**Modéliser les impacts humains et anticiper l'évacuation préventive**

**en cas de tsunami à El Jadida (Maroc)**

Frédéric Leone1,Mathieu Péroche1, Samira Mellas1,2,Emilie Lagahé1,Anthony Heymann1, Rachid Omira4, Maria-Ana Baptista4,Monique Gherardi1, Jean-Philippe Cherel1, Alexandre Sahal3, Bendahhou Zourarah2, Khaled Mehdi2, Franck Lavigne3, Delphine Grancher3,Nancy Meschinet de Richemond1, Driss Inani5

*1 UMR GRED, Université Montpellier 3 & IRD, Montpellier, France*

*2 LGMSS URAC-45, Université Chouaïb Doukkali, El Jadida, Maroc*

*3 UMR 8591, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne & CNRS, Paris, France*

*4 Instituto Dom Luiz (IDL), Universidade de Lisboa, Lisbonne, Portugal*

*5 Agence Urbaine d’El Jadida, Maroc*

**Résumé :**

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

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

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

Dans un deuxième temps, le scénario a été alimenté par une analyse du rythme urbain et des mobilités spatio-temporelles au sein de la ville. En complément des observations et enquêtes visant à reconstituer les déplacements de personnes, nous avons alimenté la base SIG par les fonctions principales et secondaires de chaque lieu étudié (bâtiments et espaces ouverts), en différenciant même pour les bâtiments les fonctions des rez-de-chaussée et des étages supérieurs. La typologie des fonctions retenue compte 49 classes (28 pour les lieux bâtis, 21 pour les espaces extérieurs). Ensuite, chaque fonction a été assortie d’une courbe de fréquentation humaine entre 0 et 24h, pour deux saisons (haute et basse saison touristiques). Les taux de fréquentation horaire ont été obtenus soit directement par comptage sur plusieurs lieux représentatifs de la ville, soit par extrapolation et/ou à partir des statistiques disponibles auprès des administrations locales. Par ailleurs, la capacité d’accueil maximale crédible de chaque rez-de-chaussée ou espace ouvert (dont les rues) a été estimée en fonction de sa classe fonctionnelle et de sa localisation. Ces données démographiques ont permis de développer un modèle de fréquentation qui débouche sur des cartes de densités humaines heure par heure, et d’obtenir ainsi une estimation fine des enjeux humains exposés à un éventuel tsunami.

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

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

**Mots clés** : Tsunami, Modélisation, Vulnérabilité, Indice, Risque, Accessibilité, Evacuation, Maroc