



HAL
open science

Method for Evaluating Vulnerability to Tsunamis of low-to-medium intensity: Application to the French Côte d'Azur

Monique Terrier, Daniel Monfort, Jérôme Lambert, Sylvestre Le Roy, Rodrigo Pedreros, Olivier Sedan

► To cite this version:

Monique Terrier, Daniel Monfort, Jérôme Lambert, Sylvestre Le Roy, Rodrigo Pedreros, et al.. Method for Evaluating Vulnerability to Tsunamis of low-to-medium intensity: Application to the French Côte d'Azur. Fifth International Tsunami Symposium, Sep 2012, ISPRA, Italy. 15 p. hal-00717416v1

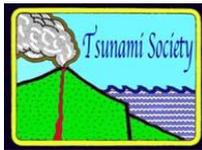
HAL Id: hal-00717416

<https://brgm.hal.science/hal-00717416v1>

Submitted on 12 Aug 2012 (v1), last revised 20 Aug 2012 (v2)

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

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



*Proceedings of the Fifth International Tsunami Symposium
(ISPRA-2012)
Tsunami Society International
3-5 Sept. 2012, Joint Research Centre, Ispra, Italy*



Méthode d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis de faible à moyenne intensité : application à la côte d'Azur (France)

M. Terrier, D. Monfort, J. Lambert, S. Le Roy, R. Pedreros & O. Sedan
Bureau de Recherche Géologique et Minières, Orléans, France

SUMMARY:

Aujourd'hui, l'étude du risque de tsunami est devenue une préoccupation récurrente pour les zones littorales fortement fréquentées et ce même pour les régions a priori les moins exposées au phénomène. Dans ce cadre, le BRGM a réalisé et gère depuis 5 ans une base de données historiques sur les tsunamis ayant pu toucher les côtes françaises. En parallèle, des simulations de tsunamis pour des événements majeurs plausibles sismiques ou gravitaires ont été réalisées. Elles ont démontré que le sud de la France est exposé à un risque de tsunami d'intensité faible à moyenne. Entre 2009 et 2010, le projet de recherche RATCOM a permis de fixer les principes d'évaluation de la vulnérabilité et des calculs de dommages et préjudices humains pour des tsunamis modérés. La méthode développée est complémentaire de celles déjà élaborées pour des tsunamis de plus forte intensité. Via l'outil de simulation de scénarios de risques, BRICE (©brgm), les applications de cette méthode, démontrent que, en quelques décennies seulement, le risque s'est accru de façon considérable et cela même pour des tsunamis de faible à moyenne intensité (hauteur d'eau inférieure à 1m). Ceci est dû principalement à l'augmentation exponentielle de l'urbanisation de littoral et de la pression touristique. Même s'ils ne produiront pas des destructions de bâtiments comparables aux événements de 2004 d'Indonésie ou de 2011 du Japon, des phénomènes de faible intensité peuvent déjà y causer des graves préjudices humains. Sur la côte d'Azur, le nombre de victimes potentielles est suffisamment élevé pour nécessiter la mise en place dès aujourd'hui des mesures préparatoires visant à faire face à l'éventualité d'un tel scénario.

Keywords: tsunami, base de données, simulation, dommages, France

1. INTRODUCTION

La connaissance du risque, c'est l'évaluation de l'aléa aux tsunamis (zone exposée, intensité du phénomène/probabilité d'occurrence), c'est aussi l'évaluation de la vulnérabilité des enjeux aux tsunamis. L'évaluation de l'aléa tsunamis d'une région repose sur deux composantes principales : une bonne connaissance des événements passés et la simulation d'événements tsunamigéniques. L'interprétation de ces informations doit permettre de localiser les zones les plus exposées et le niveau d'intensité correspondant. La connaissance des événements passés concernent les études de paléo-tsunamis (observations géologiques et/ou archéologiques, période de temps couverte parfois jusqu'à plusieurs milliers d'années), et l'étude des archives (période de temps couverte généralement de quelques siècles, plus rarement la période antique). La simulation des événements tsunamigéniques concernent non seulement des événements fictifs plausibles, mais aussi la modélisation d'événements passés. Dans le 2nd cas, il faudra pouvoir confronter les résultats des modèles avec les informations sur les tsunamis historiques les plus fiables possibles. La synthèse de ces informations (archives, simulations) permet alors une évaluation de l'aléa.

Après le tsunami catastrophique de l'océan indien en décembre 2004, de nombreux travaux ont été développés dans le but de mieux comprendre la vulnérabilité structurelle et humaine aux tsunamis. Basées sur le calcul de courbes de dommages aux bâtis en fonction de l'intensité du tsunami, les méthodes développées suivent une démarche comparable à celles relatives à l'évaluation de la vulnérabilité et du risque aux séismes telles que celles de HAZUS (FEMA, 2004) ou Risk-UE (Lagomarsino et al., 2006; Giovinazzi, 2005). Ces méthodes applicables pour les tsunamis de forte intensité ne permettent pas d'évaluer le risque en cas de tsunami d'intensité faible à moyenne, c'est-à-dire, où l'énergie du tsunami est insuffisante pour causer des dégâts structurels majeurs mais par contre suffisante pour générer des préjudices humains. Entre 2009 et 2010, le projet de recherche RATCOM a permis de fixer les principes d'évaluation de la vulnérabilité et des calculs de dommages et préjudices humains pour des tsunamis modérés. En parallèle, soutenu par l'UNESCO, un Centre d'Alerte aux Tsunamis, CENALT, a été mis en place. Il surveille les forts séismes et les tsunamis survenant en Méditerranée occidentale et dans l'Atlantique nord-est. Concernant le territoire français, la direction générale de la sécurité civile (DGSC) du ministère de l'Intérieur a été chargée de la coordination du projet ALDES relatif la partie descendante du système d'alerte aux tsunamis. C'est dans ce cadre que plusieurs scénarios de tsunamis avec mise en application de la méthode d'évaluation développée dans le projet RATCOM ont été réalisés sur des segments du littoral du sud de la France.

Les travaux réalisés par le BRGM ces dernières années, en particulier au niveau de la côte méditerranéenne française, s'intègrent dans la chaîne globale d'évaluation et de gestion du risque de tsunamis, avec : la réalisation d'une base de données événementielles historiques, l'identification régionale de sources tsunamigéniques et la simulation de tsunamis majeurs plausibles, la proposition d'une méthode d'évaluation de dommages et préjudices pour des tsunamis de faible à moyenne intensité et son application à des fins de gestion locale du risque.

2. RECHERCHE SUR LES TSUNAMIS AYANT PU ATTEINDRE LES COTES FRANÇAISES

2.1. Méthode de travail

La recherche sur les tsunamis historiques ayant pu toucher les côtes françaises (métropole, île de la Réunion, Antilles, Nouvelle-Calédonie), engagée depuis 2005, consiste en :

- rechercher et acquérir les sources documentaires originales, manuscrites ou imprimées les plus contemporaines de l'événement : les « primary sources »,
- couvrir un champ d'investigations très large, documentation recherchée en France et à l'étranger, et de nature diverse : livres, articles scientifiques, articles historiques, manuscrits, journaux, récits de voyageurs, chroniques, catalogues de séismes, etc.
- en parallèle, rechercher des données météorologiques : fortes tempêtes subies sur les côtes de France métropolitaine ou sur ses marges, ouragans et cyclones dans les îles françaises de l'Océan Indien, de l'Océan Pacifique et de la Mer des Caraïbes.
- dans la mesure du possible (c'est-à-dire selon la qualité des informations), analyser et interpréter les caractéristiques physiques et le calibrage de ces phénomènes sur l'échelle internationale Ambraseys-Sieberg (6 degrés d'intensité croissante),
- rechercher la cause de l'événement : séisme, mouvement de terrain, explosion sous-marine, éruption volcanique, météorite, seiche, dépression météorologique, ou toujours inconnue.

Concernant les événements dont la description documentaire ne laisse aucun doute sur la nature tsunamigène du phénomène (mouvements de flux et de reflux des eaux ou mouvement de retrait et d'inondation de la mer dans un espace-temps spécifique, etc.), chaque événement est décrit par une suite de paramètres caractérisant l'onde tsunamigène dans la localité où le tsunami a été observé. Aujourd'hui, le catalogue référencé aujourd'hui 80 événements (Lambert et Terrier, 2011) structurés en une base de données accessible sur le WEB à l'adresse www.tsunamis.fr.

2.2. Catalogue des tsunamis répertoriés au niveau de la façade française de la Méditerranée

La majorité des tsunamis observés au niveau de la façade française de la Méditerranée sont encore d'origine méconnue. Quelques glissements sous-marins sont cependant bien identifiés comme celui de 1979 à Nice ou comme celui de 1564 à Antibes et Villefranche-sur-Mer, ce dernier ayant été déclenché par un séisme dont l'épicentre (Intensité VIII MSK) était situé à 40 kilomètres à l'intérieur des terres. D'autres tsunamis de la côte méditerranéenne ont une origine sismique certaine, comme celui de 1887 largement ressenti sur la Côte d'Azur, ou ceux de 1819 et 1831 limités, semble-t-il, à la proximité des côtes françaises (San Remo).

3. SIMULATION DE SCENARIOS DE TSUNAMIS RELATIFS AU LITTORAL MEDITERRANEEN FRANÇAIS

Avec le catalogue des tsunamis historiques, la simulation d'évènements tsunamigènes, historiques ou fictifs constitue un préalable indispensable à l'évaluation de l'aléa. En effet, à partir de scénarios choisis pour leur caractère majorant vis-à-vis des côtes étudiées, les simulations permettent de disposer d'éléments généraux sur le niveau d'exposition potentielle des côtes et d'appréhender l'incidence et la forme sous laquelle les tsunamis peuvent se présenter en atteignant le littoral. C'est dans ce cadre que plusieurs scénarios ont été réalisés. Cette partie du travail a consisté en : 1) la caractérisation des sources tsunamigènes pour la côte méditerranéenne française ; 2) la réalisation de plusieurs grilles bathymétriques à différentes échelles adaptées aux tsunamis en champ proche et lointain ; 3) le choix et la simulation d'évènements de référence ; 4) la réalisation de cartes de hauteur maximale du plan d'eau et des temps d'arrivée à la côte pour chaque scénario.

3.1. Sources tsunamigéniques d'origine sismique

Une cartographie et caractérisation sismogénique des failles actives du territoire marin n'étant pas réaliste dans l'état actuel des connaissances, la phase d'identification des sources tsunamigènes d'origine sismique devait donc reposer sur un zonage sismique. A cette fin, différentes sources de données géologiques (cartes géologique d'Europe et sismotectonique du Bassin méditerranéen, autres publications), bathymétriques et sismologiques ont été rassemblées et interprétées. Elles ont conduit à un zonage sismique de la Méditerranée occidentale de type déterministe, e.g. see Fig. 1. Le zonage réalisé (Terrier, 2007) décrit pour chaque zone sismique : 1) les principales caractéristiques tectoniques et sismiques, avec selon le cas, la période de retour des très forts séismes, 2) le séisme le plus fort enregistré ou indiqué dans les archives, 3) les valeurs du séisme maximal retenues pour l'étude (magnitude, dimensions du plan de faille rompu, glissement).

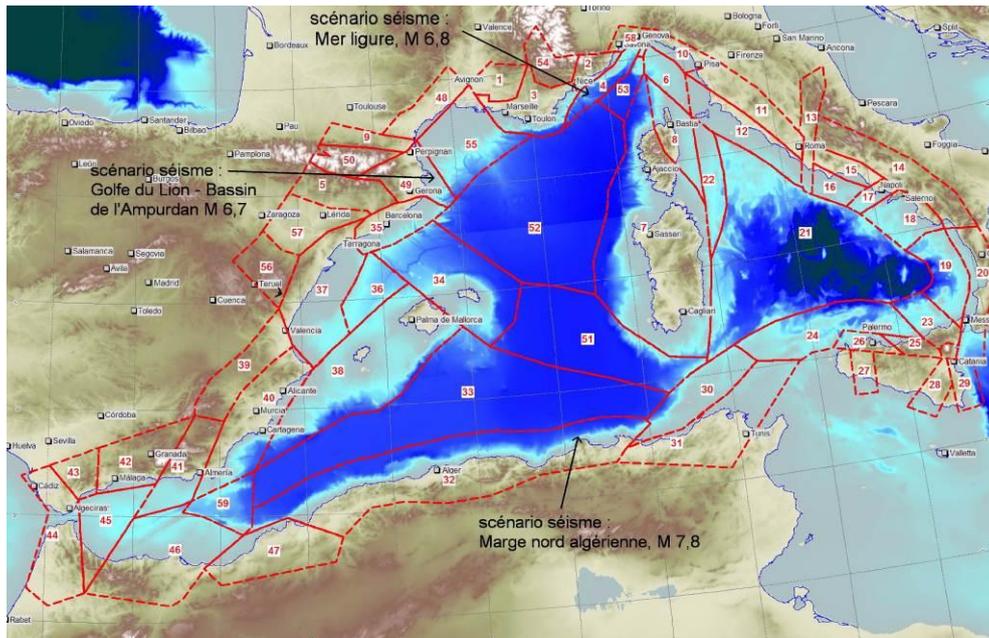


Figure 1 - Zonage sismique et choix des scénarios de sources sismiques pour l'étude du risque de tsunamis du littoral méditerranéen français (Terrier, 2007)

3.2. Sources tsunamigéniques d'origine gravitaire

Au large de la côte méditerranéenne française, le territoire maritime présente une morphologie très irrégulière avec localement des fortes pentes. Il peut par ailleurs être recouvert de formations relativement meubles et épaisses. Il s'agit donc de zones propices à des glissements sous-marins. Sur la base des données bathymétriques, de la connaissance des corps sédimentaires sous-marins et en s'appuyant sur les événements gravitaires fossiles ou actuels connus, un zonage des mouvements gravitaires sous-marins du plateau et du talus continental au large des côtes méditerranéennes françaises a été confié à l'IFREMER (Cattaneo, 2007), e.g. see Fig. 2. Chacune des zones est caractérisée par un glissement-type de volume maximal pour une période de retour de l'ordre de quelques dizaines d'années à quelques milliers d'années. Chaque glissement-type est décrit avec les paramètres suivants : longueur, largeur, épaisseur maximale, pente moyenne, profondeur moyenne, nature des sédiments déstabilisés, "SLUMP" ou "SLIDE", RUNOUT, direction de propagation. Le détail du zonage et de sa réalisation est donné par Cattaneo (2007).

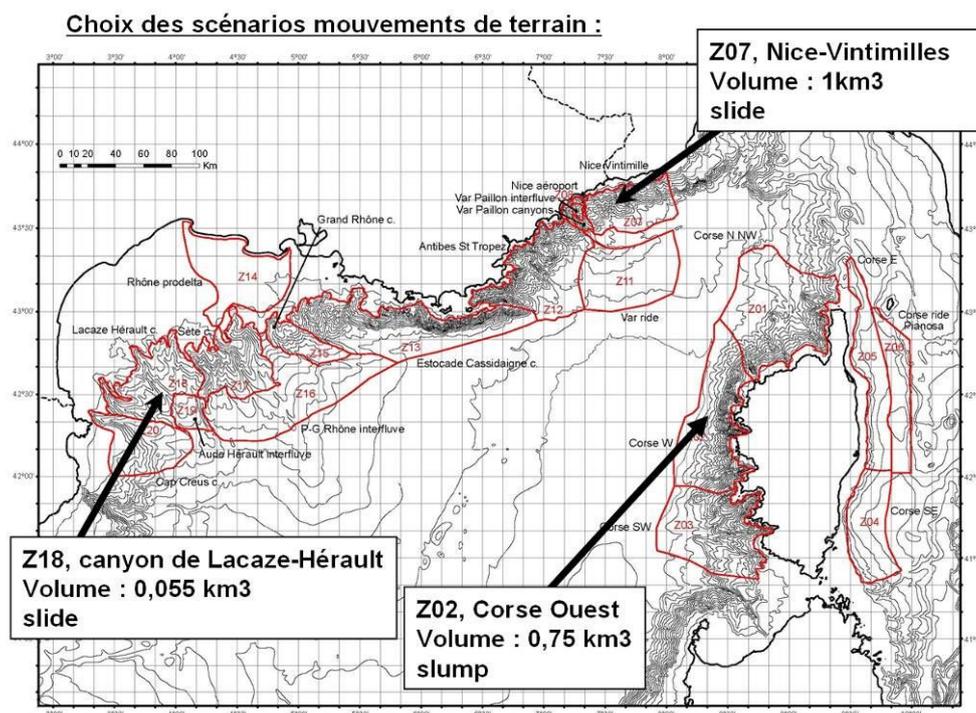


Figure 2. Zonage mouvements de terrain sous-marins et choix des scénarios pour l'étude du risque de tsunamis du littoral méditerranéen français (Cattaneo, 2007)

3.3. Simulations d'évènements majeurs plausibles

Plus d'une vingtaine de simulations sur des grilles de faible résolution (mailles de 2250 m à 750 m de côté) ont été dans un premier temps réalisées. Elles se réfèrent soit à des évènements historiques soit à des évènements fictifs. Ces calculs préalables ont permis une meilleure orientation du choix des six scénarios de référence (e.g. see Fig. 1 et 2) pour lesquels des calculs avec des mailles plus fines ont été conduits. Il s'agit d'évènements maximum plausibles, de période de retour vraisemblablement de plusieurs centaines d'années à quelques milliers d'années. Les résultats acquis (Pedreros et Poisson, 2007 ; Terrier et al., 2007) montrent que le littoral méditerranéen français n'est pas à l'abri des tsunamis (e.g. Table 1). Toutefois l'intensité attendue reste relativement modérée.

	Magnitude ou volume	Amplitude maximale des vagues au rivage	Temps d'arrivée	Secteur côtier français concerné (amplitude > 0,5 m)
Séisme Nord Ligure	M = 6,8	2 m à Antibes	10' à 15'	St Tropez à Nice
Séisme marge nord algérienne	M = 7,8	4 m à St-Tropez, Cannes 3 m à La Ciotat, Nice, Villefranche	95' à 100'	Marseille à Menton
Séisme golfe du Lion	M = 6,7	0,6 m à Agde, Port-la-Nouvelle	60' à 80'	Entre Perpignan et Béziers
Glissement marge occidentale corse	V = 0,75 km ³	5 m à 6 m au nord de Porto	5' à 15'	Moitié sud-ouest du littoral entre Porto et Bastia
Glissement canyon Lacaze-Hérault	V = 0,055 km ³	1,5 m à Perpignan 1 m à Frontignan et Beauduc (Capelude)	45' à 80'	Perpignan à Beauduc
Glissement marge Nice-Vintimille	V = 1 km ³	4 m à Antibes 3 m à Nice	10' à 20'	St-Tropez à Menton (jusqu'à San Remo en Italie)

Table 1. Synthèse des résultats des scénarios de tsunamis (Terrier et al., 2007)

4. EVALUATION DES DOMMAGES ET PREJUDICES POUR DES TSUNAMIS DE FAIBLE A MOYENNE INTENSITE

Pour la façade méditerranéenne française, l'analyse des tsunamis historiques et les simulations d'événements tsunamigéniques majeurs indiquent une hauteur maximale du niveau d'eau généralement inférieure à 4m. Il s'agit donc de tsunamis d'intensité faible à moyenne, c'est-à-dire inférieur au degré 4 de l'échelle Sieberg modifiée par Ambraseys (1962) ou d'intensité VI de l'échelle de Papadopoulos et Fokaefs (2005). Entre 2009 et 2010, le projet de recherche RATCOM a permis de fixer les principes d'évaluation de la vulnérabilité et des calculs de dommages et préjudices humains pour des tsunamis modérés (Monfort & al., 2010). La méthode développée est complémentaire à celles déjà élaborées pour des tsunamis de plus forte intensité. Elle permet une estimation quantitative des dommages aux personnes et aux biens pour différents niveaux d'agression (scénario de tsunami), sachant que : 1) l'aléa attendu pour la façade méditerranéenne française est faible à moyen, avec des surélévations du niveau d'eau qui ne dépassent pas les 3 mètres ; 2) Les enjeux les plus exposés y sont les zones portuaires (les plus impactées par les tsunamis historiques) et la population (phénomène touristique récent, après-guerre) ; 3) Vu le contexte, selon le type du bâti, celui-ci peut avoir fonction de « refuge ». Les étapes méthodologiques suivantes sont distinguées : le choix et la cartographie des enjeux, l'évaluation de leur vulnérabilité, la simulation du tsunami et l'évaluation des préjudices.

4.1. Choix et cartographie des enjeux

Le choix des enjeux tient compte de l'analyse en retour des tsunamis de moyenne intensité et du contexte socio-économique (densité humaine très élevée pendant les périodes touristiques). Les enjeux considérés sont :

- La densité de population par quartier et en fonction des différentes époques de l'année (hiver, été) et de la journée (nuit, après-midi), s'inspirant des données sur la plage des Ponchettes à Nice (Robert et al. 2008). Le découpage par quartier tient compte du type de bâti rencontré, de l'usage du sol (plage, zone commerciale, etc.) et de la topographie. Chaque entité géographique est considérée homogène par rapport aux 3 critères précités.
- Les campings.
- Les parkings souterrains (nombre de niveaux et de places).
- Les ports de plaisance ou de pêche (nombre d'amarres).
- Les axes de communication (routes et voies ferrées).
- Les bâtiments situés en front de mer (emprise au sol et type de bâti). La typologie du bâti tient compte des ouvertures au rez-de-chaussée, du nombre d'étages, de la présence de cave. Une distinction est faite entre les structures légères (cabanes de front de mer par exemple) et les structures lourdes et renforcées.

La caractérisation des enjeux est réalisée sur la base d'une enquête sur le terrain et menée auprès des collectivités territoriales et offices de tourisme. Elle est complétée par une analyse minutieuse des photographies aériennes multi-dates (délimitation des quartiers, répartition du bâti, et selon, indication moyenne de la fréquentation des plages par comptage des individus).

4.2. Evaluation de la vulnérabilité des enjeux

4.2.1 Population située à l'extérieur des bâtiments

L'évaluation de la vulnérabilité humaine dépend schématiquement de la capacité des personnes à se défendre (via notamment sa capacité à se déplacer) ou à résister à une inondation. L'inondation peut être caractérisée suivant différents facteurs physiques tels que la durée de submersion, la hauteur d'eau, la direction et la vitesse du courant, la charge solide transportée. Koshimura et al. (2006) proposent des limites au-delà duquel il y a danger important avec risque de noyade, c'est-à-dire limite de capacité de déplacement, calculées en fonction de la hauteur d'inondation et de la vitesse du courant. Les résultats de Koshimura et al. sont globalement cohérents avec ceux retenus par l'état français dans le cadre de l'élaboration des Plans de Préventions des Risques aux Inondations. Dans le

cadre de RATCOM, la composante agression est exprimée par le couple de valeurs « hauteur d'eau / vitesse » à un instant déterminé, e.g. see Fig.4. Grace à cette limite, il est possible d'identifier, au cours du temps que va durer l'inondation, les zones où les personnes peuvent résister au flux par eux-mêmes ou non. Cette courbe ne tient cependant pas compte de la mobilisation d'objets lourds et/ou volumineux qui peut constituer une gêne supplémentaire au déplacement des personnes.

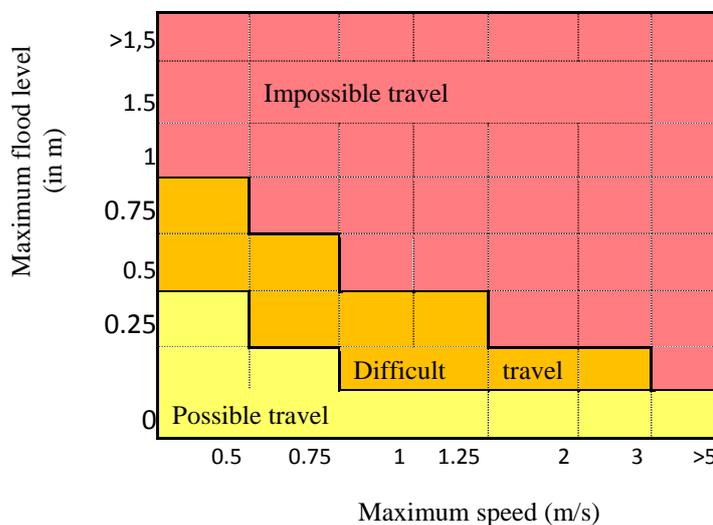


Figure 4. Limite de capacité de déplacement retenue dans le cadre du projet RATCOM

Sur la base d'analyses en retour d'événements tsunamigènes catastrophiques, Guha-Sapir (2006) et Nishikiori et al. (2007) ont observé des taux de mortalité entre 6% et 10% d'une population de personnes emportées par le courant. Suite au tsunami de 2011 à l'Est du Japon, Mimura et al. (2011) ont calculé un taux de mortalité entre 3,3% et 15% selon la localité. Sur la base de ces travaux, pour une population impactée avec impossibilité de se déplacer et située à l'extérieur des bâtiments, un taux de mortalité moyen de 10% a été retenu.

4.2.1 Population située à l'intérieur des bâtiments

L'analyse en retour des événements historiques et contemporains montrent que hors tsunami généré par un séisme proche (vibration fortement ressentie) dans tous les cas, il vaut mieux être dedans (hors sous-sol) que dehors. La démarche d'évaluation de la vulnérabilité des personnes situées à l'intérieur des bâtiments et exposées à la seule agression du tsunami suit les 4 étapes suivantes :

1) Typologie du bâti, en fonction du nombre d'étages et de la transparence du RDC :

Type 1. Bâtiment à plusieurs niveaux avec un rez-de-chaussée, RDC, transparent (présence de magasins, baies vitrées) qui favorisent l'entrée de l'eau au RDC.

Type 2. Bâtiment à plusieurs niveaux avec un RDC fermé, c'est-à-dire avec des murs qui le protègent de l'impact de la vague.

Type 3. Bâtiment à un seul niveau (RDC) transparent.

Type 4. Bâtiment à un seul niveau (RDC) avec des murs qui le protègent de l'impact de la vague.

2) Cartographie du bâti (localisation, emprise au sol et type de bâti)

3) Pour chaque type de bâti, une matrice d'exposition est définie (e.g. see Fig 5). Sur la base des travaux de Kelman (2002) et des valeurs considérées dans le cadre des Plans de Prévention des Risques pour le territoire français, plusieurs niveaux d'exposition ont été distingués. Ils dépendent de la vitesse du flux maximale et de la hauteur d'eau maximale :

- Niveau 0, bâtiment non inondé.
- Niveau 1, bâtiment inondé, population au RDC non emportée. Les personnes qui se situent au RDC sont impactées par la vague mais peuvent se déplacer. Dans le cas d'un bâtiment à plusieurs étages, ces personnes pourront migrer vers l'abri des niveaux supérieurs.

- Niveau 1.5, bâtiments de plein pied, protégés par un mur d'enceinte, inondé. Les personnes pourront se déplacer mais n'auront nulle part où se réfugier.
- Niveau 2, bâtiment inondé, la population du RDC est emportée/piégée. Les personnes que se situent au RDC sont emportées par les vagues ou noyées. En cas d'un bâtiment à plusieurs étages, la population qui est dans les niveaux supérieurs restera à l'abri. Certaines parties du bâtiment peuvent être endommagées.



Figure 5. Matrices d'exposition aux tsunamis en fonction du type de bâti

Pour la population qui serait piégée dans le RDC des bâtiments exposés à un niveau 2, sur la base des travaux de Guha-Sapir (2006), un taux de mortalité de 4% est retenu.

Les sous-sols (caves et parkings) font l'objet d'un type spécifique. Le risque est considéré de niveau 2 dès que l'inondation les atteint.

Pour des agressions supérieures à celles retenues pour les niveaux 0 à 2, le comportement du bâti peut être estimé en utilisant les courbes de vulnérabilité conçues à partir des observations du tsunami de l'océan Indien en 2004 ou celles proposées par Guillaude et al. (2009), Garcin et al. (2007), Peiris (2006), et Léone et al. (2006).

4.3. Vulnérabilité des zones portuaires

Lors d'un tsunami modéré, parmi les biens les plus endommagés, ce sont les bateaux amarrés dans les ports. Dans la mer méditerranée, où les marées sont très faibles, les bateaux sont amarrés avec peu de mou. En cas de variation soudaine et forte du niveau de la mer, les amarres très rapidement tendues à rompre se brisent, libérant les bateaux. Ceux-ci vont se percuter ou toser sur les aménagements

portuaires ou sur le fond. Les variations de niveaux liées aux flux et aux reflux provoquent des forts courants à l'intérieur des ports. Concernant la méthodologie mise en œuvre, l'agression est exprimée comme une variation du niveau d'eau (e.g see table 2). L'estimation des dommages s'appuie sur des analyses en retour de tsunamis ou raz-de-marée en Méditerranée, tel que celui de Boumerdès (2003) avec les dommages dans les ports des îles des Baléares. Très généralement, on observe des dégâts beaucoup plus importants pour les petites embarcations (pêche, loisir) que pour les grands navires. Concernant les petits bateaux, le risque pour les personnes qui logent dans les bateaux sera directement lié à celui des embarcations.

Variation du niveau d'eau dans le port	Niveaux des dégâts	% des bateaux endommagés
< 0.5 m	Variation acceptable.	
0.5 - 2 m	Quelques bateaux endommagés. Endommagement des parties mobiles des installations.	Entre 10 et 20% (situation de Boumerdès à Minorque ou à Théoule-sur-Mer)
> 2 m, forts courants	Risque fort de rupture des amarres. Risque fort d'endommagement et de destruction des bateaux. Certains équipements fixes du port sont endommagés.	50% (situation après la « sèche » de 2006 à Minorque).
Port vidé, vague par-dessus la digue.	Bateaux / barques cognent le fond. Endommagement très important pour les bateaux et les installations. Possible rupture des jetées. Mise au sec des embarcations.	

Table 2. Evaluation du risque pour les ports et les zones portuaires

5. APPLICATION A UN SCENARIO TYPE TSUNAMI 1979 A NICE (FRANCE)

La méthode d'évaluation de la vulnérabilité a été testée avec une application sur la Côte d'Azur (sud de la France), avec un évènement type glissement de Nice 1979 et quatre scénarios temporels : mi-janvier 2012, 2h et 15h ; scénarios de mi-août 2012, 2h et 15h. Les paramètres du glissement (e.g. see Table 3) retenus pour la simulation sont tirés des travaux de Silva Jacinto et Meyniel (2010).

Paramètres	Valeurs retenues
Position initiale du centre de gravité (WGS 84)	N 43°38'44.4" E 007°12'55.0"
Position initiale du centre de gravité équivalente (Lambert 3, m)	X= 993 360 Y= 161 180
Direction du glissement (exprimée par rapport au nord)	182,3°
Profondeur du glissement (m)	47
Pente moyenne du glissement (°)	10,2
Longueur maximale du volume glissé (m)	900
Largeur maximale du volume glissé (m)	700
Epaisseur maximale du volume glissé (m)	50
Densité du matériau glissé	1,4

Table 3. Paramètres retenus pour la description du glissement de l'aéroport de Nice pour la modélisation de la source tsunamigène

La simulation numérique de la génération et la propagation du tsunami a été effectuée avec le code GEOWAVE (Watts *et al.*, 2003). Puis, afin de modéliser au mieux la submersion à terre en milieu urbanisé (prise en compte du bâti et des ouvrages côtiers), un couplage a été développé entre les codes GEOWAVE et SURFWB (Marche *et al.*, 2007). Concernant les données bathymétriques et topographiques utilisées, celles-ci ont permis 3 grilles de calcul emboîtées et de résolution croissante

du talus continental à la côte (pixel à 45m, 15m, 4m). Le contour et l'altitude du bâti et les ouvrages côtiers extraits de la couche « bâti » de la BDTopo de l'IGN ont été superposés au MNT.

5.1. Simulation du tsunami

Les élévations maximales de la surface libre atteintes sur l'ensemble de la période de 20 minutes simulées indiquent l'importance particulière qu'a pu prendre le tsunami au niveau d'Antibes (e.g. see Fig.4).

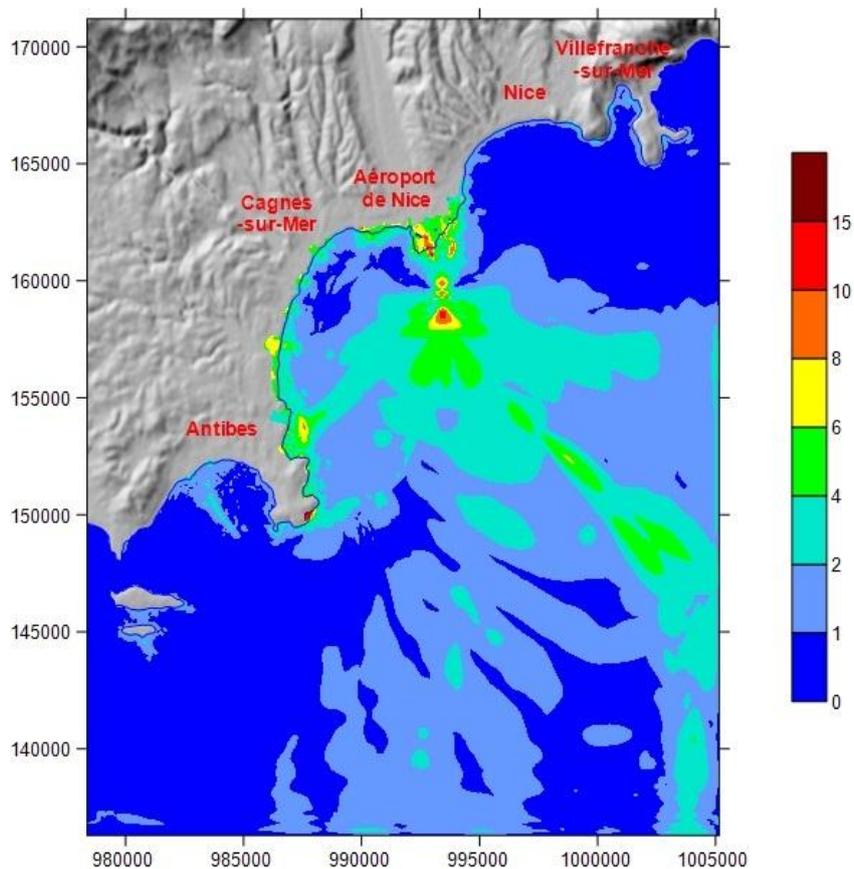


Figure 4. Simulation du tsunami type Nice 1979 : Elévation maximale (en m) de la surface du plan d'eau

La submersion a été calculée sur une grille de mailles de 3,75 m x 3,75 m. Elle indique que l'arrivée de la première vague sur la côte semble causer la majeure partie de l'inondation, les vagues suivantes ne venant que renforcer cette inondation, et ce avec des vitesses de courant globalement moins élevées. La hauteur maximale de l'inondation atteint en moyenne de 1 à 2,5 m, voire 4 à 5 m très localement (e.g. see Fig. 5). Pour la profondeur maximale d'inondation (distance inondée depuis la côte), la simulation donne 150 à 200 m au nord de la zone d'étude, une centaine de mètres au niveau de la grande plage au nord-ouest (soit jusqu'aux bâtiments), une soixantaine de mètres au niveau de la plage à coté du port de la Salis (voire un peu plus quand l'eau a pu pénétrer dans les rues), et de l'ordre de 110 m au niveau du port de la Salis. Les contours des zones inondées simulées sont relativement conformes à ceux identifiés par les témoignages (Sahal et Lemahieu, 2010).

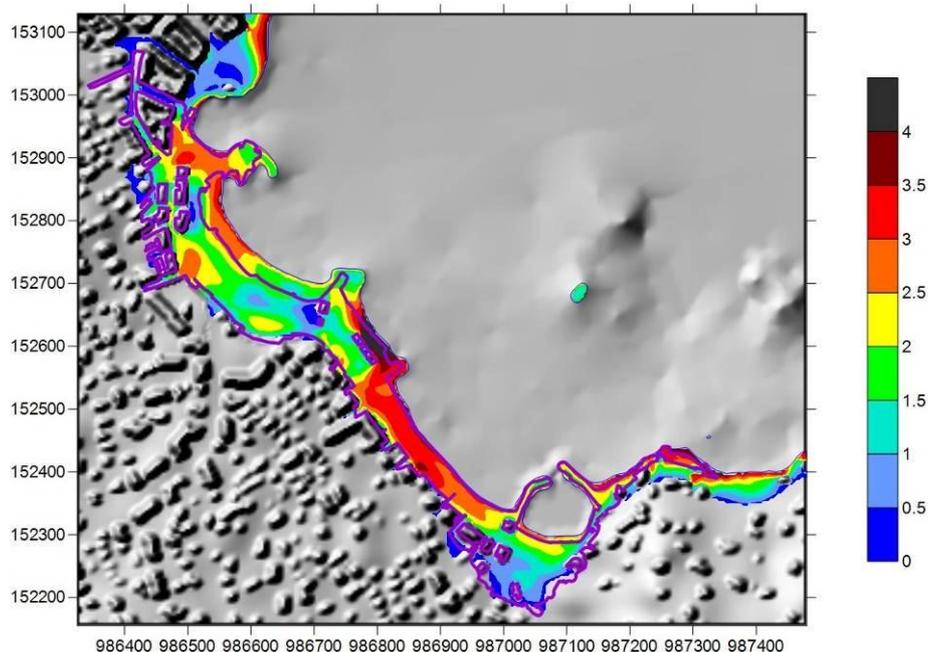


Figure 5. Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Hauteurs maximales d'inondation à terre (en m) et zone d'inondation identifiée par Sahal et Lemahieu (2010) en violet

La simulation indique par ailleurs qu'au niveau du port de la Salis, l'arrivée du tsunami se traduit par un très léger creux, un peu plus de 5 minutes après le glissement de l'aéroport (moins de 5 cm, imperceptible pour les témoins), e.g. see Fig.6. Une vague de près de 1,50 m de hauteur est ensuite entrée dans le port, environ 6 minutes après le glissement. L'eau rentrée dans le port semble avoir eu du mal à s'évacuer. Ceci peut s'expliquer par le fait que les digues du port aient été largement submergées (hauteur au-dessus de l'eau de l'ordre de 0,80 m), d'où un remplissage instantané du bassin, alors qu'après le retrait de la mer, la vidange du bassin par-dessus les digues ou par la brèche se révèle beaucoup plus lente. Le niveau de l'eau maximal dans le port est atteint aux alentours de 11'40'', avec 2,50 m de surcote.

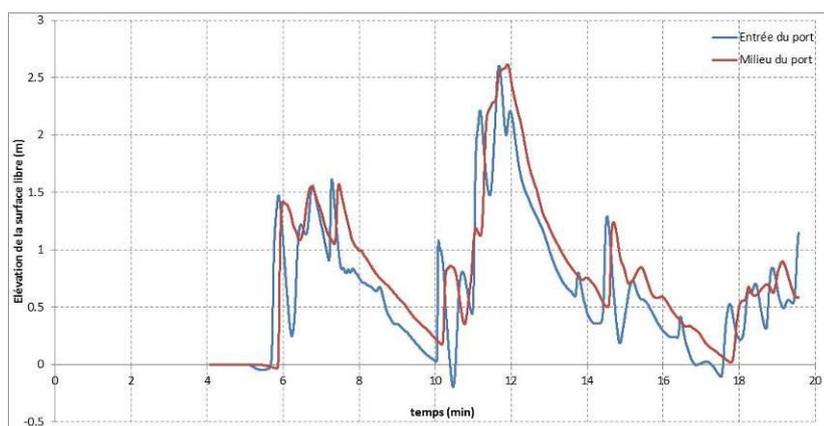


Figure 6. Simulation du tsunami type Nice 1979 : Elévation de la surface libre au port de La Salis

Les vitesses maximales simulées atteintes par le flux et le reflux (norme et direction) indiquent très généralement des valeurs supérieures à 3m/s à proximité du rivage, e.g. see Fig.7. L'analyse du film de la simulation indique que c'est pendant une phase de flux (arrivée de la vague) que sont atteintes les vitesses les plus importantes.

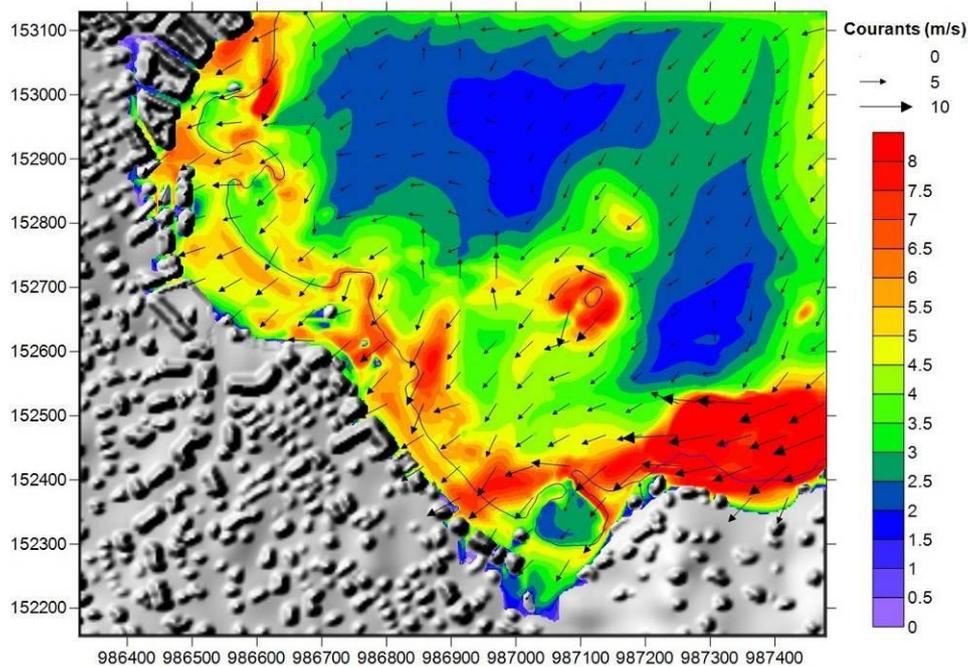


Figure 7. Simulation du tsunami type Aéroport de Nice 1979 : Vitesses maximales atteintes par les courants : normes (en m/s) et directions

5.2 Evaluation des dommages

En 1979, la zone la plus impactée par le tsunami était le littoral d'Antibes, avec le décès d'une personne qui se trouvait dans la cave de sa maison localisée près de la plage de la Salis. Dans la même zone d'Antibes, la vague avait envahi une rue et emporté une douzaine de voitures. Le journal local parlait d'une centaine de bâtiments impactés par le flot et d'une trentaine de blessés. Cet événement est survenu le 16 octobre en début d'après-midi, il y a près de 30 ans.

A partir des résultats de la simulation du tsunami type 1979, le calcul de dommages a été réalisé selon les principes d'évaluation de la vulnérabilité exposés plus haut et grâce à l'outil de simulation de scénario de risque BRICE@brgm (Sedan, 2012). Le scénario a tenu compte de la répartition et typologie actuelle du bâti, ainsi que de densité de population, hors saison et en saison touristique, 30 ans après l'évènement de 1979.

5.2.1. Dommages au bâti

L'analyse de l'impact du tsunami sur les bâtiments est indépendante de la période saisonnière ou de l'heure de survenance du tsunami. Elle montre (e.g. see Fig. 8) que sur 68 bâtiments touchés par l'inondation : 25 subiraient une hauteur d'inondation supérieure à 0,75 m ; pour 34 bâtiments, la vitesse du courant est supérieure à 1,5 m/s ; 42 ont un niveau d'exposition égal à 2 (incapacité de fuite pour la population située à l'intérieur). Ce nombre élevé de bâtiments impactés peut s'expliquer par le type de bâtiments à rez-de-chaussée ouvert rencontrés souvent en bordure du littoral.

Pour le bâti impacté en structure en dur (béton armé), l'endommagement attendu serait très faible. Les dégâts seraient surtout liés à l'impact du flot et des objets flottants contre les parties les plus fragiles du RDC (fenêtres, portes, baies vitrés, murets de jardin). Avec ces hauteurs d'eau il n'y aurait que les constructions les plus légères qui seraient fortement endommagées, comme par exemple des installations des plagistes.

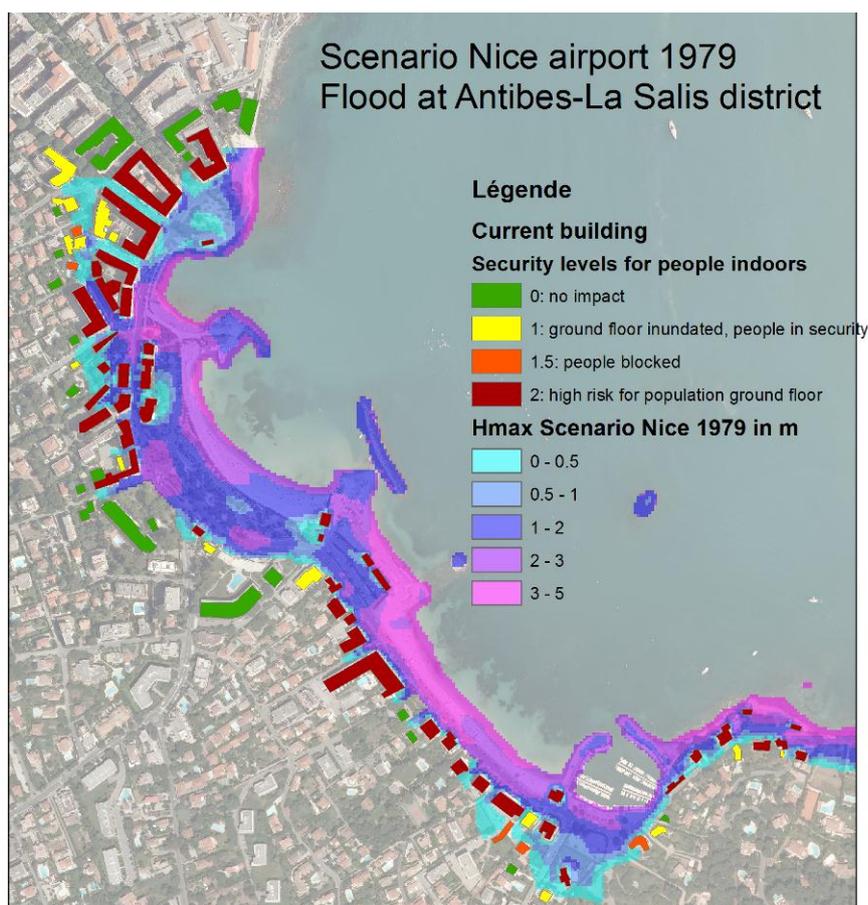


Figure 8. Niveaux d'exposition des bâtiments du quartier de la Salis (Antibes) pour le scénario Nice 1979

5.2.2. Préjudices humains

L'estimation des préjudices humains tient compte de la saison (été ou hiver) et du moment de la journée. La simulation indique des hauteurs d'inondation supérieure à 1,5 m et des vitesses de courant supérieure à 1 m/s dans le quartier de la Salis. Avec un tel niveau d'agression, les personnes sont incapables de résister à l'inondation. Cette estimation ne tient pas compte de l'anticipation ou de la mise en sécurité de la population sur la plage avant l'arrivée de l'inondation. L'inondation du quartier de la Salis atteint les plages, les promenades, les parkings et les rues adjacentes les plus fréquentées.

Le nombre de personnes situées à l'extérieur de bâtiments impactées atteindrait : 1) 2000 et 4000 personnes le 15 août, milieu d'après-midi ; 2) 60 à 80 personnes, le 15 janvier, milieu d'après-midi.

L'estimation moyenne du nombre de personnes situées dans les rez-de-chaussée au moment de l'évènement dépend du taux d'occupation moyen des bâtiments fonction de la saison mais aussi de l'heure. Sur la base des taux d'occupation proposés pour les scénarios de séismes (Coburn et al., 2002), des taux moyens d'occupation de 45% en milieu d'après-midi, et 80% la nuit ont été retenus. Concernant la population située à l'intérieur des bâtiments, 42 bâtiments sont jugés avec un niveau d'exposition égal à 2. Le nombre de personnes impactées pour un scénario à mi-août est au moins dix fois plus faible que celui des personnes situées à l'extérieur : près de 200 personnes en milieu d'après-midi et plus de 300 personnes la nuit. Par contre, en hiver, le nombre de personnes impactées (90 à 150) situées à l'intérieur des bâtiments est plus élevé que celui des personnes situées à l'extérieur.

5.2.3. Dommages dans les ports

Antibes disposent de plusieurs ports de plaisance ou de pêche, avec au total d'environ 3000 places, et un taux d'occupation de plus de 90% quelle que soit la saison. L'évaluation pour un scénario type 1979 indique un endommagement de 8,5% des bateaux. Le port le plus endommagé serait celui de la

Salis, avec un risque de mise au sec des embarcations (soit un fort risque d'endommagement) autour du 50% de l'effectif.

5.3.4. Résultats du scénario étendu à plusieurs communes

Le scénario étendu à plusieurs communes de la baie de Nice indique que si un évènement tel que celui de 1979 avait lieu en forte période touristique (pic maximum de fréquentation mi-août, pleine journée), le tsunami pourrait impacter plusieurs milliers de personnes. On estime toutefois que la durée totale où les plages sont très fréquentées représente environ 7% sur le temps total de l'année. De façon plus générale, l'application de cette méthode d'évaluation du risque à un scénario évènementiel comme celui de Nice-aéroport 1979 permet les constats suivants :

- Pendant une journée d'été, au niveau de la baie de Nice, ce sont quelques milliers de personnes (dont plusieurs dizaines de morts) qui pourraient être victimes du tsunami.
- Les secteurs urbanisés qui seraient inondés par l'évènement sont peu nombreux. Ce sont uniquement les constructions légères (« paillotes » de bord de mer, constructions en bois/ baie vitrée/ tôle) qui pourraient souffrir de dommages importants. Les autres constructions (maçonnerie, béton armé), en particulier avec 1 ou plusieurs étages, constituent au contraire un facteur de diminution du risque pour la population à l'intérieur de ces bâtiments.
- Les ports sont les infrastructures qui sont les plus impactées par les tsunamis. Les résultats indiquent que plusieurs centaines de bateaux pourraient être endommagés par ce type d'évènement. Des indications plus précises sur l'occupation saisonnière de chaque port permettraient d'affiner ces estimations.
- La qualité des résultats sur les évaluations de dommages est non seulement dépendante de la connaissance des enjeux et des fonctions de vulnérabilité, mais aussi des indications sur l'inondation (hauteur-vitesse) engendrée par le tsunami.

6. CONCLUSION

Les études historiques indiquent que le littoral méditerranéen français a été plusieurs fois touché par des tsunamis d'intensité faible à modérée. Aujourd'hui la fréquentation du littoral à certaines périodes de l'année fait que le risque peut-être élevé. La méthode aujourd'hui mise en œuvre tient compte du fait que : 1) le bâti peut constituer un facteur de diminution du risque humain sous certaines conditions (hauteur et vitesse de l'inondation, typologie du bâti, situation de la population au moment de l'évènement) ; 2) des tsunamis d'intensité faible à modérée peuvent causer des préjudices humains élevés. Outre l'exposition de la population, la méthode s'intéresse aussi à d'autres enjeux comme les ports, les installations en bord de mer (parkings, campings, routes) et le milieu bâti. Vu la complexité et diversité des différents paramètres nécessaires à l'évaluation des dommages aux tsunamis, il est aujourd'hui difficile de donner un ordre de grandeur sur les marges d'incertitude des résultats obtenus. Pour assurer un meilleur crédit à la méthode développée, et par suite aux résultats obtenus, il conviendrait de poursuivre le développement de la méthode à travers un travail de recherche en ce sens.

ACKNOWLEDGEMENT

Les auteurs remercient le ministère de l'Intérieur, le ministère de l'Environnement ainsi que le ministère de la Recherche et de l'éducation pour leur contribution aux financements de ces travaux.

REFERENCES

- Ambraseys N-N., 1962. Data for the investigation of the seismic sea-waves in the eastern Mediterranean. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 52, 1962, 895-913.
- BRGM/tsunamis.fr : catalogue of the tsunamis observed in France, <http://www.tsunamis.fr>
- Cattaneo A., 2007. 'Etude préliminaire de l'aléa tsunamis en Méditerranée occidentale - Zonage des mouvements de terrain sous-marins sur le plateau et talus continental au large des côtes françaises'. *Rapport final IFREMER*, 66p, 2 ann.
- Coburn A. and Spence R. (2002). *Earthquake protection*. 2ème édition, Ed. Wiley.

- Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2004. Using HAZUS-MH for risk assessment (FEMA 433). Report of the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, United States, 224 pp.
- Garcin M., Prame B., Attanayake N., De Silva U., Desprats J.F., Fernando S., Fontaine M., Idier D., Lenotre N., Pedreros R. and Siriwardana C. (2007). Geographic Information Systems for Coastal Hazards – Application to a pilot zone in Sri Lanka. *Rapport BRGM 55553*.
- Giovinazzi S., (2005) “The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis”, PhD Thesis, Department of Civil Engineering of the Technical University Carolo-Wilhelmina at Braunschweig and the Faculty of Engineering Department of Civil Engineering of the University of Florence.
- Guillande R., Valencia N. and Gardi A. (2009). Uncertainties in modelling and damage assessment of tsunami risk, implications for crisis management (FP6 SCHEAMA project). *Poster à Seismic Risk in Moderate Seismicity areas*, Aix en Provence, Juillet 2009.
- Guha-Sapir D., Parry L, Degomme O, Joshi P.C. & Saulina Arnold J.P. (2006). Risk factors for mortality and injury: post-tsunami epidemiological findings from Tamil Nadu. Centre for Research on the Epidemiology Disasters (CRED). <http://www.cred.be/sites/default/files/RiskFactorsMortalityInjury.pdf>
- Lagomarsino S., Giovinazzi S., (2006), “Macro seismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings”, *Bull. of Earthquake Engineering*, 4, pp. 445-463.
- Lambert J., Terrier M., 2011. Historical tsunami database for France and its overseas territories. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1037–1046, 2011
- IGN (2009). *BD topo version 2, descriptif de contenu*. http://professionnels.ign.fr/DISPLAY/000/506/447/5064472/DC_BDTopo_2.pdf
- Kelman I. (2002). Physical Flood Vulnerability of Residential Properties in Coastal, Eastern England. *Thesis*, Université de Cambridge.
- Koshimura S., Katada T., Mofield H.O. and Kawata Y. (2006) - A method for estimating casualties due to the tsunami inundation flow. *Nat Hazards* (2006) 39:265–274.
- Leone F., Denain J.C., Vinet F. and Bachri S., (2006). Analyse spatiale des dommages au bâti de Banda Aceh (Sumatra, Indonésie) : contribution à la connaissance du phénomène et à l’élaboration de scénarios de risque tsunami. *Scientific report of Tsunamisque (2005-2006) program*.
- Marche, F., P. Bonneton, P. Fabrie and N. Seguin (2007) - Evaluation of well-balanced bore-capturing schemes for 2D wetting and drying processes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 53: 867-894.
- Mimura N., Yasuhara K., Kawagoe S., Yokoki H. and Kazama S. (2011). Damage from the Great East Japan Earthquake and Tsunami - A quick report. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* (2011) 16:803–818.
- Monfort D., Terrier M., Sedan O., Marçot N. (2010) – Projet RATCOM : Méthode d’évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis en Méditerranée occidentale. *Rapport BRGM/RP-58595-FR*, 143p
- Nishikiori N., Abe T., Costa D.G., Dharmaratne S.D., Kunii O. and Moji K. (2006). Who died as a result of the tsunami? – Risk factors of mortality among internally displaced persons in Sri Lanka: a retrospective cohort analysis. *BMC Public Health* 2006, 6:73 doi:10.1186/1471-2458-6-73
- Papadopoulos, G., A. and Fokaefs, A. 2005: Strong tsunamis in the Mediterranean sea: A re-evaluation, *ISET Journal of Earthquake Technology*: 463/42/2, 159-170
- Pedreros, R et Poisson, B., 2007. Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française - Modélisation numérique. Open-file BRGM, *Rapport BRGM/RP-55760-FR*.
- Peiris N. (2006). Vulnerability functions for tsunami loss estimation. First European conference on Earthquake Engineering and Seismology, a joint event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC), Geneva, Switzerland, Paper number 1121.
- Robert S., Sillère G. and Liziard S. (2008) - Évaluer et représenter le nombre d’usagers sur une plage urbaine (Les Ponchettes, Nice). <http://mappemonde.mgm.fr/num19/articles/art08305.html>
- Sahal A., Lemahieu A. (2010). The 1979 nice airport tsunami : mapping of the flood in Antibes. *Nat hazards*.
- Silva Jacinto R. & Meyniel P. (2010) – RatCom – Réseaux d’alerte aux Tsunamis et submersions Côtières en Méditerranée. Modélisation des écoulements gravitaires sous-marins en Baie-des-Anges en vue de la génération de tsunamis dans le champ proche. *R. int Ifremer Brest / GM / LES / 201-08*.
- Terrier M., 2007. Réalisation d’un zonage sismique de la Méditerranée occidentale à 1/2 000 000 préalable aux choix de scénarios de tsunamis. Open-file BRGM, *Rapport BRGM/RP - 55353 –Fr* (in french).
- Terrier M., Pedreros R. et Poisson B. (2007) Tsunamis : Étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française - Open-file BRGM report n° BRGM-RP-55765-Fr (in french).
- Watts, P., Grilli, S.T., Kirby, J.T., Fryer, G.J., Tappin, D.R., 2003. Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 391-402.
- Yang F., Barral J., Prevost T., Laligrand P., Massart N., Schmitt V. and Ollinger E. (2001). Génération de tsunamis. Nice, 16 octobre 1979. *Rapport de projet scientifique collectif*, Ecole Polytechnique, promotion 2001. Tuteur M. Dias, coordinateur M. Huerre.