



# Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française

# **Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française**

## **Liste des rapports**

***Réalisation d'un zonage sismique de la Méditerranée occidentale à 1/2 000 000 préalable aux choix de scénarios de tsunamis- Rapport intermédiaire*** (Terrier M., 2007, Rapport BRGM/RP - 55353 –Fr)

***Etude préliminaire de l'aléa tsunami en Méditerranée occidentale - Mouvements de terrain côtiers de grande ampleur- Rapport intermédiaire*** (N. Marçot, B. Colas, M. Terrier, 2007, Rapport BRGM/RP- 55356 –Fr)

***Zonage des mouvements de terrain sous-marins sur le plateau et talus continental au large des côtes françaises.*** (Cattaneo A., 2007, Rapport IFREMER DCB/GM/LES/07-17)

***Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française - Modélisation numérique des tsunamis. Rapport intermédiaire.*** (Pedreros, R et Poisson, B., 2007, Rapport BRGM/RP - 55760 –Fr)

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



# Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française

Rapport de synthèse

BRGM/RP-55765-FR  
Décembre 2007

Convention MEDAD-BRGM n° CV 05000 195



# Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française

Rapport de synthèse

**BRGM/RP-55765-FR**

Décembre 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2006 – PSP06ARN80

Convention MEDAD-BRGM n° CV 05000 195

**M. Terrier, Pedreros R. et Poisson B.**

**Vérificateur :**

Nom : Winter T.

Date :

Signature :

(Ou Original signé par)

**Approbateur :**

Nom : Modaressi H.

Date :

Signature :

(Ou Original signé par)

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Mots clés :** tsunami, Méditerranée, aléa, scénario, modélisation, séisme, glissement sous-marin

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

Terrier M., Pedreros R., Poisson B. (2007) – Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française - Rapport de synthèse. Rapport BRGM-RP-55765-Fr, 98p, 31 fig, 7 tabl, 6 pl. h.t.

## AVERTISSEMENT

Cette étude a été conduite par le BRGM à la demande du ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durable (MEDAD). Elle porte sur une première appréciation de l'aléa « tsunami » sur les côtes françaises du bassin méditerranéen.

Son objectif est double. Il s'agit en effet de :

- disposer d'éléments généraux de repère et d'illustration de l'exposition potentielle des côtes françaises à des tsunamis, de l'incidence sous laquelle ils peuvent se présenter et de la forme qu'ils peuvent revêtir en atteignant le littoral.
- utiliser ces indications comme éléments d'information et de communication auprès des services et de la population.

Toutefois, il convient de préciser que cette étude n'est pas exhaustive et qu'elle ne prétend pas donner des éléments fins de prévision. Elle consiste en une approche pragmatique de l'aléa « tsunami » fondée sur un nombre restreint de scénarios choisis par le BRGM pour leur caractère majorant vis-à-vis des côtes étudiées. Les valeurs obtenues sont à considérer comme indicateurs d'ordres de grandeur majeurs probables.

Pour cela, l'étude s'appuie sur des éléments d'observation et de connaissance existants et disponibles. Elle prend en compte des événements répertoriés récents et recourt à des outils et des modèles dont les limites sont indiquées. Des interpolations ont été pratiquées là où manquaient des données; c'est en particulier le cas de la bathymétrie qui reste encore lacunaire aujourd'hui et dont la précision contribue localement à la caractérisation finale du tsunami arrivant à la côte.

Pour mieux illustrer la démarche, c'est l'étude de cas qui a prévalu.

Le choix des scénarios a été fait en majorant des données historiques significatives connues qui ont ponctué la vie des bassins concernés et d'hypothèses de simulation issues de la connaissance géophysique et marégraphique. Cependant, ces dernières, estimées comme représentatives de phénomènes qui pourraient se présenter et fondées sur des situations vraisemblables majeures, ne définissent pas pour autant l'enveloppe des événements probables. En effet, les mouvements de terrain côtiers et les séismes peuvent avoir des impacts bien différents des cas présentés selon leur type, leur localisation et leur importance. Ainsi, certaines côtes qui semblent relativement protégées au vu des résultats de cette étude pourraient être affectées par des tsunamis dont les sources seraient situées à des endroits différents.

Malgré ces incertitudes qui demandent pour être mieux contenues des compléments de la connaissance actuelle, cette étude doit constituer un point d'appui à une illustration et une compréhension plus aisée des phénomènes majeurs probables et à une meilleure information sur un champ jusqu'à présent resté discret. Celui-ci appelle aujourd'hui un nouvel éclairage du fait de l'accroissement constant de la concentration urbaine et des activités sur le littoral.



## Synthèse

Dans le cadre du Plan Séisme, l'Etat français a confié au BRGM l'étude « Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française ». Ce projet fait l'objet d'une convention Ministère français de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables et BRGM n° CV 05000195.

Les connaissances historiques des évènements tsunamigéniques ayant pu affecter la côte française restent encore très rares (démarrage de la base historique française en 2006). En préalable à toute évaluation de l'exposition des côtes françaises aux phénomènes tsunamis, il était donc important de pouvoir s'appuyer sur des calculs d'évènements fictifs, mais plausibles, susceptibles de générer des tsunamis sur le littoral français.

Tel était l'objectif de l'étude, sachant que les scénarios sismiques ou mouvements de terrain qui seraient retenus devaient être a priori parmi les évènements les plus forts plausibles par rapport aux tsunamis susceptibles d'être générés.

- La présente étude concerne le littoral méditerranéen français, c'est-à-dire les côtes des régions Corse, Languedoc – Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Le projet a été articulé autour de deux parties principales :

1) une première phase d'identification et de caractérisation des sources tsunamigéniques :

- d'origine sismique, sur l'ensemble du bassin méditerranéen occidental,
- d'origine mouvements de terrain côtiers ou sous-marins, au niveau du littoral français ainsi qu'au large de ces côtes, sur le plateau et le talus continental

2) une seconde phase de simulation de scénarios a priori parmi les plus forts possibles : simulations réalisées sur la base des sources tsunamigéniques identifiées en phase 1 d'une part et, des données bathymétriques disponibles et d'un modèle de simulation représentatif de l'état de l'art d'autre part.

- Ce rapport est une synthèse des résultats obtenus pour l'ensemble de l'étude. Il concerne :

- la réalisation d'un zonage sismique de type déterministe, à l'échelle 1/2 000 000 ème de la Méditerranée occidentale ;
- le zonage des mouvements gravitaires sous-marins du plateau et talus continental au large des côtes méditerranéennes françaises, à l'échelle 1/500 000 ème ;
- l'identification des falaises côtières où la probabilité de mouvement de terrain en masse n'est pas nulle ;
- la réalisation de plusieurs grilles bathymétriques à différentes échelles adaptées aux tsunamis champ proche et lointain;
- les tests de sensibilité relatifs aux résultats des simulations sur la base des grilles bathymétriques utilisées ;

- le choix des scénarios ;
- pour chaque scénario, la restitution des calculs sous la forme de carte à l'échelle 1/100 000<sup>ème</sup>.

Ces résultats sont décrits en détail dans les rapports joints à cette synthèse (rapports BRGM RP-55353, RP-55356, RP-55760 et rapport IFREMER).

• Sur la base des zonages sismiques et mouvements de terrain, 6 scénarios a priori parmi les plus forts plausibles en termes de potentiel tsunamigénique et de source sismique ou mouvement de terrain ont été retenus. Ils concernent :

- 3 scénarios de séismes,
  - Séisme situé en Mer Ligure, avec un épicentre placé à une cinquantaine de kilomètres au large de la côte d'Azur, de magnitude 6,8, et attribué au jeu normal d'une faille NE-SW.
  - Séisme localisé dans le golfe du Lion, à une centaine de kilomètres au SSE de Perpignan, de magnitude 6,7, et associé au jeu normal d'une faille NW-SE.
  - Séisme de magnitude 7,8, placé à 25 km au Nord de la côte algérienne et généré par le mouvement inverse d'une faille ENE-WSW.
- 3 scénarios de mouvements de terrain sous-marins :
  - Glissement localisé à une vingtaine de kilomètres de la côte Corse nord-occidentale, le volume déstabilisé est estimé à 0,75 km<sup>3</sup> ;
  - Glissement placé à une cinquantaine de kilomètres du littoral perpignanais, au niveau du canyon sous-marin de Lacaze-Hérault, caractérisé par un volume en mouvement de 0,055 km<sup>3</sup> ;
  - Glissement supposé à près de vingt-cinq kilomètres au sud-est de Nice, avec 1 km<sup>3</sup> de matériel déstabilisé.

Les scénarios considérés correspondent à des événements maximum plausibles pour des périodes de retour vraisemblablement de plusieurs centaines à quelques milliers d'années.

Vingt-trois autres simulations complémentaires aux six événements majeurs ont été réalisées. Ces derniers se réfèrent soit à des événements historiques (séisme de 1887 en mer Ligure, séisme de 2003 dit de Boumerdès, effondrement du littoral au niveau de l'aéroport de Nice en 1979) soit à des événements fictifs indiqués dans les zonages (sismique ou mouvement de terrain).

Ces nombreux calculs préalables ont permis une meilleure orientation du choix des six scénarios majeurs précités et pour lesquels des calculs les plus précis possibles (sur la base des données bathymétriques disponibles) ont été faits. Le détail de toutes ces simulations ne fait pas l'objet du présent rapport mais est exposé dans le rapport BRGM/RP-55760-Fr.

Les simulations des 6 scénarios précités indiquent :

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

Cette première évaluation à l'échelle régionale de l'impact des tsunamis s'appuie sur les résultats des calculs qui ont au mieux une précision cartographique de l'ordre du 1/100 000<sup>ème</sup> (calculs sur des grilles de 83mx83 m de résolution spatiale).

Dans le cadre de planification du risque tsunami aux échelles locales (telle que celle des PPR), des études plus précises restent indispensables pour tenir compte non seulement de la hauteur et de la profondeur de l'inondation à terre, mais aussi de sa durée ainsi que le nombre de vagues tsunamigéniques qui se propagent à terre, la direction et la vitesse des courants. L'atteinte d'un tel niveau de précision (échelle de restitution cartographique de l'ordre du 1/10 000<sup>ème</sup> au 1/25 000<sup>ème</sup>) requière une très bonne connaissance de la bathymétrie et topographie du littoral entre -10 m et + 10m, avec une précision en z de l'ordre du décimètre. Il est aussi nécessaire de tenir compte des aménagements (bâtiments et infrastructures) le long de la zone côtière, ces derniers pouvant générer des modifications dans la propagation de l'eau à terre.

Néanmoins, tout en tenant compte des limites exposées dans le paragraphe précédent, d'ores et déjà, les documents délivrés par cette présente étude peuvent constituer :

- 1) d'une part, une aide pour l'État s'agissant de l'information et de la sensibilisation de la population au risque de tsunamis ;
- 2) d'autre part, une aide à la décision pour identifier et fixer des priorités dans les zones où des évaluations plus précises de l'aléa (cartographie à l'échelle du 1/10 000<sup>ème</sup> au 1/25 000<sup>ème</sup>) s'avèreraient nécessaire.



## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>13</b>
1.1. CONTEXTE GENERAL .....	13
1.2. STRUCTURE DU PROJET .....	13
<b>2. Provinces tsunamigéniques</b> .....	<b>17</b>
2.1. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES PROVINCES D'ORIGINE SISMIQUE.....	17
2.2. ZONAGE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN SOUS-MARINS ET COTIERS .....	25
2.2.1. Le zonage des mouvements gravitaires sous-marins au large de la côte méditerranéenne française .....	25
2.2.2. Glissements et effondrements de falaises côtières .....	33
<b>3. Données bathymétriques et construction des MNT</b> .....	<b>35</b>
3.1. DONNEES TOPO-BATHYMETRIQUES INITIALES .....	35
3.2. CONSTRUCTION DES GRILLES NECESSAIRES AUX SIMULATIONS .....	38
<b>4. Description du code de simulation</b> .....	<b>41</b>
<b>5. Incertitudes liées à la bathymétrie</b> .....	<b>43</b>
5.1. LACUNES DANS LES DONNEES .....	43
5.2. INFLUENCE DE L'ERREUR D'INTERPOLATION DU MNT .....	44
5.3. INFLUENCE DE LA DENSITE DU MAILLAGE .....	45
<b>6. Résultats des simulations</b> .....	<b>47</b>
6.1. SIMULATIONS DES TSUNAMIS HISTORIQUES.....	48
6.1.1. Séisme de Boumerdès, 2003 .....	48
6.1.2. Séisme de mer Ligure, 1887 .....	52
6.1.3. Effondrement de l' aéroport de Nice, 1979.....	54
6.2. SIMULATIONS DE SCENARIOS DE TSUNAMIS D'ORIGINE SISMIQUE .....	57

6.2.1. Scénario de séisme maximal de la zone 04, Marge Nord Ligure (planche 1 ht) .....	57
6.2.2. Scénario de séisme maximal de la zone 32, Tell et marge Nord Algérienne (planche 2 ht) .....	58
6.2.3. Scénario de séisme maximal de la zone 49, Bassin de l’Ampurdan (planche 3 ht) .....	59
6.3. SIMULATIONS DES SOURCES MOUVEMENTS DE TERRAIN .....	67
6.3.1. Scénario de glissement G_MOD de la zone 02, Corse Ouest (planche 4 ht) .....	69
6.3.2. Scénario de glissement G_MAX de la zone 07, Nice-Vintimille (planche 5 ht) .....	69
6.3.3. Scénario de glissement G_MOD de la zone 018, canyon Lacaze-Hérault (planche 6 ht) .....	70
<b>7. Conclusion</b> .....	<b>77</b>
7.1. LES RESULTATS .....	77
7.1.1. Identification des sources tsunamigéniques .....	77
7.1.2. Les simulations des tsunamis .....	78
7.2. LES PERSPECTIVES .....	79
<b>Références bibliographiques citées dans ce rapport</b> .....	<b>81</b>
<b>Références bibliographiques citées dans les rapports intermédiaires</b> : .....	<b>84</b>

## Liste des illustrations

Figure 1 – Les travaux réalisés dans le cadre du projet « Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française » .....	15
Figure 2 - Carte des zones sources sismiques proposées pour la Méditerranée occidentale et les régions côtières (d'après Terrier, 2007).....	21
Figure 3 - Zonage des mouvements de terrain sous-marins du plateau et talus continental de la façade méditerranéenne française (d'après Cattaneo, 2007).....	29
Figure 4 – Les principales zones à aléa effondrement côtier majeur identifiées sur le littoral méditerranéen français.....	34
Figure 5 - Semis de points de sonde d'une densité maximale de 25 mètres, extrait de la base SHOM (mise à jour février 2006) .....	35
Figure 6 – Modèle de la bathymétrie du domaine marin au large de la côte française avec une résolution horizontale de 250m mis à disposition par l'IFREMER.....	36
Figure 7 – Information bathymétrique à maille 1 km x 1 km d'après IFREMER.....	37
Figure 8 – Extrait du fichier GEBCO : bathymétrie avec une maille moyenne de 1'x1' (d'après <a href="http://www.gebco.net/">http://www.gebco.net/</a> ) .....	37
Figure 9 - Construction des 5 MNT principaux allant des résolutions de 2250x2250 m à 83x83 m.....	38
Figure 10 - Distribution des erreurs de l'interpolation obtenues par validation croisée (histogrammes) . La courbe rouge correspond aux fréquences cumulées (associées à l'axe des ordonnées à droite).....	39
Figure 11 - Localisation des zones dépourvues de bathymétrie haute résolution (A). MNT construit en comblant les lacunes avec les données GEBCO (B).....	43
Figure 12 – Différence d'élévation de la surface libre entre la simulation de référence et la simulation avec la surface bathymétrique perturbée à $\pm 2$ m .....	46
Figure 13 - Séries temporelles des hauteurs d'eau calculées au niveau de l'Aéroport de Nice et d'Antibes (scénario aéroport de Nice, 1979) .....	46
Figure 14 - Caractéristiques des tsunamis au niveau du rivage (d'après Pedreros et Poisson, 2007) .....	47
Figure 15 – Cotes de la surface libre (en m) obtenues lors du calcul du tsunami initial généré par le séisme de Boumerdes 2003, respectivement suivant les paramètres de Yelles et al. (2004) en haut, et Meghraoui et al. (2004) en bas.....	49
Figure 16 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue au cours des simulations du tsunami de Boumerdès 2003 sur la grille à 1800 m. ....	50
Figure 17 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue au cours des simulations du tsunami de Boumerdès 2003 sur la grille suréchantillonnée à 200 m, aux Baléares. ....	50
Figure 18 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue au cours des simulations du tsunami de Boumerdès 2003 sur la grille à 200 m, en France. ....	51
Figure 19 – Cote de la surface libre (en m) obtenue lors du calcul du tsunami initial généré par le séisme du 23 février 1887 en mer Ligure, pour les deux sources testées.....	52

Figure 20 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue au cours des simulations du tsunami de mer Ligure de 1887, sur la grille à 250 m, pour les deux sources testées. ....	53
Figure 21 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue au cours de la simulation du tsunami de mer Ligure de 1887, sur la grille à 83 m. ....	53
Figure 22 – Cote de la surface libre (en m) obtenue lors du calcul du tsunami Nice Aéroport, 1979 (grille à 83 m). ....	55
Figure 23 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue pour le tsunami Nice aéroport 1979 (grille à 83 m). ....	56
Figure 24 - Choix des scénarios de sources sismiques .....	58
Figure 25 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 04, "Marge Nord Ligure" (réduction de la planche 1 h.t.) .....	61
Figure 26 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 32, "Tell et marge Nord Algérienne" (réduction de la planche 2 h.t.) .....	63
Figure 27 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 49, "Bassin l'Ampurdan" (réduction de la planche 3 h.t.) .....	65
Figure 28 – Choix des scénarios de sources mouvements de terrain sous marins.....	67
Figure 29 - Résultat de la simulation du scénario de glissement de type G_Mod en zone 02, «Corse Ouest » (réduction de la planche 4 h.t.).....	71
Figure 30 - Résultat de la simulation du scénario de glissement de type G_Max en zone 07, « Nice-Vintimille » (réduction de la planche 5 h.t.).....	73
Figure 31 - Résultat de la simulation du scénario de glissement de type G_Mod en zone 18 « Canyon Lacaze-Hérault » (réduction de la planche 6 h.t.).....	75

## Liste des tableaux

Tableau 1- Synthèse des caractéristiques des zones sources sismiques proposées pour la Méditerranée occidentale et les régions côtières (d'après Terrier, 2007).....	22
Tableau 2 - Synthèse des caractéristiques des zones de mouvements de terrain sous-marines .....	31
Tableau 3 - Principales caractéristiques de GEOWAVE.....	42
Tableau 4 – Comparaison des amplitudes extrêmes de vague ( $\Delta h$ ) entre les observations extraites de la BD Tsunami (base de données des tsunamis historiques, BRGM-MEDAD, 2008) et les simulations réalisées sur les côtes italiennes (Sources 1 et 2, grille de résolution de 250 m). Les intervalles des valeurs simulées sont indiqués lorsque la variation entre pixels voisins est importante. ....	54
Tableau 5 – Comparaison des amplitudes extrêmes de vague ( $\Delta h$ ) entre les observations extraites de la BD Tsunami (base de données des tsunamis historiques, BRGM-MEDAD, 2008) et la simulation réalisée sur les côtes françaises et à Monaco (Source 2, grille de résolution de 83 m).....	54
Tableau 6 – Comparaison des écarts arrivée- $t_0$ ( $\Delta t$ ), hauteurs de vague ( $\Delta h$ ) et périodes ( $\theta$ ) entre les observations reportées par Assier-Rzadkiewicz et al. (2000) et Tinti et al. (2004) et la simulation réalisée dans le cadre de cette étude. ....	56

Tableau 7 - Sources mouvements de terrain sous-marins : Liste des simulations réalisées .....	68
---	----

## Liste des planches hors texte

Planche 1 : Scénario du séisme maximal de la zone « Marge Nord Ligure » (zone 04 du zonage sismique)

Planche 2 : Scénario du séisme maximal de la zone « Tell et marge nord algérienne » (zone 32 du zonage sismique)

Planche 3 : Scénario du séisme maximal de la zone « Bassin d’Ampurdan » (zone 49 du zonage sismique)

Planche 4 : Scénario du mouvement de terrain G\_MOD de la zone « Corse Ouest » (zone 02 du zonage mouvements de terrain)

Planche 5 : Scénario du mouvement de terrain G\_MAX de la zone « Corse Nice-Vintimille » (zone 07 du zonage mouvements de terrain)

Planche 6 : Scénario du mouvement de terrain G\_MOD de la zone « Canyon Lacaze-Hérault » (zone 18 du zonage mouvements de terrain)



# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE GENERAL

A la fin de l'année 2005, le Ministère français de l'Ecologie et du Développement Durable a mis en place une série d'actions destinées à réduire la vulnérabilité de la France au risque sismique. Ces actions sont rassemblées dans le cadre d'un programme national de prévention du risque sismique, intitulé « **Plan Séisme** ». Ce plan intègre un chantier sur la « prévention du risque de tsunami ».

Dans ce cadre, l'Etat français a confié au BRGM :

1) la réalisation d'une *base de données historiques sur les tsunamis* : il s'agit de constituer sur la base de recherches et analyses bibliographiques, un inventaire et une caractérisation des événements tsunamis ayant pu affecter les côtes françaises (métropole, île de la Réunion, Antilles). Cet inventaire est restitué sous la forme d'une base de données événementielle informatisée, consultable dès l'année 2008 sur le WEB.

2) des *études de cas sur les tsunamis* relatives aux côtes méditerranéennes et antillaises françaises, sur la base de scénarios sismiques ou gravitaires parmi les plus forts plausibles et susceptibles de générer des tsunamis.

Le présent travail correspond à l'étude de cas des tsunamis relatifs aux côtes méditerranéennes françaises. Il concerne donc le littoral des régions Corse, Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur.

## 1.2. STRUCTURE DU PROJET

Le projet a été articulé autour de deux axes principaux :

### **1) La caractérisation des sources tsunamigéniques pour la côte méditerranéenne française**

Les mécanismes de génération considérés sont l'activité sismique d'une part et les glissements de terrain sous-marins et effondrements de falaises côtières d'autre part. Les séismes peuvent constituer des sources tsunamigéniques proches ou lointaines, tandis que les mouvements de terrain sont considérés uniquement comme des sources proches.

Les différentes phases de cette partie de l'étude ont donc consisté en :

#### **a) Sources lointaines**

- la recherche et consultation des zonages sismiques nationaux et des catalogues de sismicité,

- l'interprétation et localisation des principales zones sismiques marines,
- la caractérisation des zones sismiques.

#### **b) Sources proches**

- la consultation des documents sismotectoniques,
- la localisation et caractérisation des zones sismiques,
- la localisation de mouvements de terrain sous marins de grande ampleur,
- la localisation et caractérisation des instabilités de pente d'origine aérienne,
- l'estimation des volumes déstabilisés.

### **2) Simulation numérique des tsunamis**

- le choix d'évènements de référence,
- l'acquisition et préparation des données bathymétriques,
- le choix du modèle numérique de simulation des tsunamis,
- le calcul pour chaque évènement de référence,
- la réalisation des cartes des hauteurs maximales du plan d'eau, des temps d'arrivée et de l'indication d'inondations éventuelles.

Le présent rapport correspond à la synthèse des résultats obtenus pour l'ensemble du projet. Il s'appuie sur les différents rapports intermédiaires réalisés lors de l'étude (Figure 1) :

- Terrier M. (2007) - Réalisation d'un zonage sismique de la Méditerranée occidentale à 1/2 000 000 préalable aux choix de scénarios de tsunamis- Rapport intermédiaire, Rapport BRGM/RP-55353-Fr
- N. Marçot, B. Colas, M. Terrier (2007) - Etude préliminaire de l'aléa tsunami en Méditerranée occidentale - Mouvements de terrain côtiers de grande ampleur- Rapport intermédiaire, Rapport BRGM/RP-55356-Fr
- Cattaneo A. (2007) – Zonage des mouvements de terrain sous-marins sur le plateau et talus continental au large des côtes françaises. Rapport IFREMER DCB/GM/LES/07-17
- Pedreros, R et Poisson, B. (2007) - Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française : modélisation numérique. Rapport intermédiaire, Rapport BRGM/RP-55760-Fr

Cette étude a par ailleurs bénéficié des conseils et avis d'un comité de pilotage externe mis en place par le MEDAD et constitué de représentants du CEA (F. Schindelé, H. Hébert), de l'IFREMER (P. Cochonat), de l'IPGP (J.P. Montagner, A. Le Friant), du CNCOI (F.Gérard), du GIS CURARE (J. Virieux), DDSC (P. Audebert, E. Crochet), MOM (A.Jaud, B. Ducros), DPPR (R.Feunteun, P. Sabourault), et BRGM (T. Winter).

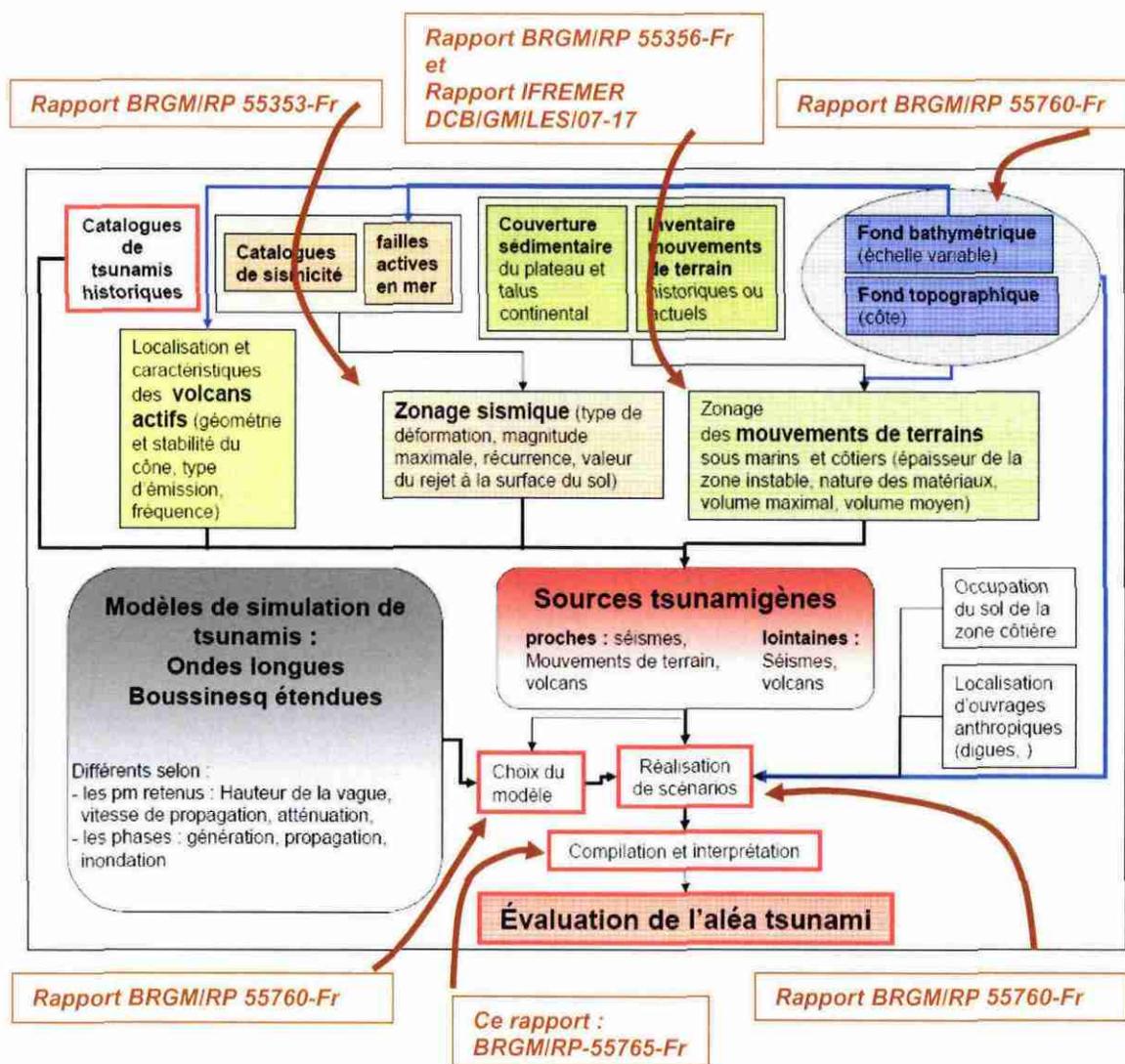


Figure 1 – Les travaux réalisés dans le cadre du projet « Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française »



## 2. Provinces tsunamigéniques

### 2.1. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES PROVINCES D'ORIGINE SISMIQUE

#### **Contexte**

La convergence actuelle des plaques Afrique et Europe se manifeste aujourd'hui par une activité sismique particulièrement élevée au sud de la Méditerranée occidentale (chaînes Maghrébines et bétiques, Sicile et Calabre). Au Nord, des Pyrénées à la marge Toscane, les séismes sont moins nombreux, mais, occasionnellement, ils peuvent atteindre des magnitudes supérieures à 6,5 (c'est-à-dire capables de créer des ruptures de faille en surface).

Hormis dans le cas d'une éruption volcanique de très grande ampleur ou de l'effondrement quasi généralisé d'un cône volcanique (type Krakatoa en 1883 ou Santorin vers 1650 BP), contrairement aux tsunamis générés par les glissements de terrain, les tsunamis d'origine sismique peuvent se propager sur de très grandes distances (plusieurs centaines à milliers de kilomètres). Dans le cadre de cette étude, il était donc indispensable de rechercher non seulement les sources sismiques proches du littoral français, mais aussi celles situées sur les rives plus lointaines de la Méditerranée occidentale.

#### **La démarche**

Une cartographie des failles actives du territoire marin, avec caractérisation de leur potentiel sismogénique, n'étant pas réaliste dans l'état actuel des connaissances, la phase d'identification des sources tsunamigéniques d'origine sismique devait donc reposer sur un zonage sismique.

Dans un premier temps, les zonages sismiques (zonages de la France, l'Italie, la Tunisie, l'Algérie, le Maroc, l'Espagne) issus des projets GSHAP, SESAME, EPAS et autres publications scientifiques ont été consultés. Face à l'hétérogénéité de ces divers zonages et du fait que ces derniers étaient généralement limités à la partie terrestre (hormis pour le zonage France qui englobe la mer Ligure et le Golfe du Lion), l'étude s'est donc attachée à réaliser spécifiquement un zonage sismique de l'ensemble de la Méditerranée occidentale et ses régions côtières.

A cette fin, différentes sources de données géologiques (cartes géologique d'Europe et sismotectonique du bassin méditerranéen, autres publications), bathymétriques et sismologiques (*données historiques* –base SisFrance, compilation GSHAP, base INGV/EMIDIUS et publications ; *données instrumentales* –bases CSEM et NEIC, mécanismes au foyer –base EMMA), ont été rassemblées et interprétées.

Elles ont conduit à un zonage sismique à 1:2 000 000 de la Méditerranée occidentale de type déterministe (cf Rapport Terrier, 2007).

Le principe d'un zonage déterministe est le suivant : chaque zone ou surface délimitée correspond à une unité sismotectonique, c'est-à-dire à une région dont les caractéristiques tectoniques (type de déformation, champ de contraintes) sont suffisamment homogènes pour que l'on puisse envisager l'occurrence d'un séisme analogue à un séisme historiquement connu, et cela en n'importe quel point du domaine. Puis compte tenu des données disponibles en termes de distribution des intensités et magnitudes, de localisation des épacentres et de profondeur des foyers, chaque zone sismique est caractérisée par une intensité épacentrale maximale connue dans la zone (SMHV ou séisme maximal historiquement vraisemblable) et ce indépendamment de sa période de retour.

Par ailleurs, conformément à la démarche d'évaluation déterministe, un séisme majoré a été calculé (séisme de type SMS, Séisme Majoré de Sécurité). Pour cela, 0,5 degré de magnitude a été ajouté à la magnitude du SMHV, sous réserve que cette majoration restait compatible avec les données géologiques et sismiques. Dans la pratique, l'ajout de 0,5 degré de magnitude permet de mieux tenir compte des incertitudes sur les données sismiques et géologiques.

Ainsi donc, dans le cadre de ce présent travail, pour chaque zone sismique, c'est la valeur de la magnitude du séisme majoré qui a été retenue comme magnitude maximale. Dans certains cas, en se référant à des publications scientifiques, il a été possible de préciser la période de retour de ces très forts séismes.

Le zonage réalisé décrit pour chaque zone sismique (Terrier, 2007) :

- 1) les principales caractéristiques tectoniques et sismiques, avec selon le cas, la période de retour des très forts séismes,
- 2) le séisme le plus fort enregistré ou indiqué dans les archives,
- 3) les valeurs du séisme maximal retenues pour l'étude (magnitude, dimensions du plan de faille rompu, glissement).

Certaines zones sont localisées totalement dans le domaine terrestre. Dans ce cas, même si leur potentiel sismogénique est élevé, elles ne sont pas, bien évidemment, considérées comme des sources tsunamigéniques.

### ***Les résultats du zonage***

Concernant le bassin méditerranéen occidental, cinquante neuf zones sont individualisées, Figure 2.

Le Tableau 1 indique pour chaque zone sismique :

- **la valeur de la magnitude maximale,**

- **le type de déformation,**
- **les dimensions** (rejet, longueur, largeur) de plan de faille rompue obtenues à partir des relations de Wells et Coppersmith (1994), avec :
  - o pm MAX\_moyen : valeurs moyennes
  - o pm MAX\_max : valeurs moyennes + écart-type

### ***Le choix des scénarios***

Sur la base de ce zonage sismique, 3 séismes de scénarios ont été proposés et retenus par le comité de pilotage de l'étude.

Il s'agit a priori des scénarios parmi les plus pénalisants pour la côte méditerranéenne française.

- Scénario du séisme maximal de la zone 4, « marge nord ligure ».
- Scénario du séisme maximal de la zone 32, « Tell et marge nord algérienne »,
- Scénario du séisme maximal de la zone 49, « bassin de l'Ampurdan, du Roussillon et zone axiale pyrénéenne »,

La magnitude du séisme maximal de chaque zone correspond à celle du séisme le plus fort connue au sein du domaine +0,5 degré de magnitude.

Concernant la période de retour de ces très forts séismes, celle-ci est très vraisemblablement supérieure à plusieurs siècles.

Pour la zone 32, selon les travaux de Hamdache (1998), un séisme de magnitude au moins égale à 7,8 aurait une période de retour supérieure au millier d'années.

Tandis que pour la zone 49, selon les travaux de Fleta et al. (2001) et de Ojeda et al. (2002), la période de retour d'un séisme de magnitude 6,7 serait de l'ordre de 8 000 à 20 000 ans.

En ce qui concerne la zone 4, la période de retour de séisme de magnitude égale à 6,8 n'a pas été à ce jour étudiée. Toutefois d'après les études de paléosismicité (Chardon et al., 2005 ; Terrier, 2006) réalisées dans le sud-est de la France, elle serait vraisemblablement supérieure au millier d'années voir même à la dizaine de milliers d'années.



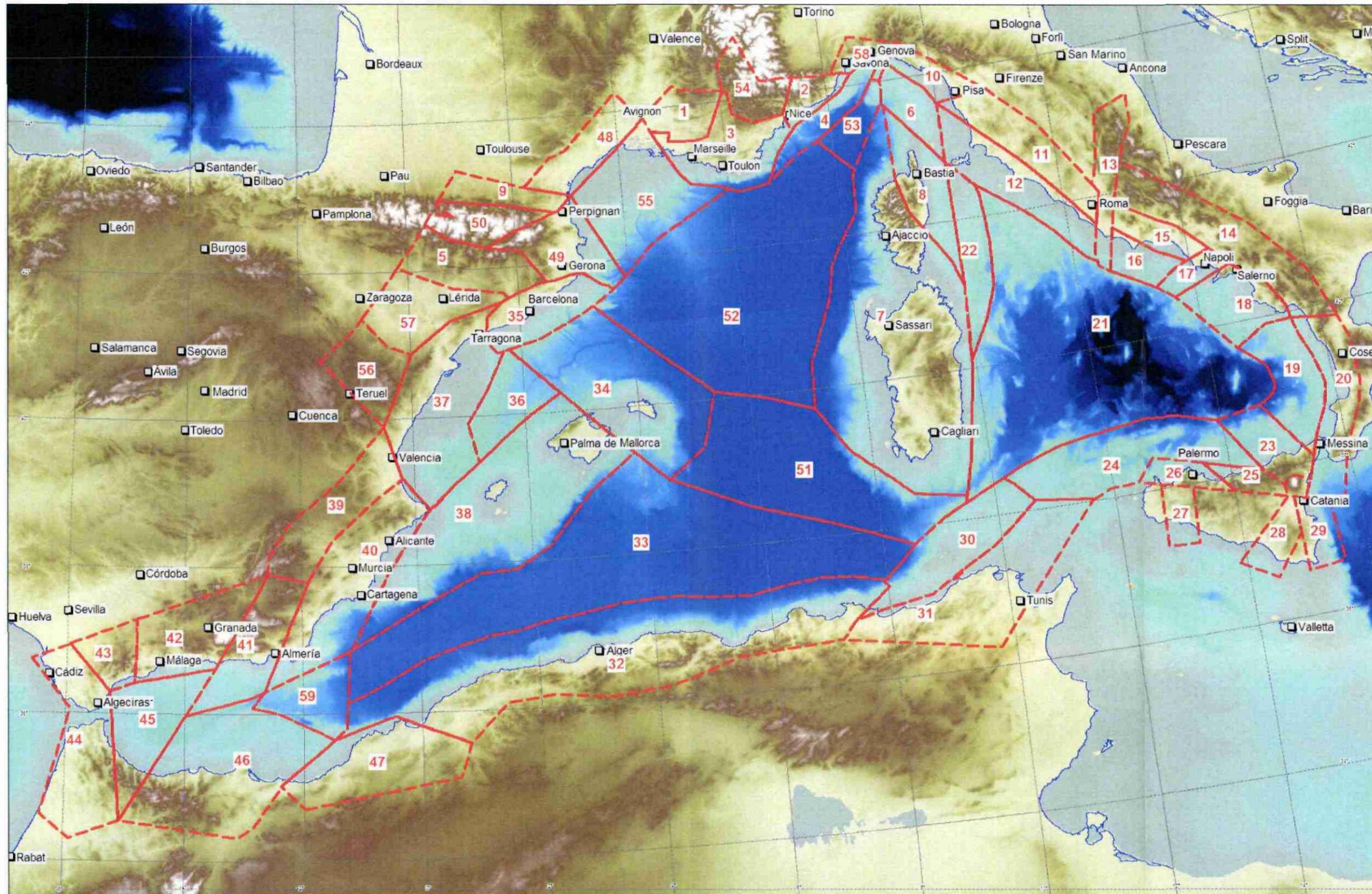


Figure 2 - Carte des zones sources sismiques proposées pour la Méditerranée occidentale et les régions côtières (d'après Terrier, 2007)

Tableau 1- Synthèse des caractéristiques des zones sources sismiques proposées pour la Méditerranée occidentale et les régions côtières (d'après Terrier, 2007)

n° zone	nom	mécanisme	Mmax	pm MAX_moyen			pm MAX_max		
				rejet (en m)	longueur (en km)	largeur (en km)	rejet (en m)	longueur (en km)	largeur (en km)
1	Provence nord occidentale	inverse, failles EW	6.5	0.6	22	11	1.2	31	15
2	Alpes maritimes	senestre NE-SW, dextre NW-SE	6.8	0.8	37	15	1.5	51	20
3	Provence sud-occidentale	décrochant senestre NE-SW, inverse EW	5.6	0.1	7	6	0.2	10	8
4	marge nord ligure	normal NE-SW en surface	6.8	0.7	33	17	1.3	46	22
5	chevauchements sud-pyrénéens	inverse ENE-WSW	6.3	0.4	19	10	0.7	26	14
6	Golfe Genova-Ligure	normal à dextre de failles NW-SE ?	6	0.2	13	8	0.4	17	11
7	Corse et Sardaigne hercynienne	?	6.2	0.3	16	9	0.6	22	13
8	Corse alpine et bassin Corse	normal NS ?	5.6	0.1	7	6	0.2	10	8
9	chevauchements nord pyrénéens	inverse WNW-ESE	6.2	0.6	15	9	1.2	21	12
10	Liguria Sud	NW-SE décrochant dextre à normal	7	0.9	42	20	1.7	58	26
11	Toscane Sud	NW-SE à NS normal, chevauchement profond	7	0.9	42	20	1.7	58	26
12	marge de Toscane	NW-SE à NS normal, chevauchement profond	5.7	0.1	8	7	0.2	12	9
13	zone de transfert entre la chaîne axiale nord et sud des Apennins	normal, NNW-SSE ; dextre, NE-SW	7.3	1.7	74	21	3.3	101	29
14	partie sud de la chaîne axiale des Apennins	normal NW-SE, chevauchement profond	7.7	3.3	127	36	6.3	175	46
15	versant sud-ouest de la chaîne des Apennins	NW-SE à NS normal, chevauchement profond	6.1	0.2	15	10	0.5	21	13
16	zone intermédiaire entre le versant sud-ouest des Apennins et le bassin tyrrhénien	normal NW-SE ?	5.7	0.1	8	7	0.2	12	9
17	Région d'Ischia-Phlegrean et du Vésuve	normal ENE-WSW, chevauchement profond	6.3	0.3	19	12	0.6	26	15
18	marge de la Campanie	normal NW-SE, chevauchement profond	5.7	0.1	8	7	0.2	12	9
19	zone intermédiaire entre l'arc de Calabre et le bassin océanique tyrrhénien	normal NNW-SSE au Nord, NE-SW au sud	6	0.2	13	9	0.4	18	12
20	arc de Calabre	normal NNW-SSE au Nord, NNE-SSW au sud	7.7	3.3	127	28	6.3	175	38
21	bassin océanique tyrrhénien								
22	ride de Pianosa	normal NS ?	5.6	0.1	7	6	0.2	10	8
23	Sicile nord orientale, Cap d'Orlando	normal-dextre NW-SE, normal E-W	6.6	0.5	26	15	0.9	37	19
24	zone de haut fond oriental entre la Méditerranée orientale et le bassin tyrrhénien	inverse WSW-ESE ?	5.5	0.1	6	6	0.2	9	8
25	Sicile nord, versant nord du Nébroti	inverse WNW-ESE	6.4	0.6	20	10	1.2	27	14
26	Sicile nord occidentale, côte de Palerme	dextre-normal WNW-ESE	6.1	0.2	15	10	0.5	21	13
27	Valle del Belice	dextre N-S (faille de transfert ?)	6.6	0.4	33	11	0.7	45	14
28	nord-est du plateau ibléen	inverse NE-SW	6.1	0.6	13	8	1.2	18	10
29	escarpement de Malte	dextre-normal NNE-SSW	7.4	2.0	84	23	3.9	116	31
30	zone de haut fond occidental entre la Méditerranée orientale et occidentale	inverse NE-SW	7	0.7	44	18	1.4	60	25
31	dépression de Constantine et région d'Annaba	dextre WNW-ESE, senestro-inverse NNE-SSW à NE-SW	7	1.1	49	17	2.1	67	23
32	Rif Tell et marge nord maghrébine	inverse ENE-WSW, dextre NW-SE, senestre NNE-SSW	7.8	3.8	145	31	7.3	200	41

n° zone	nom	mécanisme	Mmax	pm MAX_moyen			pm MAX_max		
				rejet (en m)	longueur (en km)	largeur (en km)	rejet (en m)	longueur (en km)	largeur (en km)
33	bassin algérien : partie sud du bassin océanique de la Méditerranée occidentale								
34	zone intermédiaire Nord-Ouest entre le bassin liguro-provençal et le bassin algérien	dextre ?	5.7	0.1	9	6	0.1	12	8
35	cordillère ibérique septentrionale	normal NE-SW	6.2	0.3	17	11	0.5	23	14
36	zone à croûte continentale réduite du bassin de Valencia								
37	bassin de Valencia	normal NE-SW, NNW-SE au sud	7	0.9	42	20	1.7	58	26
38	terminaison NE de la cordillère bétiques et îles Baléares	inverse ENE-WSW	5.4	0.1	6	5	0.2	8	7
39	zone intermédiaire entre le bassin de Valencia et le front nord de la chaîne bétique	senestre NE-SW à inverse ENE-WSW	6.7	0.7	33	14	1.3	45	18
40	zone de failles NE-SW et NNE-SSW d'Alicante-Murcia-Carboneras	senestre NE-SW à inverse ENE-WSW	7.1	1.3	56	18	2.4	77	25
41	région d'Almeria	normal NW-SE, senestro-inverse NE-SW	7	0.9	42	20	1.7	58	26
42	région de Malaga, segment de la cordillère bétique interne	dextre WNW-ESE, normal NNW-SSE	7	1.1	49	17	2.1	67	23
43	zone intermédiaire entre le bassin de Gibraltar et la chaîne bétique de Malaga		5.7	0.1	8	7	0.2	12	9
44	extrémité occidentale du Rif et de la cordillère bétique	dextre NNW-SSE, senestre NE-SW	6.9	0.8	51	13	1.3	69	17
45	extrémité ouest de la mer d'Alboran	normal ENE-WSW	5.7	0.1	9	7	0.2	13	9
46	zone faillée NE-SW de Jehba et Nékor	normal NS, dextre-normal NW-SE	7	0.9	42	20	1.7	58	26
47	région d'Oran	inverse	7	0.7	44	18	1.4	60	25
48	Languedoc	failles NE-SW, normal à décrochant senestre	6.1	0.2	15	10	0.5	21	13
49	bassin de l'Empurdan, du Roussillon et zone axiale pyrénéenne	normal-dextre NW-SE (en mer)	6.7	0.6	30	16	1.1	41	21
50	Pyrénées centrales	chevauchant E-W et dextre NW-SE	6.4	0.4	22	11	0.8	30	15
51	zone intermédiaire Sud-Est entre le bassin liguro-provençal et le bassin algérien	failles NW-SE -dextre	5.7	0.1	9	7	0.3	13	10
52	Bassin liguro-provençal	normal	5.7	0.1	9	7	0.3	13	9
53	Mer de Ligurie	inverse failles NE-SW, dextre ESE-WNW, sen. NNW-SS	6.8	0.8	37	15	1.5	51	20
54	Chaines subalpines méridionales	inverse, décrochant	7.3	1.7	74	21	3.3	101	29
55	Golfe du Lion-Camargue	normal, failles NE-SW ou NW-SE	6.1	0.3	15	10	0.5	21	13
56	massifs centre-ibériques	inverse NW-SE ?	6.4	0.6	20	10	1.2	27	14
57	bassin de l'Ebre	inverse NW-SE	4.7						
58	Liguria Nord	dextre NW-SE, senestre NE-SW	6	0.1	14	7	0.2	19	10
59	extrémité ouest du bassin algérien	dextre WNW-ESE, senestre NE-SW	6.3	0.2	22	9	0.4	29	12



## **2.2. ZONAGE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN SOUS-MARINS ET COTIERS**

### **2.2.1. Le zonage des mouvements gravitaires sous-marins au large de la côte méditerranéenne française**

#### ***Contexte***

Au large de la côte méditerranéenne française, le territoire maritime peut être caractérisé par une morphologie très irrégulière avec localement de fortes pentes. Il peut par ailleurs être recouvert de formations relativement meubles et épaisses (dépôts alluvionnaires des rivières du Rhône, du Var, du Paillon par exemple). Il s'agit donc de zones propices à des glissements sous-marins.

Ainsi, au large de la côte d'Azur, le plateau et talus continental de la mer ligure sont réputés pour avoir subi des mouvements gravitaires sous-marins très volumineux. C'est le cas du cirque Marcel dont le volume est estimé à plusieurs millions de m<sup>3</sup>. Il s'agit d'un glissement fossile dont la cicatrice d'arrachement a pu récemment être précisée (Ruellan et al., 2007). Toutefois, la cicatrice de ce glissement est très probablement le résultat de plusieurs événements successifs dont il n'est pas facile de reconstruire la chronologie (Ruellan et al., 2007 ; Cattaneo, 2007).

Plus à l'Ouest, le golfe du Lion est constitué par un plateau continental dont la largeur peut dépasser 80 km. Pendant le Pleistocène, les apports sédimentaires du Rhône et d'autres fleuves se sont accumulés au niveau du plateau et talus continental actuel. Les formations néogènes ont été successivement recouvertes par les cônes sédimentaires du Rhône et incisées lors de périodes glaciaires successives (lesquelles ont donné lieu à un abaissement du niveau marin). Le rebord du plateau continental est localement entaillé par des canyons aux pentes parfois très raides. Les canyons languedociens et pyrénéens constituent le trait morphologique majeur de la zone étudiée ; ils forment des incisions dépassant 600 m de profondeur, avec des flancs extrêmement pentés. Des loupes d'arrachement d'aspect très frais entaillent les anciens dépôts littoraux formés durant le dernier maximum glaciaire, il y a environ 20 000 ans (le niveau marin était d'environ 120 m sous le niveau actuel), ce qui permet de dater de manière indirecte l'âge des glissements (post -20 000 ans).

La Corse présente en général un plateau continental beaucoup plus étroit (10 à 15 km de largeur). La pente continentale de la marge ouest de la Corse est profondément incisée par des canyons en relation directe avec le réseau hydrographique de la Corse émergée, et vraisemblablement aussi liée à la baisse du niveau marin lors des maximum glaciaires.

## **Démarche**

Dans le cadre de cette étude, un zonage des mouvements gravitaires sous-marins du plateau et du talus continental au large des côtes méditerranéennes françaises, à l'échelle 1/500 000<sup>ème</sup> a été confié à l'IFREMER (Cattaneo, 2007). Ce travail ne correspond pas à une cartographie événementielle des mouvements sous-marins (ce type de cartographie fait l'objet de travaux de recherche entrepris depuis plusieurs années par l'IFREMER et Géosciences Azur), mais plutôt à l'identification de zones instables sous marines avec une estimation des volumes maximum susceptibles d'être déstabilisés.

Sur la base des données bathymétriques, de la connaissance des corps sédimentaires sous-marins et en s'appuyant sur les événements gravitaires fossiles ou actuels connus, ce zonage des mouvements gravitaires sous marins avait donc pour objectifs :

1) l'identification et la délimitation de zones marines aux caractéristiques gravitaires a priori homogènes sur l'ensemble de la zone considérée.

2) pour chaque zone, dans la mesure où cela se justifiait (possibilité d'instabilités de pente), caractérisation des zones par deux types de mouvements de référence :

- un mouvement de taille maximale, qualifié d'exceptionnel (rare) : G\_MAX
- un mouvement de taille moyenne, c'est-à-dire le plus commun : G\_MOD

3) Qualification des mouvements de référence :

- nature du phénomène (dynamique),
- géométrie (longueur, épaisseur, largeur du glissement initial),
- nature des matériaux susceptibles d'être déstabilisés (sables, graviers, limons, rocheux, etc),
- angle moyen de la surface de rupture (plan de glissement par rapport à l'horizontale),
- profondeur moyenne du glissement.

## **Les résultats**

Au total, vingt zones ont été individualisées (Figure 3). Les caractéristiques gravitaires de chacune de ces zones sont détaillées dans le rapport IFREMER (Cattaneo, 2007). Chacune des zones est caractérisée par un glissement-type estimé maximal (G\_MAX) et un glissement-type dit commun (G\_MOD), avec, dans la mesure du possible, indications des paramètres suivants :

- L = longueur (m) ;
- W = largeur (m) ;
- H = hauteur (épaisseur maximale du glissement, en m) ;
- Pente moyenne
- Profondeur moyenne
- N = nature des sédiments déstabilisés

- TYPE = "SLUMP" (avec dépôt au pied de la loupe) ou "SLIDE"
- 'RUNOUT' = ordre de grandeur de la distance parcourue par le glissement (en km)
- Direction de propagation du glissement

Concernant les paramètres L, W, H, pente moyenne, profondeur moyenne et N, une distinction est faite entre les loupes d'arrachement et la zone de dépôt du glissement-type considéré.

Le volume du glissement est calculé selon les indications de McAdoo (2000), c'est-à-dire en considérant le volume d'un prisme ayant comme base l'aire (L x W) et comme hauteur la valeur H :  $\text{Volume (m}^3\text{)} = \frac{1}{2} \times L \times W \times H$ .

En outre, selon la zone et la qualité des informations de base, pour MOD deux paramètres indicatifs sont donnés :

- n : nombre de glissements de ce type dans la zone
- fréquence : période de retour en années.

Le Tableau 2 est une synthèse des principales caractéristiques géométriques des glissements-type G\_MAX et G\_MOD.

Sur la base des données paléogéomorphologiques (âge et nature des glissements) et du nombre d'évènements répertoriés au niveau des différentes zones, une évaluation de la période de retour probable des glissements sous-marins est donnée. Ainsi, d'une façon générale, la fréquence des glissements de terrain est estimée de l'ordre de quelques dizaines d'années à quelques milliers d'années pour les glissements les plus courants (G\_MOD). Par contre, concernant les glissements réputés exceptionnels (G\_MAX), celle-ci serait a priori de quelques dizaines de milliers d'années voire même au-delà de la centaine de milliers d'années.

### ***Le choix des scénarios***

Au total, vingt scénarios de glissements sous-marins (dont 1 historique) ont été simulés. Le choix des 20 scénarios a porté non seulement sur les volumes en jeu ainsi que de la profondeur d'initiation du glissement, mais aussi, dans certains cas (comme pour la Zone 19-G\_MOD) sur le doute élevé qui pouvait exister quant-au caractère tsunamigénique de la zone.

Ensuite, trois ont été choisis pour des simulations à plus haute résolution spatiale (mailles de 250mx250 m ou 83mx83m). Le choix des simulations des 3 scénarios de mouvements de terrain de référence, estimé a priori parmi les plus catastrophiques pour la côte méditerranéenne française, a été fait en tenant compte des résultats des premières simulations (sur grille à 750m), mais aussi de la fréquence d'apparition des glissements et du niveau de fiabilité estimé pour les caractéristiques de la zone (cf Cattaneo, 2007).

Il s'agit des scénarios de :

- glissement de type G\_MOD à l'Ouest de la Corse, zone 02, volume déstabilisé 0,75 km<sup>3</sup>,
- glissement de type G\_MOD dans le canyon Lacaze-Hérault, zone 18, volume déstabilisé 0,55 km<sup>3</sup>.

Concernant la fréquence d'apparition des glissements de type G\_MOD, celle-ci est estimée de l'ordre de 1 par quelques centaines à quelques milliers d'années (Cattaneo, 2007), cette période de retour est cohérente avec celle évaluée pour les séismes maximum du zonage sismique.

Par ailleurs, le glissement de type G\_MAX au Sud de la Côte d'Azur entre Nice et Vintimilles, zone 07, volume déstabilisé 1 km<sup>3</sup>, a aussi été retenu comme scénario de référence. Ce dernier correspond à la trace d'une dizaine de glissements (d'après Cattaneo, 2007), ce qui diminue le caractère exceptionnel du glissement G\_MAX de la zone 07. Par ailleurs, la simulation sur grille 750 m réalisée au préalable a montré que ce type de glissement pouvait générer un tsunami beaucoup plus important que celui lié à l'évènement de Nice 1979.

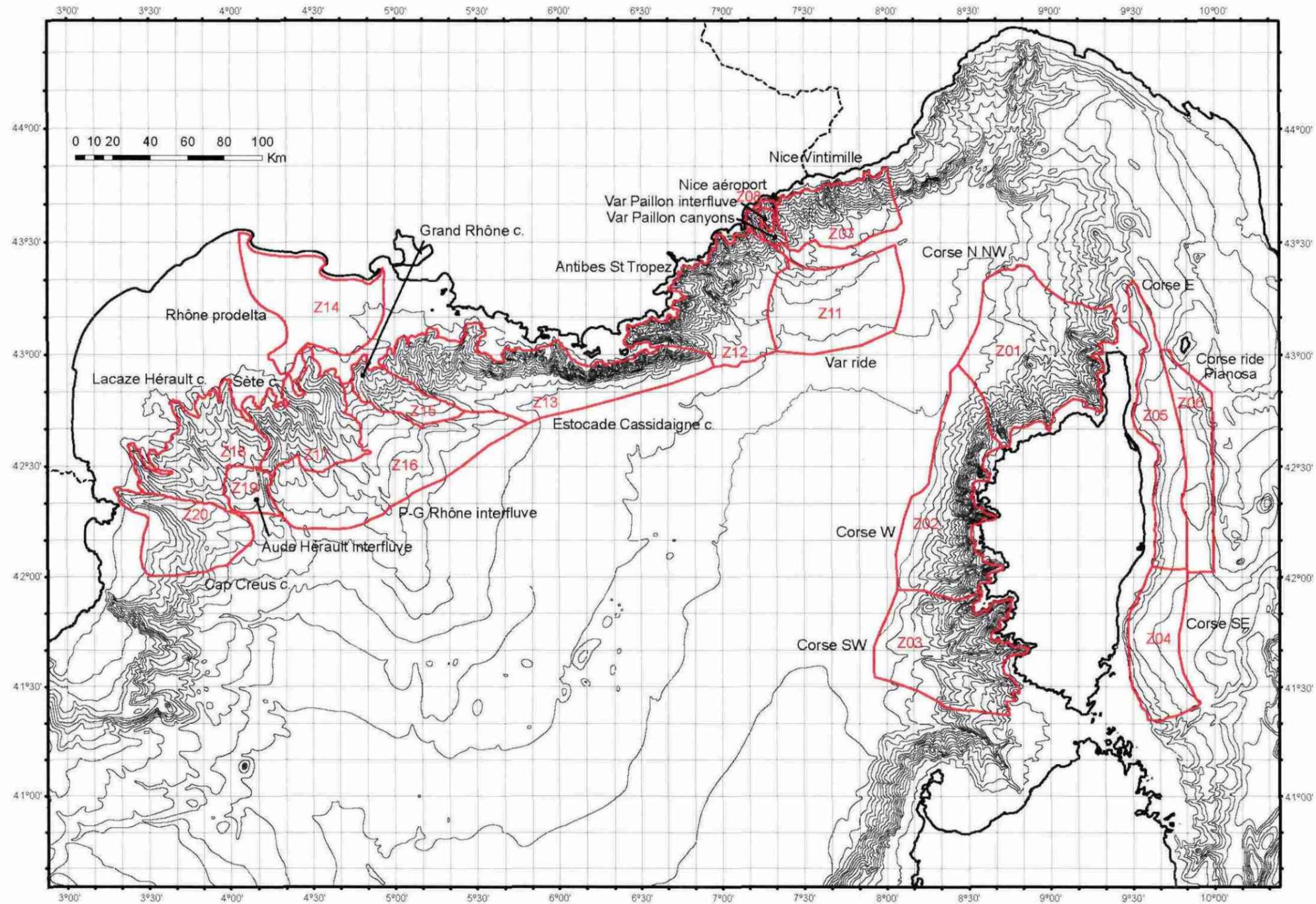


Figure 3 - Zonage des mouvements de terrain sous-marins du plateau et talus continental de la façade méditerranéenne française (d'après Cattaneo, 2007)



Tableau 2 - Synthèse des caractéristiques des zones de mouvements de terrain sous-marines

n° ZONE	NOM		indice de fiabilité	Longueur L (m)	Largeur W (m)	Hauteur H (en m)	Volume en km <sup>3</sup>	type de mouvement	Nature des matériaux glissés
Z01	Corse NNW	MAX	1	10000	3000	150	2,25	slide	
		MOD	1	2000	500	50	0,025	slide	
Z02	Corse W	MAX	2	12000	3000	250	4,5	slide	
		MOD	2	5000	1500	200	0,75	slump	
Z03	Corse SW	MAX	2	7000	5000	200	3,5	slide	
		MOD	2	4000	2000	50	0,2	slide	
Z04	Corse SE	MAX	3	1000	2000	20	0,02	slump	
		MOD	1	500	500	10	0,0013	slide	
Z05	Corse E	MAX	1	2000	2000	100	0,200	slide	
		MOD	1	1000	1500	50	0,0375	slide	
0									
Z06	Corse - ride Pianosa	MAX	2	20000	10000	150	15	slump	vase silteuse
		MOD	3	4000	4000	50	0,4	slump	vase silteuse
Z07	Nice - Vintimille	MAX	2	5000	2000	200	1	slide	
		MOD	2	2000	1000	75	0,075	slide	
Z08	Nice - aéroport	MAX	3	1000	350	55	0,0096	slide	vase silteuse et niveaux sableux
		MOD	3	500	100	10	0,003	slide ?	vase silteuse et niveaux sableux ?
Z09	Interfluve du Var et du Paillon	MAX	2	2000	400	60	0,024	slide	
		MOD	2	500	200	20	0,001	slide	vase silteuse
Z10	Canyons du Var et du Paillon	MAX	2	2000	1500	100	0,15	slide	
		MOD	2	1000	500	50	0,0125	slide	

n° ZONE	NOM		indice de fiabilité	Longueur L (m)	Largeur W (m)	Hauteur H (en m)	Volume en km <sup>3</sup>	type de mouvement	Nature des matériaux glissés
Z11	Ride du Var	MAX	1	5000	3000	100	0,75	slide	
		MOD	2	1000	500	100	0,025	slide	
Z12	Antibes - St Tropez	MAX	2	6000	2000	200	1,2	slide	
		MOD	2	1000	300	50	0,0075	slide	
Z13	Canyon d'Estocade-Cassidaigne	MAX	1	5000	2000	100	0,5	slide	
		MOD	2	1000	500	50	0,0125	slide	
Z14	prodelta du Rhône	MAX	3	200	500	10	0,0005	slump	sables
		MOD	3	200	100	5	0,0001	slide	vase
Z15	Canyon du Grand Rhône	MAX	1	7000	3000	150	1,575	slide	
		MOD	3	1500	500	30	0,0113	slide	
Z16	P-G Rhône interfluve	MAX	3	10000	6000	100	3	slide	
		MOD	3	4500	2000	30	0,135	slide	
Z17	Canyon de Sète	MAX	1	10000	5000	100	2,5	slide/Débris flow	
		MOD	2	1500	700	50	0,0263	slide	
Z18	canyon de Lacaze - Hérault	MAX	1	4000	3500	160	1,12	slide	
		MOD	3	2000	1000	55	0,055	slide	
Z19	interfluve Aude - Hérault	MAX	1	5000	3500	100	0,875	slide	
		MOD	1	5000	2500	50	0,3125	slide	
Z20	canyon du Cap Creus	MAX	1	7000	5000	100	1,75	slide	
		MOD	2	2000	1000	30	0,03	slide	
<b>Indice de fiabilité :</b>									
1 = FAIBLE, basé seulement sur des données de morphobathymétrie (identification de glissement pas sûre à 100%)									
2 = MOYENNE, basé sur des données suffisantes pour identifier les glissements. Pas de travaux spécifiques disponibles									
3 = FIABLE, basé sur des données suffisantes pour identifier les glissements et des travaux de détail spécifiques									

## 2.2.2. Glissements et effondrements de falaises côtières

### **Démarche**

Les mouvements de terrain que subissent les falaises côtières font partie des différents phénomènes susceptibles de générer un tsunami dans la mesure où la dimension de la masse écroulée est suffisante (plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup>) et que la zone de réception du mouvement de terrain correspond à une zone immergée avec une tranche d'eau de plusieurs mètres d'épaisseur.

L'identification et la caractérisation des secteurs côtiers susceptibles d'être affectés par des mouvements de terrain de fort volume ont été basées sur les travaux de cartographie de l'aléa mouvements de terrain à 1/100 000<sup>ème</sup> réalisés pour la région Corse (Sedan et al., 2002 ; Colas et Sedan, 2003) et la région PACA (Marçot et Mathon, 2003). Pour la région LRO, ce travail a été complété par l'analyse des photographies aériennes et des cartes géologiques.

### **Résultat**

Le littoral des régions Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Corse correspond localement à des falaises côtières de plusieurs dizaines de mètres de hauteur. Même en considérant une probabilité faible d'apparition, et cela quel que soit le secteur considéré, les volumes maxima susceptibles d'être générés en cas de départ en grande masse restent bien inférieurs à 1 million de m<sup>3</sup>.

Parmi les principaux secteurs qui pourraient présenter des risques de départ en grande masse, il s'agit de (Figure 4) :

- Cap Canaille (Bouches-du-Rhône)
- Le Revestel (Bouches-du-Rhône)
- Cap Nègre (Var)
- Falaise d'Eze (Alpes Maritimes)
- Cap Béar (Pyrénées Orientales)
- Falaise de Bonifacio (Corse du Sud)

### **Choix des scénarios**

Bien que, la probabilité d'un départ en grande masse (supérieur à plusieurs centaines de m<sup>3</sup>) soit extrêmement faible, et cela quelque soit le site considéré, un scénario à quand même était réalisé. Le choix a été porté sur une simulation d'effondrement au niveau de la falaise Cap Nègre (Var) en raison de la morphologie sous-marine en pied de falaise, du volume déstabilisé et de la qualité du MNT à cet endroit.

Les caractéristiques de cet évènement sont les suivantes :

- type de mouvement : éboulement
- nature des matériaux : micaschistes,
- ordre de grandeur du volume maximal potentiellement déstabilisé : 750 000 m<sup>3</sup>.

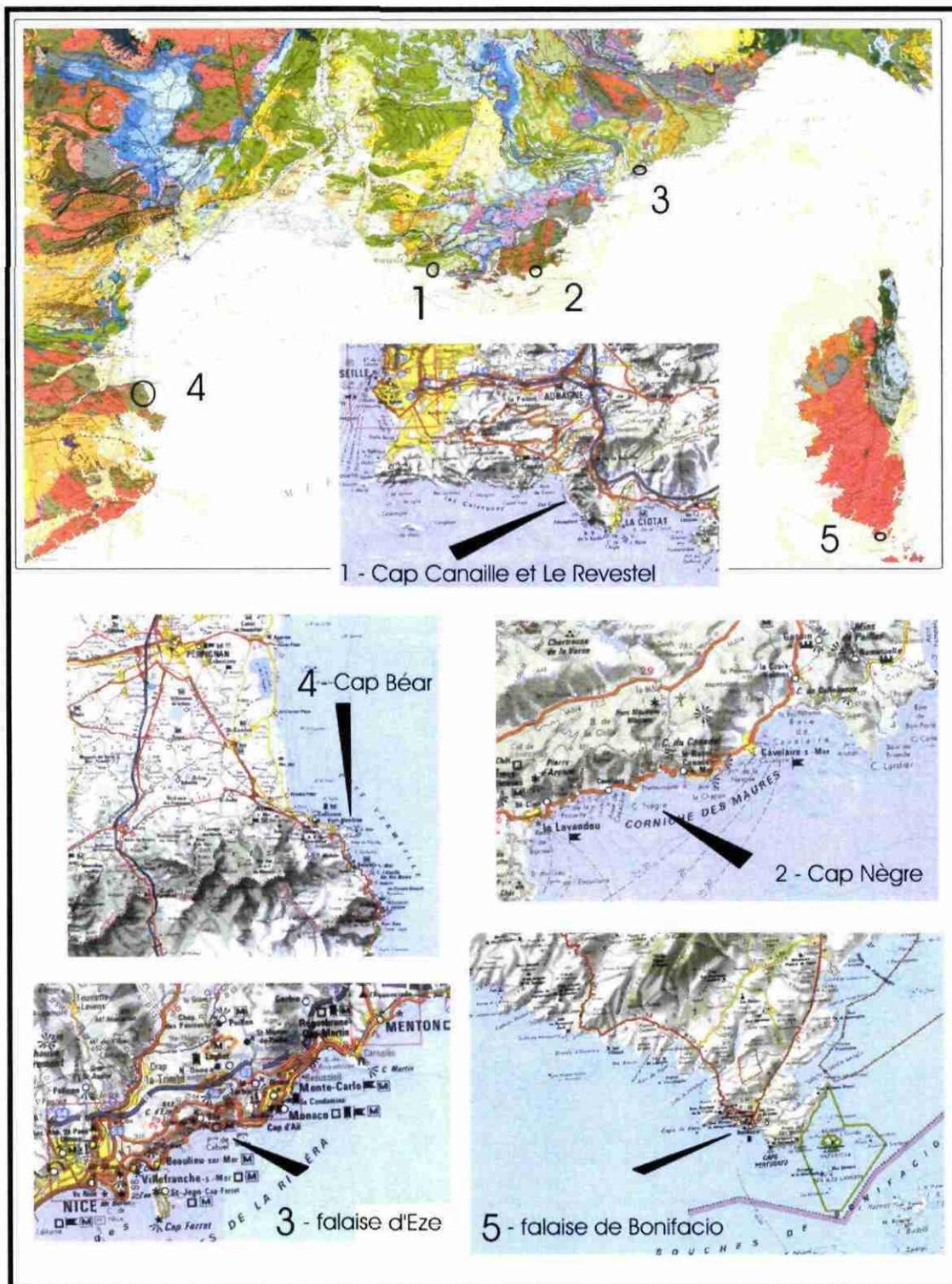


Figure 4 – Les principales zones à aléa effondrement côtier majeur identifiées sur le littoral méditerranéen français

### 3. Données bathymétriques et construction des MNT

#### 3.1. DONNEES TOPO-BATHYMETRIQUES INITIALES

Les données bathymétriques utilisées proviennent du SHOM, d'IFREMER et de la base de données internationale GEBCO.

- Données du SHOM (dalles HISTOLITT) : Ces données concernent le plateau continental Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Corse (sondes en rouge dans Figure 5). 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). La mise à disposition de ces données a fait l'objet d'une convention spécifique à l'étude entre le BRGM et le SHOM.

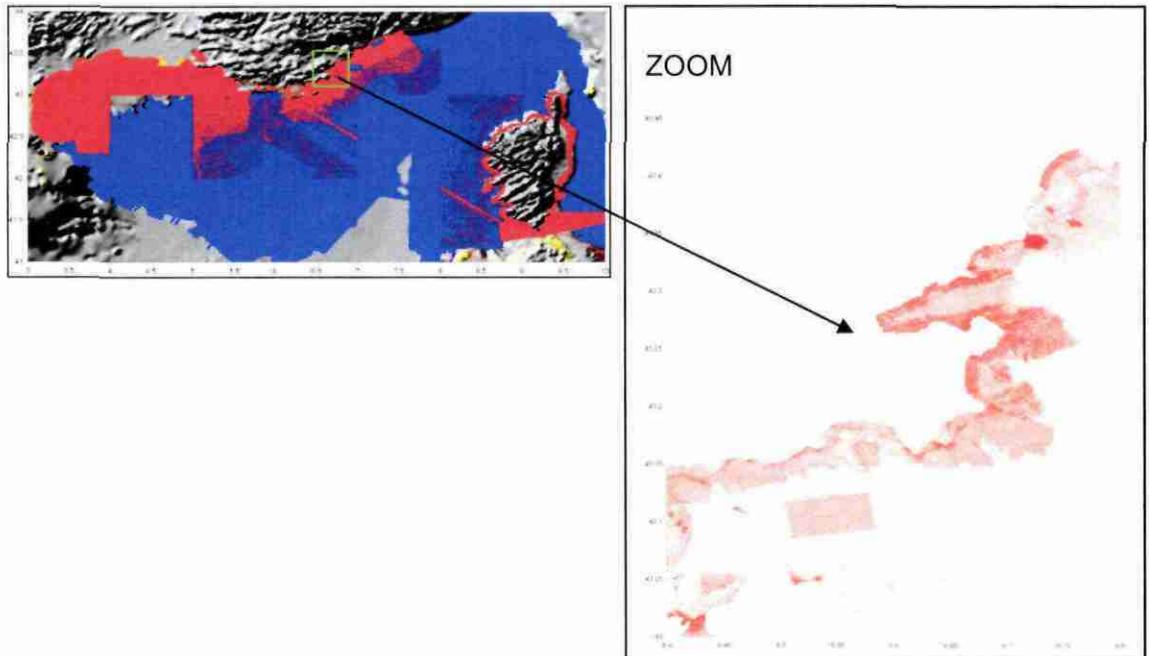


Figure 5 - Semis de points de sonde d'une densité maximale de 25 mètres, extrait de la base SHOM (mise à jour février 2006)

- **Données IFREMER :** Dans le cadre d'une convention BRGM/IFREMER, l'IFREMER a mis à la disposition du BRGM pour cette étude un modèle de la bathymétrie du domaine marin au large de la côte française avec une résolution horizontale de 250 m. Les données couvrent les profondeurs supérieures à 180 mètres. La couverture bathymétrique est représentée en Figure 6.

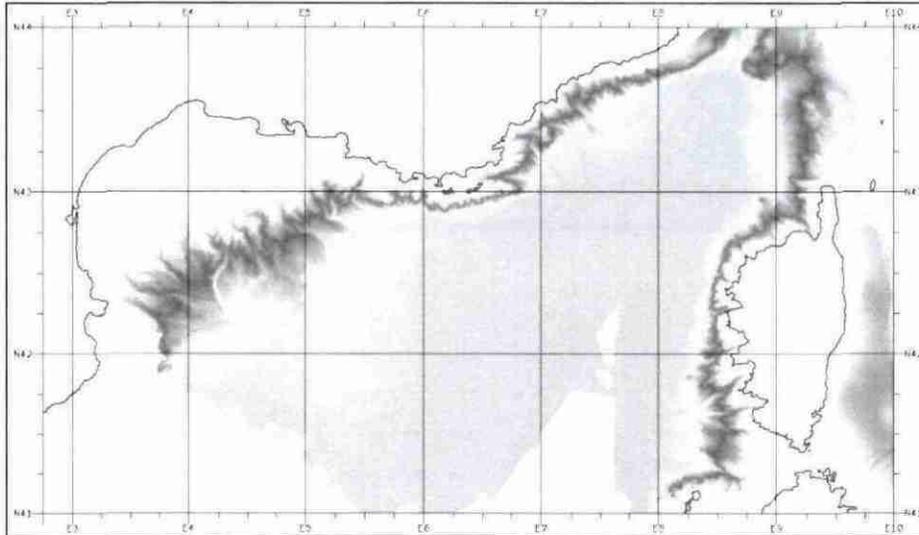


Figure 6 – Modèle de la bathymétrie du domaine marin au large de la côte française avec une résolution horizontale de 250m mis à disposition par l'IFREMER

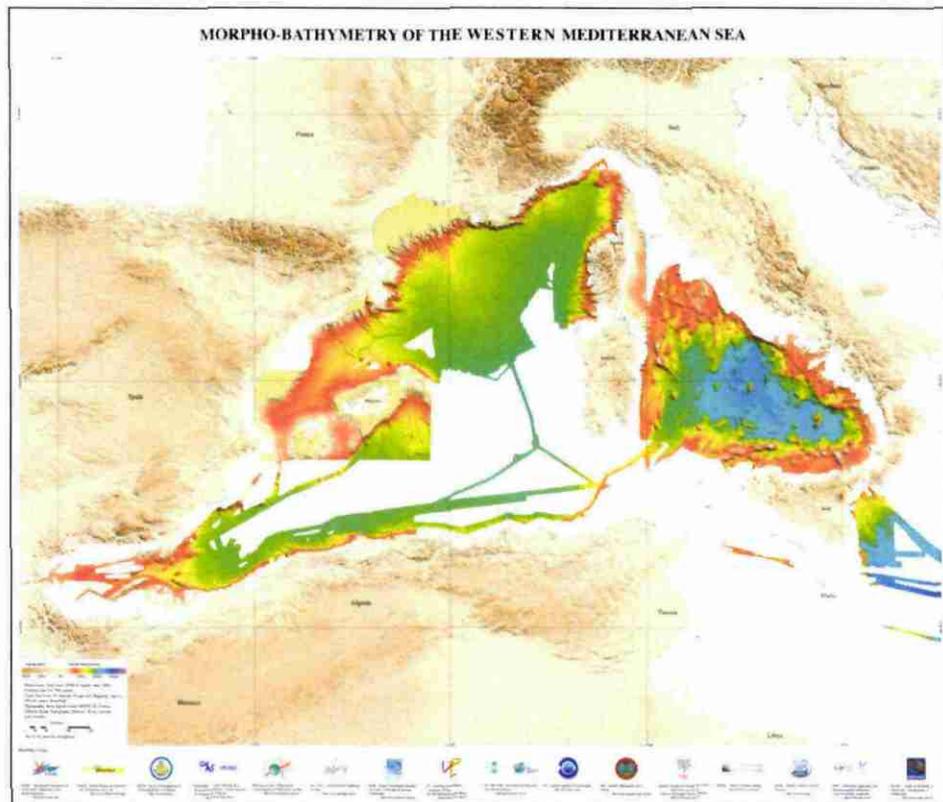
En outre, l'IFREMER a mis à la disposition du BRGM et dans le cadre de cette étude, une grille à maille de 1kmx1km couvrant pour partie bassins occidental et oriental de la Méditerranée. (Figure 7).

- **GEBCO, General Bathymetric Chart of the Oceans,** résultent d'une compilation à l'échelle du globe de sondages bathymétriques et de données issues de l'altimétrie satellitale. Les données sont délivrées gratuitement et sont accessibles à l'adresse suivante <http://www.gebco.net/>. La maille des pixels est de 1'x1' (environ 1,85 km x 1,85 km). Une extraction a été réalisée pour le domaine couvrant l'ensemble du bassin méditerranéen occidental (Figure 8).

- Concernant les données topographiques, deux sources de données ont été utilisées :

- **celles issues de la BD topo IGN** (maillage de 50 m) : pour les côtes françaises,
- **celles issues de SRTM** (Shuttle Radar Topography Mission, maillage de 90 m) : pour les côtes voisines à la France.

La précision en z de ces données peut dépasser le mètre pour les premières et plusieurs mètres pour les secondes.



Cartographie morpho-bathymétrique compilée par l'IFREMER dans le cadre d'un projet de recherche associant des instituts de recherche, océanographiques et hydrographiques, le comité Géosciences Marines de la CIESM et le groupe Cartographie de l'Ifremer (mise à disposition juin 2006)

Figure 7 – Information bathymétrique à maille 1 km x 1 km d'après IFREMER

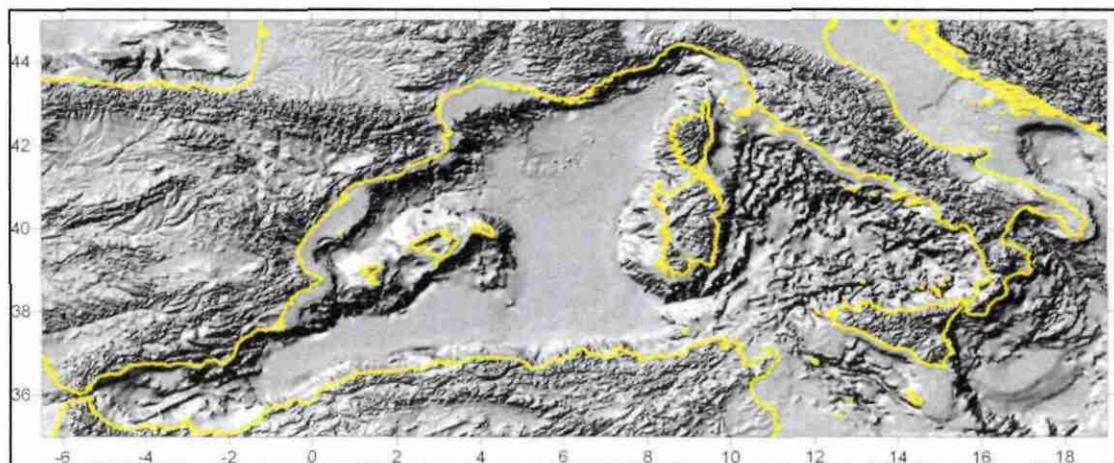


Figure 8 – Extrait du fichier GEBCO : bathymétrie avec une maille moyenne de 1'x1' (d'après <http://www.gebco.net/>)

### 3.2. CONSTRUCTION DES GRILLES NECESSAIRES AUX SIMULATIONS

Ces différentes sources de données topo-bathymétriques ont été utilisées pour construire 5 grilles principales qui ont servi de base à l'ensemble des simulations champ proche et champ lointain (Figure 9). La résolution spatiale de ces grilles varie de 2250mx2250 m pour les plus grossières à 750mx750m, puis 250mx250m, et enfin 83mx83 m pour les plus précises (régions LRO, PACA et Corse).

Cet emboîtement permet de garder une bonne résolution de la simulation sur les zones côtières tout en autorisant un domaine de calcul global étendu (cf chapitre 4).

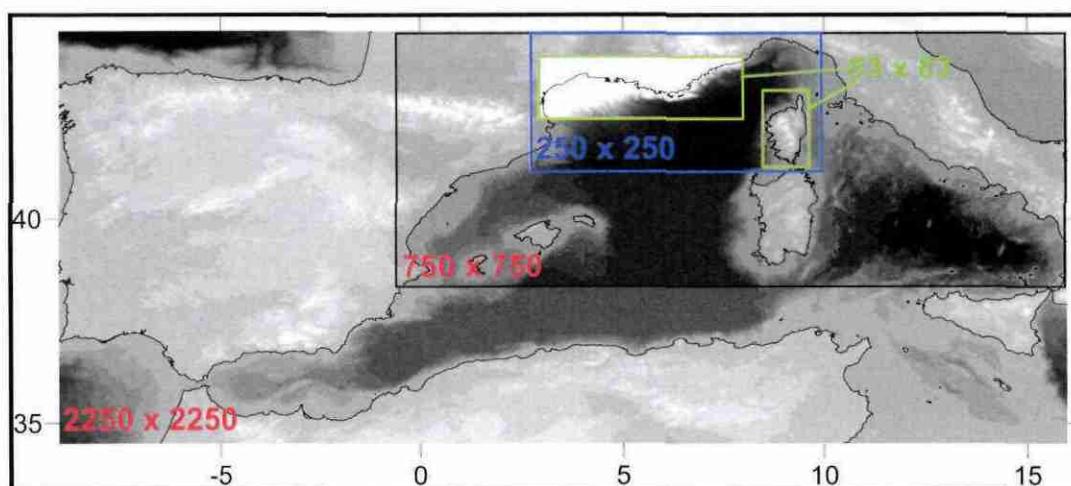


Figure 9 - Construction des 5 MNT principaux allant des résolutions de 2250x2250 m à 83x83 m.

Pour l'interpolation des données bathymétriques, sur les secteurs où plusieurs sources de données coexistaient, seules les données à plus haute résolution ont été utilisées.

Les MNT ont été fabriqués 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 et du grand nombre de valeurs considérées (environ 7 millions).

La qualité des données interpolées par cette méthode a ensuite été testée par validation croisée. Cette procédure a permis de localiser des erreurs ponctuelles en z très importantes (supérieures à 10 m en valeur absolue) à la frontière des données du SHOM et d'IFREMER (cela est dû à la combinaison de données de sources multiples et de types différents -maillées et sondes), les zones de contacts étant alors très irrégulières. Une fois localisés, ces points erronés ont été supprimés et des nouvelles interpolations effectuées.

La Figure 10 présente les résidus obtenus après validation croisée aux nouvelles grilles (83m x 83 m) interpolées. On obtient une distribution des erreurs centrée sur 0. Les erreurs les plus fréquentes se situent entre -0.5 m, et +0.5 m.

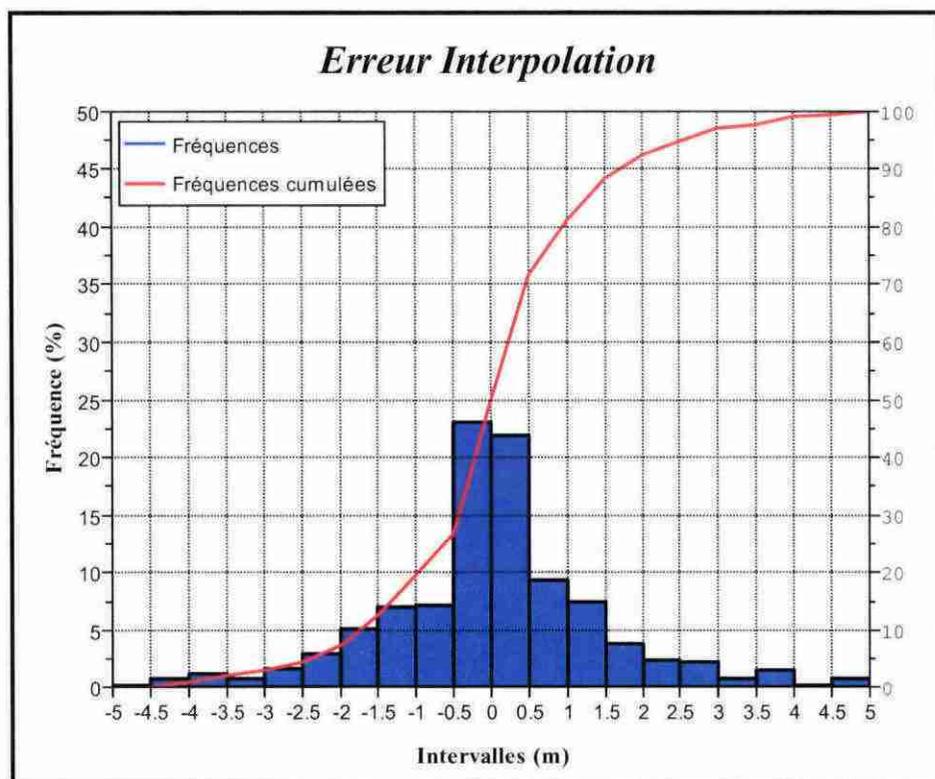


Figure 10 - Distribution des erreurs de l'interpolation obtenues par validation croisée (histogrammes) . La courbe rouge correspond aux fréquences cumulées (associées à l'axe des ordonnées à droite).

La résolution des différentes grilles (2250, 750, 250, 83) est donc en adéquation avec la densité des points (SHOM, IFREMER, GEBCO) disponible à l'intérieur du domaine des grilles.

La sensibilité des résultats de simulation en fonction de la précision des données bathymétriques a aussi fait l'objet de tests dont les résultats sont précisés en chapitre 5 de ce rapport.



## 4. Description du code de simulation

Les simulations numériques des tsunamis (phases de génération, propagation et inondation) de ce projet ont été effectués avec le code de recherche GEOWAVE (Watts et al. 2003). Il a été choisi suite à une étude menée au BRGM (Durand, 2006) visant à déterminer, parmi les codes représentatifs de l'état de l'art, le mieux adapté à cette étude. Les critères de choix étant :

- la capacité à traiter différents types de génération de tsunami : tectonique, glissement de terrain sub-aérien et sous-marin,
- l'intégration d'une physique adaptée à la gamme de longueurs d'ondes qui seront traitées (1 km-100 km),
- la considération de l'inondation : traitement du déferlement et des zones couvrantes/découvrantes,
- la robustesse du modèle.

Les principales caractéristiques de GEOWAVE sont synthétisées dans le

Tableau 3.

Néanmoins, pour répondre complètement aux besoins de cette étude, des modifications ont dû être apportées à la version de base de GEOWAVE. Celles-ci ont porté notamment sur :

- l'amélioration de la gestion de la mémoire : afin de traiter des grands domaines de calcul,
- la modification des procédures de lancement du code et des formats des sorties des données pour : un lancement automatisé, diminuer la taille des fichiers résultats (plusieurs GO par simulation) et les rendre compatibles avec les logiciels de SIG,
- la mise en place d'une gestion de grilles emboîtées :

La modélisation de tsunamis sur les zones côtières nécessite un maillage fin pour tenir compte des fortes irrégularités de la bathymétrie et évaluer précisément les zones inondables. Par contre la modélisation loin des côtes ne requiert pas une telle précision. Le code de calcul Geowave a donc été implémenté avec l'option d'usage d'une grille emboîtée, basée sur le principe : modélisation de la propagation d'un tsunami avec une faible résolution lorsque l'on se situe loin des côtes fournissant les conditions initiales à des modélisations avec une résolution de la grille de plus en plus fine dès lors que le tsunami se rapproche du littoral.

GEOWAVE ainsi modifié a été testé et validé sur de nombreux cas de référence et pour des tsunamis provoqués par des glissements sous-marins (Papouasie Nouvelle Guinée 1998, par exemple), des séismes (Sumatra 2004, par exemple).

<b>Propriétés Geowave</b>		
<b>Module Génération (TOPICS)</b>	Origine sismique	Okada 1985
	Origine glissement sous-marin	Grilli et Watts (1999)
	Origine glissement sub-aérien (effondrement falaise et volcanique)	Walder et al. 2003
<b>Module Propagation, inondation (FUNWAVE 1.0)</b>	Base théorique	Equations Boussinesq modifiées
	Domaine de propagation	360°
	Equations propagation utilisées	Complètement non linéaires et dispersives (Wei et al. 1995)
	Stationnaire ou transitoire	Transitoire (vague à vague)
	Caractéristiques maillage	Différence finies, cartésien,
	Densité maillage/longueur d'onde des vagues	Dépendant (environ 15 à 30 nœuds par longueur d'onde)
	Dépendance de la qualité des résultats/densité maillage	Forte
	Réfraction	Oui
	Diffraction	Oui
	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 – zone inondation	Oui (technique des slots)
Prise en compte d'obstacles (Bâtiments, mangrove, ...)	Non	
<b>Principaux résultats</b>	Elevation du plan d'eau	Suivant intervalle temporel défini par l'utilisateur
	Elévation maximale plan d'eau et heure correspondante	En tenant compte de l'ensemble de la simulation
	Elévation minimale plan d'eau et heure correspondante (retrait)	
	Vitesse maximale et direction atteinte par le courant	
	Limite d'inondation	
	Position du déferlement des vagues	

Tableau 3 - Principales caractéristiques de GEOWAVE

## 5. Incertitudes liées à la bathymétrie

L'influence de la bathymétrie sur les résultats de simulation a été traitée sous 3 aspects, en considérant :

- les lacunes dans les données,
- l'erreur liée à l'interpolation des données,
- la densité du maillage utilisé dans les calculs.

### 5.1. LACUNES DANS LES DONNEES

La Figure 11A (polygones en rouge) répertorie les secteurs dépourvus de toute information bathymétrique haute résolution (SHOM et IFREMER), à savoir : au large de la Ciotat, à l'est de Toulon et au niveau de la Rade d'Hyères. En ce qui concerne la Corse, une lacune est également observée au large du Cap Corse.

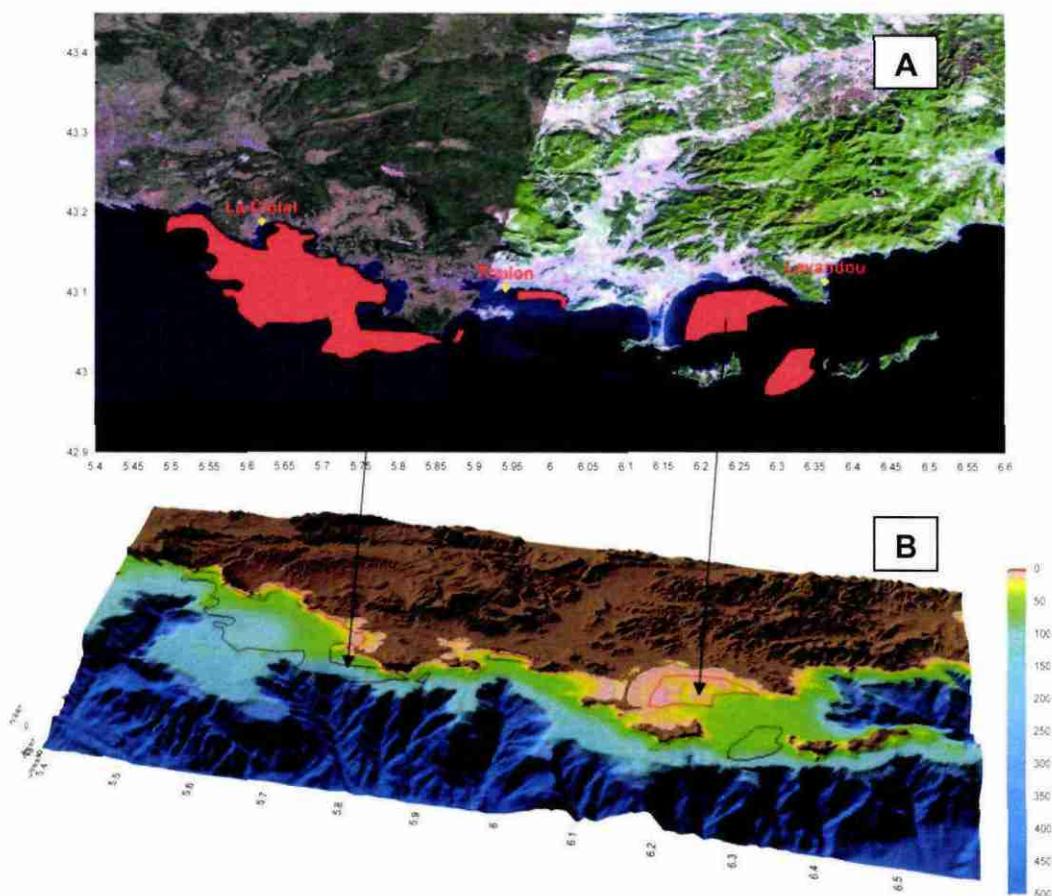


Figure 11 - Localisation des zones dépourvues de bathymétrie haute résolution (A). MNT construit en comblant les lacunes avec les données GEBCO (B)

Pour pallier à ces lacunes, les données GEBCO (mailles d'environ 1.85x1.85 km à cette latitude) présentes dans ces secteurs ont été utilisées dans la construction des MNT haute résolution (Figure 11B).

Les erreurs introduites par l'utilisation de ces données grossières dans l'interpolation correspondent aux valeurs extrêmes de la Figure 10 (proches des bornes -5 et +5 m).

## 5.2. INFLUENCE DE L'ERREUR D'INTERPOLATION DU MNT

L'influence sur les résultats de simulation des erreurs d'interpolation initiales a été analysée sur la base de trois tests relatifs à l'évènement de Nice 1979 (cf Pedreros et Poisson, 2007) :

- 1) simulation avec la grille initiale à 83mx83m,
- 2) simulation avec une grille modifiée par des perturbations systématiques de mailles avec [valeur  $z$  initiale +  $\Delta$  entre -2 et +2 m], avec  $\Delta$  fixé de façon aléatoire,
- 3) simulation avec une grille modifiée par des perturbations systématiques de mailles avec [valeur  $z$  initiale +  $\Delta$  entre -5 et +5 m], avec  $\Delta$  fixé de façon aléatoire.

La Figure 12 présente pour les tests 1 et 2 la différence entre les élévations maximales du plan d'eau calculées à partir de la bathymétrie de référence et la bathymétrie perturbée par des valeurs comprises entre + et - 2 m. L'écart moyen entre ces deux simulations est inférieur à 10 cm. Les différences les plus notables, qui peuvent être positives ou négatives, se situent à proximité des côtes. Celles-ci dépassent rarement les 20 cm.

En outre, pour les trois tests réalisés, la Figure 13 montre les séries temporelles des hauteurs d'eau calculées à proximité du rivage de l'aéroport de Nice ou du Cap d'Antibes. Cette figure indique que :

- Il n'y a pas d'écart significatif dans la prévision du temps d'arrivée du tsunami.
- Il y a un écart maximal de 15% dans l'amplitude de la crête de la vague principale pour la bathymétrie perturbée de +/-2 m. Il est de 50% pour la bathymétrie perturbée de +/-5 m.

Vu les données initiales utilisées et le choix du secteur test, les résultats des tests sont extrapolés à l'ensemble du domaine d'étude, c'est-à-dire la côte méditerranéenne française, pour laquelle on considèrera que :

L'analyse de la sensibilité des résultats par rapport aux données bathymétriques utilisées révèle une erreur maximale de 15% sur la hauteur des vagues près du rivage lorsque la couverture haute résolution spatiale est bonne (données initiales du SHOM ou de l'IFREMER, avec erreur en  $z$  au maximum de + ou -2 m). Dans les zones côtières où ces données sont absentes et que des données à basse résolution ont dû être introduites (GEBCO, erreur maximale de + ou -5 m), cette erreur maximale passe à 50%.

Ce calcul d'influence d'erreur d'interpolation bathymétrique concerne les simulations avec le code de calcul GEOWAVE modifié (cf chapitre 4) et les grilles bathymétriques utilisées (cf chapitre 3).

### **5.3. INFLUENCE DE LA DENSITE DU MAILLAGE**

Pour déterminer la densité du maillage de la bathymétrie nécessaire à la modélisation, il faut tenir compte de la longueur d'onde des tsunamis considérés. Dans le cas des modèles Boussinesq comme GEOWAVE, les travaux antérieurs montrent que les vagues sont bien décrites avec un minimum de 15 à 20 nœuds par longueur d'onde (Grilli et Watts, 1999 ; Woo et Liu, 2004).

Cette influence de la densité du maillage a été testée en comparant des simulations du séisme ligurien de 1887 (source sismique proche) effectuées sur des mailles de 750mx750 m, 250mx250 m et 83mx83 m (rapport Pedreros et Poisson, 2007).

Les longueurs d'ondes les plus faibles traitées dans cette étude correspondent aux tsunamis initiés par les mouvements de terrain. Les valeurs minimales sont alors de 13000 m dans la zone de génération et 2000 m à proximité du rivage (profondeur d'environ 10 m). Dans ces cas, des mailles respectivement de 750 m (17 nœuds/longueur d'onde) et de 83 m (24 nœuds/longueur d'onde) ont été utilisées pour traiter ces zones.

La grille de mailles 83 m est donc suffisante pour la réalisation des simulations dans le cadre de ce projet, sachant que les résultats obtenus concernent l'estimation de la hauteur maximale des vagues à proximité du rivage.

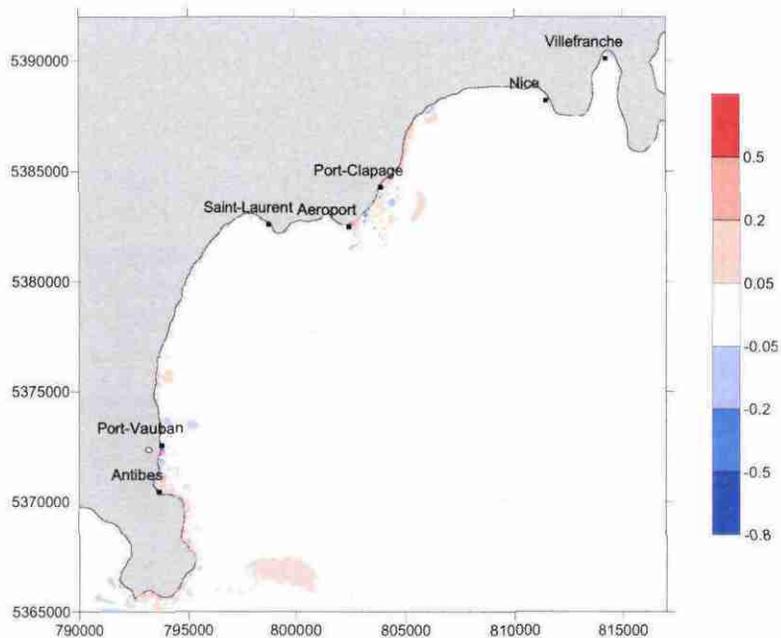


Figure 12 – Différence d'élévation de la surface libre entre la simulation de référence et la simulation avec la surface bathymétrique perturbée à  $\pm 2m$

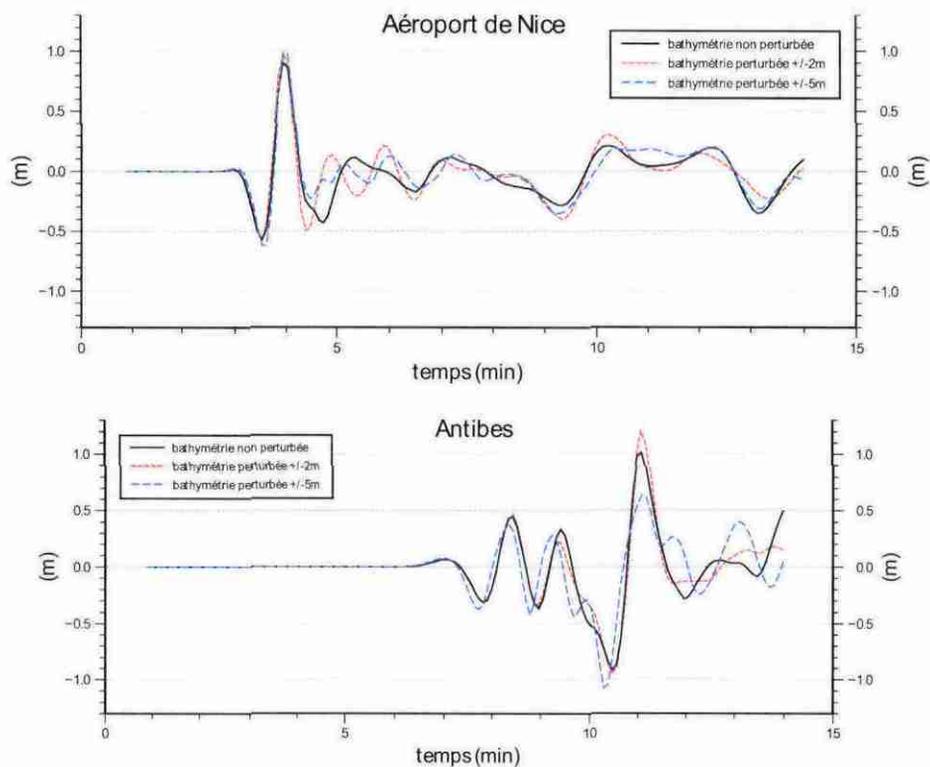


Figure 13 - Séries temporelles des hauteurs d'eau calculées au niveau de l'Aéroport de Nice et d'Antibes (scénario aéroport de Nice, 1979)

## 6. Résultats des simulations

Ci-après sont présentées les simulations :

- i) des 3 événements historiques de référence ayant servi à la validation du modèle et des données bathymétriques utilisés ;
- ii) de 6 scénarios fictifs retenus parmi les 29 simulés. Ces 6 scénarios (source sismique et mouvement de terrain) ont été choisis en tenant compte d'une part, de leur impact potentiel sur les côtes et d'autre part, de leur périodes de retour a priori de quelques centaines d'années à quelques milliers d'années.

Pour ces 6 scénarios, des simulations avec des grilles de meilleure résolution possible (avec les données actuelles) ont été faites. Les résultats sont présentés sur les planches 1 à 6 en hors, avec : l'élévation maximale du plan d'eau, le temps d'arrivée du tsunami, le courant maximal généré par le tsunami, une série temporelle des hauteurs d'eau.

Les résultats des simulations concernent plus particulièrement les caractéristiques du tsunami dans la zone marine proche du rivage. Par élévation maximale du plan d'eau, on entend l'amplitude de la crête des vagues (cf Figure 14). Par ailleurs, lorsque l'amplitude du tsunami devient non négligeable par rapport à la profondeur de l'eau, une partie de la vitesse d'oscillation de l'eau se transforme en un mouvement horizontal global. Cette information est indiquée sur les planches h.t. par des flèches (courant maximal).

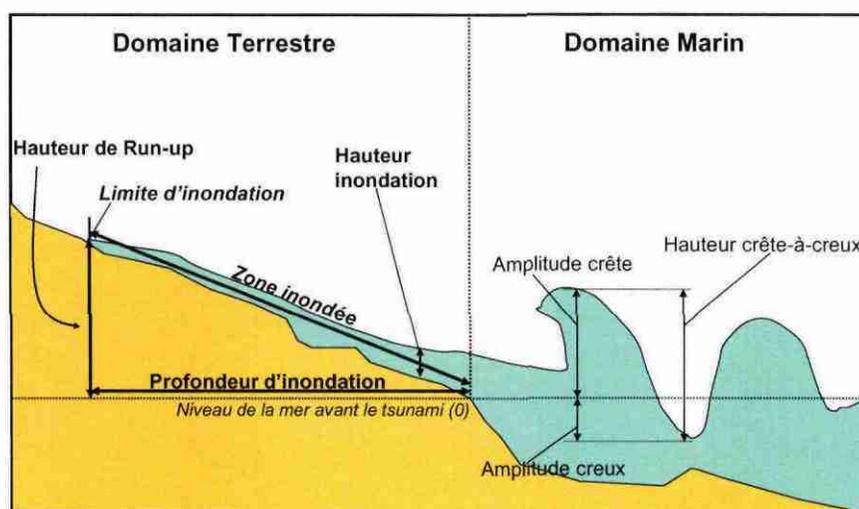


Figure 14 - Caractéristiques des tsunamis au niveau du rivage (d'après Pedreros et Poisson, 2007)

Ces planches ont été également insérées dans le texte de ce rapport avec réduction de leur format d'édition.

Le détail des résultats de l'ensemble des simulations (événements historiques et scénarios) est exposé dans le rapport de Pedreros et Poisson (2007).

## **6.1. SIMULATIONS DES TSUNAMIS HISTORIQUES**

Trois tsunamis historiquement survenus dans la zone étudiée ont été simulés : deux tsunamis d'origine sismique (séisme de Boumerdès, 2003, et séisme de mer Ligure, 1887), et un tsunami généré par glissement de terrain (effondrement de l'aéroport de Nice, 1979).

### **6.1.1. Séisme de Boumerdès, 2003**

L'épicentre du séisme se trouvait à une cinquantaine de km d'Alger, non loin de la côte. La magnitude a été estimée à 6.8, avec une profondeur focale de 10 km. Le séisme résulte du jeu d'une faille inverse de direction NE-SW, à pendage 40 à 50°SE.

Pour simuler cet événement, nous avons testé deux jeux de paramètres différents Meghraoui et al., 2004, et Yelles et al., 2004. En ce qui concerne le soulèvement moyen, une valeur de 1.5 m a été appliquée de façon homogène sur toute la longueur de la faille.

La simulation se fait à partir d'une grille bathymétrique dérivée de GEBCO d'une résolution de 1800 m de côté. Le calcul est ensuite emboîté sur des grilles de résolution 600 puis 200 m, sur les Baléares et sur les côtes françaises. Sur les Baléares, ces deux boîtes ont été construites en suréchantillonnant les données GEBCO et IFREMER (MNT à 1 km pour des profondeurs supérieures à 200 m). Aussi, la bathymétrie près de ces côtes possède une faible précision. A proximité des côtes françaises, les données haute résolution de l'IFREMER et du SHOM ont été utilisées pour construire les grilles de bathymétrie fine.

Le tsunami initial pour chacun des deux jeux de paramètres est représenté Figure 15.

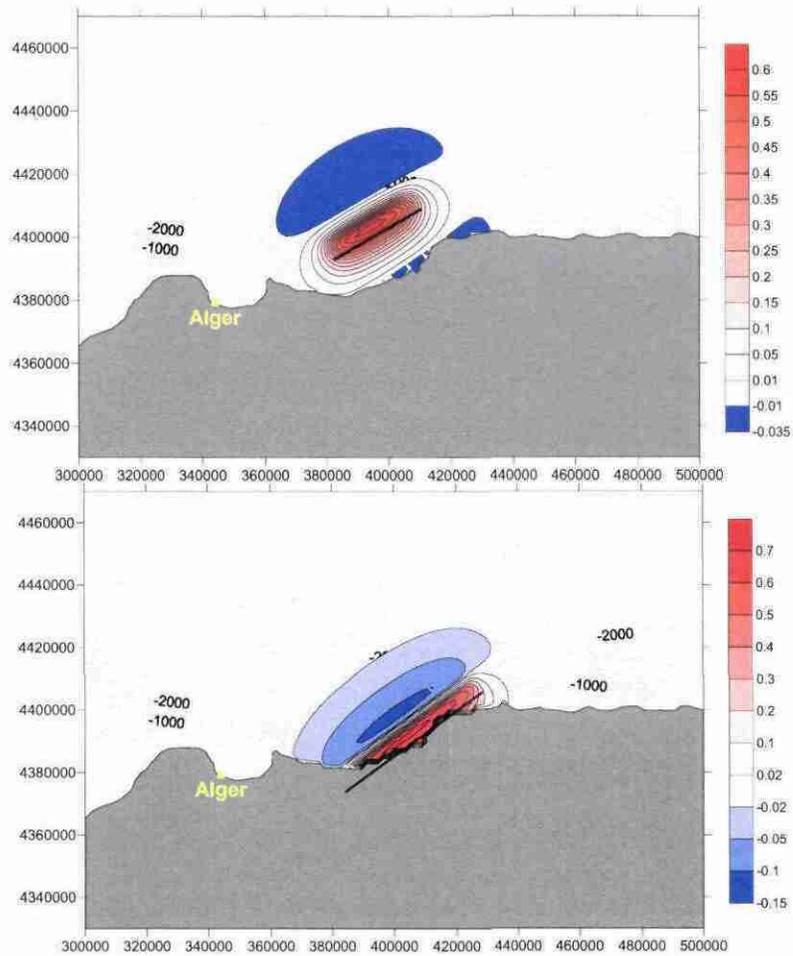


Figure 15 – Cotes de la surface libre (en m) obtenues lors du calcul du tsunami initial généré par le séisme de Boumerdes 2003, respectivement suivant les paramètres de Yelles et al. (2004) en haut, et Meghraoui et al. (2004) en bas.

L'élévation maximale du plan d'eau atteinte par le tsunami est représentée, pour le domaine de calcul à 1800 m, sur la Figure 16 et pour les domaines à 200 m, sur les Figure 17 (Baléares) et Figure 18 (France).

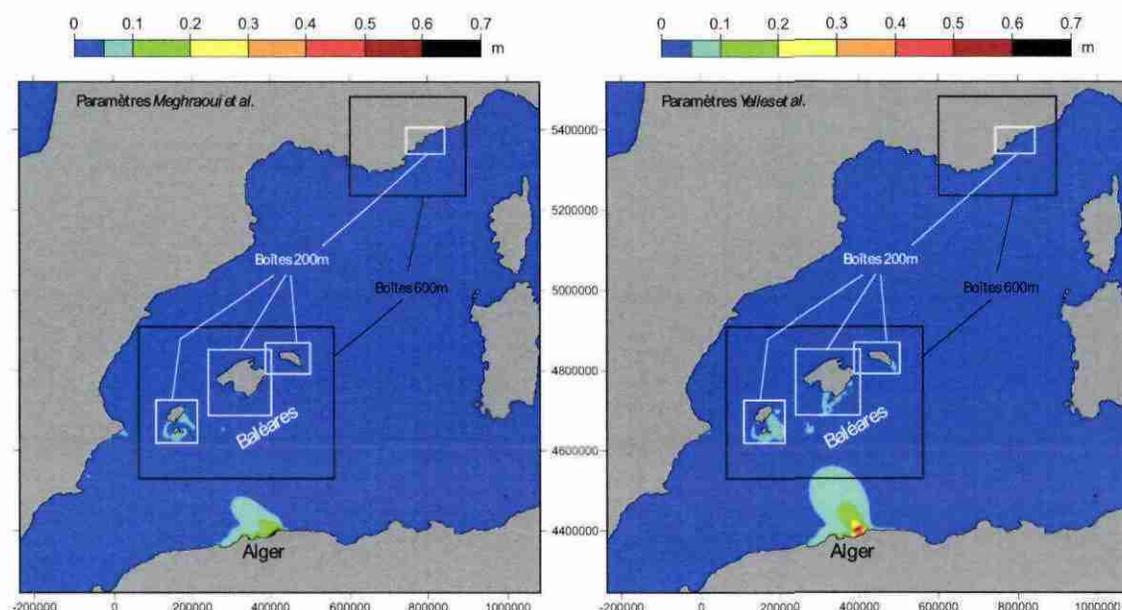


Figure 16 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue au cours des simulations du tsunami de Boumerdès 2003 sur la grille à 1800 m.

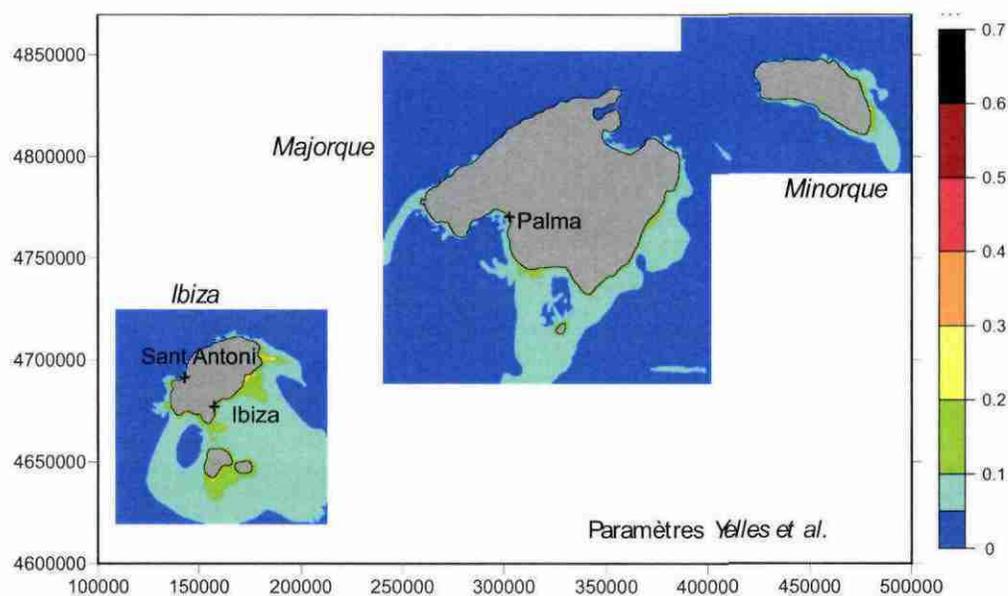


Figure 17 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue au cours des simulations du tsunami de Boumerdès 2003 sur la grille suréchantillonnée à 200 m, aux Baléares.

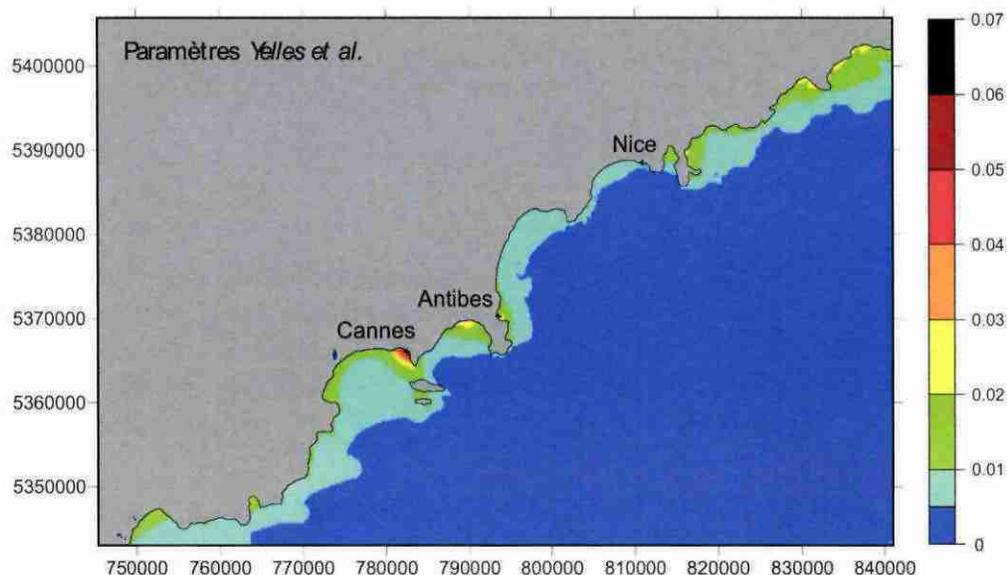


Figure 18 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue au cours des simulations du tsunami de Boumerdès 2003 sur la grille à 200 m, en France.

La comparaison des résultats des simulations aux observations indique que l'ordre de grandeur obtenu pour le tsunami est bon sur la côte algérienne (en temps d'arrivée, en hauteur et en période) et cela pour les deux sources. Aux Baléares, on constate :

- une surestimation systématique du temps d'arrivée des tsunamis et cela pour les deux sources traitées. Le retard maximal étant à Palma (environ 30 minutes)
- une sous-estimation de la hauteur des vagues à Palma et Sant Antoni alors qu'à Ibiza il existe un bon accord entre ces valeurs. Les résultats issus de la source de Meghraoui et al., 2004 sont légèrement supérieurs à Yelles et al. 2004
- des valeurs comparables pour les périodes. L'écart le plus important concerne Palma (30 minutes pour la source de Yelles et al. 2004 au lieu des 20 minutes observés)

Ces différences, en particulier à Palma, peuvent s'expliquer par la basse résolution des données bathymétriques (GEBCO) utilisées dans les baies étudiées. Alasset et al. (2006) arrivent à la même conclusion après avoir étudié l'influence de 5 sources sismiques différentes. La hauteur maximal calculée par ces auteurs à Palma est comparable à la nôtre, respectivement 0.40 m et 0.39 m, et cela quelque soit la source considérée. Un retard important de l'arrivée du tsunami est également signalé sur ce site.

Quant aux côtes françaises, on retrouve l'ordre de grandeur centimétrique des vagues atteignant la côte, indiquées dans les simulations d'Alasset et al. (2006). L'observation à Nice (environ 0.1 m) est un peu plus importante que celle donnée par nos calculs. Sur le reste de la côte française, le tsunami très atténué n'a été observé que dans le seul port de Théoule-sur-mer (baie de Cannes), sans doute à cause d'un effet de site.

### 6.1.2. Séisme de mer Ligure, 1887

Deux sources ont été retenues pour les simulations :

- source 1 : la localisation est issue de SisFrance (<http://www.sisfrance.net>), la géométrie de la faille est établie selon Ferrari (1991), revue par Pelinovsky et al. (2002). Il s'agit d'une faille normale subverticale à pendage nord-nord-ouest
- source 2 : elle reprend les principales caractéristiques de la source 1. Seuls l'azimuth et la longueur (prolongement vers les côtes françaises) de la faille changent

Les calculs s'effectuent sur une grille bathymétrique de résolution 250 m, couvrant la côte franco-italienne de Cannes à Gênes. De plus, un emboîtement centré sur la côte française de résolution 83 m est effectué pour la source 2.

Le tsunami initial pour chacun des deux jeux de paramètres est représenté Figure 19.

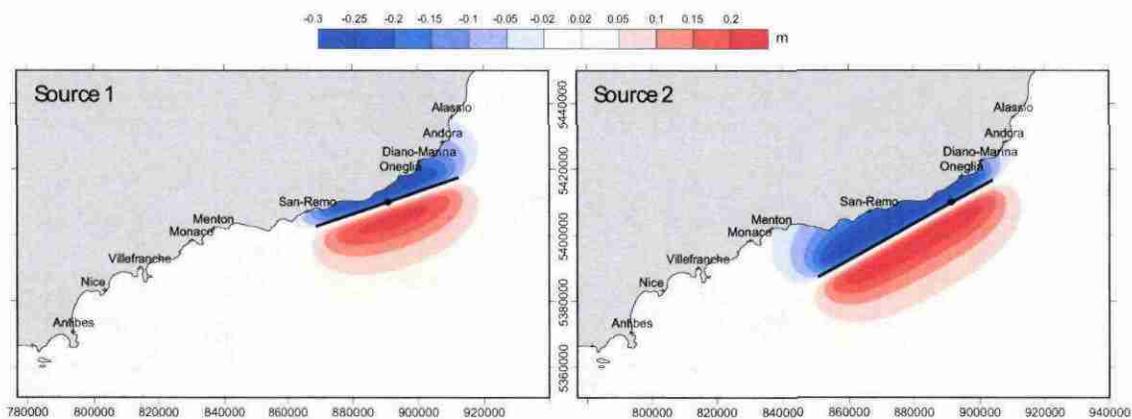


Figure 19 – Cote de la surface libre (en m) obtenue lors du calcul du tsunami initial généré par le séisme du 23 février 1887 en mer Ligure, pour les deux sources testées.

Les élévations maximales du plan d'eau calculées pour ces simulations sont représentées Figure 20 et Figure 21.

Les observations le long de la côte italienne, face à l'épicentre, font état d'une hauteur de retrait et d'inondation de 1 m sur tous les sites répertoriés (Tableau 4). Les amplitudes des creux et des crêtes simulées près du rivage et correspondant à ces observations sont du même ordre de grandeur et cela pour les 2 sources. La différence la plus importante concerne le retrait au niveau d'Oneglia pour la source 2 (-0.3 au lieu de -1 m).

A proximité de la France, les valeurs simulées pour la source 2 sont correctes à Menton et à Monaco, mais restent en-deçà des observations rapportées à Nice et Antibes (Tableau 5). A Nice en particulier, le marégraphe situé dans le port avait enregistré une dépression de -0.5 m, tandis que la simulation donne -0.3 m à l'extrême ouest de la ville.

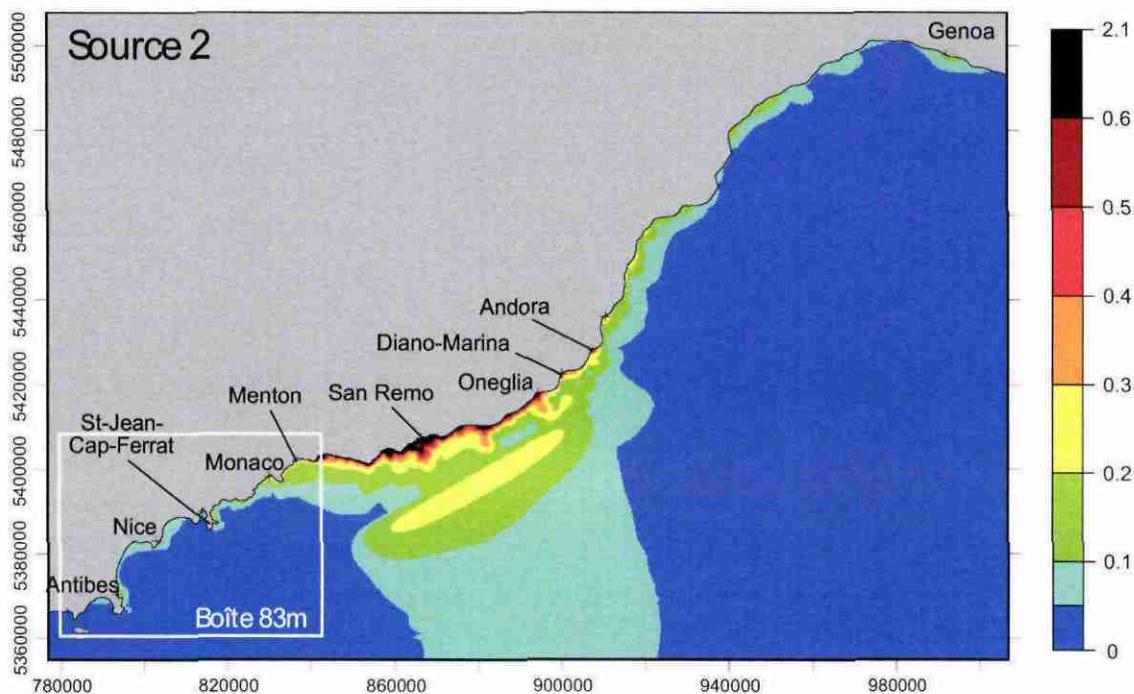


Figure 20 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue au cours des simulations du tsunami de mer Ligure de 1887, sur la grille à 250 m, pour les deux sources testées.

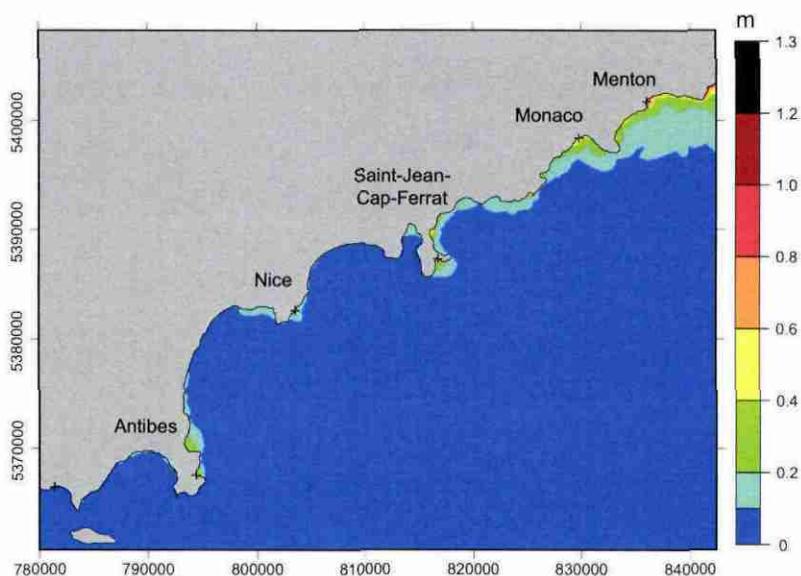


Figure 21 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue au cours de la simulation du tsunami de mer Ligure de 1887, sur la grille à 83 m.

	<b>Observations</b>	<b>Source 1</b>	<b>Source 2</b>
<b>site</b>	$\Delta h$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta h$ (m)
<b>San Remo</b>	-1/+1	[-0.4 – -0.7]/+0.5	-1.3/+1.3
<b>Oneglia</b>	-1/+1	[-0.4 – -0.7]/+1.0	-0.3/+0.9
<b>Diano Marina</b>	-1/+1	-0.8/+1.2	[-0.4 – -0.6]/+0.8
<b>Andora</b>	-1/+1	-0.7/+0.7	-0.7/+0.6

Tableau 4 – Comparaison des amplitudes extrêmes de vague ( $\Delta h$ ) entre les observations extraites de la BD Tsunami (base de données des tsunamis historiques, BRGM-MEDAD, 2008) et les simulations réalisées sur les côtes italiennes (Sources 1 et 2, grille de résolution de 250 m). Les intervalles des valeurs simulées sont indiqués lorsque la variation entre pixels voisins est importante.

	<b>Observations</b>	<b>Source 2</b>
<b>site</b>	$\Delta h$ (m)	$\Delta h$ (m)
<b>Antibes</b>	[-1 – -2]/+1	-0.7/+0.6
<b>Nice</b>	-0.5/+0.55	-0.3/+0.2
<b>Monaco</b>	-0.5/?	-0.6/+0.6
<b>Menton</b>	-0.85/?	-1.1/+1.0

Tableau 5 – Comparaison des amplitudes extrêmes de vague ( $\Delta h$ ) entre les observations extraites de la BD Tsunami (base de données des tsunamis historiques, BRGM-MEDAD, 2008) et la simulation réalisée sur les côtes françaises et à Monaco (Source 2, grille de résolution de 83 m).

### 6.1.3. Effondrement de l'aéroport de Nice, 1979

Il s'agit d'un tsunami provoqué par un glissement de terrain résultant de l'effondrement de l'extension de l'aéroport de Nice, le 16 octobre 1979. Pour les simulations, on pose l'hypothèse que le tsunami a été généré par deux glissements différents qui se sont succédés à 140 s d'intervalle (GIS CURARE, 2006).

La simulation est réalisée sur une grille bathymétrique de résolution 83 m. Le tsunami initial correspondant à ces deux glissements est représenté Figure 22.

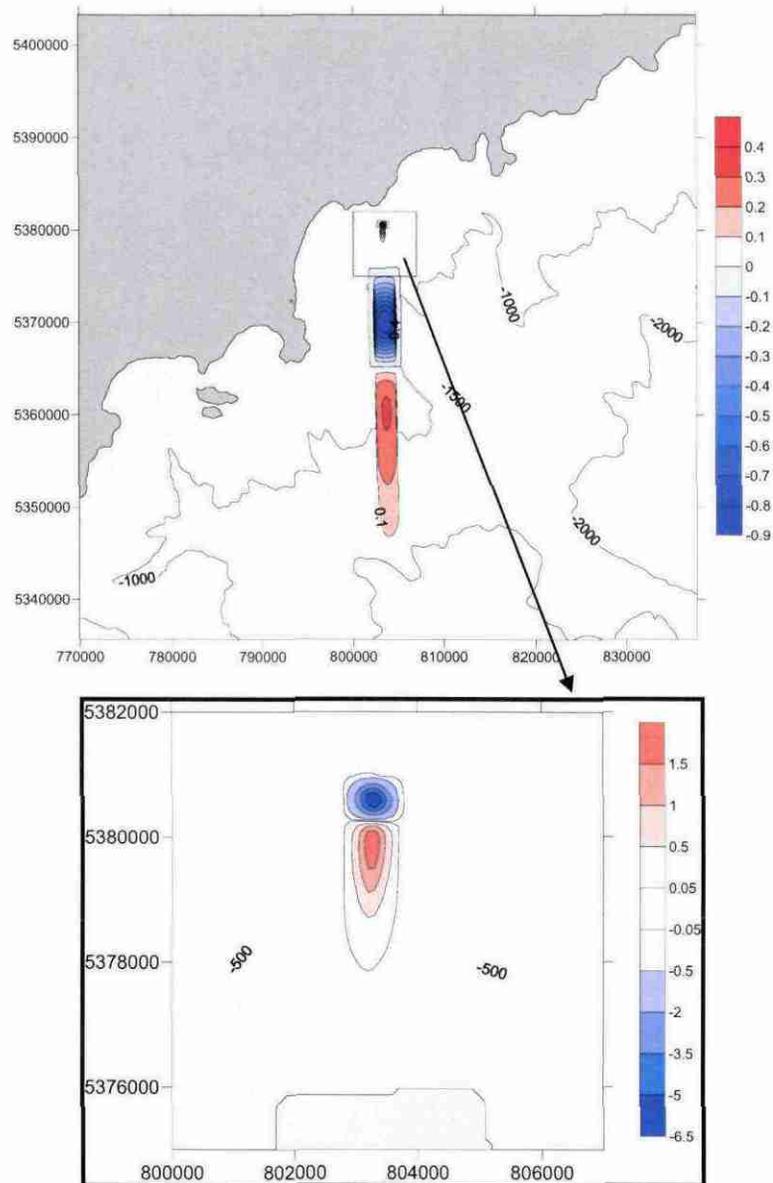


Figure 22 – Cote de la surface libre (en m) obtenue lors du calcul du tsunami Nice Aéroport, 1979 (grille à 83 m).

L'élévation maximale du plan d'eau calculée pour ces simulations est représentée Figure 23. On constate que les valeurs les plus importantes se situent à proximité de l'aéroport de Nice et d'Antibes.

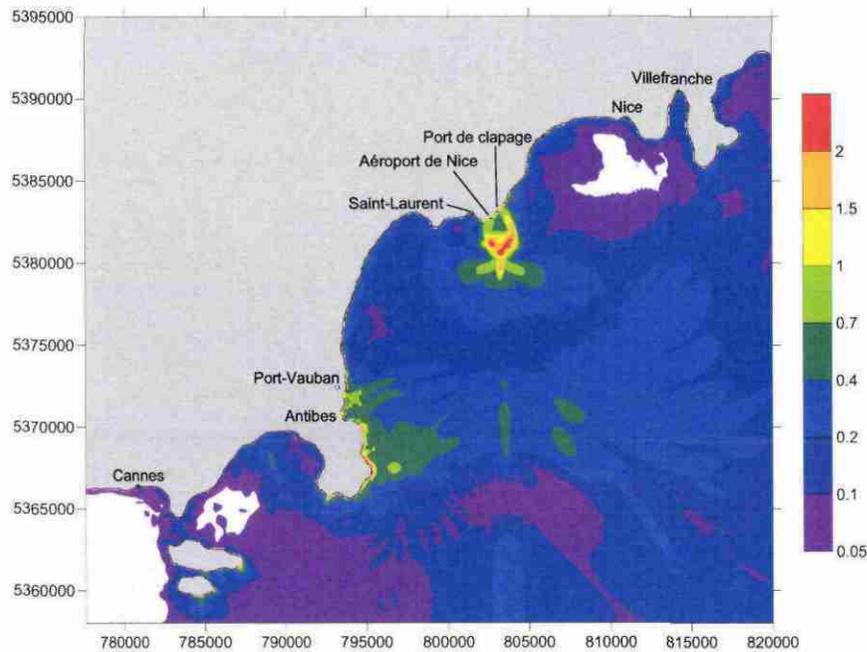


Figure 23 – Elévation maximale du plan d'eau (en m) obtenue pour le tsunami Nice aéroport 1979 (grille à 83 m).

Les différentes caractéristiques des vagues (temps d'arrivée, hauteur crête-à-croix et période), calculées aux sites où le tsunami a été observé, sont reportées dans le Tableau 6 avec les observations rapportées par Assier-Rzadkiewicz et al. (2000) et Tinti et al. (2004).

site	Observations			Simulation		
	$\Delta t$ (min)	$\Delta h$ (m)	$\theta$ (min)	$\Delta t$ (min)	$\Delta h_{max}$ (m)	$\theta$ (min)
<b>Saint-Laurent</b>	1	2-3	3	1	1.5	3.5-5.5
<b>Port de clapage</b>	4	2-3	7	2	2.8	2.5-4.5
<b>Nice</b>	4	1-1.2	8	3-8	1.1	3-4.5
<b>Antibes</b>	8	2.5-3.5	8-9	5-8	1.7	3.5-4
<b>Port-Vauban</b>	7	< 2.5	-	4-7	1.9	2-4
<b>Villefranche</b>	10	1-1.8	8	11	0.9	3-5
<b>Cannes</b>	15	< 1	> 15	12	0.4	5

Tableau 6 – Comparaison des écarts arrivée- $t_0$  ( $\Delta t$ ), hauteurs de vague ( $\Delta h$ ) et périodes ( $\theta$ ) entre les observations reportées par Assier-Rzadkiewicz et al. (2000) et Tinti et al. (2004) et la simulation réalisée dans le cadre de cette étude.

La comparaison des résultats de la simulation aux observations indique que :

- les temps d'arrivée simulés s'accordent aux temps observés ;

- à l'exception de Saint-Laurent où il y a un bon accord, les périodes des vagues simulées sont environ deux fois inférieures aux observations ;
- les retraits de la mer précédant l'arrivée du tsunami observés à Saint-Laurent, à Antibes et à Villefranche sont bien reproduits dans la simulation. A noter toutefois la sous-estimation du creux à Saint-Laurent (0.30 m au lieu de 2 m) ;
- en ce qui concerne les hauteurs crête-à-creux, les résultats sont conformes aux observations sur 5 des 7 sites étudiés. A Saint-Laurent et à Antibes, les valeurs sont sous-estimées.

Ces résultats montrent que, malgré une simplification importante de la dynamique et de l'entraînement du matériel glissé (considération de deux glissements distincts), les principales caractéristiques du tsunami ont été correctement reproduites.

Un meilleur accord serait obtenu, notamment en ce qui concerne les périodes, en améliorant le paramétrage du glissement ou bien en le modélisant.

En outre, comme pour tous les tsunamis locaux, le raffinement de la bathymétrie permettrait d'améliorer les hauteurs de vague simulées.

## **6.2. SIMULATIONS DE SCENARIOS DE TSUNAMIS D'ORIGINE SISMIQUE**

Parmi les trois scénarios retenus, deux se trouvent à proximité des côtes françaises, (séisme maximal de la zone 4, « marge nord ligure » et séisme maximal de la zone 49, « bassin de l'Ampurdan, du Roussillon et zone axiale pyrénéenne ») et un 3<sup>ème</sup> constitue une source lointaine (séisme maximal de la zone 32, « Tell et marge nord algérienne »), Figure 24.

Concernant les simulations de ces événements maximaux, celles-ci ont été réalisées tant sur les valeurs moyennes des paramètres géométriques de la rupture (pm MAX\_moyen) que sur les bornes maximales de ces valeurs (pm MAX\_max). Néanmoins, étant données les précautions déjà prises en ce qui concerne l'estimation du séisme maximal (valeur du SMHV +0,5 degré de magnitude) et si l'on considère les périodes de retour pour ces très forts séismes (au minimum de plusieurs centaines d'années), seules les valeurs des paramètres pm MAX\_moyen sont présentées ici.

### **6.2.1. Scénario de séisme maximal de la zone 04, Marge Nord Ligure (planche 1 ht)**

L'épicentre du séisme de scénario est positionné à 55 km au sud de Nice. La magnitude est estimée à 6,8, avec une profondeur focale de 8 km. Le séisme est associé au jeu normal d'une faille de direction NE-SW et pendage 45°NW (Figure 25).

Les simulations indiquent la possibilité de tsunami au niveau de la côte d'Azur, entre Cannes et Menton. Le temps d'arrivée du tsunami s'échelonne entre 13 et 18 minutes.

C'est au Cap d'Antibes que l'amplitude des crêtes des vagues pourrait être la plus élevée (plus de 3 m d'après la simulation).

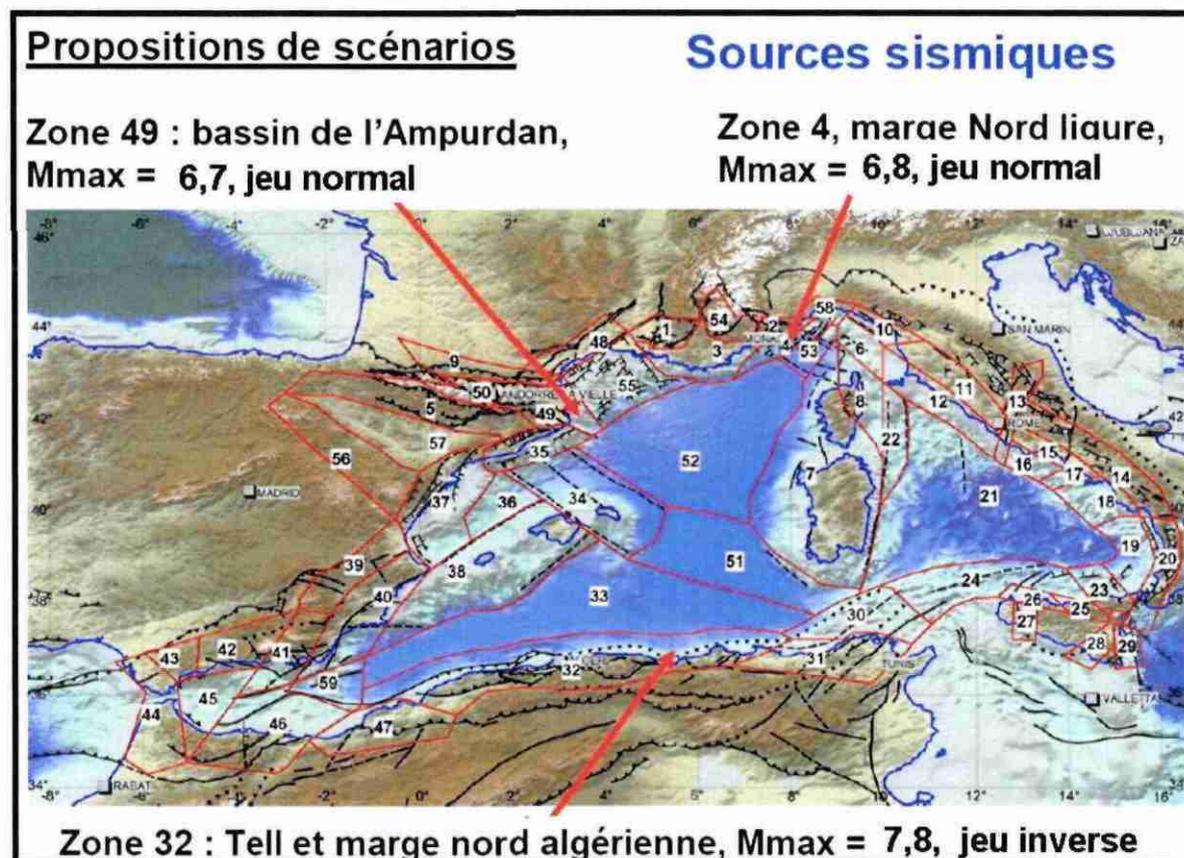


Figure 24 - Choix des scénarios de sources sismiques

### 6.2.2. Scénario de séisme maximal de la zone 32, Tell et marge Nord Algérienne (planche 2 ht)

L'épicentre du séisme de scénario est positionné à près de 25 km au large de la côte de Constantine en Algérie. La magnitude est estimée à 7,8, avec une profondeur focale de 11 km. Le séisme est associé au jeu inverse d'une faille de direction ENE-WSW et pendage 45°S (Figure 26).

Les simulations indiquent la possibilité de tsunami au niveau de la côte d'Azur, entre Marseille et Menton, avec un temps d'arrivée de la vague principale d'environ 1h 30'.

Des vagues supérieures à 4 m d'amplitude sont possibles en plusieurs secteurs du littoral, notamment à La Ciotat, Saint-Tropez, Cannes et Nice.

### **6.2.3. Scénario de séisme maximal de la zone 49, Bassin de l’Ampurdan (planche 3 ht)**

L'épicentre du séisme de scénario est positionné à environ 100 km au sud-sud-est de Perpignan. La magnitude est estimée à 6,7, avec une profondeur focale de 10 km. Le séisme est associée à une faille à jeu normal de direction NW-SE et pendage 60°NE (Figure 27).

L'amplitude des vagues reste relativement faible, son maximum étant entre 0,5 et 1 m à Port-La Nouvelle. Les simulations indiquent la lente vitesse de propagation de l'onde sur le golfe du Lion. Le tsunami n'atteint Port-La-Nouvelle que 70 minutes après le début du séisme.







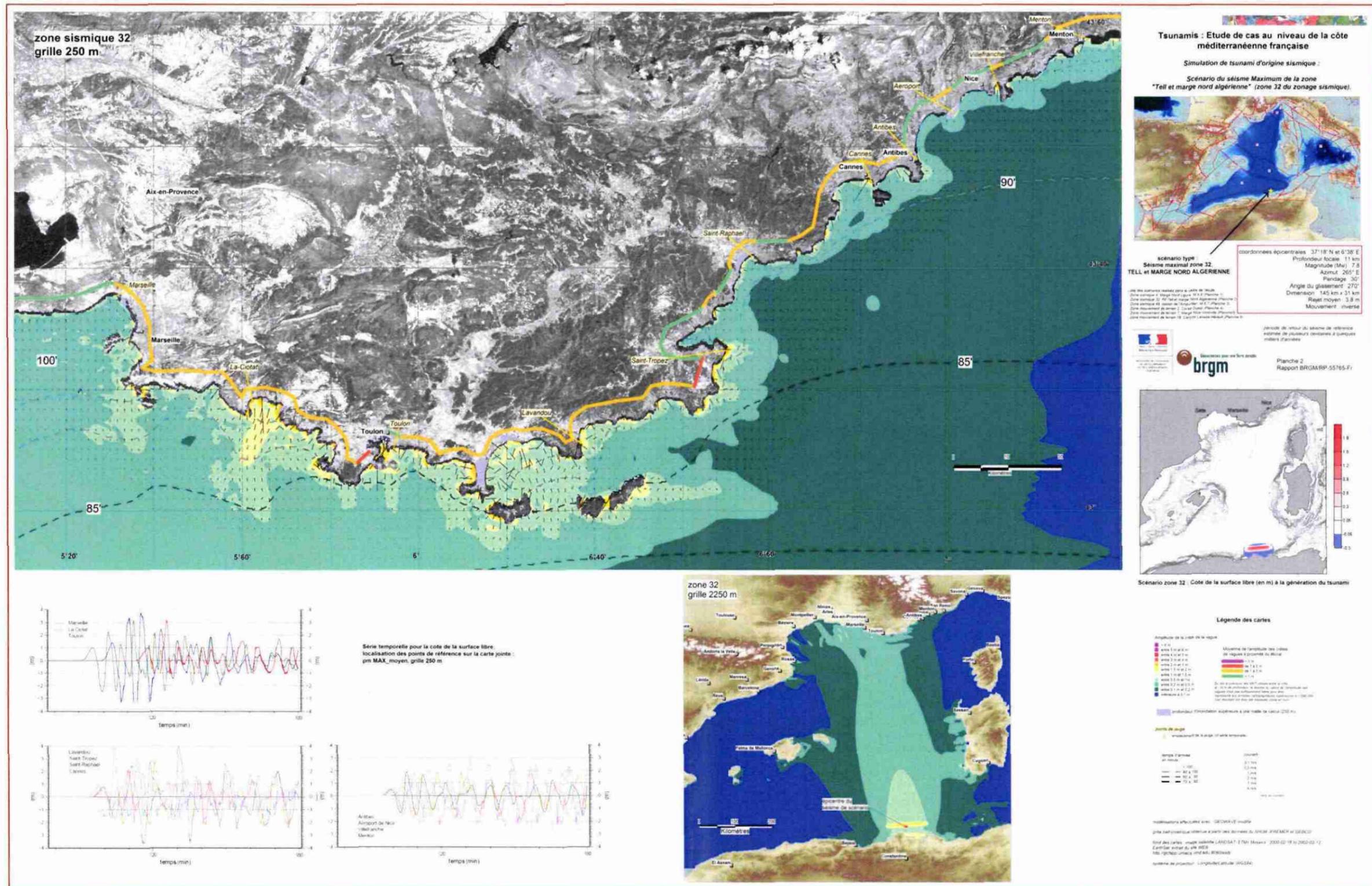


Figure 26 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 32, "Tell et marge Nord Algérienne" (réduction de la planche 2 h.t.)



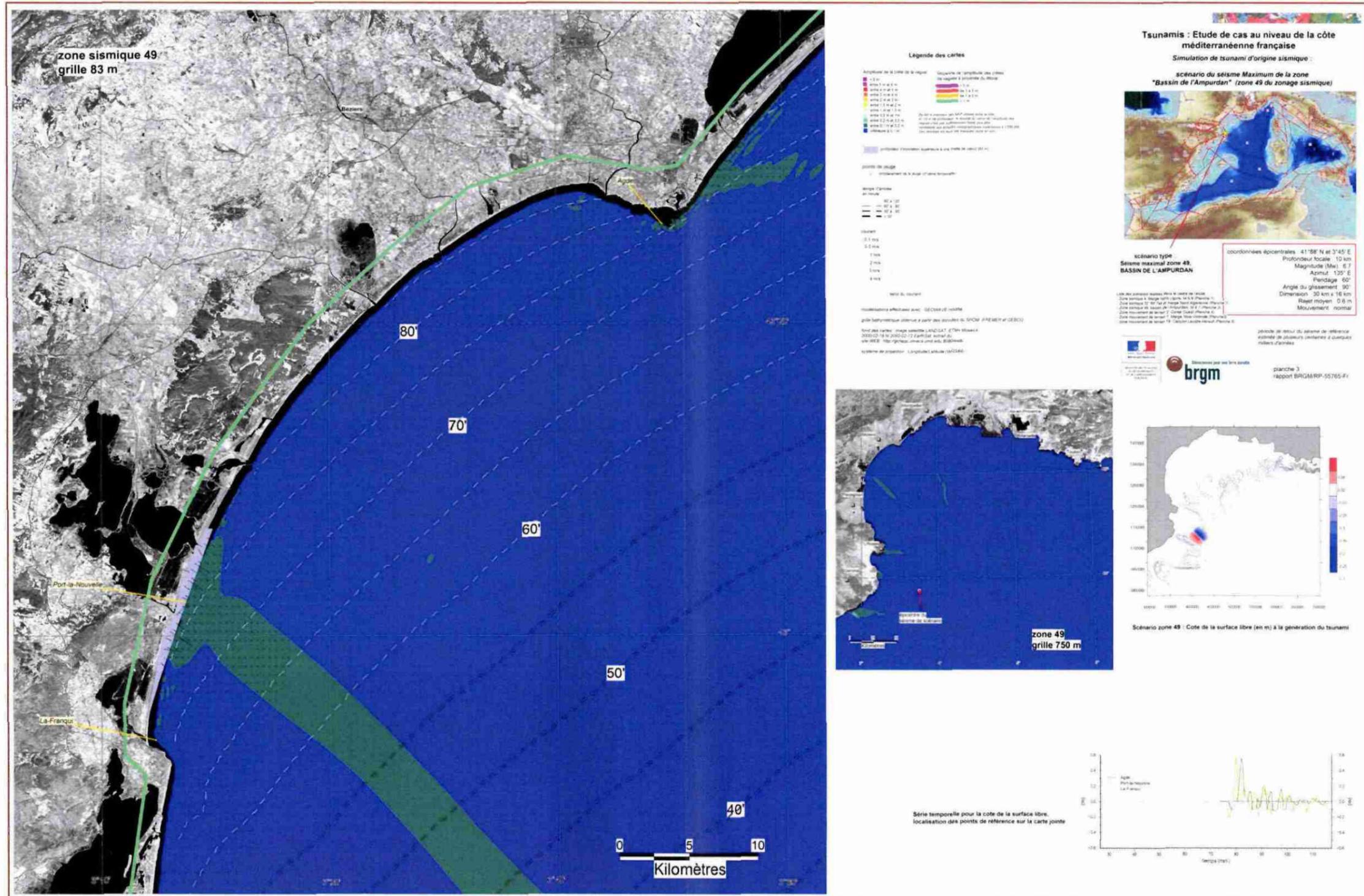


Figure 27 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 49, "Bassin l'Ampurdan" (réduction de la planche 3 h.t.)



### 6.3. SIMULATIONS DES SOURCES MOUVEMENTS DE TERRAIN

A partir du zonage mouvements de terrain sous-marins, 20 scénarios ont été simulés avec des grilles MNT à grosses mailles (750 m). Puis sur la base de ces résultats, des simulations plus précises ont été réalisées (Tableau 7). Les calculs sont décrits dans le rapport Pedreros et Poisson (2007). In fine trois scénarios jugés a priori les plus catastrophiques pour la côte française ont été retenus (Figure 28).

Pour ce qui concerne les mouvements de type G\_MOD (glissement de taille moyenne, de période de retour a priori de plusieurs centaines à quelques milliers d'années), les plus pénalisants sont ceux des zones 02 (Corse W) et 18 (canyon de Lacaze-Hérault), dans lesquelles des vagues supérieures à 1 m d'amplitude paraissent possibles.

En raison du nombre relativement élevé (une dizaine) de glissements de type G\_MAX localisés en zone 07, « Nice-Vintimille », et des résultats obtenus lors de la simulation à mailles 750 m, celui-ci a lui-aussi été retenu comme scénario catastrophique majeur plausible.

#### Choix des scénarios mouvements de terrain :

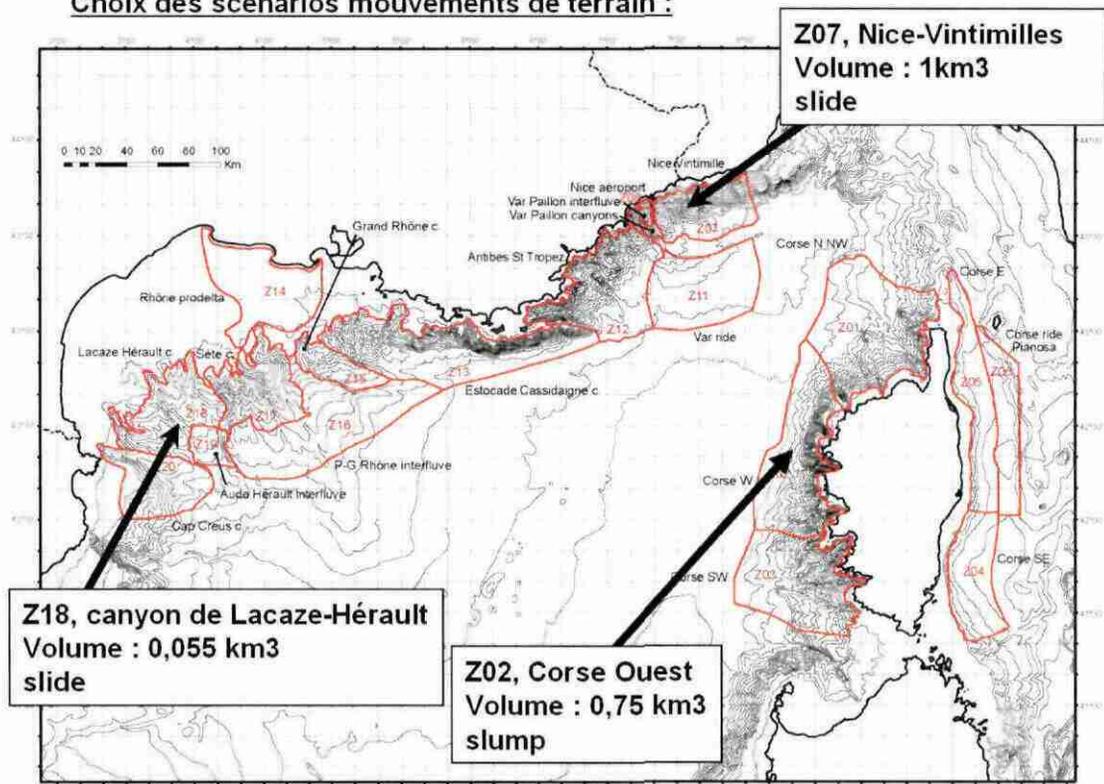


Figure 28 – Choix des scénarios de sources mouvements de terrain sous marins

<b>n° ZONE</b>	<b>NOM</b>		<b>Grille 750 m</b>	<b>Grille 250 m</b>	<b>Grille 83 m</b>
<b>Z01</b>	<b>Corse NNW</b>	MAX	simulation	simulation	
<b>Z02</b>	<b>Corse W</b>	MAX	simulation	simulation	
		MOD	simulation	simulation	simulation
<b>Z03</b>	<b>Corse SW</b>	MAX	simulation	simulation	
<b>Z05</b>	<b>Corse E</b>	MAX	simulation	simulation	
<b>Z06</b>	<b>Corse - ride Pianosa</b>	MAX	simulation	simulation	
		MOD	simulation		
<b>Z07</b>	<b>Nice - Vintimille</b>	MAX	simulation	simulation	
<b>Z08</b>	<b>Nice-aéroport</b>	MOD			simulation
<b>Z11</b>	<b>Ride du Var</b>	MAX	simulation		
<b>Z12</b>	<b>Antibes - St Tropez</b>	MAX	simulation	simulation	
<b>Z13</b>	<b>Canyon d'Estocade- Cassidaigne</b>	MAX	simulation	simulation	
<b>Z15</b>	<b>Canyon du Grand Rhône</b>	MAX	simulation		
<b>Z16</b>	<b>P-G Rhône interfluve</b>	MAX	simulation		
<b>Z17</b>	<b>Canyon de Sète</b>	MAX	simulation		
<b>Z18</b>	<b>canyon de Lacaze -Hérault</b>	MAX	simulation	simulation	
		MOD		simulation	simulation
<b>Z19</b>	<b>interfluve Aude -Hérault</b>	MAX	simulation		
		MOD	simulation		
<b>Z20</b>	<b>canyon du Cap Creus</b>	MAX	simulation		

Tableau 7 - Sources mouvements de terrain sous-marins : Liste des simulations réalisées

### **6.3.1. Scénario de glissement G\_MOD de la zone 02, Corse Ouest (planche 4 ht)**

Le glissement est positionné à environ 20 km au Nord-Ouest de Porto (Figure 29). Il déstabiliserait un volume de 0,75 km<sup>3</sup>.

Les isochrones de l'arrivée du tsunami ne sont pas représentées sur la planche hors texte 4, car, à proximité du littoral, ces courbes deviennent très irrégulières du fait du découpage très important de la côte. Il faut donc se référer aux séries temporelles pour apprécier le temps moyen d'arrivée. Celles-ci indiquent que les premiers effets du tsunami se font sentir sur la Corse au bout de 6 minutes en moyenne.

Il y a une convergence préférentielle des vagues sur les secteurs de l'Anse d'Alusi au nord et de l'île de Gargali au sud. Les amplitudes des crêtes des vagues au rivage dépassent alors les 5 m. Des valeurs importantes de 3 à 4 m peuvent être également observées à Port Agro, Baie de Focolara, Cala di Palu et Capu Frassetu. Cela est dû à des effets locaux (interactions entre les ondes incidentes et la morphologie locale).

En plusieurs points du littoral exposé, on peut distinguer jusqu'à 8 vagues principales, mais il n'y a pas de règle pour déterminer la vague la plus violente. Celle-ci peut être la 1ère (Baie d'Elbo), la 2ème (Baie de Focolara), voire la 6ème comme à Cala de Lignaghia.

### **6.3.2. Scénario de glissement G\_MAX de la zone 07, Nice-Vintimille (planche 5 ht)**

Le glissement est positionné à environ 25 km au sud-est du littoral niçois (Figure 31). Il déstabiliserait un volume de 1 km<sup>3</sup>.

On remarque que le tsunami affecte environ 170 km du linéaire côtier s'étendant depuis St-Tropez au SW et Bordighera (Italie) au NE. Sur les secteurs les plus exposés, les hauteurs maximales du plan d'eau près du rivage peuvent atteindre plus de 3 m (Cap Gros, Nice-Aéroport, Pointe de Cabbé). Sur les autres zones les valeurs sont en général inférieures à 1,5 m.

Les séries temporelles de l'évolution de la hauteur du plan d'eau indiquent que les premiers effets du tsunami se font sentir au bout de 10 minutes. Cela se manifeste par un abaissement du niveau de la mer allant jusqu'à 2 m pendant 2 minutes (Nice-Aéroport par exemple). A cela se succèdent 6 à 8 vagues principales dont les plus importantes atteignent des hauteurs crête-à-creux de 8 m (Cap Gros). En fonction des sites c'est la 1ère ou la 2ème vague la plus violente. On constate la décroissance des hauteurs des vagues sur l'ensemble des sites 30 minutes après le début du glissement.

### **6.3.3. Scénario de glissement G\_MOD de la zone 018, canyon Lacaze-Hérault (planche 6 ht)**

Le glissement est positionné à environ 50 km à l'est du littoral de Perpignan, au niveau du canyon sous-marin Lacaze-Hérault (Figure 30). Il déstabiliserait un volume de 0,055 km<sup>3</sup>.

Les secteurs les plus exposés seraient :

- Le littoral de Sainte-Marie à Perpignan, où des vagues de près de 2 m d'amplitude peuvent arriver jusqu'au littoral,
- Le littoral de Frontignan, (au sud de Montpellier) serait lui-aussi touché, notamment en raison de son altitude peu élevée.

Le tsunami généré pourrait par ailleurs se propager jusqu'au littoral camarguais, car les simulations indiquent la possibilité de vagues de plus de 50 cm au niveau de la plage de Beauduc – La Capelude dans les Bouches-du-Rhône.

Les séries temporelles de l'évolution de la hauteur du plan d'eau indiquent, que pour le secteur compris entre les sites de St-Cyprien et Agde, les premiers effets du tsunami se traduisent par un abaissement du niveau de la mer (jusqu'à 0.6 m) pendant 2 minutes. A l'est de cette zone, les premiers effets correspondent à l'arrivée d'une 1ère vague de faible amplitude (inférieure à 0.3 m) sur une durée de 2 minutes. On distingue jusqu'à 6 vagues. Les plus importantes atteignent des hauteurs crête-à-creux de 2.7 m (Sainte-Marie-Plage). La vague la plus violente peut être la 1ère, la 2ème ou la 3ème en fonction du site.

Le tsunami se manifeste sur chacun des sites sur une durée de l'ordre de 15 minutes.

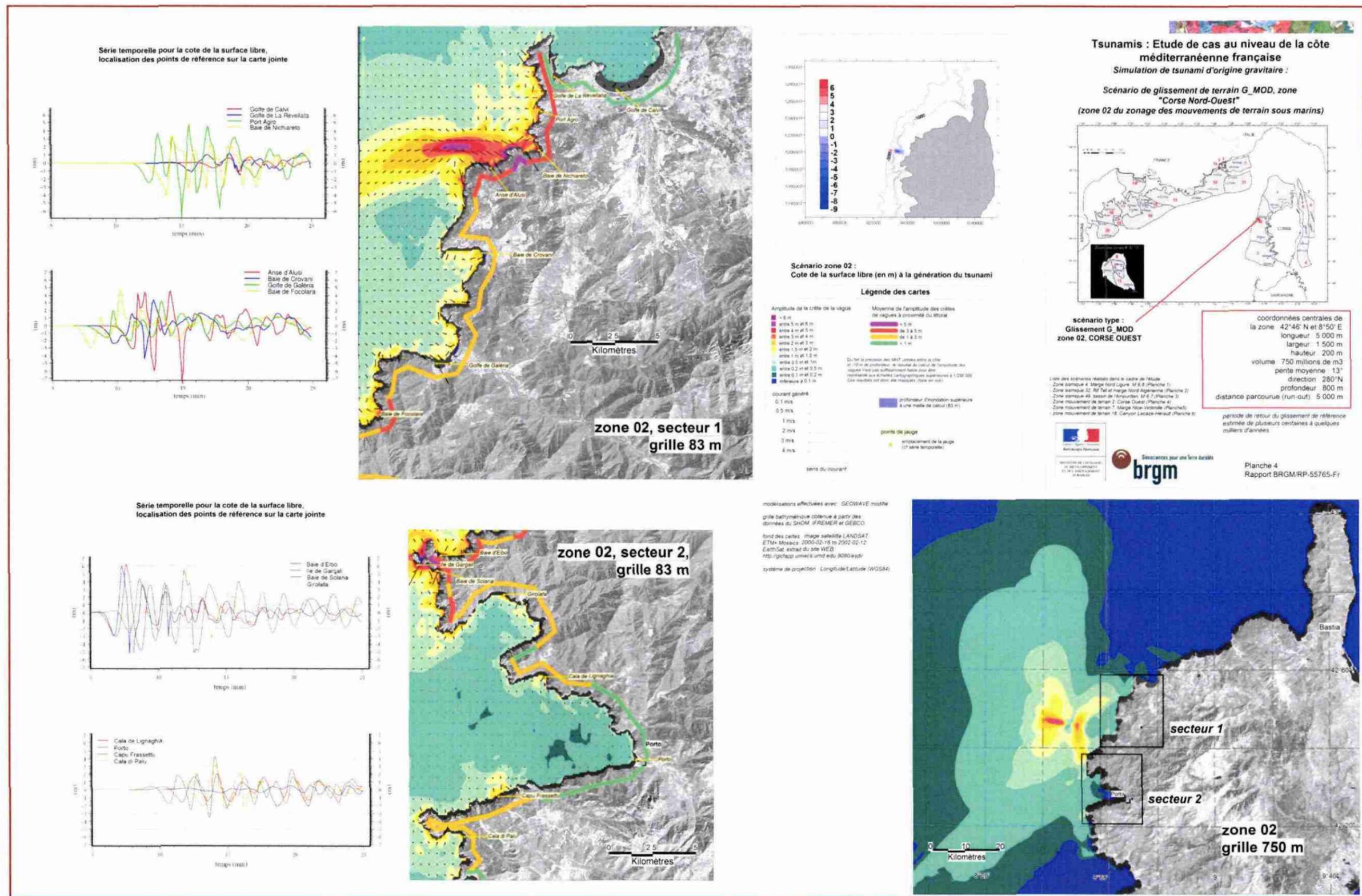


Figure 29 - Résultat de la simulation du scénario de glissement de type G\_Mod en zone 02, « Corse Ouest » (réduction de la planche 4 h.t.)



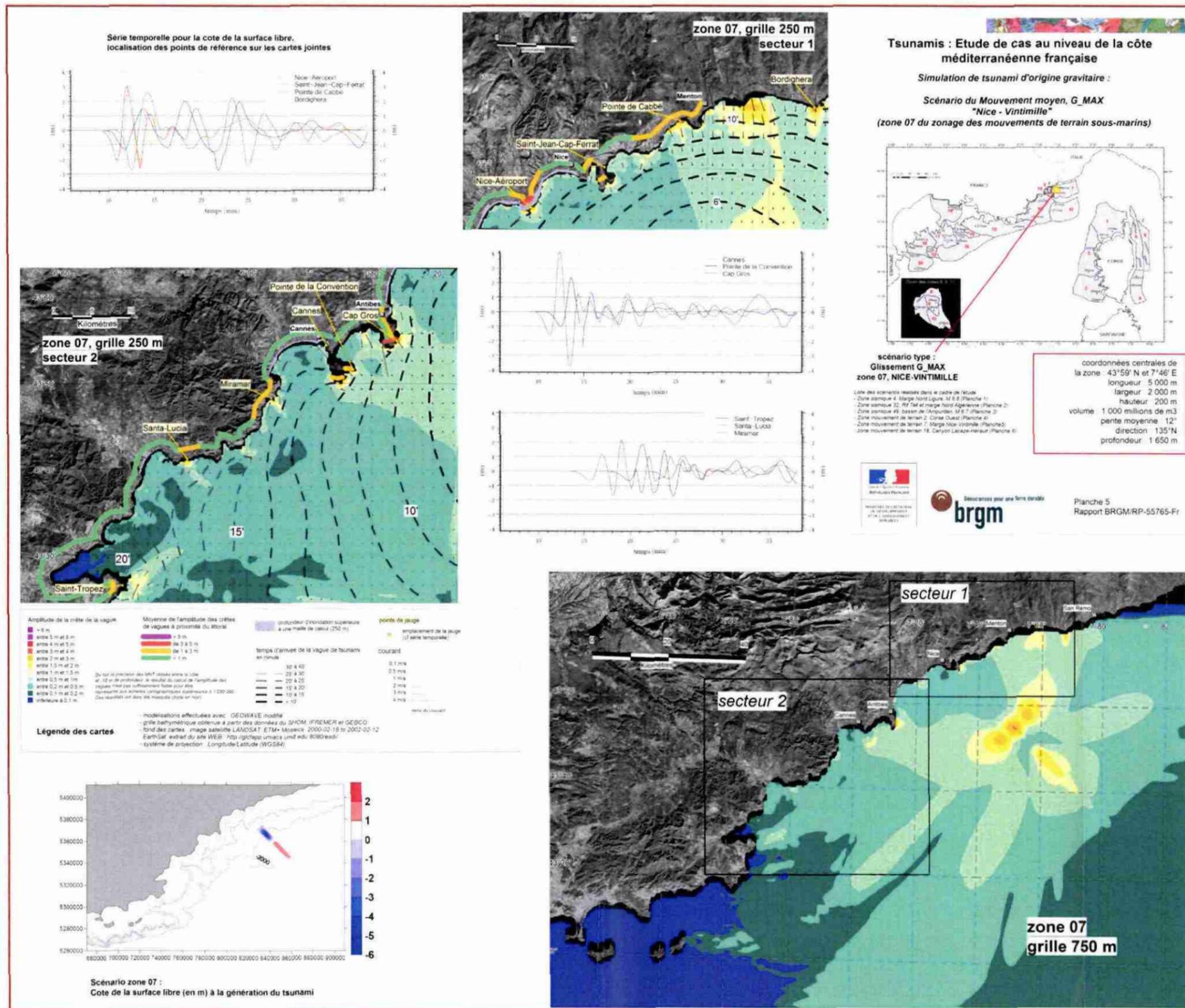


Figure 30 - Résultat de la simulation du scénario de glissement de type G\_Max en zone 07, « Nice-Vintimille » (réduction de la planche 5 h.t.)



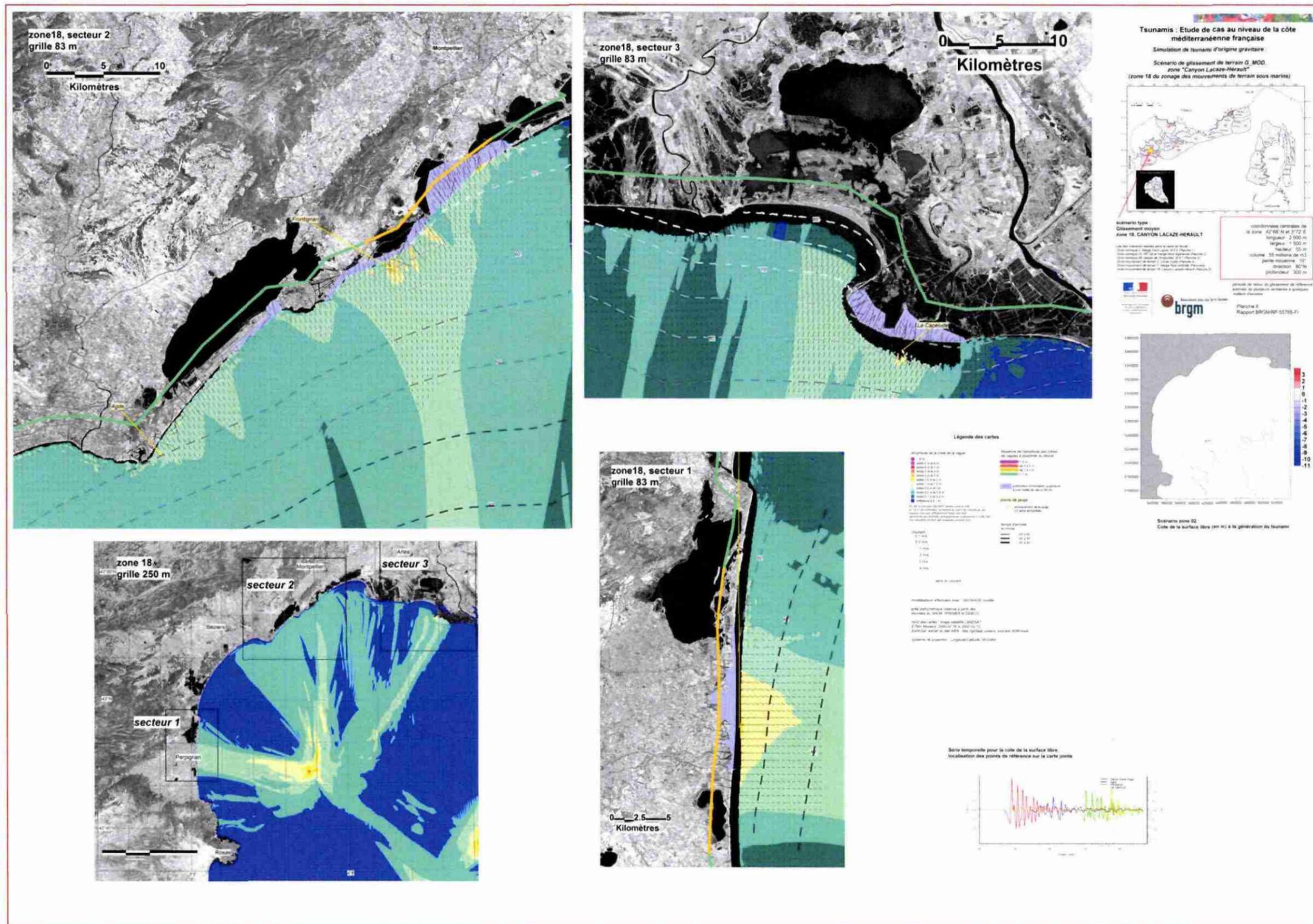


Figure 31 - Résultat de la simulation du scénario de glissement de type G\_Mod en zone 18 « Canyon Lacaze-Hérault » (réduction de la planche 6 h.t.)



## 7. Conclusion

### 7.1. LES RESULTATS

#### 7.1.1. Identification des sources tsunamigéniques

- Dans le cadre de cette étude, un zonage sismique couvrant l'ensemble de la Méditerranée occidentale a été réalisé. Ce zonage a donné lieu à une caractérisation de chacune des zones selon une démarche de type déterministe. Les séismes de référence représentent donc des valeurs maximales susceptibles d'être atteintes et ce, pour des périodes de retour vraisemblablement de plusieurs siècles à quelques milliers d'années.

Ce zonage a servi non seulement de référence pour le choix des scénarios de tsunami, mais, étant donnée l'étendue du domaine concerné, il pourra aussi servir de support à d'autres études de risque sismique ou tsunamis, relatives au bassin méditerranéen occidental.

S'agissant des tsunamis induits par des sources lointaines, étant donnée la forte magnitude des séismes relatifs à la zone sismique « marge nord algérienne » (zone 32), des simulations de séismes de magnitude plus faible, mais de probabilité de survenance plus grande, permettrait une meilleure évaluation de l'aléa tsunami en termes de probabilité de survenance/intensité du phénomène.

Concernant les sources sismiques proches du littoral français, les simulations indiquent des tsunamis moins intenses que ceux qui seraient induits par des séismes lointains. Néanmoins, en cas de survenance de séismes de magnitude relativement élevée et situés sur ou à proximité du littoral français, la sollicitation sismique pourrait déclencher de nombreux et/ou volumineux glissements de terrain sous marins, lesquels pourraient induire à leur tour des tsunamis locaux.

- Grâce aux résultats acquis ces dernières années par l'IFREMER dans le cadre de la recherche sur les mouvements gravitaires sous-marins du plateau et du talus continental du golfe du Lion et de la mer Ligure, un zonage de glissements sous marins a pu être spécifiquement réalisé dans le cadre de ce projet. Chaque zone individualisée est caractérisée par un glissement avec une fréquence d'apparition de un événement par période de l'ordre de quelques centaines à quelques milliers d'années, et, selon le cas, par un glissement plus exceptionnel, qualifié de rare, et dont la survenance est vraisemblablement liée à des conditions climatiques particulières (périodes glaciaires ou interglaciaires du Quaternaire). Si les premiers types de glissements sont généralement estimés sur la base de critères assez fiables, les seconds sont généralement beaucoup plus approximatifs.

Le zonage réalisé doit être considéré comme une première identification des sources gravitaires tsunamigéniques, à partir de laquelle des études plus ciblées vis-à-vis de la localisation des zones sous-marines instables et de leur caractérisation (en termes de zone de départ/propagation/accumulation, direction, géométrie de la masse en mouvement, vitesse, densité des matériaux déstabilisés, probabilité de survenance) pourraient être retenues.

### 7.1.2. Les simulations des tsunamis

- Cinq évènements d'origine sismique (2 cas historiques et 3 scénarios) ont été simulés. Ces simulations indiquent une amplitude des vagues de tsunami la plus élevée pour ce qui concerne les séismes lointains produits au large du Maghreb, amplitude supérieure à 3 m en plusieurs points du littoral Provence-Alpes-Côte d'Azur, avec un temps d'arrivée d'environ 1h30' après le séisme. Néanmoins, un séisme proche localisé au large de la côte d'Azur pourrait lui-aussi produire localement des vagues de plus de 2 m à proximité du littoral, et ce avec un temps d'arrivée de moins de 15'.

- Vingt cas de mouvements gravitaires sous-marins (dont 1 cas historique) ont été préalablement testés sur leur capacité à générer des tsunamis. Parmi ceux-ci, trois ont été retenus pour des simulations plus précises et ce en fonction de leur probabilité d'occurrence et de leur impact potentiel sur les côtes.

Les simulations indiquent la possibilité de vagues de plusieurs mètres dans des secteurs ponctuels de la côte (quelques centaines de mètres et exceptionnellement quelques kilomètres de linéaire côtier). Ainsi, outre le littoral de la Côte d'Azur déjà réputé pour son exposition au risque tsunami, les simulations montrent que certaines parties du golfe du Lion soumises à des instabilités sous-marines très volumineuses (1 km<sup>3</sup> en moyenne), pourraient créer des tsunamis avec, localement, des amplitudes de vagues de plusieurs mètres.

On souligne néanmoins que les caractéristiques du glissement (localisation, géométrie) à la génération du tsunami influent grandement sur les résultats des simulations près du rivage. Aussi, comme il est indiqué plus haut, il serait nécessaire d'améliorer l'état de nos connaissances sur les mouvements sous-marins au large de la côte française, notamment dans les zones tsunamigéniques les plus critiques (au large de la Côte d'Azur, et des côtes perpignanaises).

- Les tests de validité des résultats des simulations indiquent que les informations sur les tsunamis modélisés sont correctes au large de la côte jusqu'à une profondeur d'environ 10m. Pour disposer d'une information au niveau de la frange côtière entre en moyenne – 10 m et + 10 m d'altitude, il serait indispensable de disposer d'un modèle de terrain beaucoup plus fin notamment pour apprécier l'étendue des zones potentiellement inondables et l'intensité de l'inondation.

- Avec les réserves énoncées précédemment, quant à la question posée au lancement de l'étude : la côte méditerranéenne française peut-elle être touchée par un tsunami ? Les résultats des simulations montrent incontestablement que de tels phénomènes

peuvent avoir lieu sur le littoral des régions Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte d'Azur ou Corse.

On rappelle néanmoins que ces indications reposent sur la base de scénarios de période de retour supérieure à quelques centaines d'années, voire milliers d'années. Il serait utile de réaliser une étude probabiliste plus précise tenant compte à la fois des diverses sources tsunamigéniques, et, pour ce qui concerne la sismicité, de leur effet indirect (mouvement de terrain sous-marin déclenché par une sollicitation sismique).

## 7.2. LES PERSPECTIVES

- La présente étude a concerné quelques cas événementiels considérés a priori parmi les plus forts possibles en termes de tsunami sur la côte méditerranéenne française. Hormis le fait que d'autres événements majeurs demeurent possibles, il est nécessaire de disposer d'une meilleure connaissance sur les paramètres de base des sources tsunamigéniques qu'elles soient d'origine gravitaire et sismique (position, géométrie du mouvement, magnitude, volumes sédimentaires, probabilité d'occurrence, ...) et des éventuels effets cascades (séisme de faible magnitude provoquant un glissement de terrain de grande ampleur par exemple).

- Dans un second temps, parmi les secteurs les plus exposés aux tsunamis et où les enjeux sont élevés, des études plus détaillées de l'aléa tsunami pourraient être conduites.

La précision à apporter à l'aléa concerne en particulier la phase d'inondation des tsunamis. Cela passe par des calculs sur des grilles de haute résolution spatiale à proximité du rivage (zone comprise entre -10 m et +10 m) : maillages de 20 mx20 m voire 10 mx10 m avec une erreur décimétrique en z.

Ce type de couverture altimétrique est aujourd'hui quasi inexistant en France. Néanmoins, des initiatives récentes visent à combler cette lacune. C'est le cas de la région Languedoc-Roussillon qui vient de débiter des campagnes Lidar (**light detection and ranging**) sur ses côtes et du projet Litto3D ([http://www.shom.fr/fr\\_page/fr\\_act\\_Litto3D/index\\_litto3D.htm](http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_Litto3D/index_litto3D.htm)). Le projet Litto3D associe le SHOM et l'IGN. Il a pour but de créer un référentiel Terre-Mer unique avec des produits de haute précision spatiale. Pour l'instant Litto3D est en phase de démonstration. Il existe un démonstrateur pour le Golfe du Morbihan et un autre est prévu prochainement sur le secteur de Toulon.

Il conviendrait donc de se rapprocher de ces initiatives pour définir les zones devant être levées en priorité et pour mutualiser les efforts financiers des acquisitions.

Outre ces acquisitions de précision, il est indispensable de combler les lacunes identifiées dans le paragraphe 5.1 (notamment au large de la Ciotat et au niveau de la Rade d'Hyères).

- L'amélioration de la modélisation des tsunamis passe également par une meilleure caractérisation des sources tsunamigéniques qu'elles soient d'origine gravitaire et

sismique (position, géométrie du mouvement, magnitude, volumes sédimentaires, probabilité d'occurrence, ...) et des éventuels effets cascades (séisme de faible magnitude provoquant un glissement de terrain de grande ampleur).

- D'un point de vue de la modélisation, des efforts doivent être faits sur :
  - la phase de génération sismique et mouvement de terrain : les méthodes actuelles sont trop simplistes ou basées sur des formules empiriques couvrant un nombre limité de cas ;
  - phase d'inondation : des recherches récentes permettent d'améliorer les traitements du déferlement et des surfaces couvrantes/découvrantes. Il faudrait aussi implanter un module de prise en compte d'obstacles afin d'intégrer dans les calculs l'influence des infrastructures côtières (bâti, routes, ouvrages d'art, ...).
- Par ailleurs des études sur la vulnérabilité (bâti, réseaux, ..) peuvent être menées en complément à ces études sur l'aléa afin de déterminer le risque lié aux tsunamis. En ce sens, les récents travaux du BRGM (Garcin et al. 2007) sur le site de Galle au Sri Lanka suite au tsunami du 26 décembre 2004 constituent une première avancée.

## Références bibliographiques citées dans ce rapport

- ALASSET, P.; HEBERT, H.; MAOUCHE, S.; CALBINI, V. & MEGHRAOUI, M. (2006). The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake ( $M$  (sub w) = 6.9, Algeria); modelling and results. *Geophysical Journal International* 166(1), 213-226.
- 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.
- BRGM-MEDAD (2008). Base de données sur les tsunamis historiques en France. <http://www.tsunamis.fr>.
- CATTANEO A. (2007) – Etude préliminaire de l'aléa tsunamis en Méditerranée occidentale - Zonage des mouvements de terrain sous-marins sur le plateau et talus continental au large des côtes françaises. Rapport final IFREMER, 66p, 2 ann.
- CHARDON D., HERMITTE D., NGUYEN F. et BELLIER O. (2005) – First paleoseismological constraints on the strongest earthquake in France (Provence) in the twentieth century. *Geology*, nov. 2005, v.33, n°11, 901-904.
- COLAS B., SEDAN O. (2003) - Cartographie départementale de l'aléa mouvement de terrain. Département de la Corse du Sud (2A). Rapport final.
- DURAND E. (2006) - Modélisation des tsunamis provoqués par les glissements de terrain - Comparaison de 2 modèles basés sur les équations de Boussinesq étendues COULWAVE et GEOWAVE. Rapport de stage BRGM, Ecole INSA.
- FERRARI, G. (1991). The 1887 Ligurian earthquake: a detailed study from contemporary scientific observations. *Tectonophysics*, 193 (1-3), 131-139.
- FLETA, J.; SANTANACH, P.; GOULA, X.; MARTÍNEZ, P.; GRELLET, B.; MASANA, E. (2001) Preliminary geological, geomorphologic and geophysical studies for the paleoseismological analysis of the Amer fault (NE Spain). *Geol. Mijnbouw/Netherlands J. Geosciences* 80, p. 201-211
- GARCIN M., B. PRAME, N. ATTANAYAKE, U. DE SILVA, J.F. DESPRATS, S. FERNANDO, M. FONTAINE, N.LENOTRE, R. PEDREROS, C.H.E.R. SIRIWARDANA (2007) – A Geographic Information System for Coastal Hazards - Application in a pilot site in Sri Lanka (Final Report). BRGM Open file BRGM/RP-55553-FR
- 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
- HAMDACHE M. (1998) – Seismic Hazard Assessment for the Main Seismogenic Zones in North Algeria. *Pure appl. Geophys.* 152, 281-314

MARÇOT N., COLAS B., TERRIER M. (2007) - Etude préliminaire de l'aléa tsunami en Méditerranée occidentale - Mouvements de terrain côtiers de grande ampleur- Rapport intermédiaire, Rapport BRGM/RP- 55356 –Fr, 37p,, 10 fig.

MARÇOT N., MATHON CH. (2003) – Prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire en Provence – Alpes – Côte d'Azur. Année 1 : Bilan des connaissances, définition des instabilités et qualification de l'aléa. Rapport BRGM/RP-52829-FR

MCADOO, B.G., PRATSON, L.F., ORANGE, D.L. (2000) - Submarine landslide geomorphology, US continental slope. *Marine Geology* 169, 103-136.

MEGHRAOUI, M.; MAOUCHE, S.; CHEMAA, B.; CAKIR, Z.; AODIA, A.; HARBI, A.; ALASSET, P.J.; AYADI, A.; BOUHADAD, Y. & BENHAMOUDA, F. (2004). Coastal uplift and thrust faulting associated with the M (sub w) = 6.8 Zemmouri (Algeria) earthquake of 21 May, 2003. *Geophys.Res.Lett.*, 31 (19).

OJEDA A., ATAKANA K., MASANAB E., SANTANACH P., JIMENEZ M.J., GARCIA-FERNANDEZ M. (2002) - Integration and influence of paleoseismic and geologic data for the seismic hazard evaluation in the Catalan coastal ranges, Spain. In *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22 (2002) 911–916

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) – Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française - Modélisation numérique. Rapport intermédiaire, Rapport BRGM/RP-55760-FR.

PELINOVSKY, Y.; KHARIF, C.; RIABOV, I. & FRANCIUS, M. (2002). Modelling of tsunami propagation in the vicinity of the French Coast of the Mediterranean. *Nat.Hazards*, 25 (2), 135-159.

RUPELLAN E., MANGIN A., MIGEON S., BETHOUX N., BUFFET G., DESCHAMPS A., DUBAR M., GARZIGLIA S., IOUALALEN M., LANGLOIS R., LEGONIDEC Y., LEBOURG T., MASCLE J., MARECHAL M., NAULT L., RIBODETTI A., SAGE F., TREVISAN J., TRIC E., BONGIOVANNI E., DESTI J.F., LEFUR H., RIGAUD V., OPDERBECKE J (2007) – GIS CURARE 2005- 2007, Axe III – Mouvements du sol et instabilités gravitaires en mer. Rapport scientifique 2006.([http://curare.unice.fr/rapport/2006/Axe3\\_GIS\\_CURARE\\_2006.pdf](http://curare.unice.fr/rapport/2006/Axe3_GIS_CURARE_2006.pdf))

SEDAN O., MARTIN R., NAY K.M. (2002) - Département de la Haute-Corse. Aléa mouvements de terrain. Rapport BRGM/RP-51168-FR

TERRIER M. (2006) - Identification et hiérarchisation des failles actives de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur - Phase 3 : Hiérarchisation des failles actives. Rapport BRGM/RP-53 930-FR, 216p, 89 fig., 5 pl. hors texte, 1 ann.

TERRIER M. (2007) - Réalisation d'un zonage sismique de la Méditerranée occidentale à 1/2 000 000 préalable aux choix de scénarios de tsunamis- Rapport intermédiaire, Rapport BRGM/RP - 55353 –Fr, 109 p, 43 fig., 1 pl. HT

TINTI S., MARAMAI A., GRAZIANI L., (2004). The new catalogue of the Italian tsunamis. *Natural Hazards*, 33, 439-465.

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

WELLS D.L., COPPERSMITH K.J. (1994) - New empirical relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, pp. 974-1002.

WOO S.-B, LIU P.L.-F. (2004) - Finite-element model for modified Boussinesq equations. I: Model development, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 130 (2004) 1-16.

YELLES, K.; LAMMALI, K.; MAHSAS, A.; CALAIS, E. & BRIOLE, P. (2004). Coseismic deformation of the May 21st, 2003, Mw = 6.8 Boumerdes earthquake, Algeria, from GPS measurements. *Geophys.Res.Lett.*, 31 (13).

## Références bibliographiques citées dans les rapports intermédiaires :

### Zonage sismique, Rapport BRGM RP55353

AUTRAN A., BLES J.L., COMBES PH., CUSHING M., DOMINIQUE P., DUROUCHOUX C., MOHAMMADIOUN B., TERRIER M. (1998). Probabilistic seismic hazard assessment in France, Part 1. *Seismotectonic Zonation*, ECEE'98, Paris.

AOUDIA A., VACCARI F., SUHADOLC P., MEGHROUI M. (2000) – Seismogenic potential and earthquake hazard assessment in the Tell Atlas of Algeria. *J. of Seismology*, 4, 79-98

AMBRASEYS N.N., FREE M.W. (1997) – Surface-wave magnitude calibration for european region earthquakes. In *Journal of Earthquake Engineering*, vol1, n°1, p1-22

BENEDICTO-ESTEBAN A. (1996) – Modèles tectono-sédimentaires de bassins en extension et style structural de la marge passive du golfe du Lion (partie nord), Sud-Est France. *Thèse de doctorat européen*. Univ Montpellier 2.

BIGOT-CORMIER F. (2002) – La surrection du massif cristallin externe de l'Argentera (France-Italie) et ses relations avec la déformation pliocène de la marge nord-ligure. *Thèse Univ. Nice Sophia-Antipolis*.

BOTTARI C., TERMINI D., TERAMO A. (2005) – Macroseismic Parameters of Seismogenic Zones of Calabria and Sicily for Seismic Hazard Evaluation. *Pure appl. Geophys.*, 162, p 739-746

BUFORN A, SANZ DE GALDEANO C, UDLAS B.(1995) - Seismotectonics of the Ibero-Maghrebian region in *Tectonophysics* 248 (1995) 247-261

CHARDON D., HERMITTE D., NGUYEN F. & BELLIER O. (2005) – First paleoseismological constraints on the strongest earthquake in France (Provence) in the twentieth century. *Geology*; nov. 2005, v.33, n°11, 901-904.

CHAUMILLON E., DEVERCHERE J., REHAULT J.P., GUEGEN E. (1994) – Réactivation tectonique et flexure de la marge continentale Ligure (Méditerranée occidentale), *C. R. Acad. Sc., Paris*, 319, (série II), 675-682

DERCOURT J., ZONENSHAIN L. P., (ZONENSHAYN L.P.), RICOU L. E., KAZMIN V. G., LE PICHON X., KNIPPER A. L., GRANDJACQUET C., SBORTSHIKOV I. M. (SBORSHCHIKOV I. M.), GEYSSANT J., LEPVRIER C., PECHERSKY D. H. (PECHERSKIY, D. H.), BOULIN J., SIBUET J.C., SAVOSTIN L. A., SOROKHTIN O., WESTPHAL M. BAZHENOV M. L., LAUER J. P. ET BIJU-DUVAL B. (1986). - Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamirs since the Lias. *Tectonophysics*, 123, 1-4, 241-315.

DEVERCHERE J., YELLES K., DOMZIG A., MERCIER DE LEPINAY B., BOUILLIN J.P., GAULLIER V., BRACENE R., CALAIS E., SAVOYE B., KHERROUBI A., LE ROY P., PAUC H., AND DAN G.

(2005) - Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relations to the 2003 Mw 6.9 earthquake *Geophysical Research Letters* FEB 2005; 32(4) : NIL\_10-NIL\_14

EL ALAMI, S. O., TADILI, B. A., CHERKAoui, T. E., MEDINA, F., RAMDANI, M., BRAHIM, L. A. AND HARNAFIT, M., 1998. The Al Hoceima earthquake of May 26, 1994 and its aftershocks: a seismotectonic study. *Annali di Geofisica*, vol. 41, n° 4.

FLETA, J.; SANTANACH, P.; GOULA, X.; MARTÍNEZ, P.; GRELLET, B.; MASANA, E. (2001) Preliminary geological, geomorphologic and geophysical studies for the paleoseismological analysis of the Amer fault (NE Spain). *Geol. Mijnbouw/Netherlands J. Geosciences* 80, p. 201-211.

FONSECA, J.F.B.D. AND R.E. LONG (1991). Seismotectonics of SW Iberia: A Distributed Plate Margin? in *Seismicity, Seismotectonics and Seismic Risk of the Ibero-Maghrebien Region*, J. Mezcua and A. Udías (Editors), Memoire n°. 8, Instituto Geografico Nacional, Madrid.

GEO-TER (2002) - Révision du zonage sismique de la France- Etude probabiliste Rapport n° GTR/MATE/701-150, 18 Août, 2002

GORINI C. (1996) – Géodynamique d'une marge passive : le golfe du Lion (Méditerranée occidentale). *Thèse Univ. Paul-Sbatier, Toulouse III*

GUTDEUTSCH R., DIETHELM K. AND JENTZSCH G. (2002) - Magnitude Formulae and Intensity–Magnitude Relations for Early Instrumental Earthquakes in the Iberian Region - *Geophys. J. Int.* (2002) 151, 824–834

HAMDACHE M. (1998) – Seismic Hazard Assessment for the Main Seismogenic Zones in North Algeria. *Pure appl. Geophys.* 152, 281-314

KANAMORI H. (1977) - The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.* 82, 2981–2987.

LAGABRIELLE Y. ET LEROY S. (2005) – Le visage sous-marin de la Terre. *Eléments de géodynamique océanique*. Edit. CCGM, ISBN : 2-9517181-6-0

LARROQUE ET AL. (2001) - Active and recent deformation at the southern Alps - Ligurian basin junction. *Netherlands Journal of Geosciences/Geology en Mijnbouw* 80(3-4), p 255-272

LOPEZ CASADO C., SANZ DE GALDEANO C., MOLINA PALACIOS S., HENARES ROMERO J. (2001) – The structure of the Alboran Sea: an interpretation from seismological and geological data. in *Tectonophysics*, 338, 79-95

MEGHRAoui, M., J-L. MOREL, J. ANDRIEUX, ET M. DAHMANI, (1996) - Tectonique plio-quadernaire de la chaîne tello-rifaine et de la mer d'Alboran - une zone complexe de convergence continent-continent, *Bull. Soc. Géol. France*, (8), t. I, 167, 141-157.

MELETTI C., PATACCA E., SCANDONE P. (2000) – Construction of a Seismotectonic Model : The case of Italy. In *Pure appl. Geophys.* 157, p11-35

MELETTI E VALENSISE G. (2004) – Zonazione sismogenetica ZS9 – App.2 al Rapporto Conclusivo. Gruppo di Lavarò per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 20.03.03 n.3274). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

MEZCUA J ET MARTINEZ SOLARES J.M. (1983) – Sismicidad del area ibero-mogrebi. Publicacion 203. Edit. Instituto Geografico Nacional, Madrid

MOREL, J-L., AND MEGHRAOUI M. (1996), Goringe-Alboran-Tell tectonic zone: A transpression system along the Africa-Eurasia plate boundary, *Geology*, 24(8), 755-758.

NOCQUET J.M. (2002) – Mesure de la déformation crustale en Europe occidentale par géodésie spatiale. Thèse Univ. Sophia-Antipolis.

OJEDA A., ATAKANA K., MASANAB E., SANTANACHB P., JIMENEZC M.J., GARCIA-FERNANDEZ M. (2002) - Integration and influence of paleoseismic and geologic data for the seismic hazard evaluation in the Catalan coastal ranges, Spain. In *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22 (2002) 911–916

OLIVERA C., FLETA J., SUSAGNA T., FIGUERAS S., GOULA X. Y ROCA A. (2003) – Sismicidad y deformaciones actuales en el nordeste de la peninsula iberica. In *Física de la Tierra* ISSN: 0214-4557, 2003, 15, 111-144

REBAÏ, S., PHILIP, H. AND TABOADA, A., (1992) - Modern tectonic stress field in the Mediterranean region: evidence for variation in stress directions at different scales. *Geophys. J. Int.*, 110, 106-140.

SCALERA G. (2005) A new interpretation of the Mediterranean arcs: Mantle wedge intrusion instead of subduction. In *Boll. Soc. Geol. It.*, Volume Speciale n. 5 (2005), 129-147, 12 ff.

SECANELL R., GOULA X., SUSAGNA T., FLETA J., ROCA A. (1999) – Mapa de zonas sísmicas de Catalunya. 1er congres Nacional de Ingenieria Sísmica, Murcia

SECANELL R., GOULA X., SUSAGNA T., FLETA J., ROCA A. (2004) – Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain, integrating random uncertainties. *J. of Seismology*, 8, 25-40

SÉRANNE M. (1999) – The gulf of Lion continental margin (NW Mediterranean) revisited by IBS : an overview. In: *Durand B., Jolivet L., Horvath F. et Seranne M. (eds.) The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen*. Geological Society, London, Special Publications, 156, 15-36

VALENSISE G., PANTOSTI D. (2001) – Database of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy. *Ann. Geofis.*, suppl. Vol.44 (4), 797-964, con CD-ROM

WELLS D.L., COPPERSMITH K.J. (1994) - New empirical relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, pp. 974-1002.

YELLES A.K., DOMZIG A., DÉVERCHÈRE J., BRACÈNE R., MERCIER DE LÉPINAY B., BERTRAND G., BOUDIAF A., WINTER T., KHERROUBI A., LE ROY P., H. DJELLIT (soumis GJI) - Evidence for a large active fault offshore West Algiers, Algeria, and implications on the strain pattern of the region.

### **Mouvements de terrain côtiers, Rapport BRGM RP 55356**

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

COLAS B., SEDAN O. (2003) - Cartographie départementale de l'aléa mouvement de terrain. Département de la Corse du Sud (2A). Rapport final.

MARÇOT N., MATHON CH. (2003) – Prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire en Provence – Alpes – Côte d'Azur. Année 1 : Bilan des connaissances, définition des instabilités et qualification de l'aléa. Rapport BRGM/RP-52829-FR

RUPELLAN E., MANGIN A., MIGEON S., BETHOUX N., BUFFET G., DESCHAMPS A., DUBAR M., GARZIGLIA S., IOUALALEN M., LANGLOIS R., LEGONIDEC Y., LEBOURG T., MASCLE J., MARECHAL M., NAULT L., RIBODETTI A., SAGE F., TREVISAN J., TRIC E., BONGIOVANNI E., DESTÉ J.F., LEFUR H., RIGAUD V., OPDERBECKE J (2007) – GIS CURARE 2005- 2007, Axe III – Mouvements du sol et instabilités gravitaires en mer. Rapport scientifique 2006.([http://curare.unice.fr/rapport/2006/Axe3\\_GIS\\_CURARE\\_2006.pdf](http://curare.unice.fr/rapport/2006/Axe3_GIS_CURARE_2006.pdf))

SEDAN O., MARTIN R., NAY K.M. (2002) - Département de la Haute-Corse. Aléa mouvements de terrain. Rapport BRGM/RP-51168-FR

### **Zonage des mouvements de terrain sous-marins, Rapport IFREMER DCB/GM/LES/07-17**

Amblàs, D., Canals, M., Lastras, G., Berné, S., Loubrieu B., 2004. Imaging the seascapes of the Mediterranean. *Oceanography* 17, 144-155.

Amblàs, D., Canals, M., Urgeles, R., Lastras, G., Liqueste, C., Hughes-Clarke, J.E., Casamor, J.L., Calafat, A.M., 2006. Morphogenetic mesoscale analysis of the northeastern Iberian margin, NW Mediterranean Basin. *Marine Geology* 234, 3-20.

Assier-Rzadkiewicz, S., Heinrich, P., Sabatier, P.C., Savoye, B., Bourillet, J.F. 2000. Numerical modelling of a landslide-generated tsunami : The 1979 Nice event. *Pure and Applied Geophysics* 157, 1707-1727.

Bain, O., 1998.: Approche morphostructurale de la marge ouest Corse : secteur sud (France). Mémoire IGAL MI3.179, 83 p.

Baztan, J., Berné, S., Olivet, J.L., Rabineau, M., Aslanian, D., Gaudin, M., Réhault, J.P., Canals, M., 2005. Axial incision: the key to understand submarine canyon evolution (in the western Gulf of Lions). *Marine and Petroleum Geology* 22, 805-826.

Bellaiche, J.P., Pautot, G., Gaullier, V., Vanney, J.R., Droz, L., 1993. Les appareils sédimentaires de la marge orientale de la Corse: interprétation hydrodynamique et implications structurales. *Marine Geology* 316, 513—517.

Bellaiche, G., Droz, L., Gaullier, V., Pautot, G., 1994. Small submarine fans on the eastern margin of Corsica: Sedimentary significance and tectonic implications. *Marine Geology* 117, 177-185.

- Benoit, G., Comeau, A. (Eds.), 2005. Méditerranée : les perspectives du Plan Bleu sur l'environnement et le développement. / A sustainable future for the Mediterranean: the Blue Plan's environment and development outlook. Edition française : Edition de l'Aube, La Tour d'Aigues, France, 432 pp. <http://www.planbleu.org/>
- Berné, S., Alöisi, J.C., Baztan, J., Dennielou, B., Droz, L., Dos Reis, T., Lofi, J., Méar, Y., Rabineau, M., 2002. Notice de la carte morpho-bathymétrique du Golfe du Lion. IFREMER et Région Languedoc Roussillon, Brest. 48 pp.
- Berné, S., Carré, Loubrieu, B., Mazé, J.-P., Normand, A., 2001. Le Golfe du Lion. Carte Morpho-bathymétrique. Cartes et Atlas. Region Languedoc Rousillon. Echelle 1/100000, Editions Ifremer, Plouzané, France.
- Berné, S., Carré, Loubrieu, B., Mazé, J.-P., Morvan, L., Normand, A., 2004. Le Golfe du Lion. Carte Morpho-bathymétrique. Echelle 1/250000, Editions Ifremer, Plouzané, France.
- Bonnel, C., Dennielou, B., Droz, L., Mulder, T., Berne, S., 2005. Architecture and depositional pattern of the Rhone Neofan and recent gravity activity in the Gulf of Lions (western Mediterranean). *Marine and Petroleum Geology* 22, 827-843.
- Borrero, J.C., 2003. Field survey and preliminary modeling of the Wewak, Papua New Guinea earthquake and tsunami of 9 September 2002. *Seismological Research Letters* 74/4, 393-405.
- Brabb, E.E., Harrod, B.L. (Eds.), 1989. Landslides: Extent and economic significance. Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Geological Congress: Symposium on landslides. Washington D.C., 17/07/89. Balkema, Rotterdam. xiv-385 pp.
- Canals, M., Lastras, G., Urgeles, G., Casamor, J.L., Mienert, J., Cattaneo, A., De Batist, M., Hafidason, H., Imbo, Y., Laberg, J.S., Locat, J., Long, D., Longva, O., Masson, D.G., Sultan, N., Trincardi, F., Bryn, P., 2004. Slope failure dynamics and impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: An overview. *Marine Geology* 213, 9-72.
- Canals, M., Puig, P., Durrieu de Madron, X. Heussner, S., Palanques, A., Fabres, J., 2006. Flushing submarine canyons. *Nature* 444, 354-357.
- Chiocci, F. L., Bosman, A., Romagnoli, C., Tommasi, P., and De Alteriis, G.: The December 2002 Sciara del Fuoco (Stromboli Island) submarine landslide: a first characterisation. EGS-AGUEUG Joint Assembly, Nice, France, April 2003, Geophysical Research Abstracts, Vol.5, CDROM Version, 2003.
- Dalrymple, R.A., Grilli, S.T., Kirby, J.T., 2006. Tsunamis and challenges for accurate modeling. *Oceanography* 19/1, 142-151.
- Dan, G., 2007. Processus gravitaires et évaluation de la stabilité des pentes : approches géologique et géotechnique. Application à la marge algérienne et à l'effondrement de l'aéroport de Nice en 1979. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale. XVII - 364 pp.
- Dan, G., Sultan, N., Savoye, B., 2007. The 1979 Nice harbour catastrophe revisited. A new and consistent trigger mechanism. *Marine Geology*, sous presse.

- Droz, L., 1983. L'éventail sous-marin profond du Rhône (Golfe du Lion): grands traits morphologiques et structure semi-profonde. 3rd Cycle Thesis, University of Paris VI.
- Droz, L., Kergoat, R., Cochonat, P., Berné, S., 2001. Recent sedimentary events in the western Gulf of Lions (Western Mediterranean). *Marine Geology* 176, 23–37.
- Droz, L., dos Reis A.T., Rabineau, M., Berné, S., Bellaiche, G., 2006. Quaternary turbidite systems on the northern margins of the Balearic Basin (Western Mediterranean): a synthesis. *Gep-Marine Letters* 26, 347-359.
- García-García, A., Orange, D., Lorenson, T., Radakovitch, O., Tesi, T., Miserocchi, S., Berné, S., Friend, P.L., Nittrouer, C.A., Normand, A., 2006. Shallow gas off the Rhône prodelta, Gulf of Lions. *Marine Geology* 234, 215-231.
- Guiomar, M., 2000. Structure et mode d'édification des éventails turbiditiques du Fiume Orbo et du Tavignano (Marge Est Corse). Mémoire de diplôme d'ingénieur géologue de l'IGAL, 5ème année. N. 133, 193 p.
- Garziglia, S., 2005. Etude d'instabilité gravitaires sur la pente continentale niçoise à partir de cartes bathymétriques et de profils sismiques. Mémoire M1 de l'Université de Nice Sophia Antipolis, 37p.
- Gaudin, M., Berné, S., Jouanneau, J.-M., Palanques, A., Puig, P., Mulder, T., Cirac, P., Rabineau, M., Imbert, P. 2006. Massive sand beds attributed to deposition by dense water cascades in the Bourcart canyon head, Gulf of Lions (northwestern Mediterranean Sea). *Marine Geology* 234, 111–128.
- Gensous, B., Tesson, M., 1996. Sequence stratigraphy, seismic profiles, and cores of Pleistocene deposits on the Rhône continental shelf. *Sedimentary Geology* 105, 183-190.
- Gensous, B., Williamson, D., Tesson, M., 1993. Late-Quaternary transgressive and highstand deposits of a deltaic shelf (Rhône delta, France). In: Posamentier, H.W., Summerhayes, C.P., Haq, B.A., Allen, G.P. (Eds.), *Sequence Stratigraphy and Facies Associations*. International Association of Sedimentologists Special Publication 18. Blackwell, Oxford, pp. 197–212.
- Gervais, A., 2002. Analyse multi-échelles de la morphologie, de la géométrie et de l'architecture d'un système turbiditique sableux profond (système du Golo, marge Est-corse, mer Méditerranée), PhD thesis, Université Bordeaux 1, 288 pp.
- Gervais, A., Savoye, B., Mulder, T., Piper, D., Cremer, M., Pichevin, L., 2004. Present morphology and depositional architecture of a sandy submarine system: the Golo turbidite system (Eastern margin of Corsica). In: Lomas, S., Joseph, P. (Eds.), *Confined Turbidite Systems*. Geological Society, Special Publication, London, pp. 59–89.
- Gervais, A., Savoye, B., Mulder, T., Gonthier, E., 2006. Sandy modern turbidite lobes: A new insight from high resolution seismic data. *Marine and Petroleum Geology* 23, 485-502.
- GIS CURARE 2006, Axe 3, Mouvements du sol et instabilités gravitaires en mer. Rapport scientifique 2006, 89 p.

- Hühnerbach, V., Masson, D.G., partners of the COSTA project, 2004. Landslides in the North Atlantic and its adjacent seas: an analysis of their morphology, setting and behaviour. *Marine Geology* 213, 343-362.
- Kenyon, N.H., Klaucke, I., Millington, J., Ivanov, M.K., 2002. Sandy submarine canyon-mouth lobes on the western margin of Corsica and Sardinia, Mediterranean Sea. *Marine Geology* 184, 69-84.
- Kergoat, R., 1998. Mise en place d'un débris flow sur le glacis catalano-languedocien. Mémoire DEA « Géologie, géophysique et géochimie sédimentaire » de l'Université de Paris XI, 56 p.
- Klaucke, I., Cochonat, P., 1999. Analysis of past seafloor failures on the continental slope off Nice (SE France): *Geo-Marine Letters* 19, 245–253.
- Klaucke, I., Savoye, B., Cochonat, P., 2000. Patterns and processes of sediment dispersal on the continental slope off Nice: SE France: *Marine Geology* 162, 405-422.
- Jouet, G., Berné, S., Rabineau, M., Bassetti, M.A., Bernier, P., Dennielou, B., Sierro, F.J., Flores, J.A., Taviani, M., 2006. Shoreface migrations at the shelf edge and sea-level changes around the Last Glacial Maximum (Gulf of Lions, NW Mediterranean). *Marine Geology* 234, 21-42.
- Lasnier, C., 1998. Etude morphostructurale de la marge ouest-corse : Secteur Nord. *Mém. Apt. Géol. IGAL*, n. 186, 97 p.
- Lasnier, C., 2001. Etude morphostructurale de la marge ouest-corse : une approche pluridisciplinaire. *Mémoire de Géologue de l'IGAL*, 246 p.
- Lastras, G., Canals, M., Urgeles, R., Amblas, D., Ivanov, M., Droz, L., Dennielou, B., Fabrès, J., Schoolmeester, T., Akhmetzhanov, A., Orange, D., 2007. A walk down the Cap de Creus canyon, northwestern Mediterranean Sea: Recent processes inferred from morphology and sediment bedforms. *Marine Geology*, sous presse.
- Lee, H.J., 1989. Undersea landslides: Extent and significance in the Pacific Ocean. In: Brabb, E.E., Harrod, B.L. (Eds.). *Landslides: Extent and economic significance*. Balkema, Rotterdam, 367-379.
- Maillet, G., Vella, C., Berné, S., Friend, P.L., Amos, C.L., Fleury, T.J., Normand, A., 2006. Morphological changes and sedimentary processes induced by the December 2003 flood event at the present mouth of the Grand Rhône River (Southern France). *Mar.Geol.*234,159-177.
- Marçot, N., Colas, B., Terrier, M., 2007. Etude préliminaire de l'aléa tsunamis en Méditerranée occidentale - Mouvements de terrain côtiers de grande ampleur- Rapport intermédiaire, Rapport BRGM-RP- 55356 –Fr, 37p., 10 fig.
- Masson, D.,G., Harbitz, C.B., Wynn, R.B., Pedersen, G., Løvholt, F., 2006. Submarine landslides: processes, triggers and hazard prediction. *Phil. Trans. R. Soc.* 364, 2009–2039, doi:10.1098/rsta.2006.1810.
- McAdoo, B.G., Pratson, L.F., Orange, D.L., 2000. Submarine landslide geomorphology, US continental slope. *Marine Geology* 169, 103-136.

- Migeon, S., Mulder T., Savoye, B., Sage, F., 2006. The Var turbidite system (Ligurian Sea, northwestern Mediterranean) – morphology, sediment supply, construction of turbidite levee and sediment waves: implications for hydrocarbon reservoirs. *Geo-Marine Letters* 26, 361-371.
- Minisini, D., Trincardi, F., Asioli, A., Canu, M., Foglini, F., 2007. Morphologic variability of exposed mass-transport deposits on the eastern slope of Gela basin (Sicily channel). *Basin Research* 19, 217–240, doi: 10.1111/j.1365-2117.2007.00324.x
- Mulder, T., Cochonat, P., Scieb, T., Tisot, J.-P., 1992. Estimation de l'épaisseur de sédiment impliquée dans les glissements sous-marins à partir de données sur l'état de consolidation. Application à la Baie des Anges (SE de la France). *C.R. Acad. Sci. Paris*, t.315, 1703-1709.
- Mulder, T., Savoye, B., Syvitski, J.P.M., 1997,. Numerical modelling of a mid-sized gravity flow: the 1979 Nice turbidity current (dynamics, processes, sediment budget and seafloor impact). *Sedimentology* 44, 305–326.
- Piper, D.J.W., Savoye, B., 1993. Processes of late Quaternary turbidity current flow and deposition on the Var deep-sea fan, north-west Mediterranean Sea. *Sedimentology* 40, 557-582.
- Piper, D.J.W., Cochonat, P., Morrison, M.L., 1999. The sequence of events around the epicentre of the 1929 Grand Banks earthquake: initiation of debris flow and turbidity current inferred from sidescan sonar. *Sedimentology* 46, 79-97.
- Prior, D.B., Bornhold, B.D., Coleman, J.M., Bryant, W.R., 1982. Morphology of a submarine slide, Kitiman Arm, British Columbia. *Geology* 10, 588-592.
- Rigaut, F., 1993. Caractérisation des événements gravitaires sur la pente continentale ; exemples de l'interfluve des canyons du Grand Rhône et du Petit Rhône (Méditerranée occidentale). Mémoire DEA « Océans » de l'Université de Bretagne Occidentale, 39 p.
- Rohais, S., 2002. Synthèse géologique de la baie des Anges, mer Ligure (mer Méditerranée) : conception et exploitation d'un système d'information géographique en géologie marine. Mémoire d'ingénieur géologue de l'IGAL, IFREMER, IGAL, Cergy Pontoise, N. 181, 152 p.
- Savoye, B., Piper, D.J.W., 1993. Quaternary sea-level change and sedimentation on the continental shelf and slope of Antibes, French Riviera. *Geo-Marine Letters* 13, 2-8.
- Savoye, B., Piper, D.J.W., Droz, L., 1993. Plio-Pleistocene evolution of the Var deep-sea fan off the French Riviera. *Marine and Petroleum Geology* 10, 550-571.
- Savoye, B., Réhault, J.-P., Le Suavé, R., Monti, S., Le Drezen, E., 1997. Synthèse Bathymétrique et Imagerie Acoustique (Corse et Mer Ligure). Notice des Cartes Bathymétriques et Imagerie Acoustique de la Mer Ligure au 1/500000e, Ed. IFREMER, Plouzané, 22 pp.
- Sultan, N., Cochonat, P., Canals, M., Cattaneo, A., Dennielou, B., Hafliadason, H., Laberg, J.S., Long, D., Mienert, J., Trincardi, F., Urgeles, R., Vorren, T.O., Wilson,

- C., 2004. Triggering mechanisms of slope instability processes and sediment failures on continental margins: A geotechnical approach. *Marine Geology* 213, 291-321.
- Sultan, N., Gaudin, M., Berne, S., Canals, M., Urgeles, R., Lafuerza, .S., 2007. Analysis of slope failures in submarine canyon heads: An example from the Gulf of Lions. *J. Geophys. Res.* 112, F01009, doi:10.1029/2005JF000408.
- Rothwell, R.G., Thomson, J., Kähler, G., 1998. Low-sea-level emplacement of a very large Late Pleistocene 'megaturbidite' in the western Mediterranean Sea. *Nature* 392, 377-380.
- Tappin, D.R., Watts, P., McMurtry, G.M., Lafoy, Y., Matsumoto, T., 2001. The Sissano, Papua New Guinea tsunami of July 1998 - Offshore evidence on the source mechanism. *Marine Geology* 175, 1-23.
- ten Brink, U.S., Geist, E.L., Andrews, B.D., 2006. Size distribution of submarine landslides and its implication to tsunami hazard in Puerto Rico. *Geophysical Research Letters* 33, L11307, doi:10.1029/2006GL026125.
- Tesson, M., Posamentier, H., Gensous, B., 2000. Stratigraphic organisation of Late Pleistocene deposits of the western part of the Rhone shelf (Languedoc shelf) from high resolution seismic and core data. *AAPG Bulletin* 84, 119–150.
- Tinti, S., Manucci, A. Pagnoni, G. Armigliato, A., Zaniboni, F., 2005. The 30 December 2002 landslide-induced tsunamis in Stromboli: sequence of the events reconstructed from the eyewitness accounts. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 763–775.
- Torres, J., 1995. Analyse détaillée du Transfert de Sédiment du Continent vers le Bassin: Le Quaternaire Terminal au Large du Delta du Rhône (Méditerranée nord-occidentale). PhD Thesis. Université de Bretagne Occidentale, 353 pp.
- Torres, J., Droz, M., Savoye, B., Terentieva, E., Cochonat, P., Kenyon, N.H., Canals, M., 1997. Deep-sea avulsion and morphosedimentary evolution of the Rhône Fan Valley and Neofan during the Late Quaternary (northwestern Mediterranean Sea). *Sedimentology* 44, 457- 477.
- Watts, P., Grilli, S.T., Kirby, J.T., Fryer, G.J., Tappin, D.R., 2003. Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 391-402.

### **Simulations des tsunamis, Rapport BRGM RP 55670**

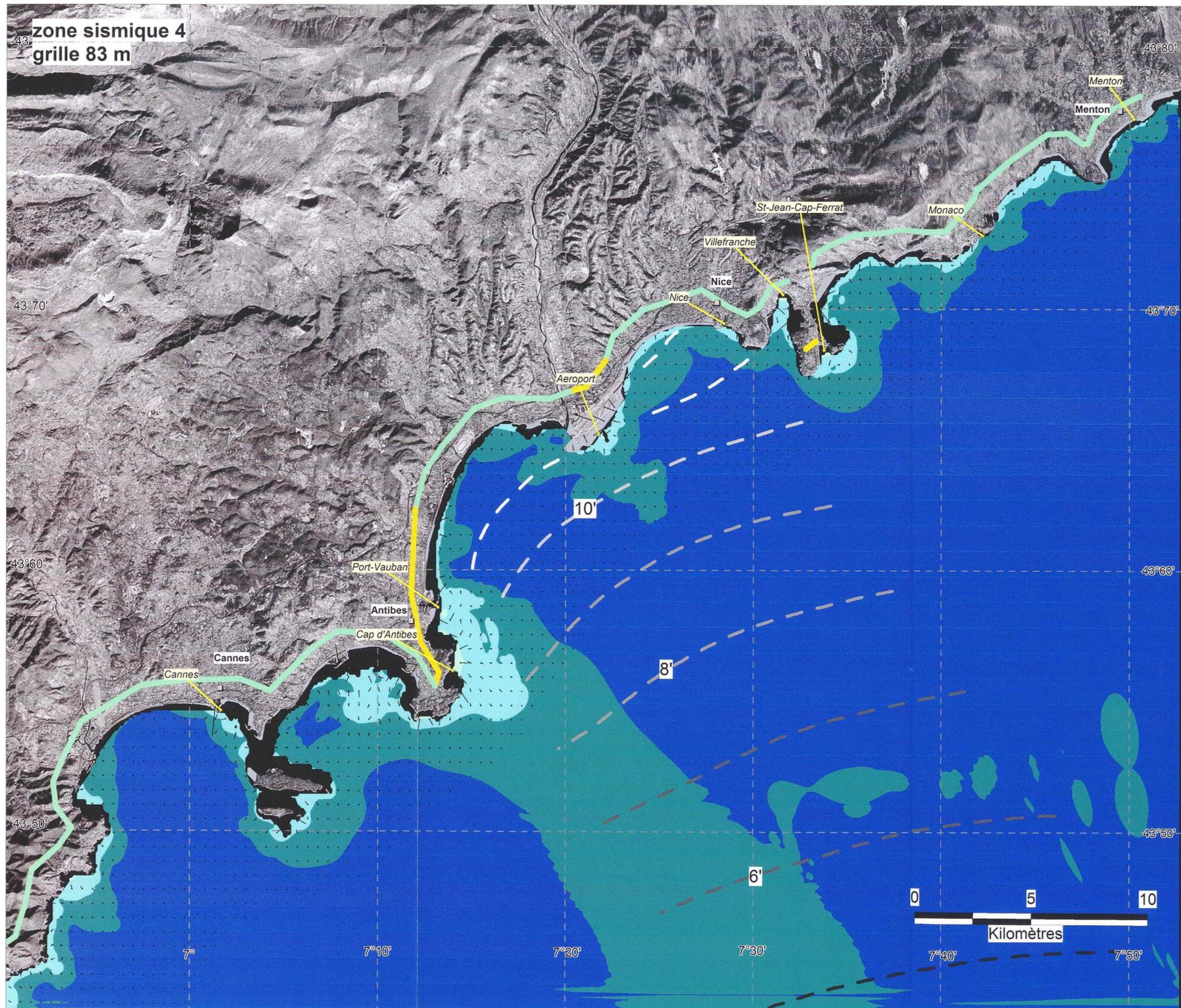
- Alasset, P.; Hebert, H.; Maouche, S.; Calbini, V. & Meghraoui, M. (2006). 'The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake (M (sub w) = 6.9, Algeria); modelling and results', *Geophysical Journal International* **166**(1), 213-226.
- Assier-Rzadkiewicz, S.; Heinrich, P.; Sabatier, P.C.; Savoye, B. & Bourillet, J.F. (2000). 'Numerical modelling of landslide-generated Tsunami; the 1979 Nice event', *Pure Appl. Geophys.*, **157** (10), 1707-1727.

- Bounif, A.; Dorbath, C.; Ayadi, A.; Meghraoui, M.; Beldjoudi, H.; Laouami, N.; Frogneux, M.; Slimani, A.; Alasset, P.J.; Kharroubi, A.; Ousadou, F.; Chikh, M.; Harbi, A.; Larbes, S. & Maouche, S. (2004). 'The 21 May 2003 Zemmouri (Algeria) earthquake Mw 6.8; relocation and aftershock sequence analysis', *Geophys.Res.Lett.*, **31** (19).
- BRGM-MEDAD (2008). Base de données sur les tsunamis historiques en France. <http://www.tsunamis.fr>.
- Catteano A. (2007). 'Etude préliminaire de l'aléa tsunamis en Méditerranée occidentale - Zonage des mouvements de terrain sous-marins sur le plateau et talus continental au large des côtes françaises'. *Rapport final IFREMER*, 66p, 2 ann.
- Colas B., Sedan O. (2003). 'Cartographie départementale de l'aléa mouvement de terrain. Département de la Corse du Sud (2A)'. Rapport final.
- Durand E. (2006). 'Modélisation des tsunamis provoqués par les glissements de terrain : Comparaison de 2 modèles basés sur les équations de Boussinesq étendues COULWAVE et GEOWAVE'. *Rapport de stage BRGM, Ecole INSA*.
- Ferrari, G. (1991), 'The 1887 Ligurian earthquake: a detailed study from contemporary scientific observations', *Tectonophysics*, **193** (1-3), 131-139.
- 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.
- 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.
- Marçot N., Colas B., Terrier M. (2007). 'Etude préliminaire de l'aléa tsunamis en Méditerranée occidentale - Mouvements de terrain côtiers de grande ampleur'. *Rapport intermédiaire, Rapport BRGM/RP- 55356 –Fr, 37p., 10 fig.*
- Marçot N., Mathon Ch. (2003). 'Prise en compte de la problématique des risques liés aux falaises côtières dans l'aménagement du territoire en Provence – Alpes – Côte d'Azur. Année 1 : Bilan des connaissances, définition des instabilités et qualification de l'aléa'. *Rapport BRGM/RP-52829-FR*.
- Meghraoui, M.; Maouche, S.; Chemaa, B.; Cakir, Z.; Aoudia, A.; Harbi, A.; Alasset, P.J.; Ayadi, A.; Bouhadad, Y. & Benhamouda, F. (2004), 'Coastal uplift and thrust faulting associated with the M (sub w) = 6.8 Zemmouri (Algeria) earthquake of 21 May, 2003', *Geophys.Res.Lett.*, **31** (19).
- Okada, Y. (1985). 'Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space'. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.

- Pelinovsky, Y.; Kharif, C.; Riabov, I. & Francius, M. (2002), 'Modelling of tsunami propagation in the vicinity of the French Coast of the Mediterranean', *Nat.Hazards*, **25** (2), 135-159.
- Sedan O., Martin R., Nay K.M., (2002). 'Département de la Haute-Corse. Aléa mouvements de terrain'. *Rapport BRGM/RP-51168-FR*.
- Terrier M. (2007). 'Réalisation d'un zonage sismique de la Méditerranée occidentale à 1/2 000 000 préalable aux choix de scénarios de tsunamis'. *Rapport BRGM/RP - 55353 -Fr, 109 p, 43 fig., 1 pl. HT*.
- Tinti S., Maramai A., Graziani L., (2004). 'The new catalogue of the Italian tsunamis'. *Natural Hazards*, **33**, 439-465.
- 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*.
- Waythomas, C.F., Watts, P., and Walder, J.S., (2006). 'Numerical simulation of tsunami generation by cold volcanic mass flows at Augustine Volcano, Alaska'. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 6, p. 671-685.
- 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.
- Wells, D.L. & Coppersmith, K.J. (1994). 'New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement', *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84** (4), 974-1002.
- Yelles, K.; Lammali, K.; Mahsas, A.; Calais, E. & Briole, P. (2004), 'Coseismic deformation of the May 21st, 2003, Mw = 6.8 Boumerdes earthquake, Algeria, from GPS measurements', *Geophys.Res.Lett.*, **31** (13).



**Centre scientifique et technique**  
**Service Aménagement et Risques Naturels**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34



**Légende des cartes**

Amplitude de la crête de la vague

- > 6 m
- entre 5 m et 6 m
- entre 4 m et 5 m
- entre 3 m et 4 m
- entre 2 m et 3 m
- entre 1,5 m et 2 m
- entre 1 m et 1,5 m
- entre 0,5 m et 1 m
- entre 0,2 m et 0,5 m
- entre 0,1 m et 0,2 m
- inférieure à 0,1 m

Moyenne de l'amplitude des crêtes de vagues à proximité du littoral

- > 5 m
- de 3 à 5 m
- de 1 à 3 m
- < 1 m

Du fait de la précision des MNT utilisés entre la côte et -10 m de profondeur, le résultat du calcul de l'amplitude des vagues n'est pas suffisamment fiable pour être représenté aux échelles cartographiques supérieures à 1/250 000. Ces résultats ont donc été masqués (zone en noir).

profondeur d'inondation supérieure à une maille de calcul (83 m)

points de jauge

- emplacement de la jauge (cf série temporelle)

temps d'arrivée en minute

- 11 - 12
- 10 - 11
- 8 - 10
- 6 - 8
- 4 - 6
- < 4

courant

- 0,1 m/s
- 0,5 m/s
- 1 m/s
- 2 m/s
- 3 m/s
- 4 m/s

sens du courant

modélisations effectuées avec : GEOWAVE modifié

grille bathymétrique obtenue à partir des données du SHOM, IFREMER et GEBCO

fond des cartes : image satellite LANDSAT, ETM+ Mosaics 2000-02-16 to 2002-02-12 EarthSat, extrait du site WEB : <http://gicfapp.umiacs.umd.edu:8080/esd/>

système de projection : Longitude/Latitude (WGS84)

**Tsunamis : Etude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française**

**Simulation de tsunami d'origine sismique :**

**Scénario du séisme Maximum de la zone "Marge Nord Ligure" (zone 4 du zonage sismique),**

**scénario type :**  
Séisme maximal zone 4, MARGE NORD LIGURE

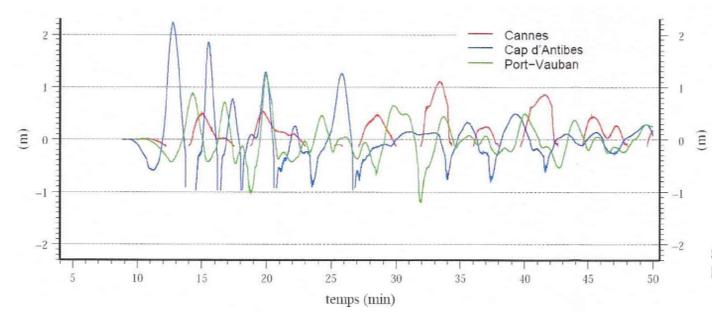
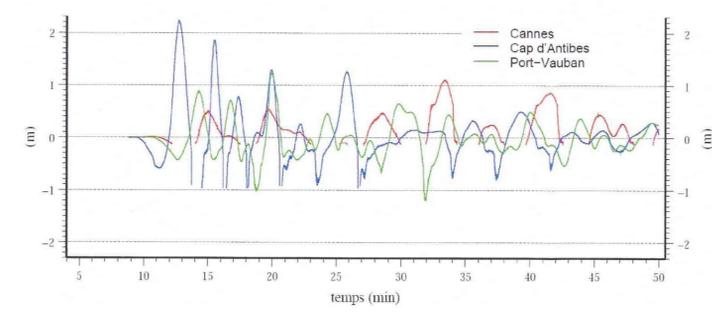
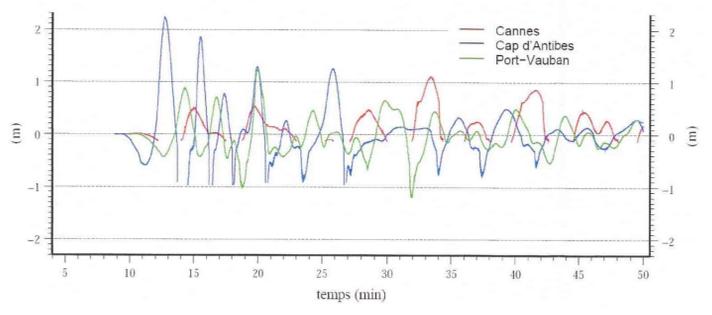
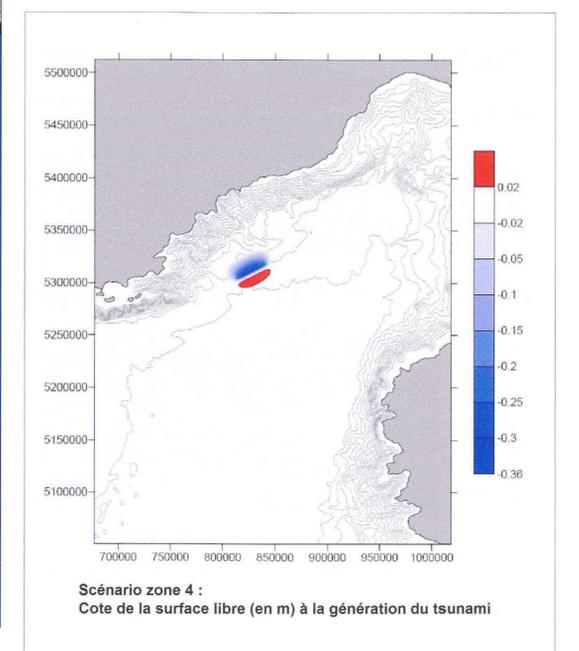
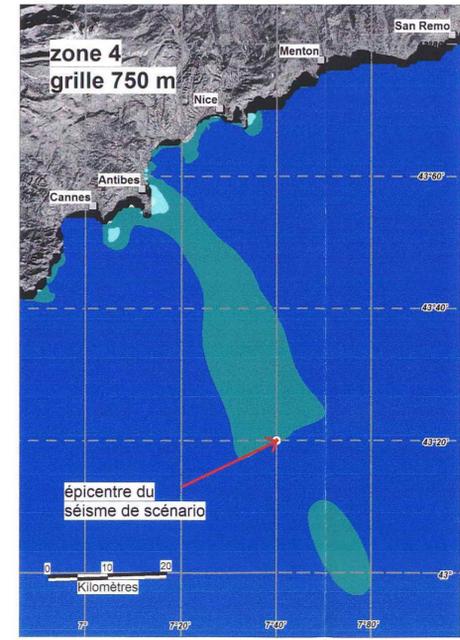
coordonnées épicentrales : 43°13' N et 7°24' E  
Profondeur focale : 8 km  
Magnitude (Mw) : 6.8  
Azimut : 63° E  
Angle du glissement : 90°  
Dimension : 33 km x 17 km  
Rejet moyen : 0.7 m  
mouvement : normal

periode de retour du séisme de référence estimée de plusieurs centaines à quelques milliers d'années

BRGM logo: Géosciences pour une Terre durable

planche 1 rapport BRGM/RP-55765-Fr

Liste des scénarios réalisés dans le cadre de l'étude :  
- Zone sismique 4, Marge Nord Ligure, M 6.8 (Planche 1)  
- Zone sismique 32, Rif Tell et marge Nord Algérienne (Planche 2)  
- Zone sismique 49, bassin de l'Apuridan, M 6.7 (Planche 3)  
- Zone mouvement de terrain 2, Corse Ouest (Planche 4)  
- Zone mouvement de terrain 7, Marge Nice-Vintimille (Planche 5)  
- Zone mouvement de terrain 18, Canyon Lacaize-Héraut (Planche 6)





**Tsunamis : Etude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française**

**Simulation de tsunami d'origine sismique :**

**Scénario du séisme Maximum de la zone "Tell et marge nord algérienne" (zone 32 du zonage sismique).**

**scénario type :**  
**Séisme maximal zone 32, TELL ET MARGE NORD ALGERIENNE**

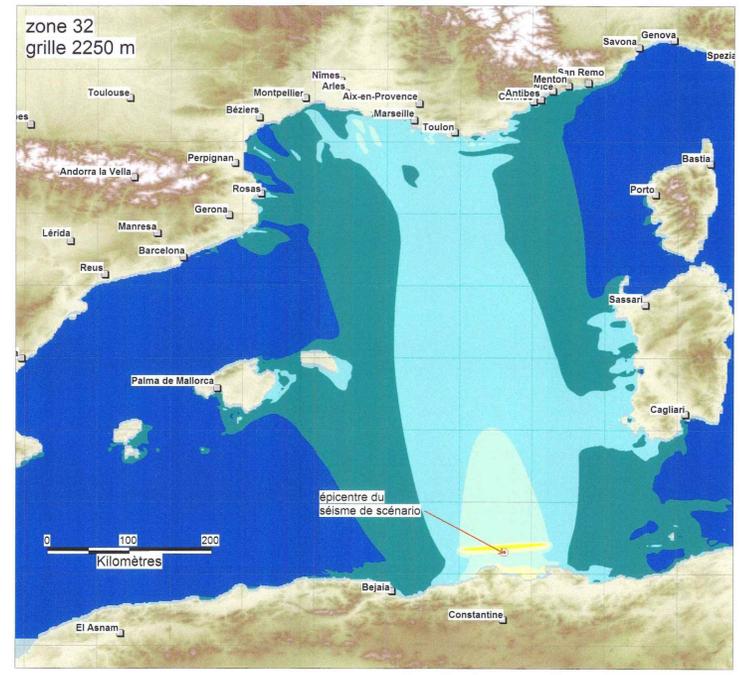
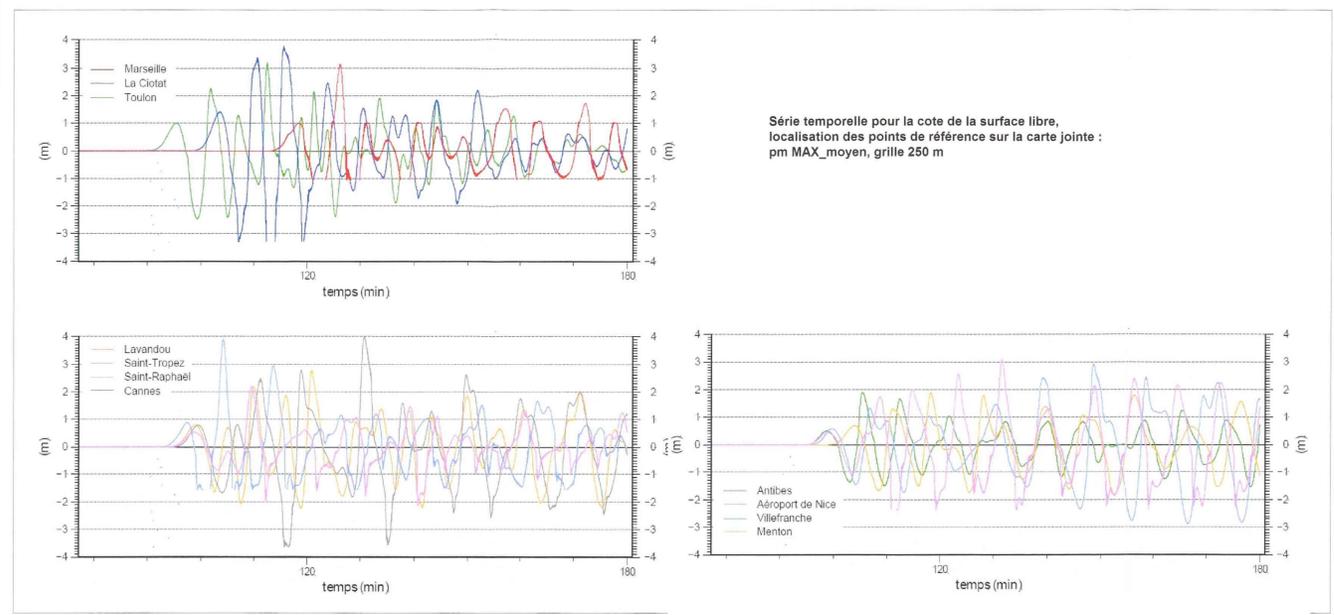
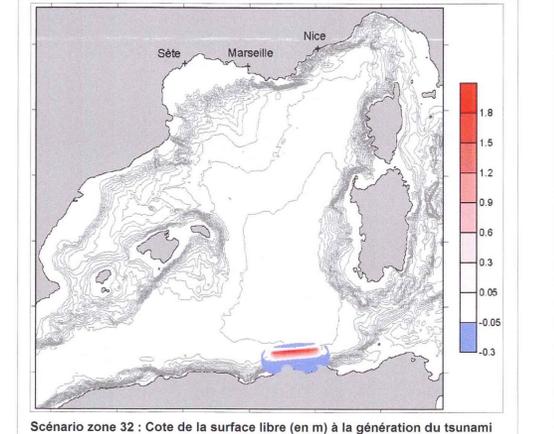
coordonnées épicentrales : 37°18' N et 6°38' E  
 Profondeur zone : 11 km  
 Magnitude (Mw) : 7,8  
 Azimut : 265° E  
 Pendage : 30°  
 Angle de glissement : 270°  
 Dimension : 145 km x 31 km  
 Rejet moyen : 3,8 m  
 Mouvement : inverse

Liste des scénarios réalisés dans le cadre de l'étude :  
 - Zone sismique 4, Marge Nord Ligur, M 8,8 (Planche 1)  
 - Zone sismique 32, R/T Tell et marge Nord Algérienne (Planche 2)  
 - Zone sismique 42, Sasso de Arcourouan, M 8,7 (Planche 3)  
 - Zone mouvement de terrain 2, Corse Ouest (Planche 4)  
 - Zone mouvement de terrain 1, Marge Nice-Vintimille (Planche 5)  
 - Zone mouvement de terrain 15, Canyon Lascabe-Héreau (Planche 6)

Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables  
 brgm  
 Géosciences pour une Terre durable  
 Planche 2  
 Rapport BRGM/RP-55765-Fr

Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables  
 République Française

période de retour du séisme de référence estimée de plusieurs centaines à quelques milliers d'années



**Légende des cartes**

**Amplitude de la crête de la vague**

- > 6 m
- entre 5 m et 6 m
- entre 4 m et 5 m
- entre 3 m et 4 m
- entre 2 m et 3 m
- entre 1,5 m et 2 m
- entre 1 m et 1,5 m
- entre 0,5 m et 1 m
- entre 0,1 m et 0,5 m
- inférieure à 0,1 m

**Moyenne de l'amplitude des crêtes de vagues à proximité du littoral**

- > 5 m
- de 3 à 5 m
- de 1 à 3 m
- < 1 m

Du fait de la précision des MNT utilisés entre la côte et -10 m de profondeur, le résultat du calcul de l'amplitude des vagues n'est pas suffisamment fiable pour être représenté aux échelles cartographiques supérieures à 1/250 000. Ces résultats ont donc été masqués (zone en noir).

profondeur d'inondation supérieure à une maille de calcul (250 m)

**points de jauge**

- emplacement de la jauge (cf série temporelle)

**temps d'arrivée en minute**

- > 100
- 90 à 100
- 80 à 90
- 70 à 80

**courant**

- 0,1 m/s
- 0,5 m/s
- 1 m/s
- 2 m/s
- 3 m/s
- 4 m/s

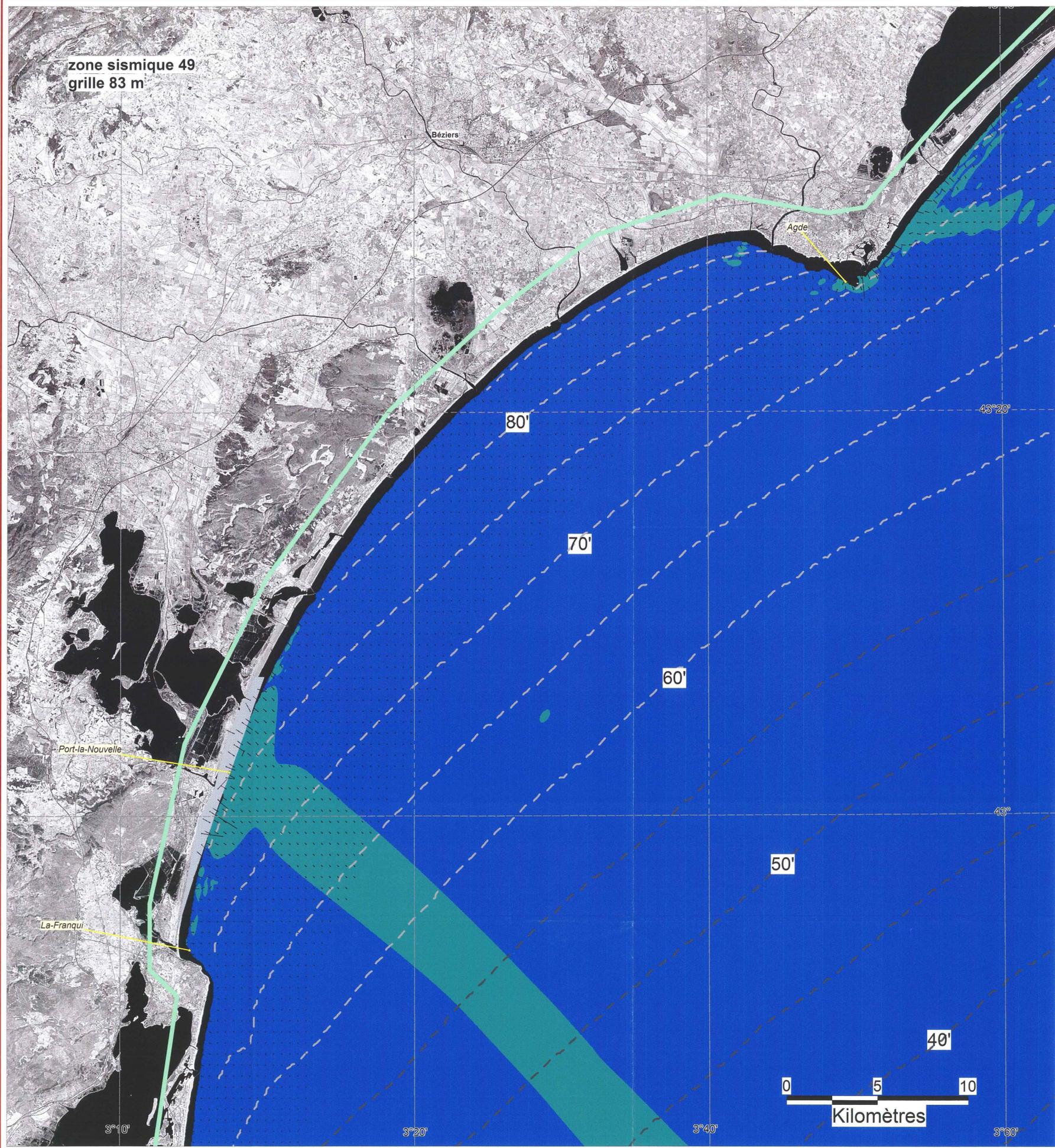
sens du courant

modifications effectuées avec : GEOWAVE modifié

grille bathymétrique obtenue à partir des données de SHOM, IFREMER et GEBCO

fond des cartes : image satellite LANDSAT, ETM+ Mosaïque 2000-02-16 to 2002-02-12  
 EarthSat, extrait du site WEB  
<http://gcfapp.umiacs.umd.edu:8080/earth/>

système de projection : Longitude/Latitude (WGS84)



zone sismique 49  
grille 83 m

### Légende des cartes

**Amplitude de la crête de la vague**

- > 6 m
- entre 5 m et 6 m
- entre 4 m et 5 m
- entre 3 m et 4 m
- entre 2 m et 3 m
- entre 1,5 m et 2 m
- entre 1 m et 1,5 m
- entre 0,5 m et 1 m
- entre 0,2 m et 0,5 m
- entre 0,1 m et 0,2 m
- inférieure à 0,1 m

**Moyenne de l'amplitude des crêtes de vagues à proximité du littoral**

- > 5 m
- de 3 à 5 m
- de 1 à 3 m
- < 1 m

Du fait la précision des MNT utilisés entre la côte et -10 m de profondeur, le résultat du calcul de l'amplitude des vagues n'est pas suffisamment fiable pour être représenté aux échelles cartographiques supérieures à 1/250 000. Ces résultats ont donc été masqués (zone en noir).

profondeur d'inondation supérieure à une maille de calcul (83 m)

**points de jauge**

- emplacement de la jauge (cf série temporelle)

**temps d'arrivée en minute**

- 90 à 120'
- 60 à 90'
- 30 à 60'
- < 30'

**courant**

- 0,1 m/s
- 0,5 m/s
- 1 m/s
- 2 m/s
- 3 m/s
- 4 m/s

sens du courant →

modélisations effectuées avec : GEOWAVE modifié

grille bathymétrique obtenue à partir des données du SHOM, IFREMER et GEBCO

fond des cartes : image satellite LANDSAT, ETM+ Mosaïque 2000-02-16 to 2002-02-12 EarthSat, extrait du site WEB : <http://gic/fasp.umiacs.umd.edu/8080/esi/>

système de projection : Longitude/Latitude (WGS84)

**Tsunamis : Etude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française**  
Simulation de tsunami d'origine sismique :

**scénario du séisme Maximum de la zone "Bassin de l'Ampurdan" (zone 49 du zonage sismique)**

**scénario type :**  
Séisme maximal zone 49, BASSIN DE L'AMPURDAN

coordonnées épicentrales : 41°88' N et 3°45' E  
Profondeur focale : 10 km  
Magnitude (Mw) : 6,7  
Azimut : 135° E  
Pendage : 60°  
Angle du glissement : 90°  
Dimension : 30 km x 16 km  
Rejet moyen : 0,6 m  
Mouvement : normal

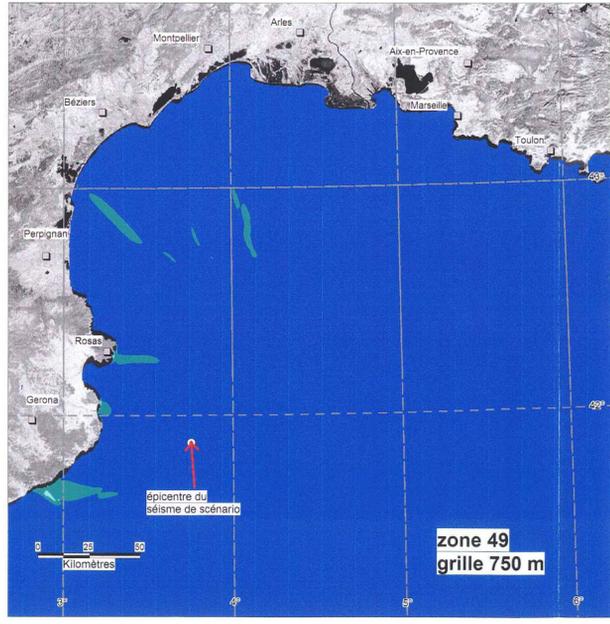
Liste des scénarios réalisés dans le cadre de l'étude :

- Zone sismique 4, Marge Nord Ligurie, M 6,5 (Planche 1)
- Zone sismique 32, Riv. Teth et marge Nord Algérienne (Planche 2)
- Zone sismique 49, bassin de l'Ampurdan, M 6,7 (Planche 3)
- Zone mouvement de terrain 2, Corse Ouest (Planche 4)
- Zone mouvement de terrain 7, Marge Nice-Vintimille (Planche 5)
- zone mouvement de terrain 16, Canyon Lacaze-Héraut (Planche 6)

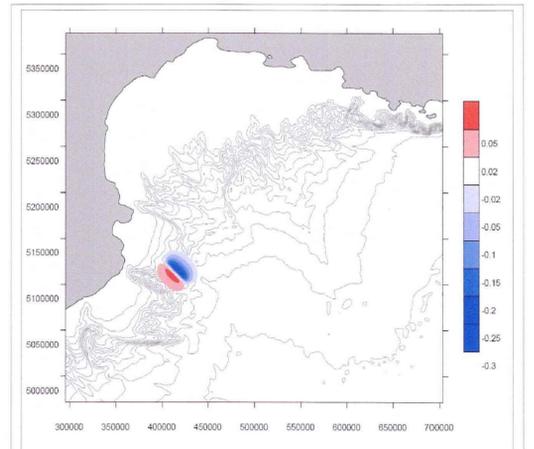
période de retour du séisme de référence estimée de plusieurs centaines à quelques milliers d'années

brgm  
Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables

planche 3  
rapport BRGM/RP-55765-Fr

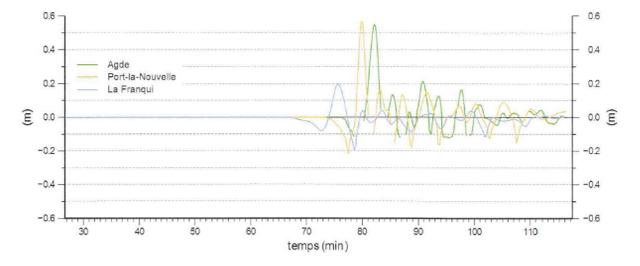


zone 49  
grille 750 m

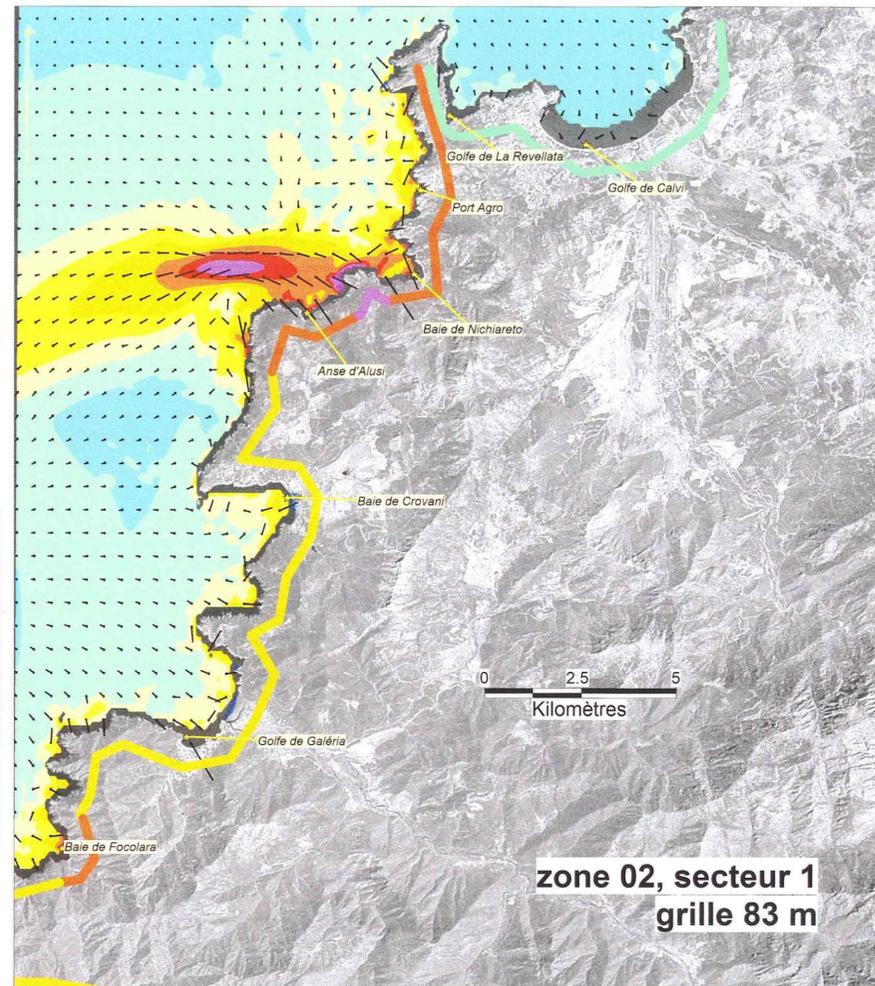
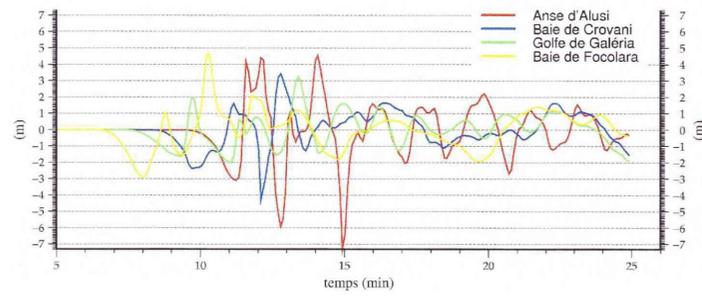
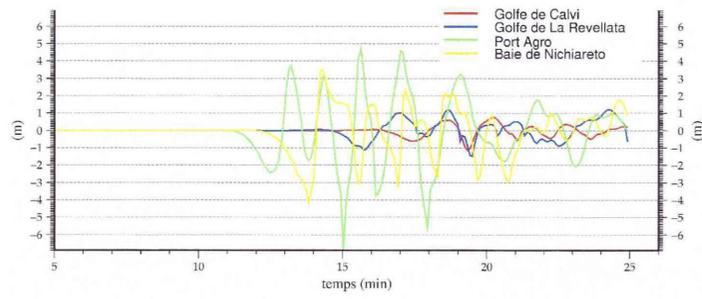


Scénario zone 49 : Cote de la surface libre (en m) à la génération du tsunami

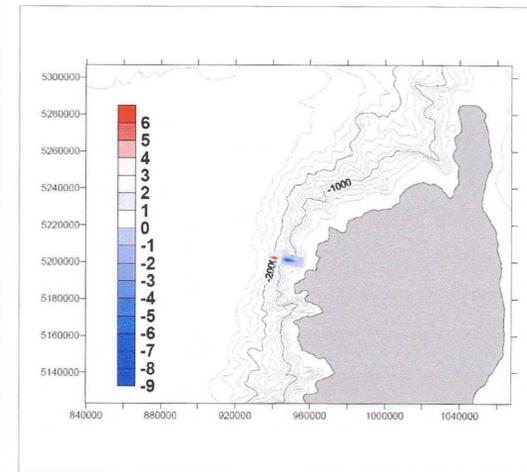
Série temporelle pour la cote de la surface libre, localisation des points de référence sur la carte jointe



Série temporelle pour la cote de la surface libre,  
localisation des points de référence sur la carte jointe

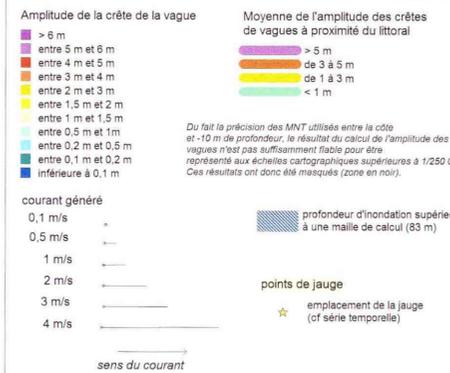


zone 02, secteur 1  
grille 83 m



Scénario zone 02 :  
Cote de la surface libre (en m) à la génération du tsunami

Légende des cartes

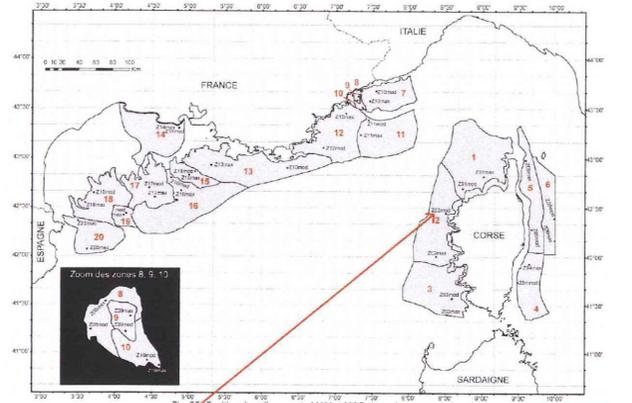


Du fait la précision des MNT utilisés entre la côte et -10 m de profondeur, le résultat du calcul de l'amplitude des vagues n'est pas suffisamment fiable pour être représenté aux échelles cartographiques supérieures à 1/250 000. Ces résultats ont donc été masqués (zone en noir).



Tsunamis : Etude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française  
Simulation de tsunami d'origine gravitaire :

Scénario de glissement de terrain G\_MOD, zone "Corse Nord-Ouest"  
(zone 02 du zonage des mouvements de terrain sous marins)



scénario type :  
Glissement G\_MOD  
zone 02, CORSE OUEST

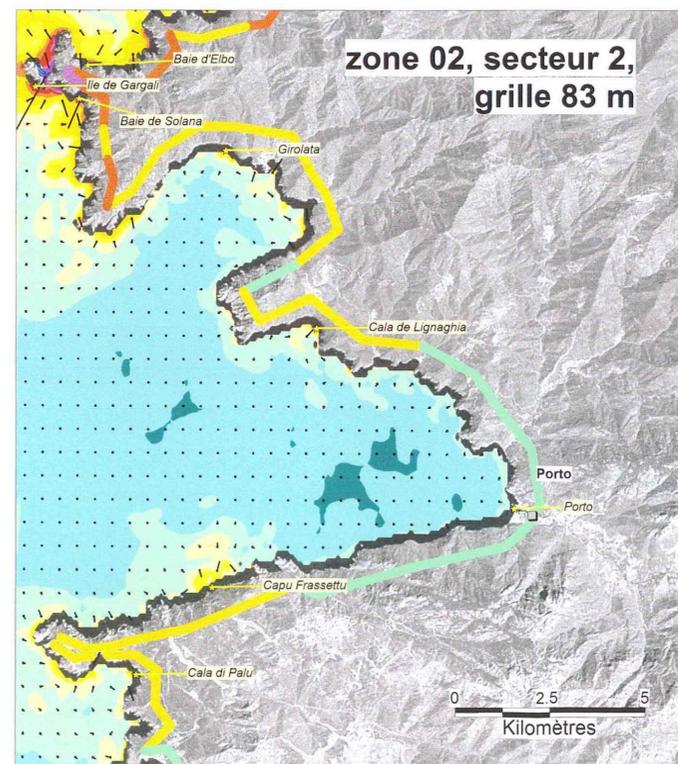
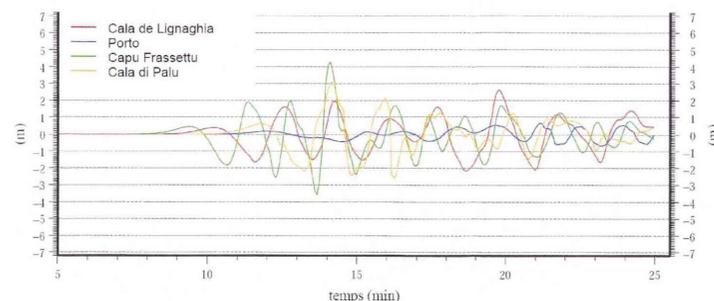
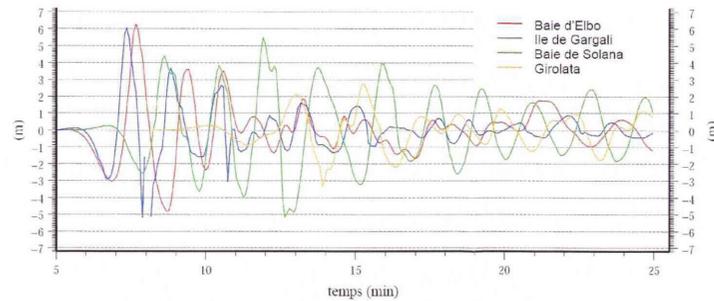
coordonnées centrales de la zone : 42°46' N et 8°50' E  
longueur : 5 000 m  
largeur : 1 500 m  
volume : 750 millions de m<sup>3</sup>  
pente moyenne : 13°  
direction : 280°N  
distance parcourue (run-out) : 5 000 m

- Liste des scénarios réalisés dans le cadre de l'étude :
- Zone sismique 4, Marge Nord Ligure, M 6,8 (Planche 1)
  - Zone sismique 32, Rif Tail et marge Nord Algérienne (Planche 2)
  - Zone sismique 49, bassin de l'Impardon, M 6,7 (Planche 3)
  - Zone mouvement de terrain 2, Corse Ouest (Planche 4)
  - Zone mouvement de terrain 7, Marge Nice-Vintimille (Planche 5)
  - zone mouvement de terrain 18, Canyon Lacaze-Hérault (Planche 6)

période de retour du glissement de référence estimée de plusieurs centaines à quelques milliers d'années

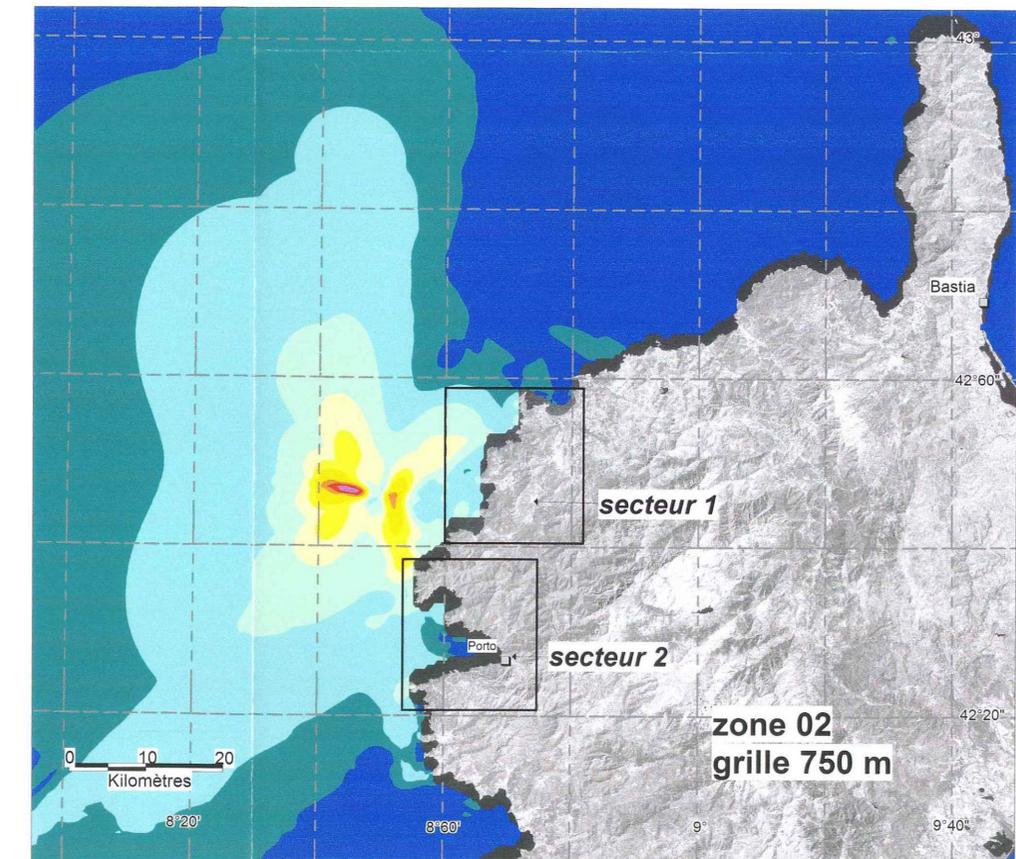


Série temporelle pour la cote de la surface libre,  
localisation des points de référence sur la carte jointe

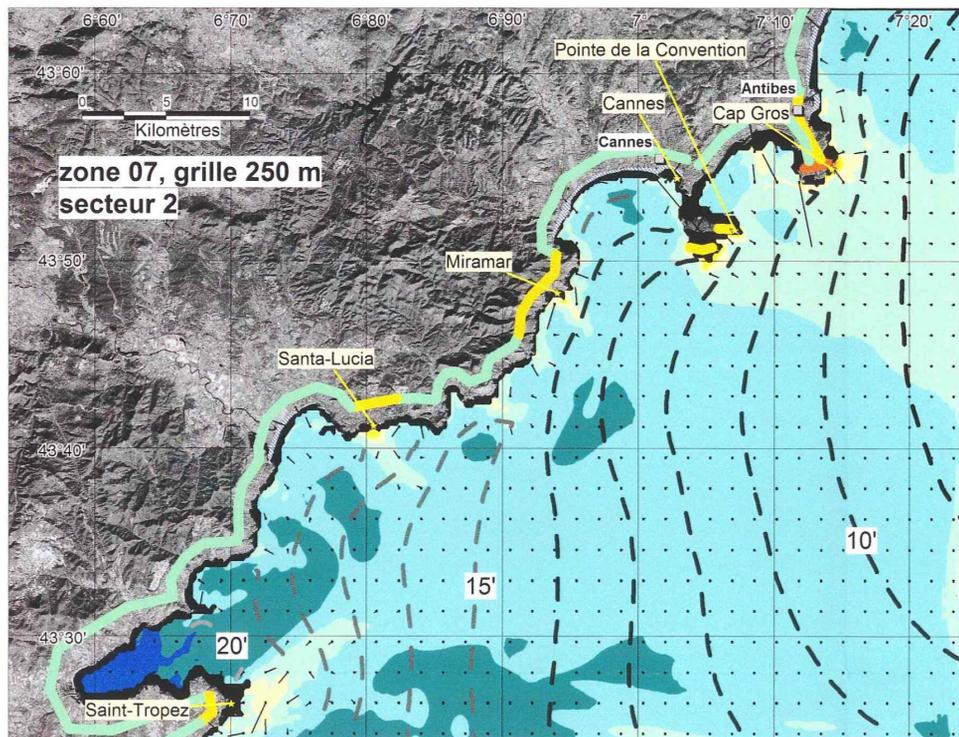
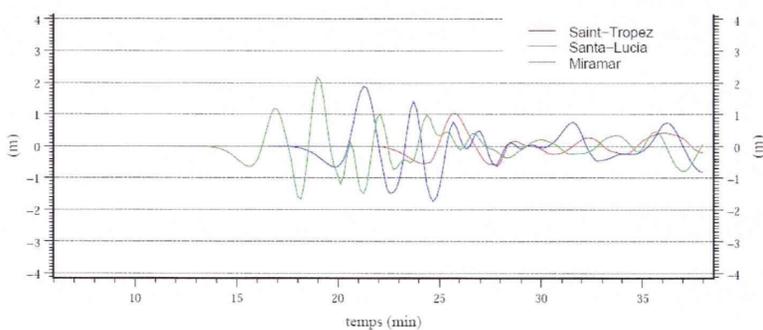
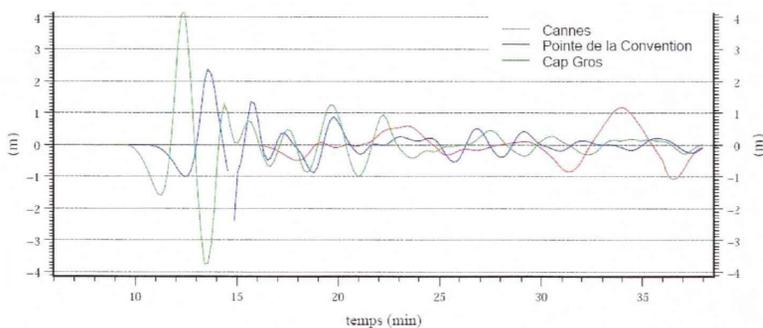
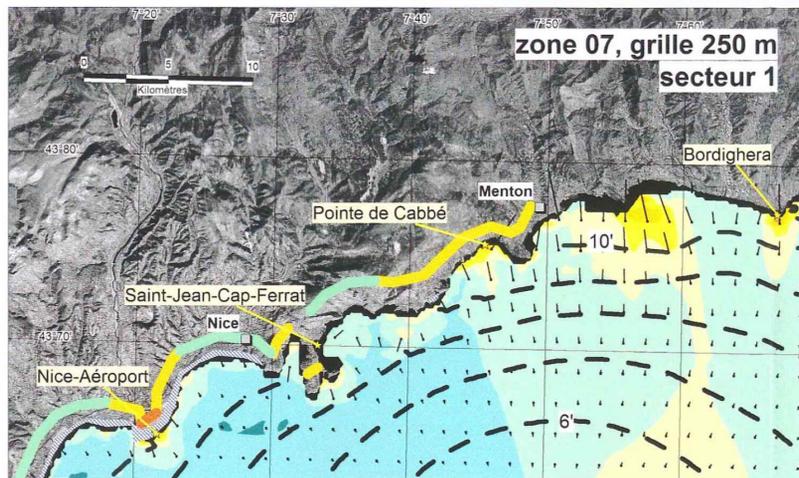
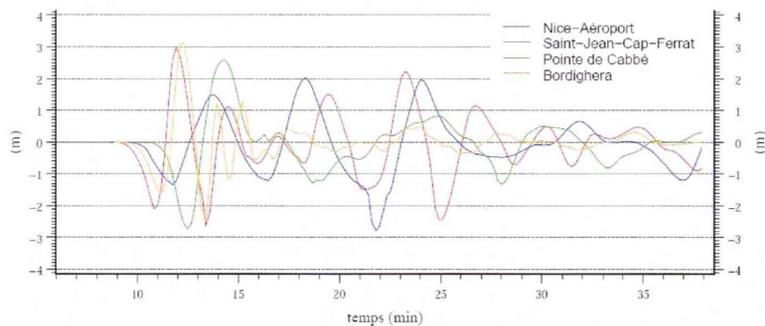


zone 02, secteur 2,  
grille 83 m

modélisations effectuées avec : GEOWAVE modifié  
grille bathymétrique obtenue à partir des données du SHOM, IFREMER et GEBCO  
fond des cartes : image satellite LANDSAT, ETM+ Mosaics 2000-02-16 to 2002-02-12 EarthSat, extrait du site WEB : <http://glcfapp.umiacs.umd.edu/8080/esdi/>  
système de projection : Longitude/Latitude (WGS84)



Série temporelle pour la cote de la surface libre, localisation des points de référence sur les cartes jointes



**Amplitude de la crête de la vague**

- > 6 m
- entre 5 m et 6 m
- entre 4 m et 5 m
- entre 3 m et 4 m
- entre 2 m et 3 m
- entre 1,5 m et 2 m
- entre 1 m et 1,5 m
- entre 0,5 m et 1 m
- entre 0,2 m et 0,5 m
- entre 0,1 m et 0,2 m
- inférieure à 0,1 m

**Moyenne de l'amplitude des crêtes de vagues à proximité du littoral**

- > 5 m
- de 3 à 5 m
- de 1 à 3 m
- < 1 m

**profondeur d'inondation supérieure à une maille de calcul (250 m)**

**temps d'arrivée de la vague de tsunami en minute**

- 30' à 40'
- 25' à 30'
- 20' à 25'
- 15' à 20'
- 10' à 15'
- < 10'

**points de jauge**

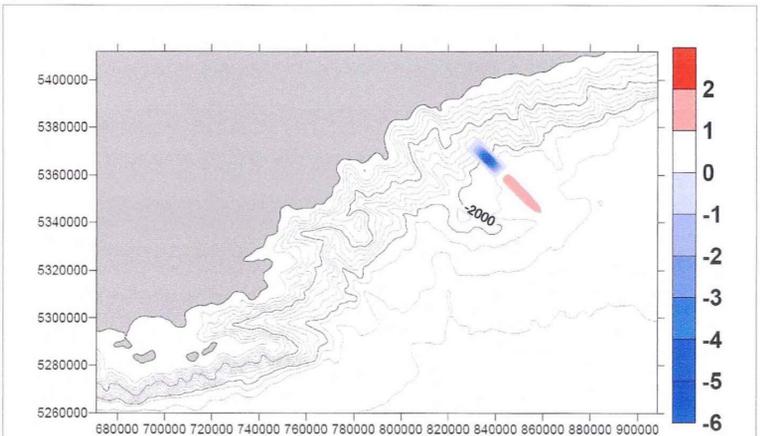
- emplacement de la jauge (cf série temporelle)

**courant**

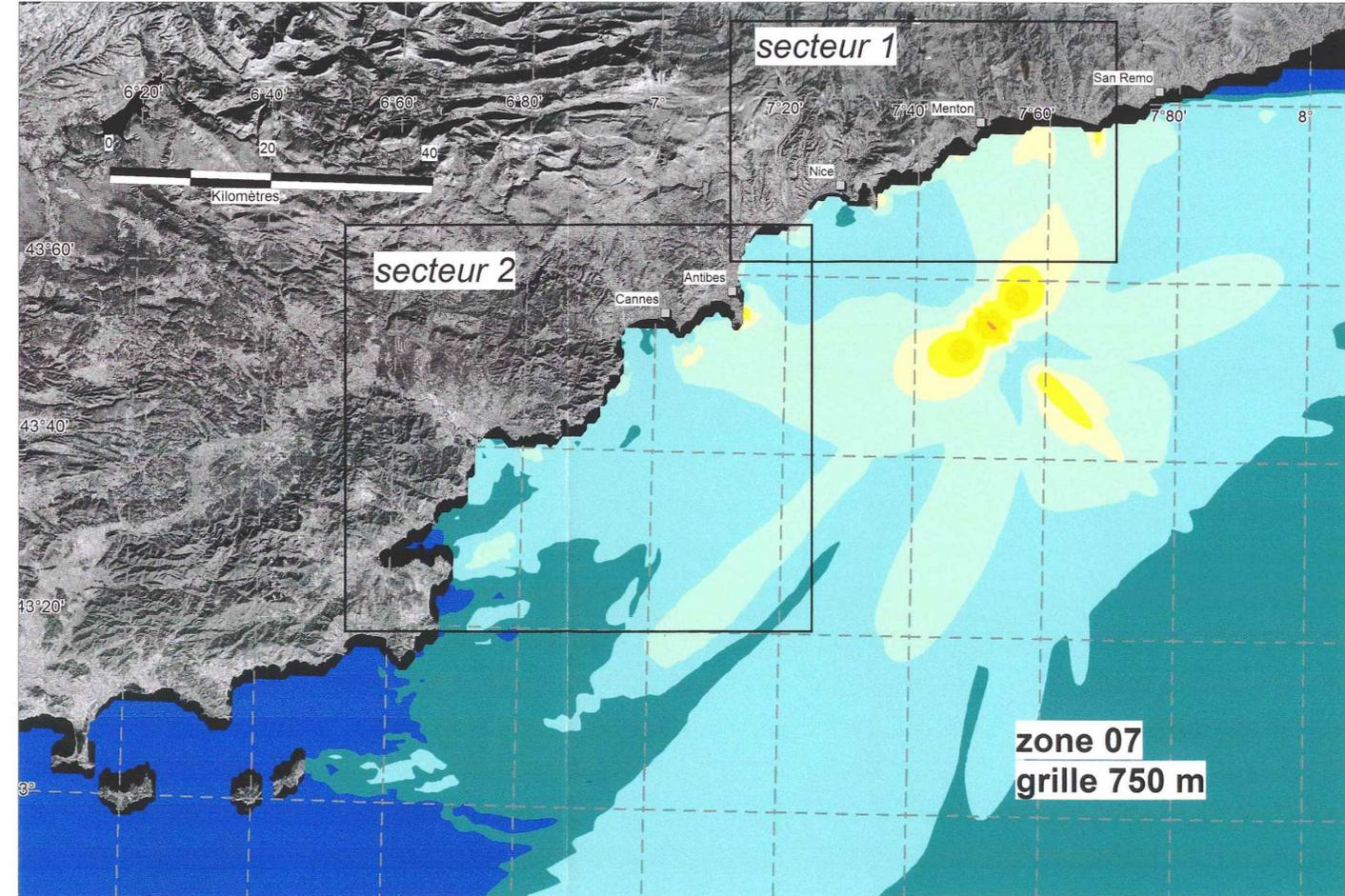
- 0,1 m/s
- 0,5 m/s
- 1 m/s
- 2 m/s
- 3 m/s
- 4 m/s

**Légende des cartes**

- modélisations effectuées avec : GEOWAVE modifié
- grille bathymétrique obtenue à partir des données du SHOM, IFREMER et GEBCO
- fond des cartes : image satellite LANDSAT, ETM+ Mosaics 2000-02-16 to 2002-02-12 EarthSat, extrait du site WEB : <http://gicfapp.umiacs.umd.edu:8080/esd/>
- système de projection : Longitude/Latitude (WGS84)



Scénario zone 07 : Cote de la surface libre (en m) à la génération du tsunami



**Tsunamis : Etude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française**

**Simulation de tsunami d'origine gravitaire :**

**Scénario du Mouvement moyen, G\_MAX "Nice - Vintimille"**

**(zone 07 du zonage des mouvements de terrain sous-marins)**

**scénario type : Glissement G\_MAX zone 07, NICE-VINTIMILLE**

coordonnées centrales de la zone : 43°59' N et 7°46' E  
 longueur : 5 000 m  
 largeur : 2 000 m  
 hauteur : 200 m  
 volume : 1 000 millions de m<sup>3</sup>  
 pente moyenne : 12°  
 direction : 135°N  
 profondeur : 1 650 m

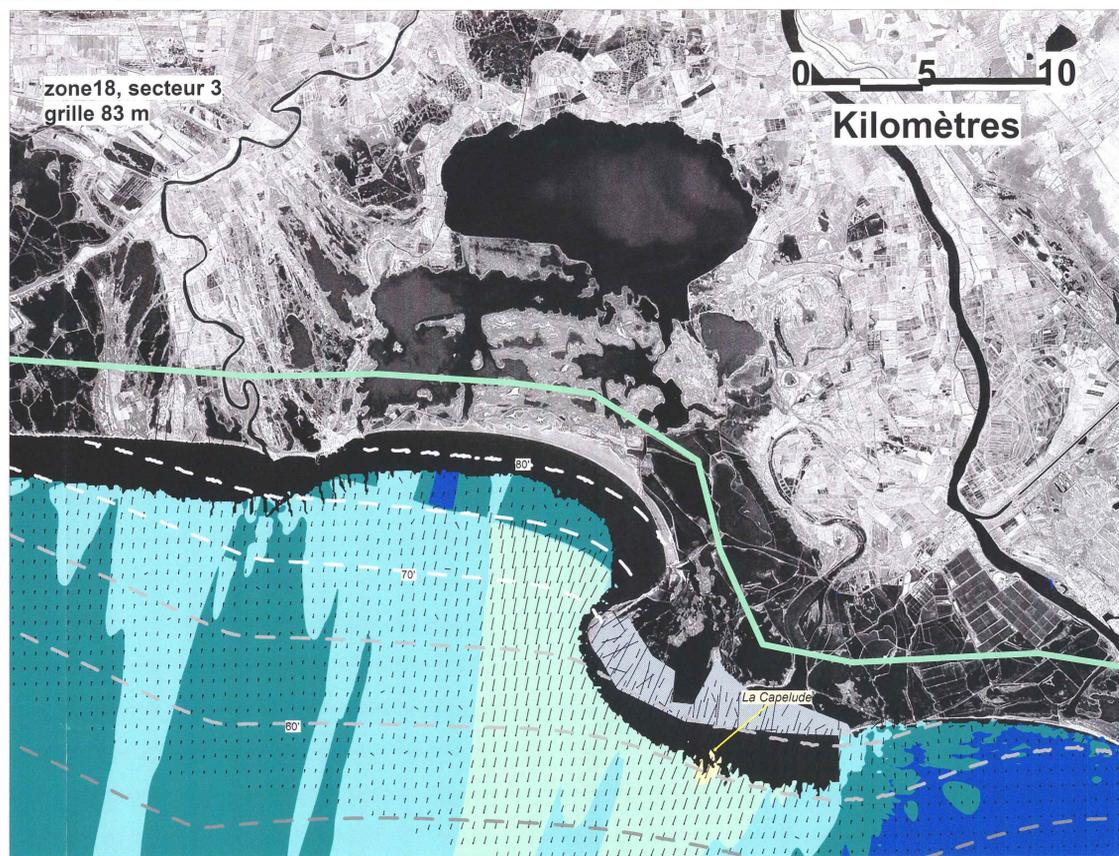
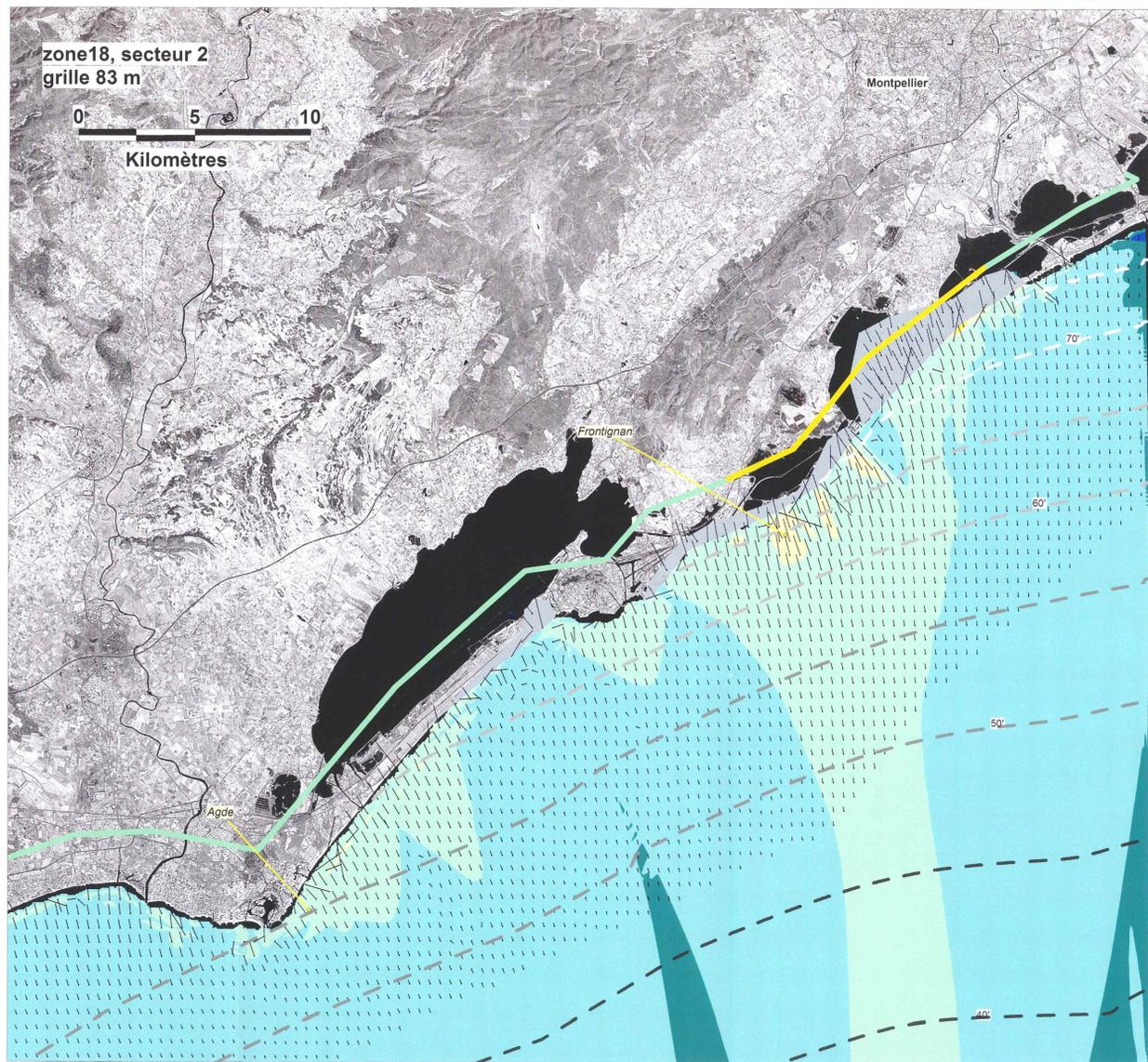
Liste des scénarios réalisés dans le cadre de l'étude :

- Zone sismique 4, Marge Nord Ligur, M 6,8 (Planche 1)
- Zone sismique 32, Rif Tell et marge Nord Algérienne (Planche 2)
- Zone sismique 49, bassin de l'Ampurdan, M 6,7 (Planche 3)
- Zone mouvement de terrain 2, Corse Ouest (Planche 4)
- Zone mouvement de terrain 7, Marge Nice-Vintimille (Planche 5)
- zone mouvement de terrain 18, Canyon Lacaze-Hérault (Planche 6)

**BRGM** Géosciences pour une Terre durable

Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Aménagement Durable

Planche 5  
Rapport BRGM/RP-55765-Fr



**Tsunamis : Etude de cas au niveau de la côte méditerranéenne française**  
Simulation de tsunami d'origine gravitaire :  
Scénario de glissement de terrain G\_MOD, zone "Canyon Lacaze-Hérault"  
(zone 18 du zonage des mouvements de terrain sous marins)

scénario type :  
Glissement moyen  
zone 18, CANYON LACAZE-HERAULT

coordonnées centrales de la zone : 42°66' N et 3°72' E  
longueur : 2 000 m  
largeur : 1 500 m  
hauteur : 55 m  
volume : 55 millions de m<sup>3</sup>  
pente moyenne : 10°  
direction : 80°N  
profondeur : 300 m

periode de retour du glissement de référence estimée de plusieurs centaines à quelques milliers d'années

Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables  
brgm  
Planche 6  
Rapport BRGM/RP-55765-Fr

