

ALDES : Modélisation numérique du tsunami survenu à Antibes en 1979 Raport intermédiaire Octobre 2011







ALDES : Modélisation numérique du tsunami survenu à Antibes en 1979

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-60353-FR

Octobre 2011

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

S. Le Roy et R. Pedreros Avec la collaboration de D. Monfort-Climent

Vérificateur :

Nom : M. Terrier

Original signé le 24/10/2011

Approbateur :

Nom : H. Modaressi

Original signé le 25/10/2011

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, Nice, Antibes

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

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre du volet WP 3.2 du projet ALDES. Il concerne les résultats de simulation numérique sur le site pilote d'Antibes, en s'appuyant sur le cas historique du tsunami survenu suite au glissement de terrain de l'aéroport de Nice.

Les caractéristiques du glissement de terrain sont issues des derniers résultats de recherche (projets RATCOM et MAREMOTI). Les modélisations réalisées s'appuient sur **3 rangs de calcul successifs** :

- Un premier, englobant toute la Baie-des-Anges, présente une résolution de 45 m et a permis la simulation de la génération et de la propagation du tsunami (code GEOWAVE);
- Un second, plus focalisé sur Antibes, présente une résolution de 15 m et a permis d'affiner la **propagation** du tsunami (code GEOWAVE) ;
- Un troisième, enfin, se concentre sur le secteur d'Antibes-la Salis avec une résolution de 3,75 m permettant la prise en compte de la topographie et du bâti (MNE) et a permis de simuler la **submersion** à terre (code SURFWB).

Les résultats obtenus présentent un certain nombre d'améliorations par rapport aux simulations antérieures :

- La **polarité** du tsunami suivant le lieu est conforme aux observations rapportées ;
- Les **heures d'arrivée** du tsunami aux différents lieux d'observation restent cohérentes avec les témoignages ;
- La **zone inondée** suivant les simulations est très proche de celle reconstituée à partir des témoignages, que ce soit en termes de profondeur d'inondation ou de run-up.

Le MNE utilisé pour le site des Alpes-Maritimes n'a toutefois pas la même précision que ceux qui seront utilisés pour les deux autres sites dans le cadre du projet ALDES (levers Lidar).

On note quelques défauts dans les simulations de submersions, où l'inondation affecte des terrains *a priori* non-impactés en 1979. Ceci s'explique vraisemblablement par des défauts du MNE utilisé, où certains murs de protection sur le rivage sont mal retranscrits. Ceci permet également de souligner l'**importance de la résolution et de la précision verticale du MNE** pour une bonne estimation de la submersion, et par conséquent de l'aléa : il convient que les rues et les moindres ouvrages (murs, bâtiments) soient bien retranscrits dans le MNE, afin de pouvoir prendre en compte les éventuels effets de seuil liés à cette problématique.

Quelques **tests de sensibilité** ont également été menés sur le cas de Nice, en faisant varier notamment certaines caractéristiques de la source, ce qui a permis de mieux appréhender l'importance de ces paramètres pour simuler la submersion.

Enfin, les résultats ont été comparés à ceux de la même simulation effectuée sous l'**hypothèse de shallow-water**. Cette hypothèse ne peut être vérifiée partout sur le cas de Nice, compte tenu des profondeurs importantes rencontrées dans la Baie-des-Anges et du fait que les tsunamis générés par des mouvements de terrain présentent des longueurs d'ondes restreintes. Les résultats obtenus ont permis de mieux appréhender les erreurs que génère cette hypothèse dans un tel contexte, et notamment l'absence de dispersion fréquentielle (énergie concentrée dans la première vague), l'amplification de l'amplitude des vagues à l'approche de la côte et, au contraire, une atténuation importante, voire totale, de l'amplitude de l'onde aux grandes profondeurs.

Sommaire

1.	Cadre de l'étude	. 11			
2.	Généralités et rappels sur le phénomène tsunami	. 13			
3.	3. Le tsunami du 16 octobre 1979 à Nice et travaux de référence 17				
	3.1. LE TSUNAMI DU 16 OCTOBRE 1979 À NICE	. 17			
	 3.2. TRAVAUX DE RÉFÉRENCE SUR LE TSUNAMI DE NICE. 3.2.1. Conséquences du tsunami : cartographie de l'inondation dans le cadre projet ANR MAREMOTI (<i>Sahal et Lemahieu, 2010</i>) 3.2.2. Génération et propagation du tsunami : Modélisation du BRGM dans le cadre du Plan Séisme en 2007 (Pedreros et Poisson, 2007). 3.2.3. Le glissement de terrain : modélisations de l'Ifremer dans le cadre du projet RATCOM (<i>Silva Jacinto et Meyniel, 2010</i>)	. 17 du . 18 . 18 . 20 . 22 . 23			
4.	Modélisation du tsunami : paramètres et données d'entrée	. 25			
	 4.1. MODÈLES UTILISÉS 4.1.1.Génération et propagation du tsunami : le code GEOWAVE 4.1.2.Submersion par le tsunami : le code SURFWB 	. 25 . 25 . 28			
	 4.2. DONNÉES TOPO/BATHYMÉTRIQUES ET CONSTRUCTION DES MNT/MN 4.2.1. Données bathymétriques	IE28 . 28 . 29 . 31 . 32			
	4.3. INCERTITUDES LIÉES À LA TOPOGRAPHIE ET À L'OCCUPATION DES SOLS	. 32			
	4.4. GRILLES DE CALCUL	. 33			
	4.5. CARACTÉRISATION DU GLISSEMENT DE TERRAIN	. 34			
5.	Résultats issus des modélisations	. 37			
	5.1. CAS DE RÉFÉRENCE	. 38			

7.	Bibliographie	77
6.	Conclusion	75
	5.6. CAS « SW »	66
	5.5. CAS « MD » (MATÉRIAU DENSE)	64
	5.4. CAS « DD » (DIRECTION DIFFÉRENTE)	60
	5.3. CAS « GC » (GLISSEMENT COURT)	57
	5.2. CAS « AO » (AVEC OUVRAGES) : EVÉNEMENT DE RÉFÉRENCE INCLUANT LES OUVRAGES CONSTRUITS POSTÉRIEUREMENT	53
	5.1.2.Rang 1 : Propagation du tsunami à l'approche d'Antibes 5.1.3.Rang 2 : Submersion au niveau d'Antibes – La Salis	43 44
	5.1.1.Rang 0 : Génération et propagation du tsunami à travers la Baie-des- Anges	38

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
Illustration 2 – Caractéristiques des tsunamis au niveau du rivage (Pedreros et Poisson, 2007)	14
Illustration 3 - Port de La Salis après le tsunami de 1979 (www.alertes-meteo.com)	17
Illustration 4 – Représentation des zones inondées, localisation des témoignages identifiant le Run-up et batiments impactés, sur fond topographique de 1980 (Sahal et Lemahieu, 2010)	18
Illustration 5 – Caractéristiques des sources pour la modélisation du BRGM de 2007 (Pedreros et Poisson, 2007)	19
Illustration 6 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue au cours des simulations du tsunami de Nice 1979 (zoom de la grille à 83 m) (Pedreros et Poisson, 2007)	19
Illustration 7 – Comparaison des temps d'arrivée (Δt), amplitudes de vague (Δh) et périodes (θ) entre les observations reportées par Assier-Rzadkiewicz et al. (2000) et la simulation réalisée par Pedreros et Poisson (2007)	20
Illustration 8 – Observations sous-marines dans le canyon du Var suite à l'accident de 1979 (source : Silva Jacinto et Meyniel, 2010)	21
Illustration 9 – Evolution du flux et de la concentration en sédiments lors de la modélisation de l'Ifremer sur les 500 premières secondes du glissement (source : Silva Jacinto et Meyniel, 2010)	22

Illustration 10 – Exemple de résultat d'inondation simulée à Antibes(viscosité dynamique des sédiments : 0,25 m ² .s-1 ; pas d'entrainement de l'eau par le glissement) et cartographie de l'inondation observée (contour blanc) (source : Donadieu, 2010)2	23
Illustration 11 – Principales caractéristiques de GEOWAVE	26
Illustration 12 – 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)	30
Illustration 13 – Aperçu du MNT (maillage de 45 m) utilisé dans le secteur de Nice pour les simulations numériques (en m) – L'axe vertical n'est pas à l'échelle	31
Illustration 14 – Cote maximale de la surface libre lors de la submersion (en m) : à gauche, résultats « bruts » ; à droite, résultats après corrections de détails (rues redessinées au nord et mur ajouté au sud)	33
Illustration 15 – Emboitement des 3 grilles de calcul, résolution des maillages en m ² et position des jauges virtuelles dans chaque grille	34
Illustration 16 – Paramètres retenus pour la description du glissement de l'aéroport de Nice pour la modélisation de la source tsunamigène	35
Illustration 17 – Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence : Cote de la surface libre (en m) à t_0+2 min ; t_0+3 min ; t_0+4 min ; t_0+6 min ; t_0+10 min ; t_0+20 min	39
Illustration 18 – Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau4	40
Illustration 19 – Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence : Elévation de la surface libre au niveau de l'aéroport de Nice et du port de clapage4	41
Illustration 20 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence : Elévation de la surface libre au niveau des principaux points d'observation de la Baie-des-Anges sur les 10 minutes suivant le glissement4	42
Illustration 21 – Comparaison entre quelques caractéristiques des observations et des simulations du CEA (grille 0) et du BRGM (Rang 0) à Saint-Laurent-du-Var (PSL), Nice (PN), Villefranche-sur-Mer (PVi), Antibes-Port-Vauban (PV) et Antibes-Ia Salis (PAS)4	43
Illustration 22 - Simulation numérique au rang 1 sur le cas de référence : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau à Antibes4	44
Illustration 23 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Cote de la surface libre (en m) et courants à t_0 +5 min ; t_0 +6 min; t_0 +7 min ; t_0 +8 min ; t_0 +10 min ; t_0 +19 min4	45
Illustration 24 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Cote maximale de la surface libre (en m)4	46
Illustration 25 – Modification du run-up lié à la présence d'un bâtiment (en rouge : MNE issu d'interpolations ; en pointillés : réalité physique)4	47
Illustration 26 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Hauteurs maximales d'inondation à terre (en m) et zone d'inondation identifiée par Sahal et Lemahieu (2010) en violet4	47
Illustration 27 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Cote maximale de la surface libre (en m), position des jauges étudiées (en violet) et profondeurs associées (IGN 69)4	49

Illustration 28 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Elévation de la surface libre au niveau du port de La Salis (jauges 1 & 2)	0
Illustration 29 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Elévation de la surface libre au niveau des plages de La Salis (jauges 3, 4 & 5)	1
Illustration 30 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Vitesses maximales atteintes par les courants : normes (en m/s) et directions	2
Illustration 31 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Hauteur d'eau et vitesse du courant au niveau de la jauge 6	3
Illustration 32 – Grille topo-bathymétrique utilisée au rang 2 pour le cas « AO », les ouvrages ajoutés apparaissant en rouge	4
Illustration 33 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « AO » (à droite) : Cote maximale de la surface libre (en m)	4
Illustration 34 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « AO » (à droite) : Hauteurs maximales d'inondation à terre (en m)	5
Illustration 35 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « AO » (à droite) : Vitesses maximales atteintes par les courants : normes (en m/s) et orientation	5
Illustration 36 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence et sur le cas « AO » : Elévation de la surface libre au niveau de La Salis (jauge 4)	6
Illustration 37 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence et sur le cas « AO » : Hauteur d'eau et vitesse du courant au niveau de la jauge 6	6
Illustration 38 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « GC » (à droite) : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau	7
Illustration 39 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « GC » (à droite) : Cote maximale de la surface libre (en m)	8
Illustration 40 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « GC » (à droite) : Hauteurs maximales d'inondation à terre (en m)	8
Illustration 41 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « GC » (à droite) : Vitesses maximales atteintes par les courants : normes (en m/s) et orientation	9
Illustration 42 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence et sur le cas « GC » : Elévation de la surface libre au niveau de La Salis (jauge 4)	0
Illustration 43 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence et sur le cas « GC » : Hauteur d'eau et vitesse du courant au niveau de la jauge 6	0
Illustration 44 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « DD » (à droite) : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau	1
Illustration 45 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « DD » (à droite) : Cote maximale de la surface libre (en m)	2
Illustration 46 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « DD » (à droite) : Hauteurs maximales d'inondation à terre (en m)	2
Illustration 47 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « DD » (à droite) : Vitesses maximales atteintes par les courants : normes (en m/s) et orientation	3

Illustration 48 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence et sur le cas « DD » : Hauteur d'eau et vitesse du courant au niveau de la jauge 6	.63
Illustration 49 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « MD » (à droite) : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau	.64
Illustration 50 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence et sur le cas « MD » : Elévation de la surface libre au niveau de Villefranche, Nice et Saint-Laurent sur les 15 premières minutes simulées	.65
Illustration 51 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence et sur le cas « MD » : Elévation de la surface libre au niveau d'Antibes sur les 10 premières minutes simulées	.65
Illustration 52 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence (à gauche) et le cas « SW » (à droite) : Cote de la surface libre (en m) à t_0+2 min ; t_0+3 min; t_0+4 min ; t_0+6 min	.67
Illustration 53 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence (à gauche) et le cas « SW » (à droite) : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau	.68
Illustration 54 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence et le cas « SW » : Elévation de la surface libre au niveau de Villefranche et Nice sur les 15 premières minutes simulées	.69
Illustration 55 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence et le cas « SW » : Elévation de la surface libre au niveau d'Antibes sur les 15 premières minutes simulées	.69
Illustration 56 – Comparaison entre quelques caractéristiques des observations et des simulations du CEA et du BRGM (cas de référence et cas « SW ») à Saint-Laurent-du- Var (PSL), Nice (PN), Villefranche-sur-Mer (PVi), Antibes-Port-Vauban (PV) et Antibes- Ia Salis (PAS)	.70
Illustration 57 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « SW » (à droite) : Cote maximale de la surface libre (en m)	.71
Illustration 58 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « SW » (à droite) : Hauteurs maximales d'inondation à terre (en m)	.72
Illustration 59 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « SW » (à droite) : Vitesses maximales atteintes par les courants : normes (en m/s) et orientation	.72
Illustration 60 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « SW » (à droite) : Hauteur d'eau et vitesse du courant au niveau de la jauge 6	.73
Illustration 61 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence (à gauche) et en shallow-water avec une densité de matériau de 2 (à droite) : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau	74

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 :

- a) en une étude de la menace tsunami le long du littoral méditerranéen afin d'identifier les zones les plus exposées,
- b) puis, à examiner en détail trois sites pilotes et y évaluer le risque (l'aléa, les dommages et préjudices humains potentiels) ;
- c) 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 simulation numérique sur le site pilote d'Antibes.

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.

A 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 = V_xT). 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.

A 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. Le tsunami du 16 octobre 1979 à Nice et travaux de référence

3.1. LE TSUNAMI DU 16 OCTOBRE 1979 À NICE

Lors des travaux d'extension de l'aéroport de Nice, en 1979, un glissement de terrain entraina un volume considérable de remblais du chantier vers le large, dans le canyon sous-marin du Var. Ce glissement provoqua la mort de 7 des personnes travaillant sur le chantier et se propagea au large jusqu'à au moins mi-distance de la Corse (distance attestée par la rupture de câbles sous-marins et par des reconnaissances ultérieures, <u>http://wwz.ifremer.fr/drogm/Vulgarisation/Dossiers/Avalanches-sous-marines</u>).

Le déplacement d'un tel volume de matériaux à faible profondeur (du moins durant les premiers instant du glissement) entraina un important mouvement d'eau à l'origine d'un tsunami dont les conséquences ont été ressenties dans toute la Baie-des-Anges. Les effets de ce tsunami ont été particulièrement dévastateurs au niveau de la ville d'Antibes, située à 10 km du glissement, où les témoignages font état d'une élévation du niveau de la mer de 3 à 4 m, ayant entrainé un décès supplémentaire.



Illustration 3 – Port de La Salis après le tsunami de 1979 (www.alertes-meteo.com)

3.2. TRAVAUX DE RÉFÉRENCE SUR LE TSUNAMI DE NICE

Ce tsunami, l'un des plus récents et des plus destructeurs ayant affecté les côtes métropolitaines françaises, a fait l'objet de nombreux travaux historiques et scientifiques afin de comprendre l'origine du glissement et la manière dont l'onde s'est propagée et a inondé Antibes. Il s'agit par conséquent du tsunami métropolitain le mieux renseigné à ce jour. Ce paragraphe évoque quelques-uns des travaux les plus récents à ce sujet, utilisables notamment à des fins de paramétrage et de validation des résultats de modélisation.

3.2.1. Conséquences du tsunami : cartographie de l'inondation dans le cadre du projet ANR MAREMOTI (*Sahal et Lemahieu, 2010*)

Dans le cadre du projet ANR MAREMOTI (MAREgraphie, observations de tsunaMis, mOdélisation et éTudes de vulnérabIlité pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée occidentale), l'analyse des documents d'archive et d'enquête sur le tsunami de 1979 a pu être complétée par une nouvelle enquête de terrain, qui a permis de récolter de nouveaux témoignages et de proposer une cartographie très fine de l'inondation engendrée par le tsunami, ainsi que des valeurs de run-up (Illustration 4).



Illustration 4 – Représentation des zones inondées, localisation des témoignages identifiant le Run-up et batiments impactés, sur fond topographique de 1980 (Sahal et Lemahieu, 2010)

3.2.2. Génération et propagation du tsunami : Modélisation du BRGM dans le cadre du Plan Séisme en 2007 (Pedreros et Poisson, 2007)

Dans le cadre du Plan Séisme, le BRGM s'est vu confier en 2007 une étude préliminaire de l'aléa tsunami en Méditerranée occidentale, au cours de laquelle ont été modélisés, à l'aide du code GEOWAVE (paragraphe 4.1.1) plusieurs tsunamis historiques ou potentiels, liés soit à des sources sismiques, soit à des mouvements de terrain gravitaires. Parmi les éléments étudiés figurait le tsunami de 1979 à Antibes.

S'appuyant sur les travaux du GIS CURARE (2006), la source a été considérée comme étant deux glissements consécutifs de caractéristiques différentes, à 140 s d'intervalle (Illustration 5). La densité du matériau glissé était supposée être de 2, les simulations ont été réalisées sur une grille bathymétrique de résolution 83 m.

	Premier glissement	Deuxième glissement
Localisation	43°38.72N 7°12.97E	43°36.42N 7°13.03E
Profondeur	49 m	839 m
Azimut	178°	181°
Pente bathymétrique	10°	11°
Largeur	652 m	458 m
Longueur	346 m	3027 m
Epaisseur	18 m	86 m

Illustration 5 – Caractéristiques des sources pour la modélisation du BRGM de 2007 (Pedreros et Poisson, 2007)



Illustration 6 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue au cours des simulations du tsunami de Nice 1979 (zoom de la grille à 83 m) (Pedreros et Poisson, 2007)

Les résultats obtenus ont pu être comparés aux observations recensées (Illustration 7).

	Observations			Simulation		
site	$\Delta \mathbf{t}$ (min)	$\Delta {f h}$ (m)	θ (min)	Δt (min)	$\Delta {f h}$ (m)	θ (min)
Saint-Laurent	1	2-3	3	1	-0.76/+0.76	1
Port de Clapage	4	+2-3	7	2	-0.66/+1.38	2.5
Nice	4	+1.2	8	8	-0.53/+0.60	2.5
Antibes	8	2.5-3.5	9	8	-0.91/+0.83	2
Port-Vauban	7	1	-	7	-0.91/+0.98	2
Villefranche	10	+1.8	8	11	-0.46/+0.47	3
Cannes	15	< 1	> 15	12	-0.22/+0.17	3



Si les temps d'arrivée simulés s'accordaient relativement correctement aux temps observés, les périodes des vagues simulées restaient par contre inférieures aux périodes reportées par Assier-Rzadkiewicz *et al.* (2000). Globalement, ces simulations ont montré un certain nombre de limites (polarité inversée, peu d'impact dans les zones effectivement les plus touchées, périodes incorrectes).

3.2.3. Le glissement de terrain : modélisations de l'Ifremer dans le cadre du projet RATCOM (*Silva Jacinto et Meyniel, 2010*)

Dans le cadre du projet RATCOM (Réseaux d'alerte aux tsunamis et submersions côtières en Méditerranée), Silva Jacinto et Meyniel (2010) ont travaillé à la modélisation de glissement de terrain sous-marin à l'origine du tsunami de 1979. Les modélisations s'appuient sur les reconnaissances sous-marines menées par l'Ifremer suite à l'événement, et apportent des précisions sur les caractéristiques du phénomène.

Le volume de matériau, estimé par comparaison entre les bathymétries avant et après le glissement, représente 10 millions de m³, pour une profondeur maximale de la cicatrice de glissement de 50 m. Les observations montrent que le glissement s'est propagé à travers 3 petits canyons jusqu'à la jonction de ces derniers, où la pente s'atténue et où des blocs et débris ont donc été déposés (Illustration 8). L'analyse de sédiments prélevés sur le site montre des densités de 1,4 (valeur sensiblement inférieure à celle prise par défaut à 2 par Pedreros et Poisson, 2007).



Illustration 8 – Observations sous-marines dans le canyon du Var suite à l'accident de 1979 (source : Silva Jacinto et Meyniel, 2010)

Les travaux de modélisation de Silva Jacinto et Meyniel (2010) ont mis en évidence l'importance des phénomènes de suspension et de dilution des matériaux avec le temps : les flux de matériaux augmentent dans les premières minutes du glissement (avec un maximum autour de 1 min), puis diminuent considérablement, alors que l'épaisseur de l'écoulement s'élargit et qu'il devient de plus en plus dilué, devenant ainsi un véritable courant de turbidité (Illustration 9). Dans cette seconde phase du glissement, lorsque les sédiments sont très dilués en profondeur, l'effet tsunamigène devient négligeable. Ces résultats indiquent donc que le tsunami a été généré dans les premières minutes suivant le déclenchement du glissement.



Illustration 9 – Evolution du flux et de la concentration en sédiments lors de la modélisation de l'Ifremer sur les 500 premières secondes du glissement (source : Silva Jacinto et Meyniel, 2010)

3.2.4. Génération et propagation du tsunami : modélisations du CEA dans le cadre du projet RATCOM (*Donadieu, 2010*)

Sur la base des résultats de Silva Jacinto et Meyniel (2010), Donadieu (2010) a modélisé le tsunami généré. Les codes utilisés sont ceux du CEA : un premier permet la simulation du glissement, la génération du tsunami et sa propagation, le second modélisant la propagation des vagues et la submersion à terre. Ces deux codes s'appuient sur les équations de Navier-Stokes moyennées sur la profondeur, sous l'approximation « shallow-water » (qui suppose une profondeur d'eau faible devant les longueurs caractéristiques des ondes). Le traitement de la submersion est assuré par l'extrapolation dans les mailles « sèches » des quantités calculées dans les mailles « mouillées ».

Les calculs ont été menés sur 2 grilles :

- Une grille 0, encadrant largement la Baie-des-Anges, avec une résolution de 25 m (n'incluant que la bathymétrie), sur laquelle ont été générés le glissement et le tsunami induit ;
- Une grille 1 focalisée sur Antibes, avec une résolution de 5 m, sur laquelle les vagues ont été propagées pour obtenir la submersion ; la grille intègre la topographie et la bathymétrie, mais pas les constructions et infrastructures.

Les calculs ont été menés avec une densité de 2 pour les sédiments glissés, et pour plusieurs valeurs de la viscosité de la masse de sédiments et d'un phénomène d'entrainement de l'eau par le glissement.

La confrontation des résultats issus de ces modélisations aux témoignages et observations du tsunami montre des résultats intéressants, mais parfois contradictoires : si les heures d'arrivée de l'onde simulée aux différents points de la Baie-des-Anges semblent cohérents avec celles indiquées par les observateurs, la polarité de l'onde (i.e. une crête ou un creux arrive t'il en premier) est parfois opposée à celle observée (Saint-Laurent-du-Var, Nice, Villefranche-sur-Mer), et les amplitudes des vagues restent en général bien inférieures à celles observées.

La simulation de l'inondation à Antibes permet de retrouver certaines zones inondées telles qu'identifiées par *Sahal et Lemahieu (2010)*, mais la submersion reste inférieure à celle observée, notamment au niveau du port de la Sallis.



$$\nu = 0.25m^2 \cdot s^{-1} e_w = 0$$

Illustration 10 – Exemple de résultat d'inondation simulée à Antibes(viscosité dynamique des sédiments : 0,25 m².s-1 ; pas d'entrainement de l'eau par le glissement) et cartographie de l'inondation observée (contour blanc) (source : Donadieu, 2010)

3.2.5. Bilan des connaissances actuelles

Les simulations de Pedreros et Poisson (2007), puis de Donadieu (2010) font apparaitre un certain nombre d'incompatibilités entre simulations et observations, notamment en ce qui concerne la polarité du tsunami parfois inversée et la hauteur des vagues, sous-estimée.

Depuis, les études sur les caractéristiques du glissement de l'accident de 1979, d'une part, et sur la submersion à Antibes d'autre part, ont apporté des informations fondamentales pour la modélisation du tsunami..

Les travaux présentés dans le présent rapport intègrent toutes ces connaissances pour proposer une simulation optimisée des phénomènes survenus à Nice en 1979.

4. Modélisation du tsunami : paramètres et données d'entrée

4.1. 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

4.1.1. 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 11.

Propriétés Geowave				
	Origine sismique	Okada, 1985		
Génération	Origine glissement sous-marin	Grilli et Watts, 1999, 2005		
(TOPICS)	Origine glissement subaérien (effondrement	Walder et al., 2003		
	falaise et volcanique)			
	r			
	Base théorique	Equations 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)		
Propagation	Dépendance de la qualité des	Forte		
inondation	Pétraction	Oui		
	Diffraction	Oui		
(FUNWAVE 1.0)	Réflexion	Oui		
	Gonflement	Oui		
	Déferlement	Kennedy et al., 2000		
	Interaction houle-courant	Oui		
	Dissipation énergie par frottements au fond	Terme dissipatif		
	Traitement surface couvrante/découvrante –	Oui (technique des slots)		
	Prise en compte d'obstacles (Bâtiments,	Non		
	mangrove,)			
	Elevation du plan d'eau	Suivant intervalle temporel défini par		
		l'utilisateur		
	Elevation maximale plan d'eau et heure			
	Correspondance			
Principaux	correspondente (retrait)			
résultats	Vitesse maximale et direction atteinte par le	En tenant compte de l'ensemble de		
	courant	Id Simulation		
	Limite d'inondation	1		
	Position du déferlement des vagues	1		

Illustration 11 – 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.

A 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.

4.1.2. 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.

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.

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

4.2.1. Données bathymétriques

Les données bathymétriques utilisées proviennent du SHOM et d'IFREMER.

• 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 12).

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 12).

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 12). Les données couvrent les profondeurs supérieures à 180 mètres.

Levers par sondeurs multifaisceaux

Des données issues de levers par sondeurs multifaisceaux ont été mises à disposition par le SHOM dans le cadre de cette étude. Elles concernent deux secteurs : Port-Vauban à Antibes et Port-Gallice, sur la côte ouest du Cap d'Antibes (données acquises par MESURIS).

4.2.2. Données topographiques

Les données topographiques utilisées correspondent au MNT du Conseil Général des Alpes Maritimes (CG 06) d'un maillage de 5 m mis à disposition par le CRIGE PACA (Centre Régional de l'Information Géographique).



Illustration 12 – 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)

4.2.3. Construction des grilles MNT

Deux MNT de 45 m et 15 m de maillage ont été fabriqués pour simuler la génération et la propagation du tsunami. Ils ont été générés 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.

L'Illustration 13 présente le MNT (maillage de 45 m) de la zone étudiée. On notera que ce secteur du littoral méditerranéen présente la particularité d'être très abrupte, avec un plateau continental très réduit et des fonds plongeant rapidement à plusieurs centaines de mètres au large de Nice et de Cagnes-sur-Mer. On soulignera toutefois la présence d'un relativement large plateau (3 km) devant Antibes dont les profondeurs avoisinent les 100 m et diminuent progressivement à l'approche du rivage : ce plateau présente un intérêt tout particulier pour la problématique des tsunamis, car il permet une élévation et un ralentissement de la vague que ne permettent pas les côtes plus abruptes, d'où des conséquences potentiellement amplifiées du tsunami (comme cela a pu être observé en 1979).



Illustration 13 – Aperçu du MNT (maillage de 45 m) utilisé dans le secteur de Nice pour les simulations numériques (en m) – L'axe vertical n'est pas à l'échelle.

4.2.4. Construction de la grille MNE (Modèle numérique d'élévation)

Pour le calcul réaliste de la submersion, un MNE a été généré de façon à intégrer la topographie des terres émergées la plus précise ainsi que le bâti et les ouvrages côtiers. Pour cela nous avons utilisé le MNT du CGAM d'un pas de 5 m (rééchantillonné à un pas de 3,75 m, cf paragraphe 4.4), sur lequel ont été superposés les bâtiments issus de la couche « bâti » de la BDTopo de l'IGN, en valorisant le champ « Hauteur » fourni dans cette couche. Ce travail a été réalisé sous ArcGIS. A noter que pour la validation de la simulation du tsunami de 1979, certains ouvrages maritimes, construits postérieurement à cet événement, ont été supprimés manuellement du MNE (il s'agit des 2 ouvrages représentés à l'Illustration 32, construits en 1981 d'après la base MEDAM – http://sigcol.unice.fr/website/MEDAM).

4.3. INCERTITUDES LIÉES À LA TOPOGRAPHIE ET À L'OCCUPATION DES SOLS

Compte tenu de la faible hauteur d'eau circulant à terre lors de la submersion, les simulations de ce type sont particulièrement sensibles au moindre défaut du MNE. En effet, des effets de seuils interviennent très rapidement :

- l'eau peut par exemple être arrêtée par une simple butte ou discontinuité dans le MNE, inexistante en réalité ;
- au contraire l'absence d'un mur ou d'une clôture dans le MNE va empêcher l'arrêt de l'inondation, et l'eau peut par exemple dévaler dans des pentes situées plus loin, d'où une inondation largement surestimée.

L'Illustration 14 représente ainsi la submersion simulée dans un secteur d'Antibes en comparant l'influence des rues et de murs de clôture.



Illustration 14 – Cote maximale de la surface libre lors de la submersion (en m) : à gauche, résultats « bruts » ; à droite, résultats après corrections de détails (rues redessinées au nord et mur ajouté au sud)

Il est important de noter que, compte tenu de la sensibilité des simulations de submersion à la précision du MNE, certaines corrections ponctuelles ont été apportées a posteriori sur le MNE utilisé dans cette étude (ouverture de rues étroites, ajout de murs dont la présence peut être vérifiée sur le terrain...).

4.4. GRILLES DE CALCUL

Afin d'optimiser les résultats des simulations numériques, 3 grilles de calcul emboitées ont été exploitées, dont la résolution s'affine autour de la zone d'intérêt que constitue Antibes (Illustration 15). Pour chaque rang de calcul, des « jauges » virtuelles ont été installées afin de suivre le niveau de l'eau et les vitesses en différents points. Ces jauges sont également représentées sur l'Illustration 15.



Illustration 15 – Emboitement des 3 grilles de calcul, résolution des maillages en m² et position des jauges virtuelles dans chaque grille

On notera également que, compte-tenu de sa faible amplitude et de la rapidité du trajet, la marée n'a été prise en compte que dans la grille la plus fine, au rang 2. Elle a été estimée par l'outil Shomar (diffusé par le SHOM) à +0,18 m (IGN 69) lors du glissement.

Les grilles des rangs 0 et 1 (résolutions respectives de 45 m et 15 m) ont été exploitées pour les calculs sous GEOWAVE, alors que la grille du rang 2 (résolution de 3,75 m) a été utilisée pour les calculs de submersion sous SURFWB.

4.5. CARACTÉRISATION DU GLISSEMENT DE TERRAIN

Parmi les sources tsunamigènes d'origine gravitaire utilisables dans le code GEOWAVE (paragraphe 4.1.1), le glissement en translation (« slide ») a été retenu pour décrire le glissement de l'aéroport de Nice, compte tenu de ses caractéristiques géométriques (le glissement s'étant propagé sur plusieurs kilomètres).

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 (paragraphe 3.2.3), et présentées dans le tableau de l'Illustration 16.

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

Illustration 16 – Paramètres retenus pour la description du glissement de l'aéroport de Nice pour la modélisation de la source tsunamigène

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 15,7 millions de m³ (l'analyse bathymétrique de l'Ifremer l'estimait de l'ordre de 10 millions de m³).

Ces caractéristiques correspondent à un cas de référence, autour duquel 5 tests de sensibilité ont été menés en faisant varier certains de ces paramètres (direction du glissement, caractéristiques géométriques, densité du matériau glissé, méthode de calcul). Les résultats de ces essais sont présentés au paragraphe 5.

5. Résultats issus des modélisations

Comme évoqué au paragraphe précédent, plusieurs simulations numériques ont été menées, en faisant varier certains paramètres ou méthodes de calcul :

- Le cas de référence: il s'agit de la modélisation utilisant les paramètres gravitaires qui se rapprochent le plus de la situation de l'événement de 1979 (glissement décrit dans l'Illustration 16, suppression des ouvrages maritimes construits postérieurement); le calcul de la propagation du tsunami est fait suivant les équations de Boussinesq;
- Un cas noté « AO » (avec ouvrages) est identique au cas de référence, mais intègre les ouvrages maritimes construits depuis 1979 ;
- Un cas noté « GC » (glissement court) est identique au cas de référence à ceci près que la longueur initiale du glissement a été réduite à 600 m ; l'estimation du volume par la formulation de McAdoo *et al.* (2000) indique alors un ordre de grandeur de 10,5 millions de m³;
- <u>Un cas noté « DD » (direction différente)</u> est identique au cas de référence à ceci près que la direction du glissement a été légèrement modifiée (178°, soit 5° d'écart vers l'Est);
- <u>Un cas noté « MD » (matériau dense)</u> est identique au cas de référence à ceci près que la densité du matériau glissé a été fixée à 2 (comme dans les modélisations effectuées par le CEA);
- <u>Un cas noté « SW » (shallow-water)</u> est identique au cas de référence, mais utilise les équations de Saint-Venant pour la propagation du tsunami (comme dans les modélisations effectuées par le CEA).

Pour chaque cas, les simulations sont effectuées successivement sur les 3 rangs de calcul :

- Rang 0 pour la génération et la propagation du tsunami dans la Baie-des-Anges (code GEOWAVE, résolution de la grille de 45 m) ;
- Rang 1 pour la propagation du tsunami à l'approche d'Antibes (code GEOWAVE, résolution de la grille de 15 m) ;
- Rang 2 pour la submersion sur la Salis (code SURFWB, résolution de la grille de 3,75 m).

5.1. CAS DE RÉFÉRENCE

5.1.1. Rang 0 : Génération et propagation du tsunami à travers la Baiedes-Anges

Les simulations ont été menées pour une durée simulée de plus de 20 min. L'instant initial de référence t_0 correspond au déclenchement du glissement (soit à 13h57 le 16/10/1979). Le mode de génération du tsunami conduit à démarrer les simulations au bout de 111,6 s environ (soit près de 2 minutes). L'Illustration 17 présente un aperçu de la génération du tsunami et de sa propagation dans la Baie-des-Anges, issu de la simulation numérique au rang 0 (maille de 45 m de coté) avec GEOWAVE.



Illustration 17 – Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence : Cote de la surface libre (en m) à t_0 +2 min ; t_0 +3 min ; t_0 +4 min ; t_0 +6 min ; t_0 +10 min ; t_0 +20 min

La carte de l'Illustration 18 représente les élévations maximales de la surface libre atteintes sur l'ensemble de la période de 20 minutes simulées. Elle permet de visualiser l'importance particulière qu'a pu prendre le tsunami au niveau d'Antibes, qui se situait immédiatement dans l'axe de propagation de l'onde, et dont la bathymétrie a permis une élévation de la vague de plusieurs mètres (hauts-fonds). On peut également noter qu'à cette échelle, les simulations prévoient une submersion significative (notamment sur Antibes), mais que compte tenu de la résolution du maillage ces submersions ne tiennent pas compte de l'aménagement du littoral.



Illustration 18 – Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau

Au rang0, des jauges virtuelles ont été placées près du glissement (Aéroport de Nice et Port de clapage) et en différents points où des observations ont été rapportées (Baie de Villefranche-sur-Mer, Nice, Saint-Laurent-du-Var, Antibes-Port-Vauban et Antibes-la Salis). Il convient toutefois de rappeler que la position de ces jauges influe fortement sur les résultats, et que la comparaison avec des témoignages reste de ce fait difficile.

L'Illustration 19 présente les hauteurs d'eau enregistrées à proximité de la source (Aéroport et Port de clapage). A l'aéroport, un retrait est observé entre 2' 20" et 2' 50", le creux atteignant près de 9 m. Il est suivi très rapidement par une vague de 5,30 m de haut environ, aux alentours de 3'. Le retrait suivant est plus modéré (aux alentours de 2,50 m quelques secondes après la première vague) avant l'arrivée de la plus haute vague (plus de 11 m vers 3' 30"). Au port de clapage, les phénomènes sont par contre retardés et sensiblement atténués.



Illustration 19 – Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence : Elévation de la surface libre au niveau de l'aéroport de Nice et du port de clapage

Malgré la formulation très simple de la source par le module TOPICS de GEOWAVE par rapport aux simulations menées par le CEA (paragraphe 3.2.4), les ordres de grandeurs de l'amplitude des vagues près de la source restent cohérents entre les deux méthodes (le creux maximal obtenu par le CEA atteignait 13 à 14 m et la crête maximale 4 à 5 m, soit une « amplitude » maximale de l'ordre de 18 m, contre 20 m obtenus par GEOWAVE). Les résultats restent cependant assez différents en termes de polarité (crête pour le CEA, creux pour GEOWAVE) et de hauteur des vagues par rapport au niveau zéro.

L'analyse des jauges placées au rang 0 permet d'estimer le temps d'arrivée et la polarité du tsunami dans les différents sites où il a été observé. L'Illustration 20 présente les hauteurs d'eau obtenues sur les 10 premières minutes simulées au rang 0 à Villefranche, Nice, Saint-Laurent, Port-Vauban et Antibes-la-Salis. Le tableau de l'Illustration 21 rappelle les observations issues des témoignages (issues du rapport du CEA) et les résultats issus des modélisations du CEA aux résultats issus des modélisations BRGM au rang 0. Il est important de noter que ces chiffres sont particulièrement sensibles à la position du point d'observation. En l'absence d'indications précises sur la position des témoins, cette comparaison s'est limitée au maillage le plus grossier utilisé, des résultats plus fins étant présentés par la suite sur le secteur de La Salis. Les caractéristiques d'amplitude et de période des vagues, qui avaient été retenues par le CEA, ne sont pas présentées ici car elles sont très difficiles à estimer (variabilité dans le temps, position de l'observateur, amplitude seuil percue par un observateur...). On retiendra toutefois que les périodes indiquées par les observateurs à la Salis semblent très importantes par rapport à celles obtenues par simulation (8 à 9 min selon les témoignages, 2 à 3 min par les simulations).



Illustration 20 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence : Elévation de la surface libre au niveau des principaux points d'observation de la Baie-des-Anges sur les 10 minutes suivant le glissement

		Instant d'arrivée		Première vague (polarité et amplitude)			
	Observation	CEA	BRGM	Observation	CEA	BRGM	
PSL	1 min	Max : ~2 min	Début : 2min 40s Max : 3min 40s	Creux > 2 m	Crête 1,2 m	Creux 5,20 m	
PN	3 min Marégraphe : début à 3 min	Début : ~2 min 30 sec	Début : 3min 30s Max : 4min 40s	Creux 1 m	Crête 1,2 m	Creux 1,10 m	
PVi	5 min Marégraphe : début à 6 min	Max : 4 min	Début : 5min 50s Max : 7min 10s	Creux ~1 m	Crête 20 cm	Creux 1,40 m	
PV	5 min	3 min	Début : 3min 30s Max : 4min 30s	Crête 30 cm	Crête 1 m	Crête 1,20 m	
PAS	5 min	Max : 5 min	Début : 4min 30s Max : 5min 20s	Crête ~50 cm	Crête 80 cm	Crête 2,90 m	

Illustration 21 – Comparaison entre quelques caractéristiques des observations et des simulations du CEA (grille 0) et du BRGM (Rang 0) à Saint-Laurent-du-Var (PSL), Nice (PN), Villefranche-sur-Mer (PVi), Antibes-Port-Vauban (PV) et Antibes-la Salis (PAS)

Ces résultats, bien que relatifs du fait de leur sensibilité à la position des capteurs, semblent confirmer une propagation correcte à travers la Baie-des-Anges : les heures d'arrivée de l'onde sont relativement conformes entre les observations et les simulations (si les résultats du CEA étaient généralement en avance ou à l'heure, ceux issus de GEOWAVE tendent plutôt à présenter un retard quand ils ne sont pas à l'heure).

En termes de polarité, les simulations par GEOWAVE sont conformes aux observations (creux à Saint-Laurent, Nice et Villefranche, et crête à Antibes), ce qui apporte donc un progrès par rapport aux résultats obtenus par le CEA. Si l'amplitude de la première vague est cohérente avec les observations dans la partie nord de la zone, elle semble bien supérieure sur Antibes. Rappelons toutefois que ce type d'observation est particulièrement dépendant de la position de l'observateur, comme le montrent les résultats présentés par la suite, détaillés au niveau d'Antibes.

5.1.2. Rang 1 : Propagation du tsunami à l'approche d'Antibes

Les simulations ont ensuite été poursuivies au rang 1 (maille de 15 m x 15 m), en utilisant comme conditions aux limites les résultats fournis au rang précédent. L'Illustration 22 donne un aperçu des élévations maximales obtenues par les simulations numériques au rang 1. Comme au rang précédent, on retrouve l'élévation de la vague à plus de 8 m, au large d'Antibes, en raison de la bathymétrie (présence de haut-fond permettant l'élévation de la vague), alors que le Port-Vauban semble relativement protégé par ses digues (malgré leur submersion). La submersion estimée par GEOWAVE au niveau d'Antibes – La Salis s'approche significativement des zones inondées indiquées par Sahal et Lemahieu (2010) (paragraphe 3.2.1), mais elle est sensiblement plus étendue vers le nord.



Illustration 22 - Simulation numérique au rang 1 sur le cas de référence : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau à Antibes

5.1.3. Rang 2 : Submersion au niveau d'Antibes – La Salis

La submersion a enfin été calculée au rang 2, par l'intermédiaire du code SURFWB (mailles de 3,75 m x 3,75 m). L'Illustration 23 présente la propagation et la submersion à différents instants. L'analyse des événements simulés montre que l'arrivée de la première vague sur la côte semble causer la majeure partie de l'inondation, les vagues suivantes ne venant que renforcer cette inondation, avec d'ailleurs des vitesses de courant globalement moins élevées.



Illustration 23 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Cote de la surface libre (en m) et courants à t₀+5 min ; t₀+6 min; t₀+7 min ; t₀+8 min ; t₀+10 min ; t₀+19 min

SURFWB permet au final de cartographier les zones inondées par la simulation numérique. L'Illustration 24 représente la cote maximale de la surface libre rencontrée sur la zone : il s'agit donc en mer de la hauteur maximale des vagues par rapport au niveau de l'eau avant l'arrivée du tsunami, tandis qu'à terre on représente à la fois l'élévation topographique et la hauteur de l'eau. Cette information permet par conséquent d'accéder au run-up atteint par le tsunami (cote atteinte par le tsunami à terre). Les valeurs de run-up ainsi obtenues sont toutefois à relativiser en présence de bâtiments : on remarque par exemple qu'en arrivant sur une rangée de bâtiments, le run-up devient très important car l'eau s'accumule contre le bâtiment (Illustration 25).



Illustration 24 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Cote maximale de la surface libre (en m)



Illustration 25 – Modification du run-up lié à la présence d'un bâtiment (en rouge : MNE issu d'interpolations ; en pointillés : réalité physique)

L'Illustration 26 représente les hauteurs maximales d'inondation à terre enregistrées au cours des 20 minutes simulées, auxquelles a été superposée la cartographie de la zone inondée issue des travaux de Sahal et Lemahieu (2010).



986400 986500 986600 986700 986800 986900 987000 987100 987200 987300 987400

Illustration 26 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Hauteurs maximales d'inondation à terre (en m) et zone d'inondation identifiée par Sahal et Lemahieu (2010) en violet

L'Illustration 24 montre que les vagues arrivent en général avec une hauteur maximale de 2 à 4 m sur le rivage, et suivant la configuration s'engouffrent dans les rues ou se heurtent aux bâtiments. Les valeurs de run-up obtenues par la simulation sont assez cohérentes avec celles indiquées par Sahal et Lemahieu (2010) : on retrouve un runup de l'ordre de 2 à 2,5 m au nord de la zone (lié notamment à la présence d'une dépression topographique derrière les rues du front de mer), de 4 m à l'ouest (contre 3,2 à 3,5 m d'après les témoignages, malgré une zone inondée relativement cohérente) et de 3,5 à 4 m au sud. Les écarts qui existent localement entre ces témoignages et la simulation semblent résulter d'une part de petites différences entre les zones inondées, et d'autre part de la sensibilité à la position du point de mesure, que ce soit par les témoignages ou sur le MNE.

L'Illustration 26 montre finalement une hauteur d'inondation pouvant atteindre 1 à 2,5 m, voire plus localement et à proximité immédiate du rivage (par exemple 4 à 5 m au sud de la Pointe des Pendus, entre les 2 plages principales). Les contours des zones inondées simulées sont relativement conformes à ceux identifiés par les témoignages, hormis au nord et à l'est de la zone, où les simulations indiquent des inondations importantes non signalées dans Sahal et Lemahieu (2010). Ceci pourrait s'expliquer par certaines imprécisions sur la topographie utilisée (notamment l'existence de murs d'enceinte sur le littoral), et également par la proximité de ces zones avec les limites du maillage (effet de bord).

En termes de profondeur maximale d'inondation (distance inondée depuis la côte), la simulation donne 150 à 200 m au nord de la zone d'étude, une centaine de mètres au niveau de la grande plage au nord-ouest (soit jusqu'aux bâtiments), une soixantaine de mètres au niveau de la plage à coté du port de la Salis (voire un peu plus quand l'eau a pu pénétrer dans les rues), et de l'ordre de 110 m au niveau du port de la Salis.

Il convient toutefois de rappeler que ces résultats ont nécessité des interventions localisées sur le MNE afin de corriger certains défauts liés à la résolution du maillage et aux données disponibles (ouvertures de rues entre 2 bâtiments accolés, ajouts de murs d'enceinte inexistants à la base dans la topographie...). Ces interventions ont permis d'appréhender l'importance de la qualité du MNE pour la simulation de l'inondation, un simple mur inexistant dans les grilles pouvant parfois suffire à arrêter l'écoulement (Illustration 14).

La carte de l'Illustration 27 présente la position de quelques jauges au rang 2, au niveau d'Antibes. Les variations du niveau de l'eau sur ces jauges sont présentées dans les paragraphes suivants.



986400 986500 986600 986700 986800 986900 987000 987100 987200 987300 987400

Illustration 27 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Cote maximale de la surface libre (en m), position des jauges étudiées (en violet) et profondeurs associées (IGN 69)

L'Illustration 28 présente les variations du niveau de l'eau dans le port de La Salis (jauges 1 à l'entrée du port et 2 au milieu du port). On constate que l'arrivée du tsunami se traduit par un très léger creux, un peu plus de 5 minutes après le glissement de l'aéroport (moins de 5 cm, imperceptible pour les témoins). Une vague de près de 1,50 m de hauteur est ensuite entrée dans le port, environ 6 minutes après le glissement. La comparaison des 2 jauges montre que l'eau rentre parfaitement dans le port de La Salis, mais elle semble avoir du mal à s'évacuer. Ceci peut s'expliquer par le fait que les digues du port aient été largement submergées (hauteur au-dessus de l'eau de l'ordre de 0,80 m), d'où un remplissage instantané du bassin, alors qu'après le retrait de la mer, la vidange du bassin par-dessus les digues ou par la brèche se révèle beaucoup plus lente. Le niveau de l'eau maximal dans le port est atteint aux alentours de 11 minutes 40 secondes, avec 2,50 m de surcote.



Illustration 28 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Elévation de la surface libre au niveau du port de La Salis (jauges 1 & 2)

L'Illustration 29 présente les variations du niveau de l'eau au niveau des plages, au nord du port de La Salis. Comme au niveau du port, l'arrivée du tsunami commence par un léger retrait, probablement imperceptible pour les observateurs, mais légèrement plus important qu'au niveau du port (20 cm). La première vague, qui constitue cette fois la plus haute, est maximale 6 minutes 20 secondes après le glissement, et dépasse les 3 m de haut le plus au nord (jauge 5), mais reste comprise entre 2 et 3 m plus au sud. Il convient toutefois de rappeler qu'à l'approche de la côte, la vague tend à prendre de la hauteur, et que ces amplitudes dépendent donc fortement de la position des jauges. Une seconde vague importante arrive aux alentours de 11 minutes, comme au port, avec une hauteur comprise entre 1,5 m et 2,5 m au niveau des jauges.



Illustration 29 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Elévation de la surface libre au niveau des plages de La Salis (jauges 3, 4 & 5)

On peut noter que par rapport aux résultats indiqués au rang 0 dans les illustrations 20 et 21, des écarts significatifs apparaissent tant en termes de temps que d'amplitude. En effet, au niveau de La Salis, le rang 0 identifiait une crête de 2,80 m, débutant 4 minutes 30 secondes après le glissement et atteignant son maximum vers 5 min 20 secondes. Ceci illustre bien la sensibilité de ces valeurs à la position du point d'observation et à la résolution adoptée, et donc la difficulté à utiliser les témoignages comme élément de calage, à moins de connaitre très précisément la position de l'observateur et les repères utilisés.

L'Illustration 30 présente les vitesses maximales simulées atteintes par le flux et le reflux (norme et direction).



986400 986500 986600 986700 986800 986900 987000 987100 987200 987300 987400

Illustration 30 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Vitesses maximales atteintes par les courants : normes (en m/s) et directions

Les courants simulés par SURFWB sont donc particulièrement importants, puisqu'à proximité du rivage ils dépassent couramment les 3 m/s. On remarque également que dans la plus grande partie de la zone, et dans toute la zone inondée, c'est pendant une phase de flux (arrivée de la vague) que sont atteintes les vitesses les plus importantes. L'analyse du film des événements et des jauges placées dans la zone montrent qu'hormis au port de la Salis c'est essentiellement la première vague qui est à l'origine des courants les plus forts.

Dans les rues, les vitesses des courants sont relativement variables suivant les secteurs : dans les 2 rues inondées au nord de la zone, par exemple, elles restent limitées car la hauteur d'eau reste faible (0,5 à 1 m) et l'eau se contente de dévaler la pente dans la cuvette avec un flux modéré. Dans les rues immédiatement au sud des précédentes, par contre, on observe une accélération des courants qui peuvent alors atteindre voire dépasser les 5 m/s, pour des hauteurs d'eau pouvant atteindre les 2 m. Au sud de la zone, les courants rentrent dans les rues avec des vitesses de l'ordre de 4 à 5 m/s pour s'atténuer progressivement dans la rue sous l'effet de la pente.

L'Illustration 31 présente la hauteur d'eau et la vitesse du courant à terre, au niveau de la jauge 6. Ce point est atteint par l'eau 6 minutes 16 secondes après le glissement, et le niveau de l'inondation s'élève en 12 secondes à près de 2,40 m. Il redescend

rapidement (il est de 1 m au bout de 45 secondes, et ne repassera le mètre que brièvement, 11 minutes plus tard), mais les vitesses atteintes lors du passage de cette vague sont très importantes, dépassant les 6 m/s. Elles resteront plus modérées par la suite, atteignant tout de même les 1 à 2 m/s, vitesses largement suffisantes pour entrainer des dommages humains et matériels.



Illustration 31 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence : Hauteur d'eau et vitesse du courant au niveau de la jauge 6

5.2. CAS « AO » (AVEC OUVRAGES) : EVÉNEMENT DE RÉFÉRENCE INCLUANT LES OUVRAGES CONSTRUITS POSTÉRIEUREMENT

Afin de visualiser la protection que pourraient apporter les ouvrages maritimes de type brise-lame construits depuis 1979 si le même tsunami devait se reproduire, le cas de référence a été reproduit à l'identique en intégrant 2 ouvrages dans la grille topobathymétrique du rang 2, le calcul ayant été mené sous SURFWB avec les mêmes paramètres gravitaires que dans le cas de référence. L'Illustration 32 présente la topobathymétrie corrigée de ces ouvrages.



Illustration 32 – Grille topo-bathymétrique utilisée au rang 2 pour le cas « AO », les ouvrages ajoutés apparaissant en rouge

Les résultats de la submersion en termes de profondeur d'inondation et de run-up ont été comparés au cas de référence (illustrations 33 et 34). Il s'avère que la présence des ouvrages n'influe pas significativement sur les contours de la zone inondée, seules quelques petites rues se trouveraient épargnées par les ouvrages. Elle contribue toutefois à limiter légèrement la hauteur d'eau juste derrière le brise-lames allongé devant la plage.



Illustration 33 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « AO » (à droite) : Cote maximale de la surface libre (en m)



Illustration 34 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « AO » (à droite) : Hauteurs maximales d'inondation à terre (en m)

De même, en termes de vitesses maximales des courants, l'effet des ouvrages reste assez peu sensible, seule la zone située immédiatement derrière le brise-lames bénéficiant d'une protection significative (les courants maximaux au niveau de la plage du nord et des bâtiments de ce secteur voyant leurs vitesses abaissées de 1 à 2 m/s).



Illustration 35 – Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « AO » (à droite) : Vitesses maximales atteintes par les courants : normes (en m/s) et orientation

L'analyse des jauges ne fait apparaitre que des différences limitées entre le cas de référence et le cas avec ouvrages. Les illustrations 36 et 37 présentent les comportements des jauges 4 et 6 (telles que présentées à l'Illustration 27), à la fois pour le cas de référence et pour le cas « AO ».



Illustration 36 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence et sur le cas « AO » : Elévation de la surface libre au niveau de La Salis (jauge 4)



Illustration 37 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence et sur le cas « AO » : Hauteur d'eau et vitesse du courant au niveau de la jauge 6

Au niveau de la jauge 4, située devant une des plages de la Salis, peu de différences significatives apparaissent entre les deux cas. De même, pour la jauge 6 située à terre, les hauteurs d'eau et les vitesses sont peu influencées par la présence des ouvrages, sauf sur la fin de la période simulée puisque la vague qui arrive en ce point un peu plus de 18 minutes après le glissement est sensiblement atténuée (en hauteur et en vitesse) par la présence des ouvrages. Toutefois, au final, les hauteurs d'eau et

vitesses maximales restent similaires pour l'ensemble de la période simulée (les vitesses avec ouvrages pouvant même être parfois supérieures à celles sans ouvrages).

Au vu des simulations, il semble donc que la présence des 2 ouvrages construits postérieurement au tsunami n'atténuerait finalement que très peu les conséquences d'un évènement de ce type.

5.3. CAS « GC » (GLISSEMENT COURT)

Afin de tester l'influence de quelques paramètres du glissement de terrain sur les résultats, le cas de référence a été reproduit en modifiant une caractéristique géométrique du glissement : la longueur initiale du glissement est ici réduite à 600 m (contre 900 m dans le cas de référence). Comme évoqué au début du paragraphe 5, l'estimation du 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) indique alors un volume de l'ordre de 10,5 millions de m³ (contre 15,7 millions de m³ dans le cas de référence, estimés par la même méthode).

Au rang 0, les résultats montrent que l'influence de ce paramètre est forte sur les élévations maximales du plan d'eau (Illustration 38). En effet, alors que dans le cas de référence les élévations dépassaient 10 m dans certaines zones autour du glissement, elles dépassent rarement 6 m pour le glissement plus court. De même, au niveau d'Antibes, on retrouve bien une amplification de l'amplitude de l'onde, mais elle ne dépasse pas 6 m de haut pour le glissement court contre localement plus de 8 m pour le cas de référence.



Illustration 38 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « GC » (à droite) : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau

Ceci a pour conséquence, au niveau de la simulation de submersion au rang 2 par le code SURFWB, une inondation moindre que celle simulée pour le cas de référence. La simulation pour le cas « GC » est par conséquent moins cohérente avec les témoignages, tant en termes de run-up (Illustration 39) que de profondeur d'inondation (Illustration 40). L'inondation est notamment réduite au nord de la zone, où l'eau pénètre beaucoup moins dans les rues, et au niveau du port de La Salis.



Illustration 39 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « GC » (à droite) : Cote maximale de la surface libre (en m)

Cette inondation moindre se traduit également par des hauteurs d'inondation plus faibles sur toute la zone (Illustration 40), impliquant finalement des valeurs de run-up ne dépassant que rarement les 2,20 m (en l'absence de bâtiments perturbant la valeur, cf Illustration 25) pour des hauteurs d'inondation généralement inférieures à 1,50 m.



Illustration 40 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « GC » (à droite) : Hauteurs maximales d'inondation à terre (en m)

De même, les vitesses maximales des courants sont considérablement plus modérées que dans le cas de référence (Illustration 41), mais c'est bien toujours le flux qui est à

l'origine des courants les plus rapides. A terre, les vitesses des courants sont ainsi réduites de 1 à 3 m/s dans le cas « GC » par rapport au cas de référence.



Illustration 41 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « GC » (à droite) : Vitesses maximales atteintes par les courants : normes (en m/s) et orientation

Les illustrations 42 et 43 présentent les résultats simulés au niveau des jauges 4 et 6 dans le cas « GC ». Au niveau de la jauge 4, sur la plage, il apparait surtout que la première vague est considérablement moins haute que dans le cas de référence (1,5 m contre 2,40 m dans le cas de référence). Les vagues suivantes, par contre, sont tout à fait comparables et simultanées.

Au niveau de la jauge 6, à terre, il apparait par contre clairement que les conséquences du cas « GC » seraient bien moins dommageables que celles du cas de référence : la hauteur d'eau maximale est d'environ 1 m (contre 2,40 m dans le cas de référence), et les vitesses maximales des courants sont bien plus modérées (3,7 m/s contre 6,2 m/s dans le cas de référence). Les corrélations entre les différentes vagues entre le cas de référence et le cas « GC » sont cependant bien moins flagrantes qu'à la jauge 4, tant en termes de temps que de hauteur, probablement en raison d'effets de seuil (les vagues plus petites du cas « GC » ne pouvant franchir certains obstacles sans les contourner...).



Illustration 42 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence et sur le cas « GC » : Elévation de la surface libre au niveau de La Salis (jauge 4)



Illustration 43 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence et sur le cas « GC » : Hauteur d'eau et vitesse du courant au niveau de la jauge 6

Ces résultats montrent l'importance des paramètres géométriques du glissement sur la qualité des résultats : une modification significative du volume glissé peut entrainer d'importants écarts sur les résultats, tout en fournissant cependant des données valorisables pour quantifier l'aléa.

5.4. CAS « DD » (DIRECTION DIFFÉRENTE)

Toujours afin de tester l'influence des paramètres du glissement de terrain sur les résultats, le cas de référence a été reproduit en modifiant légèrement la direction du

glissement : celle-ci a donc été portée à 178 ° par rapport au nord (sens anti-horaire), soit 5 ° plus vers l'ouest que le cas de référence.

Au rang 0, les résultats montrent que cette modification n'a que peu d'influence sur les élévations maximales du plan d'eau, compte tenu de la faible perturbation apportée (Illustration 44). On remarque toutefois une légère « rotation » des structures vers Antibes, et des amplifications – atténuations des vagues localement modifiées ; ainsi par exemple, l'amplification devient un peu moins importante au sud-est de la source (aucune vague ne dépassant plus 6 m dans ce secteur par exemple), mais devient plus importante au sud de la source (les secteurs où les vagues dépassent 2 m sont plus étendus).



Illustration 44 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « DD » (à droite) : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau

L'observation des jauges au rang 0 ne montre que très peu de différences avec le cas de référence : l'instant d'arrivée de la perturbation dans les 5 villes/ports est identique au cas de référence, avec une légère amplification à Saint-Laurent (creux de 5,3 m contre 5 m dans le cas de référence), Port-Vauban (crête de 1,40 m contre 1,1 m dans le cas de référence) et Antibes-La Salis (crête de 3 m contre 2,80 m dans le cas de référence).

Les simulations ont été poursuivies au rang 1 sous GEOWAVE, puis au rang 2 sous SURFWB, dans les mêmes conditions que pour le cas de référence. L'Illustration 45 présente les élévations maximales du niveau de l'eau issues de cette simulation, comparées aux valeurs de run-up connues, et l'Illustration 46 compare les hauteurs d'eau maximales obtenues à terre aux contours connus de l'inondation. Il apparait que les valeurs de run-up et les contours de l'inondation restent relativement proches de ceux issus du cas de référence, avec toutefois une inondation légèrement plus

importante, parfois d'une dizaine de mètres en termes de profondeur d'inondation, en plusieurs secteurs, suivant les rues. En termes de run-up, les valeurs restent de l'ordre de 2 m au nord de la zone étudiée, mais se révèlent beaucoup plus importantes que dans le cas de référence le long des bâtiments du front de mer, sous l'effet perturbateur de ces derniers (Illustration 25), alors même que la zone inondée reste peu différente, ce qui traduit en fait une accumulation d'eau et des hauteurs d'inondation plus importantes (typiquement de 1 m). Au sud, cependant, au niveau de Port-Salis, le run-up est sensiblement plus important puisqu'il dépasse les 4 m du fait d'une inondation plus importante que dans le cas de référence (et que celle reconnue par Sahal et Lemahieu, 2010).



Illustration 45 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « DD » (à droite) : Cote maximale de la surface libre (en m)



Illustration 46 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « DD » (à droite) : Hauteurs maximales d'inondation à terre (en m)

Les vitesses et directions des courants maximaux sont représentées à l'Illustration 47. Les vitesses sont légèrement supérieures dans le cas « DD » par rapport au cas de référence, notamment au niveau de la plage au nord.



Illustration 47 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « DD » (à droite) : Vitesses maximales atteintes par les courants : normes (en m/s) et orientation

Au niveau de la jauge 6, à terre, il apparait que les conséquences du cas « DD » seraient légèrement plus dommageables que celles du cas de référence : la hauteur d'eau maximale est d'environ 2,80 m (contre 2,40 m dans le cas de référence), et la vitesse maximale des courants est légèrement plus élevée (6,6 m/s contre 6,2 m/s dans le cas de référence). Les corrélations entre les vagues sont très bonnes entre le cas de référence et le cas « DD », le principal écart correspondant à la première vague.



Illustration 48 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence et sur le cas « DD » : Hauteur d'eau et vitesse du courant au niveau de la jauge 6

Ces résultats confirment l'importance des paramètres géométriques du glissement sur la qualité des résultats : si une légère modification de la direction du glissement peut entrainer des écarts significatifs sur les résultats, les ordres de grandeur des caractéristiques de l'inondation simulée reste cohérents entre eux.

5.5. CAS « MD » (MATÉRIAU DENSE)

Toujours pour tester l'influence des paramètres du glissement de terrain, et afin de se rapprocher des conditions des simulations menées par le CEA en 2010, le cas de référence a été repris en augmentant uniquement la densité du matériau glissé à 2 (contre 1,4 dans le cas de référence suite aux analyses menées par l'Ifremer).

L'Illustration 49 montre la comparaison entre les élévations maximales du plan d'eau obtenues au rang 0 entre le cas de référence et le cas « MD ».



Illustration 49 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « MD » (à droite) : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau

L'onde générée par le glissement de terrain avec une densité de 2 se révèle beaucoup plus importante que dans le cas de référence : les élévations du plan d'eau dépassent couramment les 10, voire 15 m, avec des maxima de 30 à 50 m immédiatement à la source. L'Illustration 50 compare les résultats obtenus entre le cas de référence et le cas « MD » à Villefranche, Nice et Saint-Laurent, alors que l'Illustration 51 les compare au niveau d'Antibes.

Dans l'ensemble, les vagues arrivent plus vite dans le cas « MD », et avec des amplitudes largement plus importantes (amplitudes crête-à-creux pouvant atteindre 12 m à Villefranche, près de 8 m à Nice, près de 18 m à Saint-Laurent et Port-Vauban et plus de 20 m à la Salis). Ces amplitudes sont peu réalistes au vu des témoignages (de telles vagues auraient pu être particulièrement destructrices), ce qui montre



l'importance de la description du glissement pour les simulations (ici la densité du matériau glissé).

Illustration 50 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence et sur le cas « MD » : Elévation de la surface libre au niveau de Villefranche, Nice et Saint-Laurent sur les 15 premières minutes simulées



Illustration 51 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence et sur le cas « MD » : Elévation de la surface libre au niveau d'Antibes sur les 10 premières minutes simulées

Au rang 1, le calcul n'a pu aboutir en raison de problèmes de convergence. Compte tenu des amplitudes exagérées du tsunami dans cette configuration, il n'est pas apparu opportun de poursuivre les essais sur ce cas.

5.6. CAS « SW »

L'hypothèse de « shallow-water » consiste à utiliser les équations de Saint-Venant (équations de Navier-Stokes intégrées sur la profondeur), moyennant la condition que la longueur caractéristique dans le plan horizontal soit très supérieure à la profondeur. Dans le cas qui nous intéresse, cette approximation suppose donc que la longueur d'onde du tsunami soit très supérieure à la profondeur.

Dans le cas d'un tsunami généré par un mouvement de terrain, les longueurs d'ondes sont généralement relativement limitées par rapport à un tsunami d'origine sismique. Ainsi, la longueur d'onde du tsunami généré par GEOWAVE sur Nice est de l'ordre de 2 km (elle peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres pour un tsunami d'origine sismique, par exemple).

La configuration de la Baie-des-Anges présente la particularité d'avoir une bathymétrie abrupte, amenant les zones côtières à côtoyer des profondeurs importantes : au sudest de la zone étudiée, les profondeurs peuvent ainsi atteindre 2 000 m (Illustration 13). Pour la problématique étudiée, on pourra noter que l'on rencontre, entre l'aéroport de Nice et Antibes, des profondeurs pouvant atteindre 800 m dans le canyon du Var. Ces profondeurs restent inférieures à la longueur d'onde du tsunami généré par le glissement de l'aéroport de Nice, tout en présentant des ordres de grandeur similaires.

Le tsunami de 1979 de Nice constitue donc un bon cas test pour visualiser les limites liées à l'hypothèse de « shallow-water », dont s'affranchissent les équations de Boussinesq utilisées sur les cas précédents. Le code GEOWAVE permettant de travailler sous cette hypothèse, il a été choisi de la tester dans des conditions similaires au cas de référence.

L'Illustration 52 illustre la propagation du tsunami obtenue suivant les équations de Saint-Venant (cas « SW ») et suivant les équations de Boussinesq (cas de référence).



Illustration 52 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence (à gauche) et le cas « SW » (à droite) : Cote de la surface libre (en m) à t_0+2 min ; t_0+3 min; t_0+4 min ; t_0+6 min

Les deux modes de calcul amènent donc à des résultats très différents, notamment car le calcul en shallow-water semble propager le tsunami plus rapidement en eaux profondes, et par l'absence de dispersion fréquentielle (pas d'ondes « secondaires », qui suivent la première vague, du fait des hypothèses liées à l'utilisation des équations de Saint-Venant).

La carte des élévations maximales de la surface de l'eau se révèle également très différente de celle du cas de référence (Illustration 53) : les amplitudes à la source dans le sens du glissement sont très inférieures et la propagation vers le sud est très limitée. On retrouve une amplification des vagues à l'approche d'Antibes, qui reste toutefois légèrement inférieure à celle obtenue dans le cas de référence.

Par contre, au sud-est du glissement, les profondeurs augmentent pour atteindre des ordres de grandeur similaires à la longueur d'onde du tsunami, ce qui rend l'hypothèse de shallow-water caduque. Cela se traduit par une atténuation totale de l'onde par rapport au cas de référence. On remarque notamment que si le calcul par les équations de Boussinesq (cas de référence) a abouti au maintien d'une surélévation importante (plus de 4 m) au dessus de la crête bathymétrique qui sépare le canyon du Var du canyon voisin (au nord-est), l'hypothèse de shallow-water ne permet pas de constater ce phénomène.



Illustration 53 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence (à gauche) et le cas « SW » (à droite) : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau

Les illustrations 53 et 54 représentent les variations du niveau de l'eau sur Villefranche, Nice et Antibes, alors que le tableau de l'Illustration 56 reprend les données comparatives de l'Illustration 21, en les complétant par les résultats obtenus au rang 0 du cas « SW ».



Illustration 54 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence et le cas « SW » : Elévation de la surface libre au niveau de Villefranche et Nice sur les 15 premières minutes simulées



Illustration 55 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence et le cas « SW » : Elévation de la surface libre au niveau d'Antibes sur les 15 premières minutes simulées

	Instant d'arrivée				Première vague (polarité et amplitude)			
	Observation	CEA	BRGM cas de référence	BRGM cas « SW »	Observation	CEA	BRGM cas de référence	BRGM cas « SW »
PSL	1 min	Max : ~2 min	Début : 2min 40s Max : 3min 40s	Début : 2min 50s Max : 3min 30s	Creux > 2m	Crête 1,2m	Creux 5,20 m	Creux 5,20 m
PN	3 min Marégraphe : début à 3 min	Début : ~2 min 30 sec	Début : 3min 30s Max : 4min 40s	Début : 3min 50s Max : 4min 20s	Creux 1m	Crête 1,2m	Creux 1,10 m	Creux 1,70 m
PVi	5 min Marégraphe : début à 6 min	Max : 4 min	Début : 5min 50s Max : 7 min 10s	Début : 6min Max : 6min 50s	Creux ~1m	Crête 20cm	Creux 1,40 m	Creux 1,30 m
PV	5 min	3 min	Début : 3min 30s Max : 4min 30s	Début : 3min 50s Max : 4min 10s	Crête 30cm	Crête 1m	Crête 1,20 m	Crête 3 m
PAS	5 min	Max : 5 min	Début : 4min 30s Max : 5min 20s	Début : 4min 40s Max : 5min 20s	Crête ~50cm	Crête 80cm	Crête 2,90 m	Crête 3,80 m

Illustration 56 – Comparaison entre quelques caractéristiques des observations et des simulations du CEA et du BRGM (cas de référence et cas « SW ») à Saint-Laurent-du-Var (PSL), Nice (PN), Villefranche-sur-Mer (PVi), Antibes-Port-Vauban (PV) et Antibes-la Salis (PAS)

Vis-à-vis de ces caractéristiques, les résultats obtenus en shallow-water sont assez similaires à ceux obtenus au cas de référence, hormis la hauteur des vagues qui se révèle beaucoup plus importante à Port-Vauban et à la Salis. Les temps d'arrivée du tsunami sont du même ordre de grandeur sur le cas de référence et sur le cas « SW », mais la vague « monte » plus vite en shallow-water (i.e. le délai entre le temps d'arrivée de la vague et le maximum de la crête ou du creux est plus court de 30 secondes typiquement en shallow-water). Les polarités restent identiques à celles observées : l'inversion de polarité obtenue par le CEA à Saint-Laurent, Nice et Villefranche ne s'explique a priori donc pas par l'hypothèse de « shallow-water ».

En termes de hauteur des vagues, l'hypothèse de shallow-water tend, lorsqu'elle est vérifiée et en présence d'un plateau peu profond, à amplifier l'amplitude de la vague : cela est directement lié à l'absence d'effets dispersifs sous cette hypothèse, ce qui conduit à une concentration de la totalité de l'énergie dans la première vague. Ceci a par exemple pu être vérifié par Grilli *et al.* (2007), lors de simulations du tsunami de l'Océan Indien de décembre 2004 avec le même code que la présente étude (FUNWAVE) : alors même que l'hypothèse de shallow-water est clairement vérifiée dans cette situation (très grande longueur d'onde), des amplitudes plus importantes des vagues peuvent être observées lors du calcul en shallow-water par rapport au calcul de type Boussinesq.

Lorsqu'au contraire elle n'est pas vérifiée en raison de fonds importants par rapport à la longueur d'onde des vagues, elle tend à atténuer complètement l'onde, comme cela est visible sur les cartes d'élévations maximales de l'Illustration 53, dans le secteur sud-est de la zone.

Sur le cas du tsunami de 1979 de Nice, les modifications sont également sensibles sur la hauteur de la première vague, notamment au niveau d'Antibes. En effet, si la hauteur de la vague reste inchangée en shallow-water à Saint-Laurent (point le plus proche du glissement, l'hypothèse de shallow-water restant vérifiée, mais les fonds étant abrupts), le creux augmente de 0,6 m à Nice et diminue légèrement à
Villefranche, et la crête augmente de 0,9 à 1,80 m au niveau d'Antibes. Ces modifications résultent vraisemblablement des fonds rencontrés entre la source et les différents ports : la bathymétrie reste peu profonde entre l'aéroport et Saint-Laurent, et l'hypothèse de shallow-water reste donc vérifiée. Entre l'aéroport et Nice, par contre, on rencontre des fonds atteignant 550 m de profondeur, à même de créer une erreur vis-à-vis de l'hypothèse de shallow-water, d'autant que ces fonds remontent très rapidement vers Nice. Entre l'aéroport et Villefranche, on trouve des fonds atteignant près de 700 m de profondeur, mais la jauge étant placée au fond de la baie de Villefranche, la présence d'un plateau peu profond (moins de 150 m) rend l'hypothèse valide sur les 2 derniers kilomètres, d'où probablement une amplification finale compensant l'amortissement. Enfin, entre l'aéroport et Antibes, on rencontre des fonds de plus de 700 m liés au canyon du Var. A ce niveau, l'hypothèse de shallow-water ne peut être vérifiée, d'où une atténuation visible sur différentes données, mais se compensant vraisemblablement par l'amplification des vagues sur le plateau peu profond à l'approche d'Antibes.

Le calcul a été poursuivi au rang 1 en « shallow-water », sur la même grille que pour le cas de référence, ce qui a permis de générer des conditions aux limites pour le rang 2. Le rang 2 a été traité sous SURFWB, dans des conditions similaires au cas de référence, seules les conditions aux limites différant.

La carte de l'Illustration 57 présente les élévations maximales de l'eau obtenues lors du calcul au rang 2, et celle de l'Illustration 40 les hauteurs maximales d'inondation à terre. On constate que la submersion est cette fois plus importante que celle obtenue au cas de référence ou que celle observée, ce qui est cohérent avec l'observation précédente selon laquelle les vagues qui arrivent à Antibes dans ce cas sont plus importantes. L'inondation s'est propagée dans certaines rues non affectées précédemment, et a également pu franchir des obstacles (murs) qui l'avaient arrêtée au cas de référence (effet de seuil).



Illustration 57 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « SW » (à droite) : Cote maximale de la surface libre (en m)



Illustration 58 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « SW » (à droite) : Hauteurs maximales d'inondation à terre (en m)

Du fait d'une inondation plus importante sous l'hypothèse de shallow-water dans les rangs supérieurs, les valeurs de run-up sont sensiblement plus élevées que dans le cas de référence (Illustration 58) : si le run-up reste de l'ordre de 2 m au nord de la zone, il peut atteindre 6 à 7 m à l'ouest où l'eau s'est propagée à travers les rues. On peut remarquer également que si le run-up est peu différent au niveau du port de la Salis entre le cas de référence et le cas « SW », il est considérablement plus élevé au niveau des bâtiments du front de mer immédiatement à l'ouest sous l'effet des perturbations déjà évoquées (Illustration 25) : l'eau semble s'accumuler devant les bâtiments sans pour autant parvenir à s'écouler au-delà à travers les rues.

Sur la carte des vitesses maximales (Illustration 59), on constate que les vitesses atteintes à terre sont sensiblement supérieures à celles obtenues au cas de référence, sauf au sud de la plage près du port de la Salis, où elles sont au contraire légèrement inférieures.



Illustration 59 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « SW » (à droite) : Vitesses maximales atteintes par les courants : normes (en m/s) et orientation

Si l'on s'intéresse à la jauge 6, à terre, on constate (Illustration 60) que la première vague arrive en ce point dans le cas « SW » à peine 15 secondes avant la première vague dans le cas de référence. La hauteur et la vitesse de cette vague sont par contre sensiblement plus importantes, puisqu'elle atteint 3,60 m de haut pour 8,4 m/s contre 2,40 m et 6,2 m/s « seulement » dans le cas de référence. On remarque ensuite, environ 3 min 30 secondes plus tard, une nouvelle vague de 1 m, absente dans le cas de référence, puis deux vagues assez similaires à celles du cas de référence, et enfin une dernière vague plus haute d'environ 0,5 m que dans le cas de référence.



Illustration 60 - Simulation numérique au rang 2 sur le cas de référence (à gauche) et sur le cas « SW » (à droite) : Hauteur d'eau et vitesse du courant au niveau de la jauge 6

Pour conclure, l'utilisation de l'hypothèse « shallow-water » dans GEOWAVE couplé à SURFWB sur le cas de Nice semble amplifier l'inondation (surface inondée, hauteur d'eau et vitesse des courants). Ces résultats confirment l'incompatibilité des équations de Saint-Venant appliquées à des événements tels que celui de 1979.

D'autres essais en « shallow-water » ont également été menés avec une densité du matériau glissé de 2. A titre d'exemple, la carte de l'Illustration 61 présente les élévations maximales du plan d'eau ainsi obtenues au rang 0, et permet de visualiser une amplification exagérée de la vague à l'approche d'Antibes.



Illustration 61 - Simulation numérique au rang 0 sur le cas de référence (à gauche) et en shallow-water avec une densité de matériau de 2 (à droite) : Elévations maximales (en m) de la surface du plan d'eau

6. Conclusion

Les résultats publiés depuis 2010 ont permis d'améliorer considérablement la connaissance des événements survenus dans la Baie-des-Anges le 16 octobre 1979. Ainsi, notamment, les travaux de reconnaissance et de modélisation effectués par l'Ifremer ont permis d'approfondir notablement la connaissance des caractéristiques du glissement de terrain de l'aéroport à l'origine du tsunami, notamment en termes de **volumes et de densité du matériau glissé** (1,4, contre une densité supposée de 2 auparavant). Les travaux menés dans le cadre du projet MAREMOTI ont également permis de **caractériser finement la submersion** observée sur Antibes suite à cet événement.

Ces nouvelles connaissances, ainsi que le récent couplage entre les codes GEOWAVE (pour la génération et la propagation du tsunami) et SURWB (pour la submersion à terre) ont permis d'améliorer sensiblement les modélisations de l'enchainement des événements du 16 octobre 1979 par rapport à celles obtenues précédemment. Les modélisations présentées dans le présent rapport s'appuient sur **3 rangs de calcul successifs** :

- Un premier, englobant toute la Baie-des-Anges, présente une résolution de 45 m et a permis la simulation de la génération et de la propagation du tsunami avec le code GEOWAVE ;
- Un second, plus focalisé sur Antibes, présente une résolution de 15 m et a permis d'affiner la propagation du tsunami à l'approche de cette ville, toujours avec le code GEOWAVE ;
- Un troisième, enfin, se concentre sur le secteur d'Antibes-la Salis avec une résolution de 3,75 m permettant la prise en compte du bâti (Modèle Numérique d'Elévation par combinaison de la topographie et de la couche Bâti de BDTopo de l'IGN) et a permis de simuler la **submersion** à terre avec le code SURFWB.

Les résultats obtenus présentent un certain nombre d'amélioration par rapport aux simulations effectuées précédemment par le BRGM (Pedreros et Poisson, 2007) et le CEA (Donadieu, 2010) sur ce cas :

- La **polarité** du tsunami suivant le lieu est conforme aux observations rapportées ;
- Les heures d'arrivée du tsunami aux différents lieux d'observation restent cohérentes avec les témoignages ;
- La **zone inondée** suivant les simulations est très proche de celle reconstituée à partir des témoignages, que ce soit en termes de profondeur d'inondation ou de run-up.

On notera toutefois quelques défauts dans les simulations de submersions, où l'inondation affecte des terrains *a priori* non-impactés en 1979, au nord et à l'est de la Salis. Ces défauts s'expliquent vraisemblablement par des défauts du Modèle

Numérique d'Elévation utilisé, où les murs de protection en bordure du rivage sont mal retranscrits, en l'absence de données LIDAR disponibles.

Ceci permet également de souligner l'**importance de la résolution et de la précision verticale du MNE** pour une bonne estimation de la submersion, et par conséquent de l'aléa : pour simuler correctement les circulations et les écoulements de l'eau dans la ville, il convient que les rues et les moindres ouvrages (murs, bâtiments) soient bien retranscrits dans le MNE, afin de pouvoir prendre en compte les éventuels effets de seuil liés à cette problématique (vague arrêtée par un mur suffisamment haut, eau dévalant une rue en pente...).

Quelques **tests de sensibilité** ont également été menés sur le cas de Nice, en faisant varier notamment certaines caractéristiques de la source (densité du matériau, géométrie et direction du glissement), ce qui a permis de mieux appréhender l'importance de ces paramètres pour une bonne estimation de la submersion.

Enfin, les résultats ont été comparés à ceux de la même simulation effectuée sous l'**hypothèse de shallow-water** (hypothèse supposant que la longueur d'onde du tsunami est très supérieure à la profondeur). Cette hypothèse ne peut être vérifiée partout sur le cas de Nice, compte tenu des profondeurs importantes rencontrées dans la Baie-des-Anges et du fait que les tsunamis générés par des mouvements de terrain présentent des longueurs d'ondes restreintes. Les résultats obtenus ont permis de mieux appréhender les erreurs que génère cette hypothèse dans un tel contexte :

- Par hypothèse, **absence de dispersion fréquentielle**, toute l'énergie se trouvant concentrée dans la première vague ;
- Par conséquent, **amplification de l'amplitude** des vagues à l'approche de la côte ;
- **Atténuation importante**, voire totale, de l'amplitude de l'onde aux grandes profondeurs.

Les résultats relatifs à l'événement de référence **avec ouvrages** post-1979 sont ceux qui seront utilisés dans le cadre du WP 5.1 relatif à l'**évaluation des dommages et aux préjudices humains**.

7. Bibliographie

Assier-Rzadkiewicz, S. Heinrich P., Sabatier P.C., Savoye B. & Bourillet J.F. (2000) - 'Numerical modelling of landslide-generated Tsunami; the 1979 Nice event'. *Pure Appl.Geophys.*, *157 (10)*, *1707-1727*.

Donnadieu C. (2010) – Modélisation du tsunami généré par le glissement de terrain de Nice, 1979 – Etude de scenarios et effets à la côte. *Rapport CEA RATCOM_SP3_D2-2*.

GIS CURARE (2006) - 'Axe III - Mouvements du sol et instabilités gravitaires en mer'. *Rapport Intermédiaire d'activité, 87p*.

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.*

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.*

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) - Etude 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 : Etude 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>.

Silva Jacinto R. et Meyniel P. (2010) – RatCom – Réseaux d'alerte aux Tsunamis et submersions Côtières en Méditerranée. Modélisation des écoulements gravitaires sous-marins en Baie-des-Anges en vue de la génération de tsunamis dans le champ proche. *R. int Ifremer Brest / GM / LES / 201-08*.

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

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 Service Risques 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34