







Projet ALDES : Simulations numériques de tsunamis en Méditerranée Occidentale

Rapport final

BRGM/RP-61473-FR Septembre 2012

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2010 10RISG35

S. Le Roy, D. Monfort et R. Pedreros

Vérificateur :	Approbateur :
Nom : M. Terrier	Nom : JL. Foucher
Date: 21/9/12	Date : 26/9/12
Signature :	Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Mots clés: tsunami, submersion, modélisation, glissement de terrain, séisme, Leucate, Barcarès, Bandol, Sanary-sur-Mer, Six-Fours-les-Plages, Antibes, Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte d'Azur

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

Le Roy S., Monfort D. et Pedreros R. (2012) - Projet ALDES : Simulations numériques de tsunamis en Méditerranée Occidentale. Rapport BRGM/RP-61473-FR, 101 p., 62 ill.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Préambule

Sous l'impulsion de la Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO, et suite à 2 rapports de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, l'état français finance aujourd'hui la mise en place d'un Centre d'Alerte aux Tsunamis pour l'Atlantique nord-est et la Méditerranée (CRATANEM) chargé de diffuser une alerte auprès de la Direction de la Sécurité Civile (DSC) pour ce qui concerne la France.

En complément à la mise en place de ce Centre d'Alerte, le Ministère de l'Intérieur a sollicité le BRGM pour une participation à un nouveau projet dénommé ALDES. Ce dernier consiste :

- d'une façon générale, à identifier et qualifier le risque (intensité du phénomène, évaluation des niveaux de dommages potentiels en cas de tsunami sur la côte méditerranéenne française);
- à réaliser des évaluations de risque détaillées (modélisation de tsunami, évaluations des préjudices humains et dommages structuraux) au niveau de 3 sites du littoral;
- mettre en place des procédures d'alerte opérationnelles sur un des 3 sites, qualifié alors de « site démonstrateur ».

Le projet CRATANEM correspond à la partie montante du système d'alerte (déclenchement de l'alerte), le projet ALDES présente la partie descendante du système (gestion de l'alerte, à terre).

Le BRGM a été retenu dans le cadre du projet ALDES pour ses compétences concernant l'analyse de la vulnérabilité des enjeux face aux tsunamis, ses connaissances sur les évaluations de l'aléa tsunamis d'origine gravitaire ou sismique, ses développements de logiciels pour la simulation détaillée de tsunami.

La participation du BRGM à ALDES concerne en particulier :

- évaluation régionale du risque tsunamis, et l'identification des zones les plus menacées du littoral méditerranéen français;
- la simulation de scénarios de tsunamis et de la submersion induite au niveau des 3 sites pilotes, évaluation de l'intensité du phénomène, évaluation des dommages et préjudices humains ;
- sa participation à la mise en place du « site démonstrateur » (identification des zones exposées ou d'abris potentiels, documents d'informations, etc.).

Les travaux réalisés font l'objet de 6 rapports distincts :

- Monfort-Climent D. et Terrier, M. (2010) Projet ALDES : synthèse de typologie de la côte méditerranéenne française. Rapport BRGM/RP-58516-FR, 43 p., 29 fig., 1 ann.
- Monfort D, Terrier M. et A. Stepanian (2010) ALDES : caractérisation des enjeux, évaluation de la vulnérabilité. Rapport d'avancement. Rapport BRGM/RP-58988-FR, 73 p., 41 fig.
- Krien Y. (2010) Projet ALDES : Évaluation à l'échelle régionale de l'aléa tsunami d'origine gravitaire, Rapport d'avancement BRGM/RP-58924-FR, 35 p., 29 fig.
- Le Roy S. et Pedreros R. avec la collaboration de Monfort-Climent D. (2011) ALDES : Modélisation numérique du tsunami survenu à Antibes en 1979. Rapport BRGM/RP-60353-FR, 80 p., 61 ill.
- Le Roy S., Monfort D. et Pedreros R. (2012) Projet ALDES : Simulations numériques de tsunamis en Méditerranée Occidentale. Rapport BRGM/RP-61473-FR, 95 p., 62 ill.
- Monfort D., Le Roy S., Pedreros R (2012) Projet ALDES : Scénarios de risque tsunami en Méditerranée Occidentale. 77 p., 37 fig., 10 tab., 3 annexes.

En plus de ces rapports, le SIG des cartes de dommages et les films des simulations ont été communiqués au ministère de l'Intérieur et à la Préfecture du Var pour la réalisation de la dernière partie projet (WP6) relative à la préparation de la gestion de l'alerte et des secours au niveau du site démonstrateur de Bandol-Sanary- Six Fours.

Synthèse

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du projet ALDES, coordonné par le Ministère de l'Intérieur. Il correspond aux phases WP 3.2 et WP 5.1 du projet.

Trois sites sont étudiés en détail vis-à-vis du risque lié aux tsunamis. L'étude s'appuie sur la simulation numérique de la génération du tsunami, de sa propagation jusqu'aux sites d'étude et de la submersion provoquée à terre. Les résultats des simulations, objets du présent rapport, sont ensuite utilisés pour la réalisation de scénarios de risque (WP 5.2 du projet), visant à estimer l'endommagement des bâtiments, les préjudices humains et les conséquences dans les ports de chaque tsunami étudié (Monfort *et al.*, 2012).

Les 3 sites étudiés correspondent aux secteurs de Leucate-Barcarès (Pyrénées Orientales), de Bandol (Var) et d'Antibes (Alpes-Maritimes). Les scénarios simulés et les résultats obtenus en termes de submersion sont les suivants :

- site de Leucate Barcarès :
 - <u>scénario d'un glissement de terrain sous-marin dans le canyon de Lacaze-Hérault :</u> Conséquences très limitées, avec une submersion restant *a priori* cantonnée aux plages ;
- site de Bandol Sanary-sur-Mer Six-Fours-les-Plages :
 - <u>scénario d'un séisme algérien :</u> Conséquences limitées, avec une submersion affectant essentiellement les plages, mais aussi certaines parties du rivage potentiellement sensibles (parkings, esplanades, ports); certains bâtiments peuvent être atteints par les vagues, avec des hauteurs d'eau et des vitesses significatives;
- site d'Antibes :
 - <u>scénario d'un séisme algérien (M=7.5)</u>: Conséquences limitées, avec une submersion affectant essentiellement les plages, mais pouvant atteindre les parkings et routes littorales, voire quelques bâtiments,
 - <u>scénario d'un séisme type « Mer Ligure 1887 » au niveau de la faille</u> <u>Marcel (M=6.5):</u> Conséquences très limitées, avec une submersion restant a priori cantonnée aux plages et aux digues,
 - <u>scénario du glissement de terrain de l'aéroport de Nice en 1979</u>: Ce scénario, présenté par Le Roy *et al.* (2011), est le plus dommageable de tous ceux simulés : les conséquences observées de l'événement historique ont pu être retrouvées par le calcul, avec une forte submersion au niveau de la Salis (hauteurs d'eau de plusieurs mètres, courants importants, nombreux bâtiments atteints, eau atteignant les rues...).

Au final, les scénarios les plus dommageables parmi ceux simulés sont ceux du glissement de terrain de l'aéroport de Nice en 1979 pour le site d'Antibes (Le Roy *et al.*, 2011) et d'un séisme algérien pour les sites de Bandol, voire d'Antibes. Parmi les 3 sites étudiés, celui d'Antibes apparait donc comme le plus exposé, notamment en raison des instabilités sous-marines dans la Baie des Anges et de la bathymétrie défavorable au large du site.

Cependant, cette analyse n'exclue pas que d'autres secteurs de la côte méditerranéenne française puissent aussi être exposés ; par exemple, les simulations menées sur le cas d'un séisme algérien semblent indiquer des hauteurs d'eau importantes dans la baie de la Ciotat.

Outre les résultats obtenus en termes de paramétrage de tsunamis et de conséquences pour chacun des scénarios événementiels simulés, cette étude a aussi permis de souligner plus particulièrement l'importance de :

- la résolution des calculs pour une estimation réaliste de la submersion à terre ; les calculs à haute résolution sont notamment rendus possibles grâce au programme Litto3D ;
- la prise en compte du bâti lorsque des hauteurs d'eau significatives sont atteintes en milieu urbain ;
- La description de la source et type d'équations utilisées pour les sources gravitaires.

Sommaire

1.	Cadre de l'étude	11
2.	Généralités et rappels sur le phénomène tsunami	13
3.	Modélisation des tsunamis : paramètres et données d'entrée	17
	 3.1. MODÈLES UTILISÉS 3.1.1.Génération et propagation du tsunami : le code GEOWAVE 3.1.2.Submersion par le tsunami : le code SURFWB 	17 17 20
	 3.2. DONNÉES TOPO/BATHYMÉTRIQUES ET CONSTRUCTION DES MNT/MNE	21 21 23
4.	Site de Leucate-Barcarès : scénarios simulés et résultats	27
	4.1. SCÉNARIOS SIMULÉS	27
	4.2. GRILLES DE CALCUL UTILISÉES SUR LE SITE DE LEUCATE- BARCARÈS	28
	 4.3. SCÉNARIO DU GLISSEMENT DE TERRAIN SOUS-MARIN DE LACAZE- HÉRAULT SUR LEUCATE-BARCARÈS 4.3.1. Conditions de forçage 4.3.2. Résultats des simulations 	31 31 33
5.	Site de Bandol : scénarios simulés et résultats	45
	5.1. SCÉNARIOS SIMULÉS	45
	5.2. GRILLES DE CALCUL UTILISÉES SUR LE SITE DE BANDOL	45
	 5.3. SCÉNARIO D'UN SÉISME ALGÉRIEN SUR BANDOL 5.3.1. Conditions de forçage 5.3.2. Résultats des simulations 	48 48 49
6.	Site d'Antibes : scénarios simulés et résultats	63
	6.1. SCÉNARIOS SIMULÉS	63
	6.2. GRILLES DE CALCUL UTILISÉES SUR LE SITE D'ANTIBES	63

	6.3. SCÉNARIO D'UN SÉISME ALGÉRIEN SUR ANTIBES	67
	6.3.1. Conditions de forçage	67
	6.3.2. Résultats des simulations	69
	6.4. SCÉNARIO D'UN SÉISME TYPE LIGURE 1887 SUR ANTIBES	78
	6.4.1. Conditions de forçage	79
	6.4.2. Résultats des simulations	80
	6.5. SCÉNARIO DU GLISSEMENT DE TERRAIN DE L'AÉROPORT DE NICE EN 1979 87	I
7.	Conclusion	91
8.	Bibliographie	93

Liste des illustrations

Illustration 1 - Schéma de propagation d'un tsunami depuis le milieu profond jusqu'à la côte (source :	
http://www.prh.noaa.gov/itic/fr/library/pubs/great_waves/tsunami_great_waves.html)14	4
Illustration 2 - Caractéristiques des tsunamis au niveau du rivage (Pedreros et Poisson, 2007)	4
Illustration 3 - Principales caractéristiques de GEOWAVE18	B
Illustration 4 - Ensemble des sondes bathymétriques contenues dans les dalles Histolitt des côtes méditerranéennes françaises (en rouge), et couverture des données IEREMER à 250 m (en bleu)	2
Illustration 5 - Procédure de traitement des données Litto3D pour établir un MNE ne prenant en compte que le bâti	5
Illustration 6 - Comparaison des MNE « brut » (en haut) et reconstitué (en bas) avec orthophoto	6
Illustration 7 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur le secteur de Leucate-Barcarès (résultat CEA)	7
Illustration 8 - Aperçu du MNT (maillage de 250 m) utilisé sur le Golfe du Lion pour les simulations numériques (altitude en m - l'axe vertical n'est pas à l'échelle)	9
Illustration 9 - Aperçu du MNE (maillage de 1 m) utilisé sur Leucate pour les simulations de submersion (altitude en m - l'axe vertical n'est pas à l'échelle)	0
Illustration 10 - Enchainement des grilles suivant le rang de calcul sur le site de Leucate-Barcarès	1
Illustration 11 - Paramètres retenus pour la description du glissement du canyon de Lacaze-Hérault	2
Illustration 12 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Temps d'arrivée (en minutes) du tsunami généré par le glissement dans le Golfe du Lion	4

Illustration 13 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 0 (250 m) dans le Golfe du Lion
Illustration 14 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 1 (83 m)
Illustration 15 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 2 (28 m) sur Leucate-Barcarès
Illustration 16 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 2 (28 m) sur Sainte-Marie-Plage
Illustration 17 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 3 (9 m) au niveau de Leucate40
Illustration 18 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 3 (9 m) entre Sainte-Marie-Plage et Torreilles-Plage41
Illustration 19 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sans déferlement sur 75 minutes de simulation au rang 3 (9 m) entre Sainte-Marie-Plage et Torreilles-Plage42
Illustration 20 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 4 (1 m) au niveau de Leucate43
Illustration 21 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 75 minutes de simulation au rang 4 (1 m) au niveau de Leucate
Illustration 22 - Aperçu du MNT (maillage de 40,5 m) utilisé sur la Baie de Bandol pour les simulations numériques (altitude en m - l'axe vertical n'est pas à l'échelle)46
Illustration 23 - Aperçu du MNE (maillage de 2,5 m) utilisé sur Bandol pour les simulations de submersion (altitude en m - l'axe vertical n'est pas à l'échelle)47
Illustration 24 - Enchainement des grilles suivant le rang de calcul sur le site de Bandol48
Illustration 25 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation instantanée du plan d'eau (couleurs, en mètres) et vitesses des courants (flèches, en m/s) fournies par le CEA 1h20 après le séisme (résolution de 13,5 m)
Illustration 26 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 1 (40 m) dans le secteur de Bandol
Illustration 27 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de Bandol - Sanary Nord
Illustration 28 - Scénario d'un séisme algérien : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de Bandol - Sanary Nord
Illustration 29 - Scénario d'un séisme algérien : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de Bandol - Sanary Nord

Illustration 30 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de la Pointe de la Cride	53
Illustration 31 - Scénario d'un séisme algérien : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de la Pointe de la Cride	54
Illustration 32 - Scénario d'un séisme algérien : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de la Pointe de la Cride	55
Illustration 33 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de Six-Fours-les-Plages	56
Illustration 34 - Scénario d'un séisme algérien : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de Six-Fours- les-Plages (au Nord à gauche, au Sud à droite)	57
Illustration 35 - Scénario d'un séisme algérien : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de Six-Fours-les-Plages	58
Illustration 36 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur des Embiez	59
Illustration 37 - Scénario d'un séisme algérien : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur des Embiez	60
Illustration 38 - Scénario d'un séisme algérien : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur des Embiez	61
Illustration 39 - Aperçu du MNT (maillage de 1 800 m) utilisé sur la Méditerranée occidentale pour les simulations numériques (altitude en m - l'axe vertical n'est pas à l'échelle)	64
Illustration 40 - Aperçu du MNE (maillage de 5 m) utilisé sur Antibes-La Salis pour les simulations de submersion (altitude en m - l'axe vertical n'est pas à l'échelle)	65
Illustration 41 - Enchainement des grilles suivant le rang de calcul sur le site d'Antibes	67
Illustration 42 - Caractéristiques géométriques d'une faille normale (extension liée à l'écartement de plaques)	68
Illustration 43 - Scénario d'un séisme algérien : Paramètres retenus pour la description du séisme	69
Illustration 44 - Scénario d'un séisme algérien : Temps d'arrivée (en heures) du tsunami généré par le séisme	70
Illustration 45 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur 4 heures de simulation au rang 0 (1 800 m) en Méditerranée occidentale	71
Illustration 46 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur 4 heures de simulation au rang 1 (600 m) sur la Côte d'Azur	72

Illustration 47 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur 4 heures de simulation au rang 2 (200 m) sur la côte des Alpes- Maritimes
Illustration 48 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur 4 heures de simulation au rang 3 (67 m) sur la Baie des Anges74
Illustration 49 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 4 heures de simulation au rang 4 (22 m) au niveau d'Antibes
Illustration 50 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 4 heures de simulation au rang 5 (5 m) au niveau de la Salis
Illustration 51 - Scénario d'un séisme algérien : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 5 (5 m) au niveau de la Salis
Illustration 52 - Scénario d'un séisme algérien : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 75 minutes de simulation au rang 5 (5 m) au niveau de la Salis
Illustration 53 - Position du séisme de Mer Ligure en 1887 et de la faille Marcel (d'après Larroque et al., 2012)
Illustration 54 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Paramètres retenus pour la description du séisme
Illustration 55 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Temps d'arrivée (en minutes) du tsunami généré par le séisme type « Mer Ligure 1887 » sur la faille Marcel
Illustration 56 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur une heure de simulation au rang 2 (200 m) sur la côte des Alpes-Maritimes
Illustration 57 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur une heure de simulation au rang 3 (67 m) sur la Baie des Anges
Illustration 58 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur une heure de simulation au rang 4 (22 m) sur Antibes
Illustration 59 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur une heure de simulation au rang 5 (5 m) sur la Salis
Illustration 60 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 1 heure de simulation au rang 5 (5 m) au niveau de la Salis
Illustration 61 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 1 heure de simulation au rang 5 (5 m) au niveau de la Salis
Illustration 62 - Scénario Nice 1979 : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 15 minutes de simulation (résolution de 3,75 m) au niveau de la Salis
Illustration 63 - Scénario Nice 1979 : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 20 minutes de simulation (résolution de 3,75 m) au niveau de la Salis, sans bâtiments

1. Cadre de l'étude

En complément à la mise en place du Centre Régional d'Alerte aux Tsunamis pour l'Atlantique Nord-Est et la Méditerranée Occidentale (CRATANEM), chargé de diffuser une alerte à la Sécurité Civile, la Direction de la Sécurité Civile (DSC) a sollicité le BRGM pour une participation à un nouveau projet dénommé Alerte Descendante (ALDES). Ce projet consiste :

- en une étude de la menace tsunami le long du littoral méditerranéen afin d'identifier les zones les plus exposées ;
- puis, à examiner en détail trois sites pilotes et y évaluer le risque (l'aléa, les dommages et préjudices humains potentiels) ;
- et enfin, la mise en place d'un démonstrateur (sur un des 3 sites pilotes préanalysés) pour lequel les éléments d'un système d'alerte descendante adapté seront définis (plan communal de sauvegarde, formation, information, documentation, diffusion...).

Les trois sites pilotes retenus dans le cadre du projet ALDES sont :

- Bandol Six-fours-les-plages Sanary-sur-Mer dans la côte varoise (83)
- Leucate Barcarès entre l'Aude (11) et les Pyrénées-Orientales (66)
- Antibes-Juan-les-Pins et Villeneuve-Loubet dans les Alpes Maritimes (06)

Le présent rapport d'avancement concerne les résultats de simulations numériques sur les 3 sites pilotes.

2. Généralités et rappels sur le phénomène tsunami

Un tsunami (*du japonais tsu : port et nami : vague*) correspond à une série de vagues provoquée par une action mécanique brutale et de grande ampleur au niveau d'une mer ou d'un océan. Ces actions sont le plus souvent d'origine tectonique, volcanique ou liées à des glissements de terrain, mais un impact météoritique peut aussi en être la cause.

Suite à leur génération, les tsunamis se propagent dans toutes les directions, parfois sur plusieurs milliers de kilomètres, jusqu'à atteindre les côtes. Seuls les tsunamis les plus importants inondent ces dernières.

Les tsunamis peuvent ainsi être décrits selon 3 phases : la génération, la propagation et l'inondation.

À la phase de **génération**, les tsunamis se caractérisent par des périodes (**T**, durée entre deux vagues consécutives) allant de quelques minutes (généralement liés à des glissements terrain) à plus d'une heure lorsqu'ils sont causés par des événements tectoniques majeurs. Les longueurs d'onde associées (**L**, distance entre deux vagues consécutives) peuvent alors varier de plusieurs dizaines à quelques centaines de km. Bien souvent, L est largement supérieure à la profondeur (**P**). Dans ce cas, les tsunamis obéissent à la théorie des « ondes longues » qui prévoit une vitesse de propagation (**V**) homogène sur toute la tranche d'eau. V peut être alors approchée par la relation :

 $V = \sqrt{g \times P}$ où g correspond à l'accélération terrestre (9.81).

Ainsi en se **propageant** vers la côte, l'onde rencontre des profondeurs de plus en plus faibles en faisant chuter sa vitesse : par exemple, de 943 km/h à 7000 m de profondeur à 36 km/h à 10 m de profondeur (Illustration 1). Cela implique également une diminution de L (L = VxT). Comme la quasi-totalité de l'énergie transportée par le tsunami est conservée lors de sa propagation, cela implique l'augmentation des hauteurs des vagues en eau peu profonde (*étape de gonflement*).



Illustration 1 - Schéma de propagation d'un tsunami depuis le milieu profond jusqu'à la côte (source : <u>http://www.prh.noaa.gov/itic/fr/library/pubs/great_waves/tsunami_great_waves.html)</u>



Illustration 2 - Caractéristiques des tsunamis au niveau du rivage (Pedreros et Poisson, 2007)

Il existe un seuil, défini par le rapport entre la hauteur des vagues et la profondeur de l'eau, au-delà duquel les vagues déferient en contribuant à la dissipation de l'énergie.

À noter que la hauteur des vagues correspond à la somme de l'amplitude de la crête et l'amplitude du creux (hauteur crête-à-creux, Illustration 2). Dans le domaine marin, l'amplitude des crêtes équivaut donc à l'élévation maximale du plan d'eau.

L'inondation du domaine terrestre dépendra des caractéristiques du tsunami près du rivage (amplitude, période et longueur d'onde des vagues) et de la topographie côtière. En cas d'inondation, le tsunami ne se comporte plus comme une onde mais comme un torrent qui sera plus ou moins chenalisé par la topographie et d'éventuelles rivières ou canaux. Il interagira également avec la végétation, les ouvrages et le bâti côtiers. La limite d'inondation, correspondant à l'enveloppe de l'excursion maximale de l'eau dans

le domaine terrestre, permet de caractériser cette zone inondée. On parle de **hauteur** du *run-up* et de **profondeur d'inondation** comme étant respectivement l'altitude et la distance horizontale de la limite d'inondation par rapport au niveau de la mer avant le tsunami. Localement, on peut également s'intéresser à **la hauteur (**ou épaisseur) **d'inondation** qui équivaut à la différence entre les altitudes du plan d'eau et celle du substrat.

Il est à noter que les mécanismes de génération des tsunamis peuvent être plus complexes et que des interactions existent entre les différentes sources (tectonique, volcanique, glissements de terrain,...). Par exemple, un séisme de faible magnitude peut provoquer un glissement sous-marin de grande ampleur à l'origine d'un tsunami dévastateur.

Enfin, à proximité du rivage, les tsunamis subissent des phénomènes comme la diffraction, la réflexion, la dissipation par frottement et déferlement, le piégeage d'ondes (ondes de coin), ... qui accentueront ou diminueront les effets des vagues en fonction de la physiographie locale.

3. Modélisation des tsunamis : paramètres et données d'entrée

3.1. MODÈLES UTILISÉS

Afin de modéliser de façon la plus réaliste cet événement, 2 codes de calcul ont été couplés :

- GEOWAVE : pour la génération et la propagation du tsunami
- SURFWB : pour l'inondation à terre du tsunami

3.1.1. Génération et propagation du tsunami : le code GEOWAVE

Les simulations numériques de la génération et la propagation du tsunami de 1979 ont été effectuées avec le code GEOWAVE (Watts *et al.*, 2003). C'est un code représentatif de l'état de l'art actuel, testé et validé sur de nombreux cas de référence. Parmi ceux-ci, on cite notamment les applications par le BRGM dans le cadre du Plan Séisme, en Méditerranée, aux Antilles et en Guyane (Pedreros *et al.*, 2007, Terrier *et al.*, 2007, Poisson et Krien, 2009, Poisson et Pedreros, 2010), ainsi que celles relatives au tsunami de Sumatra de 2004 (Poisson *et al.*, 2009, 2011).

Les principales caractéristiques de GEOWAVE sont synthétisées dans le tableau de l'Illustration 3.

Propriétés Geowave		
	Origine sismique	Okada, 1985
Génération	Origine glissement sous-marin	Grilli et Watts, 1999, 2005
(TOPICS)	Origine glissement subaérien (effondrement	Walder <i>et al.</i> , 2003
	falaise et volcanique)	
	1	
	Base théorique	Équations Boussinesq modifiées
	Domaine de propagation	360°
	Equations propagation utilisées	Complètement non linéaires et
		dispersives (Wei <i>et al.</i> , 1995)
	Stationnaire ou transitoire	Transitoire (vague à vague)
	Caractéristiques maillage	Différence finies, cartésien,
	Densité maillage/longueur d'onde des	Dépendant (environ 15 à 30 nœuds
	vagues	par longueur d'onde)
	Dépendance de la qualité des	Forte
Propagation,	résultats/densité maillage	• ·
inondation	Réfraction	Oui
(FUNWAVE 1.0)	Diffraction	Oui
	Réflexion	Oui
	Gonflement	Oui
	Déferlement	Kennedy et al., 2000
	Interaction houle-courant	Oui
	Dissipation energie par frottements au fond	lerme dissipatif
	I raitement surface couvrante/découvrante - zone inondation	Oui (technique des slots)
	Prise en compte d'obstacles (Bâtiments,	Non
	mangrove,)	
	Élévetien du plan d'agu	Quivent intervelle temperal défininger
	Elevation du plan d eau	Suivant intervalle temporei defini par
	Élévation maximala plan d'aque at hours	Tutilisateur
	cerrespondente	
_	Élévetion minimale plan d'agu et bourg	
Principaux	correspondente (retrait)	
resultats	Vitesse maximale et direction atteinte par le	En tenant compte de l'ensemble de
	courant	la simulation
	Limite d'inondation	
	Position du déferlement des vagues	

Illustration 3 - Principales caractéristiques de GEOWAVE

Ce modèle est composé de deux modules : TOPICS et FUNWAVE.

1) TOPICS (Tsunami Open and Progressive Initial Conditions System) : permet de générer les vagues provoquées par des séismes et des glissements sous-marins et subaériens.

 Pour les séismes : l'initiation est modélisée en faisant appel aux algorithmes développés par Okada (1985) qui correspondent à la méthode couramment utilisée par les différents modèles. Ces algorithmes permettent de calculer la déformation du plancher océanique à partir des caractéristiques de la faille à l'origine du séisme. Le tsunami initial est ensuite déduit en admettant que l'intégralité de cette déformation est instantanément transmise à la surface de l'eau.

- Pour les glissements sous-marins : le code intègre les travaux de Grilli et Watts (1999). Ces auteurs ont déterminé empiriquement des relations entre les caractéristiques géométriques du glissement et les caractéristiques du tsunami à la génération (amplitude, longueur d'onde). Deux grands types de glissements sont considérés :
 - les glissements en translation (*slide*) qui sont caractérisés par une faible épaisseur et un déplacement sur une longue distance ;
 - les glissements en rotation (*slump*) qui sont caractérisés par une grande épaisseur et un faible déplacement du fait de frottements importants.

Lors de la modélisation, ils ne se différencient que par le type de mouvement du centre de gravité du glissement. Pour le *slide*, c'est un mouvement de translation parallèle à la droite ; pour le *slump*, c'est une rotation.

- **Pour les glissements subaériens** : la génération se base sur les travaux de Walder *et al.* (2003) établissant des équations empiriques reliant les caractéristiques du tsunami à la géométrie du glissement et aux caractéristiques du mouvement.

2) FUNWAVE : les paramètres initiaux du tsunami calculés par TOPICS (amplitude et longueur d'onde) sont par la suite injectés dans FUNWAVE. Ce module se charge alors de propager dans l'espace la vague initiale et de déterminer l'inondation au rivage.

La propagation s'effectue en résolvant les équations de Boussinesq étendues (non linéaires et faiblement dispersives) selon la méthode de Wei *et al.* (1995). Ces équations présentent l'avantage de traiter correctement les différents types de tsunami : aussi bien générés par des séismes (grande longueur d'onde) que par des glissements de terrain (faible longueur d'onde). Ce module peut également être utilisé suivant une version simplifiée des équations dites des « ondes longues » ou « Shallow Water » (adaptées généralement aux tsunamis provoqués par des séismes).

Pour traiter la phase d'inondation, FUNWAVE tient compte du déferlement des vagues et assure un traitement particulier des zones couvrantes-découvrantes.

À noter que des modifications ont été apportées par le BRGM à la version de base de GEOWAVE, notamment sur :

- l'amélioration de la gestion de la mémoire afin de traiter de grands domaines de calcul ;
- la modification des procédures de lancement du code et des formats de sortie des données (lancement automatisé, diminution de la taille des fichiers résultats et compatibilité avec les logiciels de SIG) ;

- la mise en place d'une gestion de grilles emboitées : indispensable pour faire des calculs à haute résolution spatiale lorsque la source tsunamigène est éloignée des zones d'intérêt.
- le pré et post-traitement ont été facilités par le développement d'outils spécifiques.

3.1.2. Submersion par le tsunami : le code SURFWB

Afin de modéliser au mieux la submersion à terre en milieu urbanisé (prise en compte du bâti et des ouvrages côtiers), un couplage a été développé entre les codes GEOWAVE et SURFWB. Ce couplage a notamment déjà été utilisé dans le cadre du projet ALDES pour simuler le tsunami survenu sur Antibes en 1979, suite au glissement du remblai de l'aéroport de Nice lors de son extension (Le Roy *et al.*, 2011). Les résultats obtenus se sont révélés tout à fait satisfaisants, apportant des améliorations significatives par rapport aux simulations effectuées jusqu'alors, tant en termes de propagation du tsunami que de la submersion à terre. Il convient toutefois de préciser que les données Lidar n'étant pas disponibles sur le site d'Antibes, le modèle numérique d'élévation (MNE) ne disposait que d'une résolution et d'une précision limitée.

Description

Le code SURFWB (Marche *et al.*, 2007) est un modèle « vague à vague » permettant de simuler les écoulements littoraux dans le cas de fortes variations topographiques (dont le bâti) grâce à la mise en place de schémas à capture de choc et bien équilibrés (« Well-balanced »). Il est issu de la dérivation d'un modèle de Saint-Venant visqueux bi-dimensionnel à partir des équations de Navier-Stokes homogènes et incompressibles. Il inclut des termes de diffusion, de friction, de Coriolis ou encore de tension de surface de manière rigoureuse d'un point de vue mathématique. Il converge par ailleurs vers l'état stationnaire au repos après le passage d'une onde et gère de manière satisfaisante les découvrements/recouvrements. Une description plus détaillée de SURFWB peut être trouvée dans Marche *et al.* (2007).

SURFWB offre la possibilité d'utiliser différentes lois pour tenir compte du frottement au fond. Dans cette étude nous avons opté pour une loi classique dite de Manning. Deux coefficients de Manning (représentatifs de la rugosité de la surface) ont été choisis selon que l'on soit à terre ou en mer :

- 0,014 s/m^{1/3} à terre (valeur typiquement utilisée pour les routes, celle des surfaces végétalisées étant plus importante);
- 0,025 s/m^{1/3} classiquement utilisée en mer.

3.2. DONNÉES TOPO/BATHYMÉTRIQUES ET CONSTRUCTION DES MNT/MNE

3.2.1. Données topo-bathymétriques

Les données bathymétriques utilisées proviennent de la base mondiale GEBCO, du SHOM et de l'IFREMER, alors que les données topographiques proviennent de la base SRTM et de l'IGN.

• GEBCO (General Bathymétrie Chart of the Oceans)

Ce produit est soutenu par l'organisation hydrographique internationale (IHO), par les Nations Unies (UNESCO) ainsi que par la commission océanographique intergouvernementale (IOC). Les informations bathymétriques résultent d'une compilation à l'échelle du globe de sondages bathymétriques et de données issues de l'altimétrie satellitale. Elles sont délivrées gratuitement et sont accessibles à l'adresse suivante http://www.gebco.net/. La maille des pixels est de 1'x1' (environ 1,85 km x 1,85 km). Une extraction a été réalisée pour la Méditerranée Occidentale.

Données du SHOM (HISTOLITT)

HISTOLITT est un produit numérique organisé en dalles de 1° x 1° contenant les sondes bathymétriques réalisées (et qualifiées) par le SHOM (Illustration 4).

La mise à disposition de ces données a fait l'objet d'une convention spécifique à l'étude entre le BRGM et le SHOM. Les informations extraites sont issues de la base du SHOM mise à jour en 2009. Ces données concernent le plateau continental Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Corse (sondes en rouge dans l'Illustration 4).

La résolution spatiale maximale de ces sondes est de l'ordre de 25 m près de la côte. D'une façon générale la densité de ces données est bonne pour des profondeurs allant de 10 m jusqu'en bordure du plateau continental (100 - 200 m).

Données IFREMER

Il s'agit de données bathymétriques maillées à une résolution spatiale de 250 m du domaine marin au large de la côte française (sondes en bleu dans l'Illustration 4). Les données couvrent les profondeurs supérieures à 180 mètres.



Illustration 4 - Ensemble des sondes bathymétriques contenues dans les dalles Histolitt des côtes méditerranéennes françaises (en rouge), et couverture des données IFREMER à 250 m (en bleu)

• Données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

Ces données topographiques sont librement accessibles et présentent un maillage de 90 m.

• Données SHOM-IGN (Litto3D)

Des données issues de levers Lidar (Light Detection and Ranging, méthode aéroportée permettant la mesure de la topographie ou de la bathymétrie par signal laser) dans le cadre du programme Litto3D ont été mises à disposition sur les secteurs de Barcarès et de Bandol.

Le programme Litto3D prévoit de couvrir à terme l'ensemble du littoral français (métropole et outre-mer) par des données topo-bathymétriques très fines, acquises essentiellement par Lidar et complétées par d'autres techniques (sondeur multifaisceaux...). L'emprise concernée, sauf cas particuliers, s'étend à au moins 2 km de part et d'autres du trait de côte, et couvre toute la zone comprise entre une altitude de 10 m et une profondeur de -10 m (IGN 69).

Les méthodes et matériels différant selon que le Lidar soit topographique ou bathymétrique, les résolutions et précisions des résultats sont variables. Ainsi, en mer, les données Lidar possèdent une précision altimétrique de 50 cm et une précision planimétrique de 2,80 m (les sondeurs multifaisceaux permettant de meilleures précisions), alors qu'à terre ces caractéristiques sont typiquement de 15 à 20 cm pour la précision altimétrique. La résolution des acquisitions Lidar est de 1 point pour 25 m² en mer, et de 2 points par m² à terre.

Les résultats fournis par l'IGN dans le cadre du projet ALDES consistent finalement en des grilles topo-bathymétriques de résolution 1 m, fournissant en tout point l'altitude (IGN 69) et projetée en Lambert 93. Deux grilles ont ainsi été fournies :

- Une grille « brute », correspondant directement aux acquisitions : il s'agit donc d'un modèle numérique d'élévation (MNE), à ceci près que le signal est bruité par l'environnement au moment de l'acquisition (végétation, véhicules, personnes...);
- Une grille MNT (Modèle Numérique de Terrain), issue de la précédente, dans laquelle toute l'occupation du sol a été nettoyée (grâce notamment à des photographies aériennes prises simultanément aux acquisitions Lidar).

Il convient également de noter qu'aucune donnée Litto3D n'est disponible dans l'étang de Leucate, dans les canaux entre Leucate et Le Barcarès et dans la plupart des ports des secteurs de Leucate et Bandol, le Lidar utilisé dans ce secteur étant de type topographique (et non bathymétrique). Ces plans d'eau ont donc été artificiellement recréés dans les données Litto3D, en les identifiant soit à travers les mesures Lidar (signal nul dans l'étang), soit avec les données de la couche « Hydro » de la BDTopo de l'IGN et les orthophotos. En l'absence de sondes bathymétriques, la profondeur de ces plans d'eau a été uniformément fixée à 2 m (profondeur moyenne de l'étang, <u>www.pole-lagunes.org</u>). Il en est de même pour certains ports suivant les secteurs, dans la zone de Bandol.

Le bâti a également fait l'objet d'un traitement particulier, présenté au paragraphe suivant (3.2.2).

3.2.2. Construction des grilles MNT/MNE

L'ensemble des grilles MNT (Modèle Numérique de Terrain) et MNE (Modèle Numérique d'Élévation) ont été réalisées et manipulées en Lambert 93 (avant éventuelle reprojection), les altitudes étant exprimées en IGN 69, en utilisant le logiciel Surfer (Golden Software) grâce à la méthode de triangulation par interpolation linéaire. Le choix de cette méthode d'interpolation tient au fait que la plupart des données utilisées sont déjà maillées. La qualité des données interpolées par cette méthode a été testée par validation croisée.

Construction d'un MNE avec données Lidar (sites de Leucate-Barcarès et Bandol)

Comme évoqué au paragraphe précédent, le MNE « brut » issu de Litto3D est bruité par les différents éléments au sol lors de l'acquisition (végétation, véhicules, personnes...). Il a donc été choisi, afin d'obtenir un MNE représentatif des éléments pérennes pour la submersion, d'utiliser comme base le MNT fourni par l'IGN (issu de Litto3D), et d'y superposer le bâti isolé dans le MNE (Litto3D) par l'intermédiaire de la couche « bâti » de la BDTopo de l'IGN, en utilisant un buffer de 1 m de large autour de

tous les bâtiments, pour prendre en compte l'imprécision des contours de la BDTopo. L'Illustration 5 résume la démarche mise en œuvre sur un extrait.

Ce traitement permet au final d'éliminer du MNE tous les éléments perturbateurs vis-àvis de la problématique de la submersion marine (végétation, véhicules...), comme le montre le zoom de l'Illustration 6, mais ne permet pas de conserver un certain nombre d'éléments pérennes susceptibles d'impacter l'inondation (murs et murets, fontaines...). Compte-tenu des submersions particulièrement limitées dans les secteurs de Barcarès et Bandol, il ne s'est pas avéré utile de réintégrer ces éléments.



Illustration 5 - Procédure de traitement des données Litto3D pour établir un MNE ne prenant en compte que le bâti



Illustration 6 - Comparaison des MNE « brut » (en haut) et reconstitué (en bas) avec orthophoto

Construction d'un MNE sans données Lidar (site d'Antibes)

Comme présenté dans Le Roy *et al.* (2011), en l'absence de données Litto3D sur les Alpes-Maritimes, le MNE a été construit sous ArcGIS à partir d'un MNT de résolution 5 m fourni par le Conseil Général des Alpes-Maritimes, sur lequel ont été superposés les bâtiments (contours et hauteurs issus de la BDTopo de l'IGN). Compte-tenu de l'importance de la submersion pouvant affecter Antibes, quelques corrections ponctuelles ont ensuite été apportées pour tenir compte au mieux de l'occupation du sol (présence de murets, rues...).

4. Site de Leucate-Barcarès : scénarios simulés et résultats

4.1. SCÉNARIOS SIMULÉS

Sources sismiques

Compte-tenu de sa situation, le site de Barcarès apparait peu exposé à des tsunamis d'origine sismique. Les simulations menées par le CEA dans le cadre du projet ALDES sur le site de Leucate-Barcarès incluaient les scénarios d'un séisme algérien (paragraphes 5.3.1 et 6.3.1) et d'un séisme type « Mer Ligure 1887 » (paragraphe 6.4.1), et ont montré des hauteurs d'eau à la côte très faibles (typiquement inférieures à 0,5 m, approchant parfois le mètre localement), avec une submersion très limitée, cantonnée aux parties basses des plages (aperçu du séisme algérien à l'Illustration 7).



Illustration 7 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur le secteur de Leucate-Barcarès (résultat CEA)

Par conséquent, aucune simulation fine de submersion n'a été menée sur ce site pour ce type de sources.

Sources gravitaires

Le scénario retenu pour le site de Barcarès correspond à un événement gravitaire au niveau du *canyon de Lacaze-Hérault*. Les caractéristiques sont issues des études de l'Ifremer (Cattaneo, 2007). Ces simulations font suite à celle déjà menées à échelle régionale en 2007 (Pedreros *et al.*, 2007).

4.2. GRILLES DE CALCUL UTILISÉES SUR LE SITE DE LEUCATE-BARCARÈS

MNT et MNE utilisés

Plusieurs grilles ont été fabriquées à différentes résolutions afin de simuler la génération et la propagation du tsunami par calculs emboités (les emprises et emboitements sont présentés à l'Illustration 10). L'ensemble de ces grilles a été utilisé en projection Lambert 93.

- Un MNT de résolution 250 m couvrant une large moitié ouest du Golfe du Lion (Illustration 8) : ce MNT est directement issu de celui généré par Pedreros *et al.* (2007) pour les études de cas de tsunamis sur la côte méditerranéenne française. Il a donc été établi à partir des données bathymétriques du SHOM (Histolitt), et de l'Ifremer, complétées par les données SRTM à terre et par les données GEBCO au large, ce qui est à l'origine de quelques défauts visibles (mais n'interférant pas avec les zones d'intérêt). Ce MNT a été utilisé pour la simulation de la génération/propagation du tsunami lié au glissement sous-marin du canyon de Lacaze-Hérault.
- Un MNT de résolution 83,33 m, de même emprise que celui utilisé par Pedreros et al. (2007) lors des études de cas pour le secteur ouest du Golfe du Lion (s'étendant depuis le sud de Port-la-Nouvelle au Nord jusqu'aux environs de Saint-Cyprien au sud). Il a été établi en valorisant les données Litto3D autour de Leucate-Le Barcarès et les données du SHOM (Histolitt) en dehors de l'emprise Litto3D utilisée, complétées par les données SRTM à terre et GEBCO / Ifremer en dehors de l'emprise des données Histolitt. Ce MNT a été utilisé pour les simulations de propagation du tsunami généré par le glissement sous-marin du canyon de Lacaze-Hérault.
- Deux MNT de résolution 27,78 m, focalisés sur Leucate-Barcarès d'une part et Sainte-Marie-Plage d'autre part, établis selon la même méthode que précédemment (Litto3D et Histolitt). Ces MNT ont été utilisés pour les simulations de propagation du tsunami généré par le glissement sous-marin du canyon de Lacaze-Hérault.



Illustration 8 - Aperçu du MNT (maillage de 250 m) utilisé sur le Golfe du Lion pour les simulations numériques (altitude en m - l'axe vertical n'est pas à l'échelle)

- Deux MNE de résolution 9,26 m, focalisés sur Leucate-Barcarès d'une part et Sainte-Marie-Plage d'autre part, établis directement à partir des données Litto3D selon la méthode exposée au paragraphe 3.2.2. Ces MNE ont été utilisés pour les simulations de propagation du tsunami généré par le glissement sous-marin du canyon de Lacaze-Hérault et une première estimation de la submersion induite.
- Un MNE de résolution 1 m, correspondant à un secteur limité de Leucate (Illustration 9), directement issu des données Litto3D selon la méthode exposée au paragraphe 3.2.2. Ce MNE a été utilisé pour les simulations de submersion à terre par le tsunami généré par le glissement sous-marin du canyon de Lacaze-Hérault.

En termes de bathymétrie, on peut noter que la bathymétrie très plate du talus continental du Golfe du Lion constitue un facteur aggravant vis-à-vis du risque tsunami, car elle permet une propagation aisée et une amplification potentiellement significative des vagues à l'approche de la côte. On pourra également signaler l'impact que peuvent présenter les lagunes en cas de tsunami important : si les vagues parviennent à franchir les cordons dunaires isolant les lagunes de la mer, ou à pénétrer dans les canaux d'accès, les conséquences du tsunami peuvent également affecter les terres situées sur la rive opposée de la lagune. De tels phénomènes ont par exemple été constatés au Sri Lanka lors du tsunami de Sumatra en 2004 (Garcin *et al.*, 2007).



Illustration 9 - Aperçu du MNE (maillage de 1 m) utilisé sur Leucate pour les simulations de submersion (altitude en m - l'axe vertical n'est pas à l'échelle)

Emboitement et emprises des rangs de calcul

La méthode mise en œuvre consiste à enchainer les calculs sur des grilles emboitées, dont les emprises diminuent et les résolutions s'améliorent au fur et à mesure que l'on se rapproche de la zone d'intérêt.

L'objectif initial des simulations visaient à simuler finement les effets du tsunami sur le secteur de Leucate. Toutefois, compte-tenu de la faible submersion simulée, il a été choisi de s'intéresser également au secteur de Sainte-Marie-Plage, qui semblait plus impacté au vu des premières simulations (Pedreros *et al.*, 2007). Deux zones d'intérêt ont donc finalement été traitées : Leucate d'une part, et Sainte-Marie-Plage d'autre part.

Au final, 4 à 5 rangs de calcul ont été mis en œuvre sur le secteur de l'étude, à partir des MNT et MNE présentés au paragraphe précédent :

- Rang 0 : Golfe du Lion, résolution de 250 m ; Génération et propagation du tsunami sous GEOWAVE ;
- Rang 1 : Côte du département des Pyrénées-Orientales (66), résolution de 83,33 m ; Propagation du tsunami sous GEOWAVE ;
- Rang 2 : résolution de 27,78 m ; Propagation du tsunami sous GEOWAVE :
 - Côte au niveau de l'Étang de Leucate ;
 - Côte au niveau de Sainte-Marie-Plage ;
- Rang 3 : résolution de 9,26 m ; Propagation du tsunami sous GEOWAVE ;
 - Côte au niveau de Port-Leucate ;
 - Côte au niveau de Sainte-Marie-Plage ;
- Rang 4 : Zoom de la côte au niveau de Port-Leucate ; résolution de 1 m ; Submersion à terre sous SURFWB ;



L'Illustration 10 présente l'enchainement de ces rangs de calcul et l'emprise des grilles utilisées.

Illustration 10 - Enchainement des grilles suivant le rang de calcul sur le site de Leucate-Barcarès

4.3. SCÉNARIO DU GLISSEMENT DE TERRAIN SOUS-MARIN DE LACAZE-HÉRAULT SUR LEUCATE-BARCARÈS

4.3.1. Conditions de forçage

Prise en compte de la marée

La marée en Méditerranée reste de faible amplitude. À Port-la-Nouvelle (port de référence le plus proche de la zone d'intérêt), le SHOM annonce une plus basse marée astronomique (PBMA) de +36 cm et une plus haute marée astronomique (PHMA) de +84 cm, pour un niveau moyen de +59 cm (valeurs exprimées par rapport au zéro hydrographique).

Compte-tenu de la précision des données issues des levers Lidar, il a été choisi de retenir la PHMA pour les simulations numériques. L'écart entre le zéro hydrographique et le zéro IGN étant de -0,427 m à Port-la-Nouvelle, la valeur de marée finalement retenue est de +0,413 m (IGN69).

Du fait des résolutions des grilles de calcul et des profondeurs considérées, la marée n'a été prise en compte qu'aux rangs 3 (résolution de 9 m) et 4 (résolution de 1 m).

Caractérisation du glissement de terrain

Parmi les sources tsunamigènes d'origine gravitaire utilisables dans le code GEOWAVE (paragraphe 3.1.1), le glissement en translation (« slide ») a été retenu pour décrire le glissement, compte tenu de ses caractéristiques géométriques (le glissement se propageant vers le fond du canyon).

La simulation numérique de la source s'appuie sur quelques caractéristiques simples du glissement (Watts *et al.*, 2003) :

- Position initiale du centre de gravité de la masse déplacée ;
- Direction du glissement ;
- Profondeur du milieu du glissement ;
- Pente moyenne du glissement ;
- Caractéristiques géométriques maximales du volume glissé (longueur, largeur, épaisseur) ;
- Densité du matériau glissé.

Les caractéristiques retenues pour ces paramètres ont été estimées à partir des travaux de référence, et notamment de ceux de l'Ifremer (Cattaneo, 2007). Les premières simulations ont été menées directement avec les mêmes caractéristiques que celles menées en 2007 (Pedreros *et al.*, 2007), mais les résultats ont montré que la submersion sur Leucate-Barcarès était quasi-nulle. Le glissement de terrain a donc été légèrement déplacé, d'environ 3,5 km vers le sud-est, tout en restant en bordure du canyon. Cette configuration reste parfaitement réaliste, compte-tenu de la précision des informations sur l'instabilité, et permet d'obtenir une submersion un peu plus importante sur les plages de Leucate-Barcarès.

Les caractéristiques du glissement finalement retenu sont présentées dans le tableau de l'Illustration 11.

Paramètres	Valeurs retenues
Position initiale du centre de gravité	N 42°37'51.3"
(WGS 84)	E 003°44'10.2"
Position initiale du centre de gravité équivalente	X= 760 464 m
(Lambert 93)	Y= 6 170 420 m
Direction du glissement	75 °
(exprimé par rapport au nord, sens horaire)	(soit est légèrement nord)
Profondeur du glissement	339 m
Pente moyenne du glissement	15 °
Longueur maximale du volume glissé	2 000 m
Largeur maximale du volume glissé	1 000 m
Épaisseur maximale du volume glissé	55 m
Densité du matériau glissé	2

Illustration 11 - Paramètres retenus pour la description du glissement du canyon de Lacaze-Hérault
Si l'on estime le volume glissé à partir de la formulation de McAdoo *et al.* (2000) comme étant la moitié du produit des 3 dimensions caractéristiques (longueur, largeur, hauteur), cela correspond à un volume de l'ordre de 55 millions de m³.

4.3.2. Résultats des simulations

La durée simulée est de 75 minutes au total, afin de visualiser l'ensemble des phénomènes sur la zone d'intérêt (Leucate-Barcarès).

Rang 0 (résolution de 250 m)

• Temps d'arrivée

Les temps d'arrivée du tsunami ont été estimés à partir des simulations menées au rang 0, en calculant à quel instant une perturbation de plus de 1 cm était détectée en chaque point. Ils peuvent donc différer légèrement de temps calculés de manière théorique uniquement à partir de la bathymétrie, si les premières perturbations s'avèrent inférieures à 1 cm.

De par la position géographique du glissement et la bathymétrie, les résultats (Illustration 12) montrent une arrivée progressive des vagues depuis le Cap-Creus en Espagne (20 minutes) jusqu'à la Grande-Motte et les Saintes-Maries-de-la-Mer (1 heure). Vis-à-vis de la zone d'intérêt, on notera notamment que le Canet-en-Roussillon est atteint en environ 35 minutes, Leucate en 40 minutes et Port-la-Nouvelle en 45 minutes environ.



Illustration 12 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Temps d'arrivée (en minutes) du tsunami généré par le glissement dans le Golfe du Lion

• Hauteurs d'eau maximales

L'Illustration 13 présente l'élévation maximale du plan d'eau calculée au cours des 75 minutes simulées. Ces résultats montrent que si la hauteur d'eau maximale atteint 4,5 m à la source, les vagues s'atténuent rapidement pour atteindre une hauteur maximale métrique, voire infra-métrique à la côte. On remarque toutefois la directivité particulière du phénomène, avec des « faisceaux » beaucoup moins atténués en direction de Sainte-Marie-Plage et de Sète-Cap d'Agde, où les hauteurs d'eau maximales restent proches du mètre. L'orientation de ces « faisceaux » est directement liée à la directivité du glissement sous-marin, et donc à l'orientation du canyon sous-marin.





À cette échelle, la submersion estimée par le code GEOWAVE affecte significativement Sainte-Marie-Plage, Sète, Palavas-les-Flots et la Camargue.

Rang 1 (résolution de 83 m)

La carte de l'Illustration 14 présente l'élévation maximale de plan d'eau au rang 1 (résolution de 83 m). Ces résultats montrent l'importance des phénomènes à Leucate-Barcarès, où les vagues à la côte dépassent largement le mètre, alors qu'elles restent moins importantes plus au nord ou plus au sud (typiquement moins de 1 m).



Illustration 14 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 1 (83 m)

À cette résolution, on constate également que les premières estimations de submersion par le code GEOWAVE prévoient une importante inondation au niveau de Sainte-Marie-Plage, où la côte s'avère particulièrement basse.

Rang 2 (résolution de 28 m)

Leucate-Barcarès

L'Illustration 15 présente l'élévation maximale du plan d'eau au cours de la simulation sur le secteur de Leucate-Barcarès. On remarque que malgré des hauteurs d'eau à la côte pouvant atteindre (voire dépasser) les 2 m, la submersion reste limitée et cantonnée à la plage, et peut localement atteindre le talus qui sépare la plage de l'urbanisation. Cet effet limité du tsunami peut s'expliquer en partie par l'influence des barres sous-marines (visibles à l'Illustration 10) qui en provoquant le déferlement des

vagues vont en dissiper une partie de l'énergie. Cet effet est encore plus visible aux rangs plus résolus (cf. paragraphes suivants).

On remarque également que les vagues ne se propagent pas significativement dans la lagune : elles sont insuffisantes pour franchir le lido, et leur propagation dans les canaux et aménagements reliant la lagune à la mer reste très limitée. Au vu de l'ampleur des vagues attendues, les terres situées à l'ouest de la lagune devraient donc être totalement à l'abri d'un tsunami de ce type.



Illustration 15 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 2 (28 m) sur Leucate-Barcarès

• Sainte-Marie-Plage

L'élévation maximale du plan d'eau au niveau de Sainte-Marie-Plage au cours des 75 minutes simulées est présentée à l'Illustration 16. On remarque que malgré l'importante inondation calculée au rang 1 (résolution de 83 m), plus aucune inondation n'apparait à cette résolution (28 m).



Illustration 16 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 2 (28 m) sur Sainte-Marie-Plage

Ceci s'explique par l'apport d'une meilleure résolution : l'intégration des données Litto3D a permis, dès le rang 2, de prendre en compte dans le calcul la topobathymétrie fine du littoral, et notamment la présence de barres sous-marines en forme de « croissants » devant la plage (visibles à l'Illustration 10) et des dunes sur la plage :

- Les barres-sous-marines ont tendance à provoquer le déferlement des vagues, dissipant ainsi une partie de leur énergie et limitant par conséquent leur impact à terre ;
- Les dunes s'avèrent suffisamment hautes pour arrêter les vagues et protéger les terres ; pour mémoire, la méthode ne permet pas de juger de la résistance des dunes face aux vagues (emportement, brèches...), mais compte-tenu de la résolution (28 m), on peut les supposer suffisamment importantes pour résister à un tsunami de faible ampleur.

Ce résultat montre bien l'importance de la résolution sur la fiabilité des résultats : là où un calcul « grossier » peut indiquer une submersion très importante, la prise en compte de données très fines permet de constater que la côte est finalement protégée. On peut noter que l'effet inverse est également envisageable (les basses résolutions ne permettant pas de prendre en compte l'effet de discontinuités liées par exemple à des aménagements à travers les dunes...).

Rang 3 (résolution de 9 m)

• Leucate

L'Illustration 17 présente les élévations maximales du plan d'eau à une résolution de 9 m au niveau de Leucate.

L'effet des barres sous-marines (observables à l'Illustration 10) apparait très nettement sur les hauteurs d'eau, du fait du déferlement des vagues qu'elles provoquent. La submersion estimée à cette résolution est significative, tout en restant cantonnée à la plage : les dunes côtières protègent dans l'ensemble bien l'arrière-plage, et le talus marquant la limite de l'urbanisation n'est atteint que très localement.



Illustration 17 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 3 (9 m) au niveau de Leucate

• Sainte-Marie-Plage - Torreilles-Plage

La carte de l'élévation maximale du plan d'eau (Illustration 18) confirme que la submersion sur ce secteur reste cantonnée à la plage, malgré des hauteurs d'eau maximales pouvant dépasser les 2 mètres à la côte : la dune littorale suffit à contenir l'inondation et à protéger les terres, et les barres sous-marines atténuent l'énergie des vagues en en provoquant le déferlement. À titre d'illustration, le calcul a été mené sur cette même grille sans prendre en compte le déferlement des vagues ; le résultat, présenté à l'Illustration 19, montre une submersion à peine plus importante, l'eau pouvant alors monter plus franchement sur la dune sans toutefois la franchir significativement. On conçoit toutefois qu'avec une dune moins haute, les résultats auraient pu être très différents, d'où l'importance de la prise en compte du phénomène de déferlement et d'une haute résolution pour les données topo-bathymétriques.



Du fait de cette submersion très limitée, les calculs sur ce secteur n'ont pas été poussés à une résolution plus fine.

Illustration 18 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 3 (9 m) entre Sainte-Marie-Plage et Torreilles-Plage



Illustration 19 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée <u>sans déferlement</u> sur 75 minutes de simulation au rang 3 (9 m) entre Sainte-Marie-Plage et Torreilles-Plage

Rang 4 (résolution de 1 m)

Seule une zone d'extension très limitée dans le secteur de Leucate a fait l'objet d'un calcul de submersion à haute résolution avec le code SURFWB.

La carte de l'Illustration 20 présente les hauteurs d'eau obtenues à terre lors de cette simulation, réalisée avec le code SURFWB. Ce résultat confirme une submersion très limitée, cantonnée à la plage; seules quelques vagues parviennent à franchir les dunes, sans que cela ne représente toutefois un volume très significatif.



Illustration 20 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 4 (1 m) au niveau de Leucate

L'Illustration 21 présente les vitesses maximales atteintes par les courants sur cette même grille de calcul. On constate que les vitesses maximales sont atteintes pendant la phase de flux : elles peuvent atteindre plus de 4,5 m/s à proximité immédiate du rivage, mais elles restent inférieures à 2 m/s dans les secteurs où l'eau parvient localement à franchir la dune (vitesses pouvant toutefois suffire à générer des dommages).



Illustration 21 - Scénario du glissement de Lacaze-Hérault : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 75 minutes de simulation au rang 4 (1 m) au niveau de Leucate

5. Site de Bandol : scénarios simulés et résultats

5.1. SCÉNARIOS SIMULÉS

Sources sismiques

Le scénario retenu correspond à un <u>séisme algérien de magnitude 7.5</u>. Les caractéristiques du séisme (magnitude, position, mécanismes au foyer) ont été fournies par le CEA, qui a sélectionné cet événement comme plausible et *a priori* le plus dommageable pour le site de Bandol.

La propagation à l'approche de la zone de Bandol - Sanary - Six-Fours et la submersion à terre sur ces 3 communes ont été simulées, sur la base des valeurs obtenues par le CEA (simulation de la génération et de la propagation du tsunami à travers la Méditerranée).

Sources gravitaires

Pour le site de Bandol, aucun mouvement gravitaire majeur plausible ne semble conduire à un tsunami significatif affectant la zone (Pedreros *et al.*, 2007). Aucune simulation fine de submersion pour un événement gravitaire n'a donc été menée sur le site de Bandol.

5.2. GRILLES DE CALCUL UTILISÉES SUR LE SITE DE BANDOL

MNT et MNE utilisés

La génération du tsunami et sa propagation à travers la Méditerranée jusqu'à la baie de Bandol ont été simulées par le CEA, qui a fourni au BRGM les caractéristiques « instantanées » des vagues à t₀+1h20min (hauteurs d'eau et vitesses). Pour le calcul de propagation et d'inondation, les résolutions utilisées pour ces simulations par calculs emboités (les emprises et emboitements sont présentés à l'Illustration 24) sont au nombre de 2, tous les calculs ayant été menés en projection Mercator :

 Un MNT de résolution 40,5 m couvrant à peu près l'emprise des données fournies par le CEA : ce MNT est directement issu de celui généré par Pedreros *et al.* (2007) pour les études de cas de tsunamis sur la côte méditerranéenne française. Il a donc été établi à partir des données bathymétriques du SHOM (Histolitt) et de l'Ifremer, complétées par les données SRTM à terre. Le rang 0 pouvant être assimilé aux calculs menés préalablement par le CEA, ce MNT a été utilisé au rang 1 des simulations de propagation du tsunami généré par un séisme algérien dans la baie de Bandol (code GEOWAVE).



Illustration 22 - Aperçu du MNT (maillage de 40,5 m) utilisé sur la Baie de Bandol pour les simulations numériques (altitude en m - l'axe vertical n'est pas à l'échelle)

- Un MNE de résolution 2,5 m, focalisé sur les communes de Bandol, Sanary-sur-Mer et Six-Fours-les-Plages, constitué à partir des données Litto3D fournies par l'IGN et le SHOM suivant la méthodologie présentée au paragraphe 3.2.2 et complété par les sondes du SHOM (Histolitt) en dehors de l'emprise du Lidar bathymétrique. Ce MNE a été découpé en 4 grilles distinctes pour des raisons pratiques :
 - Une grille focalisée sur Bandol et le Nord de Sanary-sur-Mer ;
 - Une grille sur la Pointe de la Cride, à Sanary-sur-Mer, incluant les plages de Beau-Cours et de Portissol;
 - Une grille incluant la majeure partie de Six-Fours-les-Plages ;
 - Une grille focalisée sur les îles des Embiez.

Pour mémoire, avant d'être réalisées à une résolution de 2,5 m, les simulations de submersion ont été menées à une résolution de 5 m. La résolution à 2,5 m apporte toutefois une plus grande finesse aux résultats.



Illustration 23 - Aperçu du MNE (maillage de 2,5 m) utilisé sur Bandol pour les simulations de submersion (altitude en m - l'axe vertical n'est pas à l'échelle)

En termes de bathymétrie, on peut noter que la présence d'un talus continental relativement large dans le secteur (typiquement 15 à 20 km entre Marseille et Six-Fours-les-Plages) peut provoquer une certaine amplification d'un tsunami venant du large vers la côte. Les simulations menées sur de plus grandes emprises (notamment pour simuler le même événement sur le site d'Antibes) montrent d'ailleurs une amplification particulièrement importante dans la Baie de la Ciotat, en face de laquelle le talus est le plus large.

Emboitement et emprises des rangs de calcul

La méthode mise en œuvre consiste à enchainer les calculs sur des grilles emboitées, dont les emprises diminuent et les résolutions s'améliorent au fur et à mesure que l'on se rapproche de la zone d'intérêt.

Au final, 2 rangs de calcul ont été mis en œuvre sur le secteur de l'étude, à partir des MNT et MNE présentés au paragraphe précédent :

- Rang 1 : de Cassis à Six-Fours-les-Plages, résolution de 40,5 m ; propagation du tsunami initié par le CEA sous GEOWAVE ;
- Rang 2 : résolution de 2,5 m ; Submersion à terre sous SURFWB ;
 - Bandol Nord de Sanary-sur-Mer;
 - Pointe de la Cride ;
 - Six-Fours-les-Plages;
 - Iles des Embiez.



L'Illustration 24 présente l'enchainement de ces rangs de calcul et l'emprise des grilles utilisées.

Illustration 24 - Enchainement des grilles suivant le rang de calcul sur le site de Bandol

5.3. SCÉNARIO D'UN SÉISME ALGÉRIEN SUR BANDOL

5.3.1. Conditions de forçage

Prise en compte de la marée

Là encore, les variations du niveau de la mer sous l'effet de la marée restent de très faible amplitude. À Toulon (port de référence le plus proche de la zone d'intérêt), le SHOM annonce une plus basse marée astronomique (PBMA) de +17 cm et une plus haute marée astronomique (PHMA) de +64 cm, pour un niveau moyen de +42 cm (valeurs exprimées par rapport au zéro hydrographique).

Compte-tenu de la précision des données issues des levers Lidar, il a été choisi de retenir la PHMA pour les simulations numériques. L'écart entre le zéro hydrographique et le zéro IGN étant de -0,253 m à Toulon, la valeur de marée finalement retenue est de +0,387 m (IGN69).

Du fait des résolutions des grilles de calcul et des profondeurs considérées, la marée n'a été prise en compte qu'au rang 2 (résolution de 2,5 m).

Génération du tsunami

Sur ce scénario, la génération du tsunami n'a pas été simulée : le forçage des simulations a été réalisé à partir de simulations menées par le CEA sur ce même cas

(les paramètres de la faille et du séisme étant présentés à l'Illustration 43, dans le cadre de la simulation de la génération du tsunami pour le site d'Antibes). En l'absence de conditions aux limites (séries temporelles tout le long du bord de la grille de calcul), c'est un « aperçu instantané » de la situation en termes de hauteurs d'eau et de vitesses des courants au large de la baie de Bandol (Illustration 25).



610000 615000 620000 625000 630000 635000 640000 645000 650000

Illustration 25 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation instantanée du plan d'eau (couleurs, en mètres) et vitesses des courants (flèches, en m/s) fournies par le CEA 1h20 après le séisme (résolution de 13,5 m)

L'exploitation de ces données a nécessité quelques adaptations du code GEOWAVE : les modules de génération du tsunami et de lecture de conditions aux limites ont été désactivés, et le code utilise directement les hauteurs d'eau et vitesses fournies pour continuer la propagation jusqu'à la côte.

Il est cependant important de noter que cette méthode ne permet de prendre que les phénomènes déjà présents dans l'emprise à l'instant considéré (1h20), mais que toute autre vague (non visible sur l'Illustration 25 car encore trop éloignée de la côte) ne peut être prise en compte dans les calculs. On peut cependant supposer que l'essentiel des phénomènes intervient suite à ces premières vagues.

5.3.2. Résultats des simulations

La durée simulée est de 17 minutes après la propagation fournie par le CEA, soit au total 1h 37min après le séisme. Cette durée peut sembler assez courte vis-à-vis de la

problématique, mais certaines instabilités numériques complexifient le calcul au-delà de cette durée, et l'ensemble des phénomènes visibles à l'Illustration 25 atteint la côte en moins de 17 min (au-delà, seuls subsistent des phénomènes résiduels : résonnances, réflexions, ondes piégées... indépendamment des éventuelles vagues qui pourraient survenir après, mais qui ne peuvent être prises en compte, comme indiqué au paragraphe 5.3.1). On peut toutefois supposer que l'essentiel des phénomènes intervient dans ces premières minutes, et que les phénomènes plus tardifs présentent moins d'intérêt par rapport aux objectifs du projet ALDES (alerte).

Rang 1 (résolution de 40 m)

L'élévation maximale du plan d'eau est présentée à l'Illustration 26 (nécessairement faussée au large en raison de la méthode mise en œuvre). On remarque que les hauteurs d'eau restent limitées (globalement inférieures à 1 m au large), mais que des phénomènes locaux à la côte peuvent amplifier les vagues. C'est notamment le cas dans la Baie de la Ciotat, où l'impact du tsunami se fait le plus sentir, avec des hauteurs d'eau à terre pouvant dépasser les 4 m (plus typiquement 2,5 à 3 m), et une submersion estimée à cette échelle déjà significative. Dans le secteur de Bandol-Sanary-Six-Fours, les hauteurs d'eau restent modérées, généralement de l'ordre de 1 m à 1,5 m, avec localement une amplification à 2 m - 2,5 m (plage de Renecros, de Beau-Cours et de Portissol, port de la Coudoulière et passages entre les Embiez et le continent).



Illustration 26 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 1 (40 m) dans le secteur de Bandol

Rang 2 (résolution de 2,5 m)

• Secteur de Bandol - Sanary Nord

L'élévation maximale du plan d'eau au niveau de Bandol (Illustration 31) montre que si la partie ouest de la zone (Anse de Renecros, ile de Bendor) peut être atteinte par des hauteurs dépassant les 2 m, le port de Bandol, les plages de l'est de Bandol et les plages du Nord de Sanary-sur-Mer restent plus épargnées, avec des hauteurs d'eau ne dépassant guère les 1,5 m.



Illustration 27 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de Bandol -Sanary Nord

La zone submergée par le tsunami (Illustration 28) reste par conséquent très limitée : seuls les plages, esplanades, promenades côtières et parkings sont affectés par des hauteurs d'eau pouvant localement dépasser le mètre. On notera en particulier parmi les secteurs les plus affectés par la submersion la plage de Renecros, la plage et le port de l'ile de Bendor, le parking au sud du terrain de football en face de l'ile de Bendor, l'esplanade à l'est de l'école de voile, le parking du casino et les plages de l'est de Bandol. Très peu de bâtiments sont cependant atteints par l'eau, et les hauteurs d'eau restent très modérées en dehors de plages (en général inférieures à 1 m).



Illustration 28 - Scénario d'un séisme algérien : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de Bandol - Sanary Nord

Les vitesses des courants (Illustration 35) peuvent être localement importantes et dépasser les 3 m/s. Ceci ne concerne cependant que les zones situées « en mer », et plus particulièrement les passages étroits où l'eau se concentre (entrée de l'Anse de Renecros, détroit de l'ile de Bendor, entrée du port de Bandol...). À terre, les courants restent typiquement inférieurs à 1 à 1,5 m/s, sauf très localement où ils peuvent atteindre 3 à 4 m/s (par exemple dans la baie de Renecros ou près de l'école de voile). Ces vitesses peuvent toutefois s'avérer suffisantes pour générer des dommages et emporter des personnes (Monfort *et al.*, 2012). On peut également noter qu'à l'exception de quelques secteurs exposés au sud, les vitesses maximales sont globalement atteintes pendant les phases de reflux.



Illustration 29 - Scénario d'un séisme algérien : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de Bandol - Sanary Nord

• Secteur de la Pointe de la Cride

La pointe de la Cride s'avère globalement assez escarpée, ce qui permet à la côte d'être relativement à l'abri des dommages causés par le tsunami (à la fois en raison de l'élévation de la côte, mais aussi car les fortes pentes sous-marines ne permettent pas une amplification importante du tsunami). Les secteurs les plus exposés sont donc finalement constitués des plages de Beau-Cours et de Portissol.

L'élévation maximale du plan d'eau dans le secteur (Illustration 30) confirme cette exposition des plages, puisqu'elles sont atteintes par des vagues pouvant dépasser les 3 m alors que la côte rocheuse du secteur n'est atteinte que par des vagues atteignant les 1,5 m, voire 2 m.



Illustration 30 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de la Pointe de la Cride

Par conséquent, la submersion n'est significative qu'au niveau de ces plages, avec des hauteurs d'eau maximales à terre atteignant les 2 m à la plage Beau-Cours, et les 3 m au sud de la plage de Portissol, alors qu'elles restent typiquement inférieures à 1 m ailleurs (Illustration 31).



Illustration 31 - Scénario d'un séisme algérien : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de la Pointe de la Cride

Les vitesses maximales atteintes par les courants (Illustration 32) restent dans l'ensemble modérées, inférieures à 1 m/s, à l'exception de la plage de Portissol (et très localement sur celle de Beau-Cours) au large de laquelle elles peuvent atteindre 5 m/s. À terre, des vitesses maximales de 2 à 4 m/s ont été localement calculées au sud de ces 2 plages, mais elles restent généralement comprises entre 0,5 et 1 m/s. Ces vitesses peuvent toutefois s'avérer suffisantes pour emporter des personnes, seul un adulte sportif pouvant y résister pour des hauteurs d'eau inférieures à 0,5 m (Monfort *et al.*, 2012). Là encore, c'est majoritairement pendant les phases de reflux que les vitesses maximales sont atteintes, sauf très localement sur les côtes exposées au sud.



Illustration 32 - Scénario d'un séisme algérien : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de la Pointe de la Cride

• Secteur de Six-Fours-les-Plages

Cette grille constitue la plus grande parmi les 4 utilisées au rang 2 des simulations, puisqu'elle inclue le port de Sanary et toute la côte de Six-Fours-les-Plages jusqu'au Brusc.

L'élévation maximale du plan d'eau reste plus modérée que sur les 2 grilles précédentes (Illustration 33) : elle atteint typiquement 1,3 à 1,5 m, sauf au port de la Coudoulière où elle approche les 1,8 m.



Illustration 33 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de Six-Foursles-Plages

À terre, la submersion reste là encore très limitée (Illustration 34). Les hauteurs d'eau à terre ne dépassent quasiment jamais 1 m (toujours immédiatement au bord du rivage), et les zones inondées sont très restreintes : les plus significatives sont sur les quais du port de Sanary-sur-Mer (moins de 0,5 m), l'extrême nord de la plage de Bonne-Grâce (0,8 m), l'Anse de la Coudoulière (au maximum 1 m sur la plage au nord du port, 0,5 à

1 m sur les quais du port, 1 m sur les épis de la plage au sud du port), la plage au sud de la pointe du Cros (0,5 m) et les quais du port du Brusc (surtout au sud, avec au maximum 0,5 m d'eau).



Illustration 34 - Scénario d'un séisme algérien : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de Six-Fours-les-Plages (au Nord à gauche, au Sud à droite)

Les courants maximaux restent limités (Illustration 35), avec des vitesses au large de l'ordre de 1 m/s et des vitesses à la côte de 0,3 à 0,5 m/s. En mer, seuls certains passages étroits et caps connaissent des vitesses supérieures, pouvant localement atteindre 3 à 5 m/s : il s'agit notamment des entrées des ports de Sanary-sur-Mer et de la Coudoulière et de la Pointe du Carabinier. À terre, les vitesses restent généralement inférieures à 1 m/s, sauf très localement (nord de la plage de Bonne-Grâce et anse de la Coudoulière, notamment). Là encore, les vitesses des courants sont globalement maximales pendant les phases de reflux.



Illustration 35 - Scénario d'un séisme algérien : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur de Six-Fours-les-Plages

• Secteur des Embiez

Il convient au préalable de noter que les calculs menés dans le secteur des Embiez peuvent être légèrement faussés en raison de la méthode mise en œuvre pour le couplage avec les résultats du CEA : En effet, la propagation du tsunami avec le code GEOWAVE à partir de la situation présentée à l'Illustration 25 permet le calcul des conditions aux limites aux bordures des grilles filles du rang 2 (conditions de hauteur d'eau et de vitesse à chaque instant). Cependant, à t_0 +1h20, les premières perturbations ont déjà atteint les îles des Embiez (cf. Illustration 25), et ces ondes déjà présentes dans l'emprise du rang 2 « Embiez » ne peuvent être prises en compte dans le calcul à cette résolution : la simulation présentée ci-après ne tient donc compte que des vagues qui ne sont pas déjà dans l'emprise à l'instant initial des calculs (t_0 +1h20).

L'élévation maximale du plan d'eau (Illustration 36) montre des hauteurs d'eau relativement importantes (supérieures à 2 m) au niveau du détroit du Grand Gaou, très localement sur la façade nord-ouest de l'ile de la Tour Fondue et sur la côte à l'est du Petit Gaou. Le port des Embiez, comme le côté nord du Gaou, restent par contre plus abrités, avec des élévations inférieures à 0,8 m.



Illustration 36 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur des Embiez

Compte-tenu de la morphologie de côte, la submersion reste très limitée et affecte essentiellement le détroit du Grand Gaou, où la profondeur est faible et la côte basse : sur l'île de la Tour Fondue, la submersion affecte surtout les environs du tennis et du

marais salant, et localement les petites criques de l'ouest ; l'île du Grand Gaou est affectée par une faible submersion sur tout son pourtour, sans que l'eau ne pénètre significativement (la côte nord de l'ile est toutefois plus affectée, par une hauteur d'eau restant inférieure à 0,5 m) ; le Petit Gaou est affecté par une hauteur d'eau qui peut atteindre 0,8 m au niveau du restaurant ; la route qui mène à l'île du Petit Gaou sur le continent peut être submergée significativement, avec de faibles hauteurs d'eau (inférieures à 0,5 m) susceptibles d'atteindre les bâtiments et la route.



Illustration 37 - Scénario d'un séisme algérien : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur des Embiez

Les vitesses maximales des courants (Illustration 38) restent globalement inférieures à 1 à 1,5 m/s, mais des accélérations importantes peuvent intervenir dans les passages étroits et peu profonds : c'est localement le cas sur la façade ouest de l'île de la Tour Fondue (vitesses de 2,5 à 4 m/s). À terre, on notera que les vitesses au niveau du terrain de tennis de l'île de la Tour Fondue restent limitées (typiquement 1 m/s, au maximum 2,5 m/s), mais elles peuvent être plus élevées au niveau du restaurant de l'île du Petit Gaou (près de 3 m/s) ; sur la route qui conduit à l'île, les vitesses restent dans l'ensemble modérées (0,5 à 1 m/s), mais peuvent localement être élevées au niveau des habitations du sud (parfois supérieures à 3 m/s).



Illustration 38 - Scénario d'un séisme algérien : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 17 minutes de simulation au rang 2 (2,5 m) dans le secteur des Embiez

6. Site d'Antibes : scénarios simulés et résultats

6.1. SCÉNARIOS SIMULÉS

Les scénarios simulés et présentés dans le présent rapport sont au nombre de 4. Ils n'intègrent pas le scénario du glissement de terrain de l'aéroport de Nice en 1979, ayant provoqué un tsunami qui a affecté Antibes, scénario ayant déjà fait l'objet du rapport BRGM/RP-60353-FR (Le Roy *et al.*, 2011).

Sources sismiques

Le scénario retenu pour le site d'Antibes est le même que celui retenu pour Bandol (<u>séisme algérien de magnitude 7.5</u>). Toutefois, pour Antibes, la génération et la propagation du tsunami ont été intégralement simulées pour des raisons pratiques, contrairement au travail mené sur le site de Bandol.

En complément, un second scénario sismique a été simulé sur le site de Nice, inspiré de l'événement historique survenu en 1887 en Mer Ligure et ayant généré un tsunami sur les côtes italiennes. Afin de maximiser le phénomène, le scénario simulé correspond à un <u>séisme de magnitude 6.5 au niveau de la faille Marcel</u>, située dans la continuité du réseau de failles à l'origine de celui de 1887, mais juste au large de Nice. Les caractéristiques de ce séisme ont été choisies conformément à celles retenues par le CEA dans le cadre du projet ALDES. Ce scénario est classiquement jugé vraisemblable, et pourrait affecter significativement les côtes françaises (Larroque, 2009). Il convient toutefois de noter que d'après Larroque (2009), la présence d'un système en échelon pourrait toutefois être à l'origine d'un séisme de magnitude bien supérieure.

Sources gravitaires

Le scénario du **glissement de terrain de l'aéroport de Nice en 1979** a été simulé de manière détaillée depuis la source jusqu'à la submersion sur Antibes. Les résultats de ces travaux ont déjà fait l'objet du rapport BRGM/RP-60353-FR (Le Roy *et al.*, 2011), et ne sont donc que brièvement repris dans le présent rapport.

6.2. GRILLES DE CALCUL UTILISÉES SUR LE SITE D'ANTIBES

MNT et MNE utilisés

Plusieurs grilles ont été utilisées afin de simuler la génération et la propagation de tsunamis jusqu'au secteur d'Antibes, suivant les enchainements des grilles de calcul. L'ensemble de ces grilles a été utilisé en projection Mercator.

Un MNT de résolution 1 800 m couvrant la Méditerranée occidentale, depuis la côte algérienne jusqu'à la côte française et depuis la côte est de l'Espagne jusqu'à la Corse et la Sardaigne ; ce MNT est directement issu de ceux générés par Pedreros *et al.* (2007) pour les études de cas de tsunamis sur la côte méditerranéenne française. Il a donc été établi à partir des données du SHOM (Histolitt), et de l'Ifremer, complétées par les données GEBCO au large des côtes françaises et par les données SRTM à terre. Ce MNT a été utilisé au rang 0 du scénario « séisme algérien », pour simuler la génération du tsunami et sa propagation à travers la Mer Méditerranée (code GEOWAVE).



Illustration 39 - Aperçu du MNT (maillage de 1 800 m) utilisé sur la Méditerranée occidentale pour les simulations numériques (altitude en m - l'axe vertical n'est pas à l'échelle)

- Un MNT de résolution 600 m couvrant la Côte d'Azur depuis La Ciotat jusqu'à l'Italie ; ce MNT est directement issu de ceux générés par Pedreros *et al.* (2007) pour les études de cas de tsunamis sur la côte méditerranéenne française. Il a donc été établi à partir des données du SHOM (Histolitt) et de l'Ifremer, complétées par les données SRTM à terre. Ce MNT a été utilisé au rang 1 du scénario « séisme algérien », pour simuler la propagation du tsunami à l'approche de la côte française (code GEOWAVE).
- Un MNT de résolution 200 m couvrant la côte du département des Alpes-Maritimes ; ce MNT est directement issu de ceux générés par Pedreros *et al.* (2007) pour les études de cas de tsunamis sur la côte méditerranéenne française. Il a donc été établi à partir des données du SHOM (Histolitt) et de l'Ifremer, complétées par les données SRTM à terre. Ce MNT a été utilisé au rang 2 du scénario « séisme algérien », pour simuler la propagation du tsunami à l'approche de Nice (code GEOWAVE).

- Un MNT de résolution 66,67 m couvrant la Baie des Anges; ce MNT est directement issu de ceux générés par Le Roy *et al.* (2011) pour la simulation du tsunami généré par le glissement de terrain de l'aéroport de Nice en 1979. Il a donc été établi à partir des données du SHOM (Histolitt) et de l'Ifremer, complétées à terre par un MNT à 5 m fourni par le Conseil Général des Alpes-Maritimes. Ce MNT a été utilisé au rang 3 du scénario « séisme algérien », pour simuler la propagation du tsunami à l'approche de Nice (code GEOWAVE).
- Un MNE de résolution 22,22 m couvrant la côte est d'Antibes ; ce MNE est directement issu de ceux générés par Le Roy *et al.* (2011) pour la simulation du tsunami généré par le glissement de terrain de l'aéroport de Nice en 1979. Il a donc été établi à partir des données du SHOM (Histolitt) et de l'Ifremer, complétées par un MNT à 5 m fourni par le Conseil Général des Alpes-Maritimes et la couche « bâti » de la BDTopo de l'IGN à terre. Ce MNE a été utilisé au rang 4 du scénario « séisme algérien », pour simuler la propagation du tsunami à l'approche d'Antibes (code GEOWAVE).
- Un MNE de résolution 5 m couvrant le secteur d'Antibes La Salis ; ce MNE est directement issu de ceux générés par Le Roy *et al.* (2011) pour la simulation du tsunami généré par le glissement de terrain de l'aéroport de Nice en 1979. Il a donc été établi à partir des données du SHOM (Histolitt), complétées par un MNT à 5 m fourni par le Conseil Général des Alpes-Maritimes et la couche « bâti » de la BDTopo de l'IGN à terre. Ce MNE a été utilisé au rang 5 du scénario « séisme algérien », pour simuler la submersion à terre par le tsunami sur Antibes (code SURFWB).



Illustration 40 - Aperçu du MNE (maillage de 5 m) utilisé sur Antibes-La Salis pour les simulations de submersion (altitude en m - l'axe vertical n'est pas à l'échelle)

En termes de bathymétrie, on peut noter que la bathymétrie relativement abrupte dans la Baie des Anges ne permet pas véritablement d'amplification des vagues à l'approche de la côte, hormis au niveau d'Antibes où la présence d'un plateau sousmarin peu profond (moins de 100 m) large de 3 km permet une amplification significative des tsunamis, d'où des conséquences plus importantes.

Emboitement et emprises des rangs de calcul

La méthode mise en œuvre consiste à enchainer les calculs sur des grilles emboitées, dont les emprises diminuent et les résolutions s'améliorent au fur et à mesure que l'on se rapproche de la zone d'intérêt.

Au final, 6 rangs de calcul ont été mis en œuvre sur le secteur de l'étude, à partir des MNT et MNE présentés au paragraphe précédent :

- Rang 0: Méditerranée occidentale, résolution de 1 800 m; génération et propagation du tsunami lié au séisme algérien sous GEOWAVE;
- Rang 1 : Cote d'Azur, résolution de 600 m ; propagation du tsunami lié au séisme algérien sous GEOWAVE ;
- Rang 2 : Littoral des Alpes-Maritimes, résolution de 200 m ; propagation du tsunami lié au séisme algérien sous GEOWAVE ;
- Rang 3 : Baie des Anges, résolution de 66,67 m ; propagation du tsunami lié au séisme algérien sous GEOWAVE ;
- Rang4 : Antibes côte est, résolution de 22,22 m ; propagation du tsunami lié au séisme algérien sous GEOWAVE ;
- Rang 6 : Antibes la Salis, résolution de 5 m ; Submersion à terre sous SURFWB ;

L'Illustration 41 présente l'enchainement de ces rangs de calcul et l'emprise des grilles utilisées.



Illustration 41 - Enchainement des grilles suivant le rang de calcul sur le site d'Antibes

6.3. SCÉNARIO D'UN SÉISME ALGÉRIEN SUR ANTIBES

Ce scénario s'inspire du récent tsunami causé par le séisme de Boumerdes en 2003 : ce séisme de magnitude 6,8 avait généré un tsunami qui avait causé des dégâts aux Baléares et qui avait été observé en France (vagues d'une dizaine de centimètres).

6.3.1. Conditions de forçage

Prise en compte de la marée

Là encore, les variations du niveau de la mer sous l'effet de la marée restent de très faible amplitude. À Nice (port de référence le plus proche de la zone d'intérêt), le SHOM annonce une plus basse marée astronomique (PBMA) de +21 cm et une plus haute marée astronomique (PHMA) de +70 cm, pour un niveau moyen de +47 cm (valeurs exprimées par rapport au zéro hydrographique).

Compte-tenu de la précision des données issues des levers Lidar, il a été choisi de retenir la PHMA pour les simulations numériques. L'écart entre le zéro hydrographique et le zéro IGN étant de -0,339 m à Nice, la valeur de marée finalement retenue est de +0,361 m (IGN69).

Du fait des résolutions des grilles de calcul et des profondeurs considérées, la marée n'a été prise en compte qu'aux rangs 4 et 5 (résolutions de 22 m et 5 m).

Génération du tsunami

La description de la source sismique a été fournie directement par le CEA. Il s'agit d'un séisme « virtuel » de magnitude 7,5, localisé au large de la ville de Constantine (Algérie), au niveau d'une faille inverse (chevauchement et compression liée à la remontée Nord-Ouest de la plaque africaine contre la plaque eurasienne).

L'Illustration 42 présente les principales caractéristiques d'une faille utilisées en sismologie. Ces caractéristiques sont ensuite exploitées par le code GEOWAVE, suivant les formulations proposées par Okada (1985), pour calculer la déformation initiale du plan d'eau causée par le séisme. Les calculs ont été menés en supposant une rupture instantanée en mouvement inverse de l'ensemble du plan de faille, mais il est possible de prendre en compte une vitesse de rupture pour introduire une dynamique dans la rupture de la faille.



Illustration 42 - Caractéristiques géométriques d'une faille normale (extension liée à l'écartement de plaques)
Paramètres	Valeurs retenues
Position du centroïde de la faille	N 6° 23' 54,5"
(WGS 84)	E 37° 17' 26,2"
Position du centroïde de la faille	X= 712 273 m
(Mercator)	Y= 4 479 690 m
Profondeur du centroïde de la faille	11 km
Longueur de la faille	80 km
Largeur de la faille	22 km
Mécanismes au foyer (strike / dip / rake)	81,56 / 40 / 90
Magnitude du séisme	7,5
Profondeur d'eau à l'épicentre	2 684 m
Déplacement	3,854 m

Illustration 43 - Scénario d'un séisme algérien : Paramètres retenus pour la description du séisme

6.3.2. Résultats des simulations

Le projet prévoit la comparaison des estimations de dommages pour un même site et un même scénario (WP5) sur la base des simulations d'inondation obtenues par le CEA et par le BRGM, chacun ayant des procédures et des outils spécifiques. Ces comparaisons d'évaluation de dommages sont présentées par Monfort *et al.* (2012)¹.

À cette fin, dans cette phase du projet, les calculs ont été menés avec les <u>équations de</u> <u>Saint-Venant</u> (et non avec les équations de Boussinesq, comme le permet GEOWAVE), moyennant une hypothèse d'« ondes longues » (« shallow-water » : hypothèse permettant une simplification des équations si la longueur d'onde des vagues est très supérieure aux profondeurs traversées). Dans le cas d'un tsunami d'origine sismique, cette hypothèse est généralement bien vérifiée (longueurs d'ondes de plusieurs kilomètres). Cela implique toutefois que la dispersion fréquentielle des vagues n'est pas prise en compte (i.e. que toute l'énergie est concentrée dans la première vague, et qu'il n'y a pas d'ondes secondaires ensuite).

La durée simulée est de 4 heures au total, afin de permettre au tsunami de traverser l'intégralité de la Mer Méditerranée.

Rang 0 (résolution de 1 800 m)

• Temps d'arrivée

Les temps d'arrivée du tsunami ont été estimés à partir des simulations menées au rang 0, en calculant à quel instant une perturbation de plus de 1 cm était détectée en

¹ Les comparaisons de simulations de l'inondation sur le cas du tsunami lié au glissement de terrain de l'aéroport de Nice en 1979, ainsi que la sensibilité à quelques paramètres, sont aussi présentées par Le Roy *et al.* (2011).

chaque point. Ils peuvent donc différer légèrement de temps calculés de manière théorique uniquement à partir de la bathymétrie, si les premières perturbations s'avèrent inférieures à 1 cm.

De par la position géographique du séisme et la bathymétrie, le tsunami affecte très rapidement (moins de 1 heure) les côtes algériennes, les Baléares et le sud de la Sardaigne (Illustration 44). En ce qui concerne les côtes françaises, le tsunami atteint d'abord la Corse par le sud entre 1h et 1h30min après le séisme. C'est ensuite le secteur de Toulon qui est touché, environ 1h30min après le séisme. À l'est, la vague atteint la côte jusqu'à l'Italie en moins de 1h45min. À l'ouest, le tsunami atteint Marseille en 1h45min environ, puis ralentit dans le Golfe du Lion en raison de la présence d'un large plateau continental, qui s'il contribue à ralentir l'onde tend à l'amplifier. Les côtes du Golfe du Lion sont finalement atteintes 2 à 3 heures après le séisme.



Illustration 44 - Scénario d'un séisme algérien : Temps d'arrivée (en heures) du tsunami généré par le séisme

• Hauteurs d'eau maximales

La carte de l'Illustration 45 présente l'élévation maximale du plan d'eau au cours des 4 heures de simulation sur la Méditerranée occidentale. Les hauteurs d'eau maximales à la source restent limitées, de l'ordre de 1,80 m. Les hauteurs d'eau les plus importantes sont calculées sur la côte algérienne, juste en face de la faille, où elles

peuvent atteindre 2 à 3 m. En mer, l'onde s'amortit assez vite et devient rapidement inférieure à 0,5 m.

Les côtes de Sardaigne et des Baléares restent dans l'ensemble affectées par de faibles hauteurs d'eau (généralement inférieures à 0,5 m, localement 0,7 à 0,8 m au sud-est de Minorque). À l'approche des côtes françaises, l'onde ne dépasse guère les 0,3 m, mais on peut observer une légère amplification lors du passage sur la bordure du talus continental, de Hyères à la Camargue. Cette amplification, particulièrement sensible au large de la Camargue puisque des hauteurs d'eau de 0,9 m y sont calculées, ne provoque toutefois que des conséquences limitées à la côte à cette échelle.



Illustration 45 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur 4 heures de simulation au rang 0 (1 800 m) en Méditerranée occidentale

Rang 1 (résolution de 600 m)

L'élévation maximale du plan d'eau est présentée à l'Illustration 46. Ce résultats montre que les hauteurs d'eau à la côte, globalement décroissantes d'ouest en est,

restent limitées, typiquement de l'ordre de 0,5 m. Seule la baie de la Ciotat semble plus affectée avec des hauteurs d'eau dépassant le mètre en raison d'une amplification particulière de l'onde. Dans une moindre mesure, l'ouest de Toulon, la presqu'île de Giens et Porquerolles sont également concernés par des hauteurs d'eau pouvant atteindre le mètre. Le littoral des Alpes-Maritimes, par contre, reste relativement épargné à cette échelle, avec des hauteurs d'eau généralement inférieures à 0,30 m.



Illustration 46 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur 4 heures de simulation au rang 1 (600 m) sur la Côte d'Azur

Rang 2 (résolution de 200 m)

L'élévation maximale du plan d'eau au rang 2 (Illustration 47) confirme l'impact très limité du tsunami sur les Alpes-Maritimes : les hauteurs d'eau à terre restent typiquement de l'ordre de 0,5 m, seuls les secteurs de Cannes, de l'aéroport de Nice et de Menton se distinguant par des élévations plus importantes, potentiellement métriques ou supérieures.



Illustration 47 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur 4 heures de simulation au rang 2 (200 m) sur la côte des Alpes-Maritimes

Rang 3 (résolution de 67 m)

L'Illustration 48 présente l'élévation maximale du plan d'eau dans la Baie des Anges. À cette échelle, on trouve typiquement des hauteurs d'eau métriques de Juan-les-Pins à Cagnes-sur-Mer, avec toutefois une amplification très significative à la plage de la Garoupe (Antibes), où le niveau d'eau à la côte peut atteindre 2,5 m. Saint-Laurent du Var et l'aéroport de Nice peuvent également être impactés par des hauteurs d'eau de l'ordre de 1,5 m, alors que le reste de Nice est assez épargné (hauteurs d'eau inférieures à 0,5 m. À Villefranche-sur-Mer, enfin, l'amplification des vagues par la bathymétrie permet de retrouver des vagues d'ordre métrique.



Illustration 48 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur 4 heures de simulation au rang 3 (67 m) sur la Baie des Anges

Rang 4 (résolution de 22 m)

Au rang 4, l'élévation maximale du plan d'eau devient plus significative (Illustration 49) : elles atteignent 1,5 à 2 m au niveau de la Salis, et restent plus modérées au niveau du Port-Vauban (1 m à 1,3 m). Le Port-Vauban reste relativement épargné, avec des hauteurs d'eau pouvant atteindre, mais une submersion n'affectant guère que la digue. À la Salis, une submersion significative est d'ores et déjà visible, affectant essentiellement les rues au nord de l'anse et l'arrière du port, avec des run-up pouvant atteindre les 2,7 m. Cette submersion reste toutefois largement inférieure à celle



provoquée par le tsunami du glissement de terrain de l'aéroport de Nice en 1979 (Le Roy *et al.*, 2011).

Illustration 49 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 4 heures de simulation au rang 4 (22 m) au niveau d'Antibes

Rang 5 (résolution de 5 m)

L'élévation maximale du plan d'eau au rang 5 (Illustration 50) montre bien l'amplification du tsunami par la bathymétrie à l'approche de la Salis : les vagues, métriques au large, croissent en approchant du rivage pour atteindre localement des



hauteurs de 1,75 m (notamment au niveau de la petite plage au nord de la zone et près du port).

Illustration 50 - Scénario d'un séisme algérien : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur 4 heures de simulation au rang 5 (5 m) au niveau de la Salis

La zone inondée est assez conséquente (Illustration 51), sans toutefois atteindre la même étendue que celle observée en 1979 (Le Roy *et al.*, 2011) : l'eau ne pénètre quasiment pas les rues, mais la route du front de mer est inondée en plusieurs endroits (boulevard du Maréchal Leclerc, promenade Pierre Merli, boulevard James Wyllie), ainsi que la Pointe de l'Îlette, une partie du parking plus au sud, et tout le front de mer depuis la Pointe des Pendus jusqu'au port. Les run-up atteints sont typiquement de 1,70 m à 2 m, mais les hauteurs d'eau à terre restent limitées (inférieures à 1 m en dehors des plages, le front de mer près du port de la Salis étant le plus affecté par un effet d'accumulation de l'eau).



Illustration 51 - Scénario d'un séisme algérien : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 75 minutes de simulation au rang 5 (5 m) au niveau de la Salis

L'Illustration 52 présente les vitesses maximales atteintes par les courants sur cette même grille de calcul. On constate que les vitesses maximales sont atteintes pendant la phase de flux, et restent limitées : en mer, elles restent globalement de l'ordre de 1 m/s, seuls certains passages étroits donnant lieu à une accélération du flux (par exemple, entre la Pointe de l'Îlette et la Pointe des Pendus, les vitesses atteignent 2,5 à 3 m/s, et à l'entrée du port elles dépassent les 5,5 m/s).

À terre, les courants les plus forts sont atteints au niveau des digues du port (typiquement 2,5 m/s, localement plus de 4 m/s). Ailleurs, les vitesses sont généralement inférieures à 1 à 1,5 m/s, sauf sur la plage près du port où elles atteignent 2 m/s.



Illustration 52 - Scénario d'un séisme algérien : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 75 minutes de simulation au rang 5 (5 m) au niveau de la Salis

6.4. SCÉNARIO D'UN SÉISME TYPE LIGURE 1887 SUR ANTIBES

Ce scénario s'inspire du tsunami généré par le séisme de Mer Ligure en 1887, qui avait principalement affecté la côte italienne, mais avait été observé en France au moins jusqu'à Cannes (<u>www.tsunami.fr</u>). Les caractéristiques de ce séisme restent mal connues à ce jour, sa magnitude étant estimée entre 6,5 et 6,9.

Afin de maximiser l'effet du tsunami sur la côte française, le séisme a été déplacé sur la faille Marcel, située au large de Nice (Illustration 53).



Illustration 53 - Position du séisme de Mer Ligure en 1887 et de la faille Marcel (d'après Larroque et al., 2012)

Compte-tenu de la position du séisme simulé, les calculs ont été initiés directement au rang 2 de l'emboitement présenté à l'Illustration 41.

6.4.1. Conditions de forçage

Prise en compte de la marée

Les mêmes conditions de marée que pour le scénario du séisme algérien ont été retenues, soit une marée de +0,361 m par rapport au zéro IGN69, correspondant à la plus haute marée astronomique.

Du fait des résolutions des grilles de calcul et des profondeurs considérées, la marée n'a été prise en compte qu'aux rangs 4 et 5 (résolutions de 22 m et 5 m).

Génération du tsunami

La description de la source sismique, fournie par le CEA, a été définie à partir d'un évènement instrumental dont la magnitude a été augmentée à 6,5. Les principales caractéristiques de la faille inverse et du séisme (comme définies à l'Illustration 42) sont présentées dans le tableau de l'Illustration 54.

Paramètres	Valeurs retenues
Position du centroïde de la faille	N 43° 31' 48"
(WGS 84)	E 7° 28' 48''
Position du centroïde de la faille	X= 832 670 m
(Mercator)	Y= 5 392 994 m
Profondeur du centroïde de la faille	11 km
Longueur de la faille	30 km
Largeur de la faille	10 km
Mécanismes au foyer (strike / dip / rake)	243 / 41 / 74
Magnitude du séisme	6,5
Profondeur d'eau à l'épicentre	2 000 m
Déplacement	0,715 m

Illustration 54 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Paramètres retenus pour la description du séisme

6.4.2. Résultats des simulations

Compte tenu de la proximité de la source avec la zone d'intérêt, la durée simulée est de près de 1 heure, permettant de simuler l'intégralité des phénomènes sur Antibes.

Rang 2 (résolution de 200 m)

Temps d'arrivée

Compte-tenu de la position du séisme, le tsunami arrive très rapidement à la côte (Illustration 55) : il atteint Saint-Jean-Cap-Ferrat en moins de 4 minutes, Nice, Monaco et le sud d'Antibes en 5 minutes, le reste de la côte entre l'ouest d'Antibes et l'Italie en 6 à 7 minutes, alors que Juan-les-Pins et Cannes sont atteints plus tardivement (11 minutes).



Illustration 55 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Temps d'arrivée (en minutes) du tsunami généré par le séisme type « Mer Ligure 1887 » sur la faille Marcel

Hauteurs d'eau maximales

L'élévation maximale du plan d'eau (Illustration 56) reste très modérée : elle reste inférieure à 0,2 m au niveau de la source et s'amortit assez rapidement. À cette échelle, une amplification apparait à l'approche de la côte, depuis Antibes jusqu'à Menton, conduisant à des hauteurs d'eau de 0,2 à 0,4 m de l'aéroport de Nice jusqu'à Roquebrune-Cap-Martin, avec localement 0,4 à 0,6 m (notamment autour de Saint-Jean-Cap-Ferrat). L'amplification sur Antibes reste à cette échelle limitée, les hauteurs d'eau n'y dépassant guère les 0,2 m.



Illustration 56 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur une heure de simulation au rang 2 (200 m) sur la côte des Alpes-Maritimes

Rang 3 (résolution de 67 m)

Au rang 3, la carte de l'élévation maximale du plan d'eau (Illustration 57) confirme que si les hauteurs d'eau sont très faibles au large, des amplifications à la côte peuvent localement autoriser des vagues significatives : c'est notamment le cas sur Antibes (0,6 m), l'aéroport de Nice (0,5 m) et la presqu'ile de Saint-Jean-Cap-Ferrat (0,6 à 1 m). Ailleurs, les hauteurs d'eau restent globalement inférieures à 0,2 m.



Illustration 57 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres) calculée sur une heure de simulation au rang 3 (67 m) sur la Baie des Anges

Rang 4 (résolution de 22 m)

Sur Antibes, les hauteurs d'eau peuvent être assez significatives (Illustration 58) : si les cotes maximales atteintes par l'eau restent faibles au niveau du port Vauban (inférieures à 0,5 m, intégrant le niveau de la marée à 0,361 m), des hauteurs d'eau de 1 m peuvent affecter le secteur de la Salis (notamment le port). La submersion calculée à cette résolution reste cependant quasi-inexistante.



Illustration 58 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur une heure de simulation au rang 4 (22 m) sur Antibes

Rang 5 (résolution de 5 m)

L'élévation maximale du plan d'eau au rang 5 (Illustration 59) confirme que des hauteurs d'eau significatives atteignent la côte au niveau de la Salis (typiquement 0,7 à 0,9 m au niveau des plages).



Illustration 59 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Elévation maximale du plan d'eau (en mètres, IGN69) calculée sur une heure de simulation au rang 5 (5 m) sur la Salis

La submersion reste toutefois très limitée (Illustration 60) : en dehors des plages, l'inondation reste cantonnée aux digues, avec des hauteurs d'eau à terre ne dépassant guère quelques dizaines de centimètres.



Illustration 60 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 1 heure de simulation au rang 5 (5 m) au niveau de la Salis

Les vitesses des courants restent elles aussi limitées : les vitesses maximales sont atteintes pendant la phase de flux (Illustration 61), et sont typiquement de 0,3 m/s au large. Elles peuvent très localement atteindre les 2 à 3 m/s dans les passages étroits, notamment à l'entrée du port de la Salis. À terre, les vitesses restent généralement inférieures à 0,5 m/s, mais elles peuvent localement être supérieures (0,7 m/s, et même 1,5 m/s sur la digue ouest du port de la Salis).



Illustration 61 - Scénario « Mer Ligure 1887 - Faille Marcel » : Vitesses maximales des courants (en m/s) calculées sur 1 heure de simulation au rang 5 (5 m) au niveau de la Salis

6.5. SCÉNARIO DU GLISSEMENT DE TERRAIN DE L'AÉROPORT DE NICE EN 1979

Les simulations menées sur ce scénario sont décrites en détail par Le Roy *et al.* (2011). On peut toutefois noter que les grilles de calcul utilisées dans ces simulations différaient légèrement de celles présentées au paragraphe 6.2 par leurs résolutions (3 rangs de calcul avec des résolutions respectives de 45 m, 15 m et 3,75 m). L'influence de plusieurs paramètres a notamment été testée :

- Influence des ouvrages maritimes construits après 1979 (peu d'influence);
- Longueur du glissement, et par conséquent volume du glissement (forte influence);

- Direction du glissement (peu d'influence, mais seul un écart de 5 ° a été testé);
- Densité du matériau glissé (forte influence) ;
- Type d'équations utilisées, entre équations de Boussinesq et équations de Saint-Venant (forte influence pour ce type d'événement, où les faibles longueurs d'onde associées aux phénomènes gravitaires rendent caduque l'hypothèse de « shallowwater » en présence de fonds importants).

Les résultats obtenus lors de ces simulations s'avèrent meilleurs que ceux issus des études précédentes, avec des temps d'arrivée et des polarités de la vague cohérentes avec les témoignages recueillis autour de la baie des Anges.

Au final, ces simulations ont permis de reconstituer une submersion à terre (Illustration 62) relativement cohérente avec celle observée historiquement, d'après Sahal et Lemahieux (2010).

Une autre simulation a été menée ultérieurement à Le Roy *et al.* (2011), consistant à effectuer la simulation de la submersion dans les mêmes conditions, mais sans la présence du bâti à terre. Le résultat en termes de hauteurs d'eau à terre est présenté à l'Illustration 63. Il montre une forte influence de la présence du bâti sur l'estimation de la submersion : l'effet d'accumulation de l'eau contre les bâtiments est totalement annulé, conduisant à une extension plus importante de l'inondation, mais avec des hauteurs d'eau plus faibles. En termes de vitesses maximales des courants, l'absence des bâtiments conduit souvent à une surestimation des courants, avec localement une sous-estimation, notamment au niveau des rues.



986400 986500 986600 986700 986800 986900 987000 987100 987200 987300 987400

Illustration 62 - Scénario Nice 1979 : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 15 minutes de simulation (résolution de 3,75 m) au niveau de la Salis



986400 986500 986600 986700 986800 986900 987000 987100 987200 987300 987400

Illustration 63 - Scénario Nice 1979 : Hauteurs d'eau à terre (en mètres) calculée sur 20 minutes de simulation (résolution de 3,75 m) au niveau de la Salis, <u>sans bâtiments</u>

7. Conclusion

Les simulations menées dans le cadre du projet ALDES ont permis d'étudier en détails 3 sites pilotes dans le cadre de différents scénarios jugés plausibles, depuis la génération du tsunami et sa propagation (code GEOWAVE) jusqu'à la submersion à terre en milieu urbain (code SURFWB) :

- Site de Leucate Barcarès :
 - <u>Scénario d'un glissement de terrain sous-marin dans le canyon</u> <u>de Lacaze-Hérault</u>: Conséquences très limitées, avec une submersion restant *a priori* cantonnée aux plages
- Site de Bandol Sanary-sur-Mer Six-Fours-les-Plages :
 - <u>Scénario d'un séisme algérien :</u> Conséquences limitées, avec une submersion affectant essentiellement les plages, mais aussi certaines parties du rivage potentiellement sensibles (parkings, esplanades, ports) ; certains bâtiments peuvent être atteints par les vagues, avec des hauteurs d'eau et des vitesses significatives.
- Site d'Antibes :
 - <u>Scénario d'un séisme algérien (M=7.5)</u>: Conséquences limitées, avec une submersion affectant essentiellement les plages, mais pouvant atteindre les parkings et routes littorales, voire quelques bâtiments.
 - <u>Scénario d'un séisme type « Mer Ligure 1887 » au niveau de la</u> <u>faille Marcel (M=6.5) :</u> Conséquences très limitées, avec une submersion restant a priori cantonnée aux plages et aux digues.
 - <u>Scénario du glissement de terrain de l'aéroport de Nice en 1979 :</u> Ce scénario, présenté dans Le Roy *et al.* (2011), est le plus dommageable de tous ceux simulés : les conséquences observées de l'événement historique ont pu être retrouvées par le calcul, avec une forte submersion au niveau de la Salis (hauteurs d'eau de plusieurs mètres, courants importants, nombreux bâtiments atteints, eau atteignant les rues...).

Au final, les scénarios les plus dommageables parmi ceux simulés sont ceux du glissement de terrain de l'aéroport de Nice en 1979 pour le site d'Antibes (Le Roy *et al.*, 2011) et d'un séisme algérien pour les sites de Bandol, voire d'Antibes. Parmi les 3 sites étudiés, celui d'Antibes apparait donc comme le plus exposé, notamment en raison des instabilités sous-marines dans la Baie des Anges et de la bathymétrie défavorable au large du site.

Cette analyse n'exclue toutefois pas que d'autres secteurs de la côte méditerranéenne française puissent être particulièrement exposés ; ainsi, les simulations menées sur le cas d'un séisme algérien semblent indiquer des hauteurs d'eau importantes dans la baie de la Ciotat. Des calculs à haute résolution seraient toutefois nécessaires pour vérifier les conséquences d'un tel scénario sur ce site.

D'un point de vue technique, ces travaux ont permis d'identifier un certain nombre de conclusions :

- Importance de la résolution des calculs pour une estimation réaliste de la submersion à terre; les calculs à haute résolution sont notamment rendus possibles grâce au programme Litto3D (levers Lidar à haute résolution de la topo-bathymétrie du littoral français par le SHOM et l'IGN). L'utilisation ces données permet notamment la prise en compte de petits reliefs à même d'influer sur le comportement de la vague (blocage par une dune ou au contraire intrusion dans un passage; effet de la bathymétrie sur le déferlement des vagues...).
- Importance de la prise en compte du bâti lorsque des hauteurs d'eau significatives sont atteintes en milieu urbain : l'effet des bâtiments peut en effet être très significatif sur les hauteurs d'eau et les courants.
- Les tests de sensibilités menés sur différents paramètres sur le scénario du glissement de l'aéroport de Nice en 1979 (Le Roy *et al.*, 2011) ont montré l'importance de certaines hypothèses de calcul sur les résultats obtenus pour ce type d'événements (type d'équations, description du glissement, et notamment densité du matériau glissé...) : les résultats de simulations sont en effet le plus en accord avec les observations historiques (en termes de temps d'arrivée, de zone inondée, de polarité) lorsqu'on utilise les équations de Boussinesq (adaptées aux tsunamis d'origine gravitaire en raison de leur longueur d'onde) et les caractéristiques de la source les plus fiables possibles (la densité du matériau étant notamment un paramètre clé).

L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ces simulations a été utilisé par la suite pour la réalisation de scénarios de risque (WP 5.1 du projet), visant à estimer l'endommagement des bâtiments, les préjudices humains et les conséquences dans les ports de chaque tsunami étudié (Monfort *et al.*, 2012).

8. Bibliographie

Cattaneo A. (2007) - Étude préliminaire de l'aléa tsunamis en Méditerranée Occidentale - Zonage des mouvements de terrain sous-marins sur le plateau et talus continental au large des côtes françaises. Rapport final IFREMER, 66 p., 2 ann.

Garcin M., Prame B., Attanayake N., De Silva U., Desprats J.F., Fernando S., Fontaine M., Idier D., Lenotre N., Pedreros R., C.H.E.R. Siriwardana (2007) - A Geographic Information System for Coastal Hazards - Application to a pilot site in Sri-Lanka (Final Report). BRGM Open file BRGM/RP-55553-FR, 124 p., 94 figs, 1 DVD.

Grilli S.T. et Watts P. (1999) - 'Modeling of waves generated by a moving submerged body : Applications to underwater landslides'. *Engrg. Analysis with Boundary Elements, 23, 8, 645-656.*

Grilli S.T. et Watts P. (2005) - 'Tsunami generation by submarine mass failure. Part I : Modeling, experimental validation, and sensitivity analysis'. *J. Waterway Port Coastal and Ocean Engng.*, *131*, *6*, 283-297.

Grilli S.T., Asce M., Ioualalen M., Asavanant J., Shi F., Kirby J.T. and Watts P. (2007) - Source constraints and model Simulation of the December 26, 2004, Indian Ocean tsunami. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Nov.-Déc. 2007, 414-428.

Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T., and Dalrymple, R.A. (2000) - 'Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup. I: 1D'. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 126, 39-47.*

Larroque C. (2009) - Aléa sismique dans une région intraplaque à sismicité modérée : la jonction Alpes - Bassin Ligure. *Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches de l'UMR 6526 Géosciences Azur, CNRS - Observatoire de la Côte d'Azur, Sophia Antipolis.*

Larroque C., Scotti O. and Ioualalen M. (2012) - Reappraisal of the 1887 Ligurian earthquake (western Mediterranean) from macroseismicity, active tectonics and tsunami modelling. Geophysical Journal International 190, 1 (2012) 87-104.

Le Roy S. et Pedreros R. avec la collaboration de Monfort-Climent D. (2011) - ALDES : Modélisation numérique du tsunami survenu à Antibes en 1979. Rapport BRGM/RP-60353-FR, 80 p., 61 ill.

McAdoo, B.G., Pratson, L.F., Orange, D.L. (2000) - Submarine landslide geomorphology, US continental slope. Marine Geology 169, 103-136.

Marche, F., P. Bonneton, P. Fabrie and N. Seguin (2007) - Evaluation of wellbalanced bore-capturing schemes for 2D wetting and drying processes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids, 53:* 867-894.

Monfort D., Le Roy S., Pedreros R. (2012) - Projet ALDES : Scénarios de risque tsunami en Méditerranée Occidentale. 77 p., 37 fig., 10 tab., 3 annexes.

Okada, Y. (1985) - 'Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space'. *Bull. Seismol. Soc. Am., 75, 1135-1154*.

Pedreros R. et Poisson B. (2007) - Étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne : modélisation numérique des tsunamis. *BRGM/RP-55760-FR, 176 p., 123 fig., 27 tabl., 2 ann.*

Pedreros R., Terrier M. et Poisson B. (2007) - Tsunamis : Étude de cas au niveau de la côte antillaise française - Rapport de synthèse. Rapport BRGM/RP-55795-FR.

Poisson B. et Krien Y. (2009) - Tsunamis : étude de cas sur la côte guyanaise française. Rapport BRGM/RP-58913-FR. 80 p., 49 fig., 6 tabl., 1 ann.

Poisson B. et Pedreros R. (2010) - Numerical modelling of historical landslidegenerated tsunamis in the French Lesser Antilles. *Natural Hazards and Earth System Sciences 10, 1281-1292.*

Poisson B., Garcin M. and Pedreros R. (2009) - The 2004 December 26 Indian Ocean tsunami impact on Sri Lanka : cascade modelling from ocean to city scales. *Geophysical Journal International 177, 1080-1090.*

Poisson B., Oliveros C. and Pedreros R. (2011) - Is there a best source model of the Sumatra 2004 earthquake for simulating the consecutive tsunami? *Geophysical Journal International 185, 1365-1378.*

Sahal A. et Lemahieu A. (2010) - The 1979 Nice airport tsunami : mapping of the flood in Antibes. *Natural Hazards, Volume 56, n°3, p. 833-840.* DOI: 10.1007/s11069-010-9594-6. Disponible en ligne: <u>http://dx.doi.org/10.1007/s11069-010-9594-6</u>.

Terrier M., Pedreros R. et Poisson B. (2007) - Tsunamis : Étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française - Rapport de synthèse. Rapport BRGM/RP-55765-FR.

Terrier M., Monfort D., Lambert J., Le Roy S., Pedreros R. & Sedan O. (2012) -Method for Evaluating Vulnerability to Tsunamis of low-to-medium intensity: Application to the French Côte d'Azur. *Proceedings of the Fifth International Tsunami Symposium (ISPRA-2012). Tsunami Society International.* 3-5 Sept. 2012, Joint Research Centre, *Ispra, Italy.*

Walder, J.S., Watts, P., Sorensen, O.E., and Janssen, K. (2003) - 'Tsunamis generated by subaerial mass flows. *Journal of Geophysical Research, Vol.108, B5, 2236.*

Watts P., Grilli S. T., Kirby J. T., Fryer G. J. and Tappin D. R. (2003) - Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model. *Natural Hazards and Earth System Sciences 3, p. 391-402.*

Wei G., Kirby J. T., Grilli S. T., and Subramanya R. (1995) - 'A fully nonlinear Boussinesq model for free surface wave. Part 1 : Highly unsteady waves'. *J. Fluid Mech.*, 294,71-92.



Centre scientifique et technique Direction Risques et Prévention 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 34 34