HAL
open science

Méthode d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis en Méditerranée occidentale

Monique Terrier, Daniel Monfort, Olivier Sedan, Nathalie Marçot

To cite this version:

Monique Terrier, Daniel Monfort, Olivier Sedan, Nathalie Marçot. Méthode d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis en Méditerranée occidentale. 2011. hal-00724261

HAL Id: hal-00724261

https://brgm.hal.science/hal-00724261v1

Submitted on 20 Aug 2012

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.

RATCOM **R**éseau d'**A**lerte aux **T**sunamis et **Cô**tier en **M**éditerranée

RATCOM

Méthode d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis en Méditerranée occidentale

Modélisation, simulation et vulnérabilité du milieu urbain

RATCOM SP3

Dans le cadre du projet RATCOM, le BRGM a développé une méthode d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis, avec application au site pilote « baie de Cannes-Nice ».
Dans un premier temps, l'analyse en retour de tsunamis et raz-de-marée a permis d'inventorier les éléments les plus exposés et l'intensité des dommages attendus. Concernant la côte française méditerranéenne, les zones les plus impactées sont les ports. Cependant, même pour des intensités de tsunamis faibles à moyennes, en saison touristique, la population située sur la bande côtière peut présenter un risque non négligeable. Dans un deuxième temps, un état de l'art sur les méthodes actuelles d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis a été conduit. Ces méthodes concernent généralement les zones exposées à de très violents tsunamis (comme l'océan indien) et restent difficilement applicables dans nos contextes géologiques et géographiques.
Finalement, l'étude conduit à une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des enjeux et de simulation de dommages applicable à des régions telle que la Méditerranée occidentale où les risques sont présents, même avec un aléa faible à moyen. Elle est testée au niveau de la zone « baie de Cannes-Nice » sur la base des simulations de l'évènement de 1979. A court terme, elle devrait être mise en œuvre sur d'autres sites de la Méditerranée occidentale.

Société responsable : BRGM

Date de remise contractuelle :

Date de remise effective :

Coordinateur : Jean-Louis Fondère (Thales Alenia Space)
100 Bd du Midi – BP99 – 06156 Cannes La Bocca cedex
Tél. +33 (0)4 92 92 79 56 – Fax +33 (0)4 92 92 77 60
jean-louis.fondere@thalesaleniaspace.com

Informations sur le document

Rédigé par:	D. Monfort, M. Terrier, O. Sedan, N. Marçot	BRGM/RNSC
Vérifié par:	H. Aochi	BRGM/RNSC
Approuvé par:	H. Modaressi JL Fondere	BRGM/RNSC Thales Alenia France

Evolutions du document

Version	Révision	Date	Statut du document	Auteur
V1	0	Janvier 2011	Première version	Monfort et *al.*
V2	1	Avril 2011	Deuxième version	Terrier
V3	2	Juin 2011	Troisième version	Terrier

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

MONFORT CLIMENT 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, 65fig, 28tabl, 4 ann

Consortium RATCOM

Table des matières

Table des matières 3
Liste des illustrations 7
1 Introduction 13
1.1 Objet du document 13
1.2 Structure du document 15
2 Analyse en retour des évènements tsunamis 17
2.1 Principe 17
2.2 Séisme de Boumerdès (2003) 19
2.3 Le tsunami de l'aéroport de Nice du 16 octobre 1979. 23
2.4 Séisme Mer Ligure 1887 30
2.5 Phénomènes d'origine météorologique 32
2.6 Cas d'autres tsunamis récents en dehors de la côte méditerranéenne occidentale 34
2.7 Conclusion sur l'analyse en retour 35
3 Etat de l'art sur les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis 37
3.1 Vulnérabilité physique humaine 37
3.2 Vulnérabilité structurelle des bâtiments 42
3.3 Approches multicritères 48
3.3.1 Méthode PTVAM 48
3.3.2 Vulnérabilité du bâti à Sidney (Dall'osso et al., 2009) 51
3.3.3 Etude risque tsunami au Maroc (Omira et al., 2008) 53
3.3.4 Projet CRATER 55
3.4 Discussion 58
4 Choix, collecte et structuration des enjeux 61
4.1 Délimitation des zones cibles pour les simulations de dommages 61
4.2 Choix des enjeux 62
4.3 Population 63
4.3.1 Population résidente 63
4.3.2 Population touristique 63

4.4 Bâtiments 70
4.4.1 Identification 70
4.4.2 Typologie des bâtiments 72
4.4.3 Découpage par quartiers 72
4.4.4 Estimation de la population à l'intérieur des bâtiments 74
4.5 Campings 75
4.6 Données portuaires 76
4.6.1 Localisation des ports de pêche et de plaisance 76
4.6.2 Données bathymétriques en zone portuaire 78
4.6.3 Aménagements portuaires gagnés sur la mer 80
4.7 Routes, sentiers du littoral 82
4.8 Parkings 84
4.9 Structuration des données dans un SIG 86
5 Démarche pour l'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis 87
5.1 Introduction 87
5.2 Vulnérabilité de la population 88
5.2.1 Niveau du quartier 88
5.2.2 Evaluation au niveau de la ville 98
5.2.3 Evaluation au niveau départemental 98
5.3 Vulnérabilité des zones portuaires 100
5.4 Routes et réseau ferroviaire 101
5.5 Autres enjeux 101
5.6 Synthèse des approches 102
6 Application et résultats 105
6.1 Quartier de la Salis à Antibes 105
6.1.1 Calcul des préjudices humains pour la population à l'extérieur 107
6.1.2 Calcul des préjudices humains pour la population à l'intérieur des bâtiments 107
6.1.3 Endommagement du bâti 109
6.2 Résultats à l'échelle des communes, entre Antibes et Saint-Jean-Cap-Ferrat 110
6.2.1 Population à l'extérieur 110
6.2.2 Personnes à l'intérieur 115

6.2.3 Ports 117
6.2.4 Campings 117
6.2.5 Parkings 117
6.2.6 Axes de communication 119
6.2.7 Autres infrastructures 119
6.3 Evaluation qualitative du risque sur la baie de Nice 120
6.4 Discussion des résultats 123
7 Conclusions 125
7.1 Sur la pertinence de la démarche 125
7.2 Sur la connaissance des enjeux 126
7.3 Sur les résultats d'évaluation des dommages et préjudices au niveau de la zone pilote 126
7.4 Sur l'estimation des incertitudes 127
7.5 Applications 128
8 Bibliographie 129

Liste des illustrations

Figure 1 - Les 2 composantes du projet RATCOM 13

Figure 2 : Objectifs du Sous-Projet 3 extraits du cahier des charges technique du projet RATCOM, les actions du BRGM sont surlignées en jaune 14

Figure 3 : Carte des observations du tsunami générées par le séisme de 2003, dît de Boumerdès (extrait de *tsunamis.fr*, BRGM, 2009) 19

Figure 4 : Localisation au niveau de l'île de Minorque des lieux indiqués dans le texte et impactés par le tsunami de Boumerdès 2003 (fond Corine Land Cover, en rouge les zones urbaines). 20

Figure 5 : Bateau coulé dans le port de Mahon (Minorque) à cause du tsunami de Boumerdès en mai 2003. (Image de la Vanguadia 23-5-2003). 21

Figure 6 : Vue de la côte à Théoule-sur-Mer (extrait de Google Earth) touchée par le tsunami de Boumerdès en 2003 22

Figure 7 : Lieux d'observation du tsunami de1979 enregistrés dans la base *tsunamis.fr* (BRGM, 2009) 23

Figure 8 : Vue de la côte entre l'aéroport de Nice et Antibes (extrait de Google Earth) touchée par le tsunami de 1979 24

Figure 9 : Localisation d'observations de dommages générés par le tsunami de 1979. 26

Figure 10: Photographie des conséquences du tsunami du 1979 à Antibes (http://www.lamouettelaurentine.net/st_laurent_du_var/port/tsunami.htm)..... 27

Figure 11: Dégâts au port de la Salis à Antibes (http://www.lamouettelaurentine.net/st_laurent_du_var/port/tsunami.htm)..... 28

Figure 12: Carte de la zone inondée par le tsunami de 1979 dans le quartier de la salis à Antibes (extrait de Sahal et al., 2010). 29

Figure 13 : Lieux d'observation du tsunami de 1887 enregistrés dans la base tsunamis.fr (BRGM, 2009) 30

Figure 14 : Port de Ciutadella (Minorque) pendant une seiche (« rissaga »), descente du niveau de l'eau : Certaines embarcations reposent sur le fond (http://ichep.blogspot.com/2006/06/rissaga-ciutadella.html) 33

Figure 15: Port de Ciutadella (Minorque) pendant une seiche (« rissaga »), retour de l'eau : dérive des bateaux ayant rompu leurs amarres (http://ichep.blogspot.com/2006/06/rissaga-ciutadella.html). 33

Figure 16 : Schéma du corps humain considéré par Koshimura et al. (2006) pour modéliser les forces qui agissent sur une personne en cas de flux d'inondation. 38

Figure 17 : Courbe de vulnérabilité des personnes d'après Koshimura et al. (2006). 38

Figure 18 : Carte de l'indice de mortalité estimé à Seattle par Koshimura et al. (2006). 39

Figure 19 : comparaison des différentes valeurs d'hauteur d'eau et vitesse trouvées dans la littérature délimitant des secteurs de mobilité des personnes en cas d'inondation. 40

Figure 20 : Hauteur d'eau, vitesse de flux et mobilité des personnes (plaquette de MEDAD/SDPRM 2000 guide méthodologique des PPRI, extrait de GSC 2009). 40

Figure 21 : Pourcentages de mortalité calculés pour le tsunami indonésien de 2004, en fonction de l'emplacement des personnes au moment du tsunami (Guha Sapir et al. 2006). 41

Figure 22 : Fonction d'endommagement pour une typologie de bâtiment B (maçonnerie non renforcé), déterminée à partir des observations de terrain de Léone et al. (2006) 44

Figure 23 : Fonctions d'endommagement proposées par Guillande et al. (2009). Les typologies constructives des bâtiments sont : A) constructions légères, B) maçonnerie non renforcée, C) maçonnerie de remplissage avec des éléments renforcés, D) béton non renforcé, E) béton armé. 44

Figure 24: Fonction d'endommagement pour des bâtiments en maçonnerie (Peiris, 2006). 45

Figure 25: Fonction d'endommagement pour des constructions renforcées et lourdes (Garcin et al. 2007). 45

Figure 26 : Fonction d'endommagement pour des constructions légères (Garcin et al. 2007). 46

Figure 27 : Fonction d'endommagement proposée par Koshimura (2007) pour toutes les typologies de bâtiment. 46

Figure 28 : Cartographie de l'indice RVI sur un quartier de Sydney (Dall'Osso et al. 2009). 52

Figure 29 : Valeurs du BTV (« Building Tsunami Vulnérability») à Casablanca (Maroc) pour un scénario de tsunami type Lisbonne 1755 (extrait d'Omira et al. 2008). 55

Figure 30 : Valeurs suggérées par CRATER pour évaluer la vulnérabilité des bâtiments. (Les éléments d'impact sont extraits de Dall'Osso et al., 2006). 56

Figure 31 : Exemple d'application de la méthode CRATER pour évaluer le risque des bâtiments. (Extrait de Dall'Osso et al., 2006). 57

Figure 32 : Localisation des trois secteurs géographiques d'échelle différente retenus pour les simulations de dommages aux tsunamis 61

Figure 33 : Densité de la population touristique sur le linéaire littoral de la Côte d'Azur, synthèse réalisée d'après les données du CRT 64

Figure 34 : La plage des Ponchettes vue depuis la tour Bellanda (Cliché : S. Robert , le 22 septembre 2007)..... 65

Figure 35 : Evolution le long d'une journée du nombre des personnes sur la plage des Ponchettes à Nice pour trois jours différents (extrait de Robert et al. 2008). 66

Figure 36 : Traitement de la hauteur d'un bâtiment par la BD topo (IGN 2009)..... 71

Figure 37 : Estimation du nombre de niveaux des bâtiments sur la base de la BD topo, exemple d'un secteur de Cagnes sur Mer. 71

Figure 38 : Extrait de la carte sur la répartition du bâti de type RDC simple sans protection, des communes d'Antibes et Vallauris. 72

Figure 39 : Exemple de deux polygones de quartiers à Juan les Pins, l'un avec le 100% des bâtiments RDC+ Grand collectif et l'autre avec le 100% des bâtiments en RDC simple sans protection. Sur l'image en bas une vue via Google Street de ces deux polygones. 73

Figure 40: Localisation des campings sur la Côte d'Azur 75

Figure 41 : Données relatives à la capacité des campings, extrait concernant la commune d'Antibes (données CRT 06)..... 75

Figure 42 : Localisation des ports et indication de leur capacité d'accueil et des longueurs de bateaux minimum et maximum présents 77

Figure 43 : Exemple de plan bathymétrique scanné collecté sur le port de la Rague à Mandelieu-la-Napoule 78

Figure 44 : Localisation des ports et indication de leur profondeur moyenne 79

Figure 45 : Cartographie des aménagements portuaires gagnés sur la mer 81

Figure 46 : Détail des données d'aménagements portuaires, extrait sur Antibes-Juan-les-Pins (d'après les travaux de Meinesz et al, 2006) 82

Figure 47 : Détail de la donnée Sentiers littoral sur la commune d'Antibes Juan-les-Pins (Conseil Régional PACA) 83

Figure 48 : Détail des routes et rues de la BD Topo, extrait commune de Cannes. 83

Figure 49 : Cartographie de la localisation des parkings souterrains sur le littoral de la ville de Nice. 84

Figure 50 : Cartographie de la localisation des parkings sur la ville d'Antibes Juan-les-Pins comprenant 3 parkings souterrains..... 85

Figure 51 : Exemple d'un projet d'évaluation du risque. 86

Figure 52 - Calcul des courbes de vulnérabilité humaine en fonction de la situation des personnes au moment du tsunami 90

Figure 53 : Exemple d'un bâtiment à plusieurs niveaux avec un RDC transparent (Antibes) et matrice de sauvegarde pour **le type 1** 92

Figure 54 : Exemple d'un bâtiment à plusieurs niveaux avec un RDC protégé (Cagnes sur Mer, extrait de Google Street View) et 93

Figure 55 : Exemple d'un bâtiment à un seul niveau (RDC) transparent (Saint Laurent du Var, extrait de Goole Street View) et 94

Figure 56 : Exemple d'un bâtiment à un seul niveau (RDC) avec des murs qui le protègent (Villeneuve-Loubet, extrait de Google Street View) et matrice de sauvegarde pour **le type 4**. 95

Figure 57 : Démarche générale pour l'évaluation du risque aux tsunamis en fonction de l'échelle d'analyse 102

Figure 58 : Carte de l'inondation à Antibes (quartier de la Salis) obtenue par le CEA. (Donnadieu et al., 2010) 106

Figure 59 : Simulation du tsunami de 1979 : situation des bâtiments (source BD topo) impactés ou pas par l'inondation (cf Figure 58). 108

Figure 60 : Hauteurs maximales du plan d'eau dans la baie de Nice pour un tsunami type 1979 (Donnadieu et al., 2010). 111

Figure 61 : Classe de valeurs de la hauteur d'eau maximale au niveau du trait de côte, d'après la simulation du tsunami de 1979 de Donnadieu et al. (2010) . 112

Figure 62 : Niveaux de sauvegarde de quelques maisons du lotissement au sud de l'hippodrome de Cagnes qui pourraient être inondées. 116

Figure 63 : image de la route du bord de mer et la ligne de chemin de fer entre Antibes et Villeneuve-Loubet. 119

Figure 64 : Carte du risque à large échelle sur la baie de Nice. Scénario en pleine saison estivale. 121

Figure 65 : Carte de risque à large échelle sur la baie de Nice. Scénario hors saison. 122

Tableau 1 : Extrait de la base de données *tsunamis.fr* (BRGM, millésime, 2009) des événements historiques (tsunamis ou autres) observés dans la côte méditerranéenne française 18

Tableau 2 : Dégâts observés dans les ports de l'île de Minorque lors du tsunami de Boumerdès en 2003 21

Tableau 3 : Liste des observations recueillies sur le tsunami de 1979. 24

Tableau 4 : Matrice de vulnérabilité pour un bâtiment avec un étage, surface en plan de 38 m² (Kelman, 2002). 47

Tableau 5 : Les différents facteurs et valeurs correspondantes retenus pour l'application de la méthode PTVAM à Oregon (Dominey-Howes et al., 2009). 50

Tableau 6 : Les différents facteurs retenus pour calculer l'indice de vulnérabilité du bâti (BV) proposés par Dall'Osso et al. (2009). 51

Tableau 7 : Facteurs considérés dans le paramètre protection (Dall'osso et al., 2009). 52

Tableau 8 : Typologie des bâtiments considerée dans l'indice BTV d'Omira et al. (2008). 53

Tableau 9 : Classes d'hauteur d'eau pour calculer l'indice BTV d'Omira et al. (2008). 54

Tableau 10 : Classes de protection face à la mer de l'indice BTV d'Omira et al. (2008). 54

Tableau 11 : Poids pour les trois critères de l'indice BTV d'Omira et al. (2008). 54

Tableau 12 : Estimation de la population sur le bord de mer et 1ère ligne d'habitation (source : CRT - 2009) 67

Tableau 13 : Estimation du nombre de personnes à l'extérieur par 100m² pour les 3 classes de zones de fréquentation, inspirée des données de l'étude du CNRS (Robert et al. 2008). 68

Tableau 14 : Comparaison de l'estimation faite de la population à l'extérieur et les données fournies par le CRT pour le 15 août à 15h. 69

Tableau 15 : Valeurs de densité de population à l'extérieur pour le 10 janvier l'après-midi, obtenues à partir des données du CRT. 70

Tableau 16 : ratios d'habitants par 100 m² de surface habitable pour les communes de l'étude. 74

Tableau 17 : Taux de remplissage des ports étudiés 76

Tableau 18 : Valeurs moyennes de profondeur dans chaque port 80

Tableau 19 : Matrice pour l'évaluation du risque de la population à l'extérieur à l'échelle de ville. 98

Tableau 20 : Matrice pour l'évaluation du risque à niveau départemental. 99

Tableau 21 : Evaluation du risque pour les ports et les zones portuaires..... 100

Tableau 22 : Evaluation du risque pour les routes et le réseau ferroviaire. 101

Tableau 23 : Résumé de l'ensemble des évaluations du risque à trois échelles. . 103

Tableau 24 – Quartier de la Salis (Antibes), estimation des préjudices humains/population à l'extérieur pour un scénario de tsunami type 1979, en journée touristique et journée hors saison 107

Tableau 25 – Quartier de la Salis (Antibes), estimation des préjudices humains/population à l'intérieur des bâtiments pour un scénario de tsunami type 1979, en journée touristique et journée hors saison 109

Tableau 26 : Résumé des niveaux de risque des différents secteurs de la baie de Nice impactés. 114

Tableau 27 : estimation du nombre de personnes pour chaque niveau de sauvegarde..... 115

Tableau 28 – Estimation des dommages dans les ports, pour un scénario de tsunami type (1979) 118

Annexe 1 Estimation de volumes de touristes susceptibles d'être présents sur le bord de mer 133

Annexe 2 Tableau des données collectées auprès des ports de la Riviera Française 137

Annexe 3 Tableau récapitulatif des données bathymétriques collectées sur les ports 141

Annexe 4 Tableau récapitulait des données collectées sur les parkings souterrains et non souterrains du littoral, sur les communes de Nice et d'Antibes-Juan-les-Pin 142

1 Introduction

1.1 Objet du document

Le projet RATCOM, Réseau d'Alerte aux Tsunamis et Côtiers en Méditerranée, a pour objectif de contribuer à la problématique des risques tsunamis et côtiers mais également de fournir des éléments de réponses aux problématiques génériques de l'alerte à la population pour tous types de risques, à travers le développement et la mise en place d'un démonstrateur de système d'alerte pour les risques tsunamis et côtiers. Il s'articule autour de deux composantes fonctionnelles majeures (Figure 1) :

- Une **composante montante**, dont la fonction essentielle est de délivrer une information qualifiée et de coordonner l'alerte au risque tsunami en minimisant en particulier le taux de fausse alarme.
- Une **composante descendante**, dont la fonction essentielle est de proposer des moyens de communication performants et fiables, permettant de transmettre l'alerte en réseau local, puis en diffusion de masse.

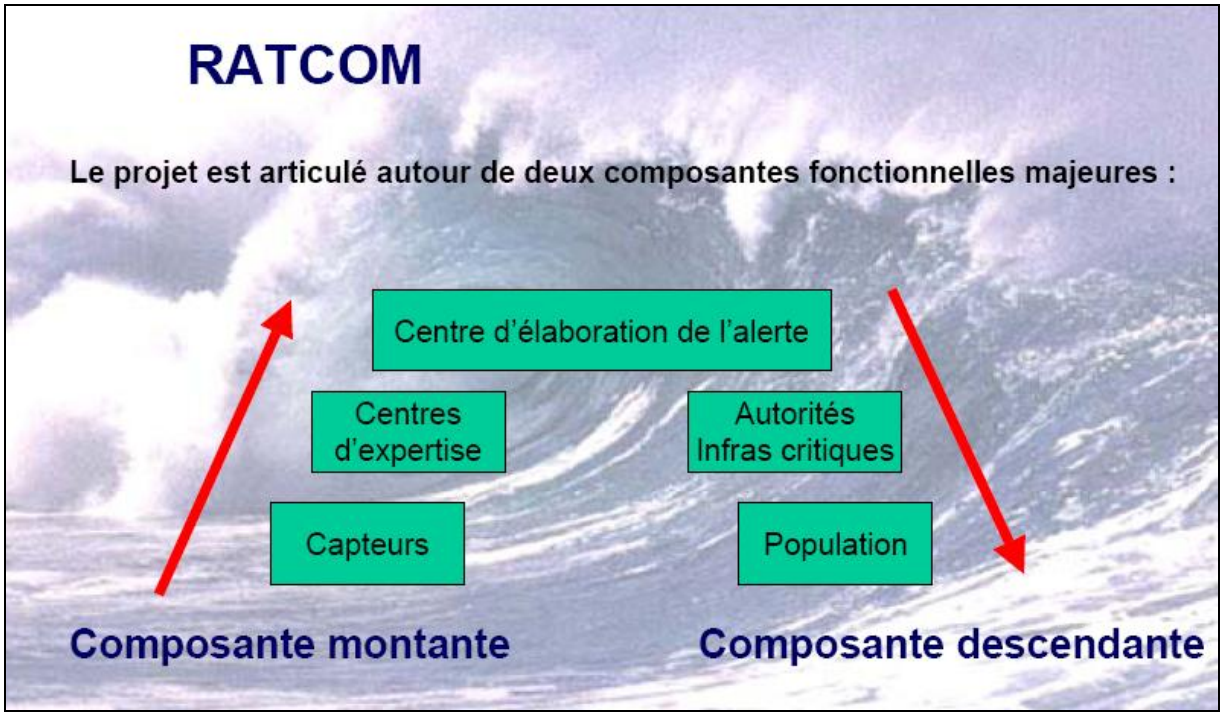


Figure 1 - Les 2 composantes du projet RATCOM

La tâche SP3 de la composante descendante du projet consiste (Figure 2) :

- à la modélisation et la simulation par le CEA/DASE de l'évènement de 1979 (glissement sous marin et tsunami) sur la zone « baie de Cannes-Nice », avec restitution des cartes de hauteur d'eau, profondeur d'inondation et vitesse,

- Parallèlement, au développement d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis par le BRGM, avec application sur la zone pilote et sur la base des résultats hauteur et vitesse d'inondation obtenus par le CEA.

Ce présent rapport concerne les résultats méthodologiques du BRGM obtenus dans le cadre du projet RATCOM.

Sous-projet 3 **MODELISATION, SIMULATION ET VULNERABILITE**	
Date de début	T0
Date de fin	T0+18
Responsable (charge de travail en h.m)	CEA(13)
Participants (charge de travail en h.m)	IFREMER(24), BRGM(9,2), GEOSCIENCES (1)
Objectifs Décrire des scenarii de propagation du tsunami, depuis sa génération jusqu'à ses effets sur la côte (section 3.2.3).	
Tâches - Modélisation du glissement de terrain et du tsunami induit de 1979 - Cartographie des zones inondées et affectées - Evaluation des dommages et de l'impact sur les côtes	
Livrables - Rapport sur la modélisation du glissement de pente et du tsunami induit de 1979 et élaboration des scénarios les plus probables - Rapport sur la cartographie des zones inondées pour chaque scénario (SIG) - Rapport sur l'évaluation de la vulnérabilité et des enjeux (SIG). Si les données sont suffisantes, simulation des dommages pour chaque scénario. - Etude de scenarii de propagation du tsunamis	

Figure 2 : Objectifs du Sous-Projet 3 extraits du cahier des charges technique du projet RATCOM, les actions du BRGM sont surlignées en jaune

1.2 Structure du document

Le présent rapport est structuré en différentes parties conduites successivement dans le cadre du projet, à savoir :

1) **Analyse en retour des tsunamis** observés dans le littoral méditerranéen et plus particulièrement sur la côte française, qui a servi à identifier les enjeux (population, biens) les plus exposés au risque tsunami,
2) **Etat de l'art des différentes méthodes** d'évaluation de la vulnérabilité face aux tsunamis
3) **Etablissement d'une méthode** d'évaluation du risque face aux tsunamis, adaptée au contexte de la Côte d'Azur (aléa modéré, très forte fréquentation touristique), en ciblant les secteurs les plus exposés comme peuvent l'être les plages.
4) **Collecte et structuration des informations sur les enjeux** de la zone test (Côte d'Azur et plus particulièrement communes de la baie de Nice et Cannes) et susceptibles d'être exposés au risque de tsunami.
5) **Résultats de simulation des dommages** obtenus sur le site « baie de Cannes – Nice » pour un scénario comparable à l'évènement de 1979

2 Analyse en retour des évènements tsunamis

2.1 Principe

L'analyse en retour des tsunamis qui ont touché la côte méditerranéenne occidentale a été réalisée sur la base d'une étude bibliographique. Cette analyse a porté particulièrement sur la nature et l'ampleur des dégâts, ainsi que sur le type d'enjeux affecté. Par ce biais, il est possible d'optimiser l'identification des principaux types d'enjeux susceptibles d'être concernés par des niveaux d'aléa qui restent relativement modérés.

La base de données tsunamis observés en France (www.tsunamis.fr, Lambert 2008) recense les données et les témoignages portant sur des phénomènes de raz de marée ou de tsunamis historiques. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** résume les évènements historiques observés sur la côte méditerranée française et recensés à ce jour, certains ayant pu provoquer des dégâts significatifs. Pour quelques uns, l'origine du phénomène est bien connue, pour d'autres elle reste supposée voire inconnue.
Le tableau utilise l'échelle d'intensité des tsunamis Sieberg-Ambraseys qui s'exprime en six degrés :

- Degré 1 : **Très légère**. Onde si faible qu'elle n'est perceptible que sur les marégrammes.
- Degré 2 : **Légère**. Onde observée par les populations du littoral et les habitués de la mer. Généralement remarquée sur des rivages très plats.
- Degré 3 : **Assez forte**. Généralement remarquée. Inondation des côtes en pente douce. Embarcations légères échouées. Constructions légères près des côtes faiblement endommagées. Dans les estuaires, inversion des cours d'eau jusqu'à une certaine distance en amont.
- Degré 4 : **Forte**. Inondation du rivage sous une certaine hauteur d'eau. Affouillement des espaces aménagés. Constructions légères endommagées près des côtes. Constructions et structures en dur abîmées sur la côte. Gros voiliers et petits navires échoués à terre ou emportés au large. Côtes jonchées de débris flottants.
- Degré 5 : **Très forte**. Inondation générale du rivage sous une certaine hauteur d'eau. Murs de soutènement des quais, constructions et structures en dur proches de la côte endommagés. Structures légères détruites. Profond affouillement des terres cultivées et côtes jonchées d'objets flottants et d'animaux marins. Exception faite des grands navires, toutes les autres catégories d'embarcations sont échouées ou emportées au large. Grands

mascarets dans les estuaires. Ouvrages portuaires endommagés. Noyades. Vagues accompagnées d'un fort rugissement.

- Degré 6 : **Désastreuse**. Destruction partielle ou complète des constructions et structures édifiées par l'homme jusqu'à une certaine distance du rivage. Inondation des côtes sous une grande hauteur d'eau. Gros navires gravement endommagés. Arbres déracinés ou cassés. Nombreuses victimes.

Nom	Description	Intensité	Origine
Glissement sous-marin (baie de Nice) 20 juillet 1564	« *La vague envahit le rivage et pénétra dans les boutiques et ensuite se retira laissant le port à sec* ». *Chroniques niçoises 1887.*	2	Glissement sous-marin après un séisme
Rivière Hérault (Agde), 16 juin 1717	Retrait des eaux d'environ 1,8 mètre à Pont d' Agde	3	Inconnu
Marseille – Cassis 29 juin 1725	Remontée de l'eau de 5 à 6 pieds, un navire endommagé.	3	Inconnu
Marseille, 27 juin 1812	Dégâts dans le port de Marseille, des bateaux s'entrechoquent.	4	Inconnu
Gênes mer Ligure 9 octobre 1828	Dégâts dans le port de Gênes.	3	Glissement sous-marin ?
Marseille 9 juillet 1829.	Dégâts dans le port de Marseille, rupture d'amarres.	3	Inconnu
Sète (Hérault) 17 juillet 1841	Dégâts dans le port de Sète, vagues atteignant 3 mètres.	3	Inconnu
Marseille 27 février 1843	Raz de marée. Interruption de la circulation dans les quais.	3	Inconnu
Séisme de Kabylie (Jijel) 21 août 1856	Suite à une secousse en Algérie, le port de Mao (Minorque) a subit des dégâts.	4	Sismique
Séisme Mer Ligure 23 février 1887	« *A Antibes la mer s'était brusquement retirée laissant à sec les bateaux de pêche et des poissons sur le sable* ». Journal de Monaco 1 mars 1887.	3	Sismique
Le Grau du Roi (Gard) 20 août 1890	Un raz de marée laisse l'étang de Vidourle à sec. Les amarres de plusieurs bateaux situés à l'entrée de l'étang se sont brisées.	3	Inconnu
Côte varoise et côte catalane 30 juin 1897	A Barcelone, dégâts pour certains bateaux, dont un navire de guerre anglais qui a dû quitter le port.	3	Inconnu
Nice aéroport 16 octobre 1979.	11 morts. Dégâts dans les ports de Sant Laurent du Var et d'Antibes. Inondation d'un quartier à Antibes.	3	Glissement sous-marin
Séisme de Boumerdès 15 mai 2003	Descente du niveau de la mer de 1,5 mètre à Théoule-sur-Mer. Dommages dans certains ports de Minorque et Majorque.	3	Sismique
Baie de Marseille, 24 aout 2004	Retrait de l'eau, baisse d'environ 50 cm du niveau marin, pas des dégâts.	2	Glissement sous-marin

Tableau 1 : Extrait de la base de données *tsunamis.fr* (BRGM, millésime, 2009) des événements historiques (tsunamis ou autres) observés dans la côte méditerranéenne française

Certains de ces évènements, a priori bien renseignés, ont fait l'objet d'une recherche documentaire complémentaire et sont décrits dans les paragraphes suivants.

2.2 Séisme de Boumerdès (2003)

Le tremblement de terre de Boumerdès en Algérie (21-05-2003) de magnitude 6,7 a provoqué un tsunami dans la mer Méditerranée qui a impacté notamment les îles Baléares (Figure 3) avec des vagues atteignant 1,5 mètre.

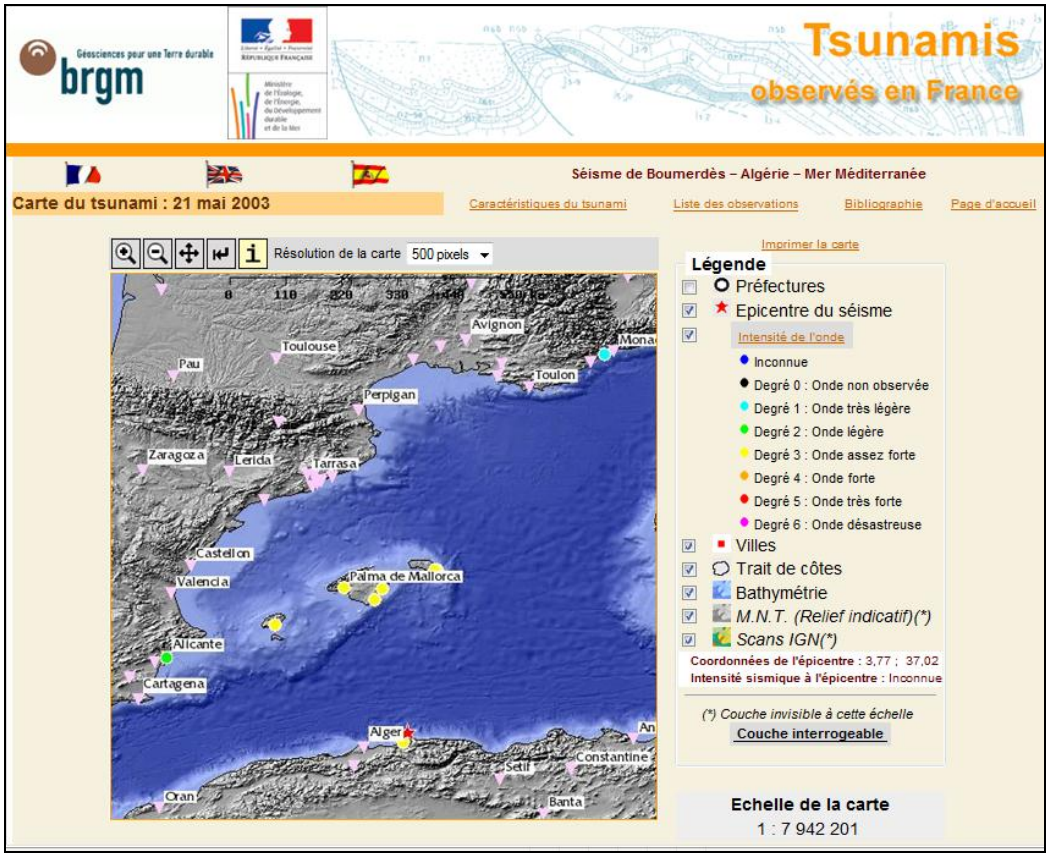


Figure 3 : Carte des observations du tsunami générées par le séisme de 2003, dît de Boumerdès (extrait de *tsunamis.fr*, BRGM, 2009)

Ainsi, dans les ports de l'Est de l'île de Minorque (Figure 4, Figure 5, Tableau 2) plusieurs bateaux ont coulés ou ont été endommagés (La Vanguardia, 23-05-2003, Figure 5 : Bateau coulé dans le port de Mahon (Minorque) à cause du tsunami de Boumerdès en mai 2003. (Image de la Vanguadia 23-5-2003).). Dans certains secteurs de la même île, le rez-de-chaussée d'hôtels en bord de mer a été inondé (Menorca.info 23-05-2003). Le détail des dommages observés dans les ports de l'île de Minorque après le tsunami de Boumerdès est résumé dans le Tableau 2.

Bien que l'on n'ait pas pu retrouver d'indication systématique sur la taille des bateaux endommagés ou coulés, le fait que l'on ne retrouve pas dans la presse de trace de l'endommagement d'embarcations de grande taille laisse à penser que seules les embarcations amarrées dans les zones de faible tirant d'eau (donc plutôt de petite taille) ont été sérieusement endommagées.

A Palma de Mallorca (île de Majorque), l'élévation du niveau marin a atteint un mètre sur certains secteurs de l'Est de l'île, impactant ainsi certains ports. Dans l'île d'Ibiza un bateau a coulé et une quinzaine de véhicules ont été emportées par l'inondation.

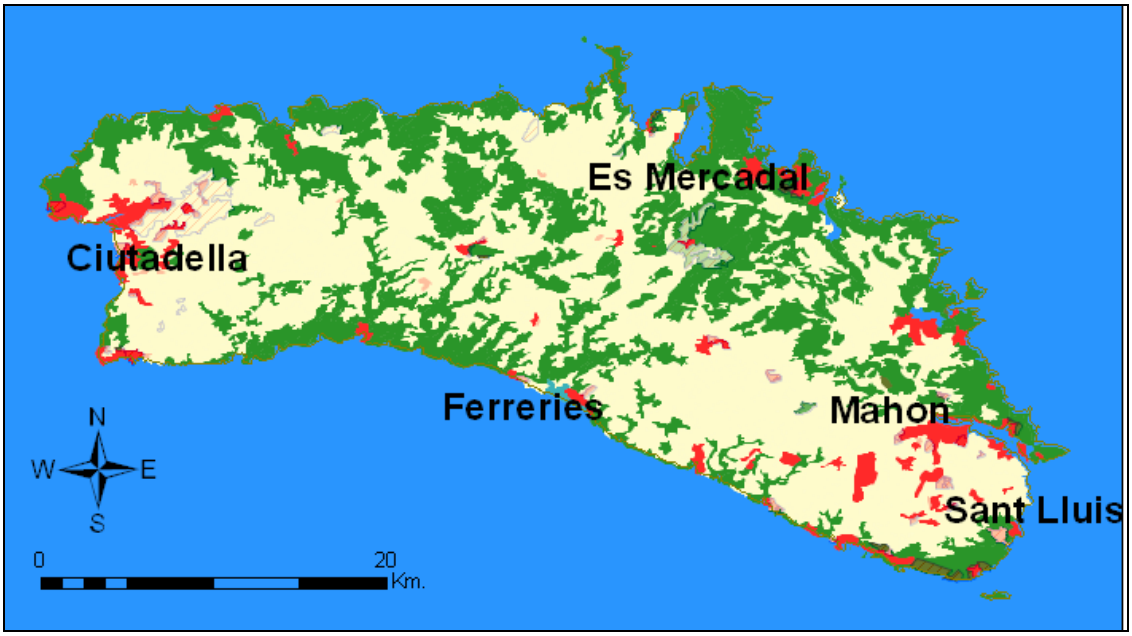


Figure 4 : Localisation au niveau de l'île de Minorque des lieux indiqués dans le texte et impactés par le tsunami de Boumerdès 2003 (fond Corine Land Cover, en rouge les zones urbaines).

Figure 5 : Bateau coulé dans le port de Mahon (Minorque) à cause du tsunami de Boumerdès en mai 2003. (Image de la Vanguadia 23-5-2003).

Ports	Dommages	Capacité du port*
Colàrsega Mahon	11 bateaux coulés, 26 endommagés	230
Ensemble des ports de Mahon	73 bateaux coulés, 80 endommagés	1460
Cala Llonga	20 bateaux coulés	115
Es Castell, Mahon	11 bateaux coulés, 26 endommagés	100
Sant Lluis	19 bateaux coulés, 30 endommagés	130
Es Mercadal	4 bateaux coulés	80
Ferreries	6 bateaux coulés, 6 endommagés	80

Données issues soit du site web des ports, soit d'un comptage manuel des embarcations à partir des images aériennes (GoogleEarth©).

Tableau 2 : Dégâts observés dans les ports de l'île de Minorque lors du tsunami de Boumerdès en 2003

Le même tsunami a touché aussi une partie de la côte française (www.azurseisme.com) avec une intensité moindre. A Théoule-sur-Mer (Figure 6) plusieurs petits bateaux ont été couchés par des vagues plus fortes que la normale. Selon le chef du secteur maritime de Théoule, ce phénomène s'est produit durant la nuit du 21 au 22 mai 2003. Il s'est manifesté par l'arrivée d'un train de houle de forte ampleur. Il a eu pour effet une montée rapide et importante du niveau de l'eau avec ensuite un retrait provoquant par "effet de pompe" un assèchement partiel du port.

Figure 6 : Vue de la côte à Théoule-sur-Mer (extrait de Google Earth) touchée par le tsunami de Boumerdès en 2003

Le niveau de l'eau est descendu d'environ 1,50 m dans l'ensemble des bassins, avec de très forts courants entrants et sortants. Un bateau de 5 mètres de long a coulé, les quilles ont touché le fond du port et des amarres se sont rompues.

Dans le port de Mouré-Rouge à Cannes, un bateau s'est échoué et des amarres se sont rompues (Sahal et al. 2009).

A Antibes des plaisanciers ont signalé des vagues importantes. Un retrait d'un mètre aurait été observé près d'Hyères dans le département du Var (Azur Séisme).

2.3 Le tsunami de l'aéroport de Nice du 16 octobre 1979.

Le tsunami de l'aéroport de Nice (Figure 7, Figure 8, Tableau 3), en 1979, a fait l'objet d'un intérêt particulier de la part de la presse de l'époque. Outre le nombre de victimes, une polémique importante au sujet de l'origine du tsunami, avec la possibilité avancée par certains d'un glissement de l'extension de la plateforme du nouveau port, explique le nombre important des articles de presse[1] traitant du sujet.

La conséquence la plus grave en relation avec ce phénomène fut la mort de dix personnes travaillant sur l'extension de la plateforme (Figure 9) lorsque celle-ci à brutalement glissée en mer et a donc été détruite et submergée.

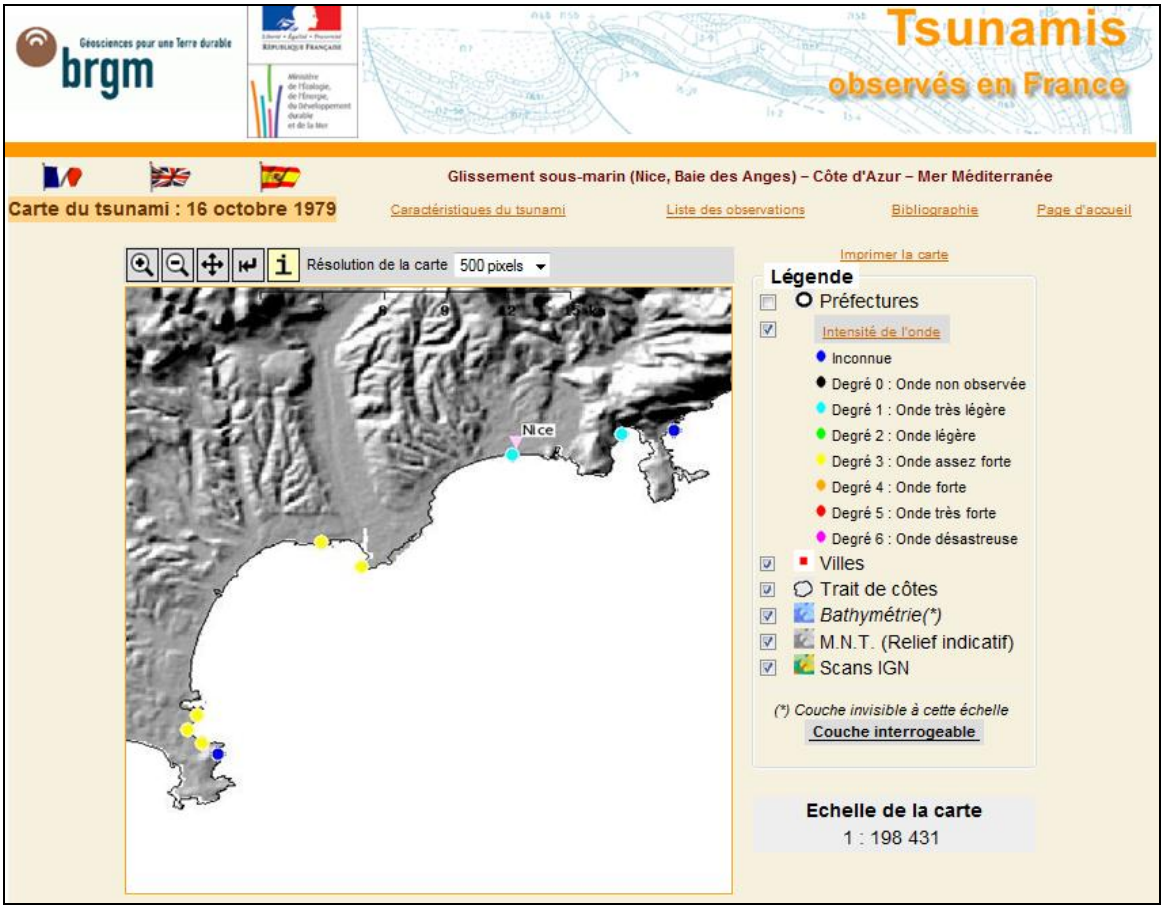


Figure 7 : Lieux d'observation du tsunami de1979 enregistrés dans la base *tsunamis.fr* (BRGM, 2009)

[1] Les images correspondent à l'archive photographique du journal Nice Matin (http://www.nicematin.com/ta/tsunami/216868/tsunami-a-antibes-l-evenement-en-images) et au site http://www.lamouettelaurentine.net/st_laurent_du_var/port/tsunami.htm

Figure 8 : Vue de la côte entre l'aéroport de Nice et Antibes (extrait de Google Earth) touchée par le tsunami de 1979

Tableau 3 : Liste des observations recueillies sur le tsunami de 1979.

Lieu	Source	Observations
Antibes, la Salis	http://lamouettelaurentine.net, article Nice Matin	Voitures emportées par le flot. Une fer morte dans la cave du moulin à l'hui
Antibes Port de la Salis	http://lamouettelaurentine.net, article Nice Matin	50 embarcations coulées
Antibes, la Garoupe	http://lamouettelaurentine.net, article Nice Matin	Toutes les installations balnéaires ont été emportées, sauf celles qui étaient en dur et en hauteur
Port Vauban Antibes	http://lamouettelaurentine.net, article Nice Matin	Rupture d'une chaine libère plusieurs embarcations
Port St Laurent	http://lamouettelaurentine.net, article Nice Matin	Le port s'est pratiquement vidé, niveau a baisé 2 m. Endommagement d'embarcations
Antibes Salis	http://lamouettelaurentine.net, article Nice Matin	Rupture vitrines au RDC, inondation bâtiments
Vieux Port Nice	http://lamouettelaurentine.net, article Nice Matin	Amplitude vague 0,8 à 1,5 m
Port Canto Can	http://lamouettelaurentine.net, article Nice Matin	Raz de marée dans le port, moindre qu'à Antibes
Port Cannes	http://lamouettelaurentine.net, article Nice Matin	Raz de marée dans le port, moindre qu'à Antibes
Aéroport Nice	http://lamouettelaurentine.net, article Nice Matin	Disparition d'une partie du nouveau port de Nice
Port Salis Antibes	http://www.tsunamis.fr/scantsunamis%5CT00600 02_36-03_OR.gif	50 embarcations coulées
Antibes Ilette	http://www.tsunamis.fr/scantsunamis%5CT00600 02_36-03_OR.gif	10 voitures emportées contre les murs
Antibes la Salis	http://www.tsunamis.fr/scantsunamis%5CT00600 02_36-03_OR.gif	Boulevard James Willye plein de détritus

Antibes Garoupe	http://www.tsunamis.fr/scantsunamis%5CT0060002_36-03_OR.gif	Retrait 300 m
Hôtel Josse Antibes	http://www.nicematin.com/ra/antibes/216798/antibes-il-y-a-30-ans-une-vague-meurtriere-sur-la-ville	L'hôtel Josse, envahi par l'eau et les branches avait dû fermer.
Port Salis Antibes	http://www.nicematin.com/ra/antibes/216798/antibes-il-y-a-30-ans-une-vague-meurtriere-sur-la-ville	« A la base de voile soixante-dix dériveurs avaient été détruits ainsi que le matériel »
Port Salis Antibes	http://www.nicematin.com/edito/photo/510/20091015/nm-photo-268941.jpg	Image Nice Matin
Aéroport Nice	http://www.nicematin.com/ta/a%E9roport/217002/nice-catastrophe-du-16-octobre-1979-deux-rescapes-se-	Témoignage travailleurs port de Nice
Antibes Ilette	http://www.nicematin.com/ta/tsunami/216800/antibes-ils-ont-ete-les-premiers-pompiers-sur-les-lieux	Ilette, moulin d'huile. Témoin d'un pompier: « j'ai trouvé la personne noyée dans un mètre d'eau [...] Soudain une deuxième vague nous a soulevés jusqu'au plafond, avant de se retirer »
Port Vauban Antibes	http://www.nicematin.com/ta/tsunami/216800/antibes-ils-ont-ete-les-premiers-pompiers-sur-les-lieux	Au port Vauban les bateaux étaient montés au niveau des quais.
Port Villefranche	http://www.tsunamis.fr/fiche_observations.asp?NUMEVT=60002	Vague 1 m
Marina baie des Anges	http://lamouettelaurentine.net, article Nice Matin	Variation entre 1.2 et 1.5 m
Hôtel Josse - Antibes	Photographie Nice Matin	
Port Salis - Antibes	Photographie Nice Matin	
Ilette - Antibes	Photographie Nice Matin	
Beaulieu	http://www.tsunamis.fr/fiche_observations.asp?NUMEVT=60002	

Figure 9 : Localisation d'observations de dommages générés par le tsunami de 1979.

Un autre décès concerne celui-ci directement lié à l'inondation provoquée par le tsunami, a eu lieu à Antibes, dans le secteur de la plage de la Salis, où une femme âgée est morte noyée à l'intérieur d'un bâtiment en front de mer.

Dans la même zone d'Antibes, la vague a envahi une rue et emporté une douzaine de voitures qui y étaient garées (Figure 10). Le journal Nice Matin parlait d'une centaine d'immeubles impactés par le flot entre le port de la Salis et la rue de l'Ilette. A la Garoute (coté Est du Cap d'Antibes), toutes les installations balnéaires ont été emportées sauf les bâtiments en dur qui étaient en surélévation. Des témoignages sur Antibes parlent d'une amplitude de la vague entre 2,5 et 3,5 mètres (d'après Yang et al. 2001, in tsunamis.fr).

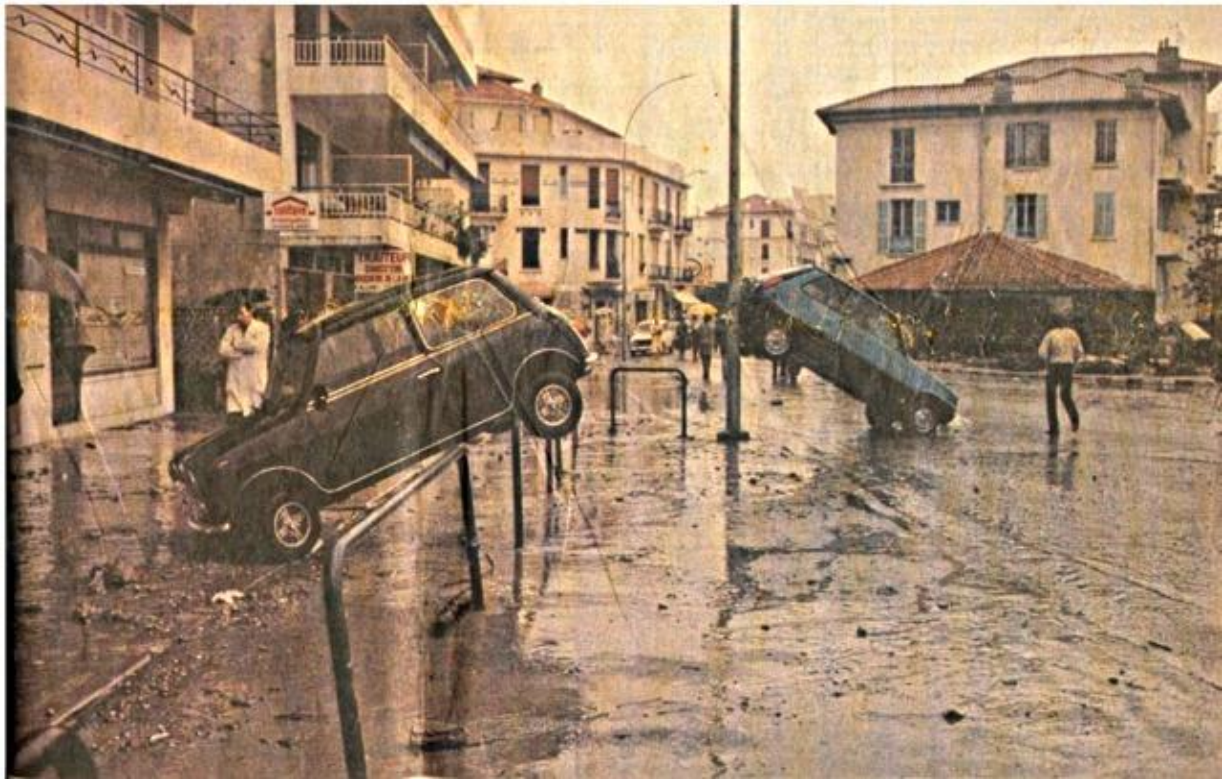


Figure 10: Photographie des conséquences du tsunami du 1979 à Antibes (http://www.lamouettelaurentine.net/st_laurent_du_var/port/tsunami.htm).

Dans les ports, les dégâts furent importants. Le port de la Salis à Antibes a compté des nombreux bateaux détruits ou endommagés (Figure 11). La rupture d'une chaîne-mère dans celui de Vauban (Antibes) a libéré plusieurs embarcations qui se sont entrechoquées.

Le port de Saint Laurent-du-Var s'est vidé, et lors du retour de l'eau celle-ci a pénétré dans le port à une vitesse estimée de 30 km/h provoquant l'endommagement de plusieurs bateaux (Nice Matin).

Des variations du niveau d'eau ont été observées aussi dans le port de Nice (amplitude entre 0,8 et 1,5 m), Marina-Baie des Anges (1,2 m à 1,5 m) et Port Canto à Cannes à un degré moindre.

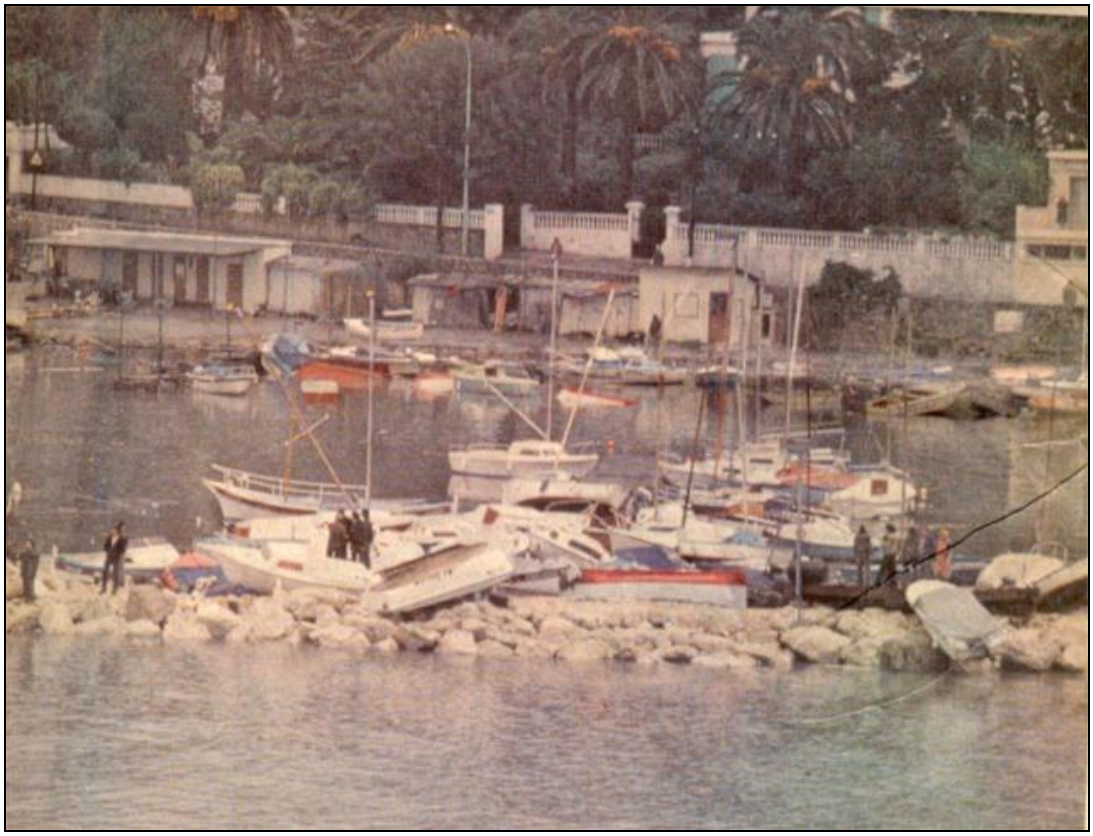


Figure 11: Dégâts au port de la Salis à Antibes
(http://www.lamouettelaurentine.net/st_laurent_du_var/port/tsunami.htm).

Sahal et al. (2010) ont rassemblé des témoins de cet événement et ont consulté des rapports non publiés rédigés pendant l'enquête faite après le tsunami. Ce travail leur a permis de créer une base de données d'observations sur le quartier de la Salis (Antibes) et de délimiter avec précision la zone inondée (Figure 12).

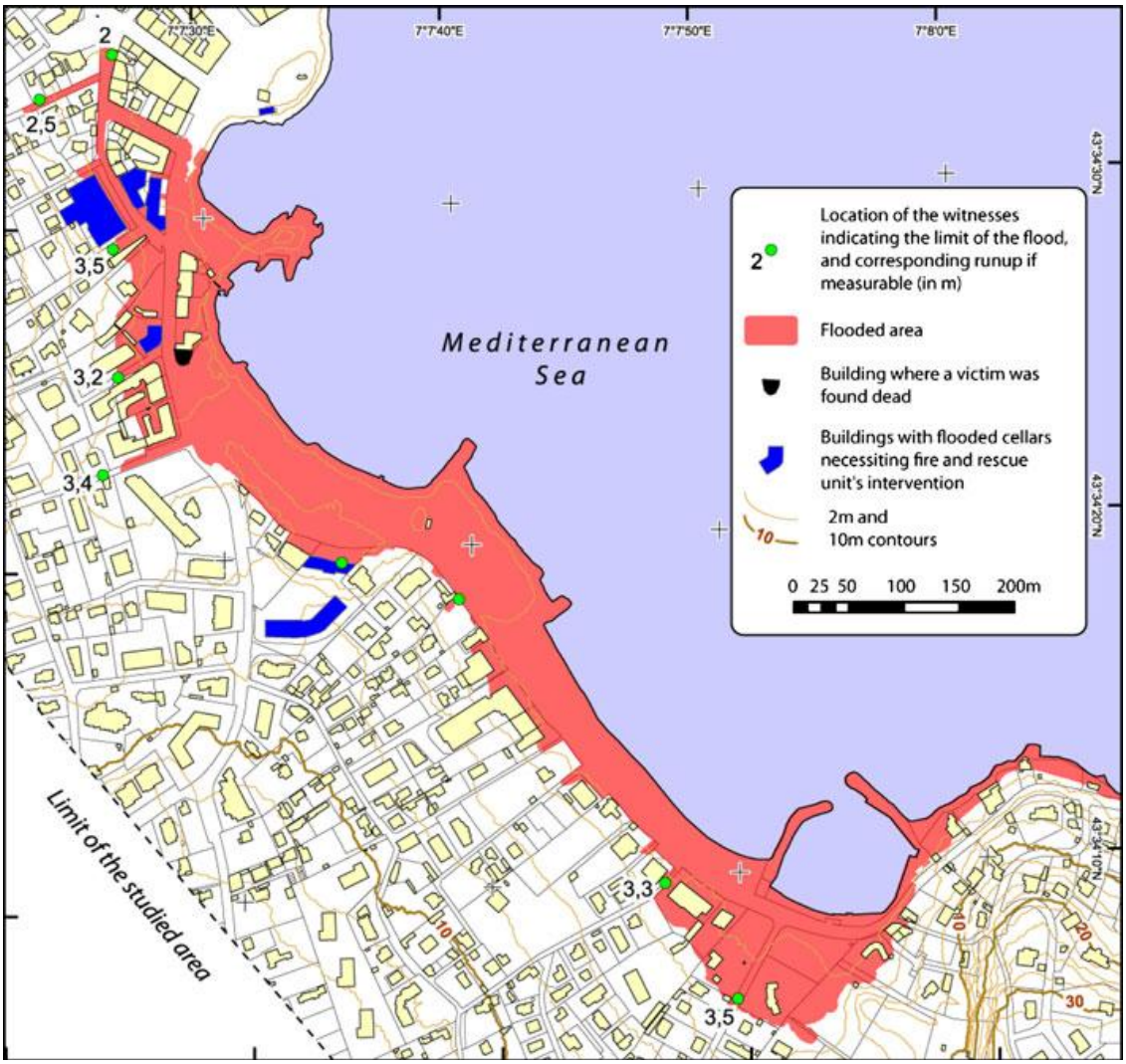


Figure 12: Carte de la zone inondée par le tsunami de 1979 dans le quartier de la salis à Antibes (extrait de Sahal et al., 2010).

2.4 Séisme Mer Ligure 1887

Le séisme de la mer Ligure du 23 février 1887 a déclenché un tsunami qui a impacté une partie du littoral de la Côte d'Azur (Figure 13). Les plus forts dégâts se sont produits en Italie.

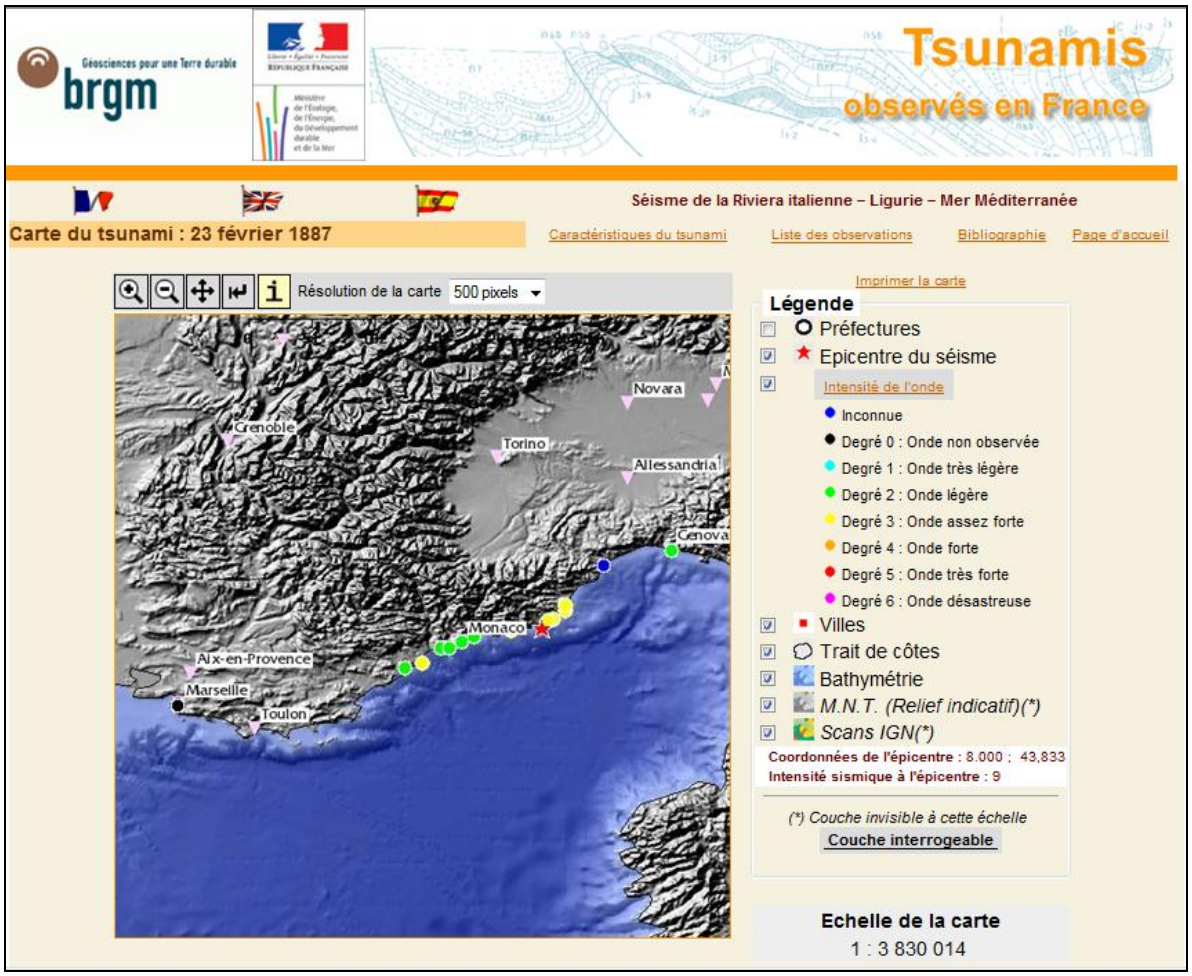


Figure 13 : Lieux d'observation du tsunami de 1887 enregistrés dans la base tsunamis.fr (BRGM, 2009)

Des retraits de la mer furent observés à Villefranche-sur-Mer, Monaco, San Remo, Riva, San Stefano, Oneglia, Alassio, Antibes et Nice.

Naudin (1887) explique dans la revue de l'Académie des Sciences (*tsunamis.fr*) le phénomène qu'il avait observé de cette manière: « la *mer a tout à coup baissé d'environ 1 m, laissant le fond à découvert sur une étendue plus ou moins grande, suivant la profondeur. Des navires qui étaient à flot dans le port ont touché terre pendant quelques instants, puis la mer est remontée avec une certaine impétuosité à son niveau habituel. Ce fait ne semble pas pouvoir s'expliquer autrement que par un soulèvement momentané du sol* ».

Dans le Petit Niçois du 28 février 1887, on peut lire que « *les eaux du port ont baissé rapidement de près d'un mètre à tel point que les navires chargés ont talonné et pris une assez forte inclinaison ». Ce* phénomène, qui d'ailleurs n'a causé aucune avarie, s'est produit trois fois dans l'espace d'une demi-heure. Une chaloupe montée par six matelots, après avoir remorqué un brick-goélette retournait vers la passe du port lorsqu'elle a été saisie par un courant d'une telle violence qu'elle a été rejetée sur le môle du phare *(www.azurseisme.c*om*)*.

Dans la revue *Astronomi*e de l'époque, le témoignage de personnes se trouvant au Cap Ferrat donne les précisions suivantes (www.azurseisme.com): « *cette mer calme, comme endormie, alourdie mais d'une teinte bleu et jaune ; puis tout à coup elle se retire, et laisse les algues, les rocs à nu sur une longueur de cent mètres ; puis elle revient avec une force de soulèvement qui ne ressemble à aucune vague »*.

Le commandant du vapeur Guadeloupe voyageant de Gênes à Marseille ressentit à 6 heures du matin deux fortes secousses, comme si le navire avait touché un écueil. Le commandant fit ralentir la machine pour examiner la cale. Vers 8 heures, le navire ressentit une autre secousse, mais moins sensible (*www.azurseisme.com*).

2.5 Phénomènes d'origine météorologique

Les seiches ont des conséquences très similaires à celles des tsunamis. Aux îles Baléares ce phénomène est relativement fréquent. Il se produit de préférence en été, et est dû à des variations de la pression atmosphérique. Il est connu sous le nom de *rissaga*.

En juin 2006, le port de Ciutadella (Minorque) a subit une seiche ayant atteint 5m d'amplitude. Une importante iconographie est disponible sur cet évènement. Elle peut aider à comprendre, par analogie, les conséquences d'un tsunami au niveau d'un port. Dans un premier temps, le port s'est complètement vidé et les bateaux se sont posés sur le fond (Figure 14). Ce déplacement vertical a provoqué des ruptures d'amarres, libérant ainsi les bateaux. Dans un deuxième temps, le niveau marin a remonté, les embarcations se sont remises à flotter, mais celles qui ont rompu leurs amarres se sont alors déplacées librement dans le bassin au grès des courants violents et ont percuté les autres bateaux ou les quais (Figure 15).

Pour prévenir ces dommages, lorsqu'une seiche est prévue (ce phénomène, étant prévisible), les marins ont l'habitude[2] de donner du mou aux amarres des bateaux pour éviter qu'elles se brisent.

La périodicité de ce phénomène d'amplitude moyenne d'environ un mètre est annuelle en Méditerranée. Les seiches décennales présentent environ 3 mètres d'amplitude (Rabinovich et al. 1998). C'est pour des phénomènes présentant une période de retour décennale et plus que les endommagements des embarcations peuvent être très importants (Rabinovich et al. 1998).

L'événement de juin 2006 a eu pour conséquence une trentaine d'embarcations coulées et une centaine d'endommagées, sur une capacité du port d'environ 300 anneaux.

[2] Sebastià Montserrat, IMEDEA (Institut Méditerranéen d'Etudes Avancés)

Figure 14 : Port de Ciutadella (Minorque) pendant une seiche (« rissaga »), descente du niveau de l'eau : Certaines embarcations reposent sur le fond (http://ichep.blogspot.com/2006/06/rissaga-ciutadella.html)

Figure 15: Port de Ciutadella (Minorque) pendant une seiche (« rissaga »), retour de l'eau : dérive des bateaux ayant rompu leurs amarres (http://ichep.blogspot.com/2006/06/rissaga-ciutadella.html).

2.6 Cas d'autres tsunamis récents en dehors de la côte méditerranéenne occidentale

Pour compléter les données permettant d'apprécier la nature et l'importance des dommages induits par des tsunamis d'ampleur modérée (hauteur de vague maximale inférieure à 4 mètres), l'analyse de quelques tsunamis de ce type, qui ont eu lieu en dehors de la mer Méditerranéenne occidentale, a été conduite dans le cadre de cette étude.

Le tsunami de l'océan Indien de décembre 2004 fut observé dans les îles Maldives, situées à 2 500 kilomètres de la source du tsunami, avec des valeurs d'hauteur d'eau entre 3 et 4 mètres. Le rapport de Keating et al. (2005) décrit les différents types de dégâts observés.

- Dégâts sévères pour la végétation, arbres arrachés, végétation tuée par l'inondation et le sel.
- Dépôt de sable à l'intérieur et l'extérieur des bâtiments.
- Portes et fenêtres arrachées, fissures dans des murs. Destruction de certains bâtiments.
- Rupture de l'appontement et de la jetée de certains ports.
- Transport d'objets lourds à terre (par exemple barques).
- Estimation initiale de 80 morts (noyade). Blessures par impact.

Suite à l'éruption du volcan dans l'île de Montserrat, en juillet 2003, un tsunami a été généré affectant la Guadeloupe pendant la nuit (Pelinovsky et al., 2004). Lendemain, dans le port de Deshaies, les pécheurs, ont trouvé une dizaine d'embarcations échouées à une quinzaine de mètres à l'intérieur des terres, dont quelques unes légèrement endommagées. La surélévation du plan d'eau est estimée à l'entrée du port de 1,5 mètre, la hauteur de la jetée du port étant égale à 40 cm. Dans le même secteur, une rivière a débordé (hauteur d'eau estimée en 60 cm).

Le 24 mars 2002, dans l'île de Rhodes en Grèce, un glissement sous-marin a généré un tsunami. La hauteur de la vague a varié entre 3 et 4 mètres. L'eau est passée par-dessus un mur de protection de la ville de Rhodes. Les magasins en front de mer ont enregistré des dégâts, et des objets ont été mobilisés à l'intérieur de la ville (Papadopoulos et al., 2007).

2.7 Conclusion sur l'analyse en retour

Les principaux effets des tsunamis ou raz-de-marée historiques observés sur la côte méditerranéenne occidentale sont les suivants :

- Très souvent, un retrait brusque des eaux au niveau des ports. Les témoignages historiques de ports vidés ou à sec sont nombreux.
- Les zones portuaires sont les plus touchées par les tsunamis. Le retrait des eaux peut provoquer des ruptures d'amarres ayant comme conséquence l'endommagement des bateaux. L'endommagement d'installations portuaires est aussi observé.
- Plus rarement, le tsunami peut donner lieu à une inondation des zones côtières basses.
- Les surélévations maximales atteintes seraient, d'après les témoignages, de l'ordre de 2 à 3 mètres (cf. quartier de la Salis à Antibes en 1979).

Une pénétration significative de l'onde à terre étant rare, les pertes humaines causées par un tsunami sont peu nombreuses. Malgré le faible nombre de victimes historiquement recensé, il semblerait que la principale cause de blessure ou de décès soit la noyade et les phénomènes liés à l'impact direct de la vague sur la population.

Parmi toutes les archives analysées (*tsunamis.fr,* BRGM, millésime, 2009 ; Tinti et al 2004) et relatives à la côte Méditerranéenne française, aucune n'indique jusqu'à présent d'observation de destruction de bâtiment par un tsunami dans cette partie de la Méditerranée. Ce qui est très différent des événements de forte intensité comme celui de l'océan Indien survenu en 2004 ou ceux survenus le long de l'arc hellénique (Crête, 365, Rhodes, 1303), de Sicile (Messine, 1908) ou encore de Lisbonne (1755).

Le retour d'expérience du tsunami de 2004 dans l'océan Indien montre que, en règle générale, les bâtiments de bonne qualité ne se sont pas effondrés, ce qui a conféré le statut de refuge aux bâtiments qui disposaient de plusieurs niveaux, et ce même face à des vagues de taille exceptionnelle (plus de 5 mètres). Pour un tsunami d'une intensité beaucoup plus faible, où la surélévation d'eau attendue est rarement supérieure à 3 mètres, l'effondrement des bâtiments ne semble pas être une cause importante de perte pour la population.

Même s'il ne s'agit pas d'un tsunami mais d'un phénomène météorologique exceptionnel, la tempête Xynthia en février 2010 dans la côte atlantique, a rappelé l'importance du risque pour une population située à l'intérieur de maison à un seul niveau (RDC) en cas d'inondation, causé par l'impossibilité de se réfugier dans un niveau supérieur.

Toutefois, il semble important de tempérer le constat plutôt optimiste résultant de l'analyse historique des tsunamis en Méditerranée occidentale. Il importe en effet

d'intégrer à cette analyse en retour les conséquences de l'évolution du littoral, en particulier en terme démographique. Comme en effet le souligne Proenza (2006), une étude de risque basée uniquement sur l'analyse en retour des évènements passés pourra conduire à une sous-estimation du risque si celle-ci ne prend pas en considération les conséquences de l'explosion du phénomène touristique. Laquelle explosion touristique est très récente par rapport à la période de retour des tsunamis.

3 Etat de l'art sur les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis

Une recherche bibliographique dans la littérature scientifique et technique a été menée afin d'inventorier et d'analyser les méthodes et travaux faits pour évaluer la vulnérabilité de différents enjeux matériels, mais aussi de la population vis-à-vis d'un tsunami. Une grande partie de ces travaux est basée sur l'observation et l'interprétation des dommages générés par le tsunami de l'océan Indien de décembre 2004.

3.1 Vulnérabilité physique humaine

Un tsunami provoque une inondation du littoral, espace souvent occupé par l'homme. Par conséquent la vulnérabilité physique humaine dépend de la capacité des personnes à se défendre et à se déplacer en cas d'inondation.

Cette inondation peut localement se caractériser par plusieurs facteurs physiques, variant pendant la durée de la submersion : hauteur d'eau, vitesse (direction et intensité) du courant, charge solide transportée, …

Koshimura et al. (2006) proposent une courbe de vulnérabilité des personnes basée sur un bilan des forces qui agissent sur une personne impactée par l'inondation (Figure 16). Il s'agit de comparer la force de résistance d'une personne face à l'inondation, qui correspond au frottement avec le sol (coté gauche de l'équation ci-dessous) et les forces hydrodynamiques qu'elle reçoit (coté droit de l'équation ci-dessous).

$$f(\mathrm{mg} - w) \leq \alpha \int \frac{1}{2} \rho C_{\mathrm{D}} u^2 \mathrm{d}S + \int \rho C_{\mathrm{M}} \frac{\partial u}{\partial t} \mathrm{d}V$$

Où f est un coefficient de friction, mg est le poids d'une personne, w est la flottabilité de cette personne, α est un facteur de correction qui considère un facteur psychologique obtenu par Suga et al. (1995) lié au comportement des individus confrontés à l'inondation. Le coté droit est l'équation de la force hydrodynamique décrite par Morrison et al (1950), où ρ est la densité de l'eau, C_D et C_M sont les coefficients de friction et d'inertie, u est la vitesse du flux et dS et dV sont respectivement la surface projetée perpendiculaire au flux et un élément de volume du corps humain.

Lorsque cette inéquation (force d'inondation supérieure à la résistance des personnes) est vérifiée les personnes ne peuvent plus résister efficacement au flot et sont emportées par le courant.

La courbe que Koshimura et al. (2006), Figure 17, est établie pour une personne de taille moyenne 1,70 m pour un poids de 70 kg.

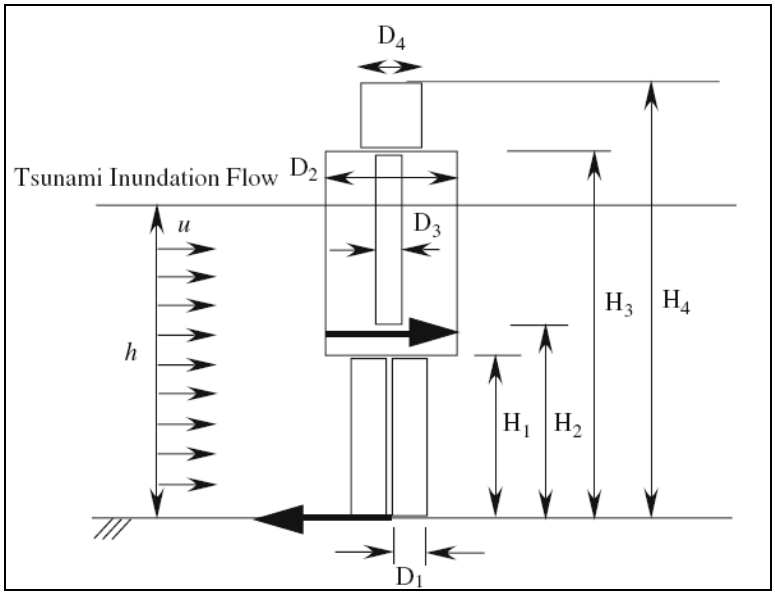
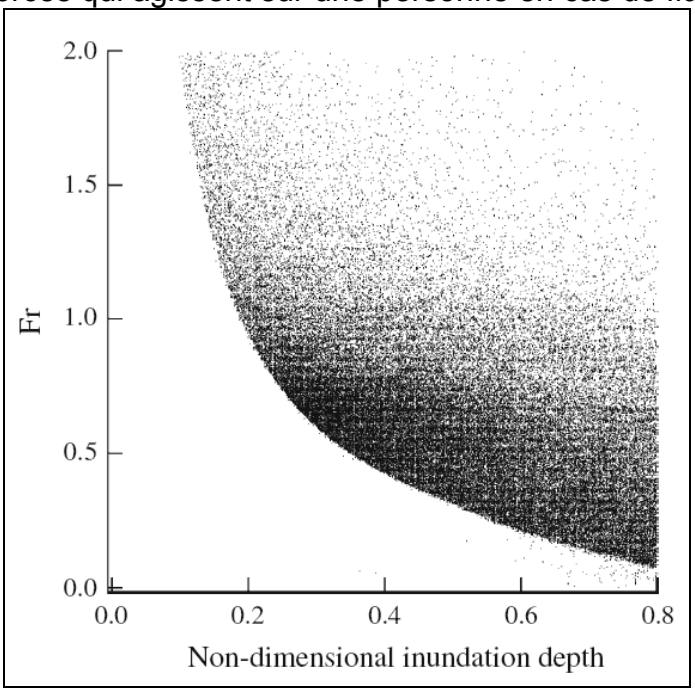


Figure 16 : Schéma du corps humain considéré par Koshimura et al. (2006) pour modéliser les forces qui agissent sur une personne en cas de flux d'inondation.



Axe vertical :

Fr= u/racine (H*g)

Axe horizontal : Hauteur d'eau / taille d'une personne, valeur adimensionnelle dite de profondeur d'inondation.

La zone en noir correspond aux valeurs où les forces du flux sont supérieures

Figure 17 : Courbe de vulnérabilité des personnes d'après Koshimura et al. (2006).

Dans la même étude Koshimura et al. (2006) proposent aussi un ratio de mortalité dû à l'inondation provoquée par le tsunami. Cette valeur se définie par le ratio entre le temps d'inondation où l'inéquation est accomplie (forces d'inondation supérieures à la résistance des personnes) et le temps total d'inondation. Cette approche a été

mise en œuvre par la simulation d'un tsunami sur la ville nord-américaine de Seattle (Figure 18).

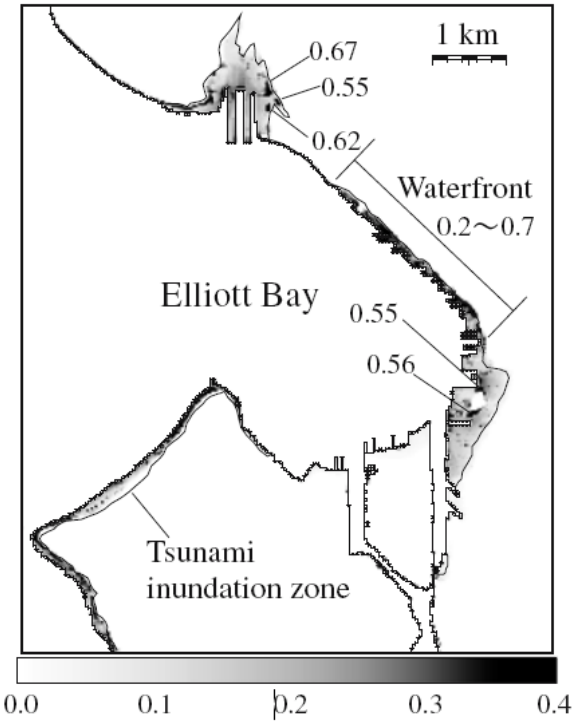


Figure 18 : Carte de l'indice de mortalité estimé à Seattle par Koshimura et al. (2006).

Les travaux de Sugimoto et al. (2003) leur ont aussi permis de proposer des taux de mortalité d'une population soumise à un tsunami et située à l'extérieur de bâtiment. Ces auteurs considèrent qu'une personne de corpulence et de taille moyenne ne peut plus se déplacer lorsqu'elle a de l'eau au-dessus du genou (0,5 m) ou que le courant présente une vitesse supérieure à 2 m/s, Figure 19.

Dans le même esprit, on trouve les courbes qui apparaissent dans le guide méthodologique des PPRI français (Plan Prévention des Risques d'Inondation). Ces courbes ont été construites sur la base d'études de capacité de déplacement en zone inondée. Selon cette étude, la vitesse de 0,5 m/s (environ 2 km/h) constitue un seuil au-delà duquel il y a un danger important, avec risque de noyade pour les personnes.

La comparaison des 3 courbes montre que dans le cas d'une personne adulte, les courbes de Koshimura et al. (2006) sont plus optimistes que celles de Sugimoto et al. (2003) ou des PPRI, Figure 19.

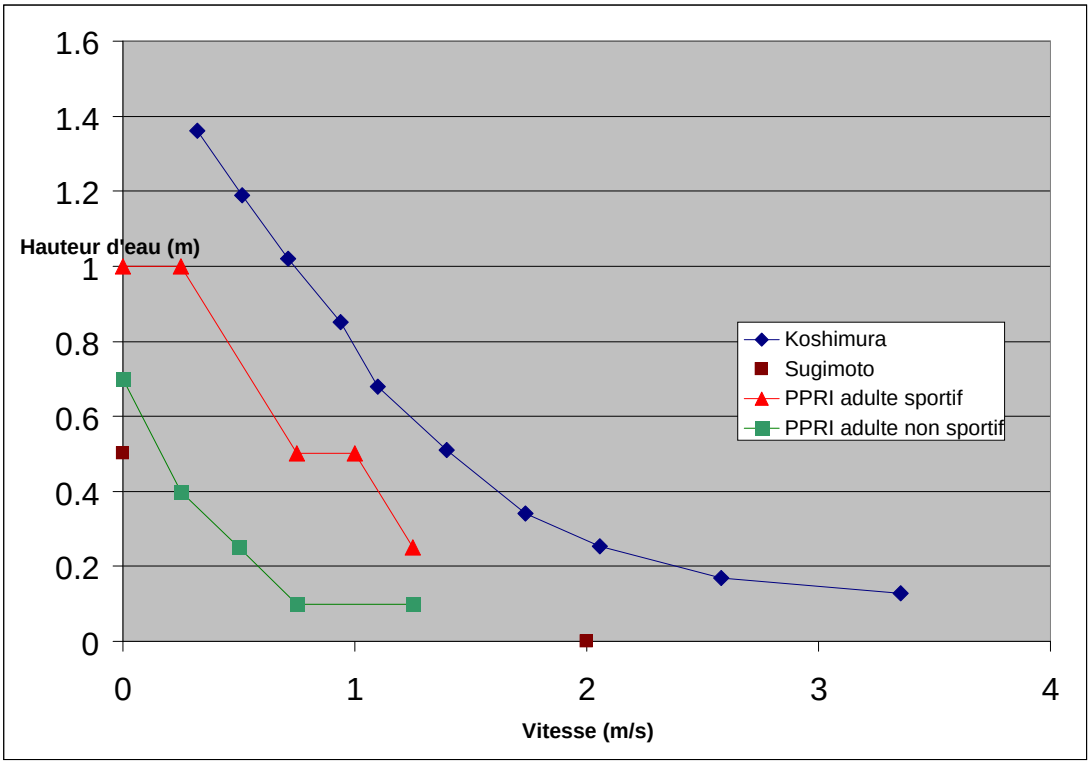


Figure 19 : comparaison des différentes valeurs d'hauteur d'eau et vitesse trouvées dans la littérature délimitant des secteurs de mobilité des personnes en cas d'inondation.

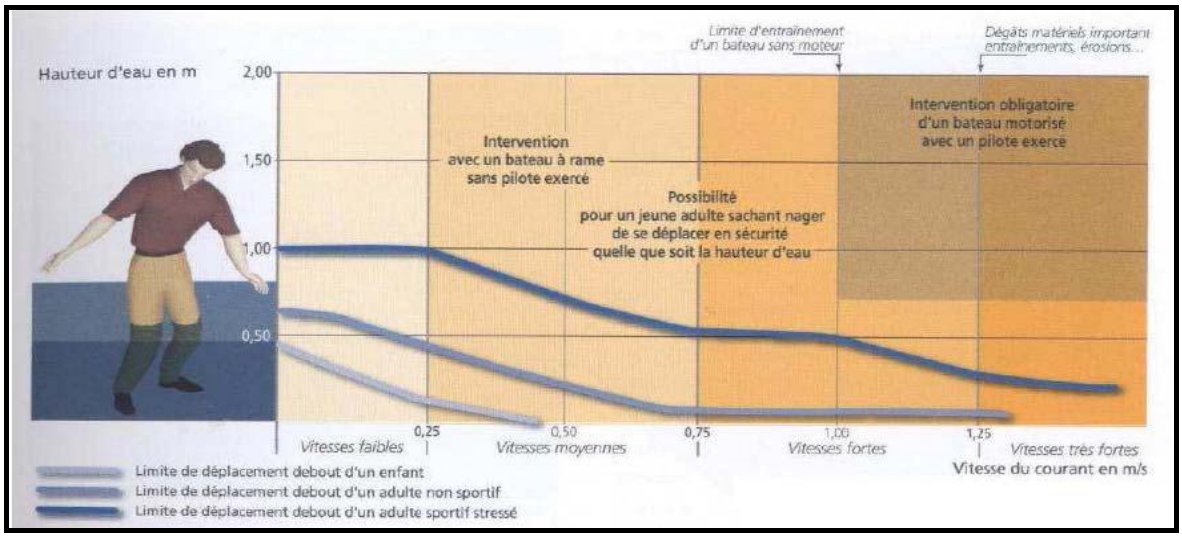


Figure 20 : Hauteur d'eau, vitesse de flux et mobilité des personnes (plaquette de MEDAD/SDPRM 2000 guide méthodologique des PPRI, extrait de GSC 2009).

D'autres travaux présentent des ratios de mortalité observés dans des événements passés et ce en fonction de différents critères comme l'âge, le sexe, la capacité à nager, la localisation au moment du tsunami, etc.

Guha Sapir et al. (2006) dans une étude en Inde observent que l'âge se révèle comme un facteur important car les personnes âgées et les enfants sont les plus sinistrés. Par ailleurs, concernant la localisation des personnes, fort logiquement, les ratios de mortalité observés sont plus grands pour les gens qui étaient sur la plage ou à faible distance de la mer (Figure 21).

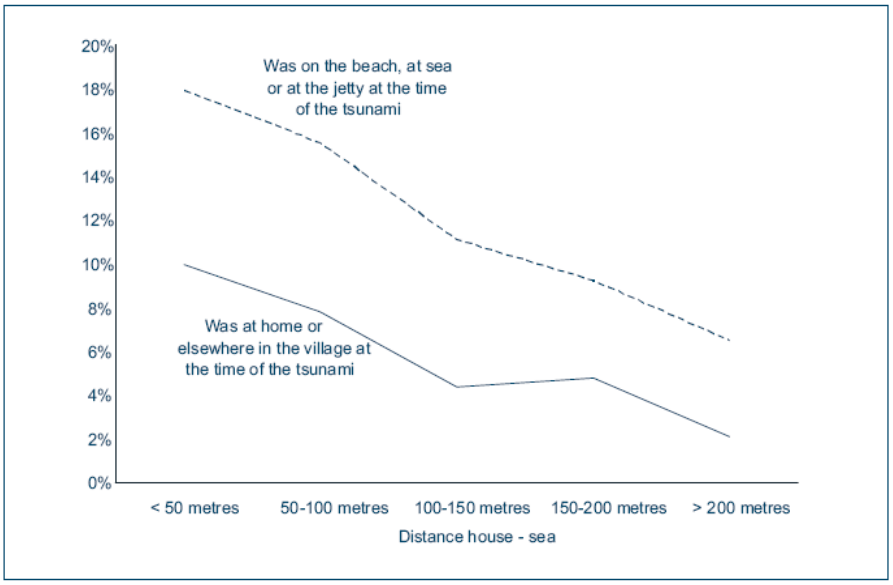


Figure 21 : Pourcentages de mortalité calculés pour le tsunami indonésien de 2004, en fonction de l'emplacement des personnes au moment du tsunami (Guha Sapir et al. 2006).

Nishikiori et al. (2006), dans une étude similaire sur l'impact du tsunami de 2004 au Sri Lanka, observent que le ratio de mortalité a été plus fort pour la population qui se situait à l'intérieur des édifices qu'à l'extérieur dans un secteur, dans le cas où le taux de destruction du bâti était très important. Nishikiori et al. (2006) donnent des ratios de mortalité en fonction de l'emplacement des personnes situées à l'extérieur de bâtiments lors de l'arrivée de la vague :

- 9.4% pour les gens qui étaient sur la plage,
- 8.3% pour les gens qui étaient en mer,
- 7.4% pour les gens qui étaient autour de maison et
- 2.3% pour d'autres localisations.

La mortalité moyenne des personnes à l'extérieur a été calculée à 5.9%.

Proenza (2006) utilise un ratio de préjudice égal à 10% pour donner une idée du potentiel meurtrier des tsunamis aux Etats-Unis.

3.2 Vulnérabilité structurelle des bâtiments

À la différence du mouvement sismique vibratoire, pour lequel les dommages aux bâtiments sont la principale cause de perte humaine, concernant les tsunamis, le bâtiment n'est pas forcement l'endroit le plus dangereux pour la population. Ce constat est clairement mis en évidence dans le calcul et l'analyse de données statistiques de Guha Sapir et al. (2006). En cas de séisme, on doit, si on en a le temps, sortir du bâtiment ; en cas de tsunami cela peut être le contraire : le bâtiment peut être considéré comme un refuge, en particulier s'il possède des étages. La stabilité structurelle du bâti doit néanmoins être prise en compte, pour justement estimer la qualité de ce refuge.

Lors du tsunami de 2004 dans l'océan Indien, de nombreuses constructions des pays sinistrés ont subi un endommagement important. Saatcouglu (2009) cite les différents mécanismes d'endommagement ou forces qui agissent sur le bâtiment en phase d'inondation du tsunami :

- La force hydrostatique, générée par la pression d'eau immobile perpendiculaire aux surfaces verticales. Elle est souvent petite par rapport à d'autres forces dynamiques mais elle peut être importante quand l'effet du tsunami peut s'assimiler à celui-ci d'une marée rapide (« *rapidly riding tide* » en anglais).

- Les forces de flottation (poussée d'Archimède) peuvent provoquer le déplacement de structures, surtout les plus légères.

- Les forces hydrodynamiques, directement proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement. La valeur de cette force appliquée sur une surface dépend de la valeur de l'aire mais aussi de la forme de la surface (hydrodynamisme).

- Impact de débris. Un tsunami peut transporter des objets flottants lourds comme des voitures, des bateaux, des parties des bâtiments, etc. L'impact de ces objets contre une structure peut contribuer fortement à son endommagement.

Après le tsunami de 2004, de nombreuses publications et études, basées sur les observations et le retour d'expérience, (Garcin et al. 2007, Peiris et al. 2006, Léone et al. 2006) ont proposé des fonctions d'endommagement, c'est-à-dire estimation des degrés de dommage du bâti en fonction de niveaux d'agression. Même si la vitesse du flux, la durée de l'inondation, la matière solide charriée sont des facteurs très importants qui vont conditionner le niveau de dommage des bâtiments, l'essentiel des traces qu'on peut trouver sur le terrain après un tsunami sont celles

de la hauteur d'eau maximale. Les courbes d'endommagement établies de façon empirique, sur la seule base des données de terrain interprétées, mettent en relation le taux de dommages et la hauteur de l'eau uniquement. Les auteurs partent du principe que, globalement, la vitesse est fonction de la hauteur de submersion. Il s'agit d'une simplification abusive, qui pourrait s'avérer vite insuffisante selon l'échelle et la qualité des évaluations souhaitées.

L'interprétation des données de terrain se fait à partir de niveaux de dommage observés pour différents types de construction. Une échelle d'endommagement a été proposée par l'EEFIT en 2005 pour évaluer les conséquences d'un tsunami:

- D0 : pas des dégâts.
- D1 : dégâts légers. Petites fissures, fenêtres et portes endommagées. Dégâts réparables, occupation immédiate.
- D2 : dégâts modérés. Dégâts importants pour des murs qui n'ont pas une fonction structurelle. Erosion du sol, exposition des fondations. Les murs en maçonnerie sont réparables. L'occupation immédiate n'est pas conseillée.
- D3 : dégâts forts. Impact sur la stabilité de la structure de la maison. Forte érosion du sol, dégâts pour les fondations, tassement. Démolition.
- D4 : effondrement. Dégâts structuraux complets. Les fondations sont bien visibles et exposées.

Les fonctions d'endommagement (ou de vulnérabilité) peuvent attribuer de manière déterministe un niveau d'endommagement moyen (D0 à D4 ou D5) pour différentes hauteurs de submersion et pour chaque type de bâti considéré (Figure 22 et Figure 23).

D'autres auteurs ont calculés des fonctions d'endommagement en exprimant la vulnérabilité de manière probabiliste, c'est-à-dire en proposant pour chaque type de construction considéré, un pourcentage de niveau de dommage en fonction de la hauteur de submersion (Figure 24 à Figure 26).

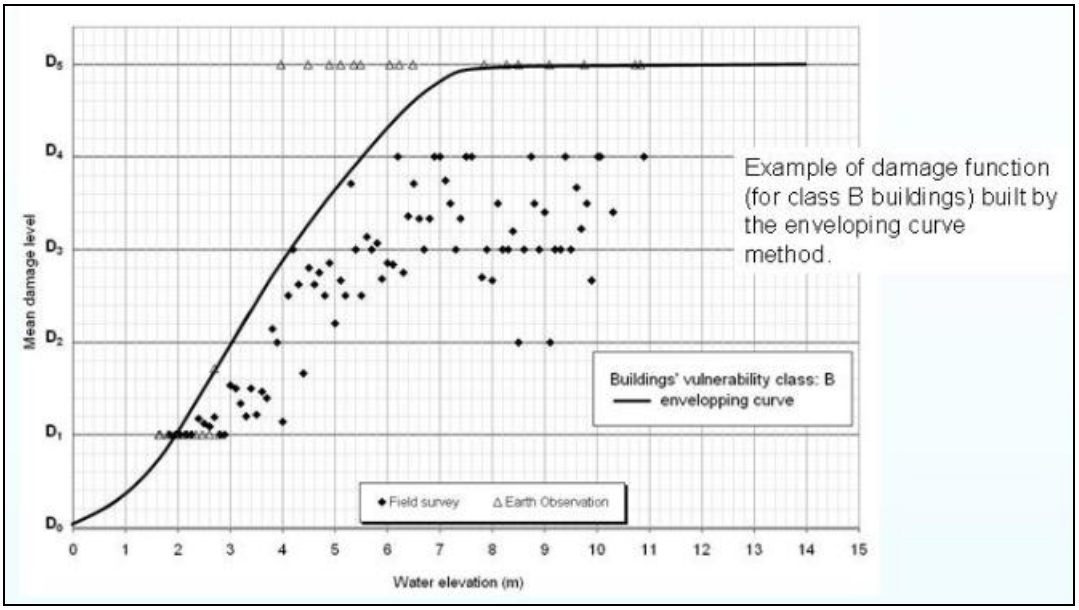


Figure 22 : Fonction d'endommagement pour une typologie de bâtiment B (maçonnerie non renforcé), déterminée à partir des observations de terrain de Léone et al. (2006)

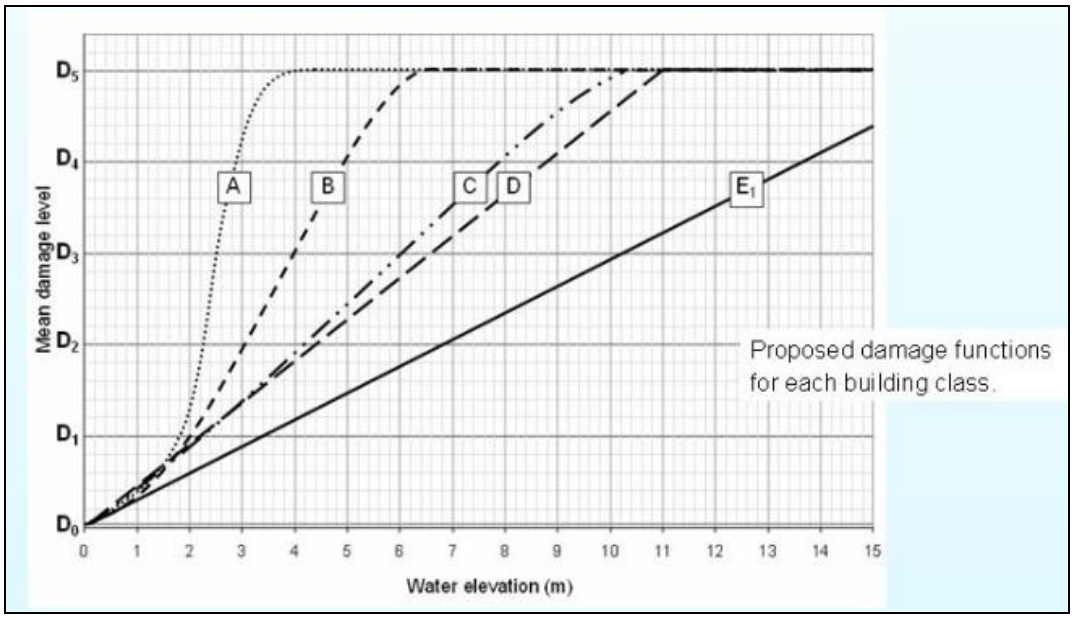


Figure 23 : Fonctions d'endommagement proposées par Guillande et al. (2009). Les typologies constructives des bâtiments sont : A) constructions légères, B) maçonnerie non renforcée, C) maçonnerie de remplissage avec des éléments renforcés, D) béton non renforcé, E) béton armé.

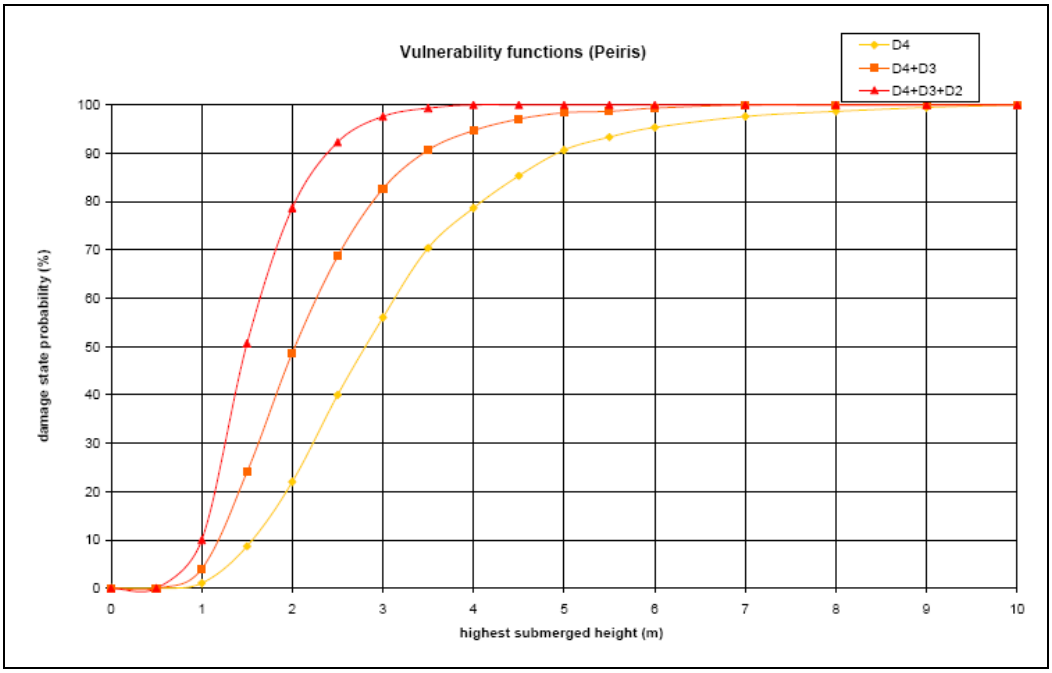


Figure 24: Fonction d'endommagement pour des bâtiments en maçonnerie (Peiris, 2006).

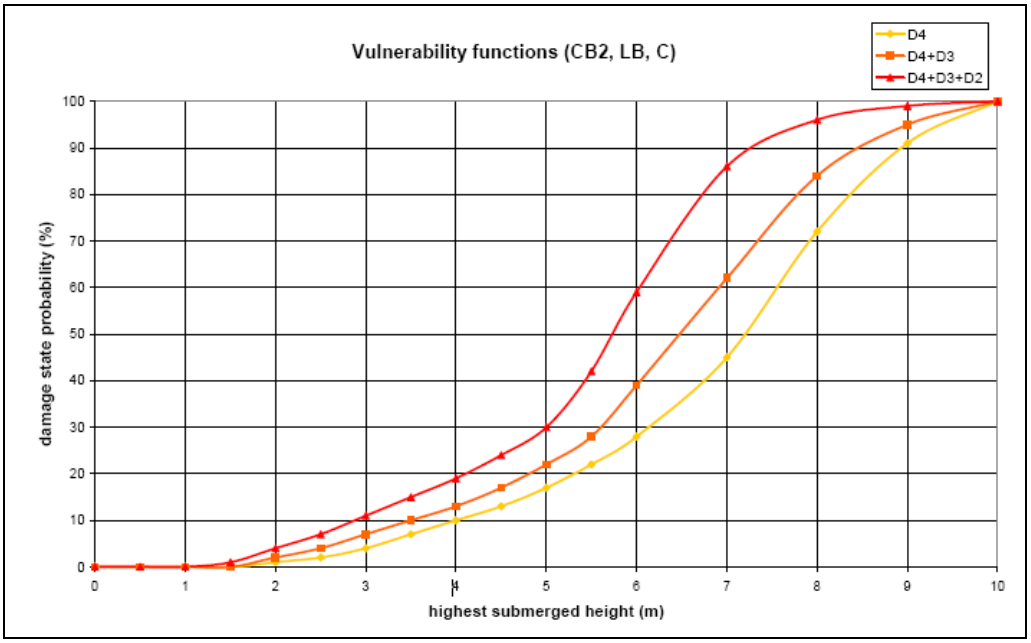


Figure 25: Fonction d'endommagement pour des constructions renforcées et lourdes (Garcin et al. 2007).

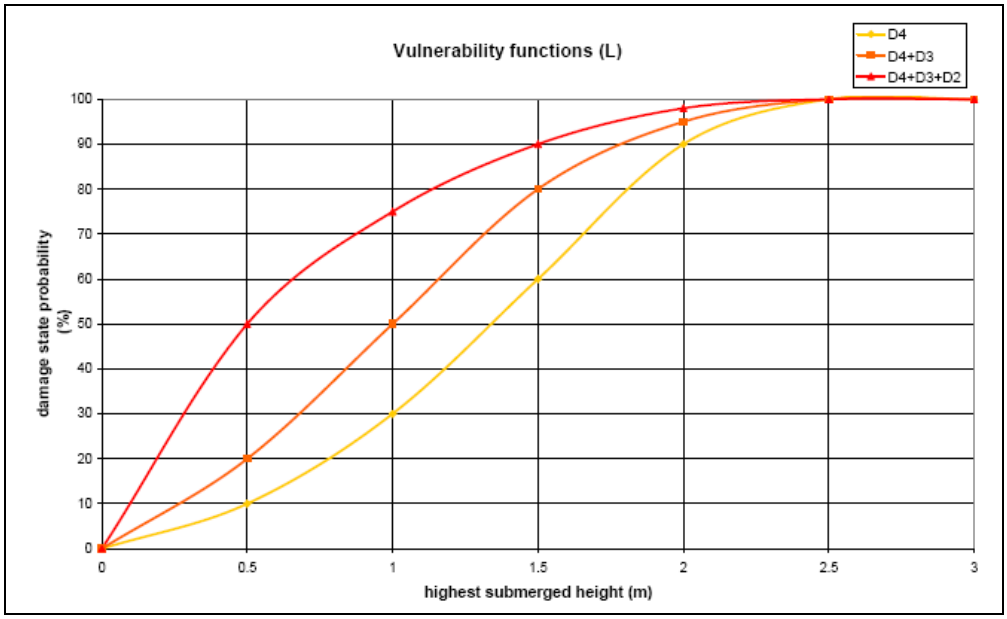


Figure 26 : Fonction d'endommagement pour des constructions légères (Garcin et al. 2007).

Koshimura (2007) propose des fonctions d'endommagement globales (Figure 27) qui prennent en compte les observations sans distinctions de types de constructions.

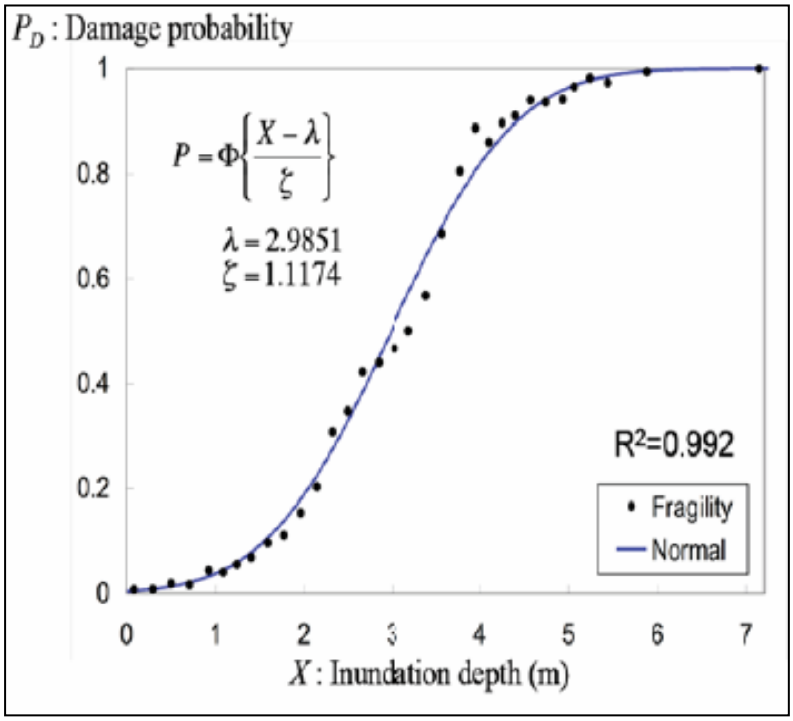


Figure 27 : Fonction d'endommagement proposée par Koshimura (2007) pour toutes les typologies de bâtiment.

Ces fonctions de vulnérabilité ont certaines limitations:

- Le rôle des objets flottants sur l'endommagement des bâtiments.
- La perte d'énergie de la vague dans la première ligne de bâtiments, ce qui peut réduire l'impact dans la deuxième.
- La charge en particules solides qui a pour effet d'augmenter le pouvoir érosif de l'eau, et dans une certaine mesure, sa densité.
- L'endommagement provoqué par la secousse du tremblement de terre.
- Le rôle de la vitesse d'impact sur la structure.

L'étude de Kelman (2002) sur la vulnérabilité des bâtiments à usage d'habitation aux inondations donne une approche complémentaire à celle exposée pour les tsunamis. Ce travail défini différents types de bâtiments représentatifs d'Angleterre et analyse les différents mécanismes d'entrée d'eau dans l'intérieur des immeubles et d'endommagement de la structure et des éléments non structuraux. Puis à chacun de ces types de bâtiment est associée une matrice de vulnérabilité qui donne, en fonction des hauteurs et vitesses d'eau maximales, différents niveaux d'impact ou endommagement du bâtiment (Tableau 4).

Maximum Flood Velocity	Maximum Flood Depth Differential			
	0.0 m	0.5 m	1.0 m	1.5 m +
0.0 m/s	DS0	DS2 Even if glass doors, DS3 unlikely	DS4	DS5
0.5 m/s	DS0	DS2 Even if glass doors, DS3 unlikely	DS4	DS5
1.0 m/s	DS0	DS2 Even if glass doors, DS3 unlikely	DS4	DS5
1.5 m/s	DS0	DS2 Even if glass doors, DS3 unlikely	DS4	DS5
2.0 m/s	DS0	DS2 Even if glass doors, DS3 unlikely	DS4	DS5
2.5 m/s	DS0	DS2 Even if glass doors, DS3 unlikely DS4 if weak wall panels	DS4	DS5
3.0 m/s	DS0	DS2 Even if glass doors, DS3 unlikely DS4 if weak wall panels	DS5	DS5
3.5 m/s	DS0	DS4	DS5	DS5
4.0 m/s	DS0	DS4	DS5	DS5
4.5 m/s	DS0	DS4	DS5	DS5
5.0 m/s	DS0	DS4	DS5	DS5
5.5 m/s	DS0	DS4	DS5	DS5
6.0 m/s	DS0	DS4	DS5	DS5
6.5 m/s +	DS0	DS5	DS5	DS5

Tableau 4 : Matrice de vulnérabilité pour un bâtiment avec un étage, surface en plan de 38 m² (Kelman, 2002).

Ces niveaux sont :

- DS0. Pas d'impact.
- DS1. Présence d'eau à l'extérieur du bâtiment mais pas à l'intérieur.
- DS2. L'eau s'infiltre dans l'intérieur ou des éléments extérieurs de l'immeuble sont mobilisés.
- DS3. L'eau ou les débris entrent dans le bâtiment à travers des ouvertures (par exemple, rupture d'une fenêtre).
- DS4. L'eau entre dans l'immeuble à travers une voie hors les ouvertures (par exemple à travers les murs).
- DS5. Endommagement de la structure, effondrement d'un mur, la structure bouscule, impact dans les fondations.

3.3 Approches multicritères

En plus des approches qui évaluent de façon distincte la vulnérabilité soit humaine soit du bâti (des exemples sont donnés aux § 3.1 et 3.2), il existe des méthodes d'analyse et d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis plus globales. Basées sur l'analyse multicritère, elles regardent les bâtiments d'un point de vue structurel mais intègrent aussi leur environnement, situation, forme et parfois même l'aléa (il s'agit alors plutôt de méthodes d'évaluation de risque). Certaines de ces méthodes permettent par ailleurs d'estimer les préjudices humains. Ci-après, un résumé des principales méthodes multicritères d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis publiées est donné.

3.3.1 Méthode PTVAM

Dans la méthode originale PTVAM, Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment Model (Papathoma et Dominey-Howes, 2003 ; Dominey-Howes et Papathoma, 2006), les facteurs qui permettent l'évaluation de la vulnérabilité sont :

- les matériaux de construction,
- le rang (situé en première ligne ou pas),
- l'environnement du bâti,
- le nombre d'étages,
- les caractéristiques du RDC,
- la défense par rapport à la mer,
- l'environnement naturel.

Dans le cadre de l'application de la méthode PTVAM aux Maldives, Dominey-Howes et al. (2006) discutent du choix des facteurs et de la façon de les évaluer :

- Le nombre d'étages est primordial car, dès que la maison a plusieurs niveaux les gens peuvent se réfugier dans les niveaux supérieurs.
- La présence d'objets mobiles au RDC peut induire différents types de dommages, en blessant directement les personnes, en choquer la structure du bâtiment et ainsi l'endommager. Ils peuvent aussi bloquer les chemins d'évacuation et polluer l'environnement.
- Les caractéristiques du RDC. Il semble qu'un RDC transparent se comporte mieux face à l'impact de la vague qu'un bâtiment avec un RDC avec des murs.
- La présence de murs de protection autour de la maison semble avoir certaine importance mais leur évaluation est complexe.
- Les caractéristiques constructives du bâtiment ainsi que son âge constituent aussi des paramètres influant sur le niveau de vulnérabilité.

Chaque facteur est subdivisé en différentes classes. A chaque classe correspond une valeur. (Tableau 5)

Par ailleurs, les facteurs sont pondérés les une par rapport aux autres en fonction de leur nature.

L'indice de vulnérabilité final (BV) est la somme pondérée des différents facteurs relatifs aux caractéristiques constructives de chaque bâtiment.

Dans des applications postérieures de la PTVAM, la nature des facteurs pris en compte a évoluée (Dominey-Howes et al., 2009) ; par exemple, la hauteur d'eau attendue est considérée comme un facteur de vulnérabilité. Cette méthode de l'indice PTVAM est celle qui est proposée par le programme nord-américain de mitigation du risque de tsunamis (Dunbar et al., 2008).

Le Tableau 5 présente dans le cadre d'une application faite dans l'Oregon (USA) (Dominey-Howes et al., 2009) les différents facteurs retenus et les poids correspondant. Cette étude visait une évaluation du risque aux tsunamis, intégrant une estimation des dégâts du bâti mais aussi une estimation des pertes financières.

Water depth above ground surface (m) (a)		Building row number (from the sea) (b)		Building material (c)		Number of floors (d)		Orientation of building (e)		Condition of building (f)		Building surroundings (g)		Land cover (h)	
Depth	Raw score	Row number	Raw score	Material	Raw score	Floor number	Raw score	Orientation	Raw score	Condition	Raw score	Surroundings	Raw score	Cover	Raw score
≥4.0	6*	1	37*	Wood only; wood on concrete base; steel frame with wood walls	4*	1 story	2*	Irregular	3*	Poor	3*	None	4*	None	3*
3.0–3.99	5	Down to…		Stone and concrete; concrete and brick	3	2 or more	1#	Cubic with corner to sea	2	Fair	2	Low brick wall	3	Bushes and low trees	2
2.0–2.99	4	37#	1#	Concrete	2			Cubic/ parallel	1#	Excellent	1#	Medium brick/ concrete wall	2	Large trees	1#
1.0–1.99	3			Steel and concrete	1#							High concrete wall	1#		
0.5–0.9	2														
0.01–0.49	1#														

Tableau 5 : Les différents facteurs et valeurs correspondantes retenus pour l'application de la méthode PTVAM à Oregon (Dominey-Howes et al., 2009).

3.3.2 Vulnérabilité du bâti à Sidney (Dall'osso et al., 2009)

L'étude de la vulnérabilité du bâti à Sidney (Dall'Osso et al., 2009) utilise la méthode PVTM (Papathoma et al., 2003) révisée. La démarche est similaire à celle de l'application de la méthode aux Etats-Unis (Domineys-Hawes et al., 2009) avec quelques facteurs supplémentaires. C'est la raison pour laquelle elle fait l'objet d'une présentation séparée.

Dans son intitulé, l'étude indique « évaluation de la vulnérabilité », il s'agit en fait d'une évaluation de risque puisque l'aléa (niveau d'eau) est pris en compte dans le calcul.

En effet l'indice de vulnérabilité relatif (RVI) est défini comme suit :

RVI = 2/3 SV (Vulnérabilité structure) + 1/3 WV (Vulnérabilité à l'intrusion marine)

Où

SV = Ex (Exposition) * BV (Vulnérabilité du bâtiment) * Prot (Protection)

Le paramètre Ex, « exposition », considère cinq niveaux d'agression en fonction du niveau d'eau au pied de chaque bâtiment.

L'indice BV (Tableau 6) est proche de l'indice de vulnérabilité du bâti calculé par Dominey-Hawes et al. (2009). Il s'agit de la somme pondérée des différents facteurs relatifs aux caractéristiques constructives de chaque bâtiment (cf 3.3.1, Tableau 5).

	-1	-0.5	0	(+0.25)	+0.5	(+0.75)	+1
s (number of stories)	more than 5 stories	4 stories	3 stories		2 stories		1 story
m (material)	reinforced concrete		double brick		single brick		timber
g (ground floor hydrodynamics)	open plan	open plan and windows	50% open plan		not open plan, but many windows		not open plan
f (foundation strength)	deep pile foundations (>5 stories)		average depth foundations (3 stories)				shallow foundations (1 story)
so (shape and orientation)	poor hydrodynamic shape		average hydrodynamic shape				high hydrodynamic shape
mo (movable objects)			minimum risk of being damaged by movable objects	moderate risk of being damaged by movable objects	average risk of being damaged by movable objects	high risk of being damaged by movable objects	extreme risk of being damaged by movable objects
pc (preservation condition)	very poor	poor	average		good		excellent

Tableau 6 : Les différents facteurs retenus pour calculer l'indice de vulnérabilité du bâti (BV) proposés par Dall'Osso et al. (2009).

Le paramètre Prot, « protection », prend en compte l'existence de différentes sortes de protection du bâti (rang, protection naturelle, murs de protection ou digues et murs autour du bâtiment), Tableau 7.

La vulnérabilité à l'intrusion marine (WV) considère les dégâts causés par l'inondation dans les niveaux du bâtiment impactés. L'indice sera donc simplement le taux des niveaux du bâtiment inondés entre le nombre total de niveaux du bâtiment.

Finalement l'indice RVI est classé en 5 niveaux de risque (très fort à très faible), Figure 28.

	0	0.25	0.5	0.75	1
Prot_br (building row)	>10th	7-8-9-10th	4-5-6th	2nd-3rd	1st
Prot_nb (natural barriers)	very high protection	high protection	average protection	moderate protection	no protection
Prot_sw (seawall height and shape)	vertical and >5m	vertical and 3 to 5m	vertical and 1,5 to 3m	vertical and 0 to 1.5m OR sloped and 1.5 to 3m	sloped and 0 to 1.5m OR no seawall
Prot_w (brick wall around building)	height of the wall is from 80% to 100% of the water depth	height of the wall is from 60% to 80% of the water depth	height of the wall is from 40% to 60% of the water depth	height of the wall is from 20% to 40% of the water depth	height of the wall is from 0% to 20% of the water depth

Tableau 7 : Facteurs considérés dans le paramètre protection (Dall'osso et al., 2009).

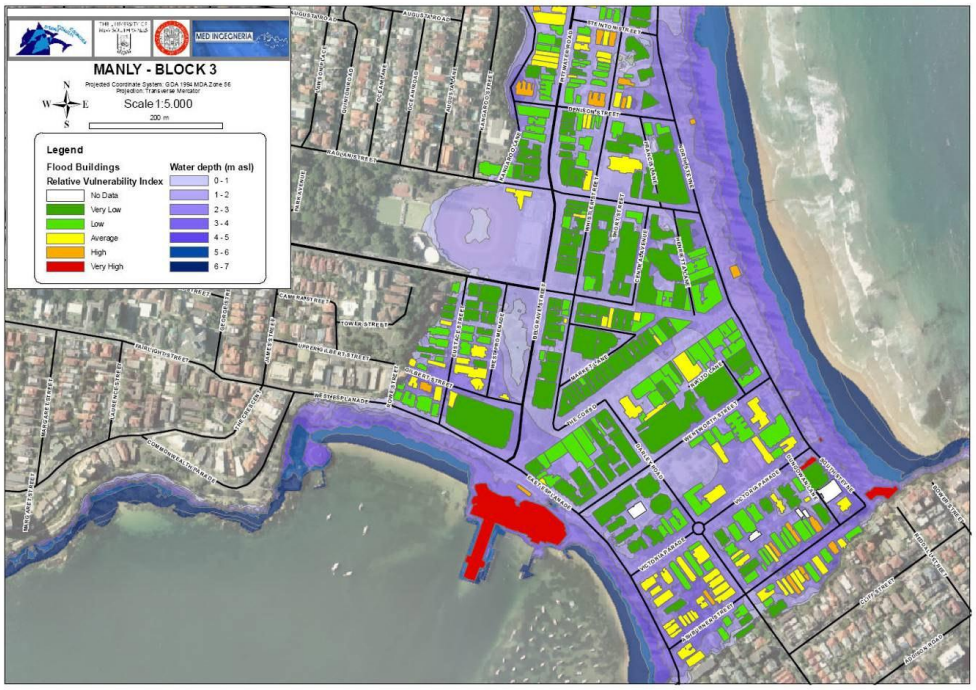


Figure 28 : Cartographie de l'indice RVI sur un quartier de Sydney (Dall'Osso et al. 2009).

3.3.3 Etude risque tsunami au Maroc (Omira et al., 2008)

L'étude d'Omira et al. (2008) sur le risque tsunami au Maroc propose un indice de vulnérabilité des bâtiments (BTV) en fonction de 3 critères :

- la typologie constructive du bâtiment (Tableau 8),
- la hauteur d'eau attendue par le tsunami de Lisbonne 1755 (Tableau 9),
- la protection de l'immeuble par rapport à la mer (Tableau 10).

Building class	Structure, material used, construction quality	Condition level	Mechanical resistance and expected damage	Classification factor ($F_{c.b}$)
A	Single-storey structureless dwelling and timber buildings made of unreinforced bricks, stone, earthen mortar, wood and zinc. Very poor construction quality	Bad	Very weak resistance to lateral forces: risk of total collapse in case of a great tsunami	4
B	Traditional brick houses of the ancient medina made of stone, wood, lime, reed and clay mortar. Non-engineered two- or three-storeys RC with unreinforced masonry walls and thin RC frames. Medium construction quality	Medium	Weak resistance to lateral loads, acceptable resistance to the horizontal forces. Risk of severe structural damage in case of a great tsunami	3
C	Two to four-storeys engineered RC-framed buildings with infill masonry walls. Good construction quality	Good	Good resistance to both lateral and horizontal forces. Risk of slight to moderate damage	2
D	Well-designed multi-storeys engineered new buildings with robust RC frames and concrete block walls. Very good construction quality	Very good	Strong resistance to both lateral and horizontal forces. Only slight damage is expected	1

Tableau 8 : Typologie des bâtiments considerée dans l'indice BTV d'Omira et al. (2008).

Zone class	Inundation risk level	Corresponding flow depth (m)	Classification factor ($F_{c.i}$)
A	High	4–6	3
B	Medium	2–4	2
C	Low	0–2	1

Tableau 9 : Classes d'hauteur d'eau pour calculer l'indice BTV d'Omira et al. (2008).

Sea defence class	Characteristics	Resistance level	Classification factor ($F_{c.s}$)
A	Absence of sea defence	Bad	3
B	Concrete wall of about 5 m in height and 0.6 m in thickness	Medium	2
C	Tetrapods of 3 m in height + 3-m high concrete walls	Good	1

Tableau 10 : Classes de protection face à la mer de l'indice BTV d'Omira et al. (2008).

Parameters/criteria	Weigh factor ($F_{w.i}$)
Building condition	$F_{w.b} = 3$
Inundation zone	$F_{w.i} = 2$
Sea defence	$F_{w.s} = 1$

Tableau 11 : Poids pour les trois critères de l'indice BTV d'Omira et al. (2008).

Chacun de ces critères a un poids (Tableau 11). L'indice de vulnérabilité (BTV) se calcule alors suivant la formule :

$$\mathrm{BTV}(\%) = \frac{(F_{c.b} \times F_{w.b}) + (F_{c.i} \times F_{w.i}) + (F_{c.s} \times F_{w.s})}{\sum_{k=1}^{3} (F_{c.\max} \times F_w)_k} \times 100$$

Même si les auteurs le nomment « indice de vulnérabilité », il s'agit plutôt d'un indice de risque, car il tient compte d'un paramètre quantitatif de l'aléa exprimé en hauteur d'eau (paramètre $F_{c.i}$).

Cet indice conduit finalement à la distinction de quatre niveaux qualitatifs de risque (Figure 29).

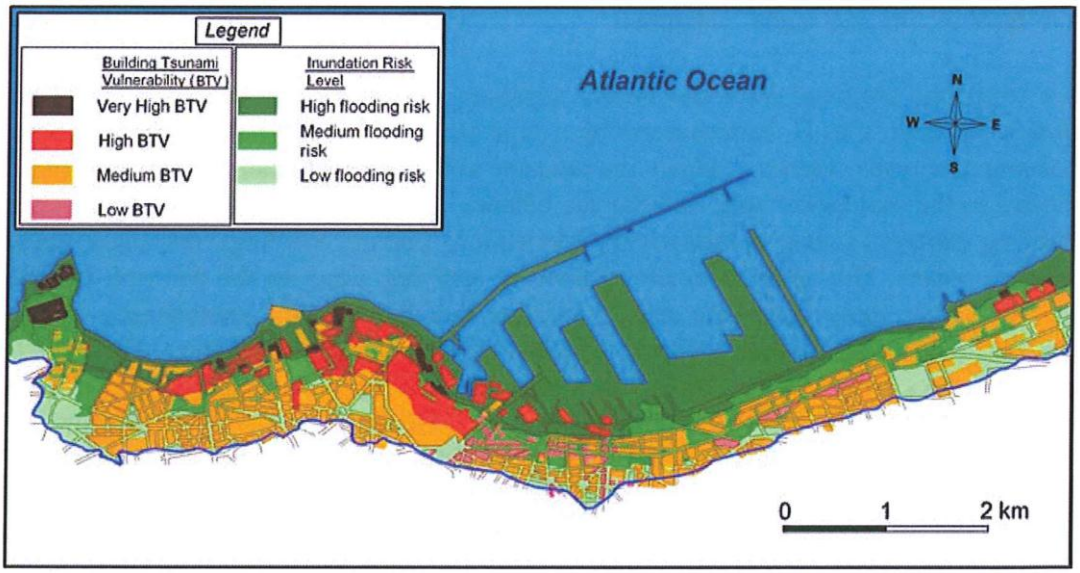


Figure 29 : Valeurs du BTV (« Building Tsunami Vulnérability») à Casablanca (Maroc) pour un scénario de tsunami type Lisbonne 1755 (extrait d'Omira et al. 2008).

3.3.4 Projet CRATER

Le projet CRATER (Coastal Risk Analyses of Tsunamis and Environmental Remediation) est mené par l'ADPC (Asian Disaster Preparadness Center) en partenariat avec le ministère de l'environnement italien.

Parmi les différents travaux, on trouve un guide méthodologique pour évaluer le risque tsunami sous le logiciel SIG ArcGIS © (Dall'Osso et al., 2006).

Il s'agit d'une évaluation multicritère de la vulnérabilité, mais contrairement à la méthode précédente, il y a une réelle distinction entre vulnérabilité et risque.

Différents paramètres de vulnérabilité sont distingués. A chaque paramètre correspond une gamme de valeur de vulnérabilité croissante (1 à 5) fonction des caractéristiques du bâti. L'évaluation de la vulnérabilité du bâti correspond au produit des valeurs des différents facteurs. La Figure 30 présente les différents paramètres de vulnérabilité et les gammes de valeurs correspondantes.

IMPACT ELEMENT	Suggested impact element's value:				
	=1	=2	=3	=4	=5
m	Reinforced concrete		Bricks or wood + concrete		Wood
g	Open plan without movable objects		Open plan with movable objects		No open plan
s	5 stories	4 stories	3 stories	2 stories	1 story
f	deep pile foundations		mean foundations		surface spread foundations
d	long building side perpendicular to the coast line		long building side oblique to the coast line		long building side parallel to le coast line

m – matériaux de construction (valeurs Vmi), g - caractéristiques du RDC (valeurs : Vgi), s - nombre de niveaux (valeurs Vsi), f – fondations (valeurs Vfi) , d - orientation du bâtiment (valeurs Vdi)

Figure 30 : Valeurs suggérées par CRATER pour évaluer la vulnérabilité des bâtiments. (Les éléments d'impact sont extraits de Dall'Osso et al., 2006).

Ces paramètres caractéristiques du bâti regroupent ce qui a été observé lors des événements passés et qui est défavorable pour la stabilité des immeubles. On peut constater :

- la faible résistance des structures légères (bois), mise en évidence dans les courbes de vulnérabilité exposées dans le chapitre ci-dessus (Figure 23) ;
- l'effet négatif pour la résistance du bâtiment des murs dans le RDC, car ces murs augmentent la surface d'actions des forces de la vague ;
- l'endommagement provoqué par l'impact des objets mobiles sur la structure ;
- l'importance des fondations, sachant que des fondations sommaires exposées à l'érosion subissent des dégâts ;
- la situation du bâtiment par rapport au front de mer (effet de la force hydrodynamique sur l'ensemble du bâtiment) ;
- le nombre d'étages, comme critère qui prend à la fois la possibilité de se réfugier dans les niveaux supérieurs et le poids de la structure.

La vulnérabilité de la population est calculée, en tenant compte : du temps d'évacuation disponible, de la période de survenance du tsunami (heure, saison touristique / hors saison), de la vulnérabilité du bâti et de la distribution par âges et genres de la population. La méthode permet d'analyser également les impacts sur des zones protégées, terrains agricoles, aquifères, etc.

L'aléa est exprimé en fonction de la hauteur de submersion, et un paramètre H (Hazard) reclasse ce paramètre en quatre intervalles :

- moins de 3 mètres, H=1,
- entre 3 et 6 mètres, H=2,
- entre 6 et 9 mètres, H=3 et
- plus de 9 mètres d'eau, H=4.

In fine, l'évaluation du risque combine les valeurs de vulnérabilité du bâti (Figure 30) et le paramètre H (hazard), Figure 31.

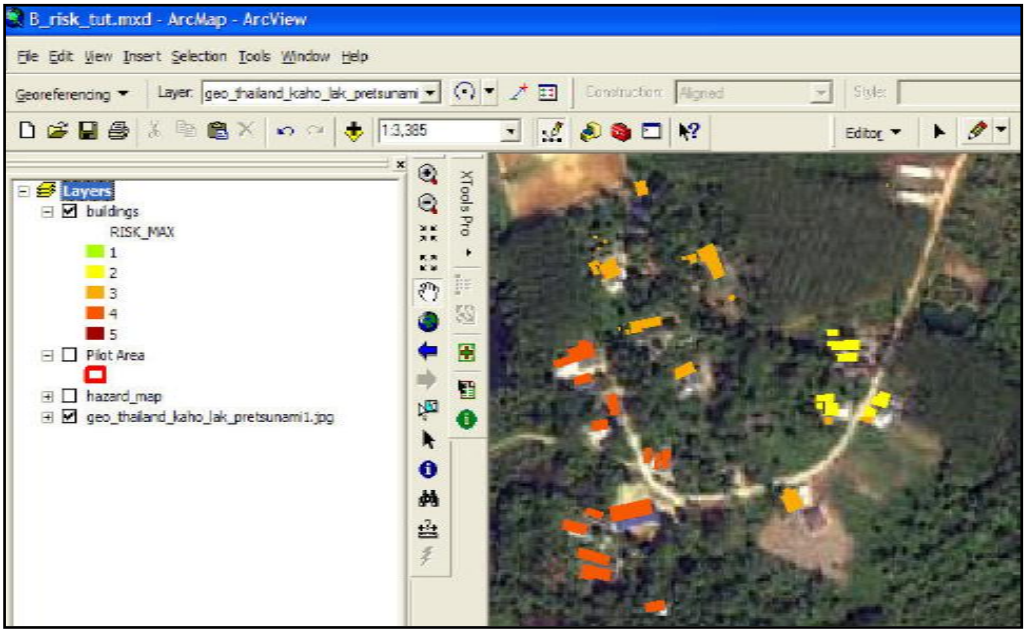


Figure 31 : Exemple d'application de la méthode CRATER pour évaluer le risque des bâtiments. (Extrait de Dall'Osso et al., 2006).

3.4 Discussion

Un grand nombre de méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et du risque aux tsunamis sont décrites dans la littérature scientifique.

Le comportement des constructions (stabilité structurale, dommages non structuraux) face aux tsunamis est intégré dans plusieurs méthodes. Certaines sont même entièrement consacrées à cette problématique. Ces méthodes peuvent présenter beaucoup d'analogie avec celles utilisées en génie parasismique. Il faut toutefois rappeler qu'à la différence du risque sismique où les dommages aux bâtiments sont la principale cause de pertes humaines, dans le cas des tsunamis ce lien n'est pas aussi direct. Même si dans certains cas, tsunamis de très forte intensité généralement, la destruction d'un bâtiment exposé à une agression a entrainé le décès des occupants, il ne faut pas perdre de vue que la probabilité de survie de ces personnes aurait été de toute façon quasi nulle à l'extérieur.

L'étude du comportement du bâtiment face à l'agression doit donc aussi s'attacher à analyser la capacité du bâtiment à remplir le rôle de refuge.

En termes de risque pour la population, le préjudice peut venir d'autres phénomènes comme la noyade, l'impossibilité de s'échapper, les traumatismes par des objets flottant, etc. La partie de la population la plus exposée est bien sûr celle qui se situe en bord de mer, à basse altitude.

Les méthodes « déterministes » ou « probabilistes » d'évaluation de la vulnérabilité humaine (cf. 3.1) ou du bâti (cf. 3.2) semblent robustes, et permettent une estimation quantifiée des dommages causés par un tsunami de scénario. Par contre, au niveau de l'agression, il semble encore difficile de retenir tous les paramètres qui pourtant conditionnent les niveaux de dommages ou préjudices. Ni la durée de l'inondation, ni la direction du flux, ni la charge et le transport solide ne sont notamment pris en compte, car très difficiles à estimer à posteriori, et donc sur la base du retour d'expérience. Ainsi, la vulnérabilité du bâti est exprimée en fonction d'une agression généralement calculée sur la base des hauteurs de submersion, tandis que la vulnérabilité humaine prend en compte la hauteur de submersion, et la plupart du temps, la vitesse du flux.

Cette synthèse de méthodes conduit à quelques commentaires :

- Certaines méthodes considèrent l'aléa (hauteur d'eau) comme un facteur pour l'évaluation résultante. Dans ce cas, il s'agit plutôt d'évaluation du risque que de la vulnérabilité. Il est possible toutefois d'extraire de ces méthodes les parties traitant spécifiquement de la vulnérabilité.

- Certaines méthodes donnent un résultat qualitatif mais exprimé sous une forme quantitative. Il est donc difficile d'utiliser ces résultats pour évaluer des répartitions de niveaux de dommage d'une façon qui ne soit pas arbitraire.

- Les méthodes multicritères ont l'avantage de pouvoir considérer une diversité assez importante des facteurs certes non quantifiables mais qui contribuent effectivement à l'évaluation de la vulnérabilité. On peut dans ce cas les considérer comme des approches plus complètes que celles, plus déterministes, portant sur la vulnérabilité humaine et du bâti décrites aux paragraphes 3.1 et 3.2.

- Ces méthodes peuvent devenir très complexes dans la mesure où le bâti peut être considéré individuellement. Concernant les caractéristiques du bâti, le nombre d'étages correspond à un des principaux facteurs pour le calcul de risque tsunami (en particulier dan le cas de phénomène de faible à moyenne intensité).

Le développement d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis pour le Projet RATCOM, présentée au chapitre 0 de ce rapport, résulte du compromis entre ces diverses approches.

4 Choix, collecte et structuration des enjeux

4.1 Délimitation des zones cibles pour les simulations de dommages

Plus les enjeux sont précis (localisation, description), meilleure devrait être l'évaluation de leur vulnérabilité. In fine, les précisions sur les évaluations de dommages et préjudices dépendent non seulement de la qualité de l'évaluation de la vulnérabilité des enjeux, mais aussi des indications sur l'agression (taille de la maille, paramètres d'inondation). Suivant ce postulat, trois échelles et zones géographiques ont été retenues dans la phase de recherche et collecte des enjeux (Figure 32) :

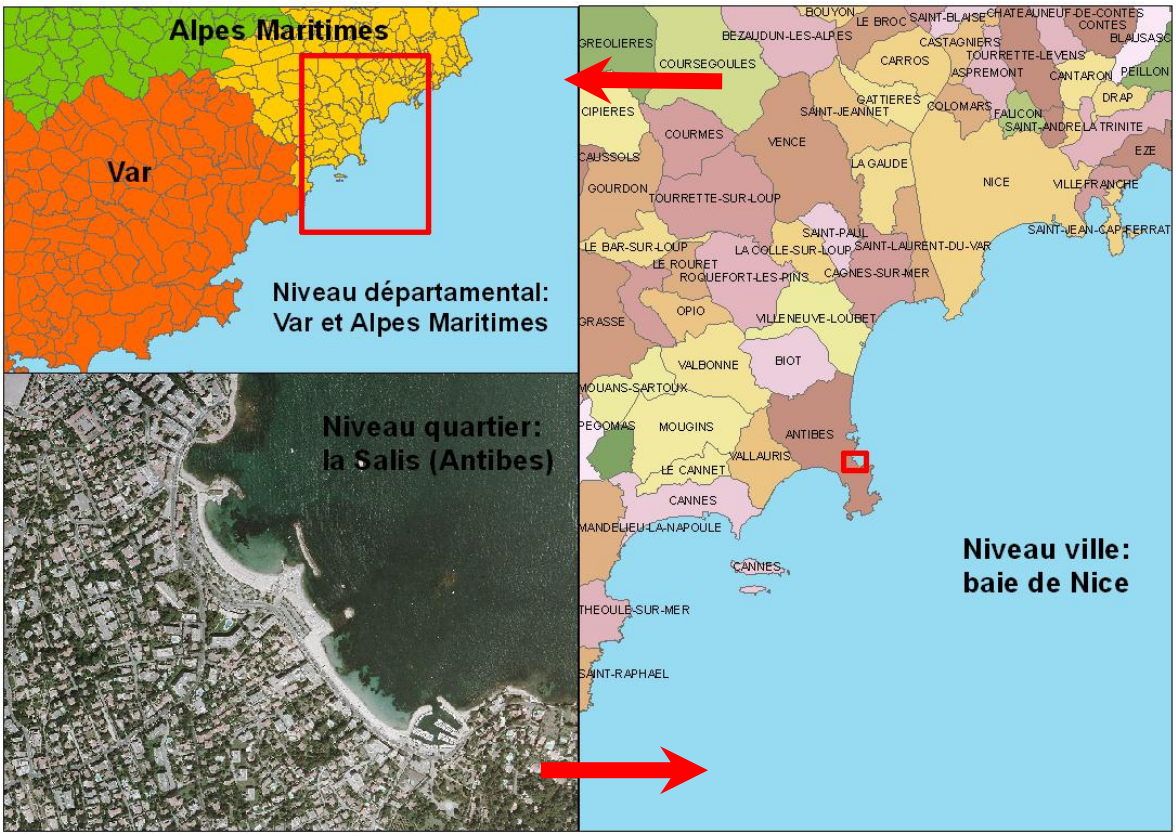


Figure 32 : Localisation des trois secteurs géographiques d'échelle différente retenus pour les simulations de dommages aux tsunamis

Niveau de quartier : c'est le niveau de travail le plus fin. Les bâtiments sont identifiés de manière individuelle ou en îlots de maisons très homogènes. Ce niveau se justifie si les moyens d'un calcul de l'inondation à cette échelle sont également disponibles, en particulier les données bathymétriques et topographiques. Dans le

cadre de RATCOM, à cette échelle de travail, les zones où ont été observés le plus de dommages, et celles qui présente une très forte exposition ont été retenues.

Niveau de la ville : c'est un niveau d'approche intermédiaire. Il traite différentes plages et secteurs en front de mer avec une affluence de population assez homogène. Il s'agit des communes situées entre Mandelieu et Villefranche sur Mer.

Niveau départemental : à cette échelle, l'ensemble de la commune, ou d'un IRIS en cas des grandes villes, est traité uniformément et de manière globale. Ce niveau comprend l'ensemble des communes des départements du Var et des Alpes Maritimes.

4.2 Choix des enjeux

L'analyse en retour des tsunamis historiques en mer Méditerranée occidentale a permis d'identifier la nature des enjeux les plus souvent endommagés. Ces derniers ont été inventoriés systématiquement, mais l'inventaire a également porté sur certaines infrastructures situées en bord de mer et susceptibles d'être impactées.

La population. Bien que l'analyse en retour des tsunamis en Méditerranée occidentale n'indique pas un grand nombre de pertes humaines, la protection de la population est la principale raison d'être du système d'alerte tsunami. Si certes l'histoire semble montrer un niveau de risque relativement faible, quoique non négligeable, cette analyse du risque doit tenir compte d'une explosion démographique le long du littoral, particulièrement prononcée en période estivale. En relation directe avec la sécurité des personnes, certains types de bâtiment doivent être inventoriés, et leur vulnérabilité analysée. Un bâtiment peut être un refuge pour la population mais aussi un piège sous certaines conditions (comme dans le cas de cave).

Les campings et les parkings souterrains. Un regard particulier est porté sur ces deux types d'installations. Le premier est assimilé à un lieu de concentration de personnes situées à l'extérieur de bâtiment, en période estivale de nuit et de jour. Le second, comme des structures constituant un piège.

Les ports de plaisance ou de pêche. Ces secteurs sont les plus touchés en cas de tsunami.

Les axes de communication. Certaines de ces infrastructures se situent en bord de mer et en cas d'incident pourraient être bloquées.

La caractérisation de ces enjeux consiste :

- à réaliser une cartographie (localisation dans un référentiel géographique unique) des différents types d'enjeux identifiés,
- à estimer le nombre de personnes ou des biens exposés et ce en fonction des différentes époques de l'année (hiver, été) et de la journée (nuit, après-midi)

4.3 Population

4.3.1 Population résidente

Le recensement INSEE de 2006 permet de connaître le nombre de résidents permanents par commune, ainsi que les données de population par îlots et IRIS.

La population résidente en permanence est déduite de ces informations et comparée à la population touristique (cf. chapitre suivant). Cette bande littorale concerne les plages et promenades en front de mer ainsi que les premiers îlots de maisons.

4.3.2 Population touristique

Selon le Comité Régional du Tourisme Riviera-Côte d'Azur (CRT), « Est considérée comme touriste toute personne en déplacement hors de son environnement habituel pour une durée d'au moins une nuitée, et d'un an au plus, pour des motifs non liés à une activité rémunérée dans le lieu visité. Les visiteurs séjournant moins de 24h sont définis comme excursionnistes ou visiteurs à la journée. »

La population totale de la Riviera Côte d'Azur est évaluée à plus d'1 million de résident. Selon le jour, entre 50 000 et 600 000 touristes sont présents en Riviera-Côte d'Azur. A cette population permanente se rajoute, selon le jour, entre 50 000 touristes et 600 000 touristes, le plus bas niveau se situant mi-décembre et la pointe étant atteinte lors du week-end du 15 août.

■ <u>Zonage de la bande côtière en fonction de la fréquentation touristique</u>

Le BRGM a réalisé, avec les données du CRT, une délimitation qualitative des zones en bord de mer en fonction de leur fréquentation touristique (Figure 33). Ce zonage a été validé par le CRT. Ces informations qualitatives sont estimées « à dire d'expert » par le CRT à partir de sa connaissance sur la fréquentation touristique du littoral, et sur les sites particulièrement fréquentés en période estivale.

Aujourd'hui, aucune donnée fine quantitative n'existe pour la zone côtière ou littorale en termes de fréquentation touristique. L'Observatoire du tourisme de la Côte d'Azur, créé par le Comité Régional du Tourisme Riviera Côte d'Azur et le Conseil Général du Département des Alpes-Maritimes, travaille uniquement à l'échelle du département. C'est pourquoi les seules données potentiellement utilisables ont du être estimées par le CRT.

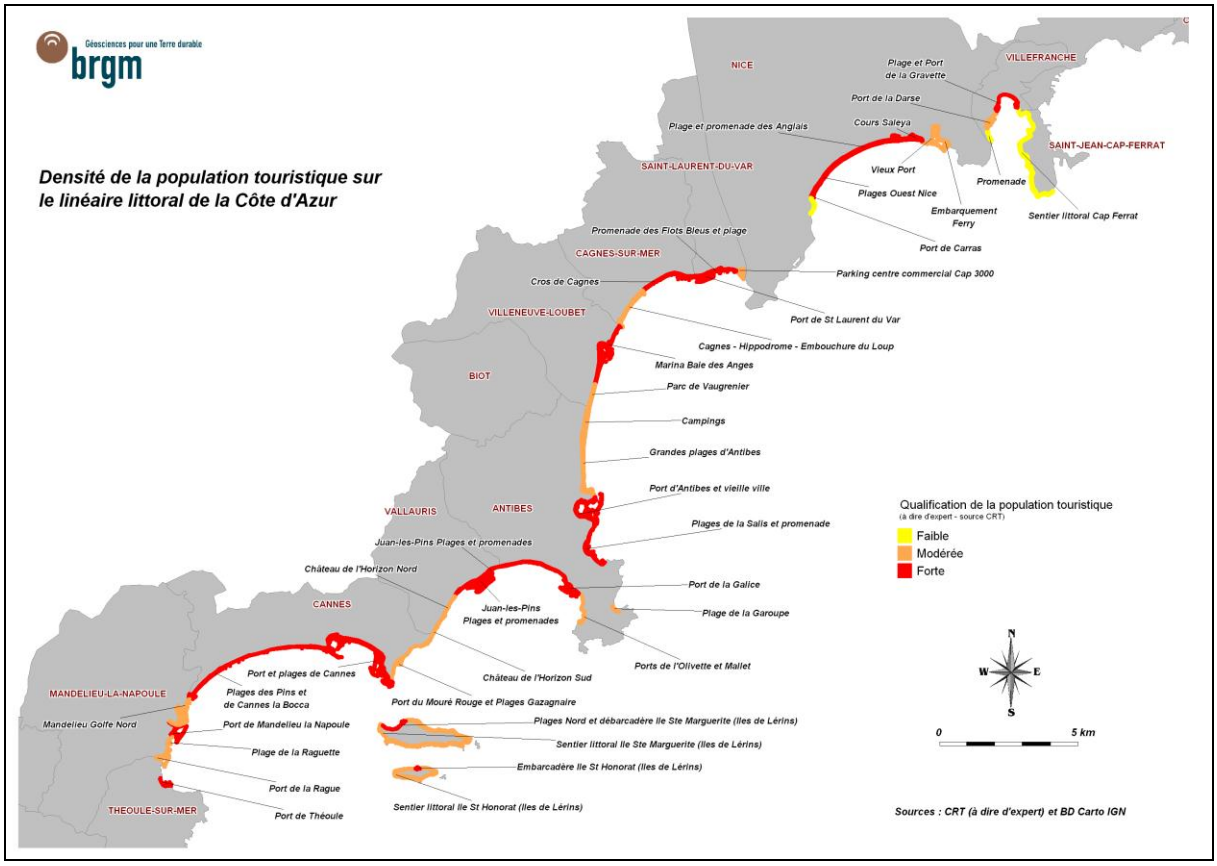


Figure 33 : Densité de la population touristique sur le linéaire littoral de la Côte d'Azur, synthèse réalisée d'après les données du CRT

A partir de cette estimation du CRT, une couche SIG a été produite par le BRGM, correspondant à la densité de la population touristique sur le linéaire littoral de la Côte d'Azur. Chaque portion de linéaire est affectée d'une toponymie (nom de la zone touristique), et d'une codification qualitative à dire d'expert de la fréquentation touristique (1 : faible, 2 : modérée ; 3 forte) :

- Forte: secteur avec une plage très peuplée, les gens restent généralement sur la plage.
- Modéré : secteur avec moins de personnes, parce que moins connu, plus excentré du centre ville, etc.
- Faible: secteur avec des gens qui sont de passage, randonneurs, etc.

Les zones rocheuses ou très élevées par rapport au niveau de la mer n'ont pas été prises en compte.

Cette donnée permet de qualifier des zones particulièrement importantes en termes de population estivale, avec des regroupements de population conséquents, et cela, principalement en bord de mer sur une frange littorale allant de la plage à 1 km en arrière environ.

■ Etude de cas, la plage des Ponchettes à Nice, Indicateur de la densité de population d'une plage urbaine très fréquentée pendant la saison estivale

Concernant la fréquentation touristique sur le littoral, l'étude du CNRS « Evaluer et représenter le nombre d'usagers sur une plage urbaine (les Ponchettes, Nice) » présente une méthode de comptage des usagers. Parmi les résultats de cette étude, on trouve une comparaison du nombre d'usagers de la plage des Ponchettes pour trois journées de l'année (21 avril, 21 juillet, 22 septembre, 2007), Figure 34 et Figure 35. Les valeurs concernant les Ponchettes peuvent être utilisées comme indicateur de la densité d'une plage urbaine très fréquentée pendant la saison estivale.

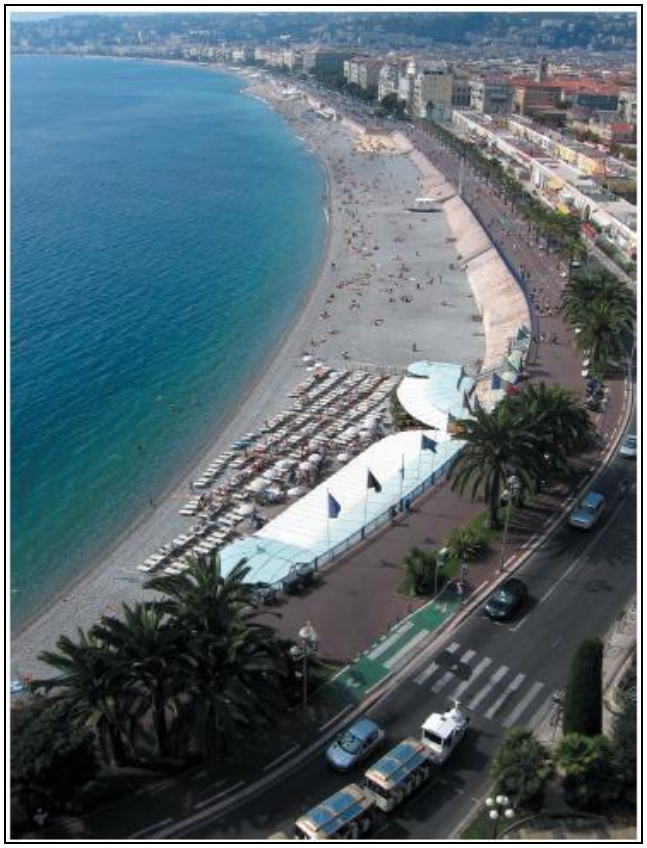


Figure 34 : La plage des Ponchettes vue depuis la tour Bellanda (Cliché : S. Robert , le 22 septembre 2007).

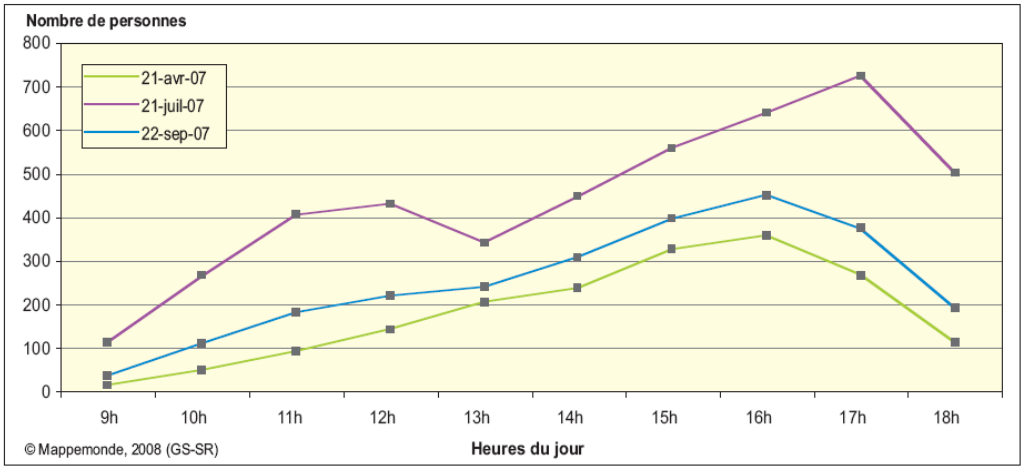


Figure 35 : Evolution le long d'une journée du nombre des personnes sur la plage des Ponchettes à Nice pour trois jours différents (extrait de Robert et al. 2008).

■ Estimation de la population située en bord de mer pour 4 scénarios temporels

Le BRGM a demandé au CRT une estimation du nombre de touristes susceptibles d'être présents sur le bord de mer (plages, ports et 1re ligne).

Cette estimation a été réalisée à partir du nombre des nuitées touristiques et de ratios concernant la répartition de la population en fonction du lieu, de la période, du jour et de l'heure.

Dans le cadre du projet, 4 scenarios temporels ont été choisis :

- période creuse/mi janvier/ 4h du matin
- période creuse/ mi janvier/ 15h
- période estivale/15 août/ 4h du matin
- période estivale/15 août/ 17h

Cette analyse tient compte également : 1) des touristes logeant dans la zone ; 2) des habitants qui ont quitté leur logement situé dans la zone à cette période ; 3) des excursionnistes de passage.

Le Tableau 12 présente par commune l'estimation de la population effectivement présente sur le littoral.

POPULATION TOURISTIQUE TOTALE		10-janv.		15 août	
		4h am	15h pm	4h am	15h pm
121	SAINT JEAN CAP FERRAT	86	312	1 825	6 833
159	VILLEFRANCHE SUR MER	279	445	2 255	7 203
088	NICE	2 398	3 255	16 030	47 129
123	SAINT LAURENT DU VAR	147	523	1 828	10 340
027	CAGNES SUR MER	246	844	3 574	17 105
161	VILLENEUVE LOUBET	292	876	5 037	18 367
004	ANTIBES - JUAN-LES-PINS	796	2 066	12 660	42 470
155	VALLAURIS - GOLFE JUAN	178	797	3 283	16 854
029	CANNES	2 472	3 222	21 571	50 155
079	MANDELIEU LA NAPOULE	290	874	6 286	19 444
138	THEOULE SUR MER	219	320	1 171	4 515
	TOTAL ZONE	7 402	13 534	75 520	240 415

Tableau 12 : Estimation de la population sur le bord de mer et 1ère ligne d'habitation (source : CRT - 2009)

Le détail de l'évaluation se trouve dans l'Annexe 1.

■ Estimation des densités de population en fonction des zones de fréquentation en été

La valeur retenue par le CNRS (Robert et al. 2008) comme occupation maximale en pleine saison estivale pour la plage des Ponchettes, de 8 personnes/100m^2, sera celle appliquée pour les zones de forte occupation l'été (retenues d'après l'avis d'expert du CRT). Cette valeur est cohérente avec la fourchette de valeurs indiquées par l'AFIT (Robert et al. 2008) comme densité gênante pour la population (4 à 8 personnes par 100 m²).

Pour les zones d'occupation modérée et faible une estimation de la densité a été faite à partir des données obtenues par le CNRS hors saison :

- Pour une occupation modérée, la valeur de 1 personne/100m² a été retenue, proche de celle trouvée pour un jour d'été à 9 heures du matin.
- La valeur pour une zone d'occupation faible a été considérée égale à 0,1 personne/100m², valeur inférieure à l'occupation de la plage des Ponchettes un jour d'avril à 9 heures du matin (0,2 personne/100m²).

Les estimations faites par le CRT du nombre de personnes situées en front de mer par commune peuvent servir à nuancer ces valeurs de densité.

De manière générale, 1) les valeurs du CRT pour le 15 août à 15 heures et 2) les valeurs obtenues de la multiplication de la surface des secteurs en front de mer de fréquentation homogène par les densités du même ordre de grandeur. Les valeurs de densité de personnes par 100m² ne sont pas aberrantes. Les valeurs du CRT sont toujours plus grandes car elles prennent en compte la population à l'extérieur mais aussi celle qui est à l'intérieur des bâtiments de 1ère ligne en front de mer.

Pour les communes qui n'ont pas beaucoup des plages de forte fréquentation les pourcentages de population à l'extérieur calculées sur la base des densités moyennes de Robert et al. (2008) sont beaucoup plus faibles (cas de Villeneuve Loubet, Théoule-sur-Mer, Mandelieu-la-Napoule et Saint-Jean-Cap-Ferrat).

Occupation (15 août, 15h)		Nombre de personnes/100m²
Occupation forte	Plage en centre historique ou centre ville	8
	Plage en zone excentrée, promenade, port	4
Occupation modérée		1
Occupation faible		0,1

Tableau 13 : Estimation du nombre de personnes à l'extérieur par 100m² pour les 3 classes de zones de fréquentation, inspirée des données de l'étude du CNRS (Robert et al. 2008).

Commune	Population estimée à l'extérieur en 1ère ligne, calculée sur la base du Tableau 13	Population en 1ère ligne de mer (population à l'extérieur ou intérieur des bâtiments) (données CRT)
ANTIBES	20746	42469
CAGNES-SUR-MER	7711	17105
CANNES	38749	50154
MANDELIEU-LA-NAPOULE	4322	19444
NICE	22803	47128
SAINT-JEAN-CAP-FERRAT	206	6832
SAINT-LAURENT-DU-VAR	8014	10340
THEOULE-SUR-MER	715	4515
VALLAURIS	6005	16853
VILLEFRANCHE	3682	7203
VILLENEUVE-LOUBET	2500	18367

Tableau 14 : Comparaison de l'estimation faite de la population à l'extérieur et les données fournies par le CRT pour le 15 août à 15h.

■ Estimation des densités de population en fonction des zones de fréquentation en hiver

En ce qui concerne l'occupation de ces zones en hiver, il existe encore moins de données car les études de fréquentation des plages ne s'intéressent qu'à la période estivale. Le CRT a estimé les valeurs de population en 1ère ligne de mer pour un jour d'hiver (10 janvier). Pour cette période de l'année, en plein jour, il est possible de considérer que près de 30% de la population est en plein air.

La densité de population à cette période de l'année, en plein jour, est alors calculée comme suit :

$$Densité_{10\,janvier} = \frac{Population_{CRT10\,janvier} * 0.3}{Surfacetotale}$$

Ce qui pour les populations situées en 1ère ligne de mer donnent les estimations indiquées dans le Tableau 15.

Commune	Personnes/100m² le 10 janvier l'après-midi
ANTIBES	0.09
CAGNES-SUR-MER	0.126
CANNES	0.09
MANDELIEU-LA-NAPOULE	0.108
NICE	0.198
SAINT-JEAN-CAP-FERRAT	0.048
SAINT-LAURENT-DU-VAR	0.108
THEOULE-SUR-MER	0.54
VALLAURIS	0.138
VILLEFRANCHE	0.156
VILLENEUVE-LOUBET	0.108

Tableau 15 : Valeurs de densité de population à l'extérieur pour le 10 janvier l'après-midi, obtenues à partir des données du CRT.

4.4 Bâtiments

4.4.1 Identification

La BD TOPO© de l'IGN est disponible sur le département des Alpes Maritimes. Cette base de données utilisée pour l'édition des cartes à 1/25 000 intègre donc l'ensemble des éléments géographiques nécessaires à une précision annoncée du 5 000$^{ème.}$. Le géo référencement est en 3D (X, Y, Z). La BD TOPO©, fait une distinction entre bâtiments indifférenciés, industriels et remarquables.

Les bâtiments indifférenciés concernent les bâtiments d'habitation, les bureaux, les bâtiments d'enseignement, les bâtiments hospitaliers, et immeubles collectifs. Mais sont également inclus dans cette catégorie : bergeries, bories, bungalows, chalets, garages individuels, lavoirs couverts, musées, prisons, refuges, et villages de vacance.

A chaque bâtiment est caractérisé par sa hauteur et ses altitudes minimale et maximale (Figure 36).

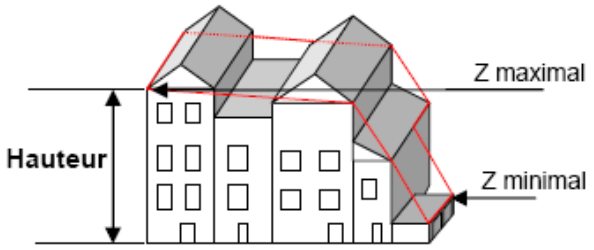
Description	Monde réel et modélisation
Signification de l'attribut hauteur	

Figure 36 : Traitement de la hauteur d'un bâtiment par la BD topo (IGN 2009).

Sur la base de ces informations, l'estimation du nombre d'étages des bâtiments a été faite dans le cadre cette étude, avec comme règle celle qu'un étage mesure 3,5 mètres de haut (Figure 37). De même, une estimation de la surface totale habitable de chaque bâtiment a été calculée. Elle est considérée comme le produit entre la surface en plan et le nombre de niveaux.

Figure 37 : Estimation du nombre de niveaux des bâtiments sur la base de la BD topo, exemple d'un secteur de Cagnes sur Mer.

4.4.2 Typologie des bâtiments

La typologie retenue s'inspire de la méthode PTVAM (cf § 3.3.1).

Les types identifiés ont été :

- Bâtiments à un niveau (RDC seul) sans protection.
- Bâtiments à un niveau (RDC seul) avec protection.
- Bâtiments à plusieurs étages (RDC+). Ici une distinction est faite entre maison individuelle, petit habitat collectif (nombre de logements réduit) et grand collectif.

4.4.3 Découpage par quartiers

A partir des données issues de la BD topo, un découpage des quartiers a été fait, sur la zone comprise entre Théoules sur Mer et Villefranche en tenant compte de la typologie du bâti. Ces quartiers ont été tracés à partir des images aériennes et grâce à la disponibilité sur la zone d'étude de l'outil Google Street©, qui permet de parcourir de manière virtuelle les rues avec une image de 360° (Figure 38 et Figure 39).

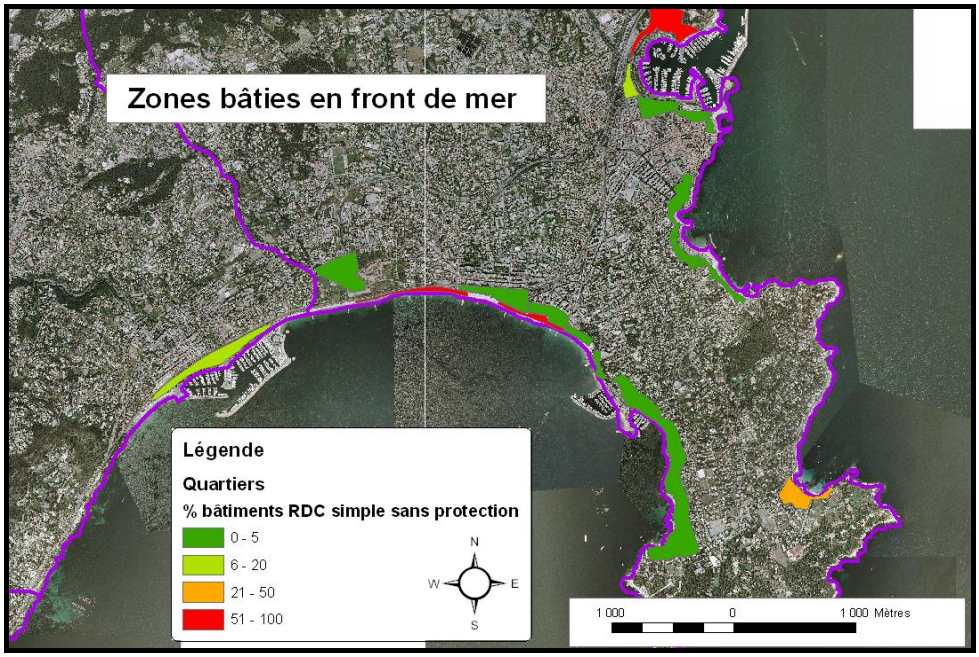


Figure 38 : Extrait de la carte sur la répartition du bâti de type RDC simple sans protection, des communes d'Antibes et Vallauris.

Ces zones se caractérisent par une distribution homogène d'une typologie de bâtiment, retenue pour l'analyse de vulnérabilité.

Sur l'ensemble de ces quartiers, à partir des ortho photos et des images Google Street©, une estimation du nombre total de bâtiments par quartier, avec un comptage par type de bâtiment. On dispose donc, de cette manière, d'une estimation du nombre de bâtiments par type pour chaque quartier. D'un point de vue

méthodologique, cette approche qui délimite des zones bâties homogènes est nécessaire lorsque des informations SIG comme la BD topo ne sont pas disponibles.

Dans le cadre du projet RATCOM, les informations sur le bâti (localisation et type de bâti) ont pu être extraites directement de la BD topo.

Figure 39 : Exemple de deux polygones de quartiers à Juan les Pins, l'un avec le 100% des bâtiments RDC+ Grand collectif et l'autre avec le 100% des bâtiments en RDC simple sans protection. Sur l'image en bas une vue via Google Street de ces deux polygones.

4.4.4 Estimation de la population à l'intérieur des bâtiments

La capacité des bâtiments et le nombre de personnes qui se trouvent à l'intérieur à différents moments de la journée et de l'année a été estimée de la façon suivante :

La BD topo permet d'estimer le nombre d'étages par bâtiment et donc une *surface habitable* du bâtiment (surface en plan * nombre d'étages). La somme des surfaces habitable de l'ensemble des bâtiments d'une commune permet de connaître la surface totale habitable par commune.

Le CRT a fourni des données de la population touristique avec nuitée par commune et par jour (le 15 août et 10 janvier). L'addition de cette population touristique et de la population permanente recensée (issue du recensement INSEE en 2006) donne le nombre total de personnes résidant à un temps T sur la commune.

Un nombre moyen de personnes par unité de surface habitable pour dates du 15 août et du 10 janvier pour les différentes communes (Tableau 16). Il apparaît clairement que les communes présentant une forte densité d'habitat collectif (exemple de Nice) ont des valeurs plus fortes que pour des communes avec une plus grande densité de maisons individuelle.

Commune	Population avec logement le 15 août	Ratio hab/100m²	Population avec logement le 10 janv.	Ratio hab/100m²
ANTIBES	169 000	1.84	83 253	0.91
CAGNES-SUR-MER	62 509	4.24	50 644	3.43
CANNES	162 116	6.28	83 070	3.22
MANDELIEU-LA-NAPOULE	40 128	4.22	22 208	2.34
NICE	474 588	6.35	372 994	4.99
SAINT-JEAN-CAP-FERRAT	10 525	4.24	2 586	1.04
SAINT-LAURENT-DU-VAR	34 726	4.50	30 892	4.01
THEOULE-SUR-MER	4 143	1.77	2 191	0.94
VALLAURIS	39 550	3.63	31 513	2.89
VILLEFRANCHE	15 051	4.54	7 911	2.39
VILLENEUVE-LOUBET	23 078	2.99	14 949	1.94

Tableau 16 : ratios d'habitants par 100 m² de surface habitable pour les communes de l'étude.

L'application de ces ratios sur l'ensemble des bâtiments permet d'évaluer la population maximale d'un bâtiment pour une journée déterminée.

En plus de période saisonnière, suivant les indications de Coburn et Spence (1992), il est possible de considérer des scénarios de nuit ou de jour, en appliquant un taux d'occupation des bâtiments de 0.8 en moyenne pour une zone résidentielle pendant la nuit et d'environ 0.45 pendant la journée.

4.5 Campings

Les campings ont été géoréférencés sous MapInfo à partir des cartes topographiques à 1/25 000 de 2004 de l'IGN.

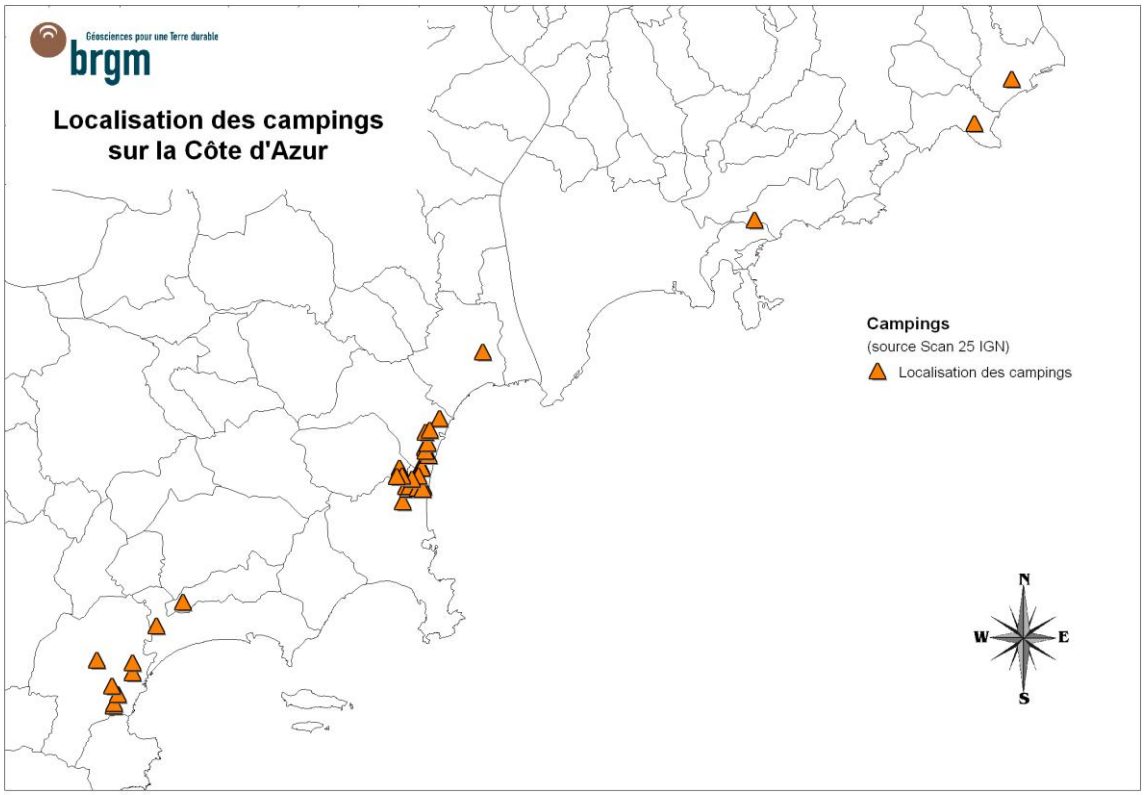


Figure 40: Localisation des campings sur la Côte d'Azur

L'Observatoire du tourisme de la Côte d'Azur met à disposition le nombre d'emplacement des campings par commune et par catégorie d'établissement.

COMMUNE	NB DE CAMPINGS PAR CATEGORIE					TOTAL NB CAMP.	NB D'EMPLACEMENTS CLASSES					TOTAL EMPL. CLASSES	NB D'EMPLACEMENTS A LA VENTE					TOTAL EMPL. VENTE
	4*	3*	2*	1*	Aires Nat.		4*	3*	2*	1*	Aires Nat.		4*	3*	2*	1*	Aires Nat.	
ANTIBES JUAN LES PINS	1	5	4	1		**11**	260	1146	200	60		**1666**	260	1146	198	61		**1665**
Secteur Antibes	**1**	**5**	**4**	**1**		**11**	**260**	**1146**	**200**	**60**		**1666**	**260**	**1146**	**198**	**61**		**1665**

Figure 41 : Données relatives à la capacité des campings, extrait concernant la commune d'Antibes (données CRT 06).

4.6 Données portuaires

4.6.1 Localisation des ports de pêche et de plaisance

Pour chaque port de pêche ou de plaisance situé entre Théoule-sur-Mer et Villefranche-sur-Mer, les informations suivantes ont été rassemblées :

- le nom du port (qu'il s'agisse d'un port privé ou non, géré par la CCI, la commune ou autre) ;
- sa capacité d'accueil (et la taille des bateaux pouvant y accoster) ;
- son taux de remplissage saisonnier (généralement de 100% été comme hiver à part quelques exceptions).

Le tableau ci-après indique, pour les ports qui nous ont donné l'information, le taux de remplissage en été et en hiver. Le détail des capacités d'accueil et des longueurs de bateaux est présenté sur la carte ci-dessous (et en annexe 2).

Commune	Nom du Port	Taux de remplissage	
		Eté	Hiver
Théoules sur mer	La Galère	100%	50 % (mise hors eau des bateaux en hiver : oct à avril)
	Port de Théoules	?	?
	Port de la Figueirette	?	?
Antibes	Port VAUBAN	100%	100%
	Port Gallice	100%	75%
	Port de la Salis	100%	100%
	Port des Croutons	100%	100%
Cagnes-sur-mer	Port du Cros de Cagnes	?	?
Saint-Jean-Cap-Ferrat		?	?
Nice carras		?	?
St Laurent du Var	Port Saint Laurent	100%	100%
Cannes	Port de Cannes	?	?
	Port Pierre Canto	?	?
	Port Abri du Béal	100%	50%
Vallauris	Golfe Juan Port Camille Rayon	?	?
	Vieux Port Golfe Juan	100%	90%
Mandelieu	Port de la Rague	100%	75%
	Port La Napoule	?	?
	Port de Cannes-Marina	100%	100%
	Port Inland	?	?
	Marco Polo	?	?
Villeneuve-Loubet	Marina Baie des Anges	?	?
Nice	Port de Plaisance	100%	100%
Vilelfranche-sur-mer	Port de Villefranche-Darse	100%	99%

Tableau 17 : Taux de remplissage des ports étudiés

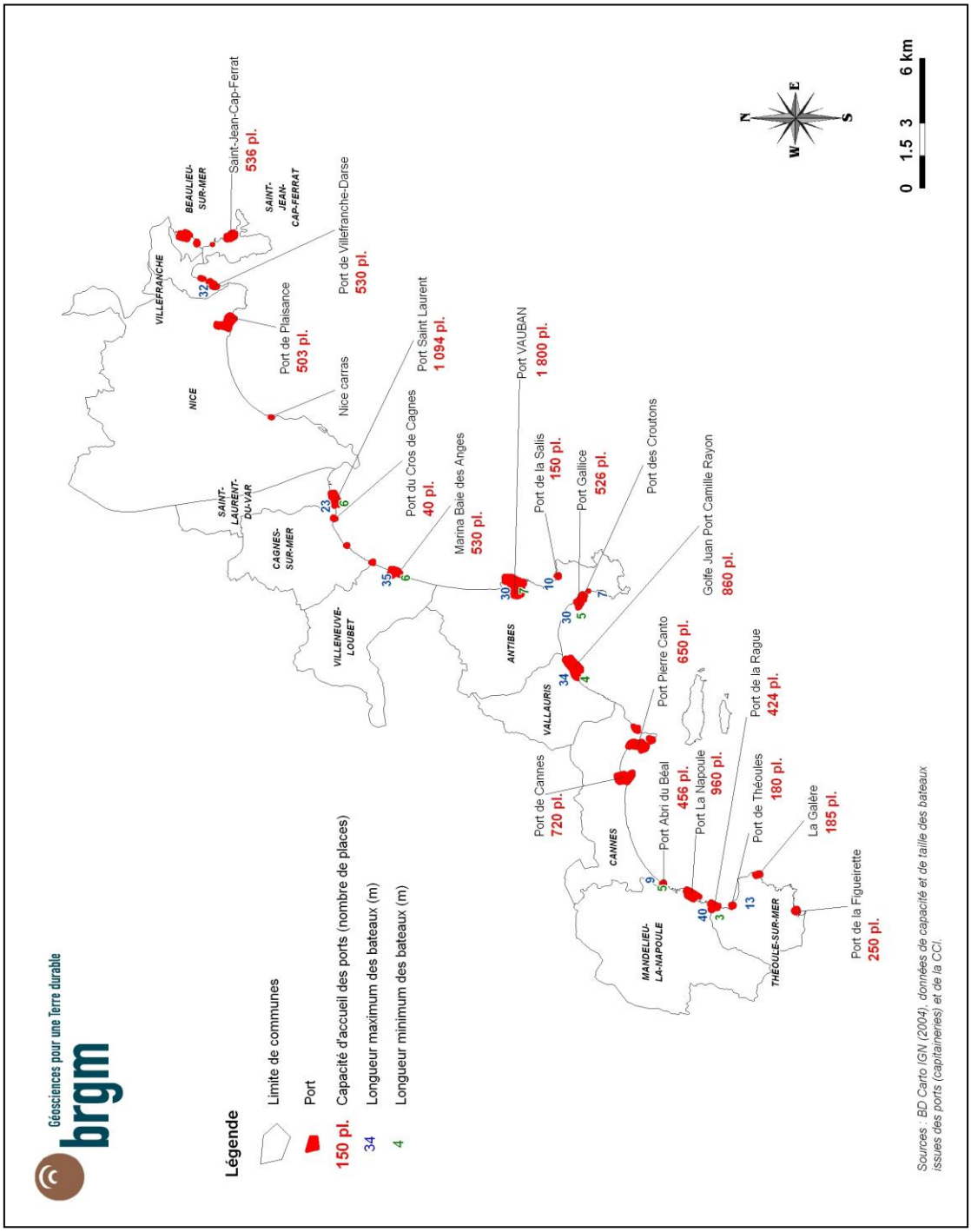


Figure 42 : Localisation des ports et indication de leur capacité d'accueil et des longueurs de bateaux minimum et maximum présents

4.6.2 Données bathymétriques en zone portuaire

L'accent a été mis sur l'inventaire et la collecte des données bathymétriques de ces ports. Les données collectées étaient sous différentes formes :

- une bathymétrie géo référencée et utilisable sous SIG ;
- des scans de cartes donnant des valeurs de profondeurs localisées dans le port (Figure 43);
- des données quantitatives moyennes non géo référencées.

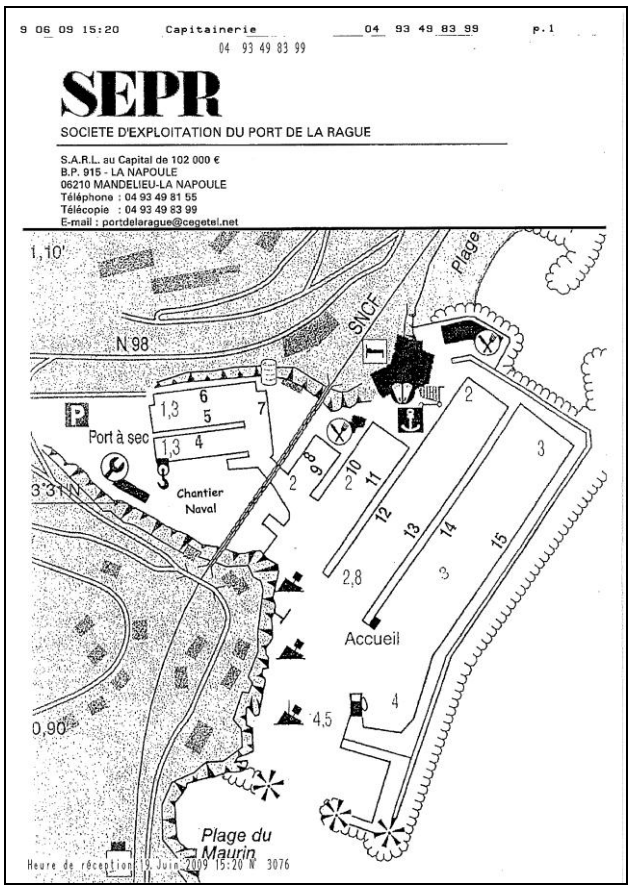


Figure 43 : Exemple de plan bathymétrique scanné collecté sur le port de la Rague à Mandelieu-la-Napoule

La Figure 44 ainsi que le Tableau 18 indiquent pour chaque port renseigné, une valeur moyenne de profondeur. L'annexe 3 rassemble les données acquises sur la bathymétrie des ports.

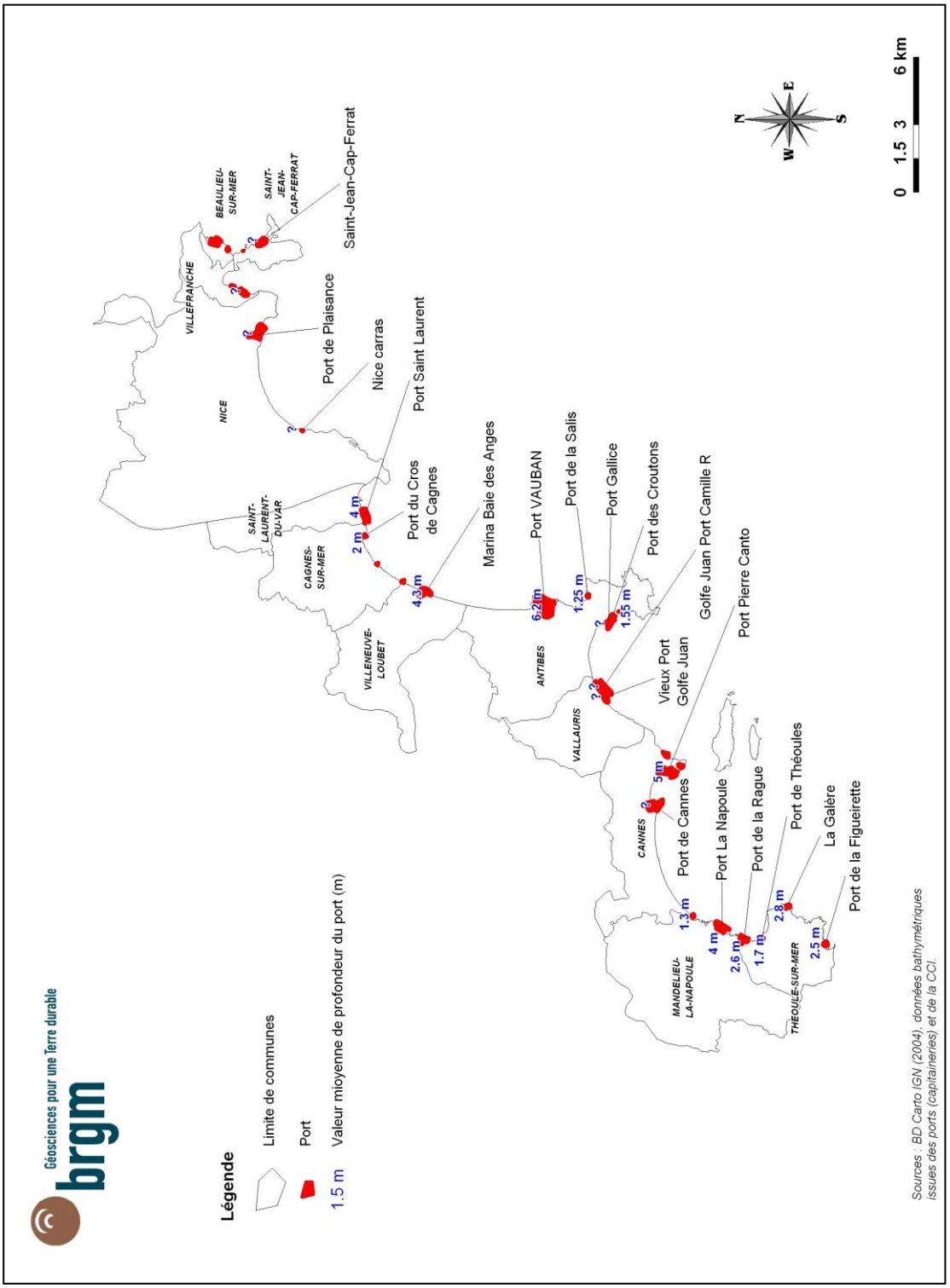


Figure 44 : Localisation des ports et indication de leur profondeur moyenne

ID	Nature	INSEE	Commune	Nom	Profondeur moyenne (m)
1	Données bathymétriques au niveau des Ports	06138	Théoules sur mer	La Galère	2.8
2				Port de Théoules	1.7
3				Port de la Figueirette	2.5
4		06004	Antibes	Port VAUBAN	6.23
5				Port Gallice	?
6				Port de la Salis	1.25
7				Port des Croutons	1.55
8		06027	Cagnes-sur-mer	Port du Cros de Cagnes	2
9		06121	Saint-Jean-Cap-Ferrat		3.5
10		06088	Nice carras		1
11		06123	St Laurent du Var	Port Saint Laurent	4
12		06029	Cannes	Port de Cannes	?
13				Port Pierre Canto	5
14				Port Abri du Béal	1.3
15		06155	Vallauris	Golfe Juan Port Camille Rayon	3.4
16				Vieux Port Golfe Juan	?
17		06079	Mandelieu	Port de la Rague	2.6
18				Port La Napoule	4
19				Port de Cannes-Marina	1.7
22		06161	Villeneuve-Loubet	Marina Baie des Anges	4.3
23		06088	Nice	Port de Plaisance	?
24		06159	Vilelfranche-sur-mer	Port de Villefranche-Darse	?

Tableau 18 : Valeurs moyennes de profondeur dans chaque port

4.6.3 Aménagements portuaires gagnés sur la mer

La Figure 45 indique les surfaces gagnées sur la mer par rapport aux plans d'eau naturels et artificiels dans le cadre d'aménagement portuaire.

Ces informations sont issues d'une base de données environnementale (Meinesz et al., 2006) mise à disposition par le CRIGE PACA.

Initialement, cette donnée a été produite par l'observatoire MEDAM pour évaluer l'impact des ouvrages gagnés sur la mer sur les côtes françaises de la Méditerranée :

- Impact écologique évalué par la comparaison des surfaces gagnées sur la mer par les aménagements avec la surface des petits fonds littoraux qui sont les plus riches en milieu marin. Cette évaluation conduit à proposer des taux de destruction de l'ensemble des écosystèmes littoraux considérés ;
- Impact paysager évalué par la comparaison du linéaire artificialisé avec le linéaire du littoral avant toute construction (initial). Cette évaluation conduit à proposer des taux d'artificialisation du littoral.

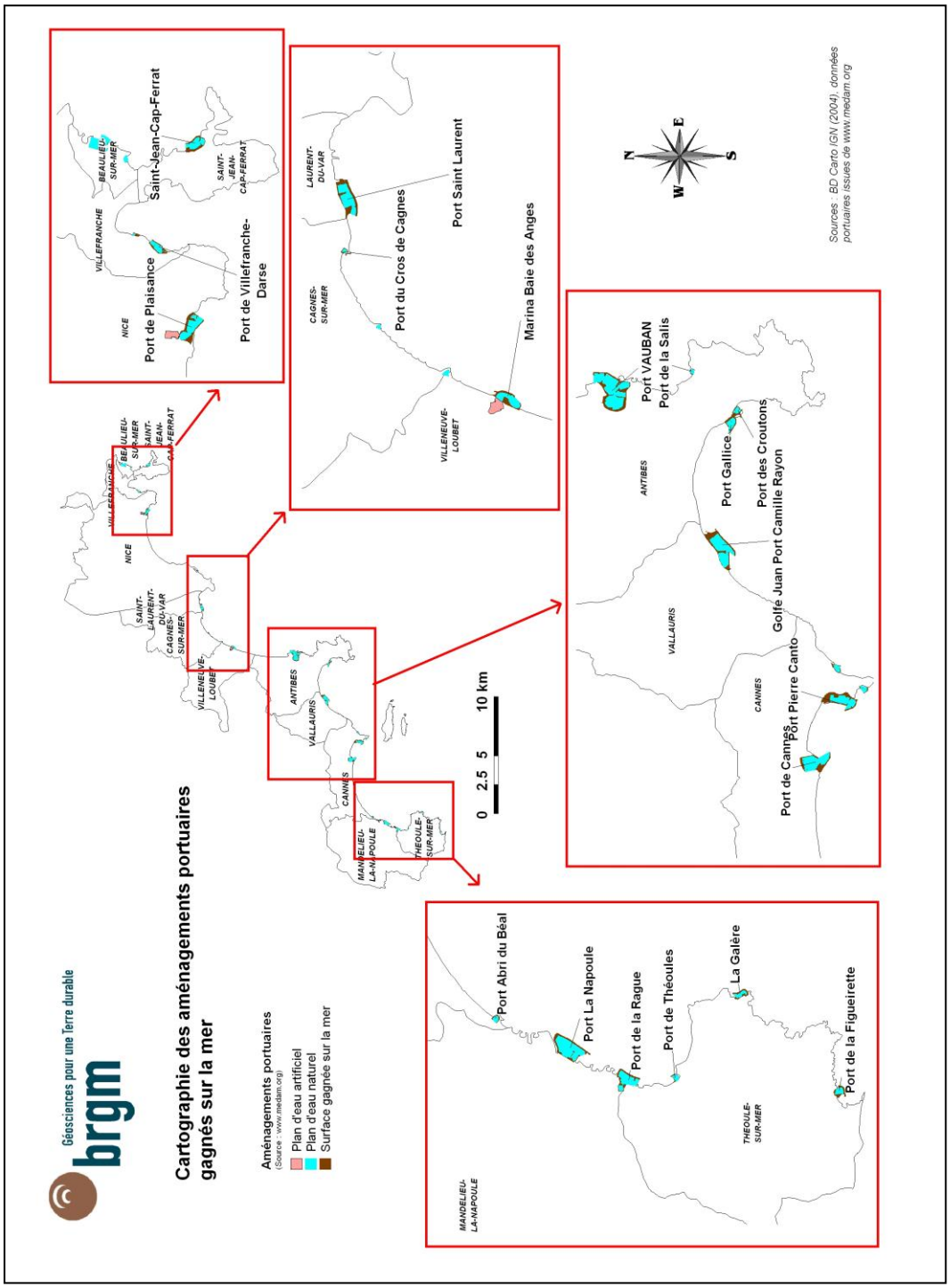


Figure 45 : Cartographie des aménagements portuaires gagnés sur la mer

En plus d'indiquer les zones d'aménagements et de ports, cette base de données sert de référentiel de base du trait de côte sur la zone d'étude. Cette donnée a une échelle de validité allant du 1/5 000 au 1/50 000 et date de 2006 (Figure 46).

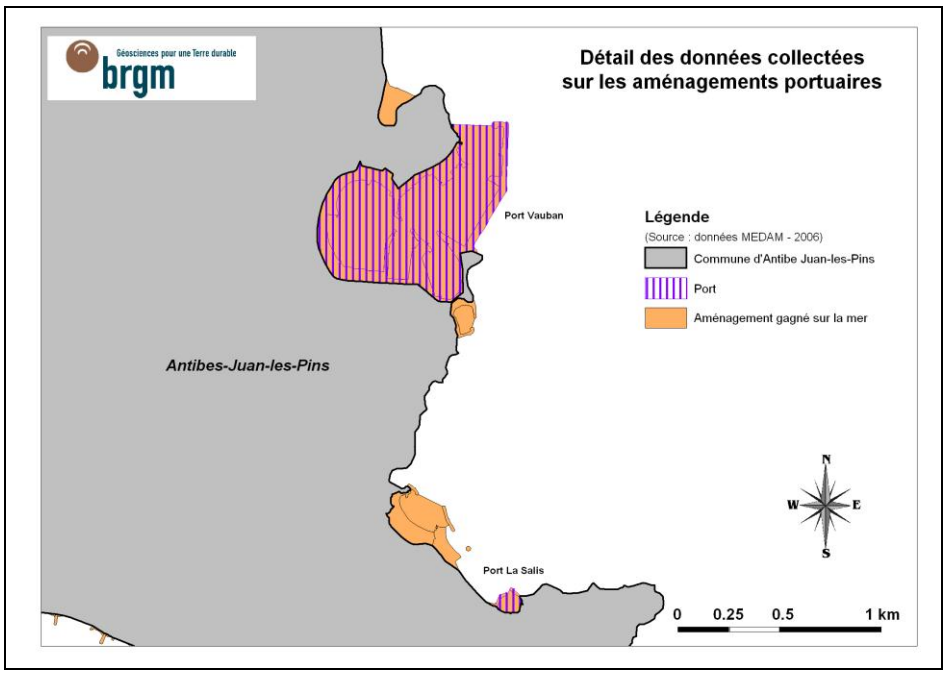


Figure 46 : Détail des données d'aménagements portuaires, extrait sur Antibes-Juan-les-Pins (d'après les travaux de Meinesz et al, 2006)

4.7 Routes, sentiers du littoral

Les données relatives aux routes et voies de communication (voies ferrées…) sont issues de la base de données BD Carto produite par l'IGN, avec comme échelle de validité celle du 1/50 000. Elles datent de 2004.

Les données sur les réseaux de la BD Topo sont plus précises, 1/25 000, et possèdent des informations altimétriques.

Un fichier relatif aux sentiers du littoral et à leur condition d'accès a été utilisé, il provient du Conseil Régional PACA et donne l'état du sentier et l'accès à la mer. L'échelle de validité est le 1/25 000.

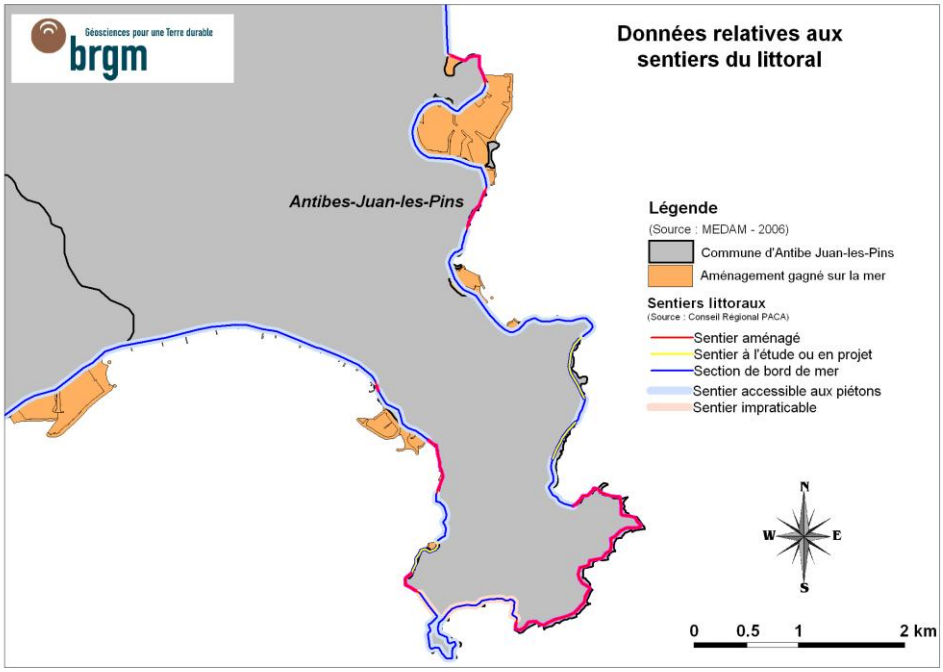


Figure 47 : Détail de la donnée Sentiers littoral sur la commune d'Antibes Juan-les-Pins (Conseil Régional PACA)

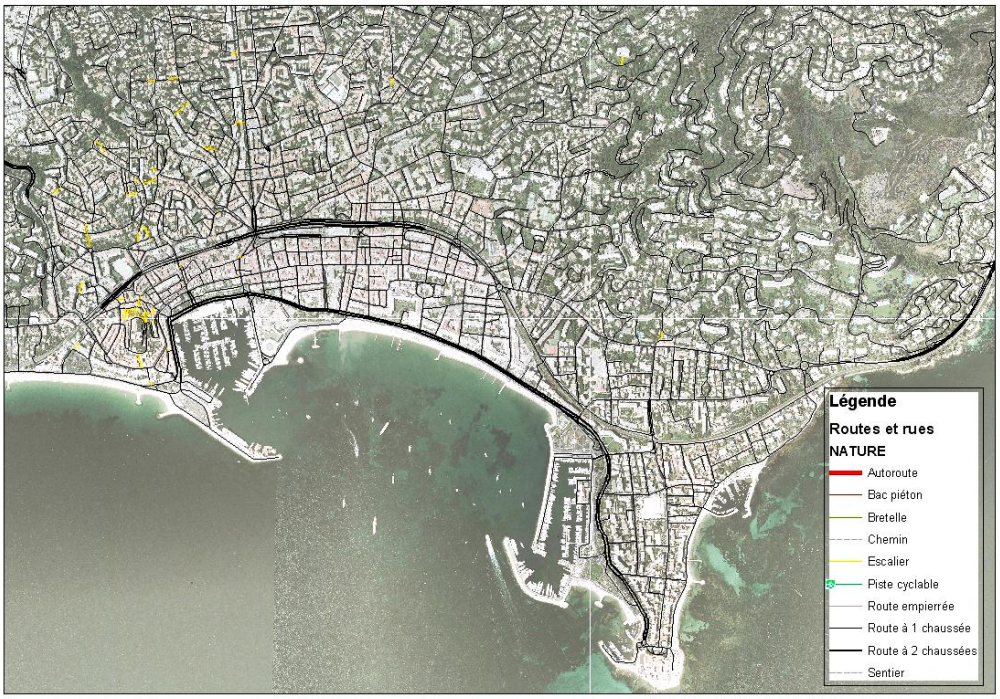
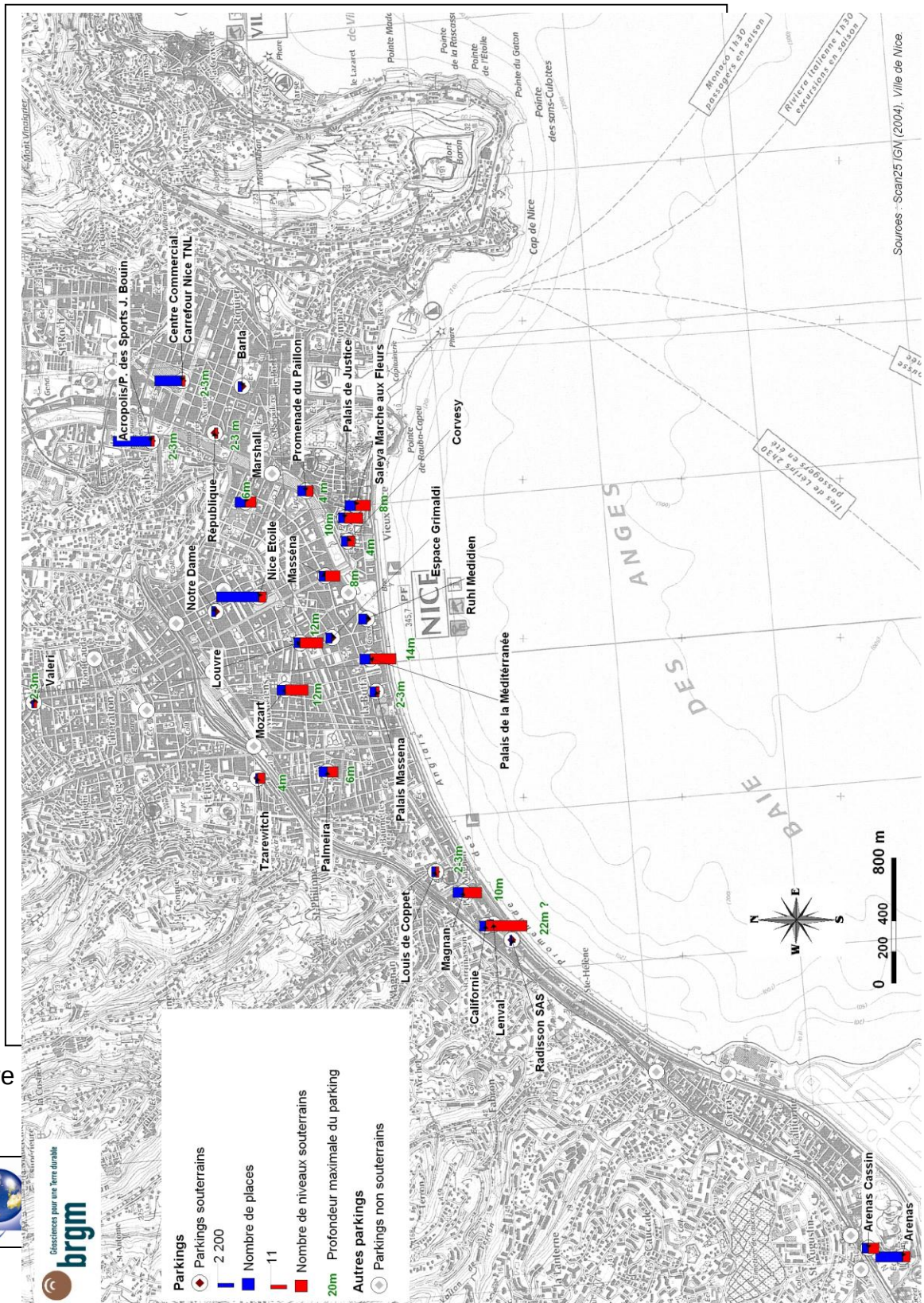


Figure 48 : Détail des routes et rues de la BD Topo, extrait commune de Cannes.

4.8 Parkings

Le travail relatif aux parkings a consisté à localiser et caractériser les parkings sur la baie de Canne, et principalement sur Antibes, Juan-les-Pins, ainsi que sur Nice. Les contacts pris auprès des mairies et des sociétés privées telles que Q-Park ont permis de géo-référencer les parkings (Figure 49 et Figure 50), en y associant le nombre de niveaux, la superficie et la profondeur maximale.



Figure

L'accent a été mis sur les parkings souterrains, inondables, mais les parkings aériens ont également été géo référencés pour permettre d'identifier des sites où la présence de véhicules peut être importante.

L'Annexe 4 présente les tableaux récapitulatifs de données sur les parkings, collectées auprès des mairies et entreprises privées type Q Park.

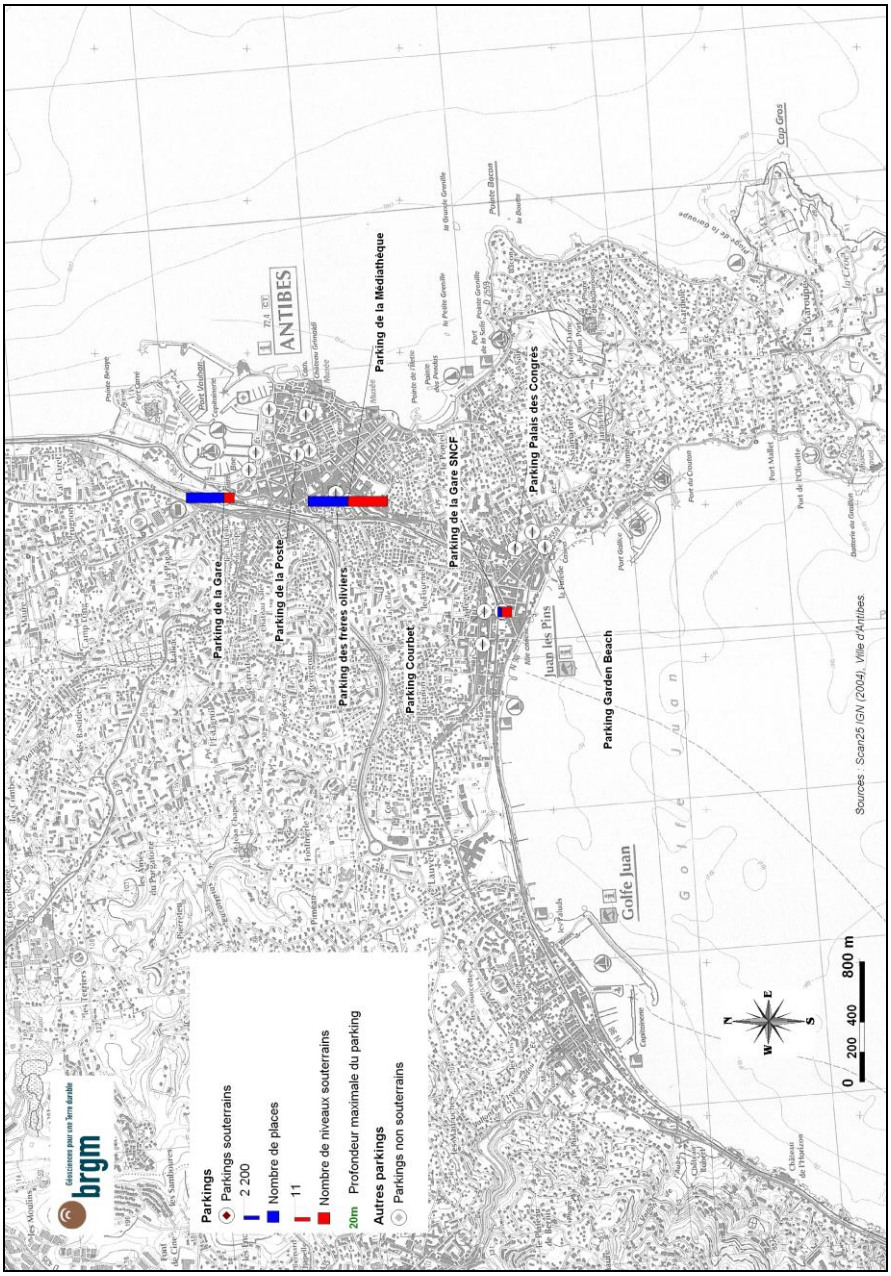


Figure 50 : Cartographie de la localisation des parkings sur la ville d'Antibes Juan-les-Pins comprenant 3 parkings souterrains

4.9 Structuration des données dans un SIG

En plus des informations sur les simulations de tsunami ou carte d'aléa, il est nécessaire de structurer les données sur les enjeux dans un SIG unique et cohérent.

Chaque dossier informatique de simulation de dommages pourra être structuré comme suit :

- un répertoire ALEA, avec des sous-répertoires pour chaque évènement retenu (selon les cas : carte hauteur d'eau, vitesse, durée, précision de l'information)

- un répertoire enjeux, avec localisation des différents types d'enjeux, et quantification du nombre de biens et personnes exposées. Ce fichier pourra être lié à des données de taux d'occupation en fonction de la saison et l'heure.

- Un répertoire vulnérabilité, regroupant les différentes fonctions d'endommagement ou matrices de capacité de sauvegarde

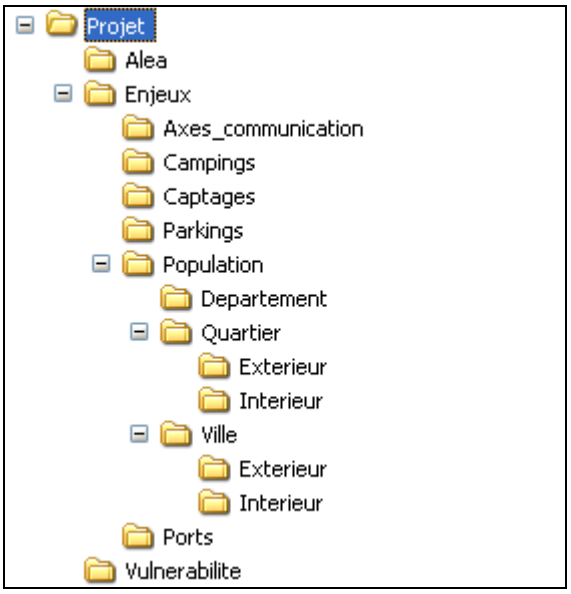


Figure 51 : Exemple d'un projet d'évaluation du risque.

5 Démarche pour l'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis

5.1 Introduction

Une méthode synthétique d'évaluation du risque tsunami est proposée dans ce chapitre. Cette approche méthodologique prend en compte différents aspects constatés dans les chapitres 2 et 3:

- L'aléa attendu dans la Méditerranée occidentale est faible à modéré, avec des surélévations du niveau d'eau qui ne dépassent pas les 3 mètres.
- Les enjeux les plus exposés aux tsunamis en Méditerranée Occidentale sont les zones portuaires (d'après les données historiques) et la population (phénomène touristique récent, après-guerre). Vu le contexte, selon le type du bâti, celui-ci peut avoir fonction de « refuge ».
- La diversité des méthodes existantes d'évaluation du risque aux tsunamis.

La méthode vise à estimer les dommages aux personnes et aux biens pour différents niveaux d'agression (scénario évènementiel). Initialement trois échelles d'évaluation avaient été retenues : le quartier, la commune, le département.

L'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis consiste au calcul des pertes suivant la mise en relation via des matrices ou courbes d'endommagement) des enjeux et des niveaux d'agression (hauteur, vitesse).

Concernant l'identification et collecte des enjeux, les résultats sont sensiblement les mêmes aux échelles dite par quartier ou communale, avec notamment des indications quantifiées sur la répartition de la population. Concernant l'échelle départementale, les indications sur les enjeux sont d'ordre qualitatif.

Dans le cadre du projet RATCOM, concernant les informations sur l'agression, elles proviennent des simulations du tsunami de 1979 réalisées par le CEA dans le cadre du module SP3 de RATCOM. Elles sont relativement détaillées à l'échelle du quartier (précision d'ordre métrique), par contre elles restent très indicatives à l'échelle communale, et a fortiori départementale.

Dans la pratique, l'application des démarches d'évaluation de la vulnérabilité et le calcul des dommages ont été limitées par la précision des informations sur les inondations.

5.2 Vulnérabilité de la population

La vulnérabilité de la population doit tenir compte de la localisation des personnes au moment du tsunami :

- personnes qui se situent à l'extérieur, sur la plage, sur les promenades ou sur les quais, avec le cas particulier des baigneurs.
- personnes qui se situent à l'intérieur des établissements ou bâtiments en bord de mer. La vulnérabilité des personnes à l'intérieur des bâtiments dépend aussi du type de bâtiment considéré.

Concernant les personnes situés à l'intérieur des bateaux au moment du tsunami, ou celles qui se trouvent dans les parkings souterrains, une évaluation spécifique des préjudices humains est réalisée.

La distinction entre personnes situées à l'extérieur et à l'intérieur des bâtiments est utilisée pour l'échelle du quartier et celle de la ville.

A l'échelle départementale la vulnérabilité de la population est traitée de manière globale.

5.2.1 Niveau du quartier

5.2.1.1Personnes à l'extérieur des bâtiments

L'estimation du nombre de personnes susceptibles d'être impactées par un tsunami d'intensité donnée est le suivant :

<u>1) Calcul de la répartition humaine à l'extérieur en fonction de différentes périodes de temps</u>

A cette échelle d'étude, on dispose d'une cartographie des zones de fréquentation homogène et d'une estimation de la densité de la population à différents moments de la journée et de l'année.

<u>2) Réalisation d'une carte de capacité de sauvegarde</u>

La capacité d'un individu à se déplacer dans une zone inondée dépend non seulement de sa taille, mais aussi du fait de savoir nager, de son âge… Comme nous ne disposons pas de données détaillées de ces paramètres, un « profil typologique moyen » des personnes a été retenu.

Outre ces paramètres, pour évaluer la vulnérabilité des **personnes à l'extérieur des bâtiments**, la composante agression est exprimée par le couple de valeurs « hauteur d'eau / vitesse » à un instant déterminé. A partir de ces deux valeurs il est possible d'établir une courbe « de vulnérabilité » fonction de la taille de l'individu. Il

existe dans la littérature différentes courbes de vulnérabilité des personnes aux inondations (cf chapitre 3.1)

Concernant le projet RATCOM, la courbe indiquée dans le cadre des PPRI pour l'adulte sportif (Plan de Prévention au Risque Inondation) est retenue (Figure 20).

Par croisement de cette courbe avec le résultat de la simulation du tsunami, en particulier sur la phase inondation à terre (pour RATCOM, cf résultat du CEA, module SP3, rapport Donnadieu et al., 2010), il est possible d'apprécier les zones où les personnes peuvent résister au flux par eux-mêmes ou non.

La **carte de capacité de sauvegarde** alors réalisée distingue trois zones :

- pas d'inondation,
- zones à déplacement possible,
- zones avec la population emportée par le courant

Cette capacité de sauvegarde peut être utilisée :

- D'une part, pour quantifier le nombre de personnes emportées par le flot.
- D'autre part, dans le cadre d'une réflexion sur les chemins d'évacuation possibles (plans de secours) des personnes situées dans la zone de flux/déflux mais non emportées,

L'inondation peut provoquer la mobilisation d'objets lourds et volumineux qui interfère avec la mobilité des personnes emportées (cas par exemple des voitures). L'analyse du risque de la population située en plein air devra tenir compte de la présence en nombre de ce type d'objets (comme c'est le cas par exemple des parkings en bord de mer).

3) Estimation du nombre de personnes emportées par l'inondation

Ce calcul est réalisé sur la base d'un croisement entre la carte de capacité de sauvegarde et les densités indiquées dans la carte des zones homogènes de fréquentation de la population.

Parmi les personnes emportées par le courant, un ratio de mortalité est appliqué sur la base des taux moyens proposés par Nishikiori et al. (2007) ou Proenza (2006), (cf 3.1) , soit respectivement 6% et 10%.

Il s'agit toutefois d'estimation très incertaine car basée sur des relations empiriques calculées avec très peu d'observations historiques.

5.2.1.2 Personnes à l'intérieur des bâtiments

La méthode qui suit propose de considérer principalement les bâtiments comme un refuge possible pour les personnes qui sont à l'intérieur et aux alentours, en prenant en compte les facteurs qui peuvent favoriser ou non la sauvegarde de la population (Figure 52).

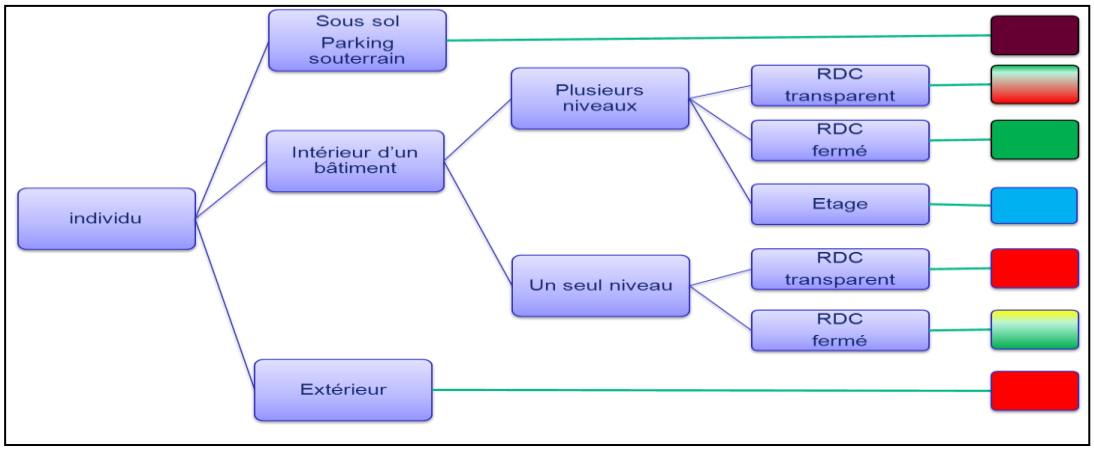


Figure 52 - Calcul des courbes de vulnérabilité humaine en fonction de la situation des personnes au moment du tsunami

On procédera également à une analyse de la stabilité structurelle du bâti, pour pouvoir traiter un phénomène de grande ampleur et cela dans le but de vérifier que les bâtiments identifiés comme des refuges possibles pour la population ne seraient pas détruits par l'impact du tsunami.

La méthode est structurée en quatre étapes.

1) <u>Typologie des bâtiments</u>

Celle-ci est s'inspirée de la méthode PVTAM (Papathoma, 2003 et 2007) et des résultats de CRATER (2006).

Les critères typologiques sont les suivant :

- Le nombre d'étages : en distinguant les bâtiments à un niveau (RDC simple) des bâtiments à étages (refuge).
- La protection du bâtiment : Au-delà des infrastructures de protection du littoral (digues, enrochement…) ce critère prend en compte l'existence d'un mur de protection autour du bâtiment, et également le fait que le bâtiment est situé en deuxième ligne, donc partiellement protégé par ceux situés face à la mer.
- La présence d'objets dans le RDC et les environs du bâtiment. Des objets divers (tables, chaises…) peuvent réduire la mobilité des gens, les blesser et bloquer les issues qui permettraient de monter dans les étages.
- Les caractéristiques du RDC, transparent ou avec des murs.

Les effets induits par l'impact d'une vague contre une baie vitrée ou contre un mur en maçonnerie légère vis-à-vis de la population à l'intérieur peuvent être différents. D'une part, la présence d'un RDC transparent diminue la vulnérabilité structurale du bâtiment (contrairement au séisme), mais d'autre part, elle expose les individus présents au RDC à l'impact direct de la vague, et provoque la pénétration quasi immédiate de l'inondation dans la maison. C'est cet effet négatif que nous avons retenu.

Quatre types de bâtiments sont identifiés (Figure 52 à Figure 56) :

- Type 1. Bâtiment à plusieurs niveaux avec un 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 protégé, avec des murs.
- 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. La présence de murs protecteurs dans l'environnement immédiat de la construction peut être aussi prise en compte pour ce type.

3) Pour chaque type de bâti, une **matrice de sauvegarde** est définie (Figure 52 à Figure 56).

Elle dépend de la vitesse et de la hauteur d'eau maximale. Les valeurs limites des hauteurs d'eau et vitesses sont inspirées de la plaquette de prévention du risque d'inondation (MEDAD, 2000) et des valeurs de Kelman (2002).

2) Classement du risque de la population en trois **niveaux de sauvegarde** :

- **Niveau 0, bâtiment non inondé.**
- **Niveau 1, bâtiment inondé, population au RDC non emportée (Hauteur/vitesse =>alea faible).** Les personnes que 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 2, bâtiment inondé, la population du RDC est emportée/piégée (alea moyen à fort).** Les personnes que se situent au RDC sont emportées par la vague 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.

Pour les bâtiments en RDC simple protégés, on distingue **un niveau 1.5 : bâtiment inondé, à un RDC simple, population au RDC protégé par le confinement (alea moyen à fort).** Les personnes seront piégées, c'est-à-dire qu'elles pourront se déplacer mais qu'elles n'ont nulle part où se réfugier.

Les sous-sols fond l'objet d'un type spécifique. Le risque y sera de niveau 2 dès que la vague les atteint.

Hauteur d'eau maximale (en m)	1,5 < H	2	2	2	2	2	2	2	2
	1 < H ≤ 1.5	2	2	2	2	2	2	2	2
	0.5 < H ≤ 1	1	2	2	2	2	2	2	2
	0 < H ≤ 0.5	1	1	1	1	2	2	2	2
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		V<0.5	0.5 ≤ V < 0.75	0.75 ≤ V < 1	1 ≤ V < 1.25	1.25 ≤ V < 2	2 ≤ V < 3	3 ≤ V < 5	5 ≤ V
Bâti de Type 1		Vitesses maximales (m/s)							

Figure 53 : Exemple d'un bâtiment à plusieurs niveaux avec un RDC transparent (Antibes) et matrice de sauvegarde pour **le type 1**

Hauteur d'eau maximale (en m)	1,5 < H	2	2	2	2	2	2	2	2
	1 < H ≤ 1.5	1	1	1	1	1	2	2	2
	0.5 < H ≤ 1	1	1	1	1	1	2	2	2
	0 < H ≤ 0.5	1	1	1	1	1	1	1	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		V<0.5	0.5 ≤ V < 0.75	0.75 ≤ V < 1	1 ≤ V < 1.25	1.25 ≤ V < 2	2 ≤ V < 3	3 ≤ V < 5	5 ≤ V
Bâti de Type 2		Vitesses maximales (m/s)							

Figure 54 : Exemple d'un bâtiment à plusieurs niveaux avec un RDC protégé (Cagnes sur Mer, extrait de Google Street View) et matrice de sauvegarde pour **le type 2**.

Hauteur d'eau maximale (en m)	1,5 < H	2	2	2	2	2	2	2	2
	1 < H ≤ 1.5	2	2	2	2	2	2	2	2
	0.5 < H ≤ 1	1	2	2	2	2	2	2	2
	0 < H ≤ 0.5	1	1	1	1	2	2	2	2
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		V<0.5	0.5 ≤ V < 0.75	0.75 ≤ V < 1	1 ≤ V < 1.25	1.25 ≤ V < 2	2 ≤ V < 3	3 ≤ V < 5	5 ≤ V
Bâti de Type 3		Vitesses maximales (m/s)							

Figure 55 : Exemple d'un bâtiment à un seul niveau (RDC) transparent (Saint Laurent du Var, extrait de Goole Street View) et matrice de sauvegarde pour **le type 3**

Hauteur d'eau maximale (en m)	**1,5 < H**	2	2	2	2	2	2	2	2
	1 < H ≤ 1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2	2
	0.5 < H ≤ 1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2	2
	0 < H ≤ 0.5	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		V<0.5	**0.5 ≤ V < 0.75**	**0.75 ≤ V < 1**	**1 ≤ V < 1.25**	**1.25 ≤ V < 2**	**2 ≤ V < 3**	**3 ≤ V < 5**	**5 ≤ V**
Bâti de Type 4		**Vitesses maximales (m/s)**							

Figure 56 : Exemple d'un bâtiment à un seul niveau (RDC) avec des murs qui le protègent (Villeneuve-Loubet, extrait de Google Street View) et matrice de sauvegarde pour **le type 4**.

4) Estimation des préjudices humains

A partir de la BD topo, la répartition des bâtiments bâti et la surface habitable correspondante a été estimée. En outre le nombre de nuitées (résidents ou touristes) pour différentes périodes est indiqué pour les différentes communes par le CRT.

A partir de ces indications, tel qu'indiqué dans l'analyse des enjeux (cf chapitre 4.4.4), les ratios de personnes par unité de surface habitable pour les dates du 15 août et du 10 janvier ont été calculés (Tableau 16).

L'application de ces ratios sur l'ensemble des bâtiments habitables permet d'évaluer la population maximale d'un bâtiment pour une journée déterminée.

L'estimation des préjudices humains résulte de la combinaison : niveau de sauvegarde du bâtiment et nombre de personnes dans le bâtiment.

Sur la base d'observations après le tsunami de 2004 en Indonésie, Guha-Sapir et al. (2006) estiment entre 4% et 10% le taux de mortalité de personnes qui se trouveraient dans des bâtiments situées jusqu'à 200 m de la côte (Figure 21). Ces taux sont estimés indépendamment de l'intensité de l'inondation. Dans le cadre de RATCOM, concernant le niveau 2 de sauvegarde, celui-ci correspond à un risque moyen à fort pour les personnes situées en RdC. Celles-ci sont emportées par le flot. Vue la hauteur d'eau relative au niveau 2, le taux moyen retenu pour le calcul des pertes humaines est de 4%.

Le niveau 1,5 de sauvegarde correspond à un risque faible à moyen. Les personnes pourront se trouver bloquer, mais cependant les valeurs hauteur ou vitesse de l'eau restent suffisamment faible pour ne pas causer de victimes.3

Le niveau 1 de sauvegarde correspond au risque faible. Il n'y a pas de risque de mortalité.

5) Analyse de la stabilité du bâtiment en cas d'impact

Il s'agit d'évaluer l'endommagement potentiel des bâtiments, dans le but d'estimer à partir de quelle hauteur et vitesse d'inondation, un bâtiment (en particulier ceux susceptibles de constituer un abri pour les personnes en cas de tsunami) subirait un endommagement structurel important.

Après le tsunami de l'océan indien en décembre 2004, plusieurs travaux ont été consacrés à l'évaluation de la vulnérabilité du bâti aux tsunamis. D'une façon générale, il a été observé que les bâtiments construits avec des structures lourdes (béton armé, maçonnerie) ne souffrent des dégâts structuraux importants qu'à partir des hauteurs d'eau supérieures à 2 ou 3 m et des vitesses fortes.

Dans le cadre de ce projet, en cas de fortes valeurs d'agressions (hauteur d'eau) calculées au niveau des zones construites, le comportement du bâti pourra être estimé en utilisant les courbes de vulnérabilité conçues à partir des observations du tsunami de l'océan Indien en 2004 (par exemple celle de Guillande et al., 2009, Figure 23). Vu les niveaux d'intensité attendus (faible à moyen), les courbes de dommages au bâti concerneront surtout les constructions dites légères, qui correspondent à des bâtiments en bois, métallique, verre, ou maçonnerie de qualité

médiocre, situés en bord de mer, en général à usage commercial et exceptionnellement d'habitation.

Le type des fondations des bâtiments (sommaires ou profondes) est un paramètre important vis-à-vis de l'érosion provoqué par la vague. Malheureusement cette donnée est difficilement accessible, même de manière statistique. En conséquence, et compte tenu du faible niveau de dommage attendu pour le milieu bâti, ce paramètre n'a pas été retenu.

Les zones où des objets volumineux et lourds tels les automobiles ou les bateaux peuvent être mobilisés et emportés par le courant sont susceptibles d'être le siège de dommages aggravés, ces corps flottants pouvant impacter fortement les constructions.

En cas d'endommagements importants, les bâtiments ne constituent plus un refuge. Pour l'estimation des victimes parmi les occupants des bâtiments, il est alors possible de se référer aux matrices retenues dans le cadre de scenarii de séismes, qui relient les niveaux d'endommagement du bâtiment avec des ratios de victimes parmi les occupants.

5.2.1.3 Campings

Les zones en bord de mer présentent souvent des campings à proximité. L'analyse de la vulnérabilité de ces établissements et leurs occupants face à un tsunami est similaire à celle proposée pour les personnes situées à l'extérieur des bâtiments. La capacité de chaque camping est estimée à partir des données du CRT portant sur le nombre d'emplacements par commune.

L'analyse de vulnérabilité des campings est limitée aux secteurs où la modélisation de l'inondation exprimera l'agression en hauteur et vitesse d'eau.

5.2.1.4 Parkings souterrains

Comme pour les campings, les parkings souterrains sont géo référencés. L'analyse de la vulnérabilité de ces établissements et leurs occupants face à un tsunami est similaire à celle pour les personnes à l'intérieur des bâtiments. Un parking souterrain est considéré comme un sous-sol, c'est-à-dire, dès que le parking est impacté par la vague le parking est un piège pour la population.

L'analyse de vulnérabilité est limitée aux secteurs où la modélisation de l'inondation exprimera l'agression en hauteur et vitesse d'eau.

5.2.2 Evaluation au niveau de la ville

A cette échelle de travail, les valeurs de densité de population à l'extérieur à différents moments de la journée et de l'année seront les mêmes que ceux exposés pour l'échelle de quartier (cf chapitre 4).

Par contre, concernant les valeurs d'agression (Hauteur, vitesse), les renseignements sont limités à des indications de hauteur maximale de l'onde de tsunami à proximité du rivage (carte d'inondabilité).

Du fait de la qualité des données sur l'inondation, dans le cadre du projet RATCOM, l'estimation du niveau de risque suit une démarche qualitative, simplifiée, suivant la matrice en Tableau 19.

	Occupation forte	**Occupation modérée**	**Occupation faible**
Pas d'inondation	Nul	Nul	Nul
Inondé mais personnes non emportées	Fort	Modéré	Faible
Personnes emportées par la vague	Très fort	Fort	Modéré

Tableau 19 : Matrice pour l'évaluation du risque de la population à l'extérieur à l'échelle de ville.

5.2.3 Evaluation au niveau départemental

Le niveau d'étude départemental ne fait plus de distinction entre les personnes à l'extérieur et à l'intérieur.

L'agression est extrapolée à partir de la valeur de la hauteur maximale du plan d'eau à proximité du rivage.

Les enjeux à ce niveau-là sont classés en :

- zones urbaines,
- zones non urbaines mais avec une possible présence de personnes (exemple : plages naturelles)
- zones avec une fréquentation supposée très faible à nulle (exemple : falaises).

Une distinction entre zones de topographie plate et zones abruptes est aussi faite, car la population est globalement moins exposée dans les zones de baignade escarpées.

La délimitation des zones urbaines est effectuée à l'aide des données Corine Land Cover (interprétations d'images satellite) ou de la BD CARTO© IGN. La

détermination des plages naturelles peut se faire également à partir de Corine Land Cover ou éventuellement avec d'autres critères indirects comme la carte de pente du littoral.

Les pertes potentielles sont estimées de manière qualitative à l'aide d'une matrice qui va mettre en relation ces zones avec quatre classes d'agression (hauteur max. de submersion), et ce pour deux périodes de l'année, pendant une journée d'été (bords de mer fréquentés, appelé saison) et pendant une journée d'hiver ou pendant la nuit (appelé hors saison).

Topographie	**Enjeu**		**hauteur maximale du plan d'eau à proximité de la côte**			
			< 0,5 m	0,5 – 1 m	1-2 m	> 2m
Topographie plate	Plages en zone urbaine	Saison	Faible	Modéré	Fort	Très fort
		Hors saison	Très faible	Faible	Modéré	Fort
	Plage naturelle	Saison	Faible	Faible à modéré	Modéré à fort	Fort à très fort
		Hors saison	Nul	Très faible	Modéré	Modéré à fort
Topographie abrupte	Falaises, côte rocheuse		Nul	Nul	Nul	Nul
	Petites plages, zone urbaine	Saison	Faible	Modéré	Fort	Fort à très fort
		Hors saison	Très faible	Faible	Modéré	Fort
	Petites plages, zone naturelle	Saison	Très faible	Faible	Modéré à fort	Fort
		Hors saison	Nul	Très faible	Faible	Modéré

Tableau 20 : Matrice pour l'évaluation du risque à niveau départemental.

5.3 Vulnérabilité des zones portuaires

Lors d'un tsunami modéré, parmi les biens les plus endommagés se 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 tendus à rompre se brisent, libérant les bateaux. Ceux-ci vont se percuter ou tosser 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. Si le modèle n'indique qu'une élévation du niveau marin à l'extérieur du port, celle-ci est alors comparée avec la profondeur moyenne du port. L'endommagement dans le port est alors estimé globalement. L'évaluation du risque au niveau des ports est indépendante des trois échelles de travail.

Le Tableau 21 propose en fonction des valeurs d'hauteur d'eau, une estimation moyenne des dommages à l'intérieur des ports. Ces estimations s'appuient sur des analyses en retour de tsunamis, plus particulièrement celui de Boumerdès (2003) qui a donné lieu à de nombreux dommages dans les ports des deux îles des Baléares. Même si les observations historiques des dommages ne décrivent pas spécifiquement la taille des bateaux endommagés, il est constaté de façon générale des dégâts beaucoup plus importants pour les petites embarcations (pêche, loisir) que pour les grands navires. Le risque pour les personnes qui logent dans les bateaux sera directement lié au risque 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 « seiche » 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.	

Tableau 21 : Evaluation du risque pour les ports et les zones portuaires.

5.4 Routes et réseau ferroviaire

En cas d'inondation des bords de mer, un des points importants pour la gestion des secours sera de localiser les axes routiers ou ferroviaires qui seront bloqués ou impactés. Le Tableau 22 résume les trois niveaux de dommages distingués par les réseaux routiers et ferroviaires.

Cette évaluation est réalisée par croisement entre les informations sur les réseaux extraits de la BD Topo, et la carte d'inondabilité.

L'évaluation du risque au niveau des axes de communication est indépendante des trois échelles de travail.

Agression	Description
Pas d'impact	Le réseau n'est pas impacté par le tsunami
Impacté	Réseau envahi par l'inondation et dénoyé lorsque les eaux se retirent. La présence d'objets abandonnés par les flots bloquants le réseau est possible.
Inondé	Une partie du réseau reste longtemps inondé après le retrait des eaux (zones de faible pente).

Tableau 22 : Evaluation du risque pour les routes et le réseau ferroviaire.

5.5 Autres enjeux

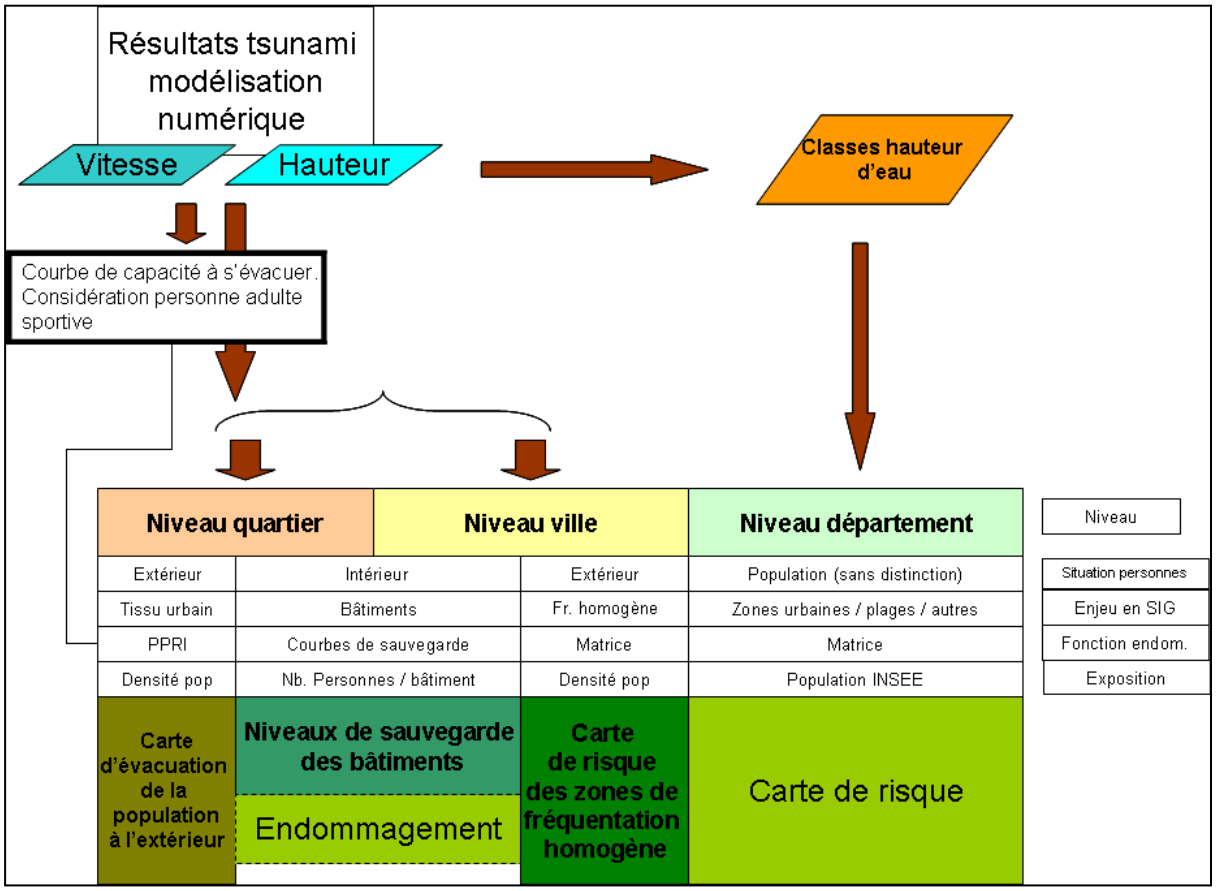
Le rapport du GSC (2009) identifie une série d'enjeux et les facteurs de vulnérabilité associés suite au retour d'expérience du tsunami de l'océan Indien. Parmi ces enjeux critiques on trouve notamment les réseaux d'eau potable et d'assainissement, d'électricité, de gaz et de télécommunication. Mais ceux-ci ne seront pas étudiés dans le cadre de ce projet, celui-ci étant principalement axé vers un système d'alerte.

L'aéroport de Nice, situé en bord de mer constitue toutefois un cas spécifique, en raison de sa vulnérabilité et de son importance stratégique, mais également à cause d'une population importante qui y transite.

Le risque au niveau du terminal de l'aéroport est évalué suivant le principe relatif aux « bâtiments », tandis que la piste fait l'objet d'une analyse dérivée de celle des axes routiers.

5.6 Synthèse des approches

La Figure 57 et le Tableau 23 présentent respectivement la démarche générale d'évaluation du risque aux tsunamis en fonction de l'échelle d'analyse, et les données de base nécessaires ainsi que les calculs utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité des enjeux.



Fr : fréquentation de la population

Figure 57 : Démarche générale pour l'évaluation du risque aux tsunamis en fonction de l'échelle d'analyse

Niveau	Enjeu	Intensité	Fichier SIG enjeux	Typo-logie enjeux	Exposition f(heure,saison)	Fonction endommagement
Quartier	Population extérieur	h et v	Tissu urbain/Zones fréquentation homogène	Taille de personne moyenne	Densité population	PPR-Inondation ou autres
	Population intérieur /Bâtiments	h et v	BDtopo - bâtiments	4 types de bâti	Nb personnes / bâtiment	Matrice de sauvegarde / Courbe vulnérabilité du bâti Sri Lanka&Kelson
Ville	Population extérieur	h et v	Délimitation plages&promenades (zones fréquentation homogène)	Taille de personne moyenne	3 classes de fréquentation forte /moyenne/ faible Densité population	PPR-Inondation ou autres
	Population intérieur /Bâtiments	h et v	Polygones bâti	4 types de bâti	Nb personnes / quartier et par type de bâtiment	Matrice de sauvegarde / Courbe vulnérabilité Sri Lanka&Kelson
Département	Population	h	Zones côtières	Plage et zone urbaine / Plage naturelle / Autres	Population INSEE, données fréquentation touristique	Matrice de risque
Tous les niveaux	Ports	h	Situation ports		Nb bateaux/port et fréquentation	% de pertes en fonction de H
	Campings	h et v	Situation campings		Nb personnes / camping	PPR-Inondation ou autres
	Parkings	h et v	Situation parkings souterrains		Nb places / Fréquentation	matrice de sauvegarde
	Routes /Chemin de fer	h	Localisation	Types définis dans BD Topo		Pas impact / impacté / inondé

Tableau 23 : Résumé de l'ensemble des évaluations du risque à trois échelles.

L'échelle d'étude « du quartier » s'appliquera aux secteurs où sont réunis un aléa fort, une disponibilité de données bathymétriques et topographiques à grande échelle qui permettent une simulation détaillée de l'inondation et une forte exposition des enjeux. L'intérêt d'études à cette échelle sera établir des sites pilotes et démonstrateurs. Les zones déjà identifiées sont la plage de la Salis à Antibes (dégâts lors du tsunami en 1979) et la plage des Ponchettes à Nice (très fréquentée l'été).

L'échelle d'étude « de la ville » permettra de découper une commune en différentes zones de fréquentation homogène à l'extérieur et en secteurs bâtis. L'intérêt de cette échelle est de localiser les quartiers ou secteurs d'une ville potentiellement les plus sinistrés et d'estimer le volume de dégâts. Les communes identifiées dans cette catégorie, celles de la baie de Nice-Cannes, sont celles qui avaient été le plus impactées lors du tsunami de l'aéroport de Nice en 1979.

Finalement l'échelle départementale vise à donner une indication globale du risque au niveau communal, en supposant qu'au niveau des communes les zones à plus forte exposition sont les secteurs urbanisés en bord de mer.

6 Application et résultats

Ce chapitre présente les résultats de l'application de la méthode d'évaluation du risque faite à partir des simulations numériques de la surélévation du plan d'eau fournies par le CEA correspondant à l'événement Nice – aéroport 1979 (Donnadieu et al. 2010). Ces simulations ont été restituées à deux échelles, une première qui concerne le quartier de la Salis d''Antibes et une deuxième au niveau de l'ensemble de la baie de Nice, entre Golfe-Juan et Cap-Ferrat. Dans le même rapport du CEA sont présentés les résultats de deux simulations supplémentaires de deux volumes de sédiments présents dans le cagnon du Var et qui seraient susceptibles de provoquer aussi des tsunamis (Silva et al. 2010). Les résultats des modèles numériques de ces tsunamis ne donnent pas des hauteurs d'eau à cote significatives. Par conséquent le seul tsunami considéré dans le scénario de risque est celui-ci de Nice-aéroport 1979.

6.1 Quartier de la Salis à Antibes

Le CEA a fourni une simulation de l'inondation à terre sur un secteur d'Antibes (Donnadieu et al., 2010). Ce modèle d'inondation prend en compte un MNT avec une grille de 5 mètres. Par contre les résultats des cartes d'inondation sont restitués avec des pixels de l'ordre de 15m.

Les résultats de la simulation sur le quartier de la Salis (Figure 58) sont globalement cohérentes avec les observations de l'événement (cf BD Tsunamis et articles de presse contemporains à l'évènement) et les résultats de simulation de Sahal et al. (2010, Figure 12).

Toutefois, concernant le secteur en arrière du port de la Salis, la simulation du CEA indique une extension de la zone inondée moins étendue que celle observée en réalité. A l'inverse, au nord du quartier de la Salis (au niveau de la vieille ville d'Antibes), la simulation CEA indique un champ d'inondation plus étendu que celui observé lors de l'évènement 1979 (d'après les témoignages de l'époque).

Cette différence est probablement dû au fait que le MNT retenu pour la simulation par le CEA n'a pas tenu compte des murailles de la cité Vauban d'Antibes, lesquels peuvent constituer des murs de protection contre une agression de cette nature.

Pour une meilleure validation des résultats obtenus en comparaison avec l'évènement de 1979, le scénario de dommages a été fait sur le quartier de la Salis à Antibes, quartier le plus dévasté par le tsunami.

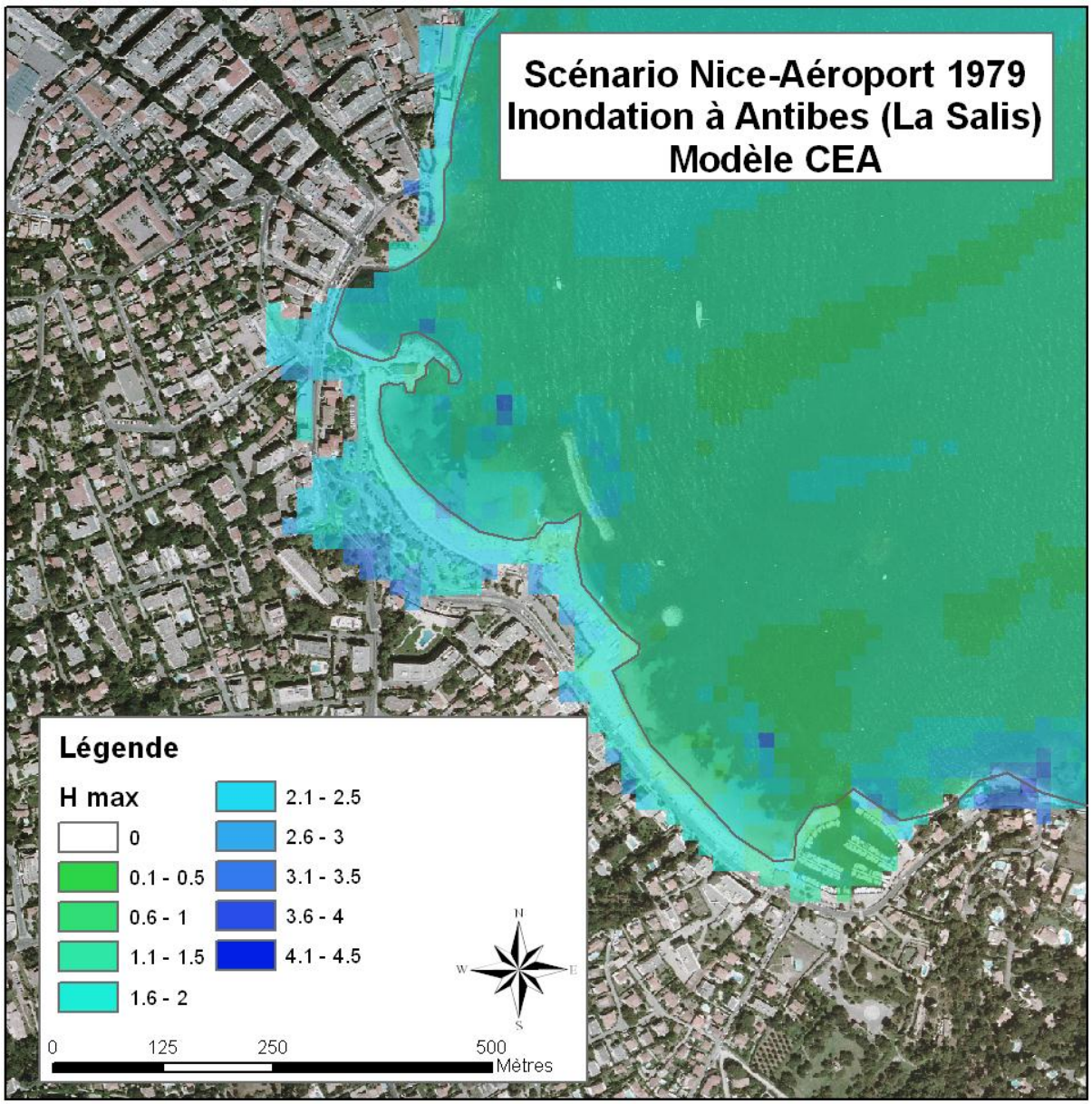


Figure 58 : Carte de l'inondation à Antibes (quartier de la Salis) obtenue par le CEA. (Donnadieu et al., 2010)

6.1.1 Calcul des préjudices humains pour la population à l'extérieur

D'après les résultats de la simulation du tsunami Nice Aéroport 1979 (Donnadieu et al., 2010), les hauteurs d'inondation sont au moins égales à 1,75 m dans le quartier de la Salis.

Concernant la vulnérabilité des personnes, ce niveau d'agression implique que dans les zones inondées aucune personne ne pourrait résister à cette inondation.

A partir des données sur les densités de population pour les secteurs extérieurs, et pour une journée d'été et une journée d'hiver, les préjudices humains calculés sont les suivants (

Tableau 24) :

Quartier de la Salis, tsunami type 1979, population à l'extérieur	Estimation Nombre Personnes emportées ou impactées	Estimation Nombre de décédés (6%)	Estimation Nombre de décédés (10%)
Journée du 15 août, milieu d'après-midi	3277	196	327
Journée d'hiver, milieu d'après-midi	49	3	5

Tableau 24 – Quartier de la Salis (Antibes), estimation des préjudices humains/population à l'extérieur pour un scénario de tsunami type 1979, en journée touristique et journée hors saison

6.1.2 Calcul des préjudices humains pour la population à l'intérieur des bâtiments

Les valeurs de l'inondation sont nettement supérieures à 1,50 mètre au pied des bâtiments et par conséquent, d'après les courbes de sauvegarde, dans tous les cas la population se situant au RDC des immeubles serait impactée et emportée.

Au total, d'après la simulation, 42 bâtiments seraient impactés par le flot (Figure 59). Parmi ces bâtiments une douzaine serait des bâtiments à RDC simple.

Le nombre de personnes impactées est estimé sur la base du nombre de personnes se situant à l'intérieur des bâtiments à différents moments de la journée (Tableau 25).

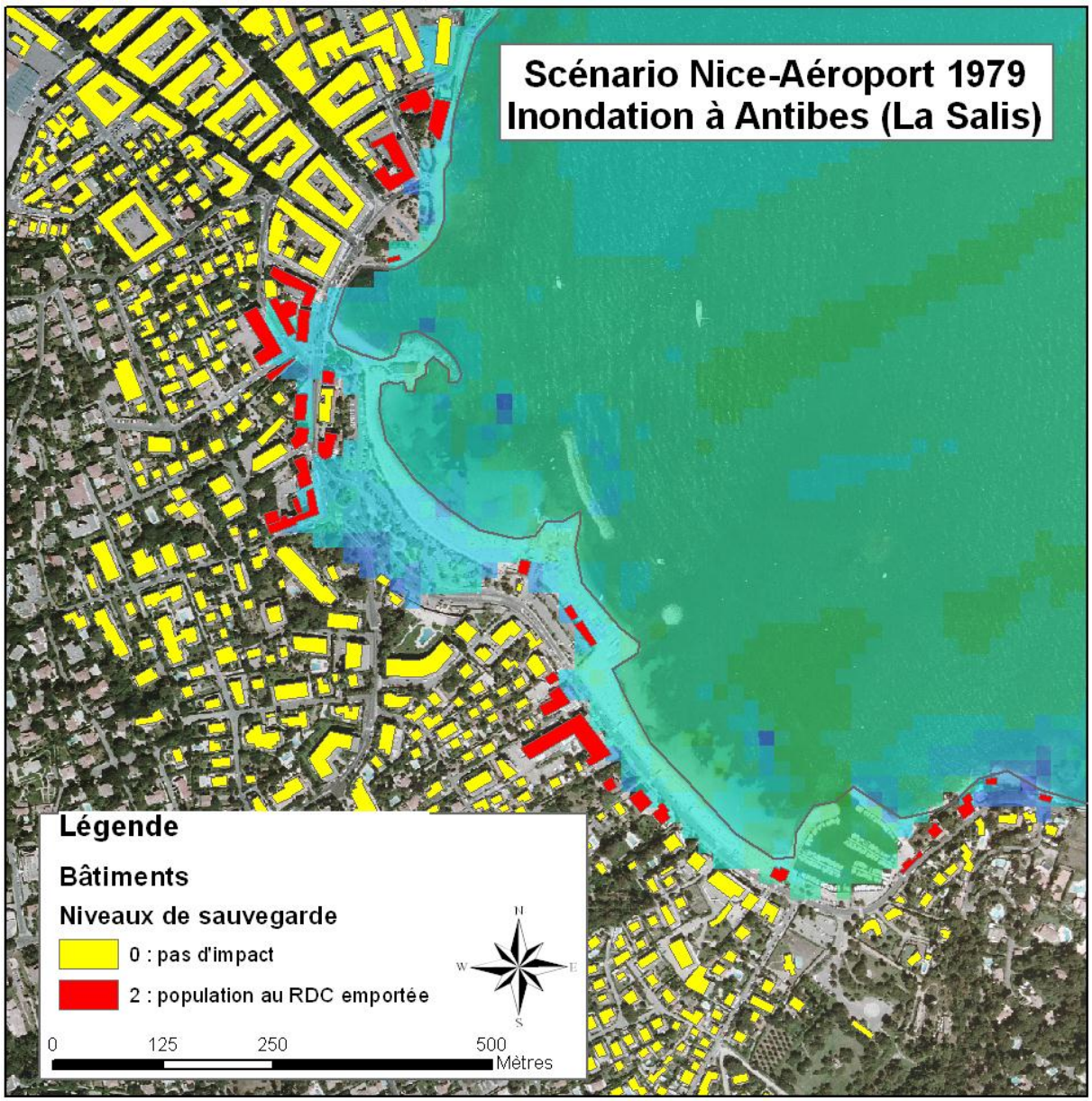


Figure 59 - Simulation du tsunami de 1979 : situation des bâtiments (source BD topo) impactés ou pas par l'inondation (cf Figure 58).

Quartier de la Salis, tsunami type 1979, population à l'intérieur des bâtiments d'habitation	Estimation Personnes emportées ou impactées	Estimation Nombre de décédés (4%)
Journée du 15 août, milieu d'après-midi (45% d'occupation)	192	7
Nuit du 15 août (80% d'occupation)	342	13
Journée d'hiver, milieu d'après-midi (45% d'occupation)	95	3
Nuit d'hiver (80% d'occupation)	169	6

Tableau 25 – Quartier de la Salis (Antibes), estimation des préjudices humains/population à l'intérieur des bâtiments pour un scénario de tsunami type 1979, en journée touristique et journée hors saison

6.1.3 Endommagement du bâti

Les valeurs d'hauteur d'eau au pied des constructions varient entre 1,5 m et 3,25 m.

Ces valeurs, d'après les fonctions d'endommagement de Guillande et al. (2009) pour des immeubles en béton ou en maçonnerie donneraient des dommages faibles (états d'endommagement entre D0 et D2), sans poser de problèmes à la stabilité de la structure.

Seulement dans le cas des constructions très légères (terrasses, paillottes) les endommagements pourraient être très forts vis-à-vis de ces hauteurs d'eau. Ces constructions temporaires ne sont pas référencées dans la BD Topo.

6.2 Résultats à l'échelle des communes, entre Antibes et Saint-Jean-Cap-Ferrat

Les résultats fournis par le CEA (Donnadieu et al, 2010) sur l'ensemble de la baie de Nice (secteur de côte entre l'Ouest du Cap d'Antibes et Saint-Jean-Cap-Ferrat) ne donnent pas des valeurs d'inondation à terre, mais une hauteur maximale du plan d'eau à proximité du rivage (Figure 60 et Figure 61).

Ces valeurs ont été comparées avec le MNT terrestre (grille de 5 mètres), puis les secteurs susceptibles d'être inondés ont été délimités par calcul simplifié altitude à terre – altitude du plan d'eau à la côte. Il s'agit d'une carte d'inondabilté très indicative sur les zones potentiellement inondables.

A quelques exceptions près, les zones impactées sont les plages. Elles seraient inondées jusqu'à la première rupture topographique (murs de protection, voie de chemin de fer, etc.).

6.2.1 Population à l'extérieur

Vu la précision sur la hauteur d'eau à terre, à cette échelle, il n'a pas été possible de faire une carte de capacité de sauvegarde (telle que celle réalisée à l'échelle du quartier de la Salis), c'est-à-dire un distinguo entre les zones inondées mais avec déplacement des personnes possible et zones inondées et où une personne de taille moyenne est emportée.

De façon simplifiée, il a été considéré que sur l'ensemble des secteurs impactés par le raz-de-marée, toute la population était emportée. Suivant ce principe, on souligne le fait que le niveau d'intensité d'inondation retenu tend à surestimer l'étendue de la zone dévastée.

Les secteurs extérieurs (plages et promenades) de fréquentation homogène de l'ensemble de la baie de Nice avaient été délimités avec l'aide du CRT du 06.

Le croisement entre les zones susceptibles d'être inondées et cette carte des zones de fréquentation homogène donne les zones fréquentées impactées par le flot et le pourcentage de surface impactée.

En général toutes les plages de la baie de Nice sont impactées, par contre peu de secteurs correspondant à des lieux de promenades sont impactés, car en général ils se situent à une cote topographique plus élevée.

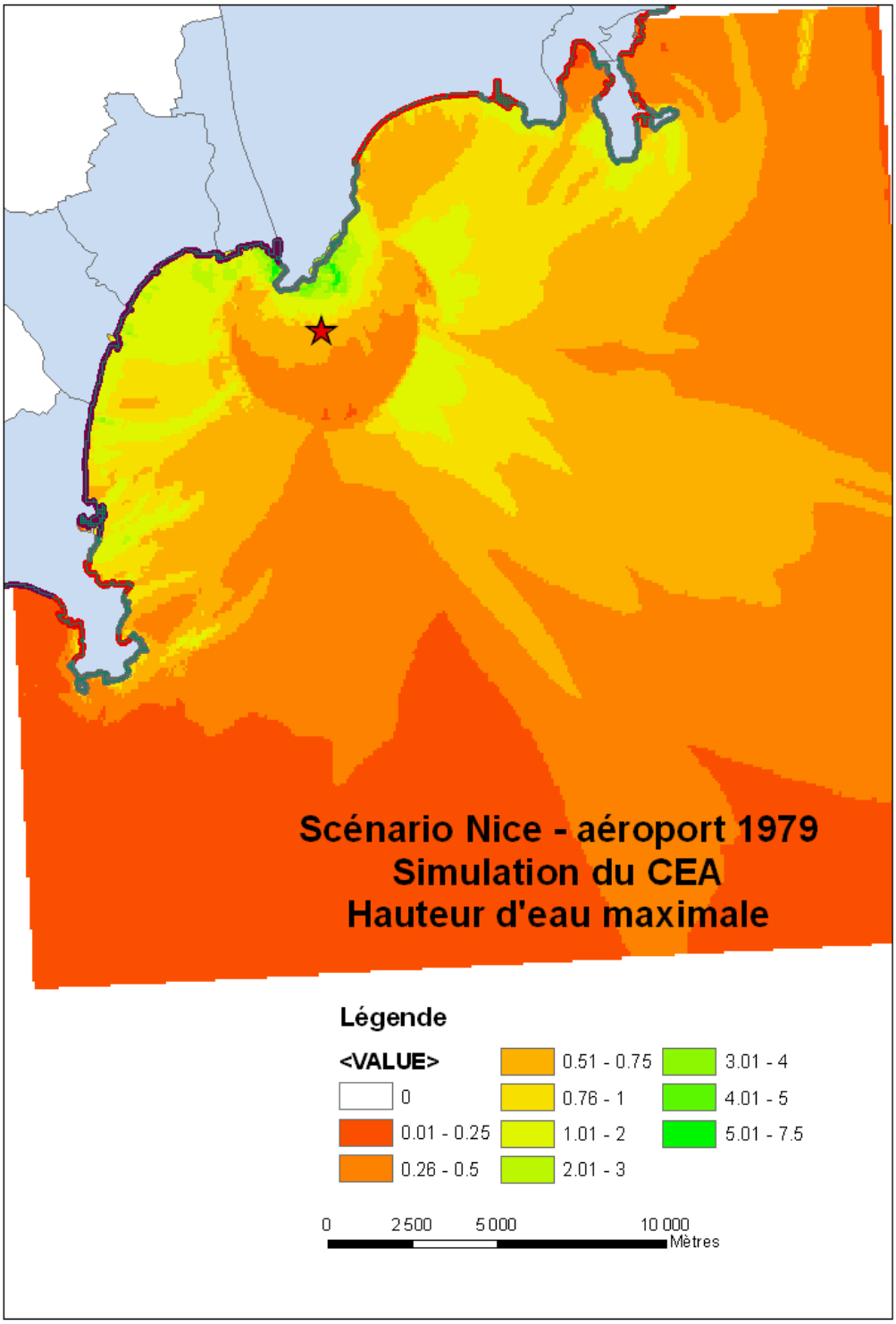


Figure 60 : Hauteurs maximales du plan d'eau dans la baie de Nice pour un tsunami type 1979 (Donnadieu et al., 2010).

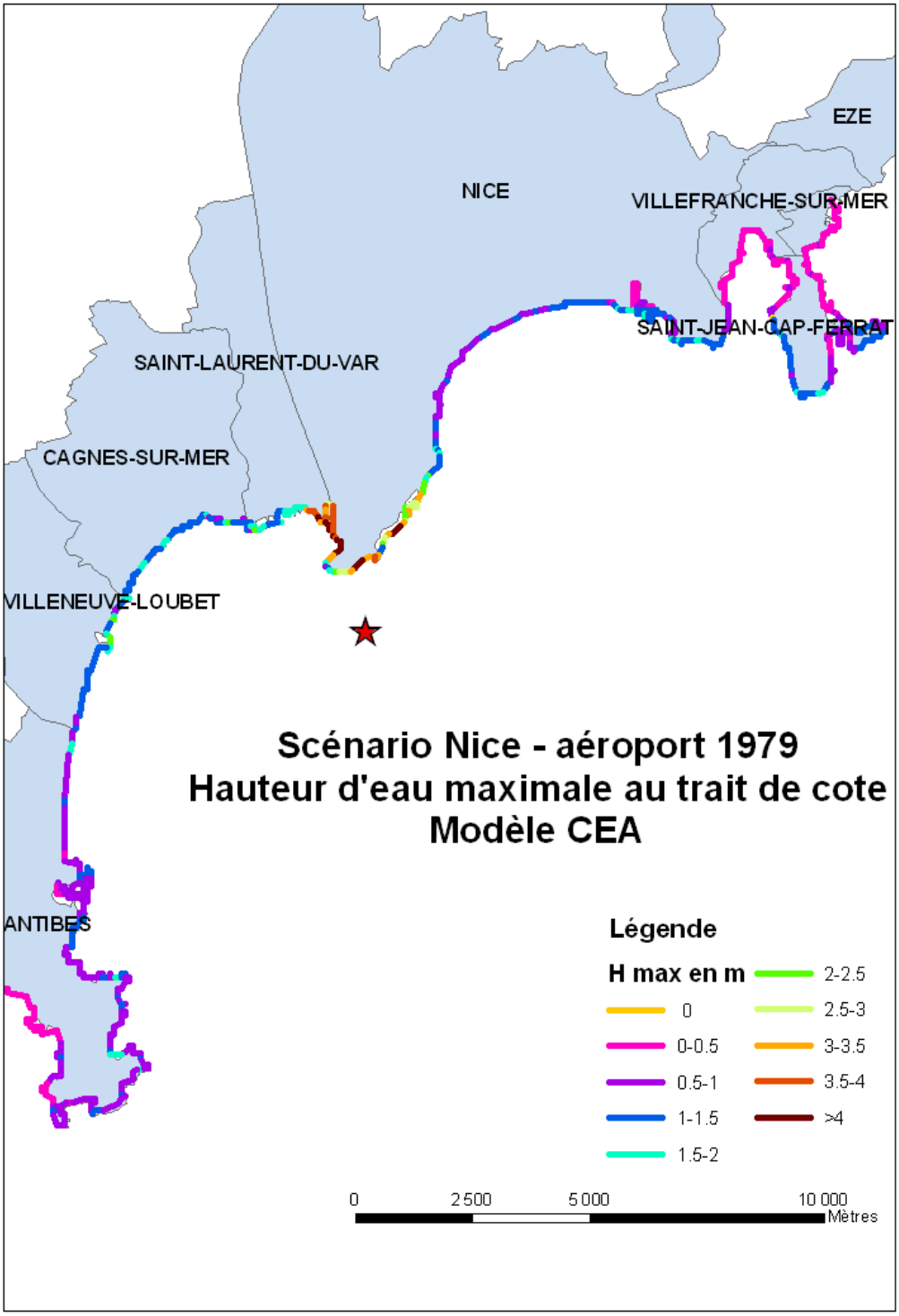


Figure 61 : Classe de valeurs de la hauteur d'eau maximale au niveau du trait de côte, d'après la simulation du tsunami de 1979 de Donnadieu et al. (2010)

Scénario 15 août (Tableau 26)

Un jour de fréquentation maximale des bords de mer, à 15h de l'après-midi, on estime qu'entre 12 000 et 18 000 personnes se situent sur les zones impactées. Cette estimation se base sur l'assignation d'une densité de population par type de zone. Cette fourchette de valeurs essaie de tenir compte de la variabilité de ce type de données.

Les zones à plus fort risque sont les plages les plus fréquentées de la baie, c'est-à-dire, les plages de Nice, Saint–Laurent-du-Var, Cros–de-Cagnes et la Salis d'Antibes.

La fréquentation des plages pendant la nuit est très faible ou quasi nulle. L'estimation du nombre de personnes est dans ce cas difficile. On estime que pour tout le long de la baie, quelques centaines de personnes pourraient se situer en bord de mer.

Scénario 10 janvier (Tableau 26)

Pour un scénario pendant l'après-midi d'une journée d'hiver (10 janvier) l'occupation des berges de mer serait nettement inférieure. A partir des valeurs de densité de population par commune il a été estimé qu'entre 600 et 960 personnes se situeraient à l'extérieur sur des secteurs impactés.

Nom	Commune	Risque	Population impactée 15 août - 15h	Population impactée 10 janvier - 15h
Plage et promenade des Anglais	Nice	Très fort	>1000	50-250
Plages Ouest Nice	Nice	Très fort	> 1000	50-250
Port de Carras	Nice	Modéré	10-50	<10
Parking centre commercial Cap 3000 *	St-Laurent	Modéré	<10	<10
Promenade des Flots Bleus et plage	St-Laurent	Très fort	>1000	10-50
Port de St-Laurent-du-Var	St-Laurent	Très fort	>1000	50-250
Cros de Cagnes	St-Laurent	Très fort	>1000	50-250
Cagnes - Hippodrome - Embouchure du Loup	Cagnes	Modéré	10-50	50-250
Marina Baie des Anges	Villeneuve-Loubet	Fort	250-1000	50-250
Parc de Vaugrenier	Villeneuve-Loubet	Fort	250-1000	50-250
Campings	Antibes	Fort	250-1000	50-250
Grandes plages d'Antibes	Antibes	Modéré	10-50	10-50
Port d'Antibes et vieille ville	Antibes	Très fort	>1000	50-250
Plages de la Salis et promenade	Antibes	Très fort	>1000	10-50
Plage de la Garoupe	Antibes	Modéré	<10	<10
Ports de l'Olivette et Mallet	Antibes	Modéré	<10	<10
Vieux Port de Nice	Nice	Fort	50-250	10-50

Tableau 26 : Résumé des niveaux de risque des différents secteurs de la baie de Nice impactés.

6.2.2 Personnes à l'intérieur

L'intersection entre l'estimation de la zone inondée et les bâtiments de la BD topo (bâti indifférencié) indique un nombre de 50 bâtiments impactés.

Les bâtiments les plus impactés seraient ceux qui se situent à une très basse cote topographique, cas de certains bâtiments des ports ou marinas, ainsi que des bâtiments très proches à la ligne de côte. Un cas à part est le lotissement situé à l'Ouest de l'hippodrome de Cagnes-sur-Mer, où une remontée de l'eau par le Loup pourrait inonder quelques maisons (Figure 62).

6.2.2.1Niveaux de sauvegarde

Pour la détermination des niveaux de sauvegarde des bâtiments impactés, il est nécessaire d'avoir connaissance des hauteurs d'eau et des vitesses de flux au pied des bâtiments.

Sur la base de la hauteur d'eau indiquée par Donnadieu et al. (2010), la vitesse du flux a été estimée à partir du calcul suivant : racine carré du produit entre l'hauteur d'eau et la gravité.

A partir de ces données, les calculs suivants ont été faits :

- 15 bâtiments à niveau de sauvegarde 1
- bâtiments à niveau de sauvegarde 1,5
- 29 bâtiments à niveau de sauvegarde 2

Le Tableau 27 présente les estimations du nombre de personnes pour chaque niveau de sauvegarde.

	Estimation Personnes emportées par le flot (Niveau 2)		**Estimation Nombre de décédés (ratio 4% des personnes en Niveau 2)**		**Estimation Nombre de Personnes bloquées (Niveau 1.5)**		**Estimation Nombre de Personnes à l'abri (Niveau 1)**	
	Nuit 80% occupation	Jour 45% occupation	Nuit 80% occupation	Jour 45% occupation	Nuit 80% occupation	Jour 45% occupation	Nuit 80% occupation	Jour 45% occupation
15 août	384	216	26	12	15	8	124	55
10 janvier	277	156	17	7	11	6	87	39

Tableau 27 : estimation du nombre de personnes pour chaque niveau de sauvegarde.

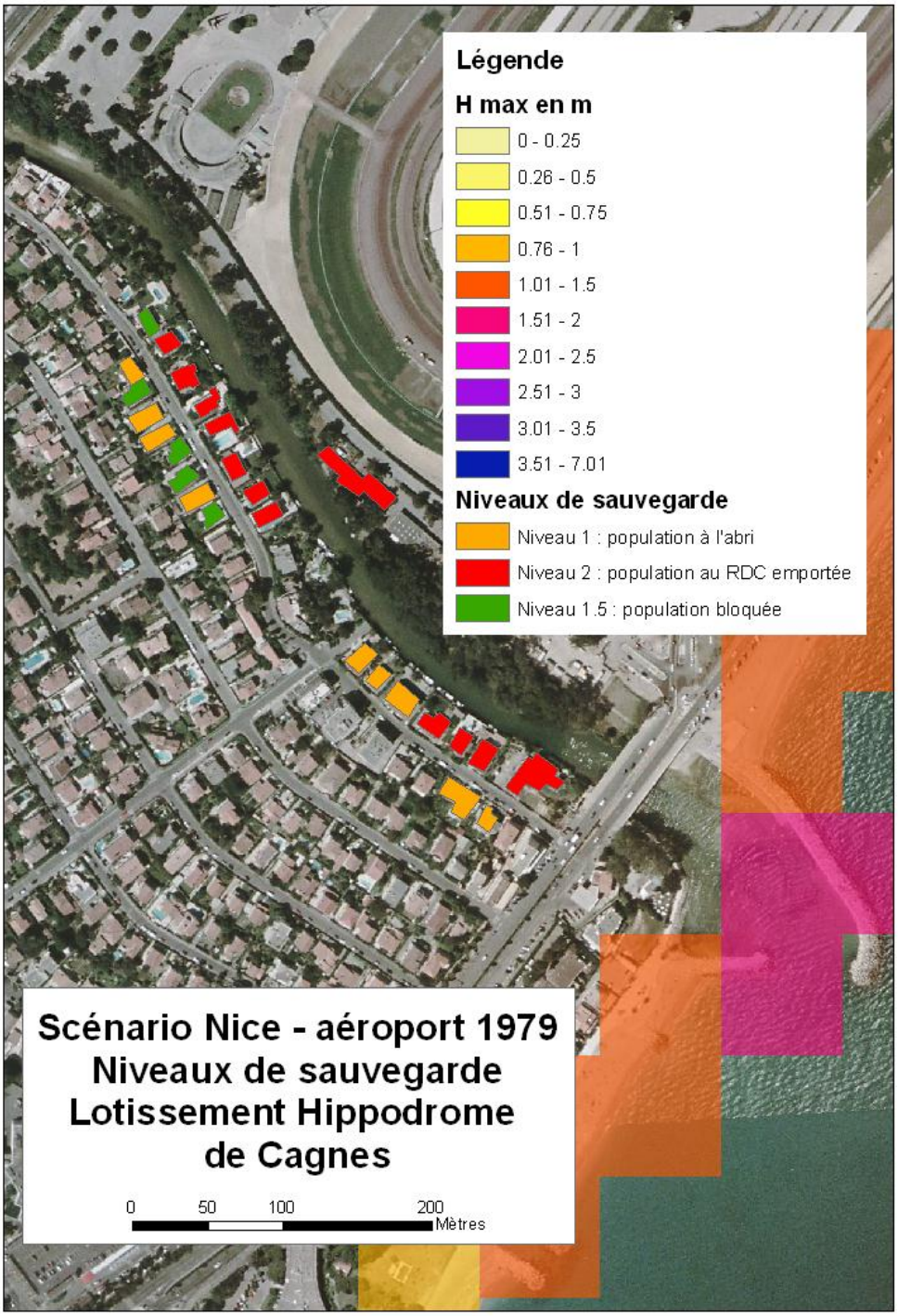


Figure 62 : Niveaux de sauvegarde de quelques maisons du lotissement au sud de l'hippodrome de Cagnes qui pourraient être inondées.

6.2.2.2Stabilité des bâtiments

Les hauteurs d'eau au pied des bâtiments atteindraient au maximum les 2 mètres. Pour des bâtiments en béton armé ou en maçonnerie plus ou moins renforcée ces hauteurs d'eau ne présentent pas un grand danger pour la stabilité structurale. Seulement des éléments très fragiles ou non structuraux pourraient présenter des forts dégâts (cas de murets de jardin, baies vitrés, etc.).

Des dégâts plus forts peuvent survenir en cas d'impact des objets lourds (cas des voitures) contre la structure du milieu bâti.

Les terrasses et autres constructions légères peuvent souffrir de dégâts graves.

6.2.3 Ports

A partir des résultats sur l'ensemble de la baie de Nice, il a été estimé une variation de la surface d'eau à l'entrée des ports. Ces variations d'eau ont été comparées avec les profondeurs des bassins, afin d'identifier les ports qui risquent de se vider.

Pour le scénario simulé de 1979, ce sont les ports de la Salis (Antibes) et Saint-Laurent-du-Var qui présentent le risque le plus fort. Le port de Saint-Laurent, vue le nombre de place, est celui qui pourrait présenter le plus grand nombre de bateaux endommagés, et par conséquent, le plus fort risque pour la population qui séjourne dans les bateaux. (

Tableau 28)

6.2.4 Campings

Les campings localisés sur la zone se situent à une cote topographique plus élevée que la côte maximale d'inondation. Néanmoins, une grande zone de camping située sur les berges de la Brague (au nord de la commune d'Antibes) pourrait présenter quelques installations inondées (propagation du flux à travers la rivière).

6.2.5 Parkings

Les parkings souterrains de la zone sont très éloignés de la zone inondée. En revanche, plusieurs zones de stationnement en surface sont impactées par le flux, surtout les zones situées au Port Vauban d'Antibes.

Ceci représente plusieurs risques. A part les risques directs, l'inondation d'un parking en surface a certains risques secondaires : blocages de routes, création d'obstacles, impact contre les infrastructures ou bâtiments, impact contre les personnes, etc.

Nom	Commune	Nb places	Prof max (m)	Prof min (m)	Δh max (m)	Niveaux d'agression avec 1) H<0,5m ; 2) H entre 0,5 et 2m ; 3) H>2m ou port vidé*	% endom.	Nb de bâteaux endom.
Port Vauban	Antibes	1800	8	2	1.5	2	15	270
La Gallice	Antibes	526	3	2	0.5	1	0	0
La Salis	Antibes	150		1.2	1	3	50	75
Port des Croutons	Antibes	390	2	1	0.5	1	0	0
Port Olivette	Antibes	45			1	2	15	7
Marina Baie des Anges	Villeneuve-Loubet	530	5	2	1.5	2	15	79
Cros de Cagnes	Cagnes-sur-Mer	40			1.5	2		
Saint-Laurent-du-Var	Saint-Laurent-du-Var	1094	4	2.2	2	3	50	547
Carras	Nice	Port à sec			1			
Vieux Port	Nice	503	8	4.5	1.5	2	15	75
La Darse	Villefranche	500	7.1	1.4	0.5	1	0	0
Vieux Port	Villefranche	36			0.5	1	0	0

Tableau 28 – Estimation des dommages dans les ports, pour un scénario de tsunami type (1979)

6.2.6 Axes de communication

■ La ligne de chemin de fer entre Antibes et Nice passe en bord de mer. En général elle se situe en élévation, sauf sur un secteur entre Antibes et Villeneuve-Loubet. D'après le MNT utilisé et le modèle à mer du CEA, ce tronçon de ligne de chemin de fer pourrait être atteint par l'inondation.

Figure 63 : image de la route du bord de mer et la ligne de chemin de fer entre Antibes et Villeneuve-Loubet

■ Le croisement entre l'inondation est les axes routiers de la BD Topo donne 279 tronçons impactés dont :

- 3 tronçons de route d'importance 2 (liaison entre départements). Il s'agit d'un point de la route de Nice entre Antibes et Villeneuve-Loubet (Figure 63).

- 66 tronçons d'importance 3 (liaison ville à ville à l'intérieur d'un département), notamment la route du bord de mer entre Antibes et Villeneuve-Loubet.

En résumé, pour les axes de communication il existe un point critique, dû à sa faible côte topographique, entre Antibes et Villeneuve-Loubet. Le reste des axes importants ne serait pas impacté.

6.2.7 Autres infrastructures

Les valeurs de hauteur maximale de la surface du plan d'eau (Donnadieu et al., 2010) indiquent une inondation possible de la piste de l'aéroport de Nice. Par contre, les installations et les terminales de l'aéroport, plus en hauteur, ne seraient pas atteintes par le flot.

6.3 Evaluation qualitative du risque sur la baie de Nice

Les résultats de simulation du CEA ont été limités à la baie de Nice, de fait l'évaluation qualitative prévue à l'échelle de la zone côtière du département de 06 s'est concentrée sur cette partie du littoral.

Cette évaluation se fait à partir de :

- la cartographie de types de côte faite dans le cadre du projet ALDES sur l'ensemble de côte méditerranéenne française (Monfort et al. 2010),
- les valeurs de surélévation maximale du plan d'eau à proximité de la côte calculées par le CEA sur la baie de Nice
- une matrice de risque (Tableau 20) définie pour l'échelle départementale.

On identifie très clairement les secteurs rocheux avec un risque nul. La zone de l'aéroport en bordure du littoral présente un risque nul à très faible au regard de la fréquentation de la population (rare ou très faible).

Pendant l'été, presque l'ensemble des plages a un risque entre modéré et fort. Les plages de Villefranche-sur-Mer, Cap-Ferrat et Golfe-Juan, plus à l'abri du tsunami, ont des risques faibles. La plage de l'embouchure du Var et la zone du Cap3000 a un risque très fort à cause de la grande surélévation d'eau attendue, Figure 64

Pendant l'hiver, il reste relativement élevé pour le Cap3000, le port de Saint Laurent et la Marina des Anges, mais bien moindre pour un grand nombre de plages. Figure 65

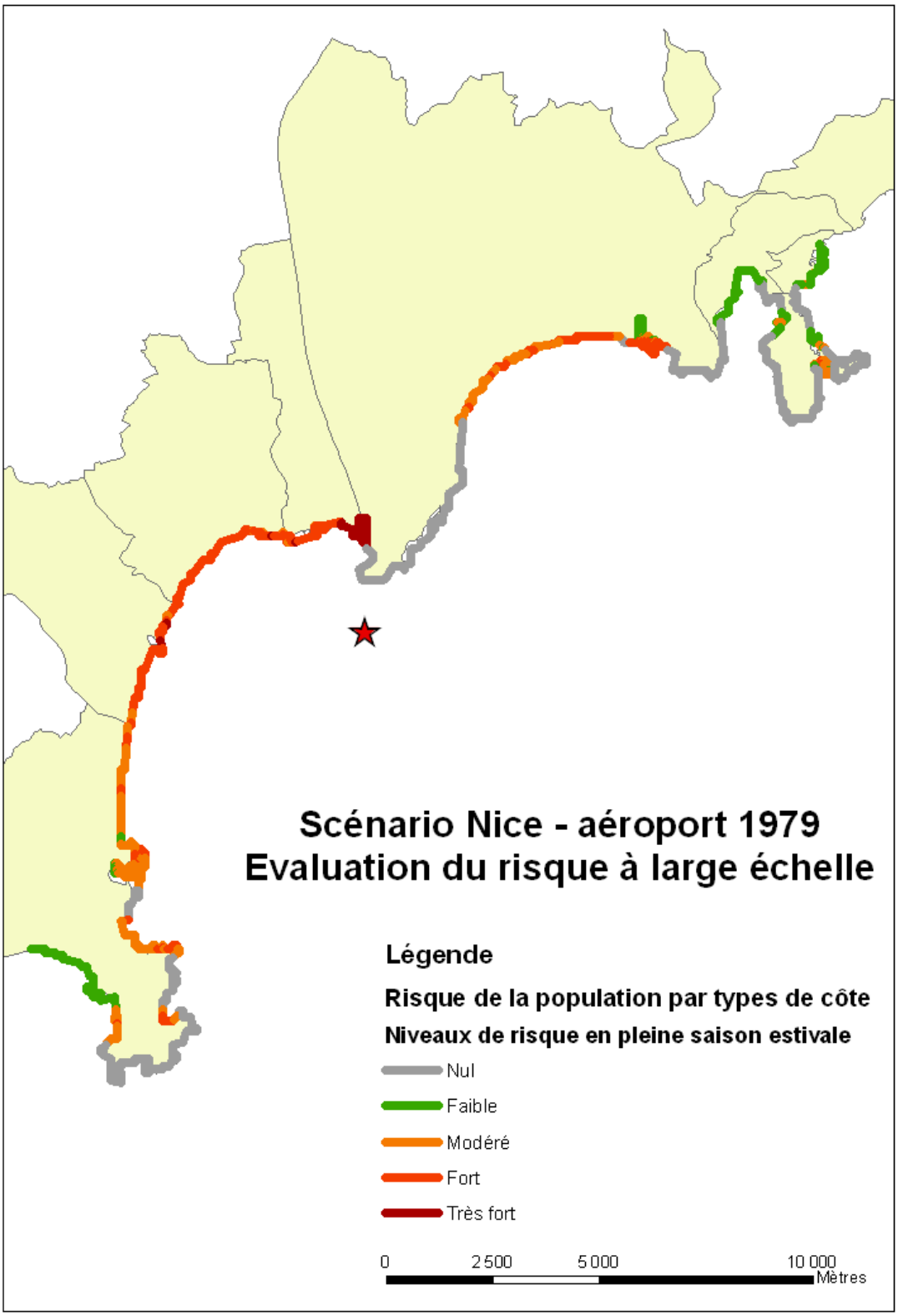


Figure 64 : Carte du risque à large échelle sur la baie de Nice. Scénario en pleine saison estivale.

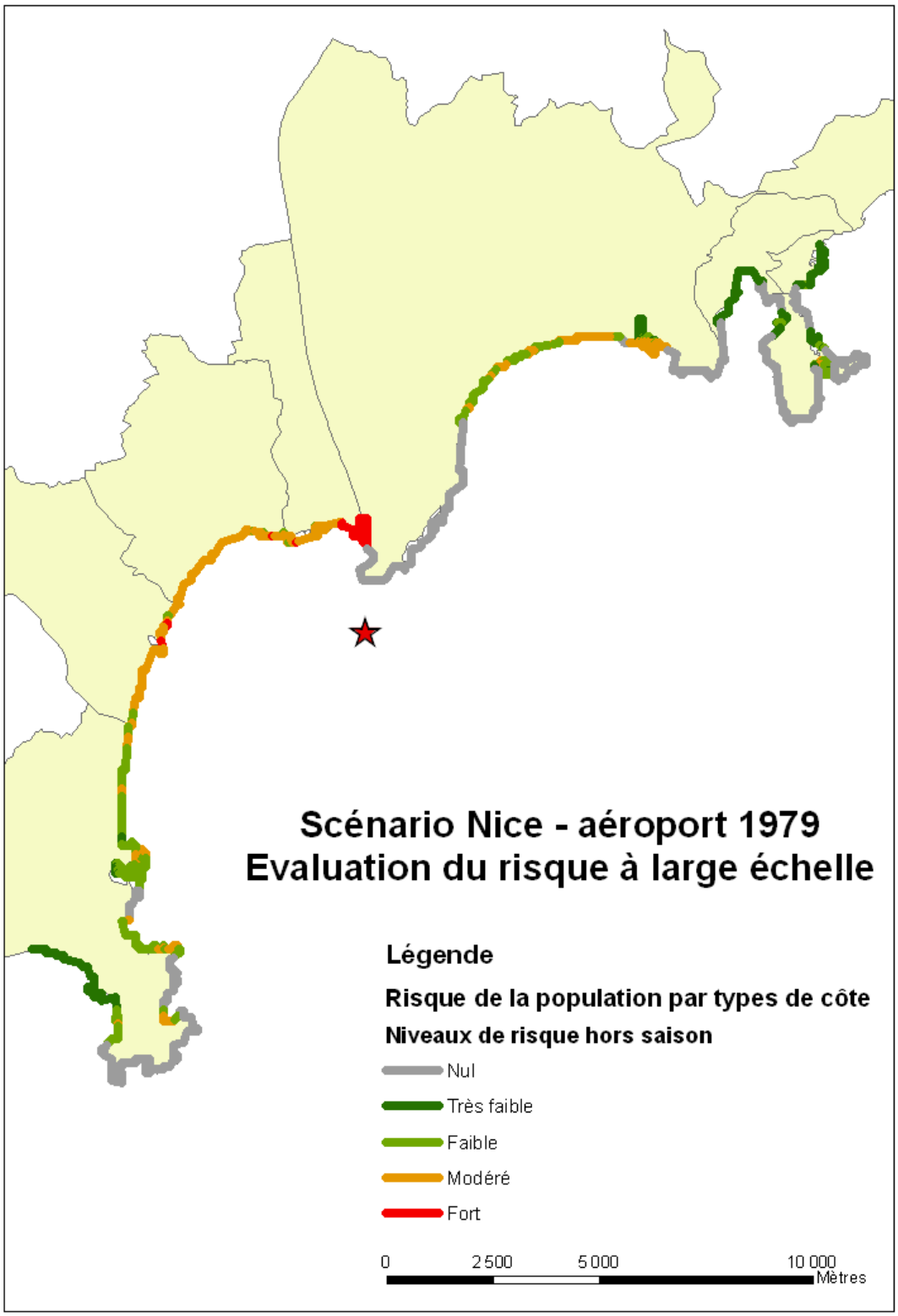


Figure 65 : Carte de risque à large échelle sur la baie de Nice. Scénario hors saison.

6.4 Discussion des résultats

■ L'estimation des préjudices humains, relatif au scénario à l'échelle du quartier de la Salis :

- pour une journée d'hiver correspond assez bien avec les observations de l'événement de 1979 : une cinquantaine de personnes impactées (c'est-à-dire situées dans la zone où il est impossible de résister à l'inondation), dont une moyenne de 4 personnes tuées.
- Un jour de 15 août, milieu d'après midi, plus de 3 000 personnes impactées, dont près de 200 tuées.

Concernant la simulation à l'échelle du quartier, sur la base des données hauteur d'eau et vitesse de l'inondation à terre, moyennant quelques ajustements par rapport au contexte local (prise en compte des infrastructures qui modifient le champs d'inondation), les résultats semblent assez cohérents avec les niveaux de dommages auxquels on pourrait s'attendre si un tel évènement se reproduisait.

■ L'estimation des préjudices humains, relatif au scénario du littoral de plusieurs communes bordant la baie de Nice, entre Villefranche-sur-Mer et Antibes, 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.

La fréquentation estivale des berges a bien évidemment des variations pendant la saison, mais on estime que la durée totale où les plages sont très fréquentées représente environ 4% sur le temps total de l'année.

Le risque hors saison est nettement moins fort, car la fréquentation des plages diminue beaucoup, mais quelques centaines de personnes pourraient être impactées. Les résultats de ce scénario sur l'ensemble de la baie donnent cependant un nombre de personnes impactées beaucoup plus élevé que lors de l'évènement d'octobre 1979. Parmi les raisons qui pourraient expliquer l'importante différence du nombre de personnes impactées par l'évènement d'octobre 1979 avec celui calculé pour le scénario d'hiver au niveau de la baie, on indique :

- Les incertitudes sur l'estimation du nombre de personnes à l'extérieur un jour d'hiver. En effet, cette estimation est encore plus difficile à faire que pour celle d'un jour d'été. La donnée de référence est la densité de population communale. Celle-ci est répartie de façon constante sur tout secteur urbain. Or en hiver, la densité de population des plages ou du bord de mer est probablement plus faible que la densité moyenne de la commune (cette incertitude est aussi valable pour les estimations faite à l'échelle du quartier).
- D'une façon générale les scénarios partent de l'hypothèse que tout le monde est impacté d'une manière soudaine et inattendue, sans tenir compte du fait qu'une partie de la population aura eu le réflexe et le temps suffisant pour se mettre à l'abri.

- Les incertitudes les ratios de fatalité (10% des personnes situées à l'extérieur, et 6% à 10% des personnes situées en RDC). Ces taux de mortalité ont été estimés à partir d'un travail épidémiologique sur le tsunami de l'océan Indien de 2004. Il manque des analyses en retour d'évènements qui permettraient une meilleure validation des taux retenus.
- Depuis 1979, l'augmentation de la population du littoral de la Côte d'Azur.
- La limite d'usage concernant la hauteur maximale de la surface de l'eau à la côte, la carte des zones impactées étant une extrapolation de ces résultats. Par exemple, on observe des différences entre les résultats du modèle fin (jusqu'à 3m d'inondation d'eau dans la Salis) et le modèle au large (0.8 à 1m pour le même secteur). L'usage de données beaucoup plus précises pour la simulation de l'évènement devrait permettre d'affiner notablement le résultat (notamment sur la hauteur d'eau à terre lors de l'inondation).

■ concernant le bâti, l'endommagement calculé pour ces constructions dépasserait rarement le degré D1 (dommages légers). Ces dommages seraient liés dans le cas d'un tsunami à l'impact très énergétique de la vague contre des éléments tels que vitres, fenêtres, murets de jardin et autres éléments non structuraux des bâtiments.

Les impacts des objets lourds (voitures, bateaux) contre des éléments de la structure des bâtiments peuvent occasionner des dégâts plus forts mais cette possibilité est difficilement quantifiable (facteur aggravant). Concernant la zone d'étude, ces objets lourds concernent plus particulièrement les voitures, en nombre très sur l'ensemble de la zone impactée.

Pour les constructions impactées par le flot, les occupants du RDC seraient en danger, avec un fort risque de blessures, mais les occupants des étages seraient à l'abri.

Un cas à part concerne celui des constructions légères, souvent installées seulement pendant la saison touristique, et qui face à une agression comme celle-là peuvent souffrir des dommages graves avec des conséquences directes pour ses occupants. L'exemple de la tempête Xynthia sur la côte atlantique en 2010 montre bien comment ces structures sont vulnérables face à ce type d'agression.

■ L'ensemble des ports de la baie ressent plus ou moins l'événement. Les ports les plus impactés sont celui-ci de La Salis (Antibes) et celui de Saint-Laurent-du-Var. Cette répartition est cohérente avec les observations de 1979.

■ Les scénarios type 1979 indiquent que les installations type parkings souterrains et campings, particulièrement vulnérables en cas d'inondation, se situent à l'abri.

■ Les axes routiers de la baie de Nice seraient en général épargnés de l'inondation, sauf quelques tronçons de la route qui longe la plage entre Antibes et Villeneuve-Loubet. Dans le même secteur la voie de chemin de fer pourrait être atteinte aussi par le flot.

7 Conclusions

7.1 Sur la pertinence de la démarche

Les études historiques indiquent que le littoral méditerranéen français a été plusieurs fois touché par des tsunamis. L'intensité de ces événements reste néanmoins relativement modérée en comparaison avec d'autres zones littorales de la Méditerranée. Même si les événements historiques recensés sur la côte française indiquent qu'un seul décès du directement à un tsunami (évènement de Nice, 1979) est à déplorer, la très forte croissance touristique d'une part et de celles des zones urbanisées le long du littoral d'autre part durant ces dernières décennies fait que le risque est aujourd'hui beaucoup plus important que dans le passé.

A la différence des pertes causées par la vibration sismique, le milieu bâti peut constituer non pas un facteur aggravant par rapport au risque encouru par la population, mais au contraire être un facteur de diminution de la vulnérabilité humaine.

L'originalité de la méthode développée dans le cadre de RATCOM concerne : 1) l'analyse du bâti en tant que facteur aggravant ou au contraire 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) la prise en considération d'évènements de tsunamis d'intensité faible à modérée.

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.

La méthode a été testée à 3 échelles : quartier, commune, département. Les résultats (informations sur les enjeux, modélisation du tsunami/carte d'inondation, constitution des matrices de vulnérabilité, évaluation des dommages) retiennent en fait deux échelles d'évaluation pertinentes par rapport à la complémentarité des résultats et à la différence d'approches méthodologiques :

- l'échelle locale, dite du quartier (de l'ordre du 1/10 000), approche quantitative,
- l'échelle pluri-communale, dite départementale (de l'ordre du 1/100 000), approche qualitative.

7.2 Sur la connaissance des enjeux

Une donnée très importante pour évaluer le risque de la population face à un tsunami est l'estimation des personnes qui se situent à l'extérieur, en bord de mer (plages et promenades). En général, sauf cas exceptionnel sur un endroit très précis, les collectivités locales ne connaissent pas de façon quantitative la fréquentation de leurs plages. L'acquisition de l'information sur la répartition de la population en fonction du lieu, de la saison, du jour, de l'heure est donc très délicate.

Concernant le littoral niçois, ces évaluations ont pu être faites sur la base de recensements INSEE relatifs à la population résidente et de comptages sur la fréquentation touristique réalisés par le Comité régional du tourisme. En parallèle, à partir d'une étude de cas (plage des Ponchettes), des densités moyennes de fréquentation des plages en fonction de leur éloignement du centre urbain et selon la saison ont été calculées. Les résultats obtenus sont cohérents uniquement pour les communes qui disposent d'une superficie importante de plages avec une fréquentation élevée.

Il conviendrait d'étayer les densités moyennes de fréquentation en fonction de la zone côtière (distance par rapport au centre urbain, saison, jour, heure) par d'autres études de comptage. L'objectif serait de disposer à moyen terme d'un indice de fréquentation (densité) par type de secteurs côtiers, avec pondération ou typologie spécifique pour chaque région touristique (Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon, Bretagne, etc.).

En comparaison avec les informations sur la population, la collecte des informations sur les ports, les bâtiments, les réseaux est relativement aisée, car ces données 1) sont accessibles soit par base de données existantes type BD Topo, soit par interprétation photo aériennes, et 2) ne fluctuent pas dans le temps.

7.3 Sur les résultats d'évaluation des dommages et préjudices au niveau de la zone pilote

L'application de cette méthode d'évaluation du risque à un scénario évènementiel comme celui de Nice-aéroport 1979 permet le constat suivant :

- Le risque pour la population se situant sur les plages peut-être très élevé. 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 impactés 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.

- D'un point de vue général, concernant la zone d'étude, les autres enjeux vulnérables comme les campings et les parkings souterrains se situent à une hauteur suffisante pour être épargnés de l'agression.

- 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. Ainsi, l'extrapolation de la hauteur maximale du plan d'eau à la côte pour délimiter les zones inondées a montré ses limites par rapport aux estimations de dommages (alors généralement surestimés).

- Les évaluations qualitatives du risque à l'échelle départementale présentent l'avantage de la simplicité du calcul de l'aléa et du traitement de la vulnérabilité. Néanmoins, il est nécessaire de disposer de plus de résultats sur des sites locaux (échelle du quartier) pour pouvoir valider la démarche empirique retenue.

7.4 Sur l'estimation des incertitudes

Outre le fait que pour assurer une meilleure fiabilité des simulations des dommages, il apparaît la nécessité de disposer de simulation du tsunami réalisé avec un MNT suffisant précis dans la bande côtière entre -10 m et +10 m, comme le montre l'exemple décrit sur la quartier de la Salis, encore faut-il avoir aussi intégré les ouvrages en bord de mer ou sur la côte (digues, murs, constructions, etc.) susceptibles de modifier les paramètres de l'inondation.

Toutefois les incertitudes sur les estimations des dommages et préjudices humains ne dépendent pas que de cette seule composante altimétrique, on peut ainsi citer :

- Les limites des modèles utilisés pour la simulation du phénomène tsunami : il manque l'indication sur les marges d'erreur des valeurs hauteur et vitesse calculées.
- Les estimations de la répartition de la population : il n'y a pas d'écarts-type correspondant aux valeurs données, les marges d'erreur sont pourtant élevées,

- L'analyse en retour sur plusieurs évènements permettrait de mieux caler les matrices ou courbes d'endommagement utilisées, et les écarts-type correspondant.

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.

L'application à l'échelle locale sur le quartier de la Salis est cohérent avec l'évènement d'octobre 1979, et les résultats pour un scénario qui se produirait au pic de fréquentation touristique semble plausible. Par contre, les résultats obtenus à plus petite échelle apparaissent a priori surestimés, mais on ne peut pas donner pour autant de fourchette d'incertitude (absence d'informations sur les incertitudes de différents facteurs ou échantillon de référence insuffisant).

Ce manque d'information sur l'incertitude des courbes d'endommagement et des résultats est relevé aussi pour les autres méthodes aujourd'hui publiées.

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.

7.5 Applications

La méthode d'évaluation de risque tsunami développée dans le cadre du projet RATCOM est adaptée à un contexte socio-économique comme celui-ci de la côte d'Azur et d'une grande partie du littoral méditerranéen en général, caractérisée par une urbanisation et une pression touristique. Elle a été conçue de façon à prendre en considération des intensités de tsunami entre faibles et modérées.

A l'échelle locale, le risque est quantifié. Les résultats obtenus peuvent être exploités pour la prise en compte du risque de tsunami dans les documents d'urbanisme, comme outil d'aide à la préparation de crise, et la mise en place de plans de secours.

A l'échelle départementale, les résultats sont d'ordre qualitatif. Ils permettent de localiser des secteurs à risque et hiérarchiser les actions prioritaires à entreprendre concernant la gestion du risque aux tsunamis à plus grande échelle.

La méthode développée est aujourd'hui appliquée dans le cadre du projet ALDES (Système d'Alerte descendante pour les tsunamis en Méditerranée) : 1) à l'échelle locale, sur 3 secteurs de la façade méditerranéenne française, 2) à l'échelle départementale, sur l'ensemble du littoral français méditerranéen.

8 Bibliographie

Coburn A. et Spence R. (2002). *Earthquake protection*. 2ème edition, Ed. Wiley.

Dall'Osso, F.; Cavalletti, A.; Polo, P. (2006). Risk assessment and evaluation ArcGIS® toolbox: user's manual - coastal risk analysis of tsunamis and environmental remediation. ADPC – Italy government.

Dominey-Howes D.; Dunbar P.; Varner J; et Papathoma M. (2008). Estimating probable maximum loss from a Cascadia tsunami. *Natural hazards*.

Dominey-Howes D.; Papathoma M. (2006). Validating a Tsunami Vulnerability Assessment Model (the PTVA Model) Using Field Data from the 2004 Indian Ocean Tsunami. *Natural Hazards* (2007) 40:113–136.

Dunbar P. et Weaver C. (2008). *U.S. States and Territories National Tsunami Hazard Assessment: Historical Record and Sources for Waves*. National Oceanic and Atmospheric Administration et U.S. Geological Survey.

EEFIT (Earthquake Engineering Field Investigation Team), 2005. The 26 December 2004 Indian Ocean Tsunami: A Preliminary Reconnaisance Report. (www.eefit.org.uk).

Garcin M., Prame B;, Attanayake N., De Silva U., Desprats J.F., Fernando S., Fontaine M., Idier D., Lenotre N., Pedreros R. et Siriwardana C. (2007). Geographic Information Systems for Coastal Hazards – Application to a pilot zone in Sri Lanka. Rapport BRGM 55553.

Geosciences Consultants (2007). Deliverable D1.1 State of the art. Projet SCHEMA.

Geosciences Consultants (2009). Deliverable D1.3 Lessons learnt from Asia test sites. Projet SCHEMA.

Guillande R.; Valencia N. et 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.

Hérivaux C., Maton L., Berthelier E., Rey-Valette H. (2009). Point d'avancement sur l'inventaire des enjeux et l'évaluation des dommages (sous-tâches 4.2 et 4.3). Document de travail.

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*. Thèse, Université de Cambridge.

Koshimura S., (2007). Tsunami vulnerability assessment for the city of Banda Aceh using the tsunami numerical model and the post-tsunami survey data. Proceedings of the IUGG XXIV General Assembly, Perugia (Italy), July 2-13.

Koshimura S., Katada T., Mofield H.O. et Kawata Y. (2006) - A method for estimating casualties due to the tsunami inundation flow. *Nat Hazards* (2006) 39:265–274.

La Vanguardia, exemplaire du 23-05-2003, pages 36-37. http://www.lavanguardia.es/hemeroteca/

Lambert J. (2008). BD Inventaire historique des tsunamis en France. Année 2008. Rapport final BRM/RP 56696.

Lammel G, Grether D. et Nagel K. (2009). The representation and implementation of time-dependent inundation in large-scale microscopic evacuation simulations. Transportation Research C.

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 Tsunarisque (2005-2006) program*.

Meinesz A., Javel F., Longepierre S., Vaugelas J. de, Garcia D., 2006 : «Inventaire et impact des aménagements gagnés sur le domaine marin - côtes méditerranéennes françaises », donnée issue du Laboratoire Environnement Marin Littoral, Université de Nice-Sophia Antipolis (Publication électronique : www.medam.org).

Morrison J.R., O'Brien M.P., Johnson J.W., Schaaf S.A. (1950) The Force Exerted by Surface Waves on Piles. Petroleum Transaction. Vol.. (189), 1950, 149-157

Omira R.; Baptista M.A.; Miranda J.M.; Toto E.; Catita C. et Catalao J. (2008). Tsunami vulnerability assessment of Casablanca-Morocco using numerical modelling and GIS tools. *Natural hazards*.

Papadopoulos G.A.; Daskalaki E.; Fokaefs A. et Giraleas N. (2007). Tsunami hazards in the Eastern Mediterranean: strong earthquakes and tsunamis in the East Hellenic Arc and Trench system. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 7, 57–64.

Papadopoulos G.A. (2003). Tsunami Hazard in the Eastern Mediterranean: Strong Earthquakes and Tsunamis in the Corinth Gulf, Central Greece. *Natural Hazards* 29: 437–464.

Papathoma M., Dominey-Howes (2003). Tsunami vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning,

Gulf of Corinth, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (2003) 3: 733-747.

Papathoma M., Dominey-Howes D., Zong Y. et Smith D. (2003) - Assessing tsunami vulnerability, an example from Herakleio, Crete. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (2003) 3: 377–389

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.

Pelinovsky E.; Zahibo N.; Dunkley P.; Edmonds M.; Herd R.; Talipova T.; Kozelkov A. et Nikolkina I. (2004). Tsunami generated by the volcano eruption on july 12-13,2003, at Montserrat, les Antilles. *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 22, No. 1, page 25 (2004)

Proenza B. (2006). Tsunami, el peligro olvidado, the forgotten danger. A Risk-to-Life Assessment: The Very High Caribbean Risk. Présentation journées UNESCO IOC/ICG Caribbean Tsunamis San Juan, Puerto Rico, 11/29-30/06.

Rabinovich A. et Montserrat S. (1998). Generation of Meteorological Tsunamis (Large Amplitude Seiches) Near the Balearic and Kuril Islands. *Natural hazards*, 18, 25-55.

Robert S., Sillère G. et 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

Saatcioglu M. (2009). Performance of structures during 2004 Indian Ocean tsunami and tsunami induced forces to structural design. *Earthquakes and tsunamis, Geotechnical, geological and earthquake engineering* 11 (2009).

Sahal A., Roger J, Allgeyer S., Lemaire B., Hébert H., Schindele F. et Lavigne F. (2009). The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerd`es-Zemmouri (Algeria) earthquake: field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1823-1834.

Sahal A., Lemahieu A. (2010). The 1979 nice airport tsunami : mapping of the flood in Antibes. *Nat hazards*.

Sugimoto T., Murakami H., Kozuki Y. Niskikawa K et Shimada T. (2003). A Human Damage Prediction Method for Tsunami Disasters Incorporating Evacuation Activities. *Natural Hazards* 29: 585–600.

Tinti. S., Maramai A., et Graziani L. (2003). The catalogue of the Italian tsunamis. *Natural hazards* 33: 439–465.

Yang F., Barral J., Prevost T., Laligrand P ;, Massart N, Schmitt V. et 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.

Zahibo N. ; Pelinovsky E., Okal E., Yalçiner A., Kharif C. ; Talipova T. ; Kozelkov A. (2005). The earthquake and tsunami of november 21 2004 at Les Saintes, Guadeloupe, Lesser Antilles. *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 23, No. 1, page 25 (2005)

Sites Internet

Base de données des tsunamis en France : http://www.tsunamis.fr

Site de l'association de citoyens Laurentins (St Laurent du Var) : http://www.lamouettelaurentine.net/st_laurent_du_var/port/tsunami.htm

Sites web sur les seiches dans les îles Baléares : http://www.imedea.uib.es/natural/goi/oceanography/html/research/Projects/WEB_rissagues/Rissagues/principal.htm

http://www.meteored.com/ram/1051/la-rissaga/

Hémérothèques en ligne des journaux Menorca.info, La Vanguardia et Diari de Balears.

Laurenti, A. (2009). Site web Azurseisme : http://www.azurseisme.com

Annexe 1

Estimation de volumes de touristes susceptibles d'être présents sur le bord de mer

POPULATION TOURISTIQUE AM / SOURCE METHODE FLUX

		+10% exc	+10% transit	-absences		ratio
10-janv	45000	4 500	4 500	2 250	**51 750**	1
15-août	605000	60 500	60 500	30 250	**695 750**	1

ESTIMATION POPULATION TOURISTIQUE PRESENTE SUR LA ZONE D'ETUDE / SOURCE VISAVION

séjours avion	moy annuelle	zone d'étude	77 000	173 000
	part avion		26	21
	séjours tous modes		296 154	823 810
	durée séjours avion		7.8	12.1
	durée séjours tous modes		5.5	9.0
	total nuitées mois		1 628 846	7 414 286
	% nuitées mois/jour		36 780	334 839
	AJOUT exc/transit 15%		**42 297**	**385 065**

avion		janvier			aout		
heb marchand		séjours	nuitées	dms	séjours	nuitées	dms
Code INSEE	Communes	Moy 92-08			Moy 92-08		
121	SAINT JEAN CAP FERRAT	205	585	3	1 445	16 449	11
159	VILLEFRANCHE SUR MER	340	3 100	9	1 125	11 878	11
088	NICE	19 691	98 118	5	46 430	365 403	8
123	SAINT LAURENT DU VAR	469	1 748	4	799	5 111	6
027	CAGNES SUR MER	430	3 334	8	1 020	16 160	16
161	VILLENEUVE LOUBET	333	2 441	7	963	8 378	9
004	ANTIBES - JUAN-LES-PINS	2 105	15 856	8	10 934	141 937	13
155	VALLAURIS - GOLFE JUAN	125	873	7	425	5 237	12
029	CANNES	13 231	61 781	5	18 025	171 380	10
079	MANDELIEU LA NAPOULE	1 018	4 056	4	2 722	28 712	11
138	THEOULE SUR MER	22	67	3	89	742	8

avion		janvier			aout		
heb non marchand		séjours	nuitées	dms	séjours	nuitées	dms
Code INSEE	Communes	Moy 92-08			Moy 92-08		
121	SAINT JEAN CAP FERRAT	537	3 770	7	1 524	20 450	13
159	VILLEFRANCHE SUR MER	748	10 829	14	1 856	25 311	14
088	NICE	19 205	197 609	10	33 253	457 336	14
123	SAINT LAURENT DU VAR	570	5 008	9	1 449	18 930	13
027	CAGNES SUR MER	1 694	19 689	12	4 137	59 115	14
161	VILLENEUVE LOUBET	618	5 896	10	2 201	40 093	18
004	ANTIBES - JUAN-LES-PINS	5 569	54 202	10	18 144	265 822	15
155	VALLAURIS - GOLFE JUAN	257	6 922	27	1 777	33 472	19
029	CANNES	8 345	91 593	11	19 968	330 098	17
079	MANDELIEU LA NAPOULE	885	7 982	9	3 454	55 462	16
138	THEOULE SUR MER	817	7 362	9	858	10 876	13

avion		janvier			aout		
total héb		séjours	nuitées	dms	séjours	nuitées	dms
Code INSEE	Communes	Moy 92-08			Moy 92-08		
121	SAINT JEAN CAP FERRAT	742	4 355	6	2 969	36 899	12
159	VILLEFRANCHE SUR MER	1 088	13 929	13	2 982	37 189	12
088	NICE	38 895	295 727	8	79 682	822 739	10
123	SAINT LAURENT DU VAR	1 039	6 756	7	2 248	24 041	11
027	CAGNES SUR MER	2 124	23 022	11	5 157	75 275	15
161	VILLENEUVE LOUBET	951	8 337	9	3 164	48 471	15
004	ANTIBES - JUAN-LES-PINS	7 673	70 058	9	29 079	407 759	14
155	VALLAURIS - GOLFE JUAN	382	7 796	20	2 202	38 709	18
029	CANNES	21 576	153 374	7	37 993	501 478	13
079	MANDELIEU LA NAPOULE	1 903	12 038	6	6 176	84 174	14
138	THEOULE SUR MER	839	7 429	9	947	11 618	12

taux avion estimé							
121	SAINT JEAN CAP FERRAT	25%	25%		20%	20%	
159	VILLEFRANCHE SUR MER	25%	25%		20%	20%	
088	NICE	30%	30%		30%	30%	
123	SAINT LAURENT DU VAR	30%	30%		25%	25%	
027	CAGNES SUR MER	30%	30%		25%	25%	
161	VILLENEUVE LOUBET	30%	30%		25%	25%	
004	ANTIBES - JUAN-LES-PINS	25%	25%		20%	20%	
155	VALLAURIS - GOLFE JUAN	25%	25%		20%	20%	
029	CANNES	30%	30%		25%	25%	
079	MANDELIEU LA NAPOULE	25%	25%		20%	20%	
138	THEOULE SUR MER	25%	25%		20%	20%	

		janvier			aout		
total fréquentation tous transports		séjours	nuitées	dms	séjours	nuitées	dms
121	SAINT JEAN CAP FERRAT	2 968	17 421	6	14 847	184 495	12
159	VILLEFRANCHE SUR MER	4 353	55 718	13	14 908	185 945	12
088	NICE	129 651	985 757	8	265 608	2 742 463	10
123	SAINT LAURENT DU VAR	3 464	22 521	7	8 994	96 166	11
027	CAGNES SUR MER	7 079	76 741	11	20 628	301 099	15
161	VILLENEUVE LOUBET	3 170	27 789	9	12 655	193 882	15
004	ANTIBES - JUAN-LES-PINS	30 693	280 231	9	145 393	2 038 796	14
155	VALLAURIS - GOLFE JUAN	1 529	31 182	20	11 011	193 544	18
029	CANNES	71 919	511 248	7	151 974	2 005 911	13
079	MANDELIEU LA NAPOULE	7 613	48 154	6	30 881	420 872	14
138	THEOULE SUR MER	3 358	29 715	9	4 737	58 089	12

estim pop jour sur les communes d'hébergement de la zc		10-janv.		15 aout	
121	SAINT JEAN CAP FERRAT	393		8 332	
159	VILLEFRANCHE SUR MER	1 258		8 398	
088	NICE	22 259		123 853	
123	SAINT LAURENT DU VAR	509		4 343	
027	CAGNES SUR MER	1 733		13 598	
161	VILLENEUVE LOUBET	627		8 756	
004	ANTIBES - JUAN-LES-PINS	6 328		92 075	
155	VALLAURIS - GOLFE JUAN	704		8 741	
029	CANNES	11 544		90 590	
079	MANDELIEU LA NAPOULE	1 087		19 007	
138	THEOULE SUR MER	671		2 623	

A partir du volume de nuitées mensuelles totales, on estime par un ratio la variation quotidienne de ce volume. Pour le 10 janvier, on considère que le point bas représente 70% de la moyenne journalière du mois, pour le 15 août on considère que le point haut représente 140% de la moyenne journalière du mois.

		10-janv.		15 aout	
% 1ère ligne sur ces communes		4h am	15h pm	4h am	15h pm
121	SAINT JEAN CAP FERRAT	0.15	0.09	0.15	0.11
159	VILLEFRANCHE SUR MER	0.20	0.12	0.20	0.15
088	NICE	0.10	0.06	0.10	0.08
123	SAINT LAURENT DU VAR	0.20	0.12	0.20	0.15
027	CAGNES SUR MER	0.10	0.06	0.15	0.11
161	VILLENEUVE LOUBET	0.35	0.21	0.40	0.30
004	ANTIBES - JUAN-LES-PINS	0.10	0.06	0.10	0.08
155	VALLAURIS - GOLFE JUAN	0.15	0.09	0.20	0.15
029	CANNES	0.20	0.12	0.20	0.15
079	MANDELIEU LA NAPOULE	0.20	0.12	0.25	0.19
138	THEOULE SUR MER	0.30	0.18	0.30	0.23

On estime la part du flux de fréquentation journalier concentré sur la 1re ligne de bâti et les plages et ports. L'approche reste très approximative et repose notamment sur la densité des hébergements touristiques en bord de mer, variable selon les communes, et qu'il faudra confronter à l'estimation de population par l'offre. Pour le 10 janvier, il s'agit quasi exclusivement du volume de touristes passant la nuit dans les hébergements en 1ère ligne ou les bateaux pour le matin, à quoi s'ajoutent l'après-midi le flux de passage excursionnistes et en transit (+15%). Mais l'après midi on ne prend qu'une partie des touristes hébergés en 1re ligne, les autres pouvant être ailleurs dans l'intérieur des terres.

		10-janv.		15 aout	
volume touristes 1ère ligne sur ces communes		4h am	15h pm	4h am	15h pm
121	SAINT JEAN CAP FERRAT	59	41	1 250	1 078
159	VILLEFRANCHE SUR MER	252	174	1 680	1 449
088	NICE	2 226	1 536	12 385	10 682
123	SAINT LAURENT DU VAR	102	70	869	749
027	CAGNES SUR MER	173	120	2 040	1 759
161	VILLENEUVE LOUBET	220	152	3 502	3 021
004	ANTIBES - JUAN-LES-PINS	633	437	9 207	7 941
155	VALLAURIS - GOLFE JUAN	106	73	1 748	1 508
029	CANNES	2 309	1 593	18 118	15 627
079	MANDELIEU LA NAPOULE	217	150	4 752	4 098
138	THEOULE SUR MER	201	139	787	679
	total	6 497	4 483	56 338	48 591

		10-janv.		15 aout		
autres touristes présents		4h am	15h pm	4h am	15h pm	
poptour totale 06		51 750	51 750	695 750	695 750	
pop tour 06 hors zone étude 1re ligne		45 253	45 253	639 412	639 412	
pop tour 06 hors zone étude 1re ligne mais présent sur bord de mer		905	9 051	19 182	191 824	
répartition de ce volume présent sur bord de mer						
121	SAINT JEAN CAP FERRAT	27	272	575	5 755	En plus du volume de touristes hébergés sur les communes concernés, un certain nombre de touristes hébergés ailleurs peuvent se trouver sur le bord de mer. Ce taux varie selon la saison et l'heure, et vient s'additionner à la population touristique déjà estimée précédemment.
159	VILLEFRANCHE SUR MER	27	272	575	5 755	
088	NICE	172	1 720	3 645	36 447	
123	SAINT LAURENT DU VAR	45	453	959	9 591	
027	CAGNES SUR MER	72	724	1 535	15 346	
161	VILLENEUVE LOUBET	72	724	1 535	15 346	
004	ANTIBES - JUAN-LES-PINS	163	1 629	3 453	34 528	
155	VALLAURIS - GOLFE JUAN	72	724	1 535	15 346	
029	CANNES	163	1 629	3 453	34 528	
079	MANDELIEU LA NAPOULE	72	724	1 535	15 346	
138	THEOULE SUR MER	18	181	384	3 836	
	verif	905	9 051	19 182	191 824	

POPULATION TOURISTIQUE TOTALE		10-janv.		15 aout	
		4h am	15h pm	4h am	15h pm
121	SAINT JEAN CAP FERRAT	86	312	1 825	6 833
159	VILLEFRANCHE SUR MER	279	445	2 255	7 203
088	NICE	2 398	3 255	16 030	47 129
123	SAINT LAURENT DU VAR	147	523	1 828	10 340
027	CAGNES SUR MER	246	844	3 574	17 105
161	VILLENEUVE LOUBET	292	876	5 037	18 367
004	ANTIBES - JUAN-LES-PINS	796	2 066	12 660	42 470
155	VALLAURIS - GOLFE JUAN	178	797	3 283	16 854
029	CANNES	2 472	3 222	21 571	50 155
079	MANDELIEU LA NAPOULE	290	874	6 286	19 444
138	THEOULE SUR MER	219	320	1 171	4 515
	TOTAL ZONE	7 402	13 534	75 520	240 415

Annexe 2

Tableau des données collectées auprès des ports de la Riviera Française

ID	Nature	INSEE	Commune	Nom	Gestion CCI CG06						Gestion Commune - Privée					
					Places	Occupation Eté	Occupation hiver	Longueur min bateaux	Longueur max bateaux	Coordonnées Gestionnaire	Places	Occupation Eté	Occupation hiver	Longueur min bateaux	Longueur max bateaux	Coordonnées Gestionnaire
1	Données portuaires	06138	Théoules sur mer	La Galère							174 à 185	100%	50 % (mise hors eau des bateau pdt hiver : oct à avril)	?	?	Gestion privée capitainerie Port la Galère Cité Marine de Port La Galère 06590 Théoule Tel 04 93 75 41 74 Fax 04 93 75 08 74
2				Port de Théoules							180	?	?	?	13 m	Gestion communale, Mairie, Service Maritime M. Bordereau Tel 04 92 97 47 77
3				Port de la Figueirette							250 dont 40 visiteurs	?	?	?	?	Gestion communale, Mairie, Service Maritime M. Bordereau Tel 04 92 97 47 77
4		06004	Antibes	Port VAUBAN							1800	100%	100%	Majeure partie entre 20 et 25 m ; une douzaine de 30 m et le reste bateau de petite plaisance entre 7 et 15 m		M. Paoli Concession privée Bureau du Port SAEM de gestion Port Vauban 06600 Antibes Tel 04 92 91 60 00 Fax 04 92 93 74 44
5				Port Gallice							526 dont 171 visiteurs	100%	75%	4 postes entre 7 et 30 m, 15 postes entre 6 et 24 m, 15 postes entre 15 et 18 m, 80 postes de 12 m et le reste entre 5 et 11 m		Privé, Capitainerie Pointe du Crouton Bd Baudoin 06160 Juan les Pins Tel 04 92 93 74 40 Fax 04 92 93 74 44
6				Port de la Salis							150	100%	100%		10 m	Geré association Services Maritimes mairie d'Antibes M. De La Myre Maury 04 92 90 53 70
7				Port des Croutons							?	100%	100%		7 m	Geré association Services Maritimes mairie d'Antibes M. De La Myre Maury Tel 04 92 90 53 70
8		06027	Cagnes-sur-mer	Port du Cros de Cagnes							40					Gestion CANCA M. Volat Service Activités Portuaire 04 89 98 16 31 jeanfrancois.volat@nicecotedazur.org
9		06121	Saint-Jean-Cap-Ferrat								536					
10		06088	Nice carras													
11		06123	St Laurent du Var	Port Saint Laurent							1094 postes d'amarrage dont 256 publics	100%	100%	6	23	
12		06029	Cannes	Port de Cannes	720 places dont 216 visiteurs					gestion CCI (cf M. Dolidon)						
13				Port Pierre Canto							650					Port communal mais données à la Capitainerie La Croisette 06400 Cannes Tel 04 92 18 84 84 Fax 04 93 94 66 18
14				Port Abri du Béal							456 places (maritimes 122, fluvial 234, à sec 100) hangar à bateau sur 2 étages (54 bateaux)	100%	50%	5 m	9 m	Public géré par aeroport Capitainerie Aéroport de Cannes Mandelieu 06150 Cannes La Bocca Tel 04 93 90 40 44 Fax 04 93 90 40 45

ID	Nature	INSEE	Commune	Nom	Gestion CCI CG06						Gestion Commune - Privée					
					Places	Occupation Eté	Occupation hiver	Longueur min bateaux	Longueur max bateaux	Coordonnées Gestionnaire	Places	Occupation Eté	Occupation hiver	Longueur min bateaux	Longueur max bateaux	Coordonnées Gestionnaire
15	Données portuaires	06155	Vallauris	Golfe Juan Port Camille Rayon							860 places dont 30% visiteurs					gestion communale capitainerie quai Napoléon Golfe juan 06220 Vallauris M. Patrick Lara (Commandant Port Capitainerie) 04 93 63 30 30
16				Vieux Port Golfe Juan	844 places à quai ou sur pontons dont 81 postes publics	100%	760 à 780 bateaux (annuel de 90 à 100%)	4 m	34 m	gestion CCI (cf M. Dolidon						
17		06079	Mandelieu	Port de la Rague							424	100%	75%	3 m	40 m (1 poste à 40 m)	Port privé - SEPR Port de Plaisance de la Rague, Capitainerie BP 915 06210 Mandelieu la Napoule Tel 04 93 49 81 55 Fax 04 93 49 83 99
18				Port La Napoule							960 places sur pontons fixes dont 200 visiteurs					Port privé : Port de la Napoule YCI de Mandelieu-la-Napoule BP923 06210 La Napoule Plage Tel 04 92 97 77 77 Fax 04 92 97 78 78. M. Contencin Directeur du Port
19				Port de Cannes-Marina							1769 places à quai et sur pontons, pas de places visiteurs	100%	100%	12 m	30 m (6 postes pour bateaux de 2x30 m)	Port (?) Capitainerie 15 allée Calypso Port Cannes-marina 06210 Mandelieu Tel 04 93 49 51 27 Fax 04 93 49 16 50
22		06161	Villeneuve-Loubet	Marina Baie des Anges							530 places			6 m	35 m	Port Privé : Capitainerie BP 185 06272 Villeneuve Loubet cedex Tel 04 92 13 32 22/23 Fax 04 93 20 45 39
23		06088	Nice	Port de Plaisance	503	100%	100%			Tel le 19/06 : Port de Plaisance de Nice CCI Nice Côte d'Azur quai du commerce 06300 Nice Tel 04 92 00 42 14 Fax 04 92 00 42 90- Port tjs plein						
24		06159	Vilelfranche-sur-mer	Port de Villefranche-Darse	500-530	100%	99%	0	32 m	Tel le 19/06 : Capitainerie Port de la Darse 06230 Villefranche sur Mer Tel 04 93 01 78 05 / 70 70 Fax 04 93 76 92 33						

Annexe 3

Tableau récapitulatif des données bathymétriques collectées sur les ports

ID	Nature	INSEE	Commune	Nom	Plans/Bathymetrie	Profondeur moyenne du port (= hauteur d'eau moyenne au milieu du port)	Format du document				
							Numérique (.pdf, .doc…)	Papier (valeurs ponctuelles moyennes)	Géoréférencé	Courbes	Cotes
1	Données portuaires	06138	Théoules sur mer	La Galère	-	Dans le début du chenal il y a 3 m, le port est divisé en 2 parties, une partie de faible profondeur avec pas plus de 1,80 m et une partie de forte profondeur avec 3-4 m, et en bord de quai il y a environ 2,20 m d'eau.		x			
2				Port de Théoules	Port de Théoules sur Mer (donnée bloc marine).pdf	Donné batymétrique sous format PDF extrait du bloc marine	x				x
3				Port de la Figueirette	Port la figuerette (donnée bloc marine).pdf	Données batymétriques sous format PDF extrait du bloc marine	x				x
4		06004	Antibes	Port VAUBAN	MRIS_XYZ_Port Vauban_Antibes_271005_LIII_CM_1x1.xyz	-			x		x
5				Port Gallice	-	-					
6				Port de la Salis	-	1,20 m à 1,30 m dans le port en moyenne		x			
7				Port des Croutons	-	1,50 m à 1,60 m dans tous le port et la		x			
8		06027	Cagnes-sur-mer	Port du Cros de Cagnes	-	Passe d'entrée à 2,50 m de profondeur, moyenne de 2 m et environ 1,50 m en bord de cote		x			
9		06121	Saint-Jean-Cap-Ferrat		CB_St_Jean_Cap_Ferrat_020606 A0.pdf	Données batymétriques sous format PDF	x			x	x
10		06088	Nice carras		-	Environ 1 m de profondeur partout		x			
11		06123	St Laurent du Var	Port Saint Laurent	-	A l'entré du port environ 3 m et à l'intérieur du port 4 à 5 m mais ensablement régulier du port		x			
12		06029	Cannes	Port de Cannes	Plan_Port_Cannes.jpg	Plan du port, aucune valeur de	x				
13				Port Pierre Canto	Port Pierre Canto (Cannes).pdf	-	x			x	x
14				Port Abri du Béal	-	Données : 1,50 m de profondeur dans la passe centrale, 1 m sous la voie ferrée et 1,50 sur la partie fluviale. Données précises (mais non numérisées) sur Livre de Bord		x			
15		06155	Vallauris	Golfe Juan Port Camille Rayon	-	Passes d'accès (entrée et fond du port) à 5 m en moyenne, fond du port dans l'axe de 4,50 à 4,80 m, au Sud (digue) : 4,50 à 3,80 m, au Nord (petites places) : relevé à 1,75 m en moyenne voir 1,80 à 2 m, Capitainerie à l'Ouest : 4,20 à 4,40 m en moyenne		x			
16				Vieux Port Golfe	Plan_Port_GolfeJuan.jpg	Plan du port, aucune valeur de	x				
17		06079	Mandelieu	Port de la Rague	PlanBathy_LaRague.jpg	-	x				x
18				Port La Napoule	-	Dans la passe : 4,5 m à 5 m puis diminue vers les bords de quai		x			
19				Port de Cannes-Marina	-	En moyenne normalement dans le port 1,70 m, 1,80 m d'eau, port retiré plus à l'interieur des terres.		x			
22		06161	Villeneuve-Loubet	Marina Baie des	Marina Baie des Anges		x			x	x
23		06088	Nice	Port de Plaisance	Plan_Port_Nice.jpg	Plan du port, aucune valeur de					
24		06159	Vilelfranche-sur-mer	Port de Villefranche-Darse	Plan_Port_Villefranche.jpg	Plan du port, aucune valeur de bathymétrie					

Annexe 4

Tableau récapitulait des données collectées sur les parkings souterrains et non souterrains du littoral, sur les communes de Nice et d'Antibes-Juan-les-Pin

ID	INSEE	Commune	Données	Parking Souterrain								
				localisation X/Y	Nom du Parking	Souterrain	Nombres de Places	Nombres d'entrées	Nombres de niveaux	Profondeur moyenne	Superficie (m²)	Informations complémentaires
1	06004	Antibes	plan antibes nord, plan antibes vieille ville et plan de Juan les Pins		Parking de la Poste							
2					Parking Courbet							
3					Parking Palais des Congrès							
4					Parking Ambassadeurs							
5					Parking Garden Beach							
6					Parking des Frères Oliviers							
7				coordonnées données par l'entreprise : longitude 7.1191139, latitude 43,5789, + photo google maps	Parking de la médiathèque (EFFIA)	oui	186 (?)	1 entrée et 1 sortie	4	environ 8m (4niveau de 2m)	5900	
8					Parking de la Gare (EFFIA)	non	180	1 entrée et 1 sortie	1 niveau	0m	3894	
9					Parking de la Gare SNCF	non	17	1 entrée et 1 sortie	1 niveau	0m	425	Parking à horodateur
10	06088	Nice	Plan de la ville de nice avec certain parking		Acropolis/P. des Sports J. Bouin	oui	1928	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	6 niveaux dont 1 souterrain	2-3m environ	48200	Généralement, les parcs auto sont pleins entre 10h et 16h en semaine dans le centre, et lors de certaines manifestations en week end, ceux du Vieux Nice sont pleins le soir l'été et en période de carnaval (tourisme). Les parkings près des hopitaux sont souvent pleins. Calcul de la superficie : nb de places * 25m² et calcul de la profondeur : nb de niveaux souterrains * 2m
11					Mozart	oui	468	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	6 niveaux souterrains	12m	11700	
12					Promenade du Paillon	oui	460	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	3 niveaux dont 2 niveaux souterrains	4 m	11500	
13					Espace Grimaldi	oui	300	1 entrée et 1 sortie (à 2	?	?	7500	
14					Palais Massena	oui	362	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	4 niveaux dont 1 niveau souterrain	2-3m	9050	
15					Lenval	oui	298	1 entrée et 1 sortie (à 2	?	?	7450	
16					Masséna	oui	325	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	4 niveaux souterrains	8m	8125	
17					Palais de la Méditérranée	oui	603	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	7 niveaux souterrains	14m	15075	
18					Promenade des Arts	non	360	1 entrée et 1 sortie (à 2	2 niveaux	0m	9000	
19					Hotel Plaza Concorde	non	70	1 entrée et 1 sortie (à 2	1 niveau	0m	1750	
20					Ruhl Medidien	oui	430	1 entrée et 1 sortie (à 2	?	?	10750	
21					Radisson SAS	oui	120	1 entrée et 1 sortie (à 2	?	?	3000	
22					Notre Dame	oui	200	1 entrée et 1 sortie (à 2	?	?	5000	
23					Corvesy	oui	360	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	4 niveaux dont 2 niveaux souterrains	4m	9000	
24					Californie	oui	276	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	11 niveaux souterrains ?	22m ?	6900	
25					Valombrose	non	369	1 entrée et 1 sortie (à 2	6 niveaux	0m	9225	
26					Centre Commercial Carrefour Nice TNL	oui	1400	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	1 niveau souterrain	2-3m	35000	
27					Nice Etoile	oui	2200	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	3 niveaux dont 2 niveaux souterrains	4m	55000	
28					Saleya Marche aux Fleurs	oui	556	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	4 niveaux souterrains	8m	13900	
29					Palais de Justice	oui	332	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	5 niveaux souterrains	10m	8300	
30					Barla	oui	225	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	?	?	5625	
31					Marshall	oui	603	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	3 niveaux souterrains	6m	15075	
32					Palmeira	oui	397	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	4 niveaux dont 3 niveaux souterrains	6m	9925	
33					Arenas	oui	1396	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	3 niveaux dont 2 niveaux souterrains	4m	34900	
34					Cadam	non	430	1 entrée et 1 sortie (à 2	?	0m	10750	
35					Louvre	oui	356	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	6 niveaux souterrains	12m	8900	
36					Parc Gare Thiers	non	605	1 entrée et 1 sortie (à 2	6 niveaux	0m	15125	
37					Les Bosquets	non	494	1 entrée et 1 sortie (à 2	7 niveaux	0m	12350	
38					Magnan	oui	525	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	5 niveaux souterrains	10m	13125	
39					Hancy	non	141	1 entrée et 1 sortie (à 2	7 niveaux	0m	3525	
40					Raimbaldi	non	136	1 entrée et 1 sortie (à 2	21 niveaux	0m	3400	
41					Valeri	oui	147	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	2 niveaux dont 1 niveaux souterrains	2-3m	3675	
42					Louis de Coppet	oui	180	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	2 niveaux dont 1 niveaux souterrains	2-3m	4500	
43					République	oui	54	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	1 niveau souterrain	2-3 m	1350	
44					Tzarewitch	oui	116	1 entrée et 1 sortie (à 2 voies)	3 niveaux dont 2 niveaux souterrains	4m	2900	
45					Gare SNCF	non	38	1 entrée et 1 sortie (à 2	1 niveau	0m	836	
46					Ferber	non				0m		Parkings réservé aux autocars et aux poids lourds
47					Gare du Sud	non	400			0m	10000	
48					St Lambert	non	150			0m	3750	
49					Port de Nice Infernet		250				6250	
50					St Jean d'Angély	non	227			0m	5675	
51					Vauban Mail des Université	non	150			0m	3750	
52					Quai des 2 Emmanuelle	non	450			0m	11250	
53					Pont michel	non	260			0m	6500	
54					Las Planas	non	765			0m	19125	
55					Ray	non	224			0m	5600	
56					Arenas Cassin	oui	300		3 niveaux	6m	7500	
57					Voie Mathis	non	40			0m	1000	
58					Aeroport Nice Cote d'Azur	non	4544		4 niveaux	0m	113600	
59					St Augustin	non	184			0m	4600	
60					Nice Leader	non	170			0m	4250	
61					Charles Ehrmann	non	540			0m	13500	
62					Pins	non	660			0m	16500	