

Apports des sciences géographiques à la prévention du risque tsunami au Maroc

Frédéric Leone,¹ Rachid Omira,² Mathieu Péroche,³ Samira Mellas,⁴ Nancy Meschinet de Richemond,⁵ Monique Gherardi-Leone,⁶ Franck Lavigne,⁷ Bendahhou Zourarah,⁸ Khalid Mehdi,⁹ Maria Ana Baptista.¹⁰

Introduction

Depuis une vingtaine d'années, les géographes ont investi le champ des risques naturels en privilégiant une approche intégrée, en tenant compte des enjeux et vulnérabilités, et dont la valeur ajoutée apparaît en particulier au travers de la cartographie multi-scalaire du risque et l'aide à la décision qui peut en résulter. Suite à l'avènement du tsunami de dimension catastrophique qui a frappé l'Océan Indien le 26 décembre 2004, la recherche sur ce risque a connu un tournant majeur, répondant à la fois à un besoin d'évaluation mais aussi et surtout de prévention. En termes de pertes en vies humaines, le gain résultant d'une bonne préparation a été démontré lors du tsunami du 11 mars 2011 au Japon, en particulier grâce à un système d'alerte précoce et une bonne planification des évacuations des populations.¹¹ Ces deux événements ont favorisé l'émergence de nombreux projets de recherche, sur les zones touchées, mais également au-delà, sur des secteurs potentiellement exposés à ce risque et où il convient de se préparer. Des géographes français, associés à leurs collègues marocains ou portugais des géosciences, ont pleinement

-
1. UMR GRED, Université Paul Valéry-Montpellier 3 & IRD, Montpellier, France.
 2. Instituto Portugues do Mar e da Atmosfera (IPMA), Universidade de Lisboa et Instituto Dom Luiz (IDL), Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal.
 3. UMR GRED, Université Paul Valéry-Montpellier 3 & IRD, Montpellier, France.
 4. UMR GRED, Université Paul Valéry-Montpellier 3 & IRD, Montpellier, France et LGMSS URAC-45 et Université Chouaïb Doukkali, El Jadida, Maroc.
 5. UMR GRED, Université Paul Valéry-Montpellier 3 & IRD, Montpellier, France.
 6. UMR GRED, Université Paul Valéry-Montpellier 3 & IRD, Montpellier, France.
 7. Laboratoire de Géographie Physique (LGP), Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne & CNRS, Meudon, France.
 8. LGMSS URAC-45, Université Chouaïb Doukkali, El Jadida, Maroc.
 9. LGMSS URAC-45, Université Chouaïb Doukkali, El Jadida, Maroc.
 10. Instituto Dom Luiz (IDL), Universidade de Lisboa, et Portugal et Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisbon, Portugal.
 11. On estime que sur près de 602 000 personnes exposées, 582 000 ont été évacuées et environ 20 000 sont décédées ou ont été portées disparues.

participé à ces projets, en particulier au Maroc, dans le cadre des programmes de recherche pluridisciplinaires MAREMOTI et ASTARTE.¹²

En effet, par le passé, le Maroc n'a pas été épargné par des tsunamis dont les traces sont encore visibles dans de rares archives documentaires et/ou géomorphologiques. Le risque associé y reste encore sous-estimé, sinon totalement ignoré par les populations et les autorités. Pourtant, les fortes densités de la population, actuelles ou projetées sur son littoral, corrélées à une urbanisation galopante, invitent à la prudence et à la préparation collective. Cela doit se traduire en priorité par le développement d'une conscience du risque fondée sur l'information préventive et par la planification de réponses appropriées en cas d'arrivée d'un tsunami. Pour répondre à ces deux objectifs prioritaires et à moindre coût, le Maroc a besoin d'études scientifiques permettant de rationaliser l'état des connaissances sur ce risque et d'optimiser les stratégies de prévention. Nos récents travaux y contribuent modestement en comblant certaines lacunes, en précisant certaines données historiques, en proposant de nouveaux modèles, en aidant localement la planification d'évacuations. Cet article en donne un bref aperçu, dont l'objectif est aussi de montrer la richesse d'une approche géographique des risques, intégrant aussi bien le phénomène (historique et potentiel), les enjeux associés, ses conséquences potentielles, notamment humaines, et la préparation des territoires exposés pour affronter un tsunami.

Un contexte régional tsunamigène

Le Maroc se trouve dans un domaine de collision correspondant au rapprochement des plaques africaine et eurasiatique, et qui génère une forte activité sismique tsunamigène. Plusieurs secteurs sont concernés: (1) La zone transformante dextre des Açores-Gibraltar (Golfe de Cadix) qui est à l'origine de grands séismes historiques, en particulier celui du 1^{er} novembre 1755, dit de Lisbonne (magnitude des ondes de surface Ms: 8,5). Cette zone est toujours en activité comme en témoignent les séismes du 28 février 1969 (Ms: 7,8) et du 26 mai 1975 (Ms: 7,9). (2) La zone sismique Alboran-Bétiques, située à l'est du détroit de Gibraltar et source d'une dizaine de séismes tsunamigènes, dont ceux de 881, 1522, 1680, 1856 et 1980.¹³ Le tsunami le plus récent de cette région est associé au séisme de Zemmouri-Boumerdès (Algérie) de 2003,

12. Projet ANR 2009 RISKMAT MAREMOTI (*MAREgraphie, observations de tsunamis, modélisation et études de vulnérabilité pour l'est Atlantique et la Méditerranée occidentale*) & Projet UE FP7-ENV-2013 ASTARTE (*Assessment, Strategy And Riskreduction for Tsunamis in Europe*).

13. Fatima Kaabouben, Maria Ana Baptista, Aomar Iben Brahim, Azelarab El Mouraouah and El Arbi Toto, "On the Moroccan tsunami catalogue," *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (2009): 1227-36.

enregistré en de nombreux endroits de Méditerranée occidentale, sur la côte algérienne et aux Baléares.¹⁴ (3) Une autre source proche 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 et dont une grosse éruption pourrait provoquer un glissement de flanc induisant un tsunami de grande amplitude qui atteindrait les côtes marocaines en 1h30.¹⁵ Ce risque n'est pas à exclure mais semble infime par rapport à celui que pourrait provoquer une éruption du volcan Teide à Ténérif.¹⁶

Une connaissance encore partielle des évènements historiques

Kaabouben et al.¹⁷ ont répertorié l'ensemble des tsunamis probables ayant touché les côtes marocaines atlantiques et méditerranéennes depuis 382 apr. J.-C. Ce catalogue recense 14 événements tsunamigènes sur l'ensemble des côtes marocaines. Seulement 7 d'entre eux présentent un bon niveau de fiabilité et qualifié de "tsunami déterminé." Bien que la localisation des sources des séismes ne soit pas connue avec précision, 7 des 14 événements ont frappé la côte atlantique. Parmi l'ensemble de ces événements, le plus dévastateur est celui du 1^{er} novembre 1755 sur la côte atlantique. La liste des événements tsunamigènes se base sur le recueil des séismes historiques, mais aussi sur des observations directes, des témoignages écrits contemporains et des données disponibles dans les pays voisins (Portugal et Espagne) (Figure 1). Parmi les événements plus récents, survenus au cours du XX^{ème} siècle, figurent entre autres, ceux détectés par les marégraphes. D'autres catalogues sont disponibles également en ligne sur internet comme par exemple ceux de la NOAA¹⁸ ou du GIC/SATANEM.¹⁹ Ce dernier a été révisé récemment par une équipe de chercheurs italiens en charge de compiler l'ensemble des données historiques disponibles sur l'Europe et la Méditerranée. Ils ont ainsi recensé 290 événements tsunamigènes depuis 6150 avant J.C.²⁰

14. Alexandre Sahal, Jean Roger, Sebastien Allgeyer, Bruno Lemaire, Hélène Hébert, François Schindelé and Franck Lavigne, "The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdès-Zemmouri (Algeria) earthquake: field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modelling," *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (2009): 1823-34. doi:10.5194/nhess-9-1823-2009.

15. Steven Ward and Simon Day, "Cumbre Vieja Volcano-Potential collapse and tsunami at La Palma, Canary Islands," *Geophysical Research Letters* (28)(17)(2001): 3397-400. doi:10.1029/2001GL013110.

16. Raphaël Paris, Francisco-José Pérez Torrado and Juan Carlos Carracedo, "Massive flank failures and tsunamis in the Canary Islands: past, present, future," *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement Band* 140 (200): 537-54.

17. Ibid.

18. National Oceanic and Atmospheric Administration des USA, cf. BD tsunami sur <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml>.

19. Groupe Intergouvernemental de Coordination de l'Atlantique Nord-Est et la Méditerranée placé sous l'égide de l'UNESCO.

20. Alessandra Maramai, Beatriz Brizuela and Laura Graziani, "The Euro-Mediterranean Tsunami Catalogue," *Annals of Geophysics* (57) (4) (2014). doi:10.4401/ag-6437.

Il est intéressant de confronter ces catalogues afin de mettre en exergue les incertitudes sur leur localisation, en particulier dans le Golfe de Cadix, ainsi que le manque de fiabilité des sources historiques antérieures au XX^{ème} siècle. Seules les sources récentes, et qui ont bénéficié d'un enregistrement instrumental, sont bien groupées. Cinq sources sismiques potentiellement tsunamigènes, en particulier pour le Maroc, ont été recensées dans cette zone.²¹ Deux événements retiennent particulièrement notre attention pour le Maroc. Celui du 1^{er} novembre 1755 pour son ampleur exceptionnelle et celui du 28 février 1969 pour son âge récent. Bien que présentant des impacts très différents (très réduits pour 1969), ce sont les deux événements les mieux renseignés par les archives et les mieux décrits dans la littérature. Les conséquences de celui de 1755 ont fait l'objet d'une réévaluation à partir des sources historiques primaires, et ce en particulier pour la ville d'El Jadida (Maroc).

Une réanalyse de l'événement du 1^{er} novembre 1755 pour le Maroc

Le 1^{er} novembre 1755, Lisbonne est ravagée par un séisme prenant naissance dans le Golfe de Cadix. Ce tremblement de terre provoque une série d'incendies au sein de la ville et sera ressenti sur toute la péninsule ibérique, le nord du Maroc et Madère.²² Il génère un tsunami de très grande ampleur observé sur le pourtour du Golfe de Cadix et qui provoque des dégâts considérables dans un grand nombre de villes marocaines, entre Tanger et Agadir. Le train d'onde a parcouru tout le bassin atlantique avec des témoignages sur les côtes des Antilles situées à plus d'un millier de kilomètres de la source.²³

Un travail de compilation et d'analyse des recueils historiques sur les effets de ce tsunami a déjà été réalisé par un certain nombre de chercheurs.²⁴ Mais il persiste encore de nombreuses incertitudes. Celles-ci concernent

21. Rachid Omira, Maria Ana Baptista, Luis Matias, Jorge Miguel Miranda, Cristina Catita, Fernando Carrilho and El Arbi Toto, "Design of a Sea-level Tsunami Detection Network for the Gulf of Cadiz," *Natural Hazard and Earth System Sciences* 9 (2009): 1327-38.

22. Maria Ana Baptista, Salomé Heitor, Jorge Miguel Miranda, Pedro Miranda and Luiz Mendes-Victor, "The 1755 Lisbon earthquake: evaluation of the tsunami parameters," *Journal of Geodynamics* 25 (1998): 143-57; Maria Ana Baptista., Jorge Miguel Miranda, Francesco Chiericci and Nevio Zitellini, "New study of the 1755 earthquake source based on multi-channel seismic survey data and tsunami modelling," *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3 (2003): 333-40.

23. Jean Roger, Sebastien Allgeyer, Hélène Hébert, Maria Ana Baptista, Anne Loevenbruck and François Schindelé, "The 1755 Lisbon Tsunami in Guadeloupe Archipelago: Source Sensitivity and Investigation of Resonance Effects," *The Open Oceanography Journal* 4 (2010): 58-70.

24. Fatima Kaabouben et al., "On the Moroccan tsunami catalogue," Maria Ana Baptista and Jorge Miguel Miranda, "Revision of the Portuguese catalog of tsunamis," *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (2009): 25-42; Paul-Louis Blanc, "Earthquakes and tsunami in November 1755 in Morocco: a different reading of contemporaneous documentary sources," *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (2009): 725-38.

notamment la source exacte du séisme et les hauteurs de *run-up* sur les côtes. Il est donc important de comparer et de confronter les différentes sources dont on dispose et d'améliorer ainsi la connaissance de cet événement de référence pour les travaux qui vont suivre. En effet, les modèles de simulation numérique de tsunami s'accompagnent d'un besoin accru de données historiques réelles et fiables afin de contrôler et valider les simulations proposées. Nous proposons ci-dessous une ré-analyse des principales sources documentaires, initiales existantes sur cet événement, en les replaçant en particulier dans leurs contextes historiques et culturels.

Le séisme et le tsunami du 1^{er} novembre 1755 ont fait l'objet de nombreux écrits et commentaires à l'époque et jusqu'au XX^{ème} siècle. La destruction de Lisbonne a fortement marqué les contemporains, le développement des gazettes en ce milieu du XVIII^{ème} siècle assurant une diffusion de l'information à l'échelle européenne jamais atteinte auparavant pour une catastrophe naturelle. Dans cette perspective, Blanc (2009)²⁵ a proposé 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 1^{er} novembre 1755 et un séisme rifain des 18-19 (selon les documents européens) ou 17-18 novembre (selon les documents marocains) de la même année, et d'autre part la surestimation des effets du tsunami sur les côtes marocaines. La confusion entre les deux séismes a décrédibilisé les témoignages ou interprétations modérées sur l'inondation. Elle a favorisé une interprétation "maximaliste" des données disponibles, surestimation transmise ensuite au cours des siècles dans la littérature savante faute d'un retour critique aux sources initiales. Effectivement, une des sources primaires disponibles relatant le séisme du 1^{er} novembre 1755 évoque sur la ville de Mazagan (El Jadida), trois vagues successives de plus de 24 m (Figure 1). Il s'agit de la lettre de Monsieur Soyris²⁶ écrite à Marrakech le 5 novembre 1755 (soit 4 jours après le séisme et 7 jours après son arrivée dans la ville). Il y rapporte, après d'autres informations précises conformes aux autres témoignages (comme l'heure -9h39- et la durée - 8 minutes - de la secousse), une donnée de hauteur d'eau de 75 pieds (soit 24,36 m). Mais contrairement

25. Ibid.

26. "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 à Mazagan avait été dans la nécessité d'abandonner la Ville (...)": Soyris (1755), *Extrait d'une lettre de Maroc en date du 5 novembre 1755: de Soyris à Guys*, Archives Nationales de France, Marine B7/403.

Blanc, "Earthquakes and tsunami."

à ce témoignage, l'analyse critique de Blanc²⁷ l'amène à considérer que l'amplitude du tsunami du 1^{er} novembre 1755 au Maroc ne doit pas avoir dépassé celle atteinte à Cadix, soit 2,50 m au-dessus de la marée astronomique.

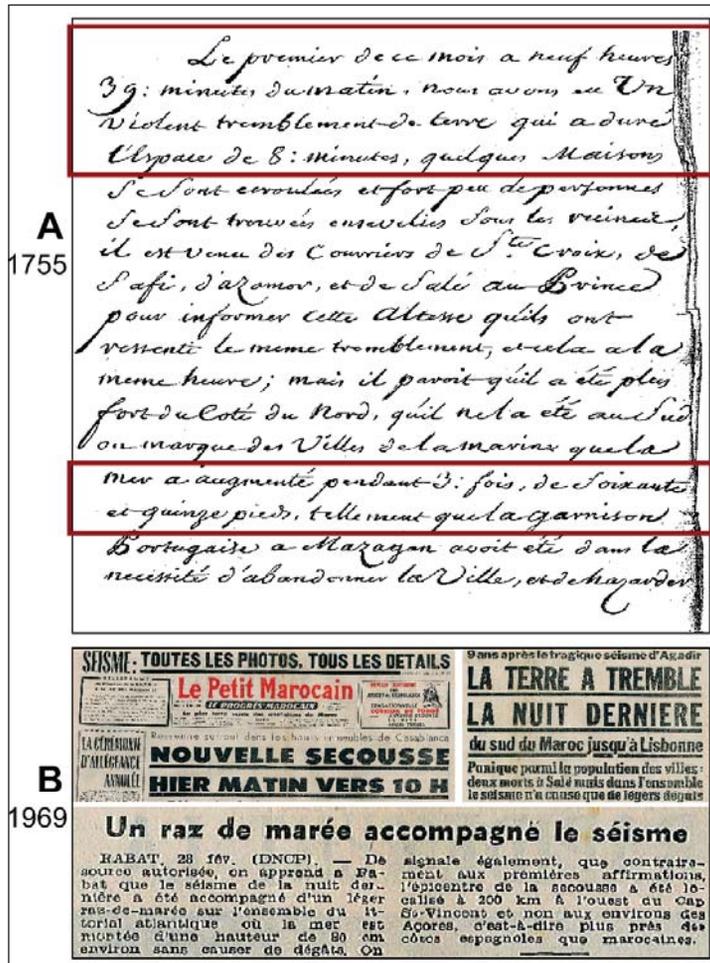


Figure 1: Extraits de sources documentaires historiques faisant état de tsunamis au Maroc.

A: pour 1755 (source Soyris 1755), B: pour 1969.

(source: quotidiens marocains de l'époque).

Afin de préciser et compléter ces analyses antérieures, nous avons procédé à un réexamen des sources historiques disponibles, soit 24 documents

27. Frédéric Leone (dir.), Maria Ana Baptista, Bendahhou Zourarah, Khaled Mehdi, François Lavigne, Nancy Meschinot de Richemond, Rachid Omira, Samira Mellas, Mathieu Péroche, Émilie Lagahé, Anthony Heymann, Monique Gherardi, Delphine Grancher, Jean-Philippe Cherel, Alexandre Sahal, Jean-Charles Denain, Nicolas Meunier et Driss Inani, *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. ANR-08-RISKAT-05 MAREMOTI, 2012. <http://www.gred.ird.fr/programmes-de-recherche/programmes-acheves/maremoti>.

en français, anglais, espagnol et portugais,²⁸ et ce pour le site de Mazagan-El Jadida. Ce corpus comporte notamment une référence²⁹ non examinée par Blanc (2009).³⁰ Il nous a en effet semblé important de compléter les travaux antérieurs en s'intéressant notamment au contexte culturel et historique au sein duquel les témoignages de l'époque doivent être compris: le risque d'anachronisme dans l'interprétation de textes anciens peut conduire au contresens ou à une mauvaise évaluation de la valeur et fiabilité de certaines données chiffrées. La place des informations présentées dans une lettre dépend aussi du système de valeurs partagé par l'auteur et le destinataire: ces informations ne doivent donc pas être extraites sans précautions de leur contexte, ni interprétées telles quelles à travers notre système de valeur et nos schémas d'analyse contemporains.³¹ En particulier, il faut souligner que nous ne sommes pas au XVIII^{ème} siècle au Portugal (comme en Espagne ou en France) dans une société laïque, dans laquelle "l'objectivité" de la "science" signifie implicitement une coupure radicale entre l'objet étudié et l'observateur, et l'absence de toute action ou dessein divin.³² Si les valeurs chiffrées que Blanc (2009)³³ propose pour corriger la surestimation historique de l'amplitude du tsunami sur les côtes marocaines (1,90 à 2,30 m à El Jadida) nous paraît beaucoup plus proche de la réalité que la valeur extrême issue de la lettre de M. Soyris, certains aspects du raisonnement nous semblent incomplets ou discutables, de nature à minimiser peut-être un peu trop les valeurs à intégrer dans un scénario de risque tsunami. Aussi, et à l'issue de cette réanalyse des sources primaires, une hypothèse de l'ordre de 5 m de hauteur nous paraît plus crédible pour quantifier les hauteurs d'eau atteintes au niveau de la cité portugaise de Mazagan-El Jadida.³⁴ Nous allons voir que ces hauteurs peuvent être confirmées localement, du moins dans leur ordre de grandeur, au moyen d'une modélisation numérique fine de la submersion marine associée à ce tsunami majeur, en reconstituant en particulier les conditions bathymétriques

28. Anonyme (1755), "*Relaçõ do grande terremoto, que houve na praça de Mazagam en o primeiro de Novembro de 1755, Referem se os seoseffeitos, e ruinas que causou, e brevemente se mostra de que procedem os tremores de terra. Lisboa, Com as licenças necessarias.*" dit "Rapport sur Mazagan," Bibliothèque nationale de Lisbonne, 8 p.

29. Ibid.

30. Gérard Chouquer, *Traité d'archéogéographie, la crise des récits géohistoriques* (Paris: Éditions Errance, 2008), 200 p.

31. Nancy Meschinet de Richemond et Magali Reghezza, "La gestion du risque en France: contre ou avec le territoire?," *Annales de Géographie* 673 (2010): 248-67.

32. Ibid.

33. Nancy Meschinet de Richemond, "Le risque de tsunami à Mazagan-El Jadida (Maroc): réévaluation des sources documentaires historiques évoquant le séisme et le tsunami de 1755," in *Gérer les risques naturels. Pratiques et outils*, Frédéric Leone et Freddy Vinet (éd.), *Géorisques* 8 (Montpellier: Presses Universitaires de la Méditerranée), sous presse.

34. Source gallica.bnf.fr.

et topographiques de la ville de Mazagan aux alentours de 1775, grâce à une carte de 1752 et un plan de 1753.³⁵

Modéliser un tsunami de référence de type 1775

Les connaissances sur les tsunamis historiques ayant affecté le Maroc sont insuffisantes pour estimer l'aléa. Par conséquent, la modélisation numérique est le seul moyen de déterminer, au moins approximativement, les zones qui seront inondées, les hauteurs d'eau et les temps d'arrivée d'un tsunami d'origine sismique. Afin de sensibiliser les décideurs sur la réalité de ce risque, l'événement de référence retenu pour ce modèle est le tsunami du 1^{er} novembre 1755. Mais la localisation de sa source sismique demeure encore à ce jour incertaine.³⁶ Quatre zones sources impliquant cinq failles potentiellement tsunamigènes sont généralement évoquées dans la littérature pour cet événement majeur. Omira et al.,³⁷ ont modélisé les tsunamis générés par chacune de ces sources. Il apparaît que c'est la faille HSF (*Horseshoes Fault*) qui génère le tsunami le plus énergétique pour la façade atlantique marocaine et El Jadida. C'est cette dernière qui a été retenue pour la suite du travail.

La simulation numérique de la propagation et de l'inondation du tsunami est fondée sur le code COMCOT (*Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model*)³⁸ modifié par l'équipe de l'université de Lisbonne dans le cadre des projets européens TRANSFER et NEAREST. Ce code résout les approximations linéaires et non-linéaires des équations "*Shallow water*" en utilisant un schéma numérique aux différences-finies dans un système de grilles imbriquées. La perturbation initiale de la surface de la mer est générée pour le scénario sismique considéré. La rupture sismique est censée être instantanée et le déplacement du fond marin est calculé en utilisant la théorie du demi-espace élastique mise en œuvre dans le code Mirone. Le

35. Marc-André Gutscher, Maria-Ana Baptista and Jorge Miguel Miranda, "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* (2006). doi:10.1016/j.tecto.2006.02.025.

36. Rachid Omira, Maria-Ana Baptista, Luis Matias, Jorge Miguel Miranda, Cristina Catita, Fernando Carrilho and El Arbi Toto, "Design of a Sea-level Tsunami Detection Network for the Gulf of Cadiz," *Natural Hazard and Earth System Sciences* 9 (2009): 1327-38; Rachid Omira, Maria-Ana Baptista, Jorge Miguel Miranda, El Arbi Toto, Cristina Catita and Joao Catalao, "Tsunami vulnerability assessment of Casablanca-Morocco using numerical modelling and GIS tools," *Natural Hazards* 54 (2010): 75-95. doi:10.1007/s11069-009-9454-4.

37. Philip L.-F Liu, Seung-Buhrn Woo and Yong-Sik Cho, *Computer programs for tsunami propagation and inundation*, Technical Report, Cornell University, 1994.

38. Camille Renou, Olivia Lesne, Antoine Mangin, Frédéric Rouffi, Abderrahman Attilah, Driss El Hadani and Hicham Moudni, "Tsunami hazard assessment in the coastal area of Rabat and Salé, Morocco," *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11 (2011): 2181-91. doi:10.5194/nhess-11-2181-2011.

déplacement vertical du fond de la mer est ensuite transféré à la surface libre de l’océan selon l’hypothèse que les deux déformations, de fond de la mer et de la surface de l’océan, seraient égales.

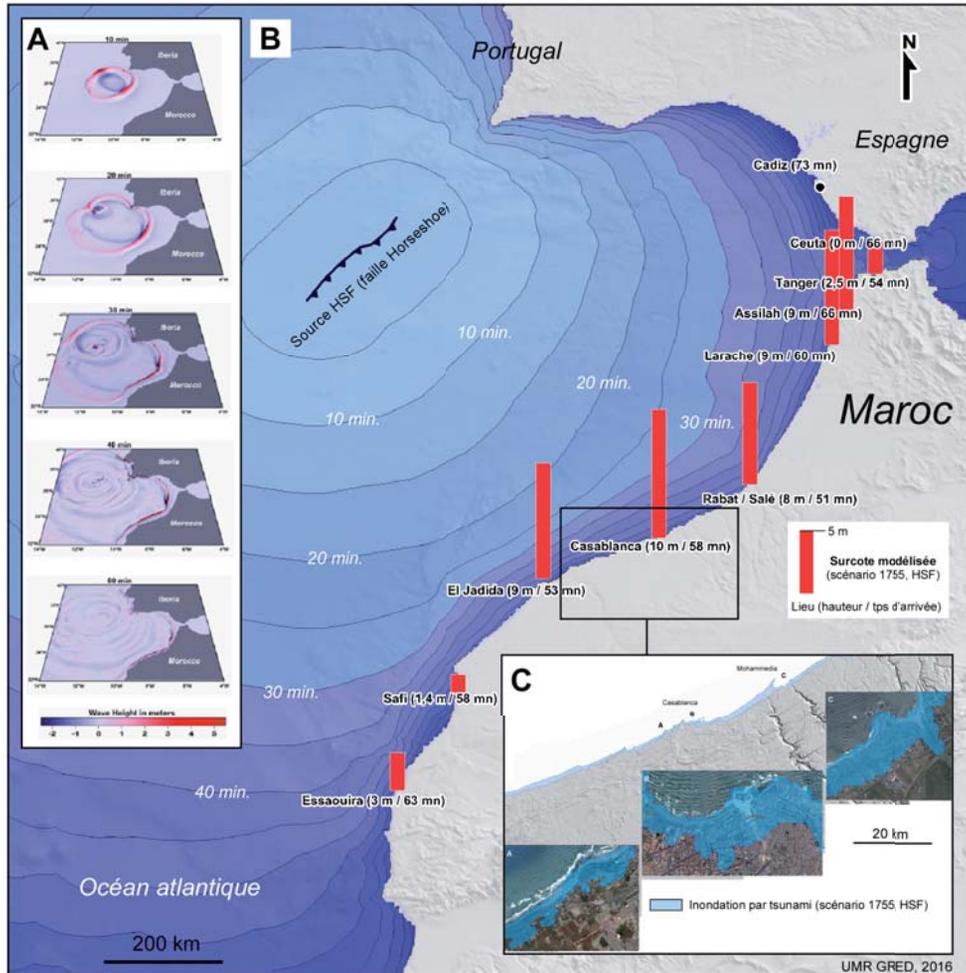


Figure 2: Modélisation numérique d’un tsunami proche de celui du 1^{er} novembre 1755 (source HSF). A: propagation en haute mer, B: temps de trajets en minutes et hauteurs d’eau maximales à la côte, C: inondations associées sur quelques lieux.

La simulation numérique d’un tsunami depuis cette source donne des temps d’arrivée compris entre 51 mn (Rabat) et 66 mn (Ceuta) sur le littoral marocain étudié (Figure 2). D’après cette simulation le port de Casablanca serait touché 58 mn 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 et 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 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, Assilah et Rabat-Salé. Globalement cette exposition est plus forte entre Assilah et El Jadida.

Ces simulations reproduisent localement deux paramètres déterminants pour comprendre les processus d'endommagement sur les personnes et les infrastructures: la vitesse et la hauteur de l'inondation. Les résultats de notre modélisation sur Rabat-Salé (H max. 8 m) sont par ailleurs comparables à ceux obtenus par Renou et al.³⁹ sur cette même zone (H max. 8-9 m). Sur El Jadida, en configuration actuelle de la ville, les vitesses maximales produites sont de 14 m/s, les hauteurs d'eau sont comprises entre 3 et 9 m, et la distance maximale de pénétration dans les terres est de 850 m.⁴⁰ En configuration proche de celle de 1755, reconstituée par un modèle numérique d'élévation de 1 m de résolution à partir de plans anciens de la ville, le modèle sort au niveau de la cité portugaise des hauteurs d'eau maximales proches de 6 m⁴¹ (Figure 3). Ces résultats numériques permettent d'écarter définitivement une hauteur de vagues de 75 pieds (soit 24,36 m) rapportées par Soyris dans sa lettre datée du 5 novembre 1755. Ils offrent également un tout premier référentiel spatial d'aléa tsunami pour le littoral atlantique du Maroc, support d'analyse des enjeux et des vulnérabilités spécifiques face à cette menace, et base de discussion pour promouvoir et dimensionner des outils de prévention adaptés tels que les plans d'évacuation.

39. Rachid Omira Maria Ana Baptista, Frédéric Leone, Luis Matias, Samira Mellas, Bendahhou Zourarah, Jorge Miguel Miranda, Fernando Carrilho and Jean-Philippe Chereh, "Performance of coastal sea-defense infrastructure at El-Jadida (Morocco) against tsunami threat: lessons learned from the Japanese 11 March 2011 tsunami," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13 (2013): 1779-94. doi:10.5194/nhess-13-1779-2013.

40. Rachid Omira, Maria Ana Baptista, Samira Mellas, Frédéric Leone, Nancy Meschinet de Richemond, Bendahhou Zourarah and Jean-Philippe Chereh, "The November, 1st, 1755 Tsunami in Morocco: Can Numerical Modeling Clarify the Uncertainties of Historical Reports?," in *Tsunami-Analysis of a Hazard-From Physical Interpretation to Human Impact*, Gloria I. Lopez (ed.), (Ed. InTech, 2012): 61-76.

41. MATEE (Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement-Département de l'Environnement). "La Cellule du Littoral. Répartition spatiale de l'occupation du sol au long du littoral," *Bulletin des espaces littoraux* 2 (2005): 12 p.

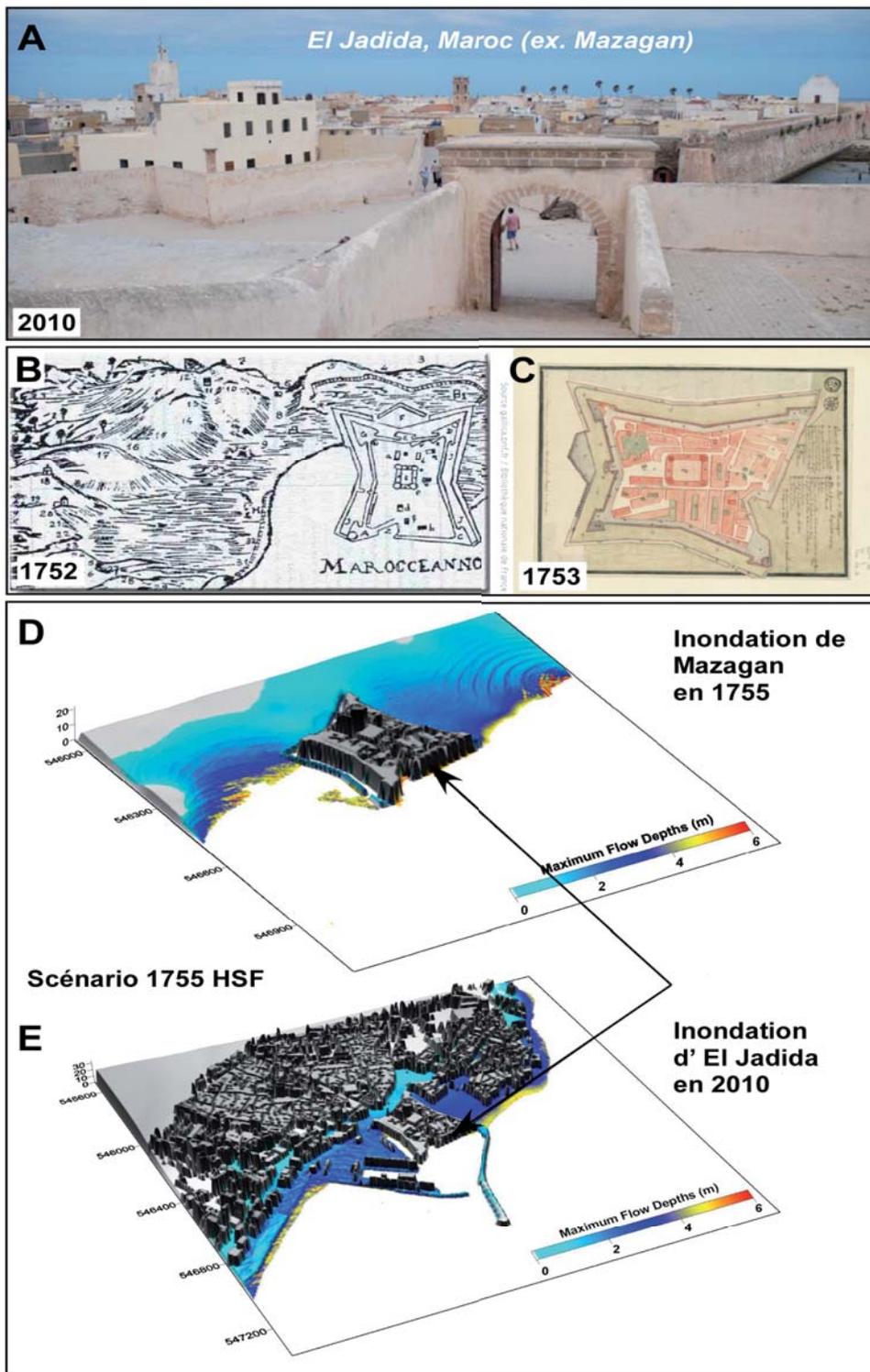


Figure 3: Modélisation numérique du tsunami du 1^{er} novembre 1755 sur la ville d'El Jadida (source HSF). A: vue de la cité portugaise, B: plan de la ville en 1752, C: plan de la cité en 1753, D: inondation modélisée sur la ville en 1755, E: inondation modélisée sur la ville actuelle.

À l'échelle régionale, une exposition centrée sur l'axe urbain médio-atlantique

Le Maroc présente 3600 kilomètres de côtes, réparties sur deux façades littorales ouvertes sur la Méditerranée et l'Atlantique. Ce littoral constitue un pôle d'attraction et de développement important pour le pays.⁴² Le littoral rassemblait en 2010 plus de 54,7 % de la population totale du Maroc, contre 49 % en 1971. Durant ces trois décennies cette population a été multipliée par un facteur 2,3 contre 2,1 pour l'ensemble du Maroc. À elles seules, les côtes atlantiques concentrent 46,2 % de la population du Maroc sur seulement 14 % du territoire national.⁴³ Ce littoral est le lieu d'implantation de 77% des installations industrielles et de 80% des emplois dans le pays, surtout le long de l'axe Kénitra- El Jadida.⁴⁴ Le littoral atlantique occupe par ailleurs une place centrale dans les activités touristiques. L'élévation du tourisme au rang de secteur économique prioritaire, et les diverses mutations des comportements socio-économiques au cours de ces dernières décennies, se sont traduites par un déferlement de la demande nationale sur le produit balnéaire. Plus de 60 % des séjours touristiques sont attirés par le littoral qui, en 2008, a réalisé 54 % de nuitées touristiques avec une capacité litière de près de 51 %.⁴⁵

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, ici entre deux familles d'enjeux (population et tâche urbaine) et l'enveloppe d'inondation du modèle de tsunami (scénario 1755 HSF). Ce maillage doit présenter le meilleur compromis entre l'information disponible, la précision exigée et les besoins cartographiques pour communiquer et partager les résultats.⁴⁶

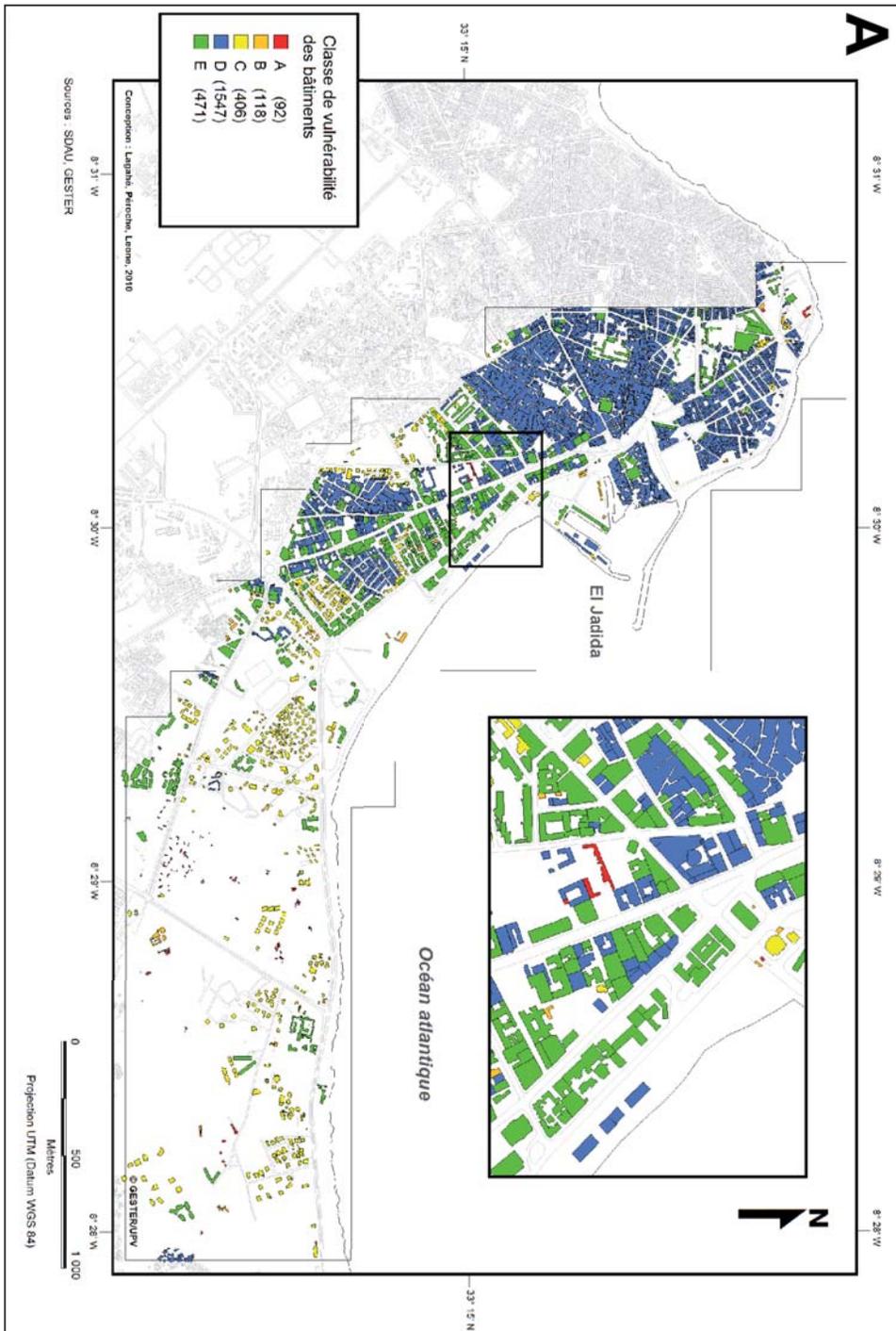
42. HCP. "Littoral marocain: un poids économique et démographique important," in Haut-Commissariat au Plan du Maroc, *présentation* du 23/9/2010 à l'IRES lors de la journée d'étude "Littoral marocain et changement climatique" (2010).

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

44. HCP. "Littoral marocain."

45. Frédéric Leone. "Système d'Information Géographique et indicateurs de risques naturels en Méditerranée: le projet SIG RINAMED," in Monique Fort et Frédéric Ogé (eds.), *Actes du colloque international "Risques Naturels en Méditerranée occidentale"*, Carcassonne, 16-21 novembre 2009, (Paris: UMR Prodig, 2011): 2-19. [En ligne]. https://www.researchgate.net/publication/311518132_Systeme_d'Information_Geographique_et_Indicateurs_de_risques_naturels_en_Mediterranee_le_projet_SIG_RINAMED

46. Omira et al., "Performance of coastal sea-defense."



Classes de vulnérabilité	Individuels			Collectifs	
	A	B	C	D	E
Critères d'identification terrain	Auto-construit en pierre sèche ou matériaux de récupération, Construction légère de plain pied, bâti non rigide ou semi-rigide	Auto-construction, de plain pied ou d'un étage, bâti maçonné (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, plusieurs poteaux $\leq 20 \times 20$ cm, géométrie simple	Structure calculée et renforcée (poteaux > 20 cm), géométrie simple, bâtiments de grande taille, plusieurs-étages
Exemples (adapté de la nomenclature du RGPH, 2004)					
	En périphérie : constructions précaires (bidonville, douar, habitat rural périphérique), En ville : kiosques, ateliers	Maisons marocaines traditionnelles	Villas modernes ou anciennes villas coloniales restaurées, parfois services privés (école privée, banque...)	Maisons marocaines traditionnelles et médina, maisons marocaines modernes, anciens équipements publics, petites et anciennes mosquées	Immeubles, équipements publics, locaux de bureaux, locaux d'hôtellerie ou industriels récents, ancienne grande mosquée et mosquée récente

Figure 4 : La vulnérabilité du bâti face aux tsunamis à El Jadida. A: cartographie par bâtiment, B: classes de vulnérabilité et critères d'identification.

Dans le cas présent, des indicateurs d'exposition ont été 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 redéfini sur la limite littorale par photo-interprétation de 1310 km de côtes à partir d'images satellites de haute résolution fournies par l'application GoogleEarth sur la période 2003-2009. Ce nouveau référentiel littoral concerne 67 communes qui s'étendent de Taghazout au sud à Taghramt au nord.

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. 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. C'est la commune d'Ain Sebaa qui présente le plus fort taux d'exposition urbain en valeur relative (70,7 %). Au total, ce sont près de 21,46 km² de surfaces urbanisées qui sont exposées sur la portion littorale étudiée. Les zones industrielles, très présentes sur le littoral atlantique marocain, ne sont pas épargnées (6,13 km² exposés). Les sites les plus exposés sont également à Casablanca, suivis de ceux de Safi et El Jadida au sud, et de Boukhalef au nord. En lien avec ces sites, toutes les infrastructures portuaires sont menacées malgré les ouvrages de défense côtière présents, la hauteur des digues de protection restant inférieure à celle des vagues modélisées.⁴⁷

En dernière analyse, c'est l'axe urbain médio-atlantique qui présente la plus forte exposition territoriale. 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 de profondeur de pénétration dans les terres. Les communes de Mohammedia et Ain Sebaa sont d'ailleurs les plus citées dans le Top 10 des neuf indicateurs produits dans nos travaux.⁴⁸

47. Samira Mellas, Frédéric Leone, Rachid Omira, Monique Gherardi, Maria Ana Baptista, Bendahhou Zourarah, Mathieu Péroche et Emilie Lagahé, "Le risque tsunamique au Maroc: modélisation et évaluation au moyen d'un premier jeu d'indicateurs d'exposition du littoral atlantique," *Physio-Géo* 6 (2012). doi:10.4000/physio-geo.2589.

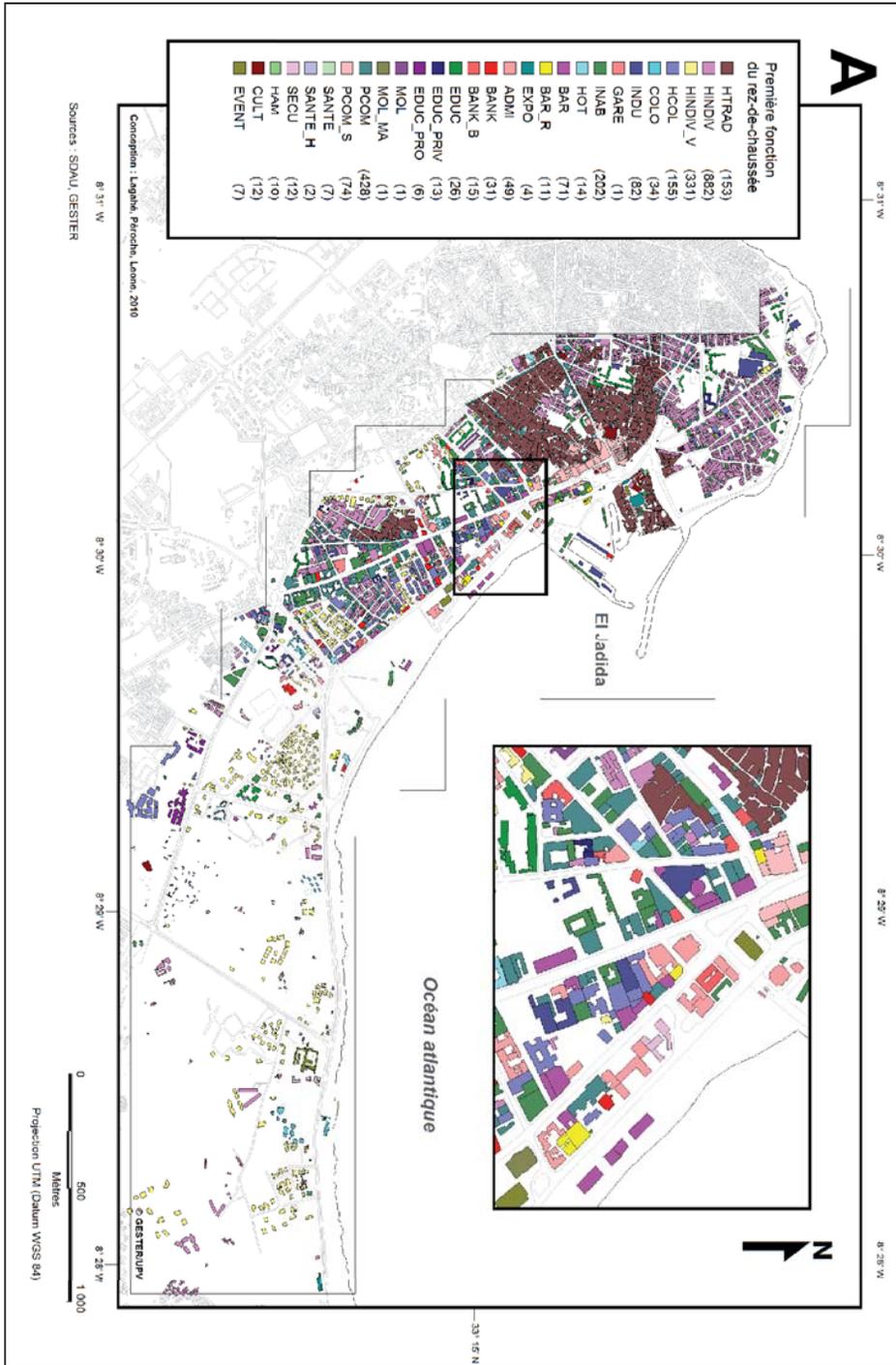
48. Leone (dir.), *Évaluation des vulnérabilités*; Mellas et al., "Le risque tsunamique au Maroc."

À l'échelle locale, cartographier le risque de pertes humaines (El Jadida)

À une échelle plus fine, et à titre expérimental, notre étude s'est focalisée sur la vulnérabilité humaine de la ville d'El Jadida grâce à un partenariat développé avec l'université régionale.⁴⁹ Une première phase a consisté à diagnostiquer sur le terrain et renseigner dans une base SIG plusieurs critères de vulnérabilité du bâti et des personnes situées à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments en cas de tsunami: résistance des bâtiment avec 5 classes de vulnérabilité intégrant plusieurs facteurs de résistance face aux forces hydrauliques (Figure 4), nombre d'étages refuges possibles, présence ou non de grandes ouvertures pouvant faciliter la pénétration de l'eau, densité potentielle d'objets flottants pouvant aggraver les effets d'impact sur les structures et les personnes. Au total ce sont 2634 polygones bâtis et 688 espaces extérieurs (lieux publics, routes) sur une zone d'étude de 6 km² qui ont été renseignés. Ce travail fastidieux de terrain a été cependant facilité par l'emploi d'une image satellite *Quick Bird* datée du 15 juillet 2009 (11h34 locale) et la base de données du SDAU de la province d'El Jadida de 2004.

Dans un deuxième temps, un scénario d'impact humain multi-temporel au pas horaire et pour deux saisons, a été alimenté par une analyse du rythme urbain et des mobilités spatio-temporelles au sein de la ville. En complément des observations et enquêtes visant à reconstituer les déplacements de personnes, nous avons alimenté la base SIG par les fonctions principales et secondaires de chaque lieu et en particulier des rez-de-chaussée des bâtiments (Figure 5). La typologie des fonctions compte 49 classes (28 pour les lieux bâtis et 21 pour les espaces extérieurs). Ensuite, chaque fonction a été assortie d'une courbe de fréquentation humaine entre 0 et 23h, pour deux saisons (haute et basse saisons touristiques), puis ces courbes ont été extrapolées à l'ensemble des objets identifiés.

49. Frédéric Leone, Franck Lavigne, Raphael Paris, Jean-Charles Denain, and Freddy Vinet, "A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability," *Applied Geography* (2010). doi:10.1016/j.apgeog.2010.07.009.



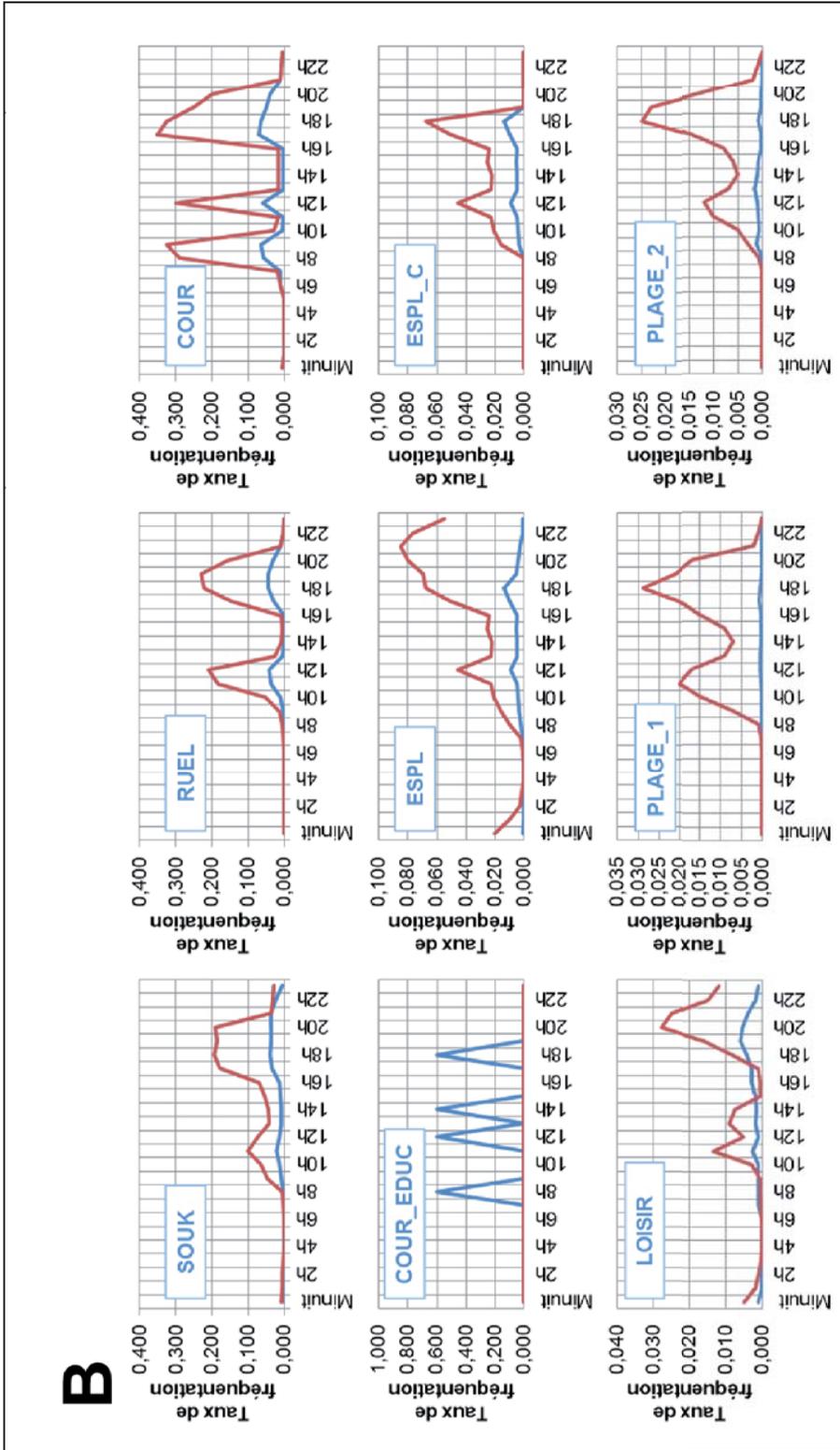


Figure 5: Caractérisation de la fréquentation humaine de la ville d'El Jadida. A: typologie des fonctions des lieux (ici du bâti en RdC), B: exemples de courbes de fréquentation horaire de quelques lieux tels que des ruelles, des cours, des plages, des parcs, des esplanades et des marchés (en bleu: basse saison, en rouge: haute saison touristique).

Les taux de fréquentation horaire (TF) 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. Ces données ont également permis d'estimer la capacité d'accueil maximale crédible (CAMC) de chaque lieu. Le produit CAMC*TF a débouché sur une cartographie dynamique des densités humaines au pas horaire, permettant d'extraire pour chaque lieu le nombre de personnes exposées à un éventuel tsunami (Figure 6). L'objectif était de moduler la variabilité spatiale et temporelle de la composante "enjeux" de l'équation du risque⁵⁰ à des échelles très fines, et en suivant une approche qui n'avait jamais été développée pour des scénarios catastrophes, ni au Maroc, ni ailleurs. Les résultats cartographiques ont pris la forme d'indicateurs de risque humain combinant les facteurs de vulnérabilité identifiés, les volumes de personnes exposées et les paramètres physiques de la submersion que sont la vitesse et la hauteur d'eau.

Une troisième phase de l'analyse répondait aux objectifs fixés: évaluer et spatialiser le risque de pertes humaines au moyen d'un indice de risque issu du produit entre des probabilités de décès (Pd) et les densités humaines (Dh). Les probabilités de décès ont été produites par des matrices de vulnérabilité adaptées à chaque environnement des personnes exposées (figure 7). Elles intègrent les facteurs de vulnérabilité définis au cours du diagnostic et des seuils de probabilités basés sur différentes courbes empiriques: courbes d'endommagement du bâti en fonction des hauteurs d'eau et des vitesses du courant,⁵¹ capacités de déplacement des personnes en fonction de la vitesse du courant,⁵² flottaison des véhicules en fonction de la hauteur d'eau.⁵³

50. Leone et al., "A spatial analysis"; Anne-Lise Gauraz, Nathalia Valencia, Mathilde Koscielny, Richard Guillaude, Annalisa Gardi, Frédéric Leone and Salaun Tugdual, "Tsunami damages assessment: vulnerability functions on buildings based on field and earth observation survey," *Geophysical Research Abstracts* 11 (2009), EGU2009-5785, EGU General Assembly; Shunichi Koshimura, Takayukie Oie, Hideaki Yanagisawa and Fumihiko Imamura, "Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia," *Coastal Engineering Journal* (51) (3) (2009): 243-73; Nathalia Valencia, Annalisa Gardi, Anne-Lise Gauraz, Frédéric Leone and Richard Guillaude, "New tsunami damage functions developed in the framework of SCHEMA project: application to European-Mediterranean coasts," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11 (2011): 2835-46. doi:10.5194/nhess-11-2835-2011.

51. Jean-Daniel Baladès, *Plans de prévention des risques naturels (PPR). Les risques d'inondation: le ruissellement péri-urbain. Note complémentaire* (Paris: Direction de la Prévention des pollutions et des risques, Sous-direction de la Prévention des risques majeurs, 2014) 64 p.

52. Tomohiro Yasuda T. and Tetsuya Hiraishi, "Experimental Study of Tsunami Inundation in Coastal Urban," in *Proceedings of the Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference* (Toulon, France, May 2004), 740-46.

53. Leone (dir.), *Evaluation des vulnérabilités*.

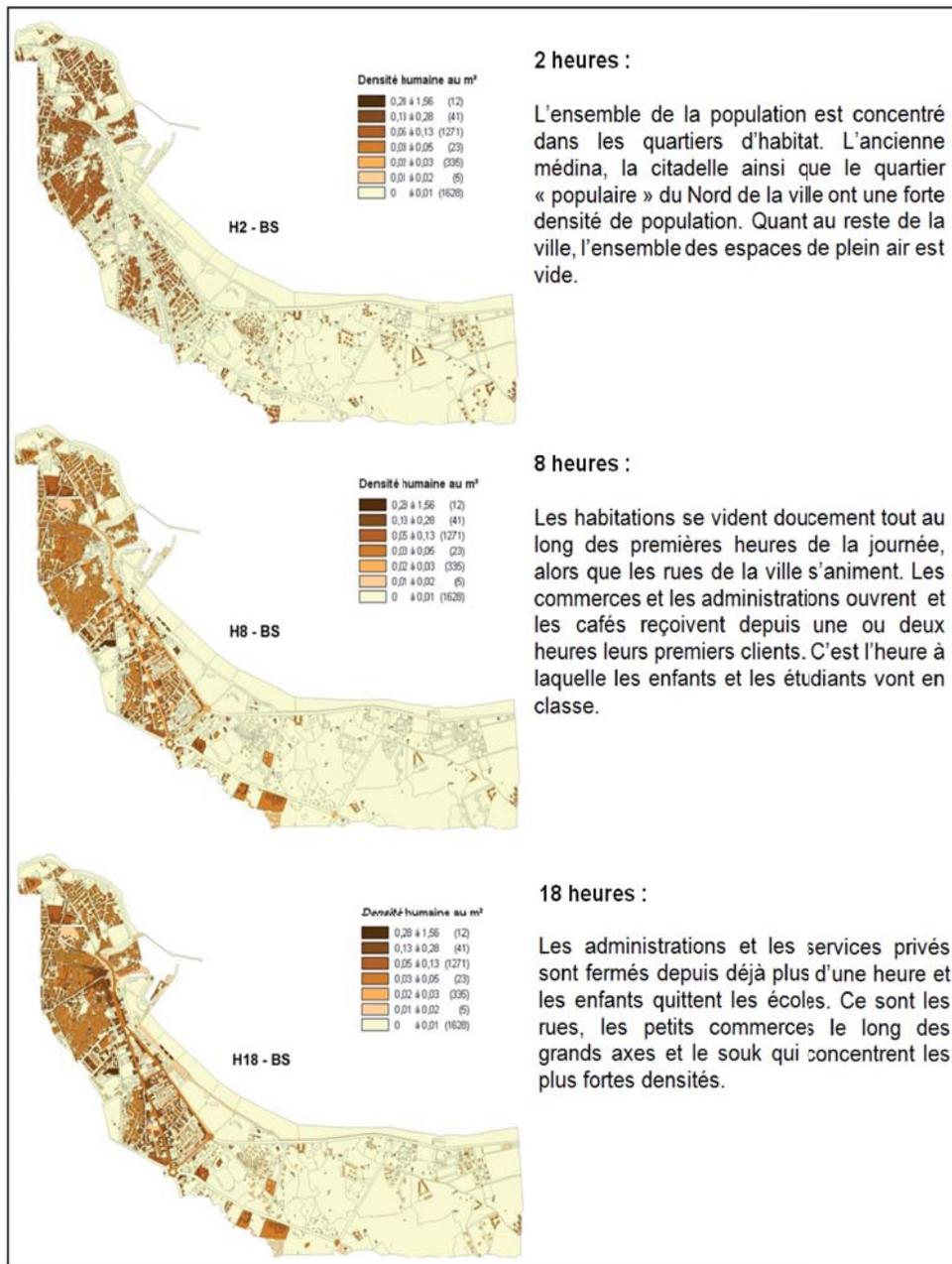


Figure 6: Modélisation spatio-temporelle de la fréquentation de la ville (densité de population) à trois moments de la journée (basse saison touristique).

Les résultats cartographiques permettent de visualiser le niveau de risque pour les personnes et sa variabilité spatiale et temporelle. On obtient ainsi une cartographie dynamique du risque et une estimation du nombre de personnes à forte probabilité de décès en fonction du moment de la journée. Le pire scénario d'impact se situe vers 18h, en haute saison touristique, avec près

de 55.000 personnes directement exposées, dont 27.000 avec une probabilité de décès maximale.⁵⁴ Ces cartes et bilans présentent pour la première fois sur une ville marocaine ce que peut être le coût humain d'un tsunami, notamment en l'absence d'information préventive et de plans d'évacuation. Ils permettent de rendre un peu plus tangible un état par définition virtuel et d'en faciliter l'appropriation et la sensibilisation par les populations et les autorités locales. C'est un support essentiel de réflexion et de concertation pour assoir une stratégie de prévention, et notamment de planification des évacuations, au moyen d'une méthodologie innovante dont les villes d'El Jadida et de Tanger sont les premières bénéficiaires au Maroc dans le cadre du programme de recherche européen ASTARTE.

Modéliser l'accessibilité de zones refuges et planifier les évacuations (El Jadida et Tanger)

Le modèle de vulnérabilité humaine développé sur El Jadida peut guider certains choix de prévention: quantifier le nombre de personnes à évacuer suivant le moment de la journée ou de l'année, identifier les foyers de victimes potentielles et cibler l'information préventive, adapter les normes de construction, et surtout aménager l'espace afin de faciliter, voire planifier une évacuation préventive en cas d'alerte tsunami. Ce dernier point a fait l'objet d'une autre phase de recherche portant sur l'évaluation de l'accessibilité pedestre de zones refuges. Ces zones, principalement topographiques, ont été préalablement sélectionnées sur le terrain et hiérarchisées en fonction de leur altitude hors zone submersible, de leur disponibilité, de leur sécurité et de leur accessibilité. Il s'agit essentiellement de parcs, de terrains vagues et des remparts de la citadelle portugaise.

54. Mathieu Péroche, Frédéric Leone and Rafaëlle Gutton, "An accessibility graph-based model to optimize tsunami evacuation sites and routes in Martinique, France," *Advances in Geosciences* 38 (2014): 1-8. DOI:10.5194/adgeo-38-1-2014.

L'accessibilité piétonne de ces lieux refuges depuis les zones de danger a été ensuite modélisée au moyen d'algorithmes de recherche des chemins les plus rapides exploitant un graphe valué des rues préalablement construit sous SIG. Cette approche sur graphe a depuis été formalisée sur d'autres terrains d'étude, en particulier aux Antilles,⁵⁵ en France métropolitaine⁵⁶ et en Indonésie.⁵⁷ Elle permet de simuler des temps d'évacuation théoriques, de définir des capacités de remplissage de zones refuges, de délimiter des secteurs à évacuer et d'optimiser des itinéraires à baliser en priorité sur le terrain. Elle est en cours d'application sur Tanger et Syracuse dans le cadre du programme européen ASTARTE.

Plusieurs scénarios d'accessibilité ont été testés sur El Jadida, en faisant varier le nombre de zones refuges, les vitesses d'évacuation pédestres, le moment de la journée (jour/nuit), la saison (hiver/été), et donc le volume de population à évacuer. La très grande majorité des espaces bénéficie d'un réseau suffisamment dense et de qualité pour évacuer la zone littorale d'El Jadida (moins de 10 m d'altitude) en 10-15 min en moyenne et 30-35 min au maximum. Cette accessibilité se dégrade lors des scénarios de nuit ou lors des fortes fréquentations humaines (heures pleines en haute saison).

Bien qu'en théorie suffisants, ces temps de mise en sécurité demeurent néanmoins très limités dans la pratique pour abriter la totalité de la population avant l'arrivée des premières vagues d'un tsunami de type 1755. En effet, à ces temps d'accès vers les zones refuges (35 minutes max.) doivent être ajoutés les délais de transmission de l'alerte montante et descendante (15 minutes?) et de réaction des populations (15 minutes?), ce qui aboutit à un temps minimum crédible d'évacuation de 65 minutes à El Jadida. Ce temps est à mettre en parallèle avec le temps modélisé d'arrivée d'un tsunami de type 1755 qui est de 53 minutes pour El Jadida, ce qui donne un déficit minimum de 12 minutes pour mettre toute la population littorale en sécurité avant l'arrivée du tsunami (Figure 8).

55. Alexandre Sahal, Frédéric Leone and Mathieu Péroche, "Complementary methods to plan pedestrian evacuation of the French Riviera's beaches in case of tsunami threat: graph-and multi-agent-based modeling," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13 (2013): 1735-43. doi:10.5194/nhess-13-1735-2013.

56. Henky Mayaguezz, Christine Plumejeaud-Perreau, Frédéric Pouget et Frédéric Leone, "Diagnostic de l'évolution spatio-temporelle de l'exposition humaine et des capacités d'évacuation face au tsunami à Padang (Indonésie)," *Revue Internationale de Géomatique* (26) (3) (2016): 273-306.

57. Sabah Bencheckroun, Rachid Omira, Maria Ana Baptista, Azelarab El Mouraouah, Aomar Iben Brahim and Al Arbi Toto, "Tsunami impact and vulnerability in the harbour area of Tangier, Morocco," *Geomatics, Natural Hazards and Risk* (6) (8) (2015): 718-40.

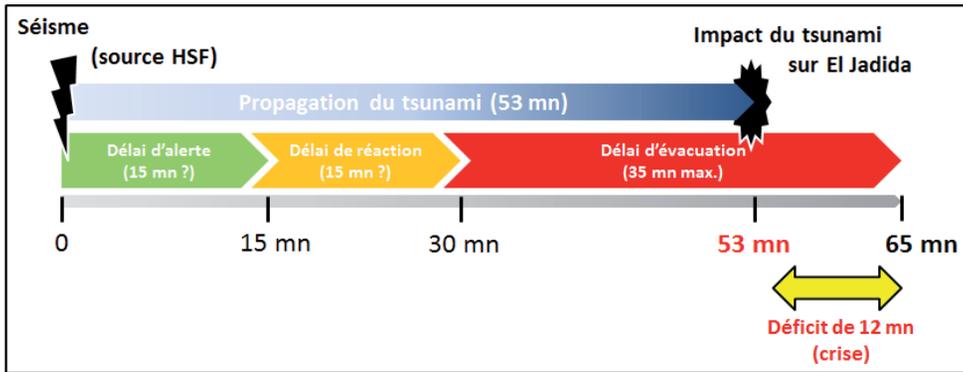


Figure 8: Temps d'arrivée d'un tsunami vs temps d'évacuation à El Jadida.

Ce déficit pourrait être comblé par une planification locale de l'évacuation indissociable d'une sensibilisation des populations à l'auto-alerte. C'est pour répondre à cet objectif, dernière étape d'un système d'alerte régional en cas de tsunami, que nous avons proposé aux autorités locales de Tanger et d'El Jadida des plans d'évacuation présentant une charte graphique normalisée, affichant des sites refuges de qualité et des itinéraires d'évacuation optimisés, susceptibles d'être balisés sur le terrain et adaptés à des exercices d'évacuation (Figure 9).



Figure 9: Extrait du plan d'évacuation en cas de tsunami de la ville de Tanger. (projet ASTARTE).

Sur Tanger, ce plan d'évacuation est conçu pour échapper à un tsunami de type 1755 provoquant une inondation d'une dizaine de mètres maximum, telle que modélisée par Benchekroun et al.⁵⁸ dans une récente étude complémentaire de nos précédents modèles, et mobilisant une autre source sismique (*Cadiz WedgeFault, CWF*).

Conclusion

La géographie des risques peut se concevoir comme une science de la vulnérabilité des territoires et des hommes qui intègre et spatialise les multiples composantes du risque selon un triptyque analytique aléas-enjeux-vulnérabilités auquel viennent s'opposer des capacités de résilience. La mise en œuvre de cette approche a montré ses atouts, en lien avec les géosciences, dans le cadre des travaux menés récemment au Maroc vis-à-vis du risque tsunami: amélioration des connaissances sur les phénomènes historiques, modélisation numérique d'un aléa de référence, caractérisation, quantification et cartographie multi-échelle des enjeux et des risques associés, optimisation et planification des évacuations, préparation et sensibilisation des populations et des autorités sur la base de scénarios de gestion de crise déterministes, c'est-à-dire rejouant un événement déjà produit. Les principaux résultats présentés dans cet article alimentent un corpus plus vaste dont l'ambition est de rendre ce risque un peu plus tangible au Maroc, et d'apporter quelques solutions pragmatiques pour y faire face, en réponse locale au système régional d'alerte Tsunami (NEAMTWS).⁵⁹ Si cette alerte arrive, avec ou sans tsunami, les autorités marocaines et les populations doivent savoir comment réagir, donc se préparer dès maintenant...

Bibliographie

- Baladès, Jean-Daniel. *Plans de prévention des risques naturels (PPR). Les risques d'inondation: le ruissellement péri-urbain. Note complémentaire*. Paris: Direction de la Prévention des pollutions et des risques, Sous-direction de la Prévention des risques majeurs, 2014.
- Baptista, Maria Ana, Salomé Heitor, Jorge Miguel Miranda, Pedro Miranda, and Luiz Mendes-Victor. "The 1755 Lisbon earthquake: evaluation of the tsunami parameters." *Journal of Geodynamics* 25 (1998): 143-57.

58. *Early Warning and Mitigation System in the North Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas*.

59. Bernal, A.M. et al., *Tourisme et développement régional en Andalousie*, Madrid, Publication de la Casa Velazquez, série "Recherches en Sciences Sociales," fasc.V (1971), 325 p; M. Boyer, *Histoire générale du tourisme du XVI^e au XXI^e siècle* (Paris: L'Harmattan, 2005).

- Baptista, Maria Ana, Jorge Miguel Miranda, Francesco Chiericci, and Nevio Zitellini. "New study of the 1755 earthquake source based on multi-channel seismic survey data and tsunami modelling." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3 (2003): 333-40.
- Baptista, Maria Ana and Jorge Miguel Miranda. "Revision of the Portuguese catalog of tsunamis." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (2009): 25-42.
- Benchekroun, Sabah, Rachid Omira, Maria Ana Baptista, Azelarab El Mouraouah, Aomar Iben Brahim, and Al Arbi Toto. "Tsunami impact and vulnerability in the harbour area of Tangier, Morocco." *Geomatics, Natural Hazards and Risk* (6) (8) (2015): 718-40.
- Blanc, Paul-Louis. "Earthquakes and tsunami in November 1755 in Morocco: a different reading of contemporaneous documentary sources." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (2009): 725-38.
- Chouquer, Gérard. *Traité d'archéogéographie, la crise des récits géohistoriques*. Paris: Éditions Errance, 2008, 200 p.
- DAT (Direction de l'Aménagement du Territoire du Maroc). *Etude sur la faisabilité de mise en place de plates-formes logistiques multimodales de fret au Maroc. Rapport: diagnostic du fonctionnement des réseaux de transport et développement économique des espaces de croissance*, 2007, 262 p.
- Gauraz, Anne-Lise, Nathalia Valencia, Mathilde Koscielny, Richard Guillande, Annalisa Gardi, Frédéric Leone, and Salaun Tugdual. "Tsunami damages assessment: vulnerability functions on buildings based on field and earth observation survey." *Geophysical Research Abstracts* 11 (2009), EGU2009-5785, EGU General Assembly.
- Gutscher, Marc-André, Maria Ana Baptista, and Jorge Miguel Miranda. "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* (2006). doi:10.1016/j.tecto.2006.02.025.
- HCP. *Littoral marocain: un poids économique et démographique important*. In Haut-Commissariat au Plan du Maroc, présentation du 23/9/2010 à l'IRES lors de la journée d'étude "Littoral marocain et changement climatique."

- Kaabouben, Fatima, Maria Ana Baptista, Aomar Iben Brahim, Azelarab El Mouraouah, and El Arbi Toto. "On the Moroccan tsunami catalogue." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (2009): 1227-36.
- Koshimura, Shunichi, Takayukie Oie, Hideaki Yanagisawa, and Fumihiko Imamura. "Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia." *Coastal Engineering Journal* (51) (3) (2009): 243-73.
- Leone, Frédéric, Nancy Meschinet De Richemond, and Freddy Vinet. *Aléas naturels et gestion des risques*. Paris: PUF, 2010.
- Leone, Frédéric. "Système d'Information Géographique et indicateurs de risques naturels en Méditerranée: le projet SIG RINAMED." In Actes du colloque international "*Risques Naturels en Méditerranée occidentale*." Monique Fort et Frédéric Ogé (eds.), 2-19. Carcassonne, 16-21 novembre 2009. Paris: UMR Prodig, 2011, [En ligne]. https://www.researchgate.net/publication/311518132_Systeme_d'Information_Geographique_et_Indicateurs_de_risques_naturels_en_Mediterranee_le_projet_SIG_RINAMED
- Leone, Frédéric, Franck Lavigne, Raphael Paris, Jean-Charles Denain, and Freddy Vinet. "A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability." *Applied Geography* (2010). doi:10.1016/j.apgeog.2010.07.009.
- Leone, Frédéric (dir.), Maria Ana Baptista, Bendahhou Zourarah Khaled, Mehdi, François Lavigne, Nancy Meschinet de Richemond, Rachid Omira, Samira Mellas, Mathieu Péroche, Émilie Lagahé, Anthony Heymann, Monique Gherardi, Delphine Grancher, Jean-Philippe Cherel, Alexandre Sahal, Jean-Charles Denain, Nicolas Meunier, et Driss Inani. *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. ANR-08-RISK/NAT-05 MAREMOTI, 2012. <http://www.gred.ird.fr/programmes-de-recherche/programmes-acheves/maremoti>
- Liu, Philip L.-F, Seung-Buhrn Woo and Yong-Sik Cho. *Computer programs for tsunami propagation and inundation*. Technical Report, Cornell University, 1994.

- Maramai Alessandra, Beatriz Brizuela, and Laura Graziani. "The Euro-Mediterranean Tsunami Catalogue." *Annals of Geophysics* (57) (4) (2014): 1-26. doi:<http://dx.doi.org/10.4401/ag-6437>
- MATEE (Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement-Département de l'Environnement). "La Cellule du Littoral. Répartition spatiale de l'occupation du sol au long du littoral." *Bulletin des espaces littoraux* 2 (2005). Maroc: MATEE/MedWetCoast, 12 p.
- Mayaguezz, Henry, Christine Plumejeaud-Perreau, Frédéric Pouget, and Frédéric Leone. "Diagnostic de l'évolution spatio-temporelle de l'exposition humaine et des capacités d'évacuation face au tsunami à Padang (Indonésie)." *Revue Internationale de Géomatique* (26) (3) (2016): 273-306.
- Mellas, Samira, Frédéric Leone, Rachid Omira, Monique Gherardi, Maria Ana Baptista, Bendahhou Zourarah, Mathieu Péroche, and Emilie Lagahé. "Le risque tsunamique au Maroc: modélisation et évaluation au moyen d'un premier jeu d'indicateurs d'exposition du littoral atlantique." *Physio-Géo* (6) (2012): 119-39. doi:10.4000/physio-geo.2589.
- Mellas, Samira. "Evaluation du risque tsunamique sur le littoral atlantique marocain." Thèse de doctorat. Université Paul Valéry-Montpellier III, UMR GRED & Université des Sciences ChouaibDoukkali d'El Jadida, Faculté des Sciences, Laboratoire des Géosciences Marines, Maroc, 2012.
- Meschinet de Richemond, Nancy, et Magali Reghezza. "La gestion du risque en France: contre ou avec le territoire?" *Annales de Géographie* 673 (2010): 248-67.
- Meschinet de Richemond, Nancy. "Le risque de tsunami à Mazagan-El Jadida (Maroc): réévaluation des sources documentaires historiques évoquant le séisme et le tsunami de 1755." In *Gérer les risques naturels. Pratiques et outils*. Frédéric Leone & Freddy Vinet. (éd.), *Géorisques* 8 (Montpellier: Presses Universitaires de la Méditerranée), sous presse.
- Omira, Rachid, Maria Ana Baptista, Luis Matias, Jorge Miguel Miranda, Cristina Catita, Fernando Carrilho, and El Arbi Toto. "Design of a Sea-level Tsunami Detection Network for the Gulf of Cadiz." *Natural Hazard and Earth System Sciences* 9 (2009): 1327-38.
- Omira, Rachid, Maria Ana Baptista, Jorge Miguel Miranda, El Arbi Toto, Cristina Catita, and Joao Catalao. "Tsunami vulnerability assessment

- of Casablanca-Morocco using numerical modelling and GIS tools.” *Natural Hazards* 54 (2010): 75-95. doi:10.1007/s11069-009-9454-4.
- Omira, Rachid, Maria Ana Baptista, Samira Mellas, Frédéric Leone, Nancy Meschinet de Richemond, Bendahhou Zourarah, and Jean-Philippe Cherel. 2012. “The November, 1st, 1755 Tsunami in Morocco: Can Numerical Modeling Clarify the Uncertainties of Historical Reports?” In *Tsunam - Analysis of a Hazard - From Physical Interpretation to Human Impact*. Gloria I. Lopez (ed.), 61-76. Ed. InTech, 2012.
- Omira, Rachid, Maria Ana Baptista, Frédéric Leone, Luis Matias, Samira Mellas, Bendahhou Zourarah, Jorge Miguel Miranda, Fernando Carrilho, and Jean-Philippe Cherel. “Performance of coastal sea-defense infrastructure at El Jadida (Morocco) against tsunami threat: lessons learned from the Japanese 11 March 2011 tsunami.” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13 (2013): 1779-94. doi:10.5194/nhess-13-1779-2013.
- Paris, Raphaël, Francisco-José Pérez Torrado, and Juan Carlos Carracedo. “Massive flank failures and tsunamis in the Canary Islands: past, present, future.” *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement Band* 140 (2000): 537-54.
- Péroche, Mathieu, Frédéric Leone, and Rafaëlle Gutton. “An accessibility graph-based model to optimize tsunami evacuation sites and routes in Martinique, France.” *Advances in Geosciences* 38 (2014): 1-8. doi: 10.5194/adgeo-38-1-2014.
- Renou, Camille, Olivia Lesne, Antoine Mangin, Frédéric Rouffi, Abderrahman Attilah, Driss El Hadani, and Hicham Moudni. “Tsunami hazard assessment in the coastal area of Rabat and Salé, Morocco.” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11 (2011): 2181-2191. doi:10.5194/nhess-11-2181-2011.
- Roger, Jean, Sebastien Allgeyer, Hélène Hébert, Maria Ana Baptista, Anne Loevenbruck, and François Schindelé. “The 1755 Lisbon Tsunami in Guadeloupe Archipelago: Source Sensitivity and Investigation of Resonance Effects.” *The Open Oceanography Journal* 4 (2010): 58-70.
- Roger, Jean, Maria Ana Baptista, Alexandre Sahal, F. Accary, Sébastien Allgeyer, and Hélène Hébert. “The Transoceanic 1755 Lisbon Tsunami in Martinique.” *Pure and Applied Geophysics* 168, Issue (6-7) (2011): 1015-31.
- Sahal, Alexandre, Frédéric Leone, and Mathieu Péroche. “Complementary methods to plan pedestrian evacuation of the French Riviera’s beaches

- in case of tsunami threat: graph-and multi-agent-based modeling.” *Nat. Hazards Earth Syst. Sciences* 13 (2013): 1735-43. doi:10.5194/nhess-13-1735-2013.
- Sahal, Alexandre, Jean Roger, Sébastien Allgeyer, Bruno Lemaire, Hélène Hébert, François Schindelé, and Franck Lavigne. “The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdès-Zemmouri (Algeria) earthquake: field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modelling.” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (2009): 1823-34. doi:10.5194/nhess-9-1823-2009.
- Nathalia Valencia, Annalisa Gardi, Anne-Lise Gauraz, Frédéric Leone, and Richard Guillaude. “New tsunami damage functions developed in the framework of SCHEMA project: application to European-Mediterranean coasts.” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11 (2011): 2835-46. doi:10.5194/nhess-11-2835-2011.
- Ward, Steven, and Simon Day. “CumbreVieja Volcano - Potential collapse and tsunami at La Palma, Canary Islands.” *Geophysical Research Letters* (28) (17) (2001): 3397-400. doi:10.1029/2001GL013110.
- Tomohiro, Yasuda, and Tetsuya Hiraishi. “Experimental Study of Tsunami Inundation in Coastal Urban.” In *Proceedings of the Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference* (Toulon, France, May 2004): 740-46.

ملخص: مساهمة العلوم الجغرافية في الوقاية من خطر التسونامي بالمغرب

يوضح هذا المقال، انطلاقاً من حالة المغرب كمثال، كيف يمكن للعلوم الجغرافية المساهمة في تحسين معرفة خطر التسونامي والوقاية منه وذلك في إطار مقارنة متكاملة ومكانية مبنية على مفهوم "السيناريو". وتدخّل النتائج الواردة في هذه الدراسة في إطار برنامجين حديثين للبحث شارك فيهما عدد كبير من الجغرافيين، حول مخاطر التسونامي بكل من مدينتي الجديدة وطنجة. ومكنت هذه الأعمال من تطوير منهجيات جديدة تقوم على البحث الميداني (التشخيص)، وتعتمد النمذجة الرقمية والتحليل المكاني باستخدام نظم المعلومة الجغرافية. حيث مكنت من توضيح عناصر الخطر المتعددة وسهلت تمثيلها وتقديمتها عبر إنجاز خرائط على عدة مستويات نذكر منها: تحليل المعطيات التاريخية، والنمذجة الرقمية لتسونامي-مرجع، وتقييم متعدد الأزمنة للرهانات البشرية والمخاطر المرتبطة بواسطة مؤشرات، ثم تخطيط وتحسين عملية الإخلاء في حالة الإنذار بوقوع تسونامي، مع تحسيس وتوعية السكان والسلطات بهذا الخطر.

الكلمات المفتاحية: جغرافيا، تسونامي، المغرب، 1755، النمذجة، خطر، إخلاء.

Résumé: Apports des sciences géographiques à la prévention du risque tsunami au Maroc

En prenant pour exemple le Maroc, cet article montre en quoi les sciences géographiques peuvent contribuer à améliorer la connaissance du risque tsunami et sa prévention dans le cadre d'une approche intégrée et spatialisée fondée sur la notion de scénario. Les principaux résultats présentés sont issus de deux programmes de recherche récents impliquant de nombreux géographes, en particulier sur les villes d'El Jadida et de Tanger. Ces travaux ont permis de développer de nouvelles méthodologies faisant appel à l'enquête de terrain (diagnostics), à la modélisation numérique, et à l'analyse spatiale sous SIG. Ils viennent illustrer plusieurs composantes du risque et en facilitent la restitution par le biais de la cartographie à plusieurs échelles: analyse de données historiques, modélisation numérique d'un aléa de référence, quantification multi-temporelle des enjeux humains et des risques associés au moyen d'indices, optimisation et planification des évacuations en cas d'alerte, sensibilisation des populations et des autorités.

Mots clés: Géographie, tsunami, Maroc, 1755, modélisation, risque, évacuation

Abstract: Contributions of Geographical Sciences to Tsunami Risk Prevention in Morocco

By focusing on Morocco, this article shows how the geographical sciences can contribute to improving the knowledge of tsunami risk and its prevention following an integrated and spatial approach based on the concept of scenario. The main results presented here come from two recent research programs involving many geographers, especially on the towns of El Jadida and Tangier. This work allowed us to develop new methodologies involving fieldwork, numerical modeling, and GIS-based spatial analysis. They illustrate several components of risk and make easier restitution through mapping at various scales: analysis of historical data, numerical modeling of hazard parameters, multi-temporal quantification of human exposure and indices of risk, optimization and evacuation planning in case of warning, sensitization of population and authorities.

Keywords: Geography, Tsunami, Morocco, 1755, Modeling, Risk, Evacuation.

Resumen: Aporte de las ciencias geográficas a la prevención del riesgo tsunami en Marrueco

Tomando el ejemplo de Marrueco, este artículo pretende mostrar como las ciencias geográficas pueden contribuir a mejorar el conocimiento del riesgo tsunami y su prevención en el marco de un enfoque integrado y espacializado basado sobre la noción de escenario. Los principales resultados presentados están sacados de dos programas de investigación recientes implicando numerosos geógrafos, en particular en las ciudades de El Jadida y Tánger. Estos trabajos han permitido desarrollar nuevas metodologías que recurren a la encuesta de campo (diagnósticos), a la modelización numérica, y al análisis espacial bajo SIG. Vienen ilustrar varios componentes del riesgo y facilitan su restitución por medio de la cartografía a varias escalas: análisis de datos históricos, modelización numérica de un azar de referencia, cuantificación multi-temporal de las implicaciones humanas y de los riesgos asociados por el medio de índices, optimización y planificación de las evacuaciones en caso de alerta, sensibilización de las poblaciones y de las autoridades.

Palabras claves: Geografía, tsunami, marrueco, 1755, modelización, riesgos, evacuacione.