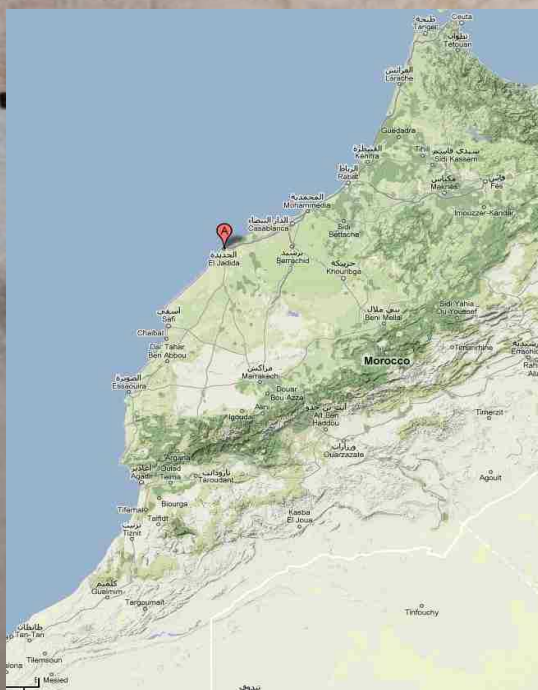


# Modélisation spatiale du risque tsunami : vulnérabilité humaine et évacuation (El Jadida, Maroc)



F. Leone, M. Péroche, E. Lagahé, A. Heymann, M. Gherardi,  
J-P. Cherel, J-C. Denain, N. de Richemond, N. Meunier  
S. Mellas, B. Zourarah, K. Mehdi  
R. Omira, M-A. Baptista  
F. Lavigne, A. Sahal, D. Grancher

Et le soutien technique de :

Agence Urbanisme El Jadida  
ONEM (Convention)  
Routes (Convention)

DAT

● **Maroc, 1755**

- Des effets constatés (citadelle portugaise)
- Mais des témoignages variables (réévaluation)
- Un évènement de référence pour scénario



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 trouvés ensevelis sous les ruines,  
il est venu des Courriers de S<sup>te</sup> Croix, de  
Safi, d'Aramor, et de Salé au Brince  
pour informer cette Altesse qu'ils ont  
venenti le meme tremblement, et cela a la  
meme heure; mais il paroit qu'il a été plus  
fort du côté du Nord, qu'il n'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 Mazagao avoit été dans la  
nécessité d'abandonner la Ville, et de s'en aller

1<sup>er</sup> novembre 1755 (Mazagao)

*The earthquake occurred at 9 1/2 h, and  
its duration was estimated to 1/4 of an  
hour (in Blanc, 2009)*

Runup (forteresse) :

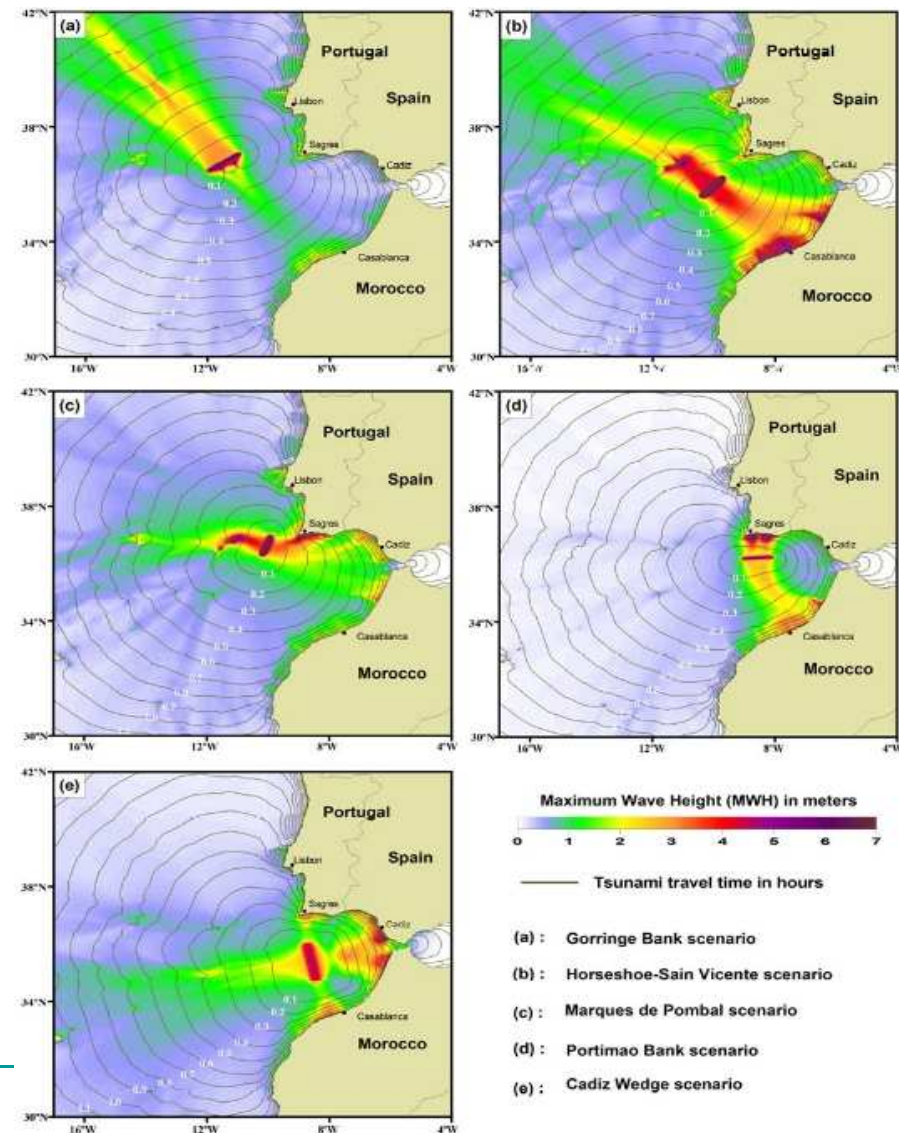
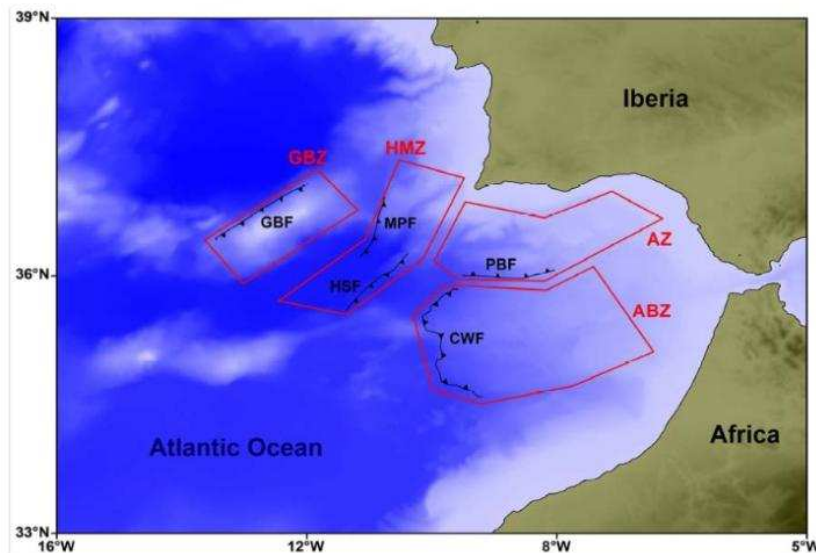
✓ 22,5 m d'après Soyris (1755) (75 pieds)

✓ 1,9 à 2,3 m, d'après Blanc (2009)

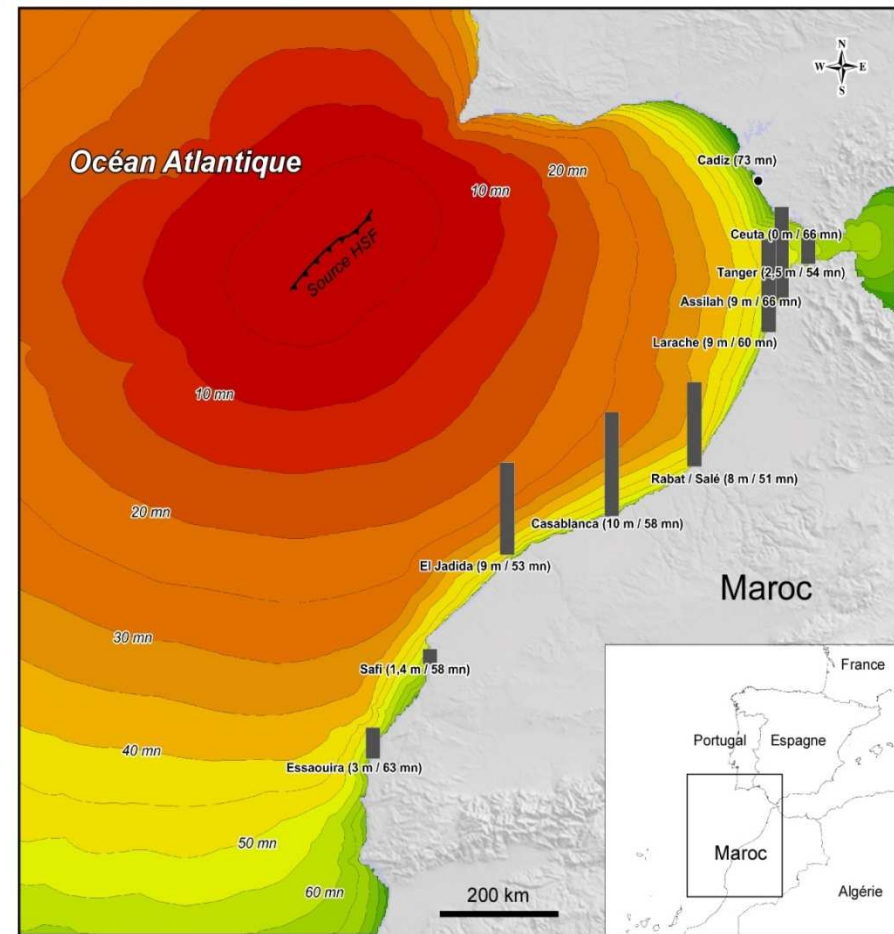
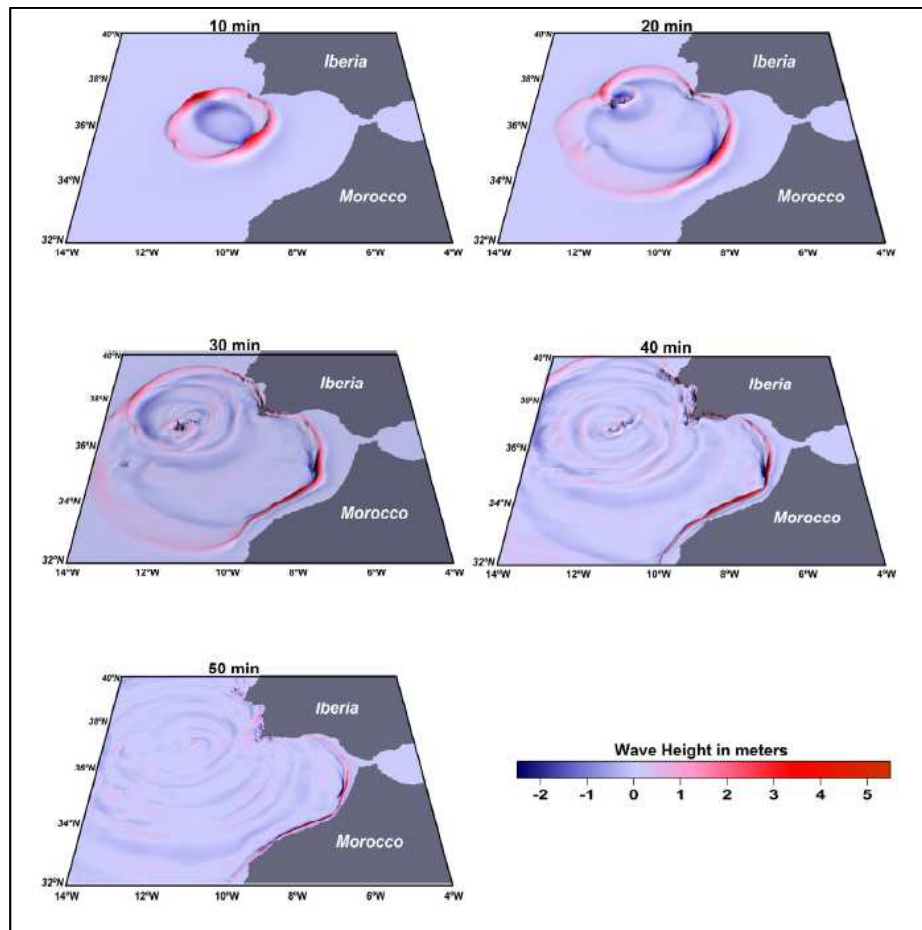
(source primaire : la lettre de Mazagao,  
publiée dans la *Gazeta de Lisboa* en  
1755)

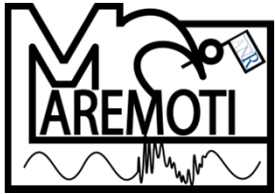
● Une appréciation de l'aléa tsunami à l'échelle du Maroc (TTT & MWH) : 1755 (Mw 8.5)

- Un modèle de propagation régionale
- Choix parmi 5 sources sismiques
- Code de simulation COMCOT-Lx basé  
(*Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model*)

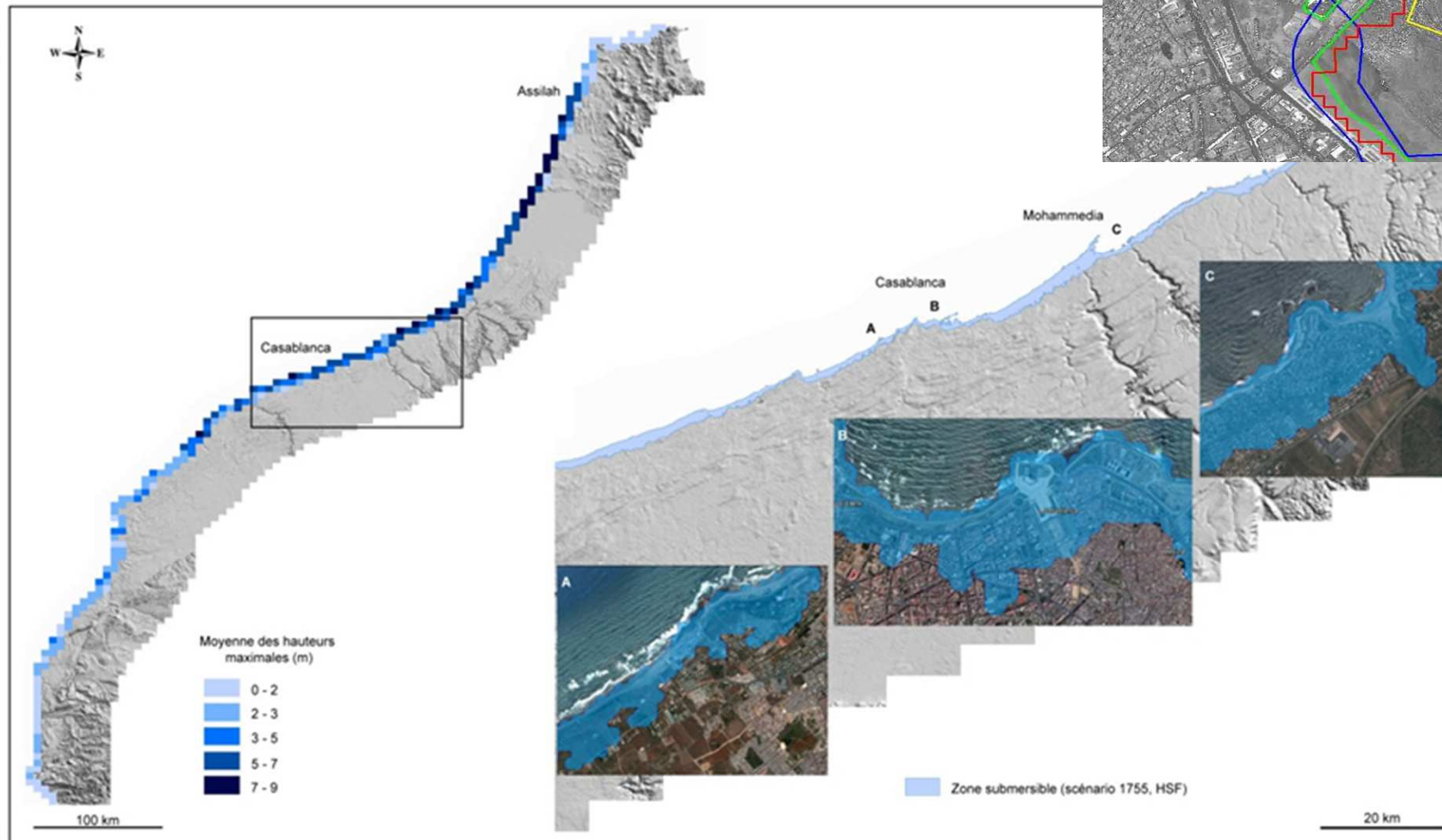
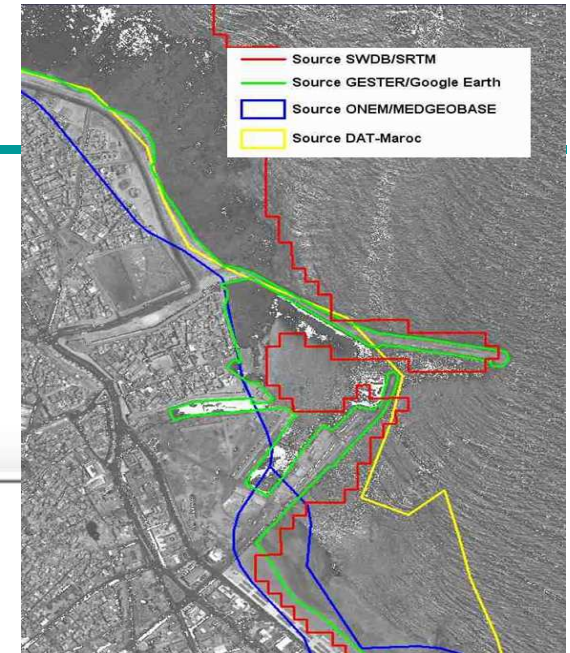


- Une appréciation de l'aléa tsunami à l'échelle du Maroc (TTT & MWH)
  - Scénario de référence basé sur la source (HSF) la plus énergétique pour El Jadida



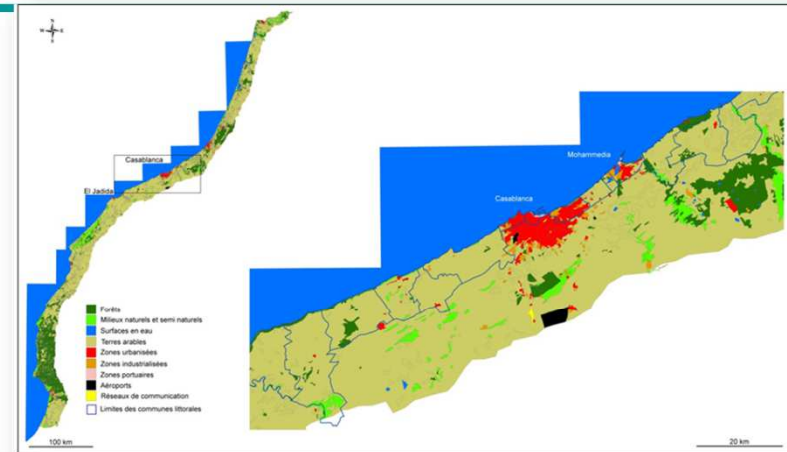


- Une appréciation de l'aléa à l'échelle du Maroc
  - Un modèle d'inondation régional sur SRTM (indicatif)

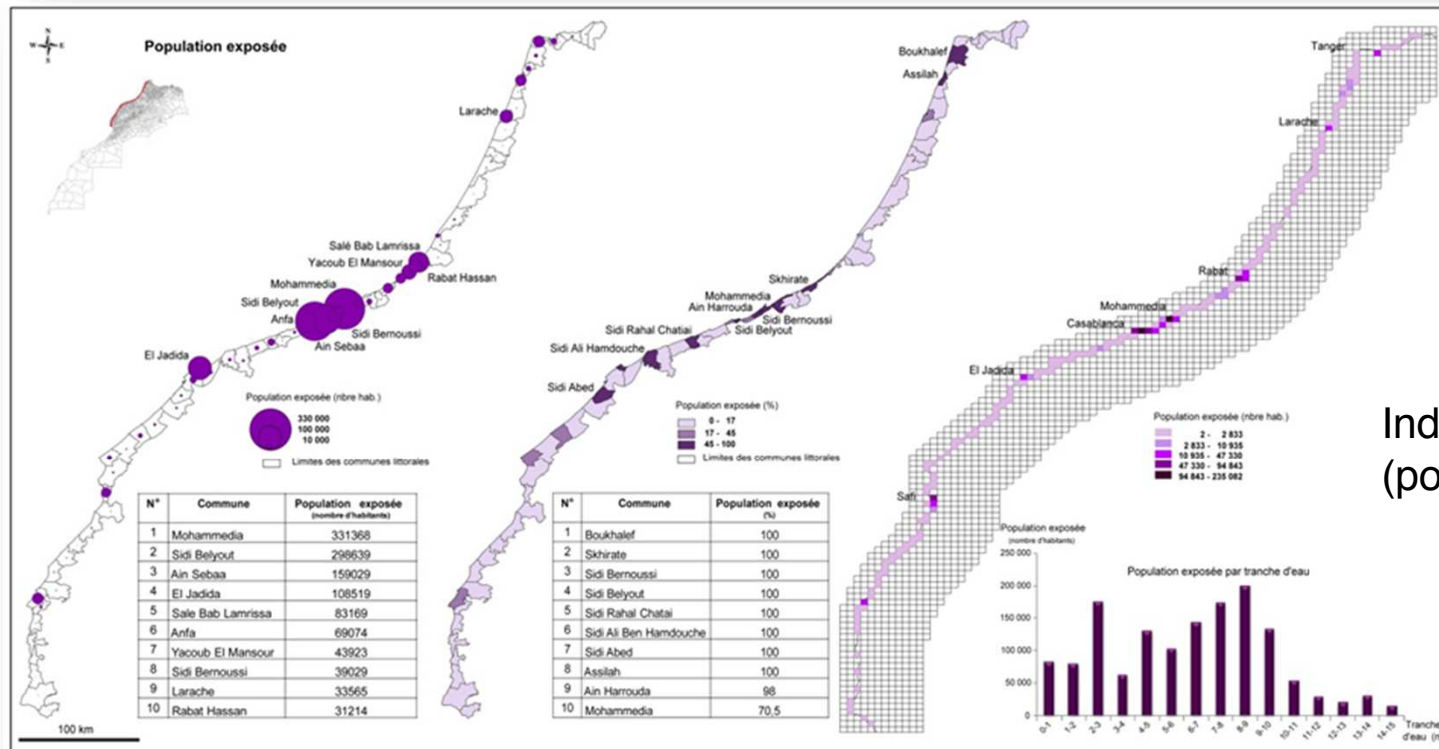


● Une appréciation du risque tsunami à l'échelle du Maroc

- Une intégration sous SIG des principaux enjeux surfaciques (BD existantes)
- Construction d'indicateurs d'exposition (communes et mailles)



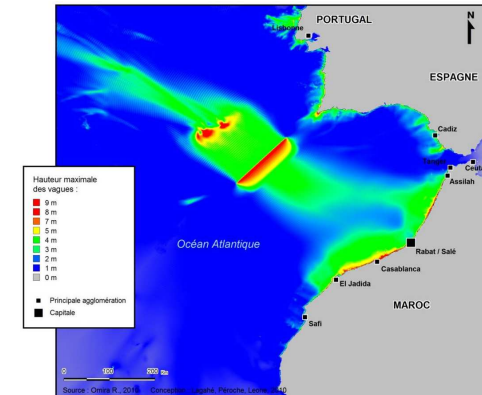
Occupation du sol (MEDGEOBASE)



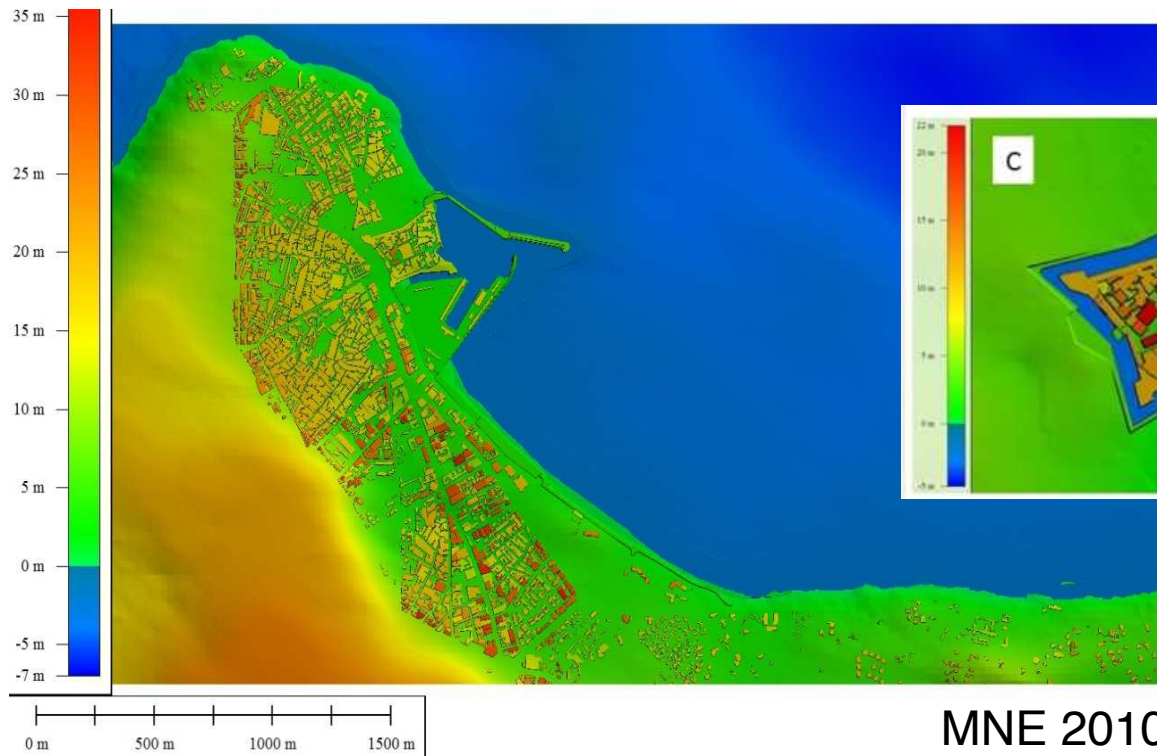
Indicateurs d'exposition (population Landscan)

● **Modélisation de l'aléa local sur El Jadida (1755)**

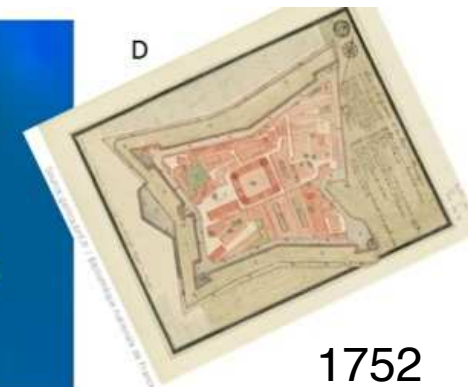
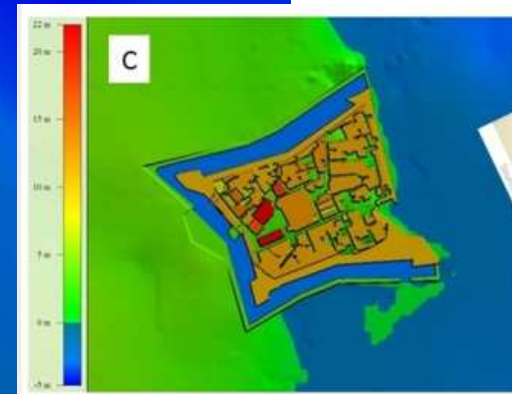
- Modèle régional : MWH de 9 m et TTT de 53 mn sur El Jadida
- Modèle d'inondation intégrant le bâti et les ouvrages de défense côtière (support MNE, résolution 1m, rugosité)
- Situation 2010 et 1755



MWH, HSF

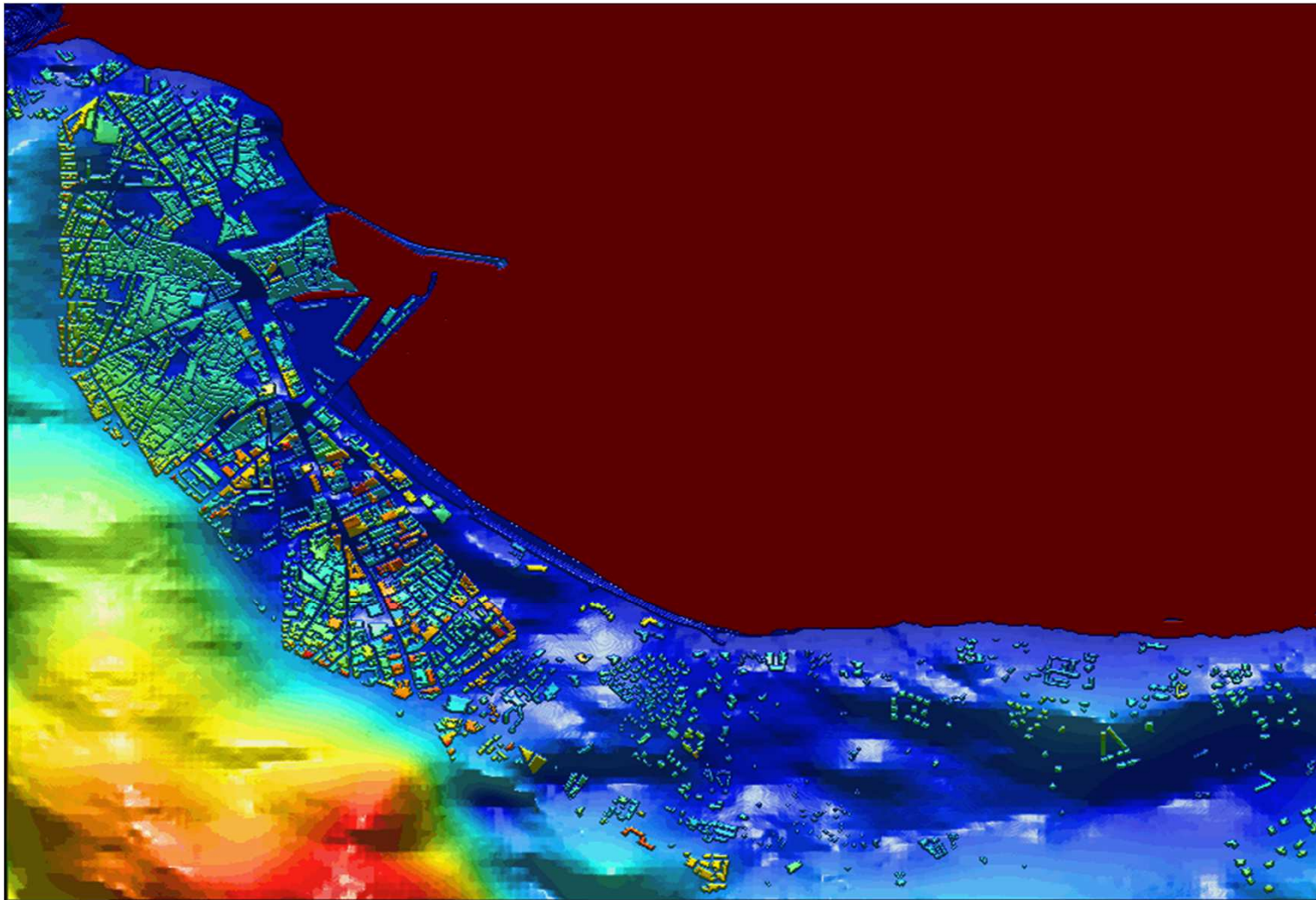


MNE 2010



1752

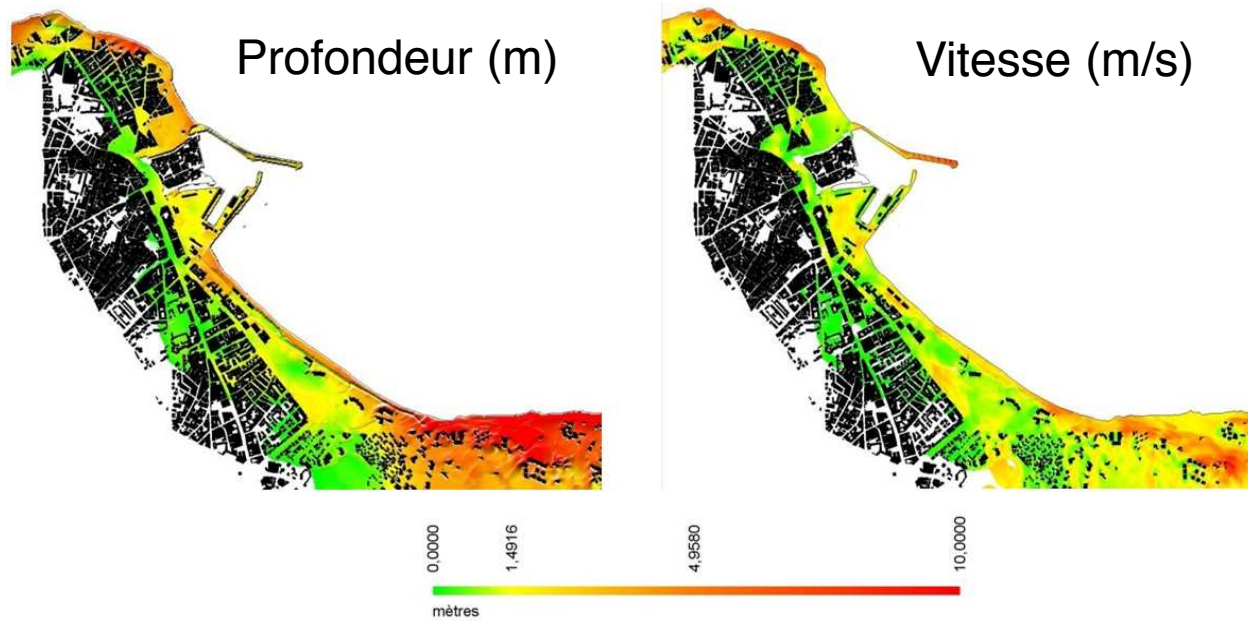
- **Modélisation de l'aléa local sur El Jadida (1755)**
  - Modèle dynamique sur MNE (source HSF)



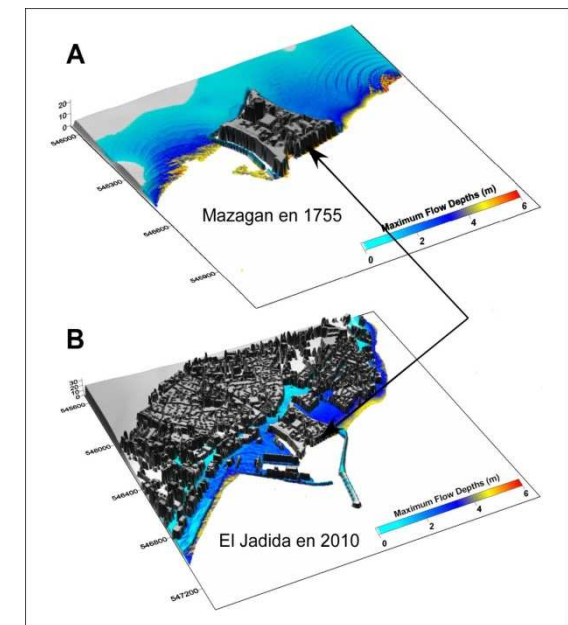


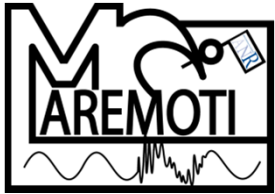
- **Modélisation de l'aléa local sur El Jadida (1755)**

- 2 variables d'intensité de l'aléa extraites : profondeur d'eau et vitesse du courant
- Confrontation avec témoignages historiques de 1755



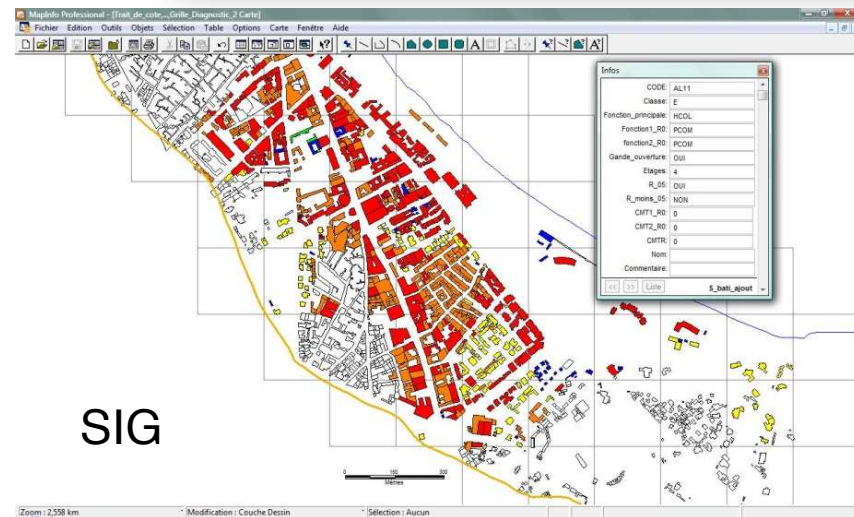
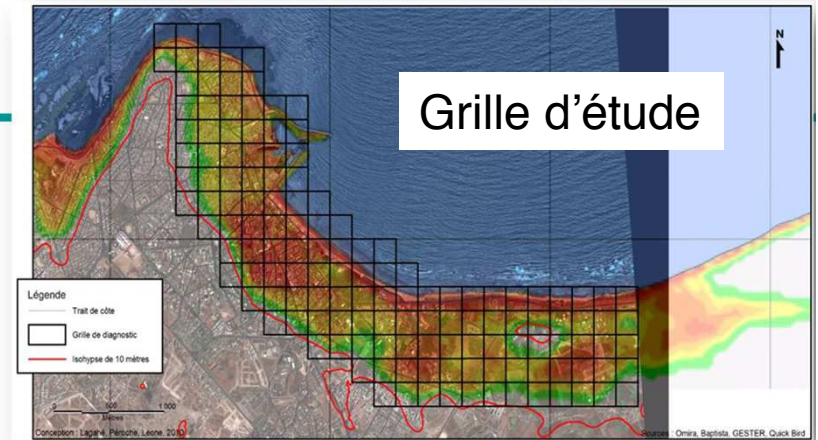
Inondation sur MNE





- **Diagnostic de vulnérabilité humaine**
  - Intégration multi-critère dans un SIG
  - Critères s'appliquant aux personnes dans bâtiments vs hors bâtiments
  - 3000 bâtiments et espaces extérieurs renseignés à partir de relevés terrain

Relevés terrain



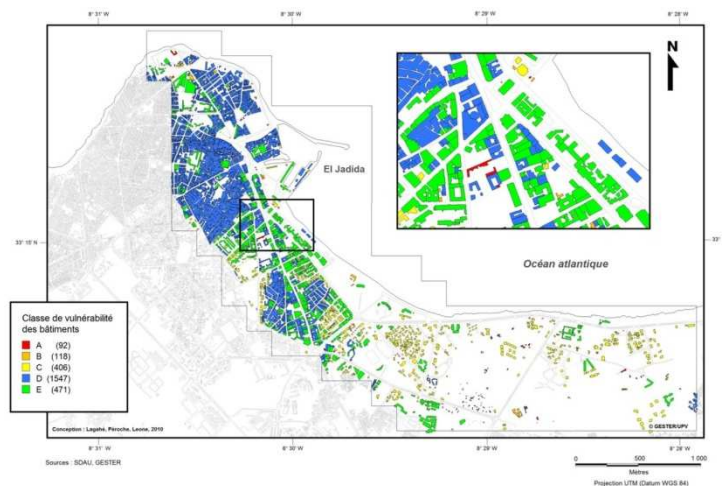
SIG

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

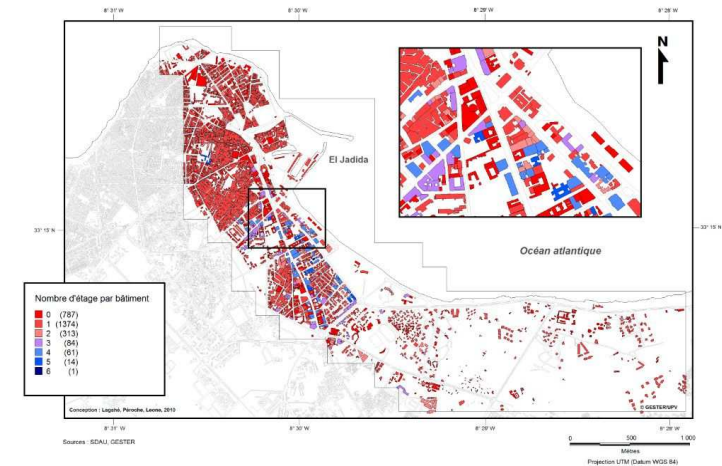
● **Diagnostic de vulnérabilité humaine**  
 ■ **Cartographie des critères de vulnérabilité humaine**

Type de bâtiment	Individuel			Collectif	
Classes	A	B	C	D	E
<b>Critère d'identification terrain</b>	Auto-construct 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 ≤ 20 x 20 cm	Structure calculée et renforcée (poteaux > 20cm), architecture sophistiquée, très souvent étage	Auto-construction, de 1 à 2 étages, structure moyennement renforcée, plusieurs poteaux ≤ 20x20 cm, géométrie simple	Structure calculée et renforcée (poteaux > 20cm), géométrie simple, bâtiments de grande taille, plusieurs étages
<b>Vue terrain</b>					
<b>Exemple de bâtiments (adapté de la nomenclature du RGPH, 2004)</b>	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

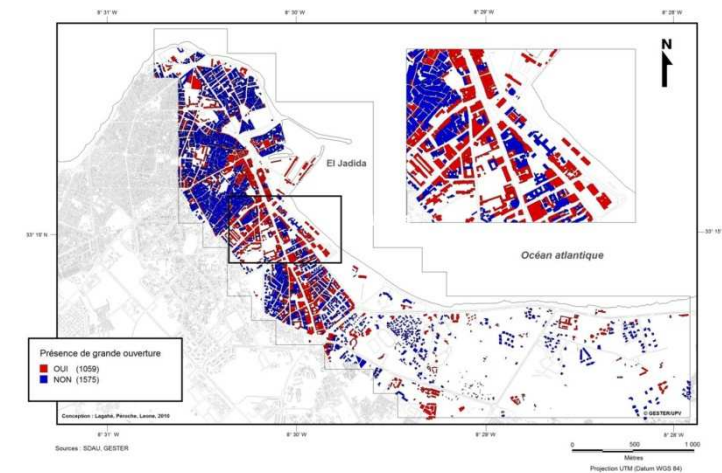
Typologie du bâti (classes de vulnérabilité adaptées aux courbes de fragilité)



Classes de bâtiments (vuln. physique)



Nombre d'étages



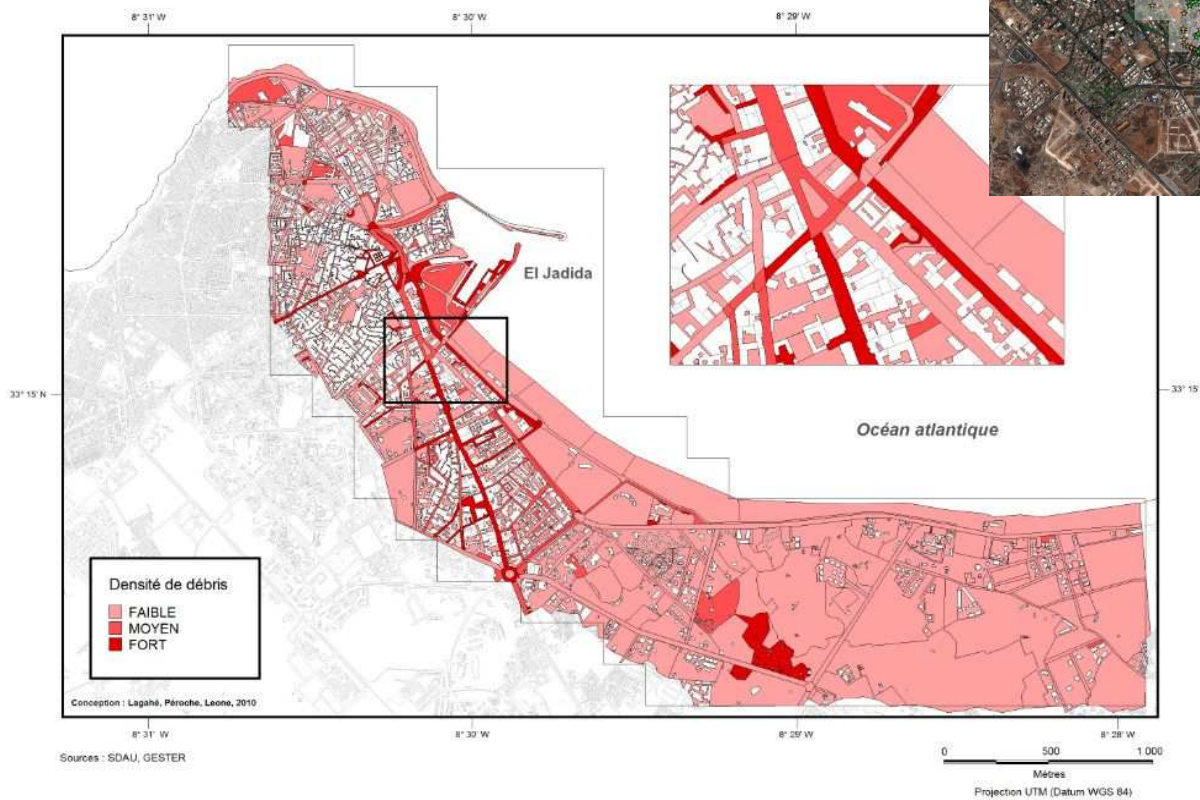
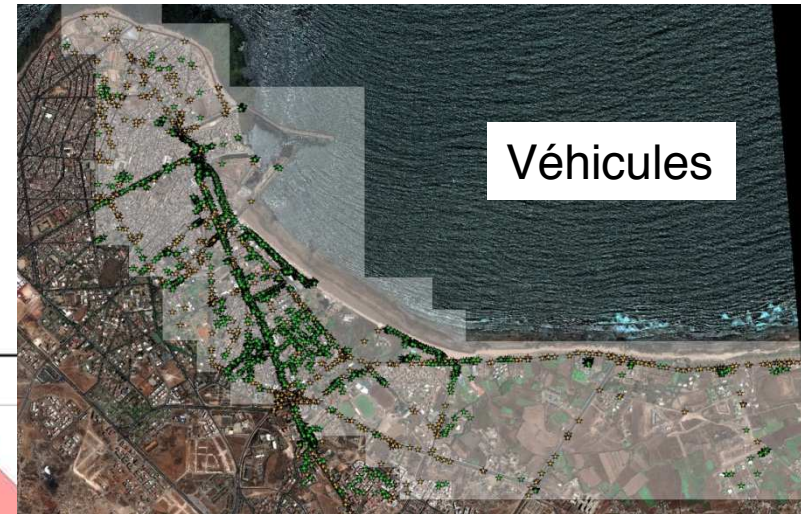
Présence ou non de grandes ouvertures

- Une vulnérabilité accrue par les densités de débris, la situation et l'âge des personnes



*11 mars 2011 - Japon*

- **Diagnostic de vulnérabilité humaine**
  - Evaluation des débris flottants potentiels



Densités de débris

● **Identification des fonctions des espaces de vie**

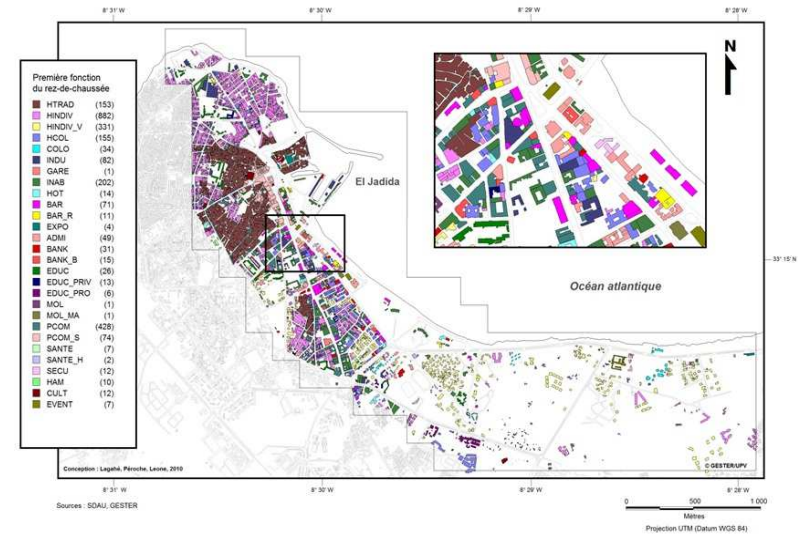
- Différenciation des fonctions principales et secondaires
- Différenciation RdC / étages

**Fonction principale des étages : HCOL**

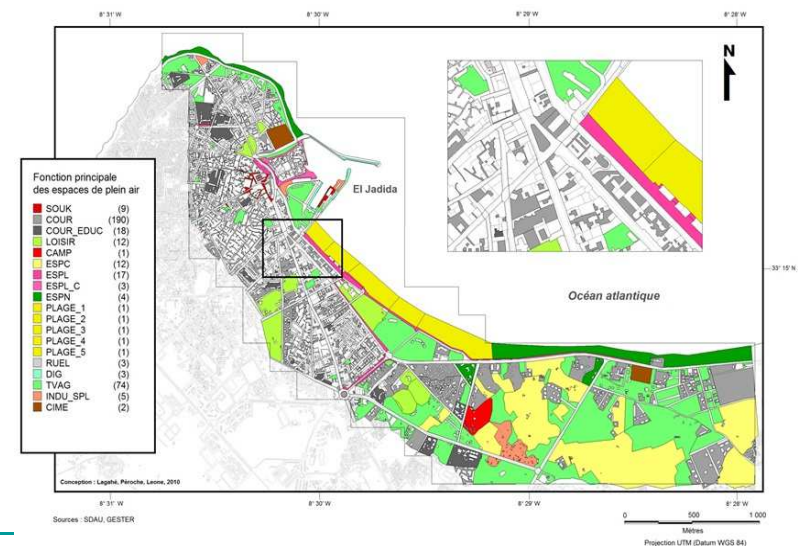


**Fonction 1 du rez-de-chaussée : BAR**

**Fonction 2 du rez-de-chaussée : PCOM**



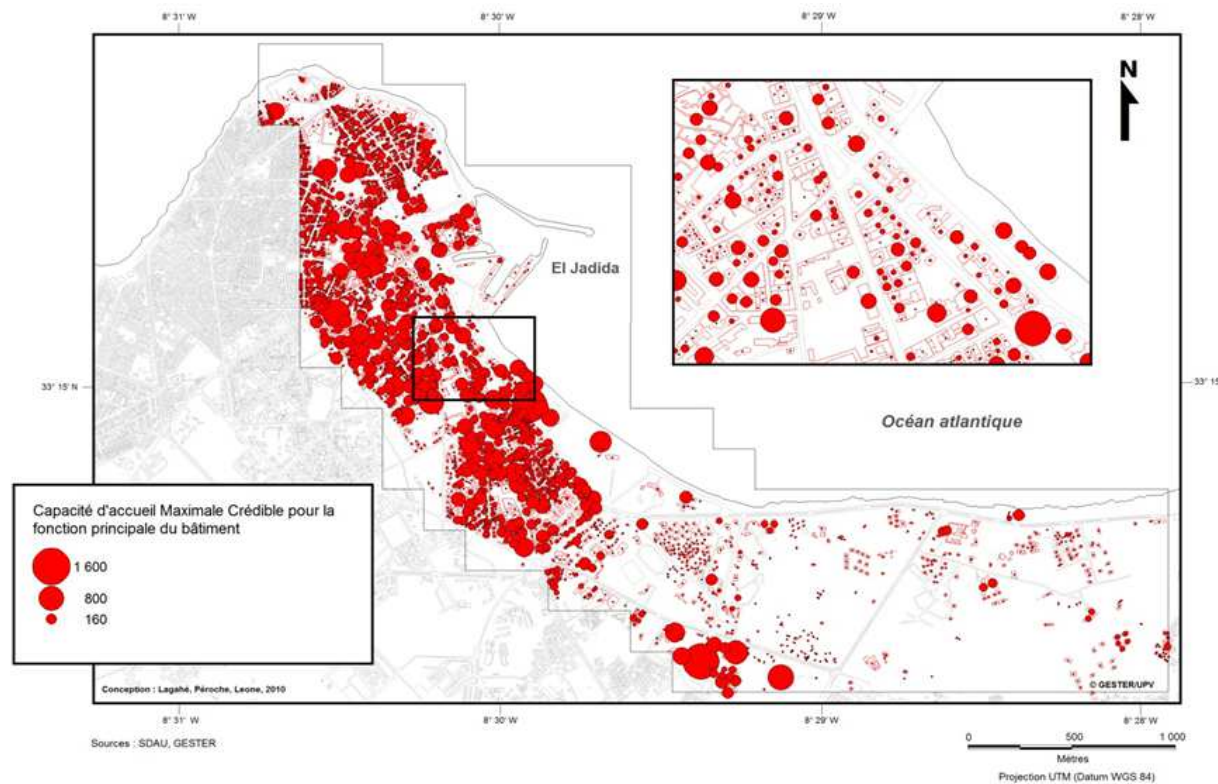
Fonction principale RdC



Fonction espaces extérieurs

● **Estimation des capacités maximales d'accueil crédibles des lieux (CAMC)**

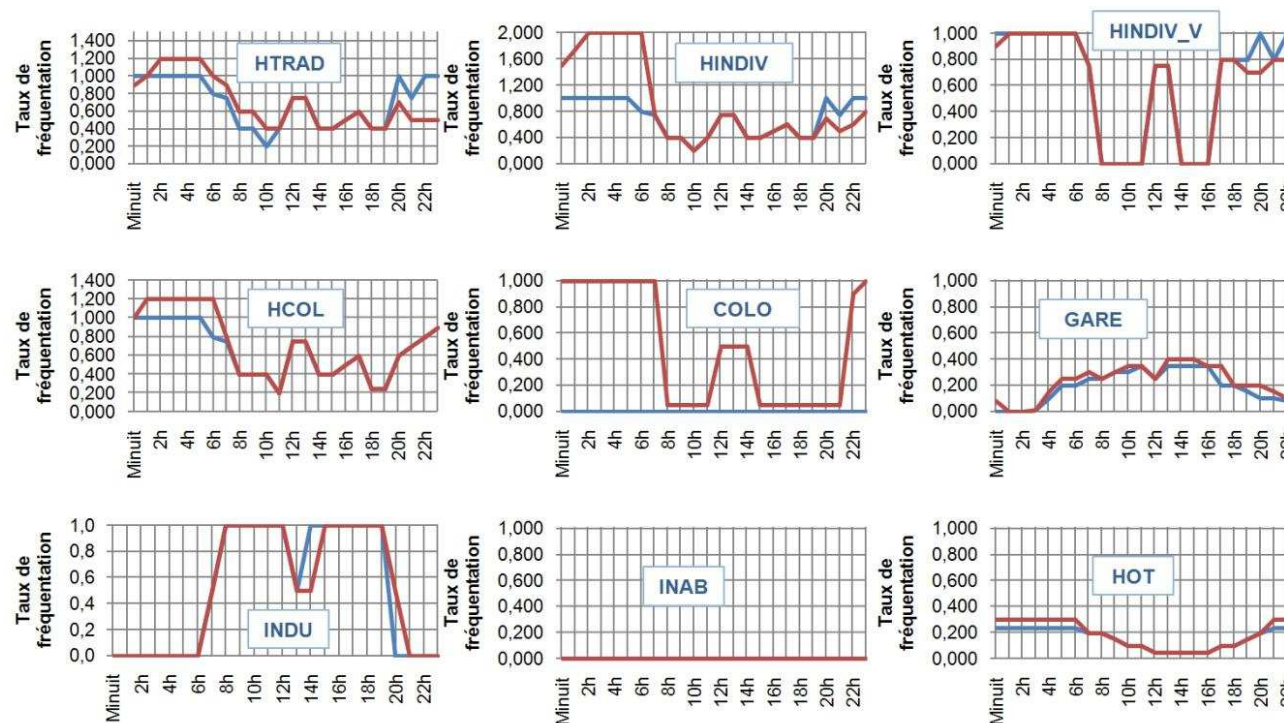
- Au moyen des statistiques disponibles
- Par comptages (observations)
- Par calcul de densités théoriques



CAMC des bâtiments (pour fonction principale au rez-de-chaussée)

● **Estimation des taux de fréquentation humaine (TF)**

- Par observation des rythmes de vie intra-journaliers et inter-saisonniers
- Extrapolation à partir des fonctions des espaces
- Au pas horaire pour 2 saisons (BS et HS)
- Construction de courbes de fréquentation pour chaque type de lieu (taux de fréquentation entre 0 et 100%)

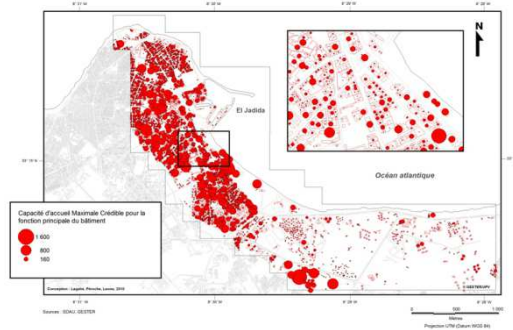




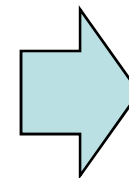
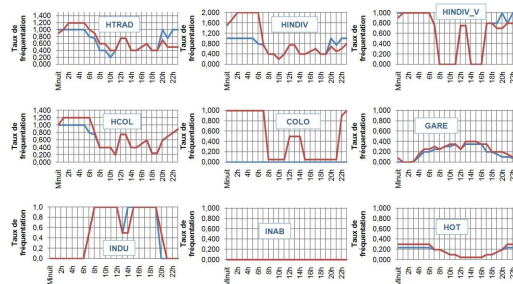
- Cartographie dynamique des densités humaines (Dh) intra-urbaines sur 0-24h (variable enjeux du scénario)

$$Dh = CAMC * TF$$

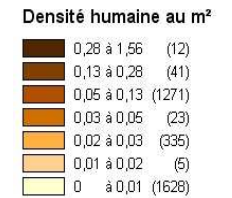
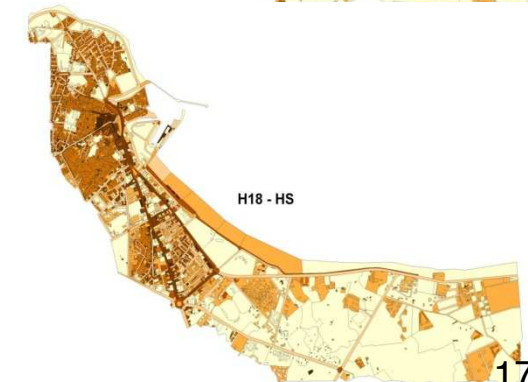
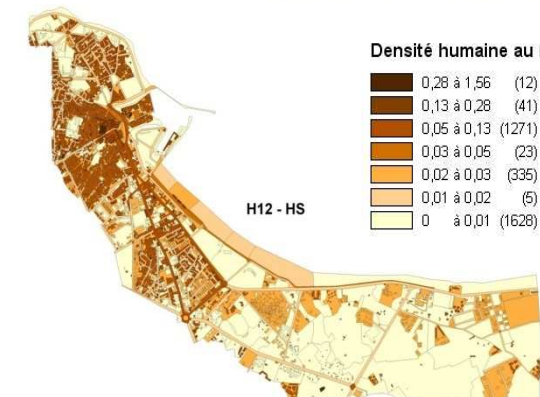
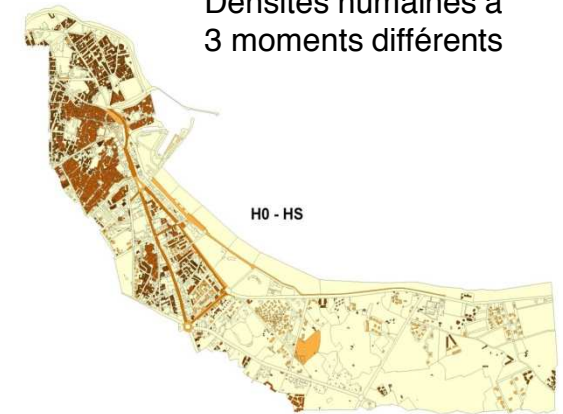
CAMC



TF

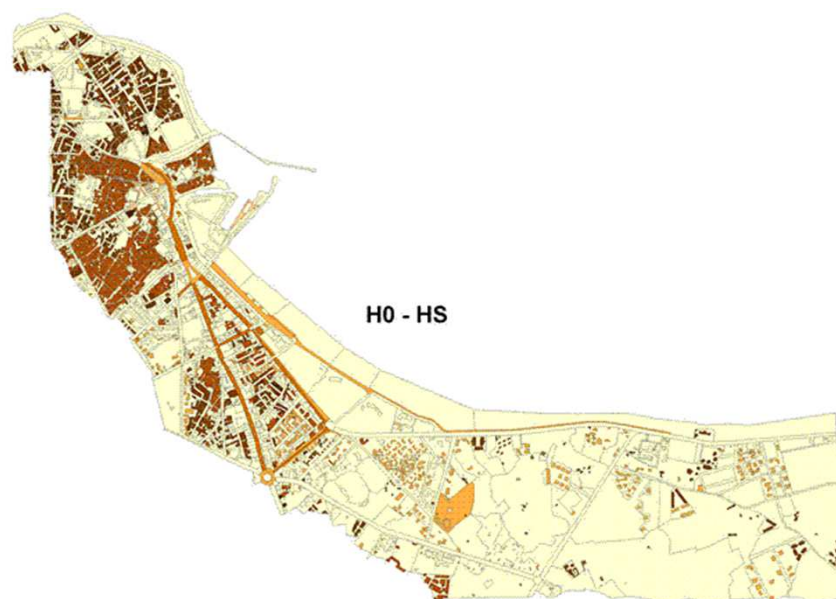


Densités humaines à 3 moments différents



- Cartographie dynamique des densités humaines (Dh) intra-urbaines sur 0-24h

## Haute Saison

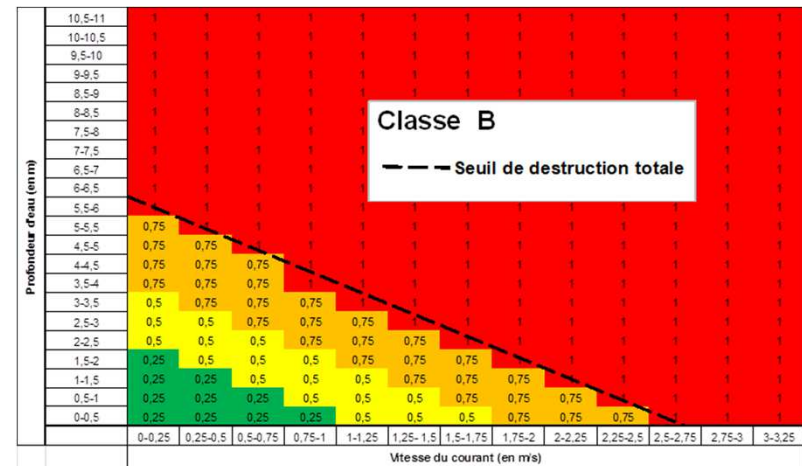
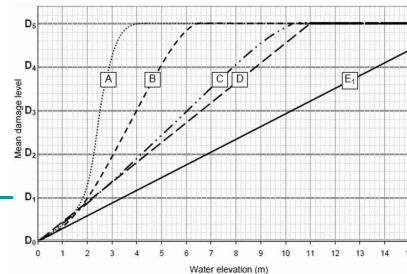
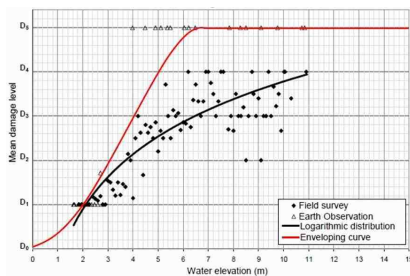
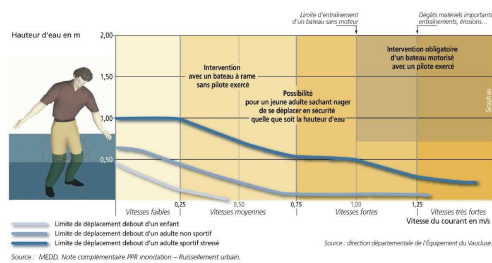


## Basse Saison

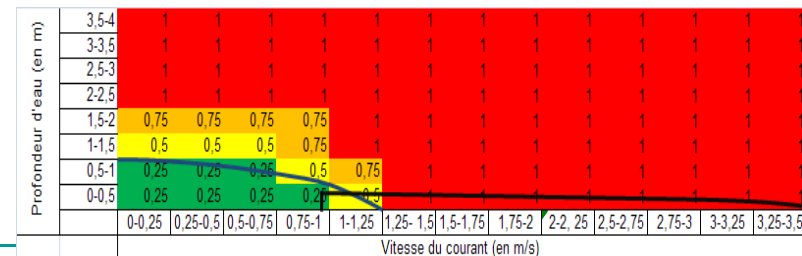


● **Elaboration de matrices de probabilités de décès (matrices de vulnérabilité)**

- 4 niveaux de probabilité en fonction des paramètres de l'aléa (vitesse et profondeur), des types de lieux (bâtiment ou espace extérieur), et de certains critères de vulnérabilité
- Des matrices qui intègrent des fonctions empiriques et des critères de pondération :
  - Seuils de destruction des bâtiments (REX Tsunarisque & SCHEMA)
  - Capacités de déplacement des personnes dans le courant
  - Seuils de mobilisation et densités de débris flottants (+ 0.25 à + 0.5)
  - Possibilité ou non de trouver un espace refuge hors d'eau (+ 0.25)
  - Présence ou non de grandes ouvertures (-0.25)

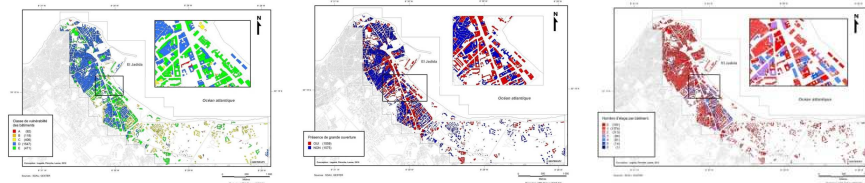
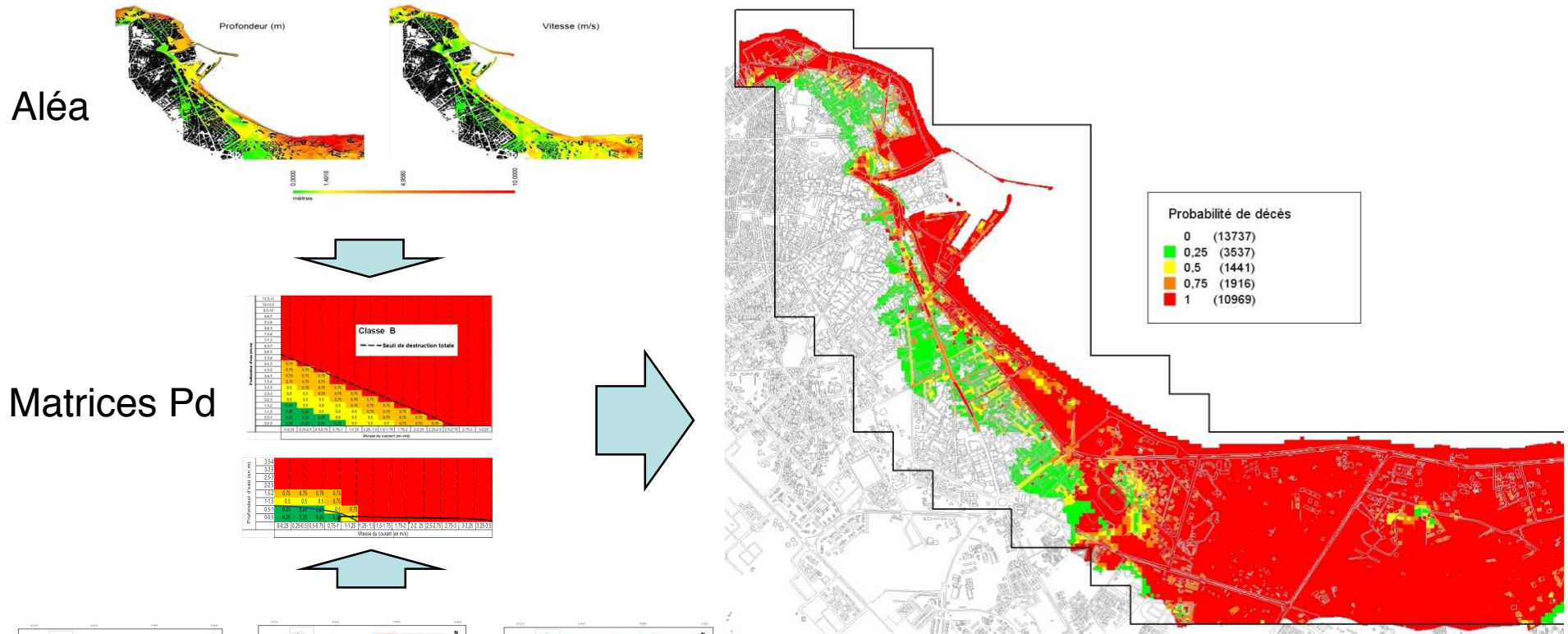


Personne dans bâti de classe B

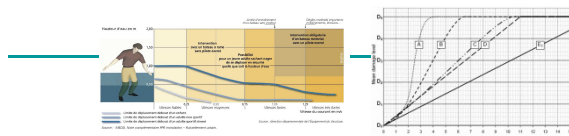


Personne à l'extérieur (peu débris flottants) 19

● Cartographie des probabilités de décès (Pd)

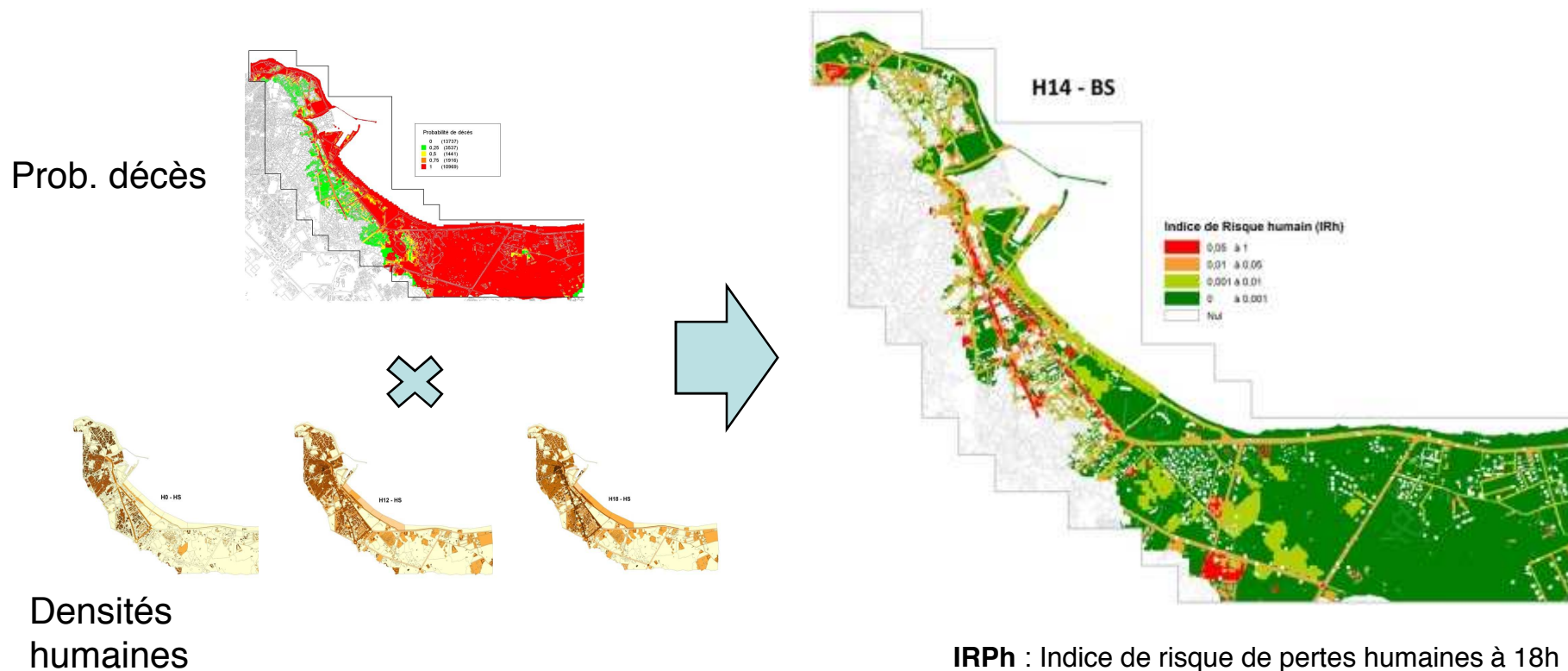


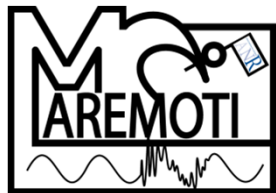
Critères de vulnérabilité



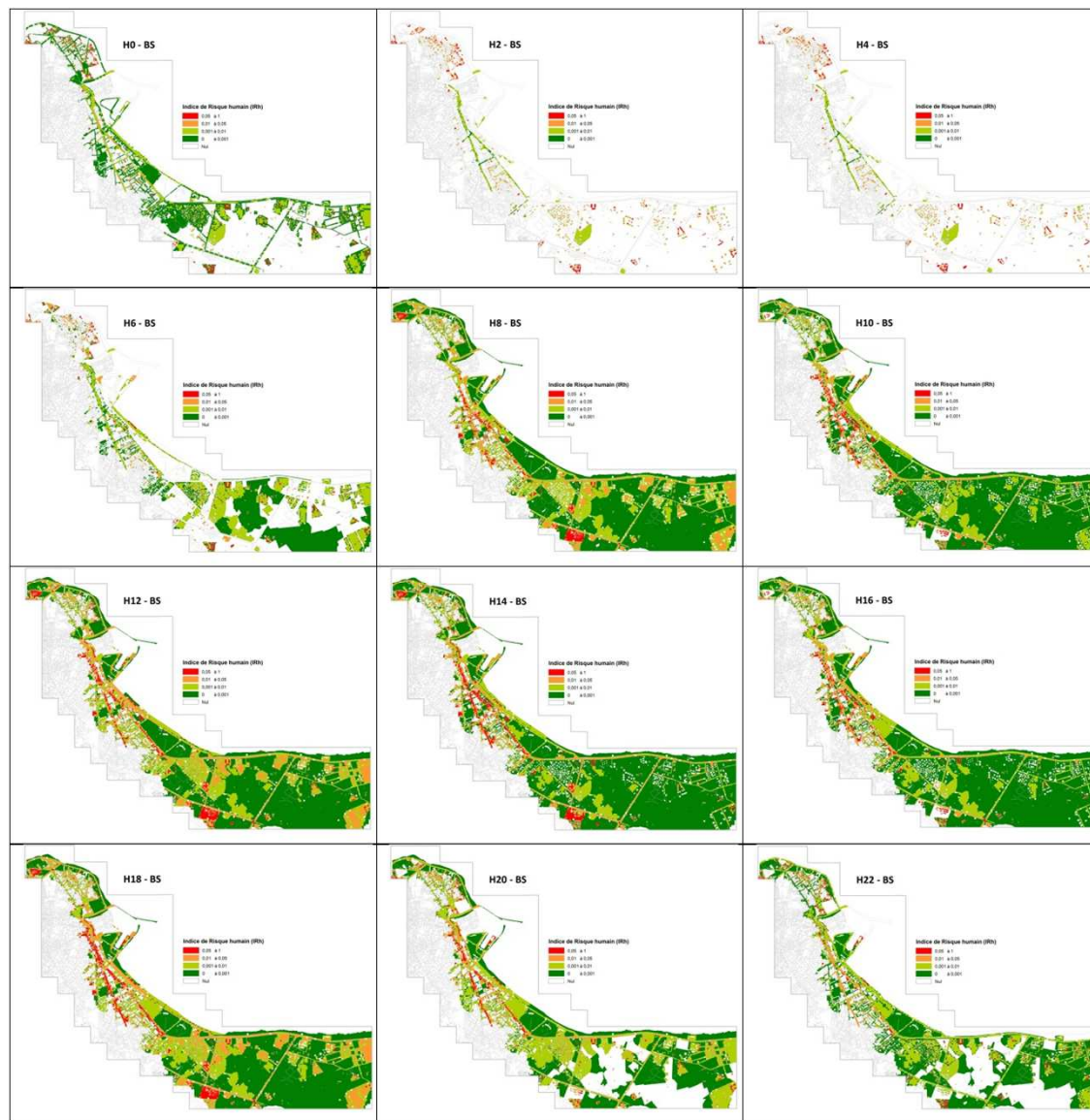
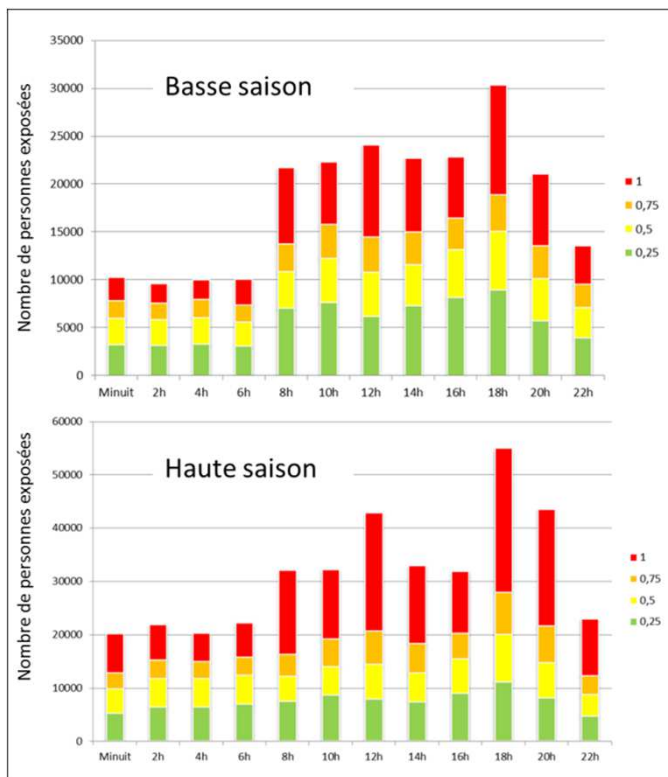
Cartographie synthétique des probabilité de décès

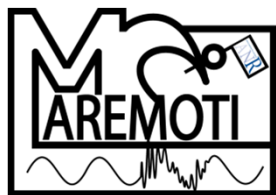
- **Cartographie dynamique du risque de pertes humaines :  $IRPh = Pd * Dh$** 
  - Au moyen d'un indice synthétique (0-1) qui permet d'afficher la variabilité spatio-temporelle du risque
  - Identification des poches de risque et des volumes de personnes exposées
  - → effectifs de population à évacuer = INPUT pour la modélisation des évacuation





● **Cartographie dynamique du risque de pertes humaines (IRPh = Pd\* Dh)**





● **Problématique d'une évacuation préventive face à un tsunami**

***Questionnements pour planifier une évacuation préventive :***

- Doit on évacuer ?
- Quand évacuer ? : le plus tôt possible
- Comment évacuer ? : à pied
- Combien de temps avant l'arrivée du tsunami ? → **Modèle de propagation**
- Combien de personnes à évacuer ? → **Modèle de vulnérabilité**
  
- Où évacuer (ZR) ?
- Quelle capacité d'accueil des ZR ?
- Quelle disponibilité des ZR ?
  
- Selon quel itinéraire d'évacuation ?
- Combien de temps pour atteindre les ZR ?
- Combien de personnes vont atteindre les ZR avant l'arrivée du tsunami ?

**Définition des zones refuges (ZR)**

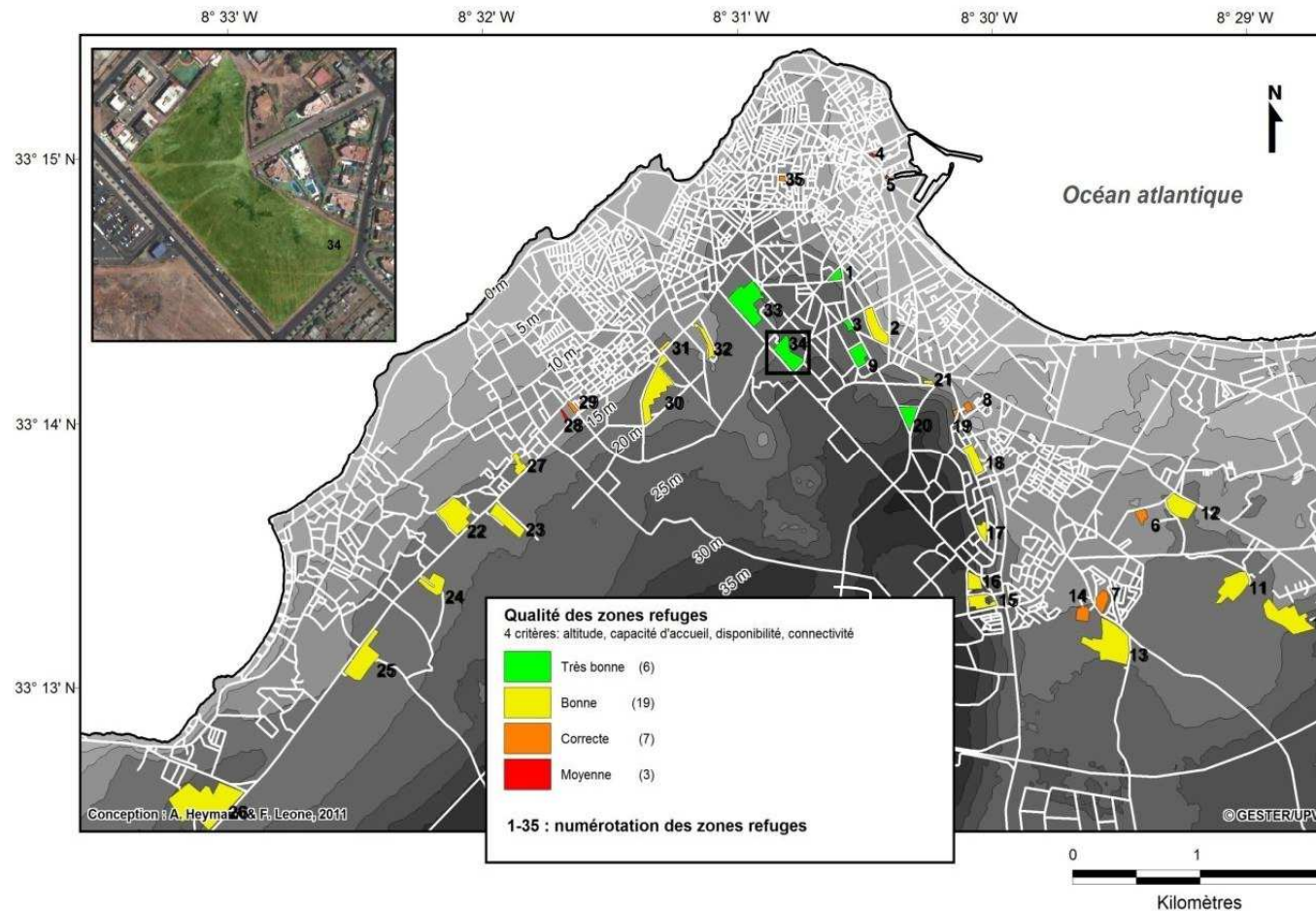
**Modèles d'accessibilité :**

- **Graphes**
- **GRID**
- **SMA**

**Accessibilité = une composante de l'évacuation / un facteur de vulnérabilité humaine**

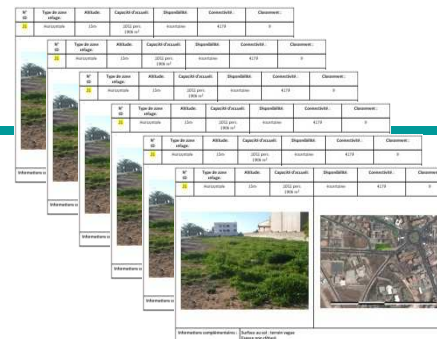
● **Approche déductive : accessibilité déduite des zones refuges**

- Critères d'indentification des ZR : Altitude, Capacité d'accueil, Disponibilité, Connectivité
- Application sur El Jadida (Maroc)





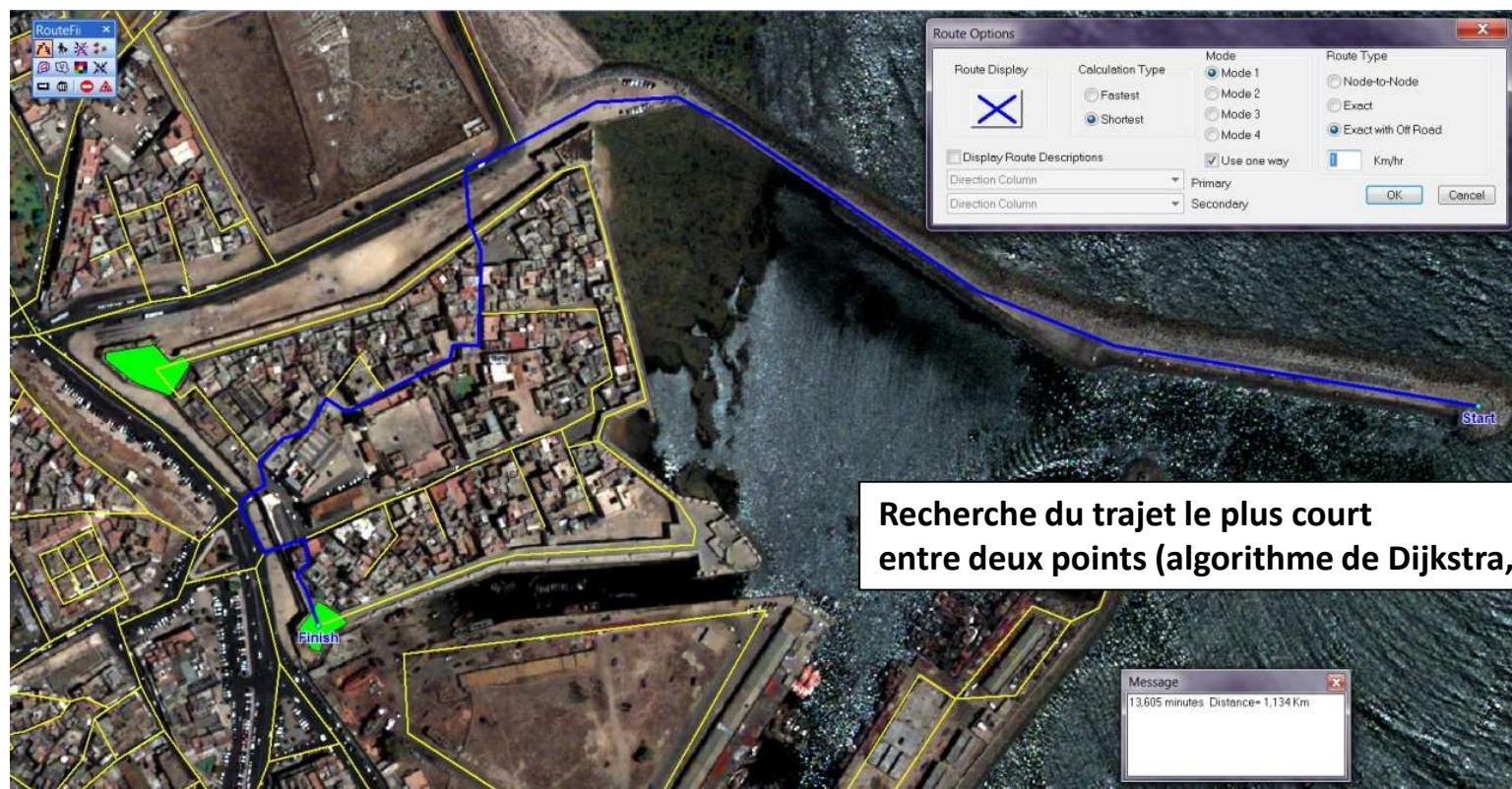
● **Fiches descriptives des zones refuges**

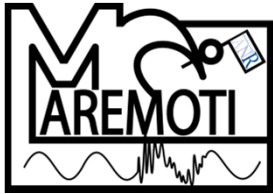


N° ID	Type de zone refuge:	Altitude:	Capacité d'accueil:	Disponibilité:	Connectivité :	Classement :
21	Horizontale	15m	2052 pers 1906 m <sup>2</sup>	-Incertaine	4179	9
Informations complémentaires :		Surface au sol : terrain vague Espace non clôturé				

● **Modèle d'accessibilité des zones refuges basé sur la théorie des graphes**

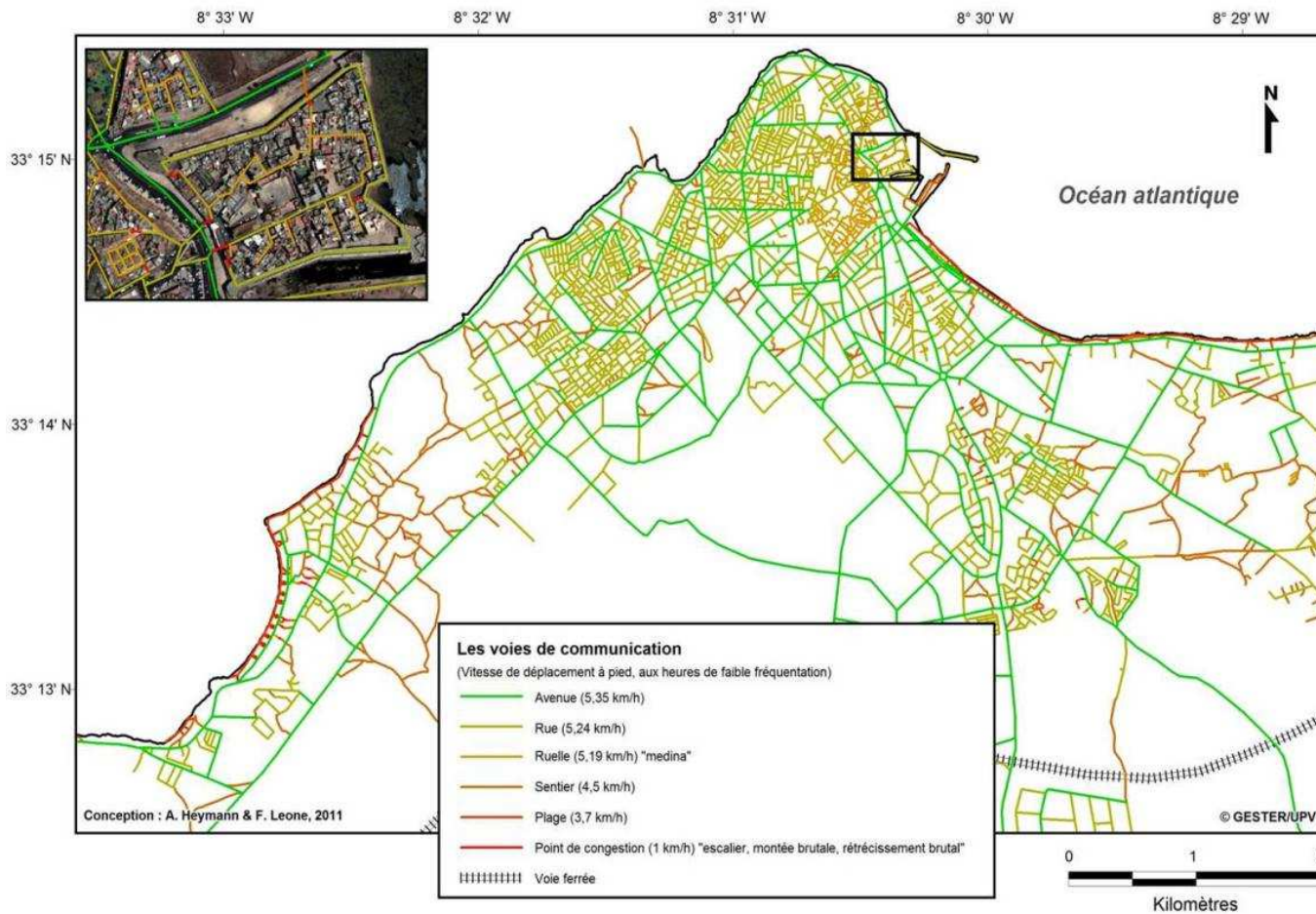
- Macro-simulation en mode vecteur
- Application *RouteFinder*® qui permet :
  - Des calculs d'itinéraires
  - Des matrices d'accessibilité (OD) entre plusieurs lieux
  - De mesurer l'accessibilité au moyen d'isochrones (environnement SIG)



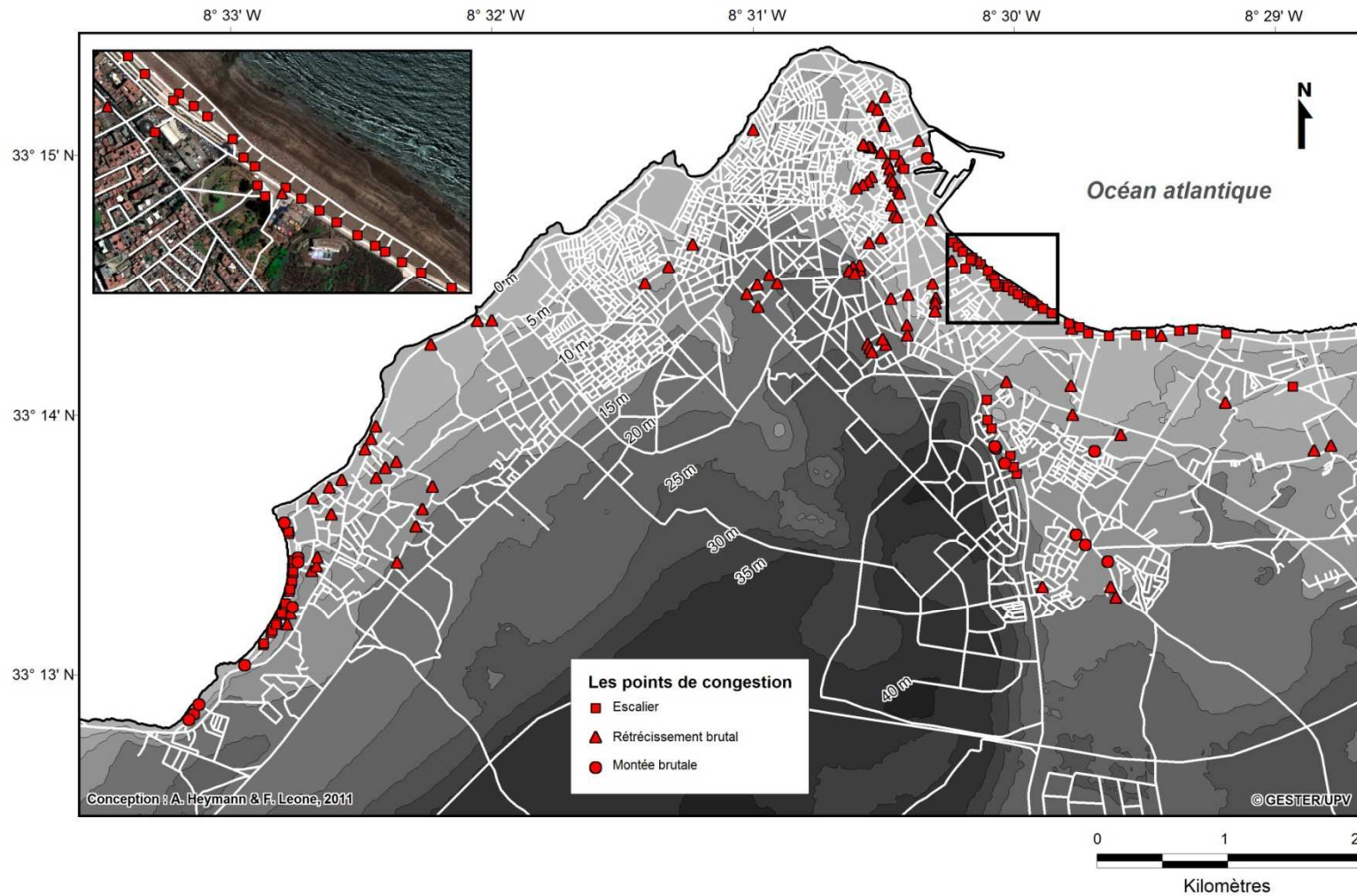


● **Construction du graphe des voies de communication et vitesses associées**

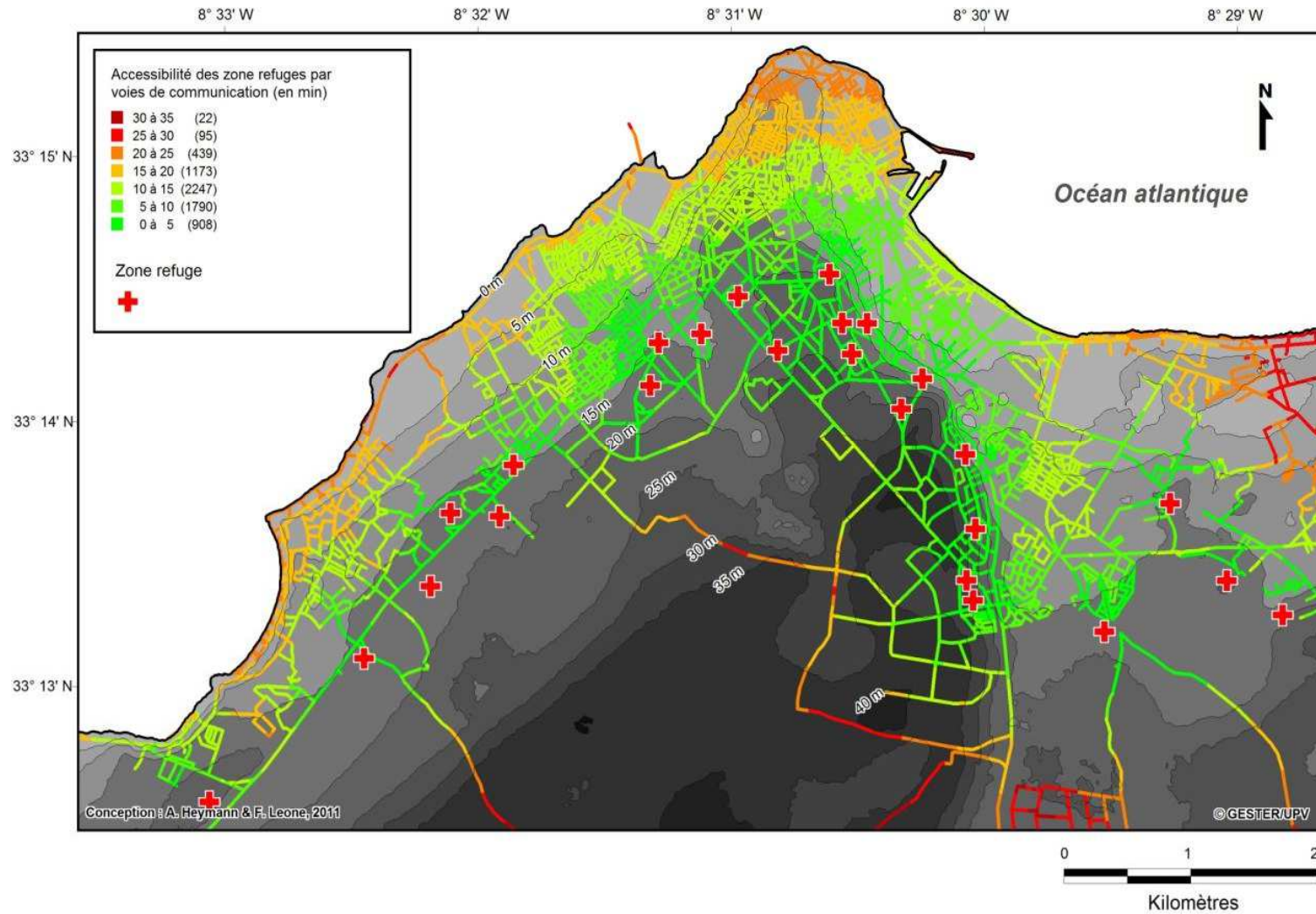
- Vitesses pédestres en fonction du type de voie (largeur, revêtement)
- Vitesses obtenues in situ (exercices avec groupes de personnes)



● Identification des points de congestion du réseau ( $v = 1 \text{ km/h}$ )



● Temps d'accès aux zones refuge (mn)

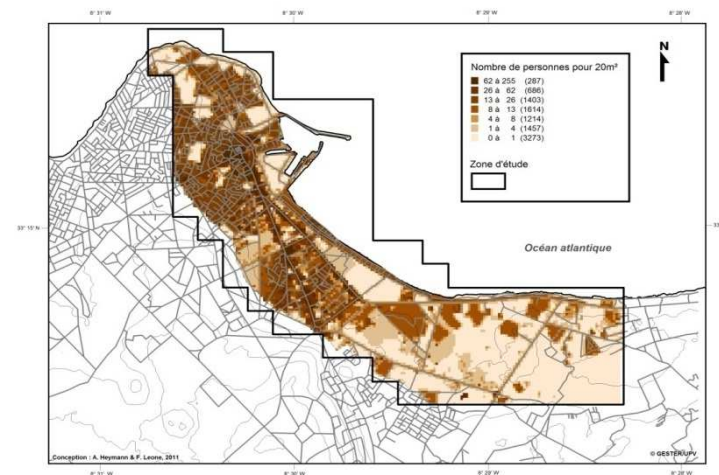


● **Des scénarios d'accessibilité multi-horaires**

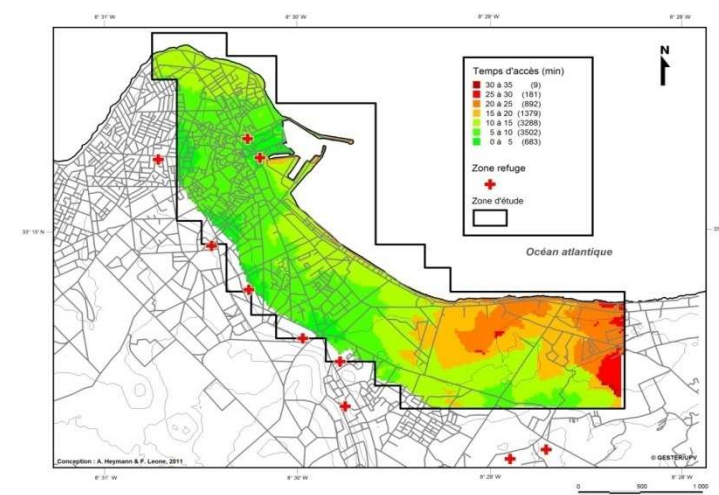
- Des vitesses d'évacuation modulées en fonction des densités humaines (moment)
- En faisant varier le nombre de zones refuges (nuit/jour, capacité)

● → **Optimiser les zones refuges et les itinéraires dans le cadre d'un plan d'évacuation**

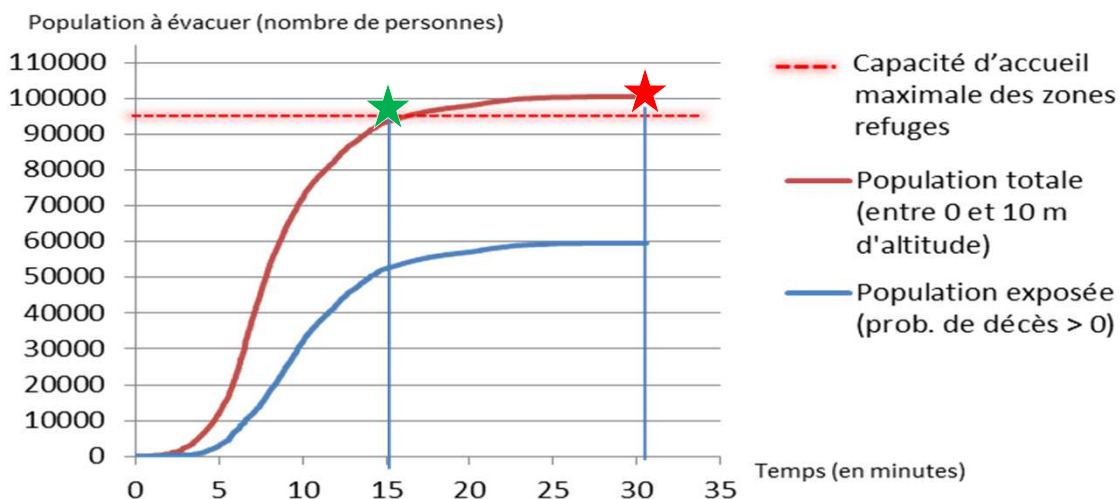
Scénario HS, 18h



Densité de population (haute saison, 18h)

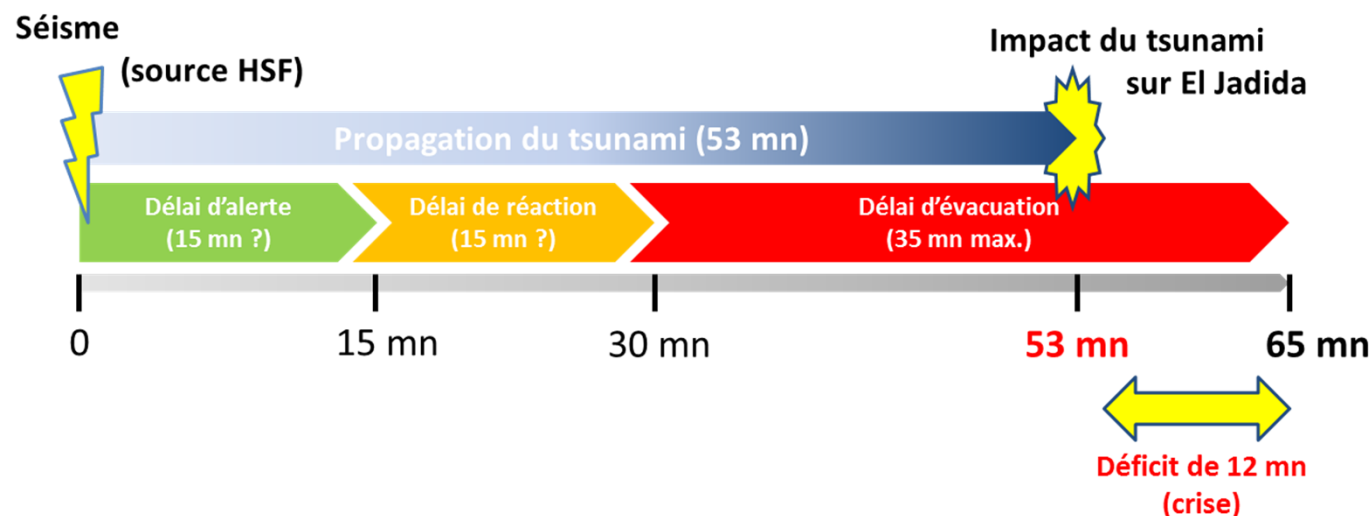


Temps d'accès ZR (haute saison, 18h)



● **Conclusion sur le modèle d'accessibilité**

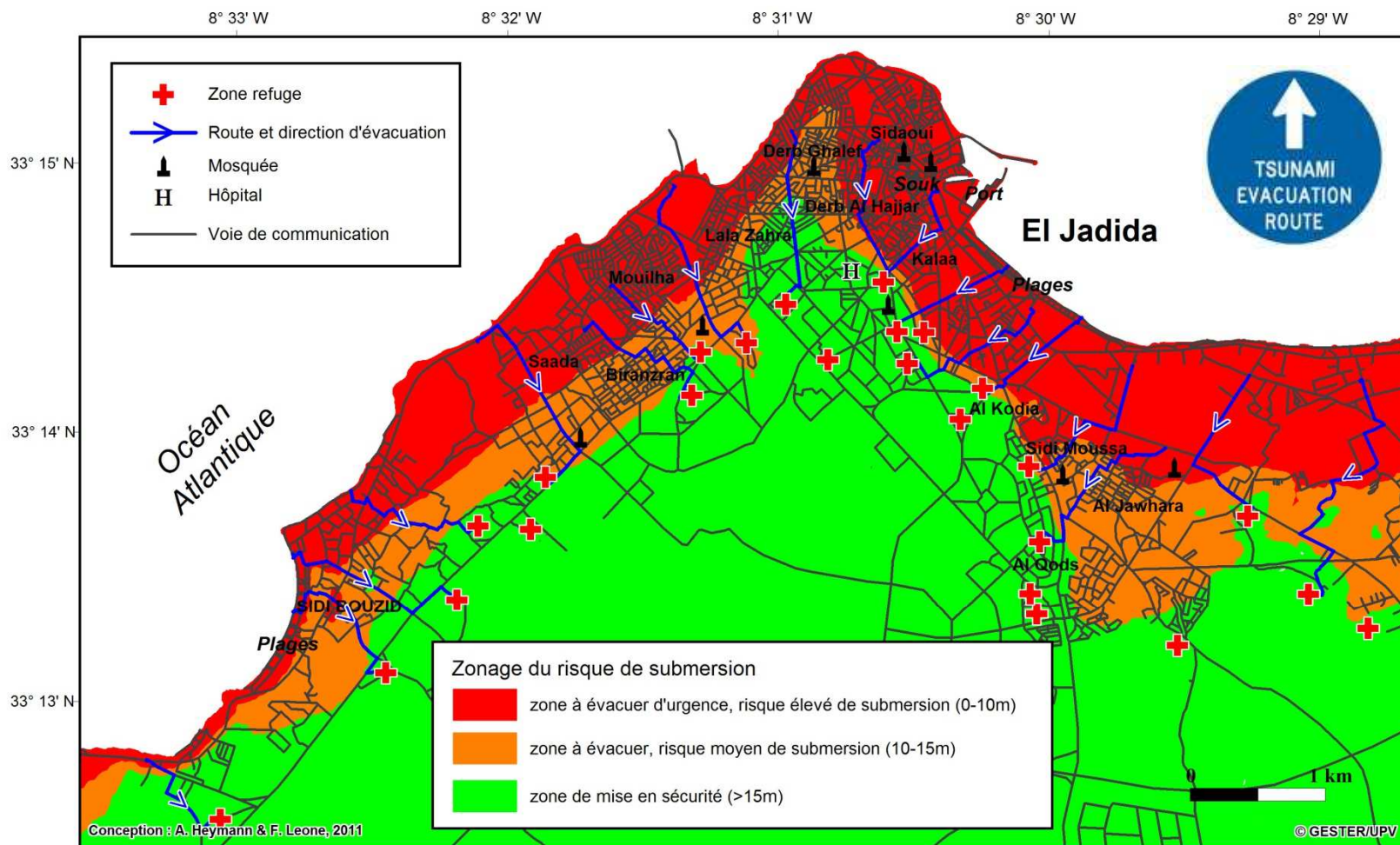
- Un déficit de temps d'évacuation théorique de 12 mn
- Premiers résultats pour établir un plan d'évacuation
- Avec signalétique appropriée (routes, zones)



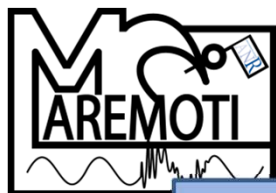
● **Nécessite en amont pour réduire ce déficit :**

- Un système d'alerte (en cours de développement)
- Une éducation spécifique (détection du phénomène, réflexes de protection) - **lesquels ?**
- Un accompagnement des autorités

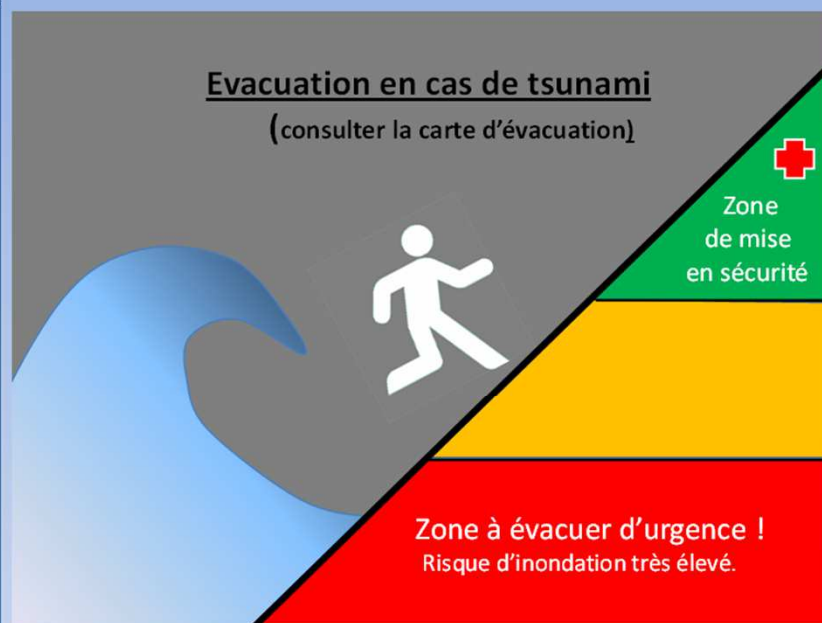
● Affichage du risque et proposition d'itinéraires d'évacuation







## ● Des consignes pour se préparer



### Qu'est ce qu'un tsunami?

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

### Ce qu'il faut savoir:

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

## CONSIGNES D'EVACUATION :

### Quand évacuer?

✓ Lorsque vous interprétez un signe précurseur

Si vous ressentez un séisme ou si la mer se retire anormalement vous devez commencer à évacuer (certains animaux peuvent adopter des comportements suspects)

✓ Lorsque l'alerte est donnée

Soyez attentif à l'alerte donnée par les autorités: sirène, haut parleur, SMS, radio, TV. Dès lors que vous êtes informé de l'alerte, évacuez immédiatement

### Où évacuer?

✓ Vers les hauteurs, en suivant les panneaux de signalisation

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

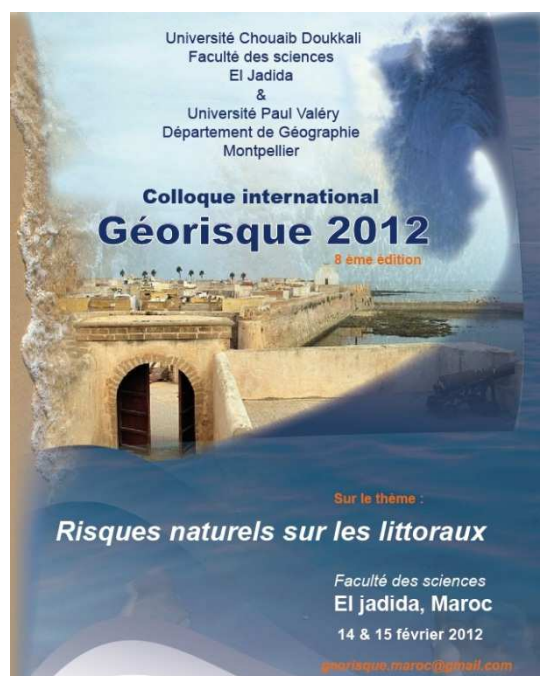


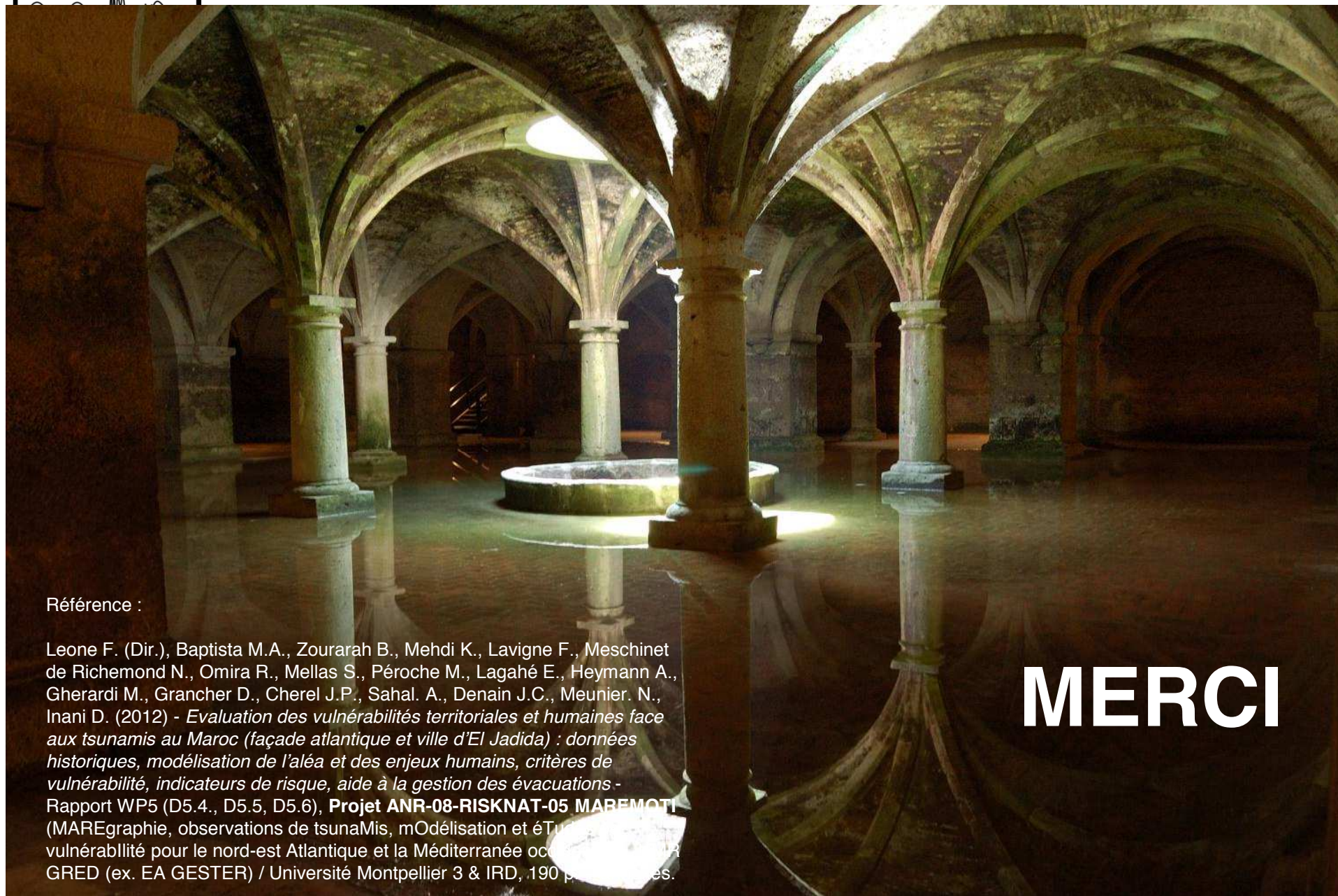
### Le bon comportement à adopter :

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

## ● Conclusion

- **Maremoti** : une opportunité de développer un nouveau modèle de vulnérabilité humaine
- Valorisation des expériences du REX TSUNARISQUE pour l'évaluation du risque
- Evaluation intégrée et spatio-temporelle (variable enjeux du scénario de risque)
- Une certaine finesse dans l'évaluation de l'aléa (Référentiel trait de côte Maroc, MNE)
- Favorisé par coopération avec Univ. D'El Jadida & Lisbonne
- Des résultats nouveaux et utiles pour le Maroc / scénario = exercice fédérateur
- Vers un transfert des résultats aux autorités marocaines : colloque GEORISQUE 2012





Référence :

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-RISKAT-05 MAREMOTI** (MAREgraphie, observations de tsunamis, mOdélisation et éTUde de la vulnérabilité pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée occidentale) - GRED (ex. EA GESTER) / Université Montpellier 3 & IRD, 190 pages.

MERCI