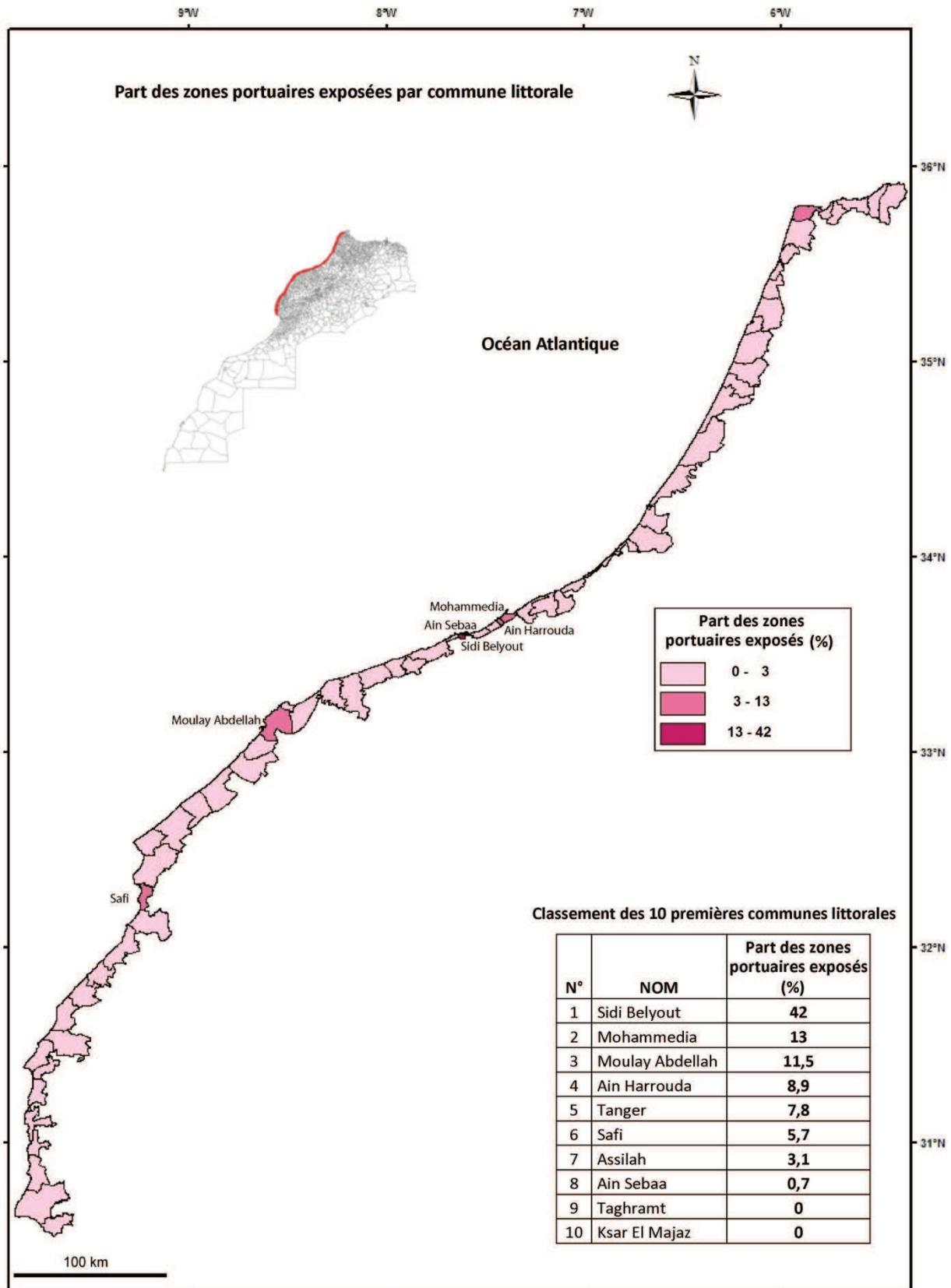


Figure 119. Indicateurs d'exposition portuaire (en %) à la submersion marine par tsunami.

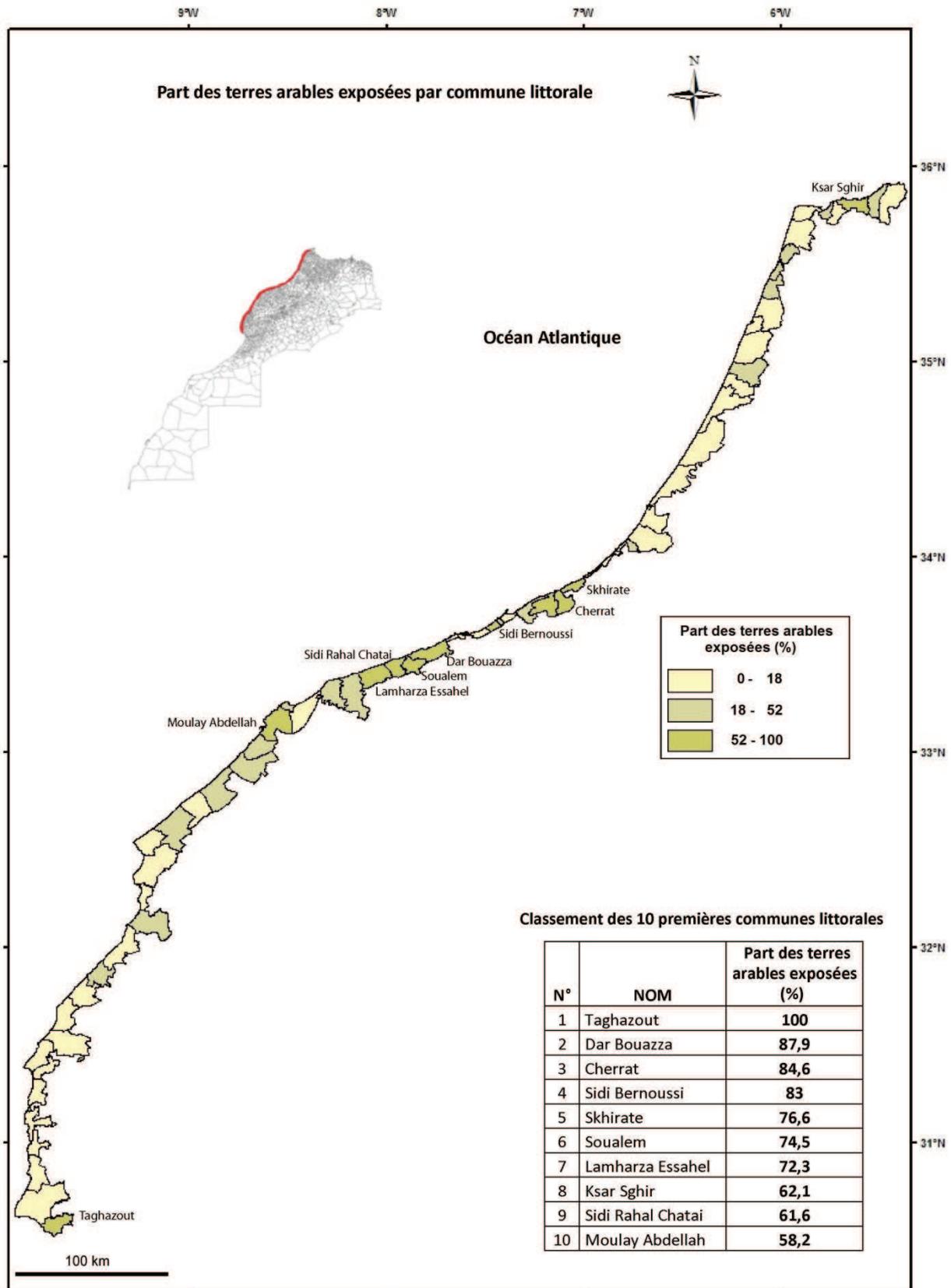


Figure 120. Indicateurs d'exposition des terres arables (en %) à la submersion marine par tsunami.

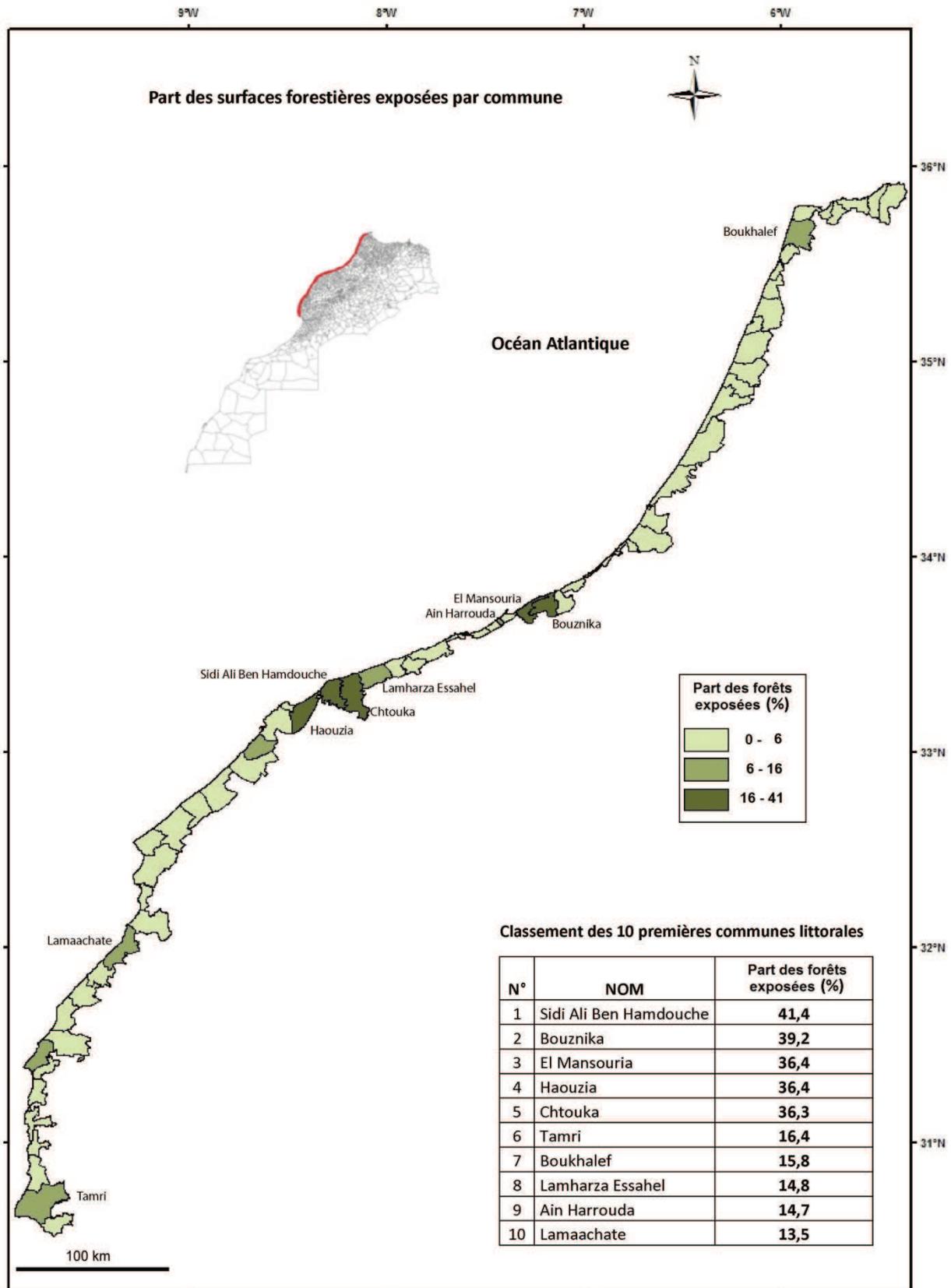


Figure 121. Indicateurs d'exposition forestière (en %) à la submersion marine par tsunami.

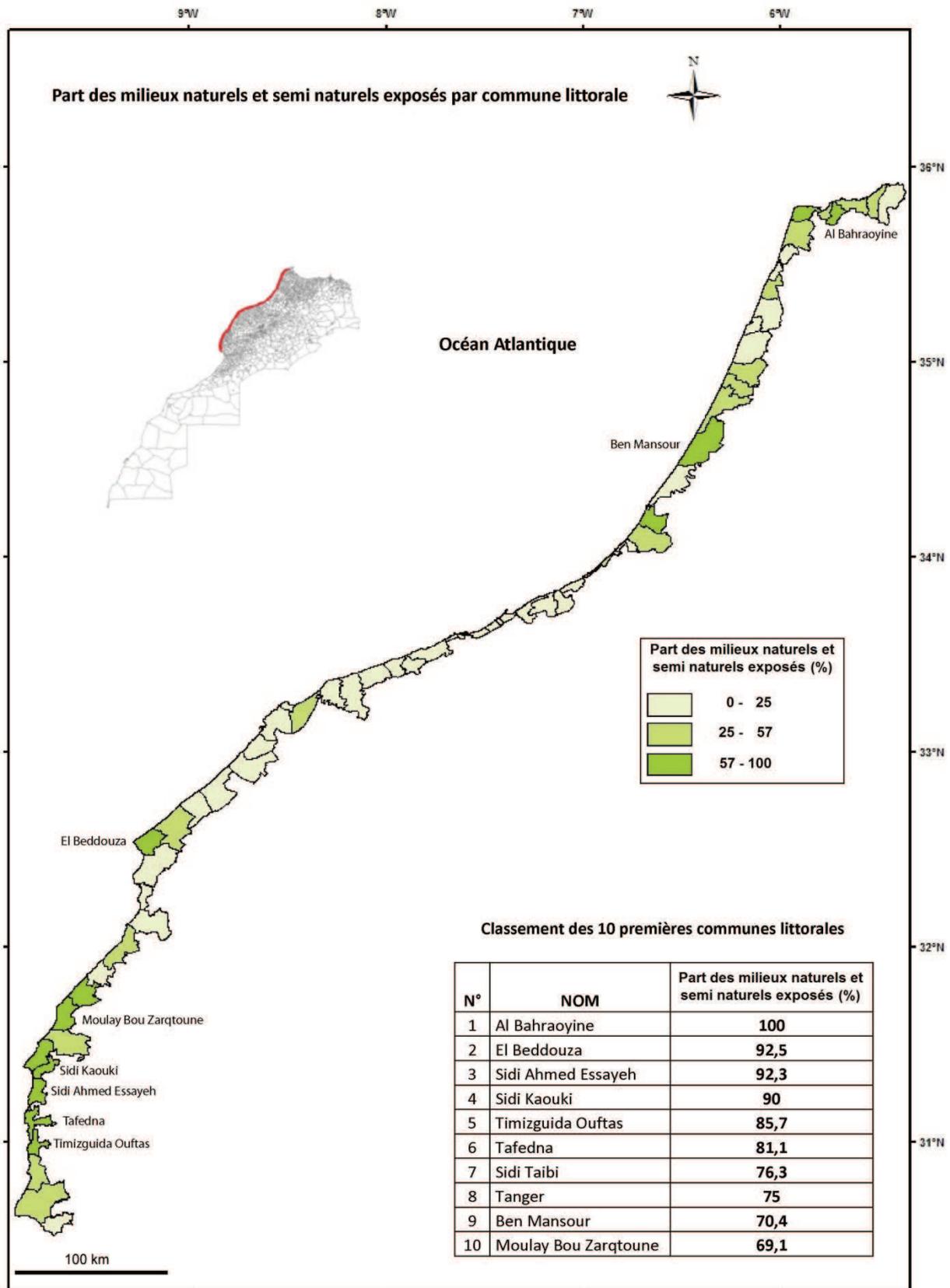


Figure 122. Indicateurs d'exposition naturelle (en %) à la submersion marine par tsunami.

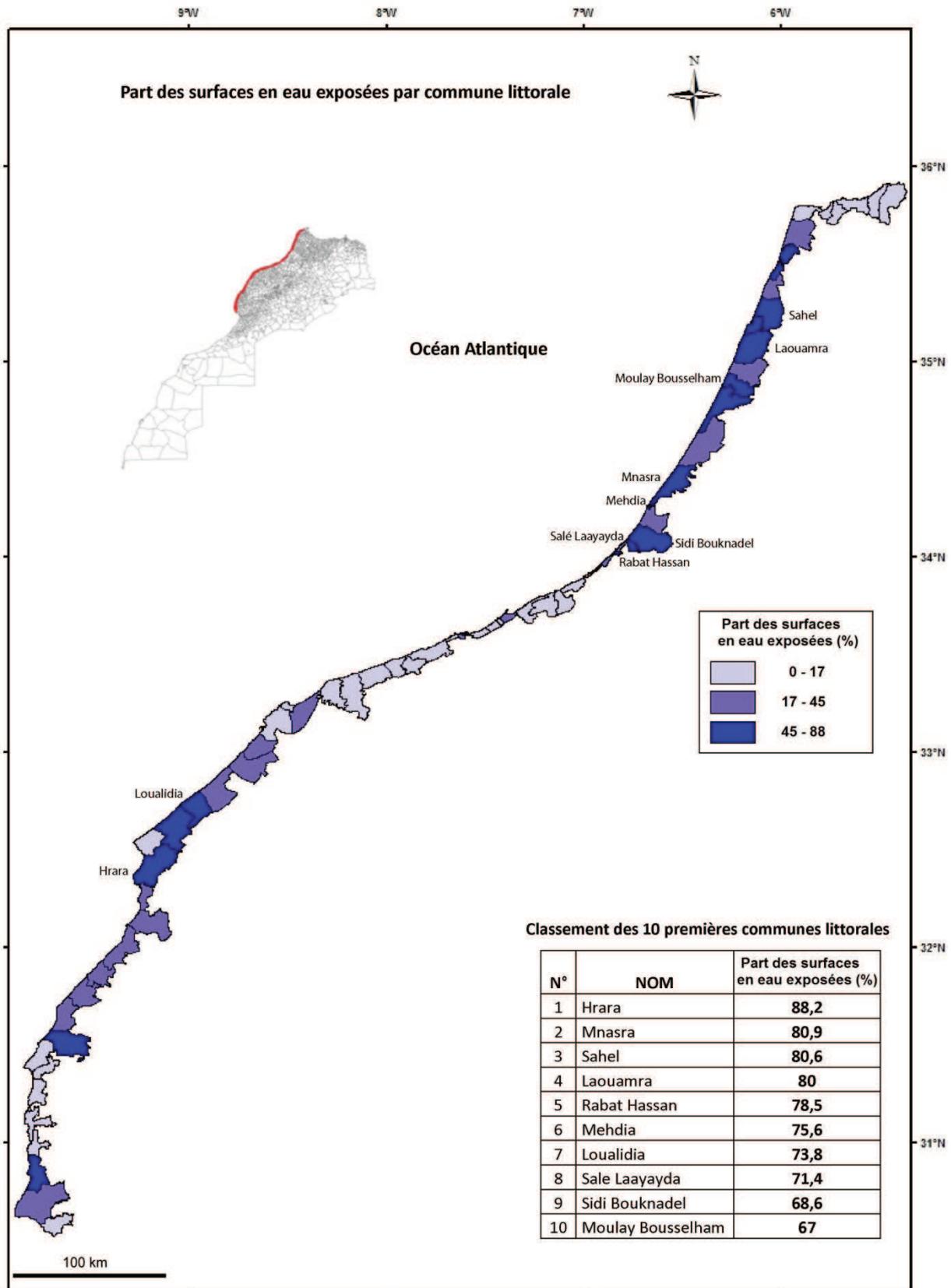


Figure 123. Indicateurs d'exposition de surfaces en eau (en %) à la submersion marine par tsunami.

2. Indicateurs d'exposition par mailles de 5 km<sup>2</sup>

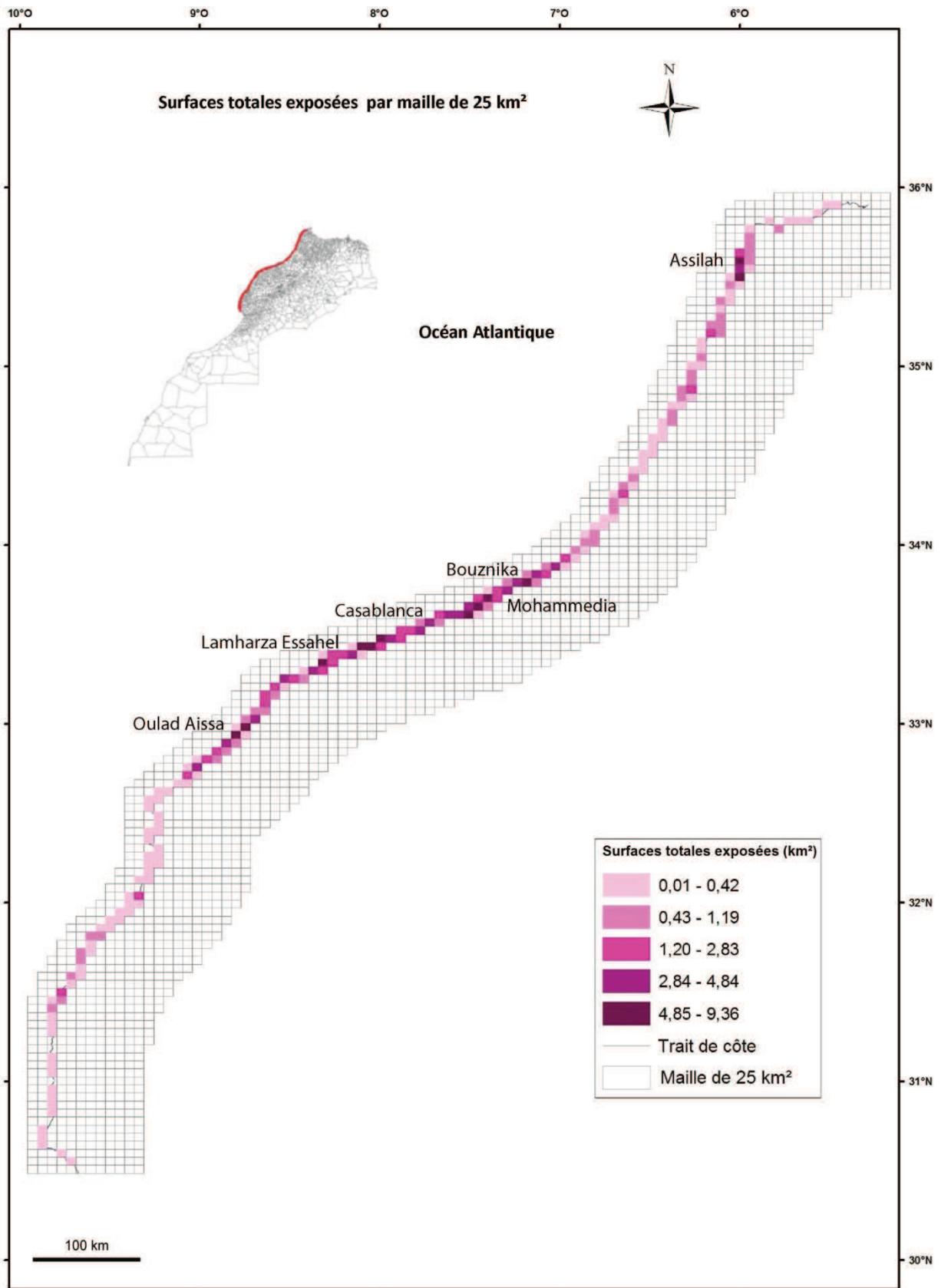


Figure 124. Indicateurs d'exposition surfacique (en %) à la submersion marine par tsunami

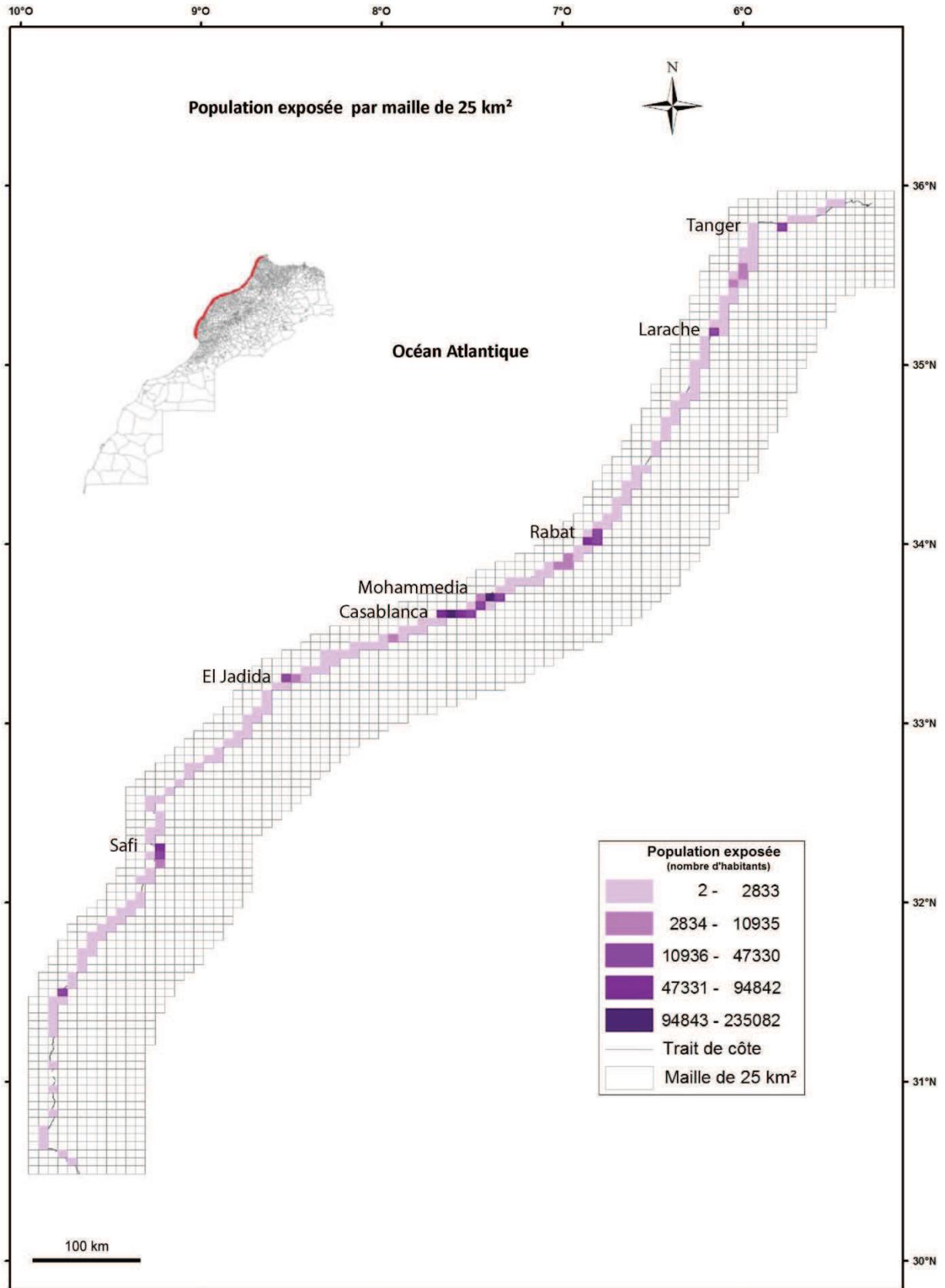


Figure 125. Indicateurs d'exposition humaine (en %) à la submersion marine par tsunami

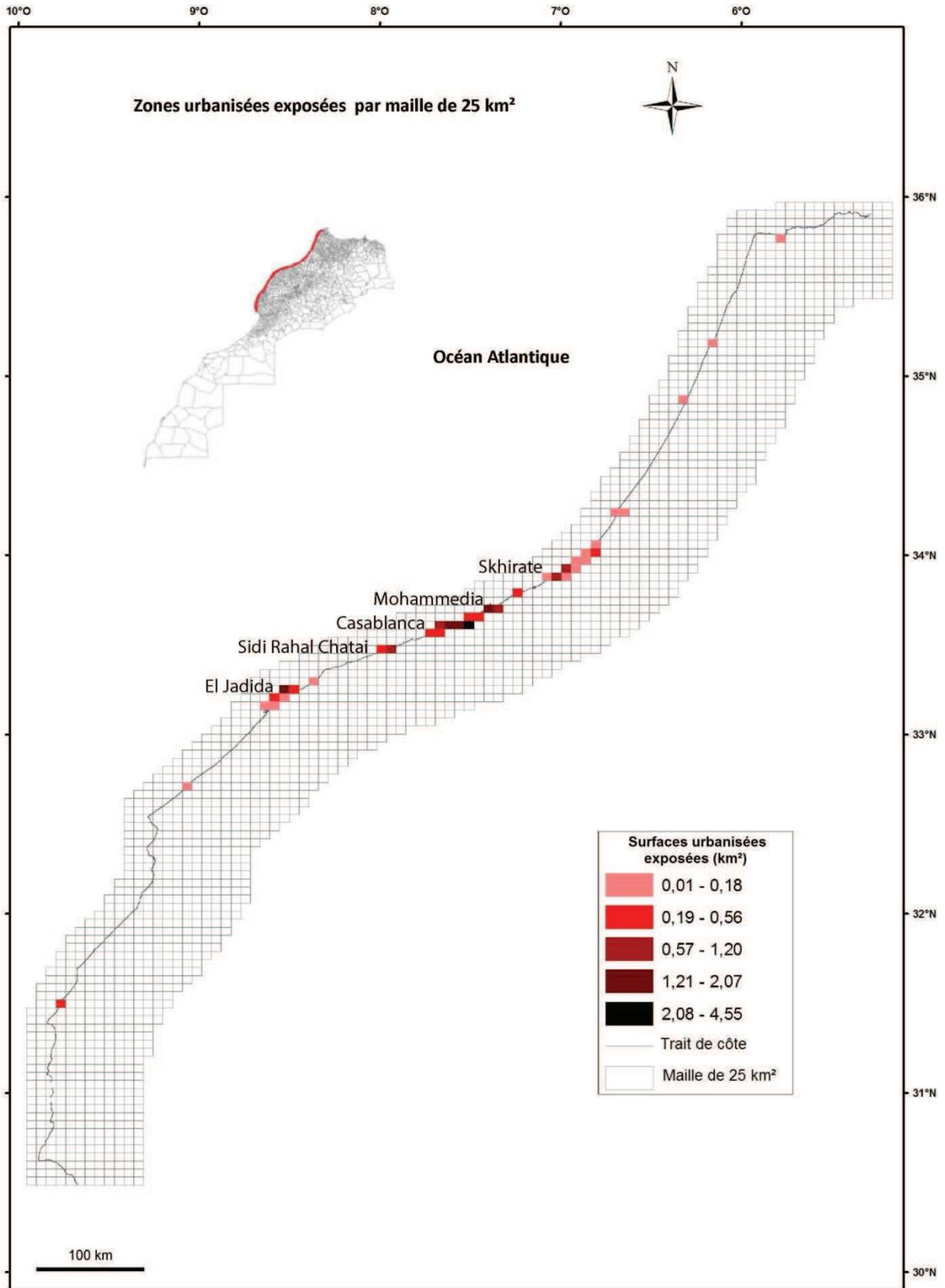


Figure 126. Indicateurs d'exposition urbaine (en %) à la submersion marine par tsunami

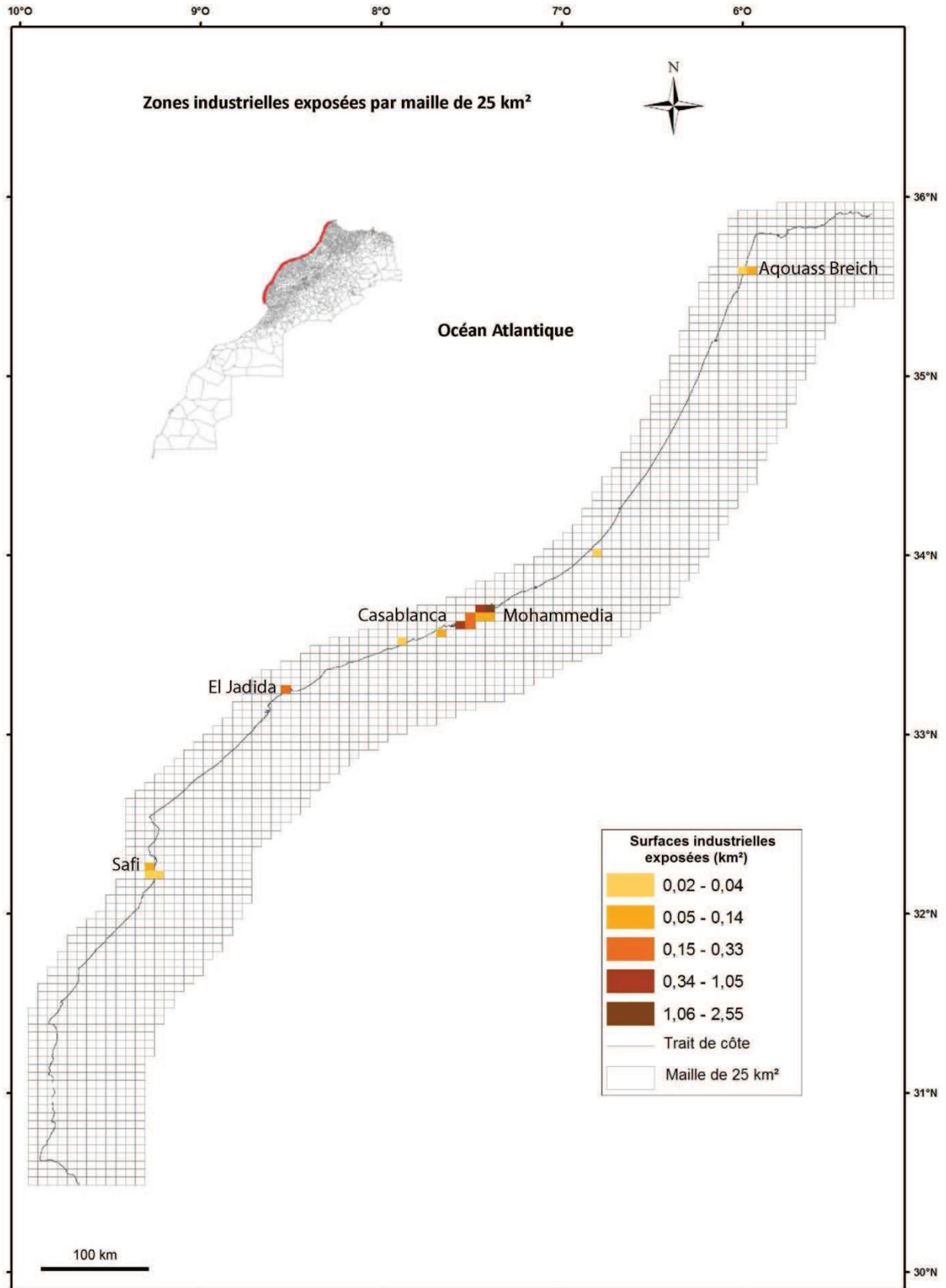


Figure 127. Indicateurs d'exposition industrielle (en %) à la submersion marine par tsunami

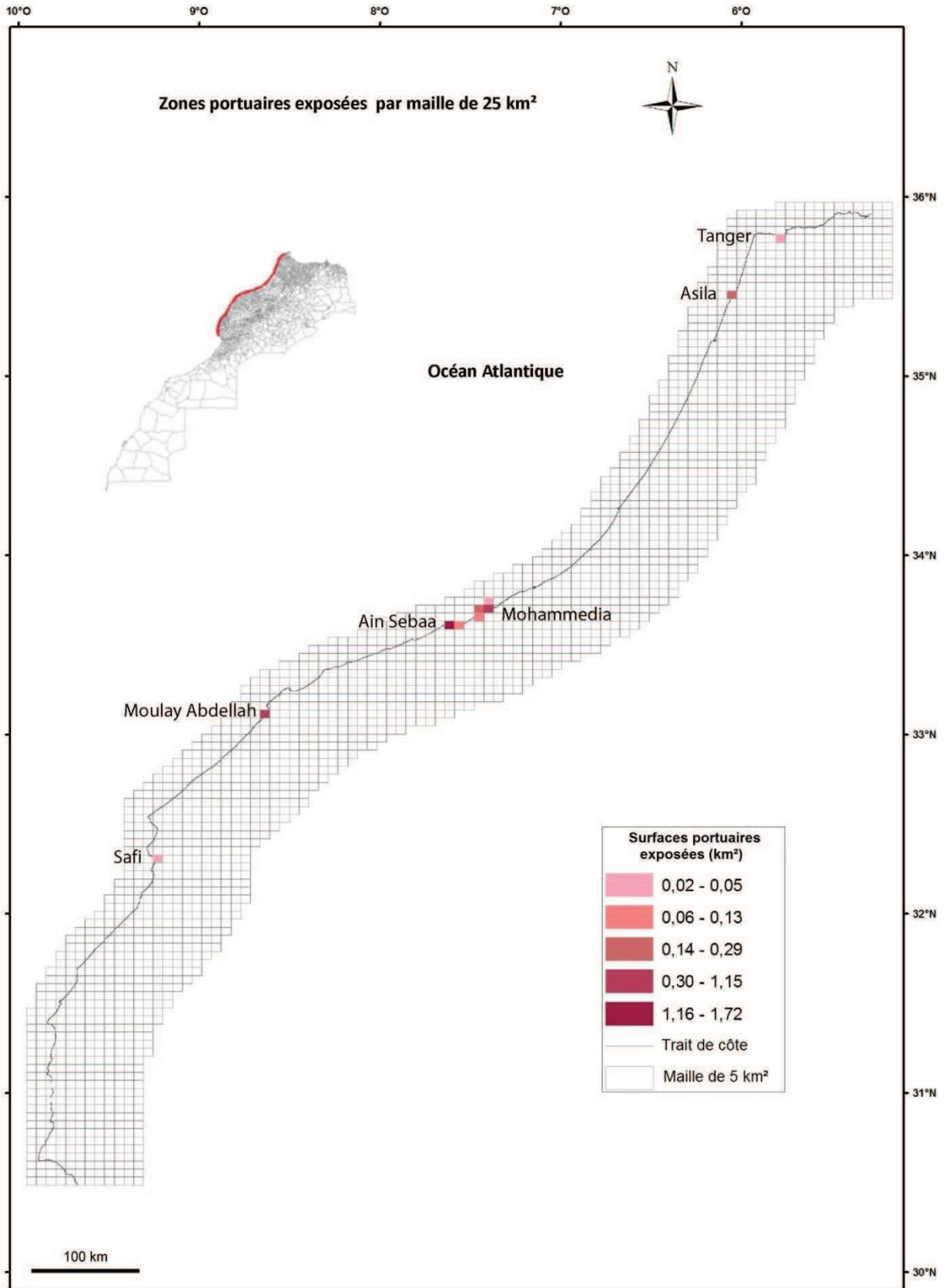


Figure 128. Indicateurs d'exposition portuaire (en %) à la submersion marine par tsunami

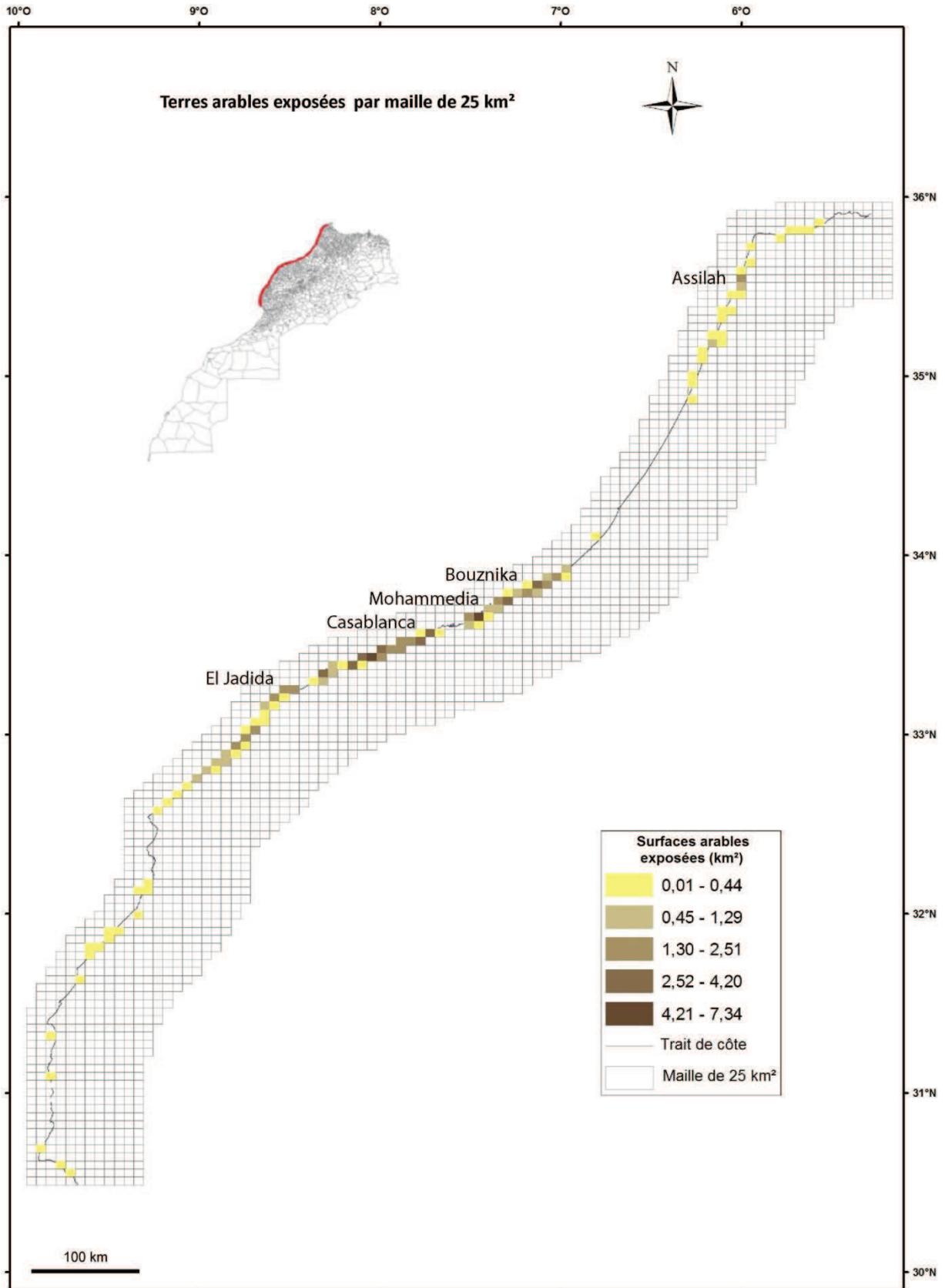


Figure 129. Indicateurs d'exposition des terres arables (en %) à la submersion marine par tsunami

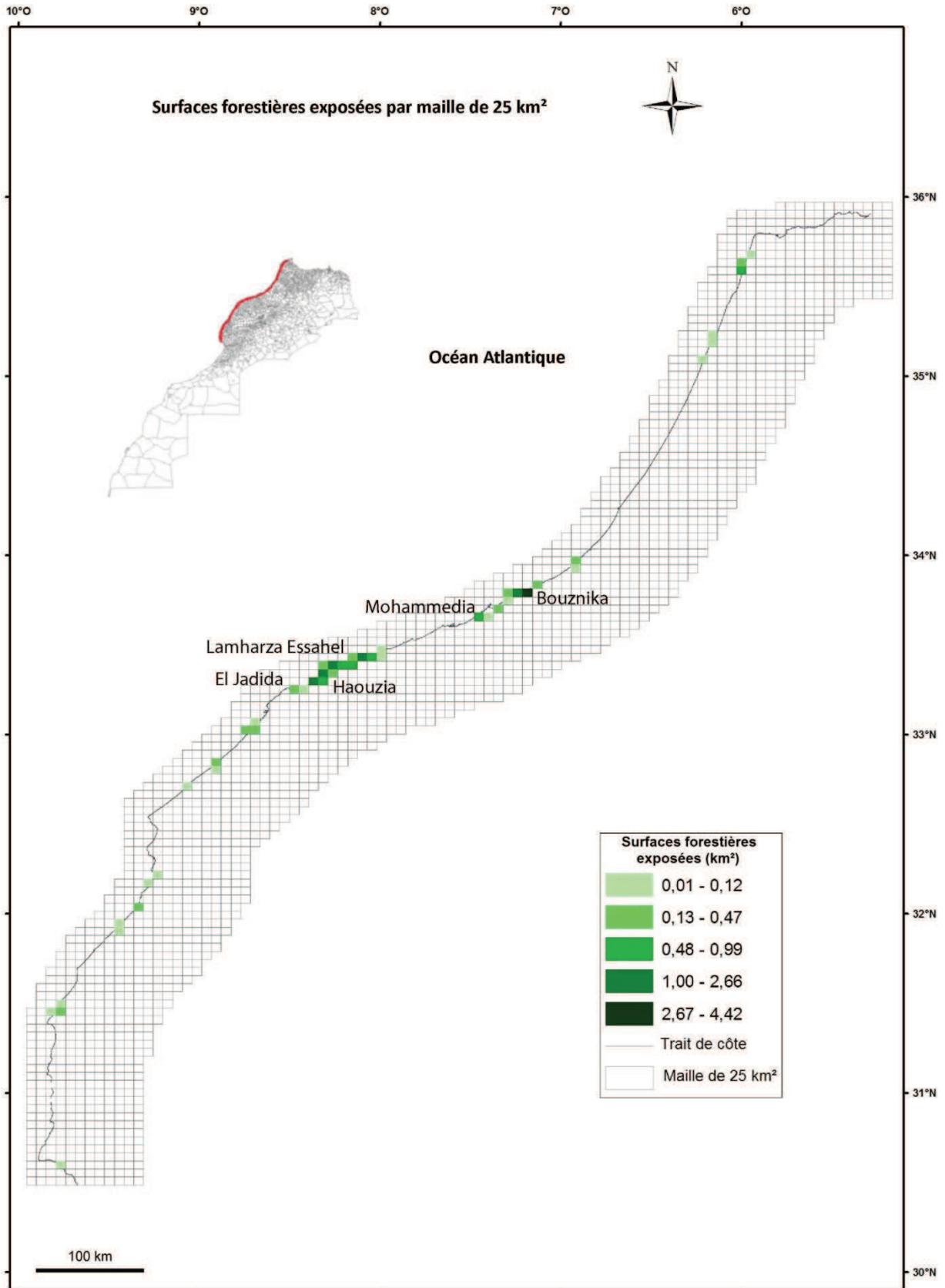


Figure 130. Indicateurs d'exposition forestière (en %) à la submersion marine par tsunami

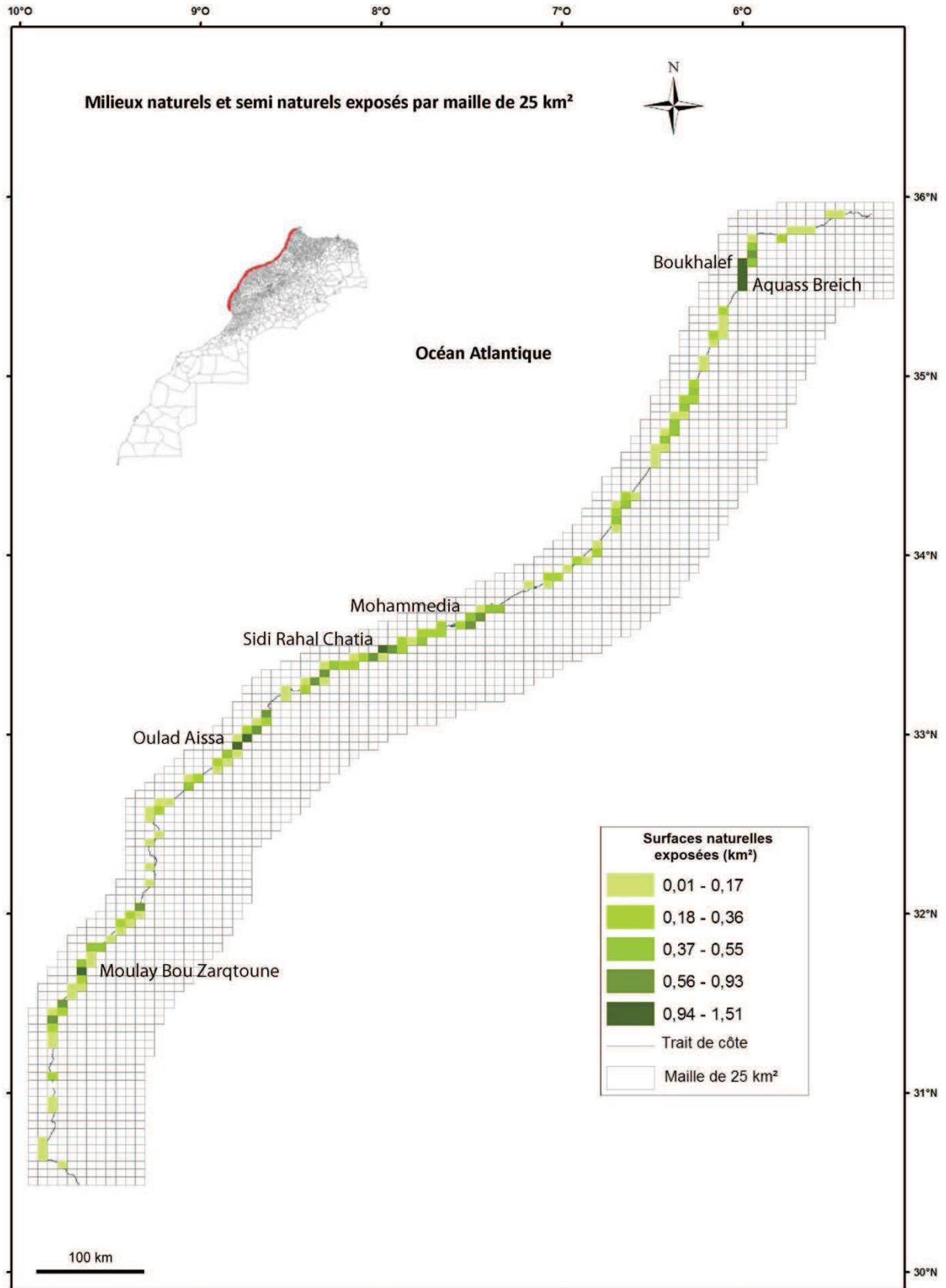


Figure 131. Indicateurs d'exposition naturelle (en %) à la submersion marine par tsunami

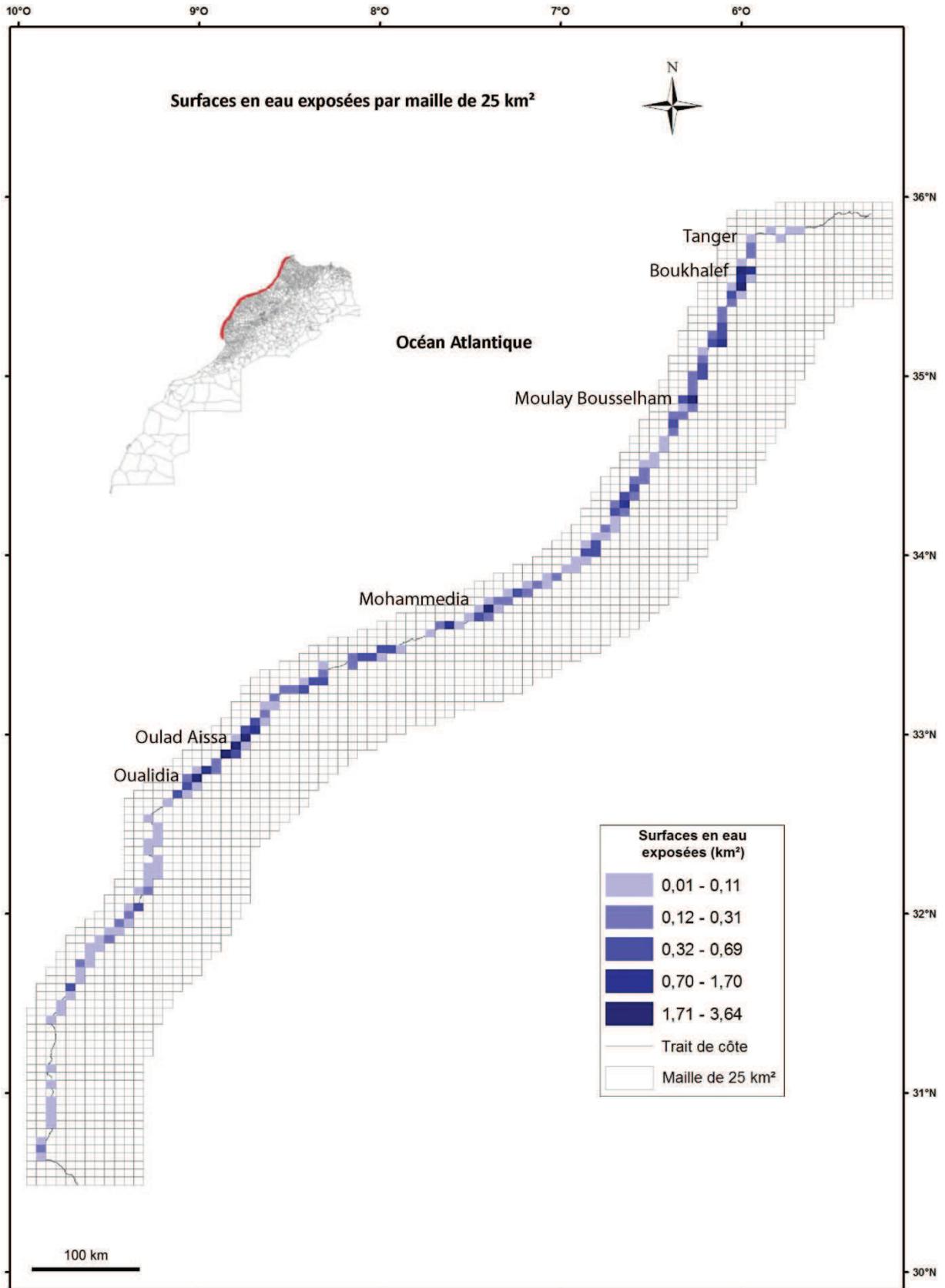


Figure 132. Indicateurs d'exposition des surfaces en eau à la submersion marine par tsunami

