

Document public



Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte antillaise française



Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte antillaise française

Liste des rapports

Réalisation d'un zonage sismique de la plaque Caraïbe préalable aux choix des scénarios de tsunamis aux Antilles françaises - Rapport intermédiaire (Terrier M., 2007, Rapport BRGM/RP - 55376–Fr)

Etude de cas au niveau de la côte antillaise française : Synthèse bibliographique sur les mouvements de terrain tsunamigènes aux Antilles – Rapport intermédiaire (Poisson B., Rapport BRGM/RP – 55783-FR)

Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte antillaise française - Modélisation numérique – Rapport intermédiaire (Poisson B. et Pedreros R., Rapport BRGM/RP–55761–Fr)

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

Document public



Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte antillaise française

Rapport de synthèse

BRGM/RP -55795-FR

Décembre 2007

Convention MEDAD-BRGM n° CV 05000 195





Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte antillaise française

Rapport de synthèse

BRGM/RP -55795-FR

Décembre 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2006 – PSP06ARN81

Convention MEDAD-BRGM n° CV 05000 195

Pedrerros R., Terrier M. 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.

Mots clés : tsunami, Antilles, aléa, scénario, modélisation, séisme, glissement sous-marin, éruption volcanique

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

Pedreros R., Terrier M., Poisson B. (2007) – Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte antillaise française - Rapport de synthèse, Rapport BRGM-RP-55795-Fr, 74p., 17 fig, 2 tabl., 8 planches H.T.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

AVERTISSEMENT

Cette étude a été conduite par le BRGM à la demande du ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables (MEDAD). Elle porte sur une première appréciation de l'aléa « tsunami » sur les côtes françaises du bassin caribéen, la Guyane faisant l'objet d'un complément ultérieur.

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 probables. Cependant, les phénomènes volcaniques ne sont pas susceptibles de se reproduire dans des conditions identiques sauf en ce qui concerne Montserrat et d'autres scénarios seraient à envisager.

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 à partir 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 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 une étude « Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte antillaise 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 événements tsunamigéniques ayant pu affecter la côte française restent encore très rares (démarrage de la recherche historique systématique en France 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'événements 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 des événements les plus forts possibles par rapport aux tsunamis susceptibles d'être générés. C'est à partir de ces résultats qu'une première interprétation en termes de susceptibilité de la côte à être touchée par un tsunami pouvait être menée.

- La présente étude concerne les côtes antillaises françaises, en particulier celles de la Martinique et de l'Archipel de la Guadeloupe.

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 au niveau de la plaque caraïbe, et en limite avec les plaques Amérique,
- d'origine volcanique et mouvements de terrain.

2) une seconde phase de simulation de scénarios a priori 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 de la plaque caraïbe,
- la détermination des événements d'origine gravitaires pouvant affecter les côtes antillaises françaises,
- 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 1/150 000^{ème}.

Ces résultats sont décrits en détail dans les rapports joints à cette synthèse (rapports BRGM RP-55376-FR, RP-55783-FR et RP-55761-FR).

• Sur la base d'un zonage sismique et de la caractérisation événementielle des mouvements de terrain, 8 scénarios ont été retenus. Il s'agit de :

- 5 scénarios de séismes :
 - Séisme localisé au niveau du système de failles normales du graben de Marie-Galante, et de magnitude 7,5,
 - Séisme situé dans le prisme de Barbuda, c'est-à-dire au niveau de la zone de subduction de la plaque Nord Amérique sous la plaque Caraïbe, et de magnitude 8,3,
 - Séisme de magnitude 7,5 (Îles Vierges, 1867), attribué au jeu normal d'une faille NE-SW qui structure le graben d'Anegada,
 - Séisme attribué à un jeu senestro-inverse d'une faille NW-SE de la ride de Sainte-Lucie, et de magnitude 7,6,
 - Séisme localisé dans le prisme d'accrétion de la Barbade, généré par le mouvement inverse de failles parallèles au front de subduction de la plaque Sud Amérique sous la plaque Caraïbe, et de magnitude de 7,1.
- 3 scénarios de mouvements de terrain sub-aériens :
 - Évènement 2003 de Soufrière-Hills (Montserrat), correspondant à l'effondrement du dôme volcanique. La fraction de volume de débris entrant dans la mer est estimée à 16 millions de m³,
 - Évènement 1902 de la Montagne Pelée (Martinique), associé à la pénétration en mer d'un lahar d'un volume d'environ 5 millions de m³,
 - Paléo-évènement de La-Soufrière (Guadeloupe) relatif à la déstabilisation de flanc du volcan de la Soufrière vers 3100 bp. Le matériau entrant en mer est estimé à 70 millions de m³.

Le détail des simulations associées à ces 8 scénarios est exposé dans le rapport BRGM/RP-55761-Fr. Ci-après les principaux résultats :

scénario	Magnitude ou volume	Amplitude maximale des vagues au rivage	Temps d'arrivée	Secteur côtier français concerné (amplitude > 0,5 m)
Séisme Graben de Marie-Galante	M = 7,5	> 3,5 m à Sainte-Marie, en MTQ	10' à 15'	<ul style="list-style-type: none"> • Nord-Est Martinique • Sud La Désirade • Sud Grande-Terre, GPE
		~ 5 m La Désirade	13' à 15'	
		~ 3 m Sainte Anne, en GPE	± 15'	
Séisme de Barbuda	M = 8,3	≥ 8 m à Le Moule, Anse-Bertrand, Clugny, en GPE	20' à 40'	<ul style="list-style-type: none"> • Toute la côte de Grande-Terre et côte Nord de Basse Terre, GPE • Ouest de la Désirade • Côtes Nord-Est de MTQ
		6 m au Marigot, en MTQ 4 m à La Trinité, en MTQ	35' à 45'	
Séisme du Passage d'Anegada	M = 7,5	> 1 m à Deshaies, en GPE	60'	Nord-Ouest de Basse-Terre, en GPE
Séisme de la ride de Sainte-Lucie	M = 7,6	~1 m à Grande-Terre, Sud-Est de Basse Terre, et Marie-Galante	20' à 30'	Côte Sud et Est de Grande-Terre, Sud-Est de Basse-Terre, Marie-Galante
		> 2 m à la Désirade	20'	Côte Sud de la Désirade
		> 3 m au Marigot et la Trinité, en MTQ	15' à 30'	Côte Est de MTQ
Séisme du prisme de la Barbade	M = 7,1	< 0,5 Le François	15' à 20'	Côte sud Martinique
Évènement 2003 de Soufrière-Hills, Montserrat	Avalanche de débris, v=0,016 km ³	> 0,5 m à Deshaies et Malendure	12' à 15'	Côte Nord et Ouest Basse-Terre, GPE
Évènement de 1902, Montagne Pelée, Martinique	Lahars, v= 0,005 km ³	> 3 m Saint-Pierre	< 2'	Côte Nord-Ouest de Martinique
Évènement de La-Soufrière, Guadeloupe	Avalanche de débris, v=0,07 km ³	> 3 m à Trois Rivières et Basse-Terre	< 5'	Côte Sud et Ouest de Basse-Terre, Les Saintes, côte Ouest Marie-Galante

Cette évaluation préliminaire régionale s'appuie sur les résultats des calculs qui ont au mieux une précision cartographique de l'ordre du 1/100 000^{ème} (calculs sur des grilles de 100 m x100 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^{ème} au 1/25 000^{ème}) 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.

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^{ème} au 1/25 000^{ème}) s'avèreraient nécessaire.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. CONTEXTE GENERAL	11
1.2. STRUCTURE DU PROJET	11
2. Zones sources tsunamigéniques	15
2.1. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES ZONES SOURCES SISMIQUES	15
2.1.1. Contexte	15
2.1.2. La démarche.....	15
2.2. EVENEMENTS HISTORIQUES MAJEURS D'ORIGINE VOLCANIQUE	23
2.2.1. Contexte	23
2.2.2. La démarche.....	23
2.2.3. Le choix des scénarios	23
3. Données bathymétriques et construction des MNT	25
3.1. DONNEES TOPO-BATHYMETRIQUES INITIALES	25
3.2. CONSTRUCTION DES GRILLES NECESSAIRES AUX SIMULATIONS	27
4. Description du code de simulation	31
5. Incertitudes liées à la bathymétrie	33
5.1. LACUNES DANS LES DONNEES	33
5.2. INFLUENCE DE L'ERREUR D'INTERPOLATION DU MNT	33
5.3. INFLUENCE DE LA DENSITE DU MAILLAGE	35
6. Résultats des simulations	37
6.1. SIMULATIONS DES TSUNAMIS HISTORIQUES.....	38
6.2. SIMULATIONS DES TSUNAMIS D'ORIGINE SISMIQUE	38
6.2.1. Scénario de séisme maximal de la zone 02, Graben de Marie-Galante (Planche 1 ht)	39

6.2.2. Scénario de séisme maximal de la zone 12, zone de subduction de Barbuda (Planche 2 ht)	40
6.2.3. Scénario de séisme maximal de la zone 29, Passage d'Anegada – Îles Vierges 1867 (Planche 3 ht).....	40
6.2.4. Scénario de séisme maximal de la zone 30, Ride de Sainte-Lucie (Planche 4 ht).....	40
6.2.5. Scénario de séisme maximal de la zone 34, Prisme d'accrétion de la Barbade (Planche 5 ht)	41
6.3. SIMULATIONS DES TSUNAMIS D'ORIGINE VOLCANIQUE	53
6.3.1. Scénario de Soufrière-Hills à Montserrat , évènement de 2003	53
6.3.2. Scénario la Montagne Pelée, évènement 1902	53
6.3.3. Scénario de la Soufrière en Guadeloupe, paléoévènement (3100 BP) ...	53
7. Conclusion.....	59
7.1. LES RESULTATS	59
7.1.1. Identification des sources tsunamigéniques	59
7.1.2. Les scénarios de tsunamis.....	59
7.2. LES PERSPECTIVES	60
8. Références bibliographiques citées.....	63

Liste des illustrations

Figure 1 – Les travaux réalisés dans le cadre du projet d'étude préliminaire de l'aléa tsunamis des Antilles françaises.....	13
Figure 2 - Carte des zones sources sismiques de la plaque Caraïbe (d'après Terrier, 2007)	19
Figure 3 - Semis de points de sonde d'une densité maximale de 50 mètres, extrait de la base SHOM (mise à jour février 2006)	26
Figure 4 – Extrait du fichier GEBCO : bathymétrie avec une maille moyenne de 1'x1' (d'après http://www.gebco.net/).	28
Figure 5 - MNT de l'Archipel de la Guadeloupe (en haut) et la Martinique (en bas) construits à partir des données du SHOM. Maillage de 100 mx100 m	29
Figure 6 - Carte de la différence d'élévation maximale du plan d'eau entre la simulation de référence et la simulation sur bathymétrie perturbée à [-2m ;+2m].	34
Figure 7 - Séries temporelles de la cote de la surface libre calculée au niveau de l'entrée du glissement dans la mer et à Saint-Pierre. On a indiqué entre crochets la valeur de la bathymétrie au capteur, perturbée ou non.....	35
Figure 8 - Caractéristiques des tsunamis au niveau du rivage (d'après Poisson et Pedreros, 2007)	37
Figure 9 - Choix des scénarios de sources sismiques.	39
Figure 10 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 02, « Graben de Marie-Galante » (réduction de la planche 1 h.t.)	43
Figure 11 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 12, « Barbuda » (réduction de la planche 2 h.t.).....	45
Figure 12 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 29, « Passage d'Anegada » (réduction de la planche 3 h.t.).....	47
Figure 13 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 30, « Ride de Sainte Lucie » (réduction de la planche 4 h.t.)	49
Figure 14 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 34, « Prisme d'accrétion de la Barbade » (réduction de la planche 5 h.t.)	51
Figure 15 - Résultat de la simulation de l'évènement volcanique La Soufrière-Hills, Montserrat, 2003 (réduction de la planche 6 h.t.)	53
Figure 16 - Résultat de la simulation de l'évènement volcanique Montagne Pelée, Martinique, 1902 (réduction de la planche 7 h.t.).....	55
Figure 17 - Résultat de la simulation du paléo-évènement (3100BP) de la Soufrière, Guadeloupe (réduction de la planche 8 h.t.).....	57

Liste des tableaux

Tableau 1- Synthèse des caractéristiques des zones sources sismiques proposées pour le zonage de la plaque Caraïbe (d'après Terrier, 2007)	21
Tableau 2 - Principales caractéristiques de GEOWAVE.....	32

Liste des planches hors texte

- Planche 1 : Scénario du séisme maximal de la zone 02 « Graben de Marie-Galante »
- Planche 2 : Scénario du séisme maximal de la zone 12 « Zone de subduction de Barbuda »
- Planche 3 : Scénario du séisme maximal de la zone 29 « Passage d'Anegada »
- Planche 4 : Scénario du séisme maximal de la zone 30 « Ride de Sainte-Lucie »
- Planche 5 : Scénario du séisme maximal de la zone 34 « Prisme d'accrétion de la Barbade »
- Planche 6 : Scénario du mouvement de terrain de « Soufrières-Hills à Montserrat , évènement de 2003 »
- Planche 7 : Scénario du mouvement de terrain de « la Montagne Pelée, évènement 1902 »
- Planche 8 : Scénario du mouvement de terrain de « Soufrière en Guadeloupe, paléoévènement (3100 BP) »

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

Le présent travail concerne le littoral des Antilles françaises, Martinique et archipel de Guadeloupe.

1.2. STRUCTURE DU PROJET

Le projet a été articulé autour de deux parties :

1) La caractérisation des sources tsunamigéniques des côtes antillaises françaises

Les mécanismes de génération considérés sont l'activité sismique et les mouvements de terrain liés à l'activité volcanique. Les séismes peuvent constituer des sources tsunamigènes 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 étaient :

a) Sources lointaines

- La recherche et la consultation des zonages sismiques nationaux et des catalogues de sismicité,
- L'interprétation et la localisation des principales zones sismiques marines,
- La caractérisation des zones sismiques.

b) Sources proches

- La consultation des documents sismotectoniques,
- La localisation et la caractérisation des zones sismiques,
- La localisation des mouvements de terrain sous marins ou aériens de grande ampleur,
- L'estimation des volumes déstabilisés.

2) Simulation numérique des tsunamis

- Le choix d'évènements de référence (a priori, 3 lointains et 3 proches),
- L'acquisition et préparation des données bathymétriques,
- Le choix des modèles numériques de simulation de tsunami,
- 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'inondation éventuelle.

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

- Terrier M. (2007) - Réalisation d'un zonage sismique de la plaque Caraïbe préalable aux choix des scénarios de tsunamis aux Antilles françaises - Rapport intermédiaire, Rapport BRGM/RP - 55376–Fr
- Poisson, B. (2007) - Etude préliminaire de l'aléa tsunami aux Antilles : synthèse bibliographique sur les mouvements de terrain tsunamigéniques aux Antilles. Rapport BRGM/RP-55783-FR
- Poisson, B. et Pedreros, R (2007) - Tsunamis étude de cas au niveau de la côte antillaise française - Modélisation numérique des tsunamis. Rapport BRGM/RP–55761–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).

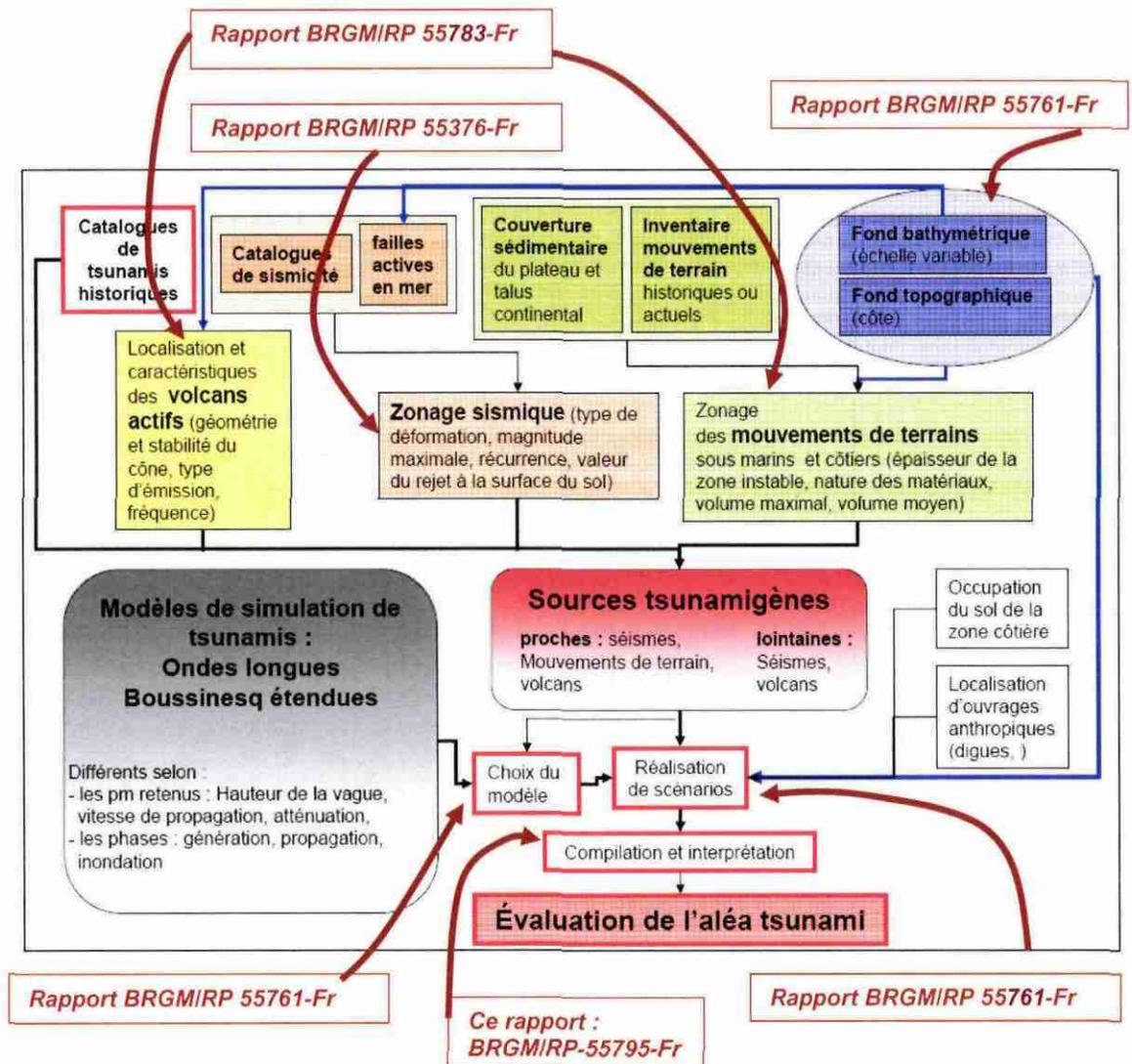


Figure 1 – Les travaux réalisés dans le cadre du projet d'étude préliminaire de l'aléa tsunamis des Antilles françaises

2. Zones sources tsunamigéniques

2.1. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES ZONES SOURCES SISMIQUES

2.1.1. Contexte

Plusieurs grands séismes localisés à proximité de la Jamaïque ou de Haïti ont pu générer des tsunamis qui ont atteint les côtes antillaises françaises, c'est-à-dire à plus de 1000 km de l'épicentre [Base tsunamis-France (BRGM, en cours), Zahibo et Pelinovsky (2001), Lander et al. (2002), McCann (2004, inédit)]. Pour cette raison, dans le cadre de l'analyse des sources sismiques tsunamigènes nous nous sommes intéressés à l'ensemble de la plaque caraïbe pour l'identification des zones sources sismiques.

2.1.2. La démarche

Le travail d'identification et de caractérisation des sources sismiques tsunamigéniques a pu être réalisé grâce à la compilation et l'analyse :

- de bases de données et publications relatives à la sismicité de la plaque Caraïbe et en limite de plaques (données instrumentales, historiques, mécanismes au foyer),
- des publications relatives à la tectonique de l'arc des Petites Antilles, de l'Amérique Centrale et des Grandes Antilles,
- des informations bathymétriques,
- du zonage sismique probabiliste de la France réalisé en 2002 (Combes et al., 2002).

Le zonage et la caractérisation des zones sismiques ont été réalisés en suivant une démarche de type déterministe.

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 épicentres et de profondeur des foyers, chaque zone sismique est caractérisée par une intensité épiscopentrale 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.

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

- 1) les principales caractéristiques tectonique et sismiques,
- 2) le séisme le plus fort enregistré ou indiqué dans les archives,
- 3) les valeurs du séisme maximal retenues pour l'étude (magnitude, dimension du plan de faille rompu, glissement).

Les résultats du zonage

Le périmètre de l'étude concerne la plaque Caraïbes et ses zones frontalières avec les plaques Amérique du Nord, Amérique du Sud, Cocos et Nazca. Au total 32 zones sismiques ont été individualisées (Figure 2) et caractérisées par un type de déformation principal et un séisme maximal de référence.

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 rompu 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, 5 séismes de scénarios ont été retenus. Il s'agit a priori des scénarios les plus pénalisants pour la côte antillaise française.

- Séisme de scénario zone 2, « Marie - Galante », $M_{max} = 7.5$.
- Séisme de scénario zone 12, « Prisme d'accrétion Barbuda », $M_{max} = 8.3$.

- Séisme de scénario zone 29, « Passage d'Anegada – Îles Vierges 1867 », $M_{max} = 7.5$.
- Séisme de scénario zone 34, « La Barbade », $M_{max} = 7.1$.
- Séisme de scénario zone 30, « Ride de Sainte-Lucie », $M_{max} = 7.6$.

Si l'on se réfère aux travaux de Feuillet (2000) sur la vitesse des failles calculées pour la Guadeloupe ainsi qu'à ceux de GeoTer (Combes et al., 2002) consacrés à l'évaluation probabiliste de l'aléa sismique, on peut estimer de l'ordre de quelques centaines à quelques milliers d'années la période de retour des très forts séismes (de magnitude supérieure à 7,0) pour ce qui concerne plusieurs failles de l'archipel guadeloupéen.

L'extrapolation de cette période de retour à celle des très forts séismes évalués au niveau des autres zones sismiques est purement hypothétique.

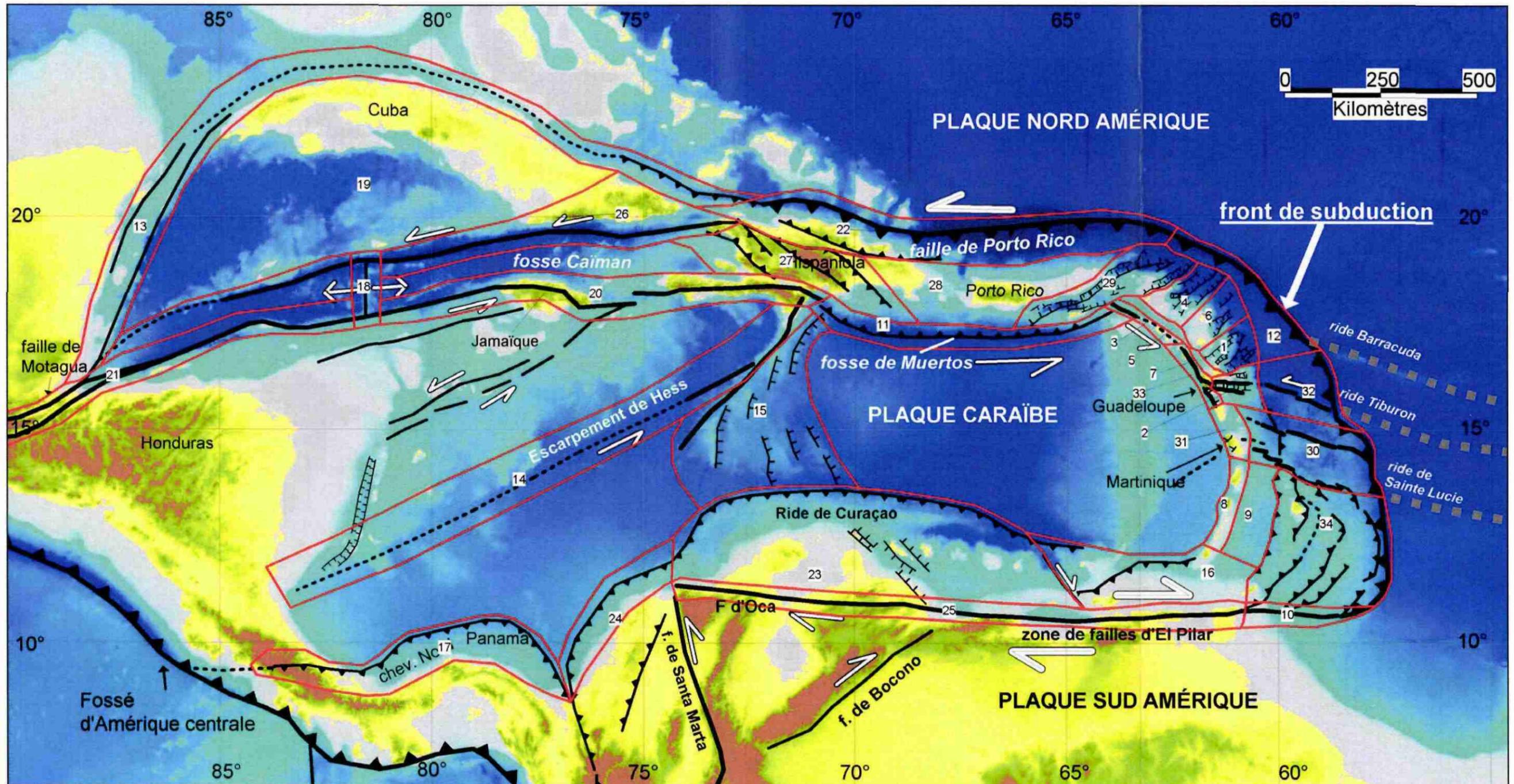


Figure 2 - Carte des zones sources sismiques de la plaque Caraïbe (d'après Terrier, 2007)

Tableau 1- Synthèse des caractéristiques des zones sources sismiques proposées pour le zonage de la plaque Caraïbe (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	Désirade	normal, failles NE-SW	7.5	2.4	97	25	4.6	133	33
2	Marie-Galante	normal, failles E-W	7.5	2.4	97	25	4.6	133	33
3	Saint Kitts - Nevis	décrochant sénestre, failles NW-SE	7.0						
4	Saint Martin- Saint Barthélémy	normal, failles NE-SW	7.5	2.4	97	25	4.6	133	33
5	Dépression Kallinago	décrochant	7.0	1.0	59	13	1.7	80	18
6	Barbuda - Antigua	normal, failles NE-SW	7.5	2.4	97	25	4.6	133	33
7	Grippons	normal, failles NW-SE	7.0	0.9	42	20	1.7	58	26
8	Arc Saint Vincent	inverse, failles NNE-SSW	6.5	0.6	22	11	1.2	31	15
9	Bassin Avant Arc Tobago	inverse, failles NNE-SSW	6.8	0.6	33	15	1.3	46	20
10	Marge Est Venezuela	décrochant-inverse	6.8						
11	fosse de Muertos	inverse, failles E-W	5.8	0.5	9	6	1.1	12	8
12	Prisme Accrétion Barbuda	inverse	8.3	8.5	286	44	16.3	394	60
13	fossé nord de Cuba	inverse	6.4	0.6	20	10	1.2	27	14
14	Escarpement de Hess ou Ride du Nicaragua	décrochant senestre, failles NE-SW	5.9	0.1	12	7	0.2	17	9
15	ride Beata	normal, failles NNE-SSW à NS							
16	Nord Venezuela	inverse décrochant	6.8	0.6	33	15	1.3	46	20
17	Panama	inverse, failles E-W	8.1	6.2	218	38	11.9	301	52
18	rift de la fosse de Caïman	décrochant	7.3						
19	bloc de Cuba	déformation intraplaque, inverse	6.4	0.6	20	10	1.2	27	14
20	fosse Caïman, faille d'Enquilliro - Plantain Garden	senestre, failles EW	7.5	2.7	120	18	4.5	163	24
21	fosse Caïman, faille bordière sud-ouest	senestre	8.0	2.7	120	18	4.5	163	24
22	Fosse de Porto Rico	inverse	8.5	5.2	191	35	10.1	262	48
23	Ride de Curaçao	inverse, failles E-W	5.7	0.5	8	5	1.0	11	7
24	Prolongement SW de la ride de Curaçao	inverse, failles NNE-SSW à NE-SW	6.5	0.6	22	11	1.2	31	15

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)
25	<i>faille d'OCA (ou transformante d'El Pilar)</i>	<i>décrochant dextre</i>	8.4						
26	<i>fosse Caïman, faille nord orientale</i>	<i>senestre, failles E-W à ENE-ESE</i>	7.9	4.5	166	33	8.6	229	45
27	<i>Ile d'Hispaniola</i>	<i>inverse, failles NW-SE</i>	7.7	0.8	111	35	1.5	153	48
28	<i>Porto-Rico et Partie Est d'Haïti</i>	<i>décrochant dextre failles NE-SW, et senestre, failles NW-SE</i>	7.5						
29	<i>Passage d'Anegada</i>	<i>normal, failles NE-SW</i>	7.5	2.4	97	25	4.6	133	33
30	<i>Ride de Ste Lucie</i>	<i>décrochant (à composante inverse ?) failles WNW-ESE</i>	7.6						
31	<i>Martinique - Dominique</i>	<i>normal, failles NE-SW ou NW-SE</i>	6.5	0.4	23	14	0.8	33	17
32	<i>Ride Tiburon</i>	<i>décrochant (à composante inverse ?) failles WNW-ESE</i>	7.6						
33	<i>Montserrat-Basse Terre</i>	<i>décrochant senestre, failles NNW-SSE</i>	7.2						
34	<i>Prisme Accrétion La Barbade</i>	<i>inverse, failles NE-SW et NW-SE</i>	7.1	0.7	50	20	1.3	69	27

2.2. EVENEMENTS HISTORIQUES MAJEURS D'ORIGINE VOLCANIQUE

2.2.1. Contexte

L'arc des Petites Antilles est constitué d'une série d'îles volcaniques s'alignant du Nord au Sud, entre la mer des Caraïbes à l'Ouest et l'océan Atlantique à l'Est. La région est ainsi susceptible de connaître des tsunamis d'origine volcanique. Deux cas principaux peuvent se présenter :

- lors d'une éruption, le matériel volcanique émis atteint la mer ;
- suite à une éruption ou non, une partie du volcan est déstabilisée et s'effondre dans la mer.

2.2.2. La démarche

L'identification et la caractérisation des événements tsunamigéniques d'origine volcanique a été réalisée à partir d'une étude bibliographique consacrée :

- Aux paléo-événements d'effondrements de grande ampleur, dont témoignent les structures volcaniques subaériennes et parfois, les dépôts d'avalanches de débris détectés dans les données sous-marines. Ces paléo-événements ont pour une grande part été identifiés à partir des données recueillies par la campagne de géophysique marine Aguadomar, réalisée en décembre 1998–janvier 1999 dans l'arc des Petites Antilles (Deplus et al., 2001). Ces données ont permis la reconnaissance des dépôts sous-marins d'avalanches de débris autour des îles volcaniques de l'arc de subduction, et particulièrement dans le bassin de Grenade.
- Aux éruptions historiques ayant généré des tsunamis, principalement du fait de l'entrée dans la mer d'écoulements pyroclastiques.

2.2.3. Le choix des scénarios

Sur la base de cette recherche bibliographique, trois scénarios de tsunamis générés par mouvements de terrain ont été retenus. Deux de ces scénarios sont basés sur des événements historiques d'éruptions ayant généré des tsunamis par entrée d'avalanche de débris ou de lahar dans la mer, tandis que le troisième repose sur un événement de déstabilisation de volcan de grande ampleur tel que ceux décrits comme paléo-événements dans la littérature.

Les trois scénarios sont les suivants :

- l'évènement de Montserrat, de juillet 2003, bien documenté par Herd et al. (2005) ; la fraction de volume de débris dont l'entrée dans la mer aurait généré le tsunami est estimée à 16 millions de m³.
- l'éruption de la Montagne Pelée, en mai 1902 ; dans ce cas, le volume du lahar ayant généré le tsunami est estimé à environ 5 millions de m³.
- l'entrée dans la mer d'une partie du matériel effondré dans le cas d'une déstabilisation de flanc de la Soufrière en Guadeloupe. Nous reprendrons dans ce cas les caractéristiques de l'avalanche de débris modélisée par Le Friant et al. (2006). Cette modélisation se base sur un paléo-évènement daté de 3100 ans B.P., une nouvelle survenance dans le futur de ce type d'évènement n'étant pas exclue.

A noter que les recherches en cours (non encore publiées) indiquent la possibilité d'autres scénarios. Ceux-ci restent à être précisés.

3. Données bathymétriques et construction des MNT

3.1. DONNEES TOPO-BATHYMETRIQUES INITIALES

Les données bathymétriques utilisées proviennent du SHOM et des base de données internationales GEBCO et ETOPO2.

- Données du SHOM (dalles HISTOLITT) : c'est un produit numérique organisé en dalles de 1° x 1° contenant les sondes bathymétriques réalisées (et qualifiées) par le SHOM. La résolution spatiale maximale de ces sondes est de l'ordre de 50 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 insulaire (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. Les informations extraites sont issues de la base du SHOM mise à jour le 8 février 2006. Ces données concernent le plateau insulaire de la Martinique et de l'Archipel de la Guadeloupe (sondes en rouge dans Figure 3, en tout 4 dalles).
- GEBCO, General Bathymetric Chart of the Oceans, est soutenu par l'organisation hydrographique internationale (IHO), par les Nations Unies (UNESCO) ainsi que par la commission océanographique intergouvernementale (IOC). Les informations bathymétriques résultent d'une compilation à l'échelle du globe de sondages bathymétriques et de données issues de l'altimétrie satellitale. Elles sont délivrées gratuitement et sont accessibles à l'adresse suivante <http://www.gebco.net/>. La maille des pixels est de 1'x1' (environ 1 85 km x 1,85 km). Une extraction a été réalisée pour le domaine couvrant l'Arc antillais (Figure 4).
- ETOPO2 : c'est une autre base de données topo-bathymétrique mondiale résultant de la compilation de sondages bathymétriques et de données issues de l'altimétrie satellitale. Elles possèdent une résolution de de 2'x2' (environ 3,7 km x 3,7 km). Elles sont délivrées gratuitement et sont accessibles à l'adresse suivante : <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/01mgg04.html>.
- Concernant les données topographiques des côtes françaises, elles sont issues de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, maillage de 90 m). Il s'agit d'une information altimétrique issue d'une analyse interférométrique des images satellites. Le projet SRTM est soutenu conjointement par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency). Les données sont téléchargeable gratuitement via le site <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/>.

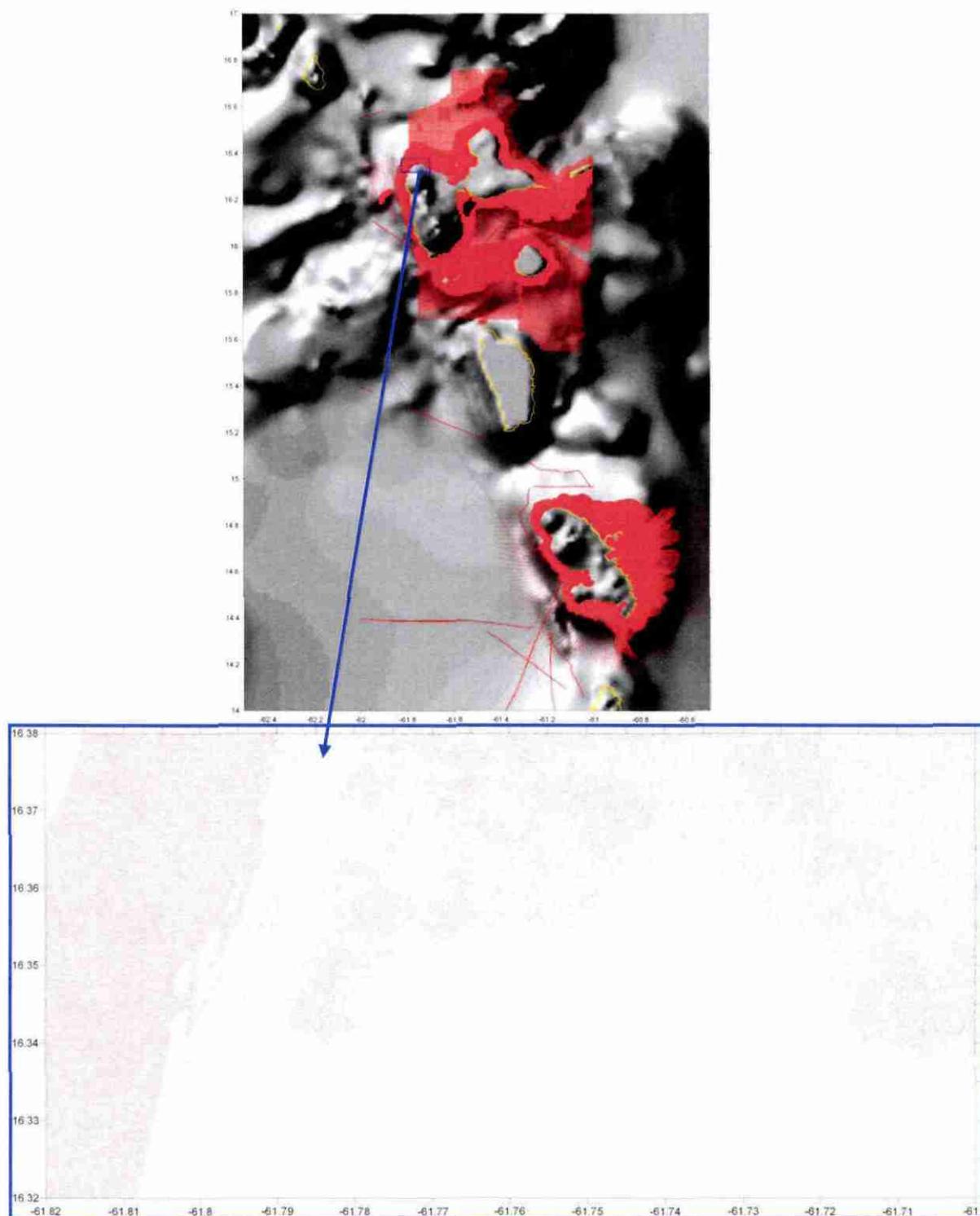


Figure 3 - Semis de points de sonde d'une densité maximale de 50 mètres, extrait de la base SHOM (mise à jour février 2006)

3.2. CONSTRUCTION DES GRILLES NECESSAIRES AUX SIMULATIONS

Le module de simulation de tsunami avec des grilles emboîtées (cf chapitre 4), implique une division par 3 de la taille des mailles entre chaque grille successive. Les données du SHOM permettent de construire des grilles à 100m. Partant de là, un rééchantillonnage à 300, puis 900 et enfin 2700 m a été réalisé. La Figure 5 correspond aux MNT de 100 mx100 m de l'Archipel de la Guadeloupe et la Martinique construits à partir des données du SHOM.

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 3 millions).

La qualité des données interpolées par cette méthode a été testée par validation croisée. Cette procédure a permis de localiser des erreurs ponctuelles très importantes (supérieures à 10 m en valeur absolue) à la frontière des données du SHOM et de GEBCO et ETOPO2. Une fois localisés, ces points erronés ont été supprimés et de nouvelles interpolations effectuées. Les résidus obtenus par l'application de la validation croisée aux nouvelles grilles (100m x 100 m) interpolées indiquent que les erreurs les plus fréquentes (42% des données) se situent entre -0.5 m, et +0.5 m.

La sensibilité des résultats de simulation en fonction de la précision des données bathymétriques a fait l'objet de tests dont les résultats sont précisés en chapitre 0 de ce rapport.

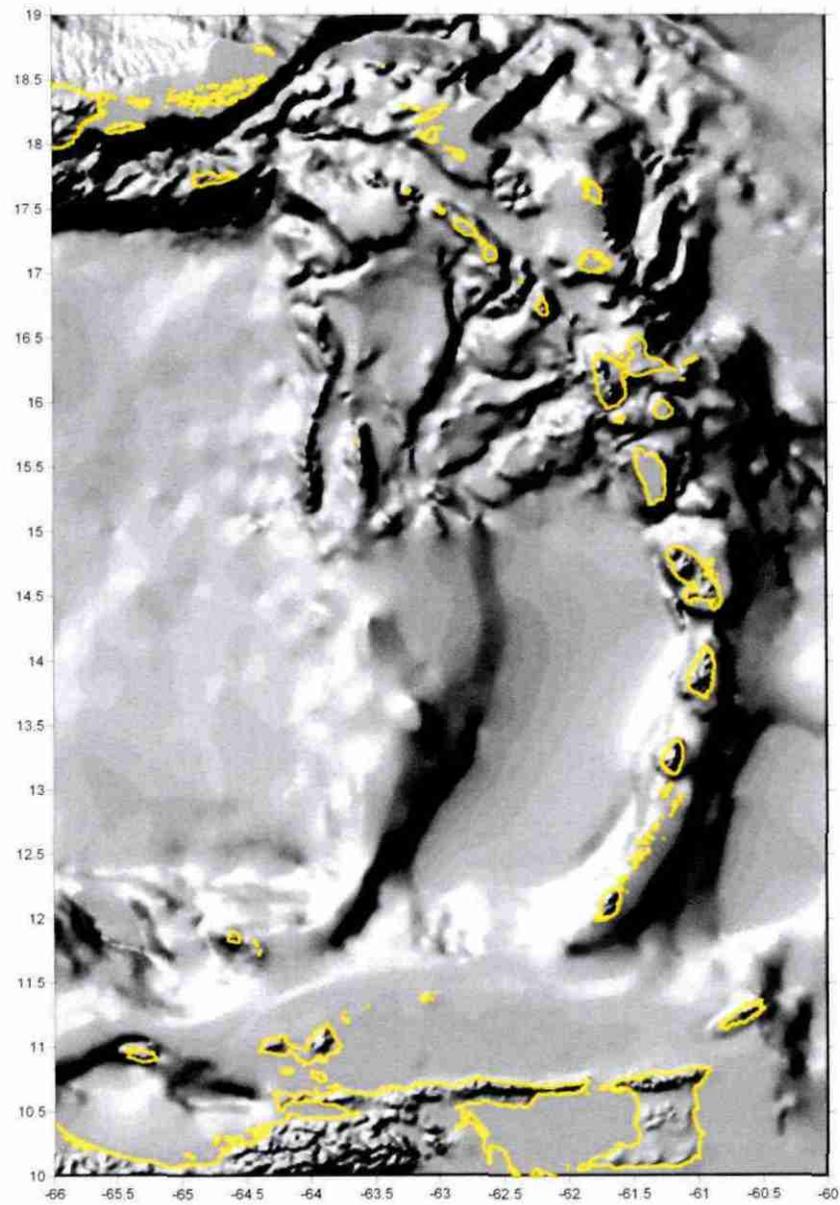


Figure 4 – Extrait du fichier GEBCO : bathymétrie avec une maille moyenne de 1'x1' (d'après <http://www.gebco.net/>).

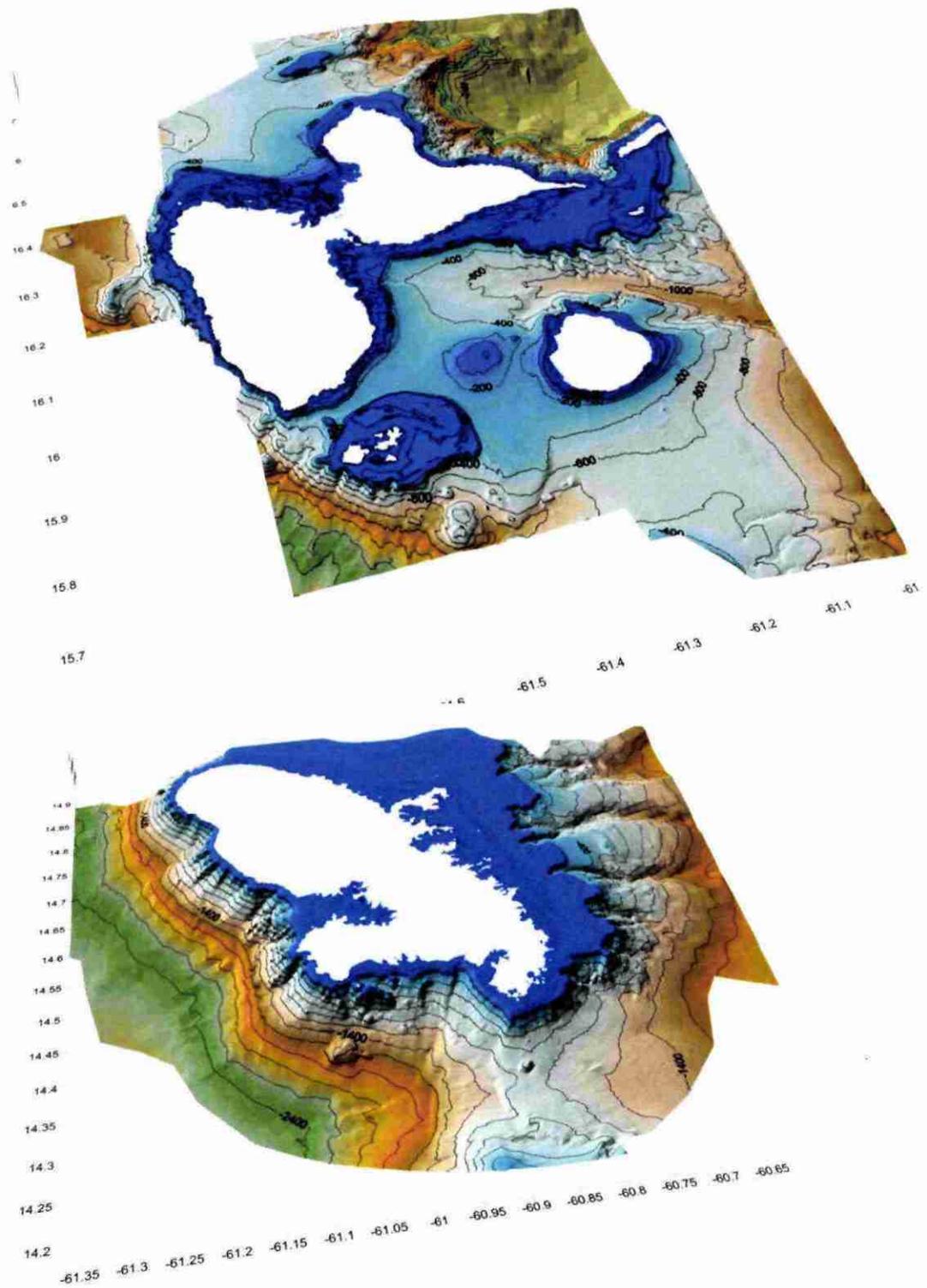


Figure 5 - MNT de l'Archipel de la Guadeloupe (en haut) et la Martinique (en bas) construits à partir des données du SHOM. Maillage de 100 mx100 m

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 2.

Néanmoins, pour répondre complètement aux besoins de cette étude, des modifications ont dû être apportées à la version de base de GEOWAVE. Celles-ci portent 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, et modélisation avec une résolution de la grille de plus en plus fine dès lors que le tsunami se rapproche du littoral.

GEOWAVE 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) ou des éruptions volcaniques (volcan Augustine, Alaska).

Propriétés Geowave		
Module Génération (TOPICS)	Origine sismique	Okada 1985
	Origine glissement sous-marin	Grilli et Watts (1999)
	Origine glissement sub-aérien (effondrement falaise et volcanique)	Walder et al. 2003
Module Propagation, inondation (FUNWAVE 1.0)	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	
Principaux résultats	Elevation du plan d'eau	Suivant intervalle temporel défini par l'utilisateur
	Élévation maximale plan d'eau et heure correspondante	En tenant compte de l'ensemble de la simulation
	Élévation 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 2 - 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

Concernant les deux derniers points, des tests ont été faits sur des secteurs de la Méditerranée où des données SHOM, SRTM et GEBCO ont aussi été utilisées pour la simulation de tsunamis. Vu la similitude des données de base utilisées, nous avons estimé que les résultats de ces tests étaient transposables à l'étude Antilles.

5.1. LACUNES DANS LES DONNEES

La Figure 5 montre l'absence des données du SHOM au large de la côte sud-ouest de Basse-Terre en Guadeloupe, ainsi qu'au nord de la côte martiniquaise. Pour pallier cette lacune, des données GEBCO (mailles d'environ 1.85x1.78 km à cette latitude) présentes dans ces secteurs ont été utilisées dans la construction des MNT haute résolution.

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 la Montagne Pelée en 1902 (cf Poisson et Pedreros, 2007) :

- 1) simulation avec la grille initiale à 100mx100m,
- 2) simulation avec une grille modifiée par des perturbations systématiques de mailles avec [valeur z initiale + Δ entre -2 et +2 m], avec Δ fixé de façon aléatoire,
- 3) simulation avec une grille modifiée par des perturbations systématiques de mailles avec [valeur z initiale + Δ entre -5 et +5 m], avec Δ fixé de façon aléatoire.

La Figure 6 présente la différence entre les élévations maximales du plan d'eau issues de la simulation de référence et de la simulation sur bathymétrie perturbée à [-2 m ; +2 m]. L'écart moyen entre ces deux simulations est inférieur à 1 cm. Les différences les plus importantes, positives et négatives, se situent à proximité des côtes. Celles-ci dépassent rarement les 20 cm.

En outre, pour les trois tests réalisés, la Figure 7 montre les séries temporelles des hauteurs d'eau calculées à proximité de l'entrée du glissement et de Saint-Pierre. Cette figure indique que :

- il n'y a pas d'écart sensible sur le temps d'arrivée du tsunami ;
- il y a un écart maximal de 9% dans l'amplitude de la crête de la vague principale pour la bathymétrie perturbée à [-2 m ; +2 m]. Il est de 20% pour la bathymétrie perturbée à [-5 m ; +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 les côtes antillaises françaises, pour laquelle on considèrera que :

L'analyse de la sensibilité des résultats par rapport aux données bathymétriques utilisées révèle une erreur maximale de 9% sur la hauteur des vagues près du rivage lorsque la couverture haute résolution spatiale est bonne (données initiales du SHOM, 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 20%.

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).

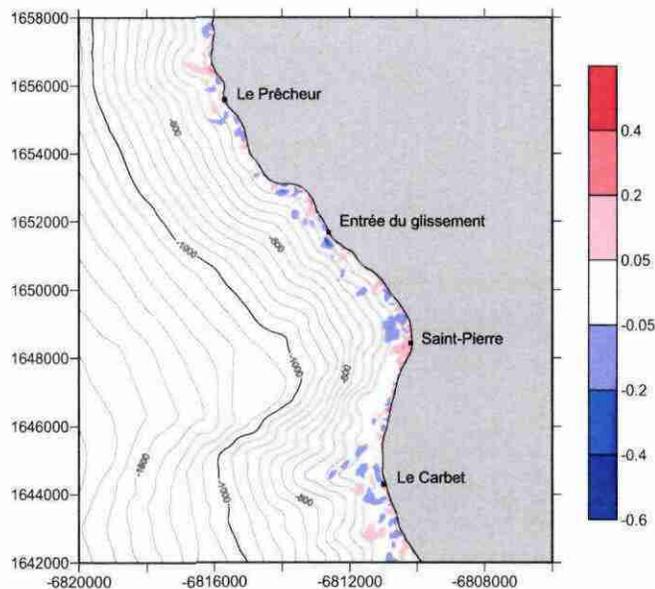


Figure 6 - Carte de la différence d'élévation maximale du plan d'eau entre la simulation de référence et la simulation sur bathymétrie perturbée à [-2m ; +2m].

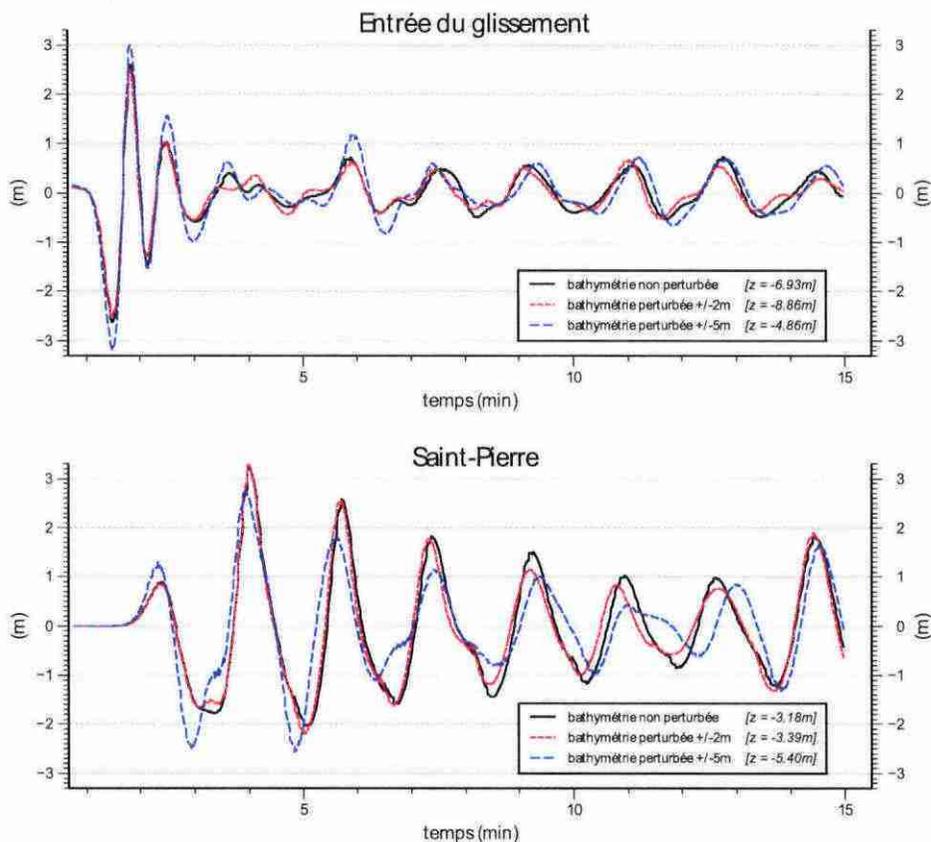


Figure 7 - Séries temporelles de la cote de la surface libre calculée au niveau de l'entrée du glissement dans la mer et à Saint-Pierre. On a indiqué entre crochets la valeur de la bathymétrie au capteur, perturbée ou non.

5.3. INFLUENCE DE LA DENSITE DU MAILLAGE

Pour déterminer la densité du maillage de la bathymétrie, 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).

Les longueurs d'ondes les plus faibles traitées dans cette étude correspondent aux tsunamis initiés par des mouvements de terrain., les valeurs minimales étant alors de 10 000 m dans la zone de génération et 2 000 m à proximité du rivage (profondeur d'environ 10 m). Dans ces cas, des mailles respectivement de 300 m (33 nœuds/longueur d'onde) et de 100 m (20 nœuds/longueur d'onde) ont été utilisées pour traiter ces zones.

La grille de mailles 100mx100m est ainsi justifiée pour la réalisation des simulations, les résultats étant une estimation de la hauteur maximale des vagues à proximité du rivage.

A noter que pour les tsunamis d'origine sismique, les longueurs d'onde dans la zone de génération sont au minimum de 50 km, la densité des données GEBCO ou ETOPO2 sont suffisantes.

6. Résultats des simulations

Ci-après sont présentés 8 des 13 scénarios simulés. Pour ces 8 scénarios, des simulations avec des grilles de meilleure résolution possible (avec les données actuelles) ont été faites.

Les planches 1 à 8 en hors texte présentent, pour chaque source sismique ou volcanique retenue, les résultats cartographiques à 1/1/150 000^{ème} sur les zones a priori les plus exposées :

- 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 (Figure 8). 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, appelé courant de Stokes. Cette information est indiquée sur les cartes par des flèches (courant maximal).

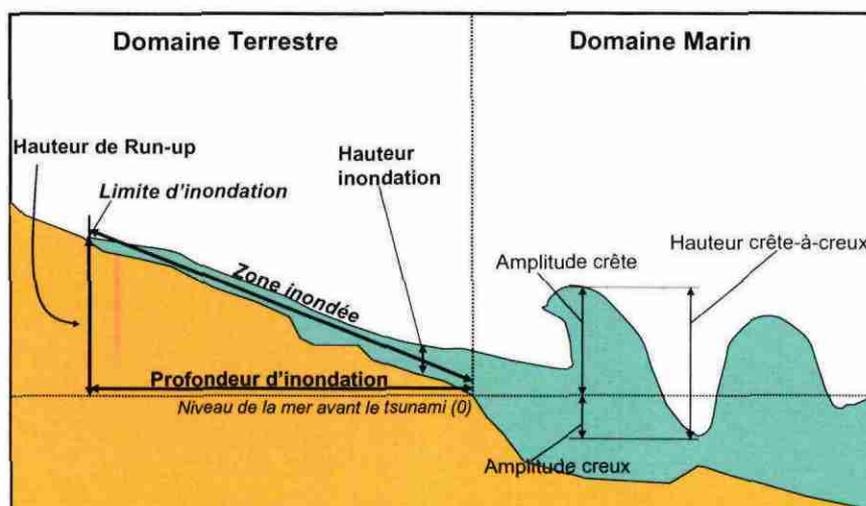


Figure 8 - Caractéristiques des tsunamis au niveau du rivage (d'après Poisson et Pedreros, 2007)

De plus sur ces planches sont aussi présentés, mais à plus petite échelle, les résultats des simulations relatifs à élévation maximale du plan d'eau depuis la source jusqu'au littoral.

Ces planches sont aussi insérées dans le texte de ce rapport avec réduction de leur format d'édition.

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

6.1. SIMULATIONS DES TSUNAMIS HISTORIQUES

Trois tsunamis historiquement survenus dans la zone étudiée ont été simulés : un tsunami d'origine sismique (séisme des Iles Vierges, 1867), et deux tsunamis générés par glissement de terrain (Montserrat, 2003, et Martinique, 1902).

Le tsunami lié au séisme des Iles Vierges de 1867 (ce séisme correspond au séisme de référence de la zone sismique 29) est présenté au paragraphe 6.2.

Les tsunamis de Montserrat et de la Montagne Pelée sont décrits paragraphe 0.

Les simulations de ces trois tsunamis donnent des résultats cohérents avec les observations faites le long de la côte française (détails des observations relevées dans la base gérée par le BRGM et consultable à l'adresse <http://www.tsunamis.fr>).

Ces comparaisons sont détaillées dans le rapport Poisson et Pedreros (2007).

6.2. SIMULATIONS DES TSUNAMIS D'ORIGINE SISMIQUE

Parmi les cinq scénarios retenus (Figure 9), deux se trouvent à proximité des côtes françaises, (zone 2, « graben de Marie-Galante », et zone 30, « ride de Sainte-Lucie »). Les trois autres se trouvent à l'Ouest, dans la zone de subduction (zone 12, « Barbuda », et zone 34, « prisme de la Barbade ») ou en limite Nord de la plaque Caraïbe (zone 29, « passage d'Anegada – Îles Vierges 1867 »).

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.

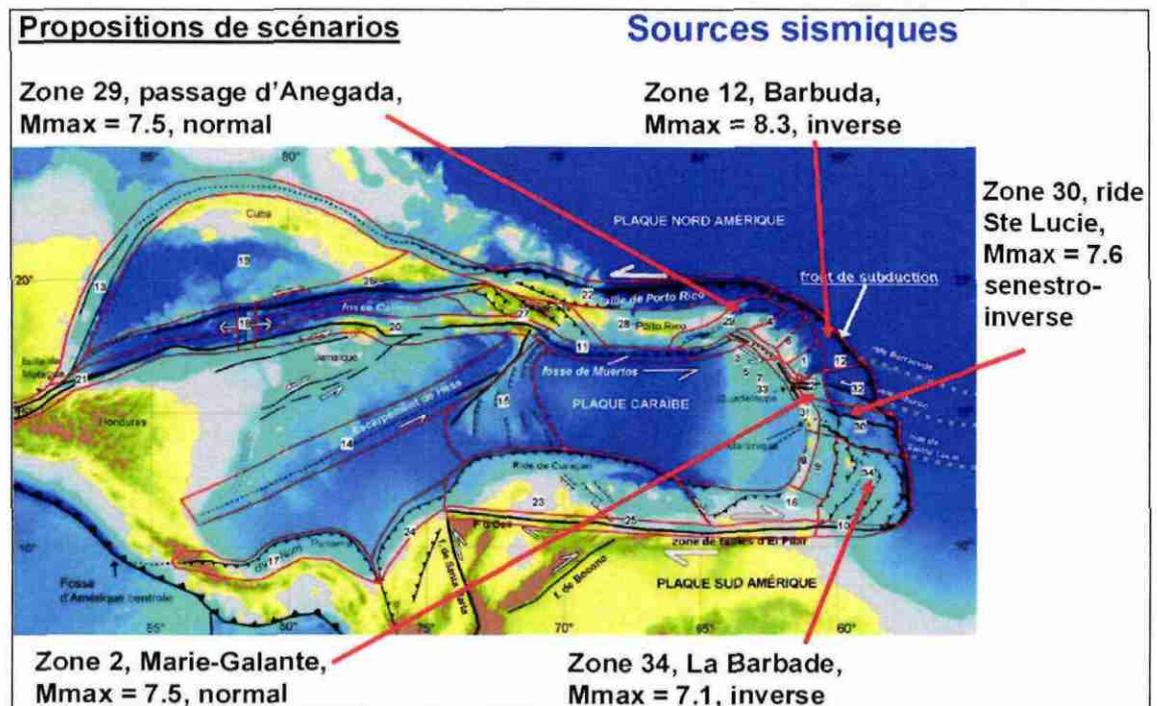


Figure 9 - Choix des scénarios de sources sismiques.

6.2.1. Scénario de séisme maximal de la zone 02, Graben de Marie-Galante (Planche 1 ht)

L'épicentre du séisme de scénario est positionné à environ 25 km à l'Est de l'île de Marie-Galante. La magnitude est estimée à 7,5, avec une profondeur focale de 14 km. Le séisme est associé au jeu normal d'une faille de direction E-W et pendage 60°N. (Figure 10)

C'est à la Désirade (Beauséjour) que l'amplitude des crêtes des vagues pourrait être la plus élevée (près de 5 mètres d'après la simulation).

En outre, les simulations indiquent un tsunami sur la côte Sud de Grande-Terre en Guadeloupe, depuis la Pointe de la Vigie (à l'Est de Le-François) jusqu'à l'ouest de Sainte-Anne, avec des vagues de 2 m à 3 m d'amplitude.

Au niveau de l'archipel guadeloupéen, le temps d'arrivée du tsunami est quasi instantané à Marie-Galante et s'échelonne de quelques minutes à une quinzaine de minutes à Grande-Terre et la Désirade.

Le tsunami toucherait aussi la côte Nord-Est de la Martinique en une quinzaine de minutes, avec en plusieurs points de la côte nord-ouest des vagues d'amplitude de près de 3 m (Macouba, Le-Lorrain, Le Marigot, Sainte-Marie, La Trinité, côte Nord de la presqu'île de la Caravelle au NE de la Trinité).

6.2.2. Scénario de séisme maximal de la zone 12, zone de subduction de Barbuda (Planche 2 ht)

L'épicentre du séisme de scénario est positionné à environ 200 km au Nord-Est de Grande-Terre (Guadeloupe). La magnitude est estimée à 8,3, avec une profondeur focale de 23 km. Le séisme est associé au jeu inverse d'une faille de direction NW-SE et pendage 50°SE. (Figure 11)

Toute la côte de Grande-Terre est exposée au tsunami, avec en plusieurs points des vagues de plus de 6 m d'amplitude à proximité du littoral. Le temps d'arrivée du tsunami est alors de 15 à 20 minutes. Le Nord de Basse-Terre est lui aussi exposé à des vagues de plus de 6 m d'amplitude, le temps d'arrivée étant d'environ 30 minutes.

En Martinique, toute la côte Nord-Est est exposée, depuis Macouba jusqu'à l'Est de la Trinité (presqu'île de la Caravelle). Le temps de propagation du tsunami est compris entre 34 et 40 minutes, avec localement des vagues de plus de 3 m d'amplitude (jusqu'à 6 m au Marigot).

6.2.3. Scénario de séisme maximal de la zone 29, Passage d'Anegada – îles Vierges 1867 (Planche 3 ht)

Le séisme de scénario est positionné au niveau des îles Vierges, à 400 km environ au nord-ouest des côtes de l'île de Basse-Terre en Guadeloupe. La magnitude est estimée à 7,5, avec une profondeur focale de 14 km. Le séisme est associé au jeu normal d'une faille de direction ENE-WSW et pendage 70°S. (Figure 12)

La simulation indique plusieurs vagues de hauteurs crête-à-creux comprises entre 0,3 m et 3 m au Nord-Est de l'île de Basse-Terre en Guadeloupe. Le temps d'arrivée du tsunami serait d'environ 1 heure. Les résultats s'accordent aux observations historiques avec un impact important du tsunami à Deshaies et Sainte Rose et plus faible à Terre-de-Haut et Pointe-à-Pitre. Néanmoins, la valeur à Basse-Terre apparaît sous-estimée.

6.2.4. Scénario de séisme maximal de la zone 30, Ride de Sainte-Lucie (Planche 4 ht)

L'épicentre du séisme de scénario est situé à 100 km environ de la côte Nord-Est martiniquaise et 125 km en moyenne de celle de l'île de Marie-Galante (Capesterre). La magnitude est de 7,6. La profondeur focale a été fixée à 13 km. Le scénario correspond au mouvement composite décrochant senestre à inverse, d'une faille orientée WNW-ESE, à pendage 45°S. (Figure 13)

La simulation indique :

- des vagues de 1 m d'amplitude en moyenne sur la côte Sud et Est de Grande-Terre en Guadeloupe,
- une vague de près de 2 m d'amplitude à Beauséjour au niveau de l'île de la Désirade,
- en plusieurs points de la côte Est martiniquaise, des vagues entre 3 et 4 m d'amplitude.

Concernant l'île de la Martinique, le tsunami atteindrait la côte entre 15 et 20 minutes. Pour la Guadeloupe, le temps d'arrivée serait de l'ordre d'une demi-heure.

6.2.5. Scénario de séisme maximal de la zone 34, Prisme d'accrétion de la Barbade (Planche 5 ht)

L'épicentre du séisme de scénario se trouve à environ 120 km au Sud-Est de la Martinique. Il s'agit du jeu inverse d'une faille NNE-SSW à pendage 45°E et jeu inverse. La magnitude du séisme est égale à 7,1. La profondeur focale est de 10 km. (Figure 14)

Concernant la côte française, c'est la partie sud de la Martinique qui serait plus particulièrement concernée par le tsunami. Les vagues à proximité du rivage ont des amplitudes inférieures à 0,5 m. Le temps d'arrivée est de l'ordre de 15 à 20 minutes.

6.3. SIMULATIONS DES TSUNAMIS D'ORIGINE VOLCANIQUE

6.3.1. Scénario de Soufrière-Hills à Montserrat , évènement de 2003

L'évènement de ce scénario est la coulée pyroclastique qui s'est produite au cours de l'éruption du volcan de Soufrière Hills à Montserrat en juillet 2003. Le pic de flux ayant généré le tsunami correspond à un volume de 16 millions de m³ (Figure 15).

Le volcan se trouve à environ 55 km de la côte Nord de Basse-Terre en Guadeloupe.

La simulation indique des vagues d'amplitude entre 0,5 et 1 m à La Perle, Deshaies Malendure et Vieux Habitants, conformément aux observations.

Le temps de propagation du tsunami est estimé entre 12 et 15 minutes.

6.3.2. Scénario la Montagne Pelée, évènement 1902

L'évènement de ce scénario correspond à l'éruption de 1902, du volcan Montagne Pelée en Martinique. L'évènement correspondrait à l'entrée en mer d'un lahar d'un volume de 5 millions de m³ (Figure 16).

La simulation indique des vagues de l'ordre de 2 à 3 m entre le Prêcheur et le Carbet, sur la côte Nord-Ouest de Martinique ce qui est en accord avec les observations historiques. Le temps d'arrivée est inférieur à 2 minutes.

6.3.3. Scénario de la Soufrière en Guadeloupe, paléoévènement (3100 BP)

L'évènement de ce scénario correspondrait à une avalanche de débris d'un volume de 70 millions de m³ produite sur le flanc Ouest de la Soufrière en Guadeloupe il y a environ 3100 ans (Figure 17).

D'après les simulations, un tel évènement volcanique pourrait provoquer un tsunami en particulier sur la côte Sud et Ouest de Basse-Terre en Guadeloupe et aux Saintes (Terre-de-Haut- et Terre-de-Bas), avec localement des vagues de plus de 3 m d'amplitude (Basse Terre, Trois-Rivières). Le temps d'arrivée du tsunami reste inférieur à 5 minutes au niveau de la ville de Basse-Terre.

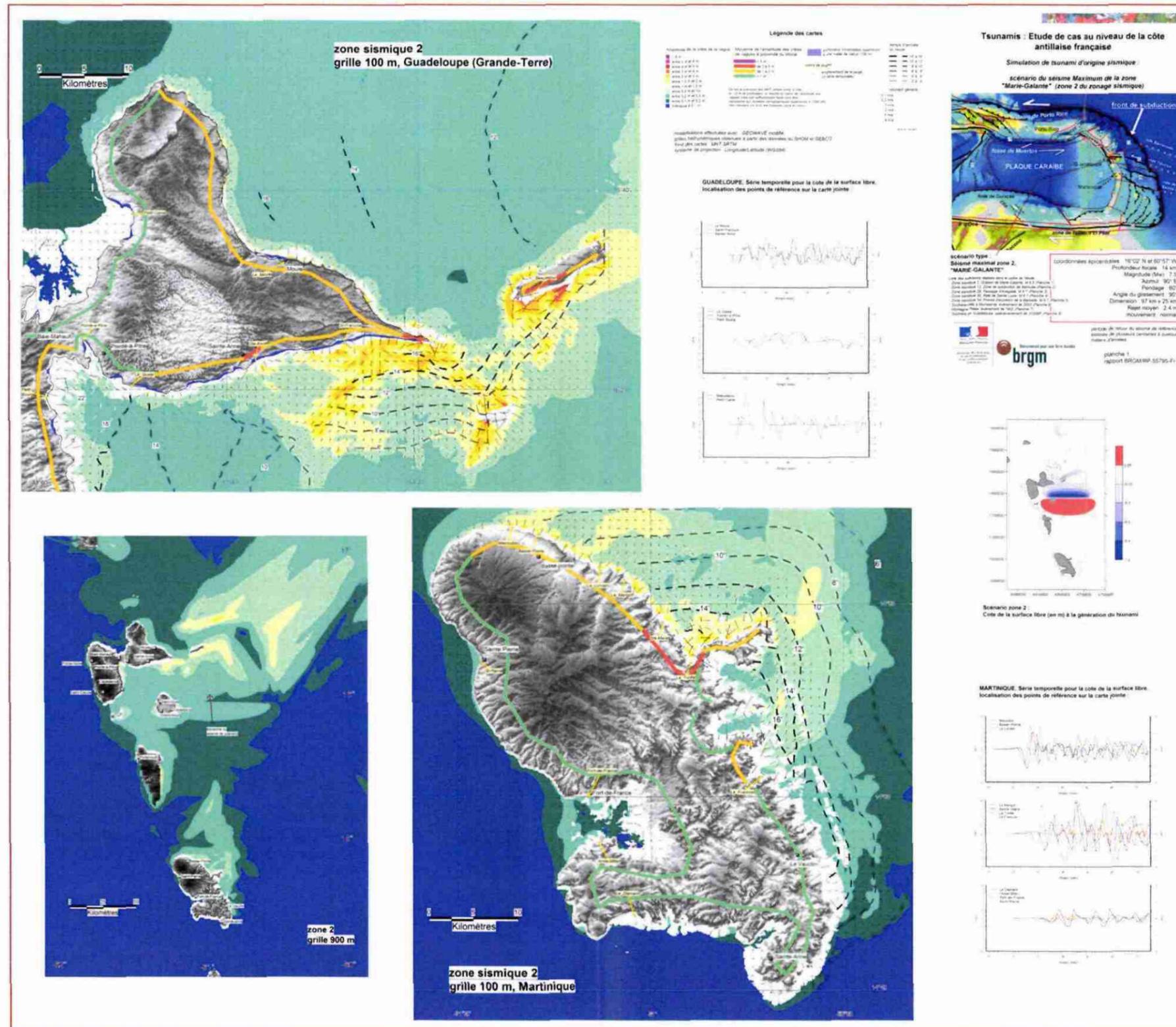


Figure 10 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 02, « Graben de Marie-Galante » (réduction de la planche 1 h.t.)

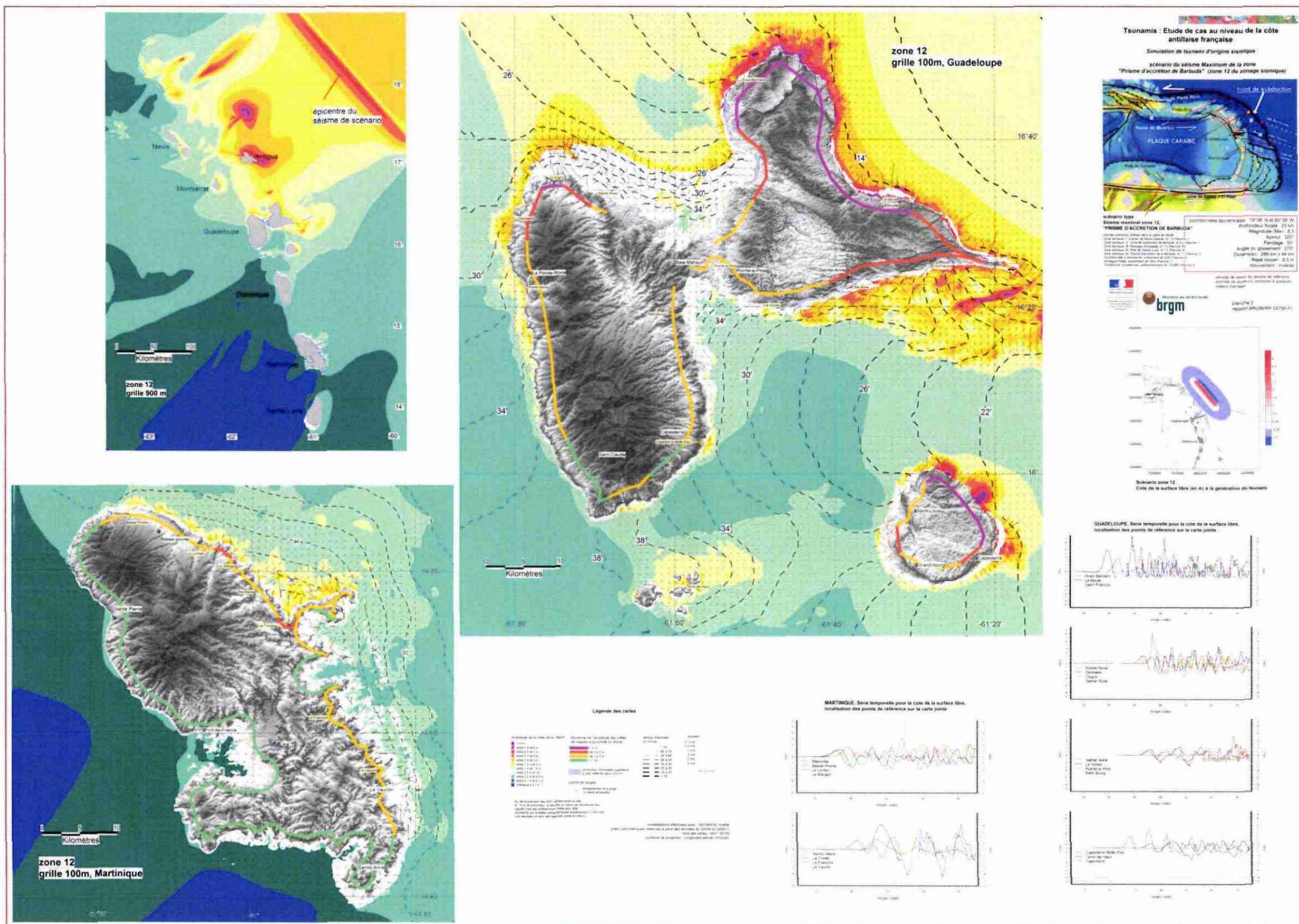


Figure 11 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 12, « Barbuda » (réduction de la planche 2 h.t.)

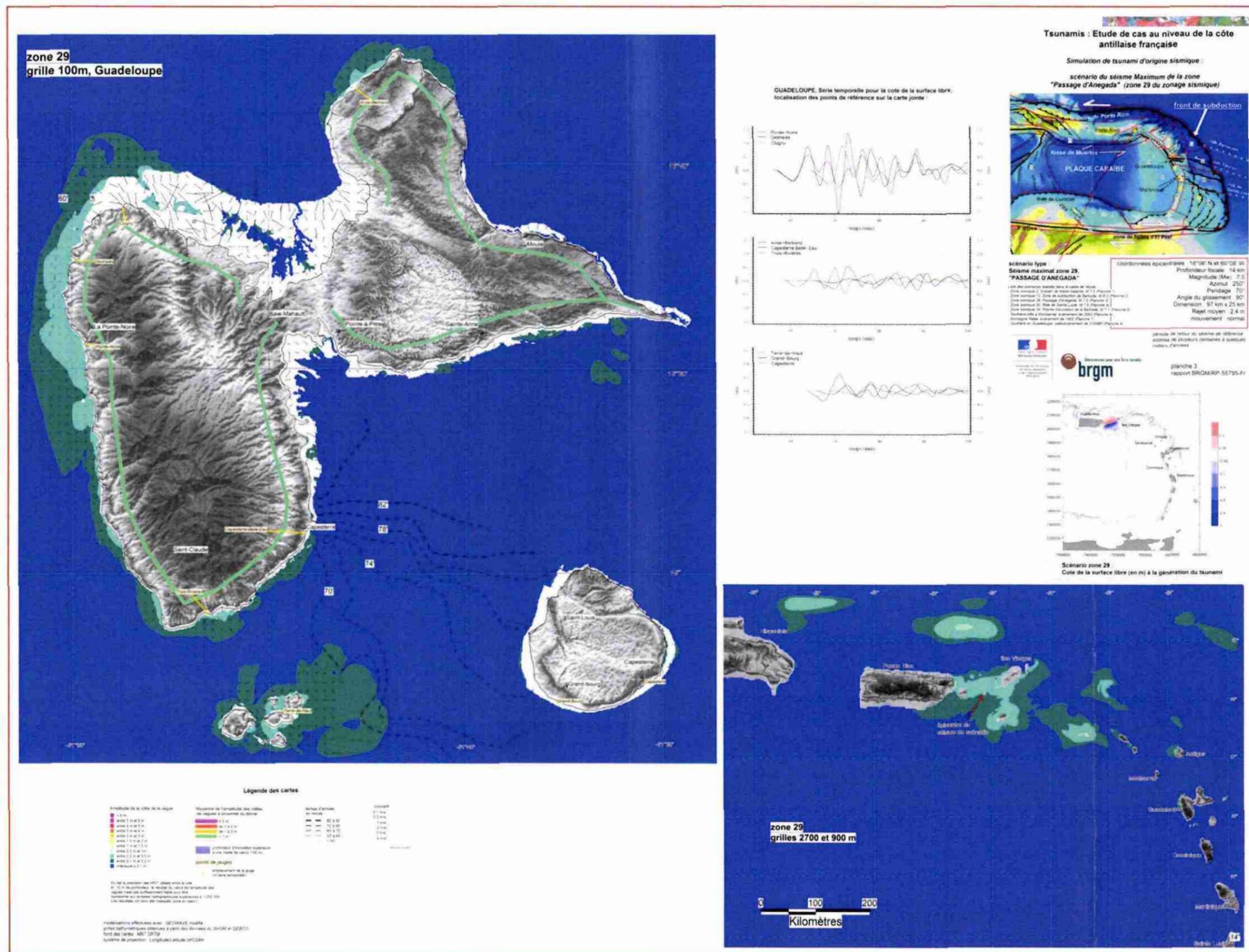


Figure 12 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 29, « Passage d'Anegada » (réduction de la planche 3 h.t.)

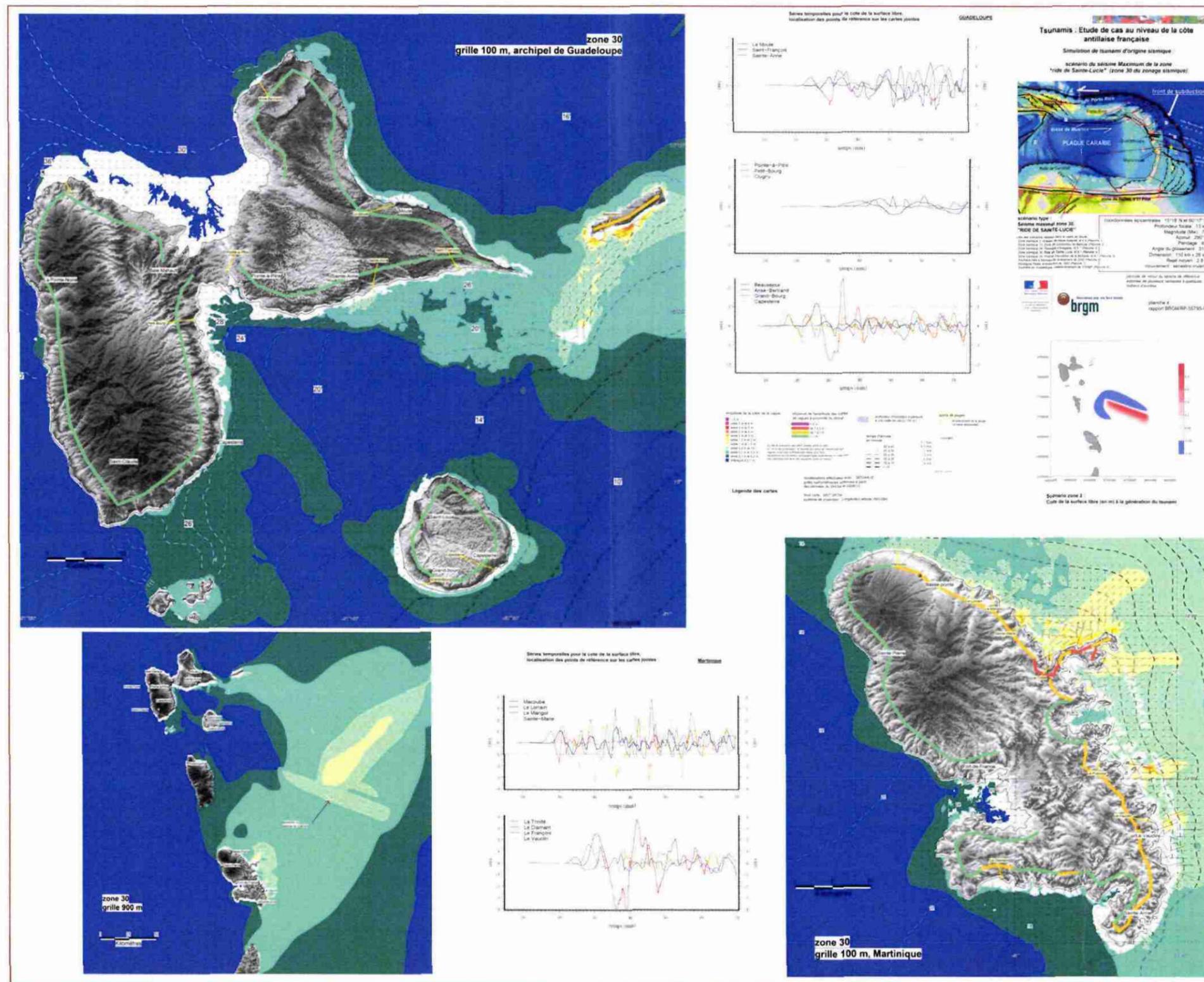


Figure 13 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 30, « Ride de Sainte Lucie » (réduction de la planche 4 h.t.)

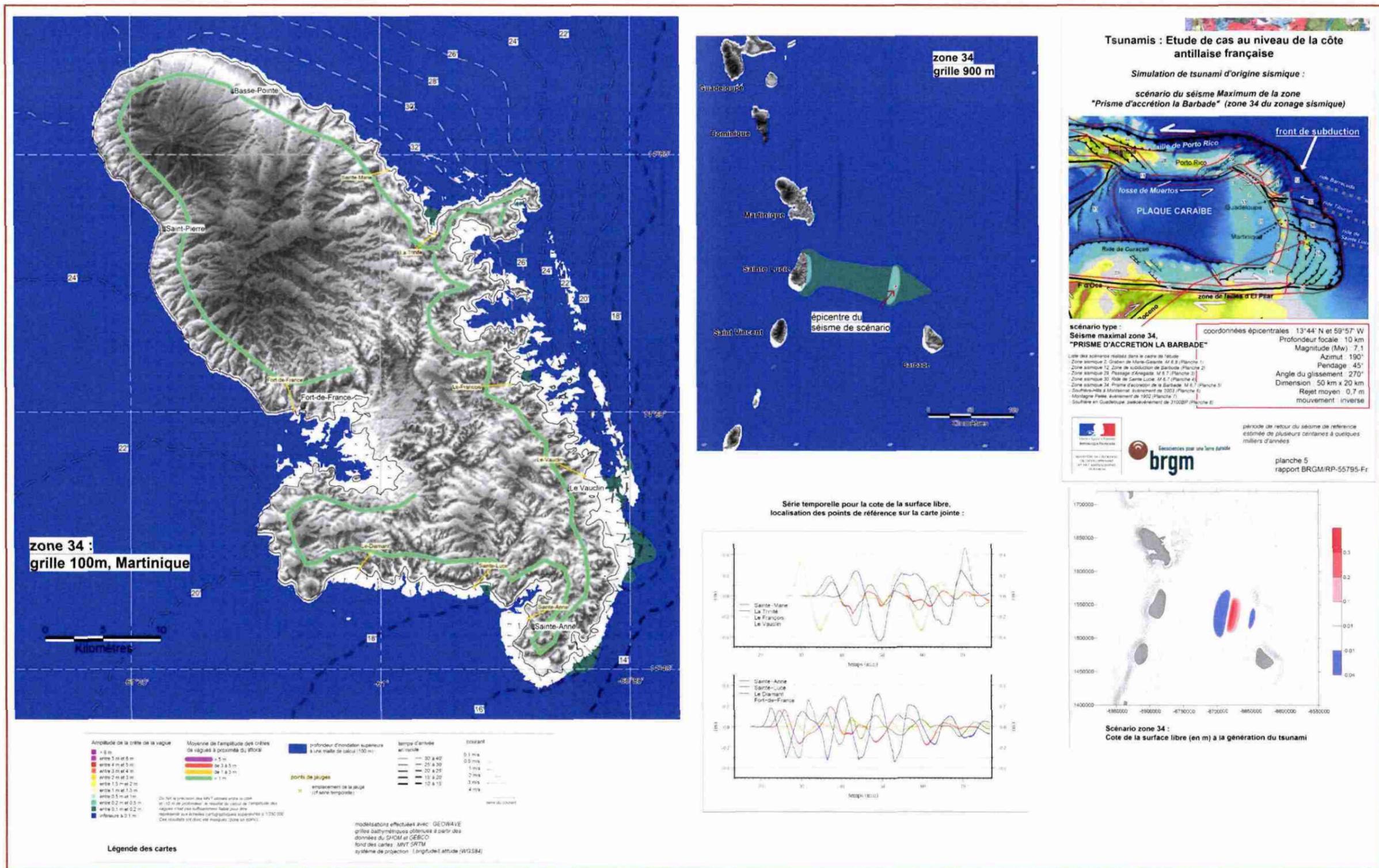


Figure 14 - Résultat de la simulation du scénario de séisme maximal en zone 34, « Prisme d'accrétion de la Barbade » (réduction de la planche 5 h.t.)

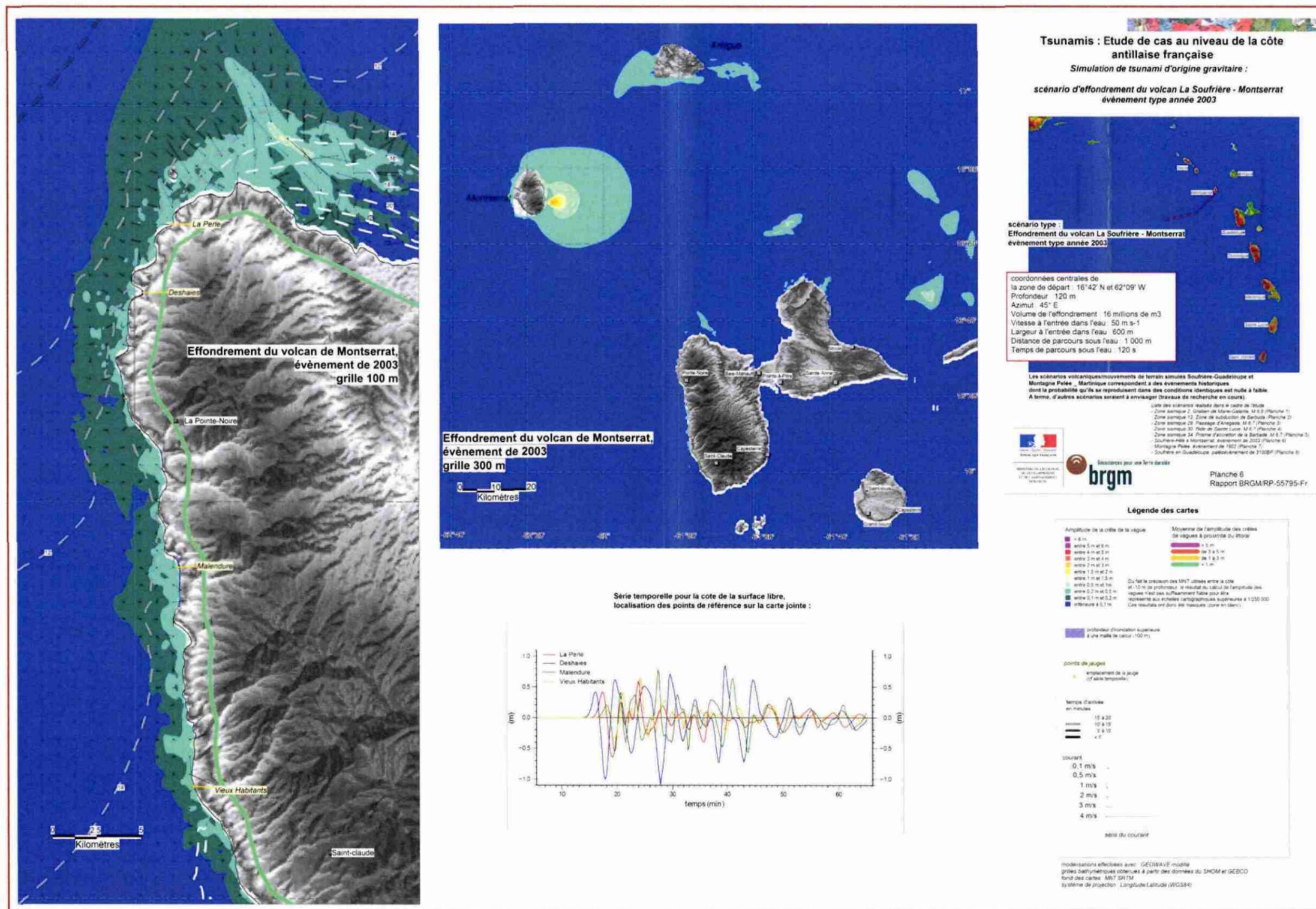


Figure 15 - Résultat de la simulation de l'évènement volcanique La Soufrière-Hills, Montserrat, 2003 (réduction de la planche 6 h.t.)

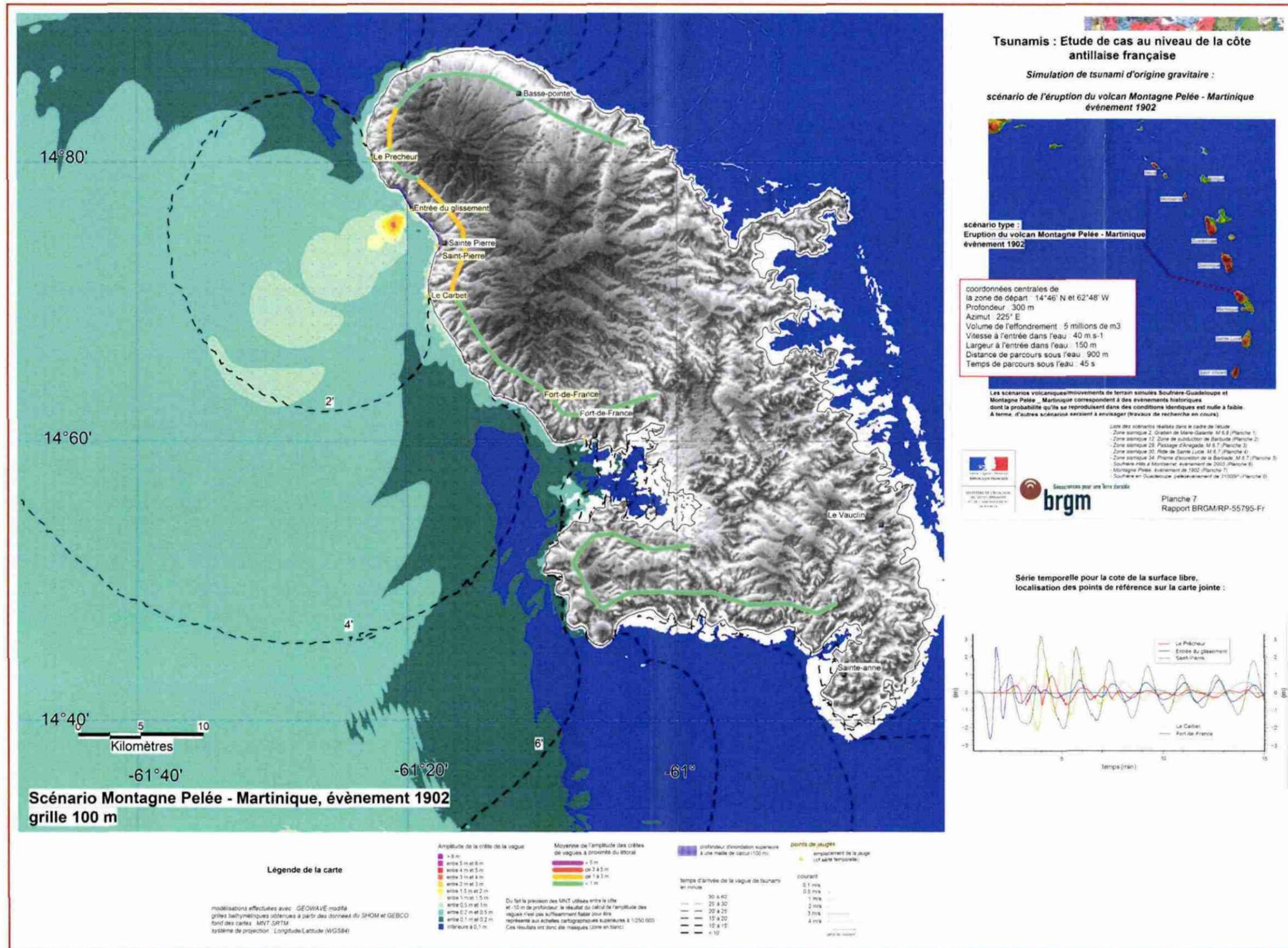
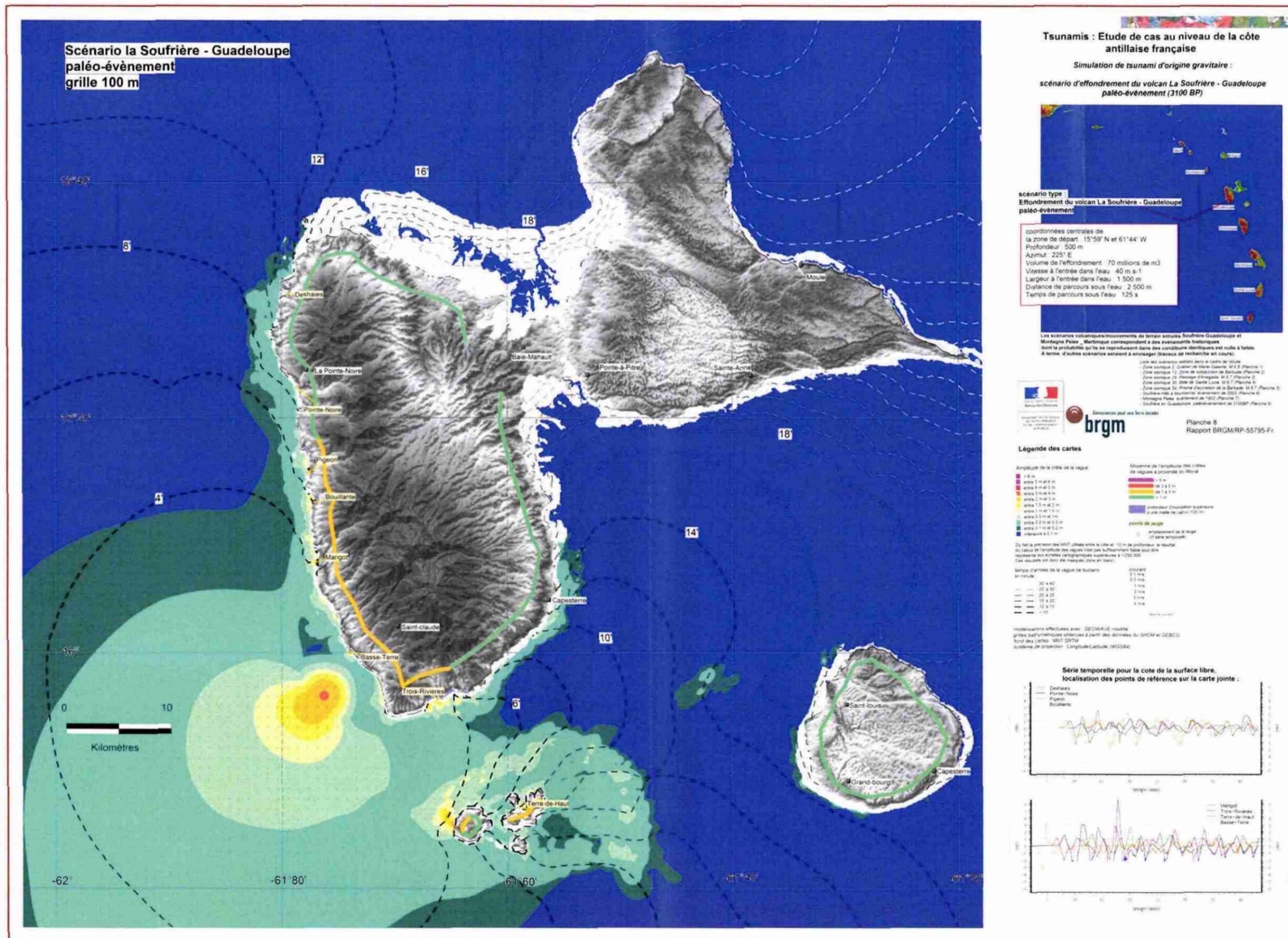


Figure 16 - Résultat de la simulation de l'évènement volcanique Montagne Pelée, Martinique, 1902 (réduction de la planche 7 h.t.)



7. Conclusion

7.1. LES RESULTATS

7.1.1. Identification des sources tsunamigéniques

- Dans le cadre de cette étude, un zonage sismique concernant la plaque Caraïbes et ses zones frontalières avec les plaques Amérique du Nord, Amérique du Sud, Cocos et Nazca a été réalisé. Au total 32 zones sismiques ont été individualisées.

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. La récente étude probabiliste réalisée par Geoter (2002) laisse supposer une période de retour de ces très forts séismes de plusieurs siècles à quelques millénaires.

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 aux caraïbes.

- Sur la base de recherches bibliographiques, trois scénarios de tsunamis générés par mouvements de terrain ont été retenus. Deux de ces scénarios sont basés sur des événements historiques d'éruptions ayant généré des tsunamis par entrée d'avalanche de débris ou de lahar dans la mer, tandis que le troisième repose sur un événement de déstabilisation de volcan de grande ampleur tel que ceux décrits comme paléo-événements dans la littérature.

Ces trois scénarios correspondent à une première identification des sources tsunamigéniques volcaniques, à partir de laquelle des études plus détaillées devront être réalisées notamment pour mieux déterminer la géométrie de la masse en mouvement, sa vitesse, la densité des matériaux déstabilisés, le volume entrant en mer ainsi que la probabilité de survenance de l'évènement.

7.1.2. Les scénarios de tsunamis

- Au total, cinq séismes de scénarios dont 1 événement historique ont été simulés.

Ces simulations montrent la possibilité de vagues de tsunami de plusieurs mètres de hauteur tant au niveau du littoral martiniquais que au niveau des îles de Guadeloupe. Avec des temps d'arrivée du tsunami variant de l'ordre de 15 minutes pour les sources les plus proches à 1 heure pour les sources lointaines.

Par ailleurs, même si les données bathymétriques existantes étaient insuffisantes pour effectuer des simulations de haute résolution spatiale (mailles de 100 mx100 m) au

niveau de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy, leur situation géographique par rapport aux sources sismiques tsunamigéniques et les résultats des simulations à faible résolution indiquent que ces deux îles sont vraisemblablement très exposées aux tsunamis.

- Les simulations des tsunamis de source volcanique proche 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), avec des temps d'arrivée de l'ordre de la minute à moins de 15 minutes.
- 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 : les côtes antillaises françaises peuvent-elles être touchées par des tsunamis importants? Les résultats des simulations montrent incontestablement que de tels phénomènes peuvent avoir lieu sur l'archipel de la Guadeloupe et en Martinique.

On rappelle néanmoins que ces indications reposent sur la base de scénarios de période de retour très vraisemblablement supérieure à plusieurs centaines d'années, voire peut-être milliers d'années.

7.2. LES PERSPECTIVES

- La présente étude a concerné quelques cas évènementiels considérés a priori parmi les plus forts possibles en termes de tsunami sur la côte antillaise française.

Hormis le fait que d'autres évènements 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.

- 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. D'autre part, il faudrait 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.

8. Références bibliographiques citées dans ce rapport

- COMBES PH., MARTIN CH., CARBON D., FIORAVANTI A. (2002) – Révision du zonage sismique de la France. Etude probabiliste. Zonages sismotectoniques en métropole et aux Antilles. *Rapport GRT/MATE/0701 – 150 Annexe 2.*
- 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.
- FEUILLET N. (2000). Sismotectonique des Petites Antilles; Liaison entre activité sismique et volcanisme. *Thèse de Doctorat, Université Paris VII Denis Diderot.*
- 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.
- 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.
- LANDER J.F., WHITESIDE L.S., LOCKRIDGE P.A. (2002) – A brief history of tsunamis in the Caribbean sea. *The international Journal of The Tsunami Society*, vol. 20, n° 2, Published Electronically.
- MCCANN W.R. (2004) Estimating the threat of tsunamigenic earthquakes and earthquake induced-landslide tsunami in the caribbean. From <http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/eng/doc15715/doc15715.htm> A privately published report by the former Director of the Seismic Research Institute at the University of Puerto Rico.
- OKADA, Y. (1985) - Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.
- POISSON B. (2007) - Etude de cas au niveau de la côte antillaise française : synthèse bibliographique sur les mouvements de terrain tsunamigéniques aux Antilles. Rapport BRGM RP-55783-FR, 32p, 5 figures.
- POISSON BL. ET PEDREROS, R. (2007) - Etude de cas au niveau de la côte antillaise française : modélisation numérique des tsunamis. BRGM/RP-55761-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 intermédiaire, Rapport BRGM/RP-55353-Fr, 109 p, 43 fig., 1 pl. HT

- 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.
- 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, 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, 1-16.
- ZAHIBO N., PELINOVSKY E. (2001) – Evaluation of tsunami risk in the Lesser Antilles. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1, pp 221-231.

9. Références bibliographiques citées dans les rapports intermédiaires :

Zonage sismique, Rapport BRGM RP55376

- AMBRASEYS N.N., ADAMS R.D. (1996) – Large-magnitude Central American earthquakes, 1898-1994. *Geophys. J., Int.*, 127, 665-692
- AMBRASEYS N.N., ADAMS R.D. (2001) – The seismicity of Central America. A descriptive Catalogue 1898-1995. Imperial College Press
- ASPINALL W.P., SHEPHERD J.B., WOO G., WIGHTMAN A., EERI M., ROWLEY K.C., LYNCH L.L., AMBEH W.B. (1994) – Seismic Ground Motion Hazard Assessment at a site near a Segmented Subduction Zone: the Roseau Dam, Saint Lucia, West Indies. *Earthquakes Spectra*, vol. 10, n° 2
- BENITO B., CEPEDA J.M., MARTINEZ DIAZ J.J. (2004) – Analysis of the spatial and temporal distribution of the 2001 earthquakes in El Salvador. *Geol/ Soc. Of Am.*, Special Paper 375.
- BERTIL D., BAZIN S., MALLARINO D., BEAUDUCEL F. (2004) - . Séisme des Saintes - Rapport de Synthèse, Centre de Données Sismologique des Antilles, 8 décembre 2004.
- CALAIS E., MERCIER DE LEPINAY B., SAINT-MARC P., BUTTERLIN J., SCHAAF A. (1992) – La limite de plaques décrochantes nord caraïbe en Hispaniola : évolution paléogéographique et structurale cénozoïque. *Bull. Soc. Géol. France*, t. 163, n° 3, pp 309-324
- CLEMENT C., BERNARD P., VIODE JP, ANTENOR C., LEPINE JC ET BEAUDUCEL F. (2001) – Compilation et validation du catalogue de sismicité des observatoires IPGP des Antilles Françaises. Rapport IPGP
- COMBES PH., MARTIN CH., CARBON D., FIORAVANTI A. (2002) – Révision du zonage sismique de la France. Etude probabiliste. Zonages sismotectoniques en métropole et aux Antilles. *Rapport GRT/MATE/0701 – 150 Annexe 2*
- COTILLA RODRIGUEZ M.O. (1998) – An overview on the seismicity of Cuba. *Journal of Seismology*, 2, 323-335
- FERNANDEZ ARCE M. (2005) – Fenomenos geologicos historicos de America central. Trandiciones populares sobre ellos y cambios sociales significativos que provocaron. *Univ. De Costa Rica., Dialogos Revista Electronica de Historia*, febrero-agosta, ano/vol. 6, n°1, pp230-246

- FEUILLET N. (2000). Sismotectonique des Petites Antilles; Liaison entre activité sismique et volcanisme. *Thèse de Doctorat*, Université Paris VII Denis Diderot.
- FEUILLET N., MANIGHETTI I., TAPPONNIER P. (2001) – Extension active perpendiculaire à la subduction dans l'arc des Petites Antilles (Guadeloupe, Antilles françaises). *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes*, 583-590
- FEUILLET N., MANIGHETTI I., & TAPPONNIER P. (2002). Arc parallel extension and localization of volcanic complexes in Guadeloupe, Lesser Antilles. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. B12, 2331, doi:10.1029/2001JB000308
- FEUILLET N., TAPPONNIER P., & MANIGHETTI I. (2004). Differential uplift and tilt of Pleistocene reef platforms and Quaternary slip rate on the Morne-Piton normal fault (Guadeloupe, French West Indies). *Journal of Geophysical Research*, v. 109, n. B02404, doi:10.1029/2003JB002496.
- GODEFROY P., MOURoux P. (1990) – Etude et prévention du risque sismique aux Petites Antilles. Evaluation de l'aléa sismique sur l'archipel de la Guadeloupe. Rapport de synthèse. Rapport BRGM R 30 857
- LANDER J.F., WHITESIDE L.S., LOCKRIDGE P.A. (2002) – A brief history of tsunamis in the Caribbean sea. *The international Journal of The Tsunami Society*, vol. 20, n° 2, Published Electronically
- McCann W.R. (2004) Estimating the threat of tsunamigenic earthquakes and earthquake induced-landslide tsunami in the caribbean. From <http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/eng/doc15715/doc15715.htm> A privately published report by the former Director of the Seismic Research Institute at the University of Puerto Rico
- MARTIN CH., SECANELL R., COMBES PH., LIGNON G., FIORAVANTI A. (2002) – Révision du zonage sismique de la France. Paramètres d'entrée des modèles. *Rapport GRT/MATE/0701 – 150 Annexe 3*
- PEREZ O.J., SANZ C., LAGOS G. (1997) – Microseismicity, tectonics and seismic potential in southern Caribbean and northern Venezuela. *Journal of Seismology*, 1: 15-28
- PERRET, M. (1982), Contribution à l'étude structuro-sédimentaire de la marge ouest de la Guadeloupe (Petites Antilles), *Rapport Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs (I.F.P.)*, 1982.
- STEPHAN J.F., MERCIER-DE-LEPINAY B., CALAIS E., TARDY M., BECK C., CARFANTAN J.CH., OLIVET J.L., VILA J.M., BOUYASSE PH., MAUFFRET A., BOURGOIS J., THERY J.M., TOURNON J., BLANCHET R., DERCOURT J. (1990) – Paleogeodynamic maps of the Caribbean : 14 steps from Lias to Present. *Bull. Soc. géol. France*, (8), VI, 6, 915-919, 1 fig., 14 cartes coul. h.t.

- TABOADA A., RIVERA L.A., FUENZALIDA A., CISTERNAS A., PHILIP H., BIJWAARD H., OLAYA J., RIVERA CL. (2000) – Geodynamics of the northern Andes: subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, vol. 19, n° 5, pp787-813
- TERRIER M., ET COMBES PH., AVEC LA COLLABORATION DE CARBON D., GRELLET B., ET SEDAN O. (2002). Failles actives et évaluation de l'aléa sismique : prise en compte des failles actives dans l'aménagement du territoire aux Antilles (Martinique et Guadeloupe). Partie 1 : Identification des systèmes de failles actives dans l'archipel de la Guadeloupe et l'île de la *Martinique*. *Rapport BRGM/RP-51258-FR*. 118 pages, 30 fig., 8 tab., 4 annexes
- TOMBLIN J.F., ASPINALL W.P. (1975) – Reconnaissance report of the Antigua, West Indies earthquake of October 8, 1974. *Bull. of the Seismological of Am.*, vol 65, n° 6, pp 1553-1573
- 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.
- WESTERCAMP D., TAZIEFF H. (1980) – Martinique, Guadeloupe, Saint-Martin, La Désirade, série *Guides géologiques régionaux*, Edit. Masson
- ZAHIBO N., PELINOVSKY E. (2001) – Evaluation of tsunami risk in the Lesser Antilles. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1, pp 221-231
- ZAHIBO N., PELINOVSKY E., OKAL E., YALÇINER A., KHARIF CH., TALIPOVA T., KOZELKOV A. (2005) – The earthquake and tsunami of november 21, 2004 at Les Saintes, Guadeloupe, Lesser Antilles. *Science of Tsunami Hazards*, vol. 23, n° 1, pp 25-39

Bibliographie Mouvements de terrain, volcanisme et tsunamis, Rapport BRGM RP 55783

- Boudon, G., Semet, M. P., Vincent, P. M., 1984. Flank failure-directed blast eruption at Soufrière, Guadeloupe, French West Indies : A 3000-yr-old Mt St Helens?, *Geology* 12, p.350-353.
- Boudon, G., Le Friant, A., Komorowski, J-C., Semet, M. P., and Deplus, C., 2003. Déstabilisations de flanc sur les volcans des petites Antilles, In Rapport quadriennal 1999–2002, CNFGG, XXIIIème Assemblée Générale de l'UGGI, Saporro, Japon.
- Bryant, E.A. 2001 *Tsunami: The underrated hazard*. Cambridge University Press, Cambridge, 320p.
- Calder, E., Young, S., Steve. R., Sparks, S., Barclay, J., Voight, B., Herd, R.A., Lockett, R., Norton, G.E., Pollard, L., Ritchie, L., Robertson, R.E.A., and MVO staff, 1998. The Boxing day collapse, 26 December 1997, Montserrat Volcano Observatory, Special Report 06.

Chrétien, S. and R. Brousse, 1989. Events preceding the great eruption of 8 May, 1902 at Mount Pelée, Martinique, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 38, Issues 1-2, p.67-75.

Cole P D, Calder E S, Sparks R S J, Clarke A B, Druitt T H, Young S R, Herd R A, Harford C L, Norton G E, 2002. Deposits from dome-collapse and fountain-collapse pyroclastic flows at Soufriere Hills volcano, Montserrat. In; Druitt T H, Kokellar B P (eds), The eruption of Soufriere Hills volcano, Montserrat, from 1995 to 1999, *Geol Soc London Mem*, 21, p.231-262.

Deplus, C., Le Friant, A., Boudon, G., Komorowski, J.-C., Villemant, B., Harford, C., Ségoufin, J., and Cheminée, J.-L., 2001. Submarine evidence for large-scale debris avalanches in the Lesser Antilles Arc, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 192, no. 2, p.145–157.

Edmonds, M., R.A. Herd and M. Strutt, (2006). Tephra deposits associated with a large lava dome collapse, Soufrière Hills Volcano, Montserrat, 12-15 July 2003. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 153, p.313-330.

Gisler, G., Weaver, R. and M. Gittings, 2006. Two-Dimensional Simulations of Explosive Eruptions of Kick-em Jenny and other Submarine Volcanos, *Science of Tsunami Hazards*, 25, p.34-41.

Herd, R.A., Edmonds, M., and Bass, V., 2005. Catastrophic lava dome failure at Soufrière Hills volcano, Montserrat 12–13 July 2003, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 148, 3–4, p.234–252, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2005.05.003.

Komorowski, J.-C., Boudon, G., Semet, M., Villemant, B., Hammouya, G., 2002. La Soufrière de Guadeloupe : une histoire d'effondrements sectoriels récurrents et de fluides hydrothermaux acides : Quo vadimus ? *Réunion des Sciences de la Terre*, Nantes, 9-12 avril 2002.

Komorowski, J. C., Boudon, G., Semet, M., Beauducel, F., Ante´ nor-Habazac, C., Bazin, S., and Hammouya, G., 2005. Guadeloupe, in: J. Lindsay, R. Robertson, J. Shepherd & S. Ali (eds), *Volcanic Hazard Atlas of the Lesser Antilles.*, Trinidad and IAVCEI: University of the West Indies, Seismic Research Unit, p.65–102.

Lander, J. F., Whiteside, L. S., and Lockridge, P. A 2002. A brief history of tsunami in the Caribbean Sea, *Science of Tsunami Hazards*, 20, 2, p.57–94.

Le Friant, A., 2001. Les déstabilisations de flanc des volcans de l'arc des Petites Antilles : origines et conséquences. *Thèse de doctorat*, Université Paris 7, France.

Le Friant A., Boudon G., Komorowski J.-C. et Deplus C., 2002. L'île de la Dominique, à l'origine des avalanches de débris les plus volumineuses de l'arc des Petites Antilles, *C. R. Géosciences*, 334, p.235-243.

Le Friant, A., G. Boudon, C. Deplus, and B. Villemant, 2003. Large-scale flank collapse events during the activity of Montagne Pelée, Martinique, Lesser Antilles, *J. Geophys. Res.*, 108(B1), 2055, doi:10.1029/2001JB001624.

Le Friant, A., Harford, C.L., Deplus, C., Boudon, G., Sparks, R.S.J., Herd, R.A., and Komorowski, J.C., 2004. Geomorphological evolution of Montserrat (West Indies): Importance of flank collapse and erosional processes, *Journal of the Geological Society [London]*, v. 161, p.147–160.

Le Friant A., Boudon G., Komorowski J.-C., Heinrich Ph., Semet M.P., 2006. Potential flank-collapse of Soufrière volcano, Guadeloupe, Lesser Antilles? Numerical simulation and Hazards. *Natural Hazards*, vol.39, p.381-393.

Lindsay JM, Shepherd JB, Wilson D, 2005. Volcanic and scientific activity at Kick 'em Jenny submarine volcano 2001-2002: implications for volcanic hazard in the southern Grenadines, Lesser Antilles. *Natural Hazards*, vol.34, p.1-24.

O'Loughlin F. and J.F. Lander, 2003. Caribbean Tsunamis - A 500-Year History from 1498-1998, *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Kluwer Academic Publishers, 263 p.

Pararas-Carayannis, G., 2004. Volcanic tsunami generating source mechanisms in the eastern Caribbean region, *Science of Tsunami Hazards*, 22, p.74-114.

Pelinovsky E., Zahibo N., Dunkley P., Edmonds M., Herd R., Talipova T., Kozelkov A., Nikolchina I., 2004. Tsunami generated by the volcano eruption on July 12-13 2003 at Montserrat, Lesser Antilles. *Science of Tsunami Hazards*, 22, p.44-57.

Robson, G.R., 1964. An earthquake catalogue for the Eastern Caribbean, 1530-1960, *Bull. Seismological Soc. Amer.*, Vol. 554, No. 2, p.785-832.

Sigurdsson, H., Sparks, R.S.J., Carey, S.N., and Huang, T.C., 1980, Volcanogenic sedimentation in the Lesser Antilles arc, *Journal of Geology*, v. 88, p.523-540.

Smith, M. and Shepherd, J., 1993. Preliminary investigations of the tsunami hazard of Kick 'em Jenny submarine volcano, *Nat. Hazards*, 7, p.257-277.

Tanguy, J-C., 1994. The 1902–1905 eruptions of Montagne Pelée, Martinique: anatomy and retrospection, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 60, p.87-107.

Tanguy, J-C., 2004. Rapid dome growth at Montagne Pelée during the early stages of the 1902–1905 eruption: a reconstruction from Lacroix's data, *Bulletin of Volcanology*, 66, p.615-621.

Trofimovs, J., Amy, L., Boudon, G., Deplus, C., Doyle, E., Fournier, N., Hart, M.B., Komorowski, J-C., Le Friant, A., Lock, E.J., Pudsey, C., Ryan, G., Sparks, R.S.J., Talling, P., 2006. Submarine pyroclastic deposits formed at the Soufriere Hills volcano,

Montserrat (1995-2003): What happens when pyroclastic flows enter the ocean? *Geology*, 34, p.549-552.

Vincent, P. M., J. L. Bourdier, and G. Boudon, The primitive volcano of mount Pelée: Its construction and partial destruction by flank collapse, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 38, p.1-15, 1989.

Watlinton, R. A., Wilson, W. D., Johns, W. E., and Nelson, C., 2002. Updated Bathymetric Survey of Kick 'em Jenny Submarine Volcano, *Mar. Geophys. Res.* 23, p.271–276.

Zahibo, N. and Pelinovsky, E. 2001. Evaluation of tsunami risk in the Lesser Antilles, *Natural Hazard and Earth Sciences*, 3, p.221–231.

Simulations des tsunamis, Rapport BRGM RP 55661

Berté, E. (1902). Notes pour servir à l'histoire de l'éruption volcanique de 1902 – Destruction de Saint-Pierre à la Martinique, le 8 mai 1902. [<http://www.cablesm.com/html/rapportberte.htm>]

Boudon, G., Le Friant, A., Komorowski, J.-C., Semet, M. P., and Deplus, C.: 2003, Déstabilisations de flanc sur les volcans des petites Antilles, In Rapport quadriennal 1999–2002, CNFGG, XXIIIème Assemblée Générale de l'UGGI, Saporro, Japon.

BRGM-MEDAD (2008). Base de données sur les tsunamis historiques en France. <http://www.tsunamis.fr>.

Calder, E., Young, S., Steve. R., Sparks, S., Barclay, J., Voight, B., Herd, R.A., Lockett, R., Norton, G.E., Pollard, L., Ritchie, L., Robertson, R.E.A., and MVO staff (1998). The Boxing day collapse, 26 December 1997, Montserrat Volcano Observatory, Special Report 06.

Chrétien, S. & Brousse, R. (1989), 'Events preceding the great eruption of 8 May, 1902 at Mount Pelee, Martinique; Mount Pelee', *J.Volcanol.Geotherm.Res.* 38(1-2), 67-75.

Chrétien, S. (2007). Montagne Pelée, 8 mai 1902... site internet de l'Association Volcanologique Européenne [http://www.lave-volcans.com/fiches_science_5.html]

Cole, P.D.; Calder, E.S.; Sparks, R.S.J.; Clarke, A.B.; Druitt, T.H.; Young, S.R.; Herd, R.A.; Harford, C.L. & Norton, G.E. (2002), 'Deposits from dome-collapse and fountain-collapse pyroclastic flows at Soufriere Hills Volcano, Montserrat; The eruption of Soufriere Hills Volcano, Montserrat from 1995 to 1999', *Memoir - Geological Society of London* 21, 231–262.

Deplus, C., Le Friant, A., Boudon, G., Komorowski, J.-C., Villemant, B., Harford, C., Ségoufin, J., and Cheminée, J.-L. (2001). Submarine evidence for large-scale debris avalanches in the Lesser Antilles Arc, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 192, no. 2, p.145–157.

- Deville Ch. (1867). Sur le tremblement de terre du 18 novembre 1867 aux Antilles. C.R. Académie des Sciences de Paris, T65.
- 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.
- Edmonds, M.; Herd, R.A. & Strutt, M.H. (2006), 'Tephra deposits associated with a large lava dome collapse, Soufriere Hills Volcano, Montserrat, 12-15 July 2003', *J.Volcanol.Geochem.Res.* 153(3-4), 313-330.
- 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.
- Heinrich, P.; Mangeney, A.; Guibourg, S.; Roche, R.; Boudon, G. & Cheminee, J. (1998), 'Simulation of water waves generated by a potential debris avalanche in Montserrat, Lesser Antilles; The Soufriere Hills eruption, Montserrat, British West Indies; introduction to special section; Part 2', *Geophys.Res.Lett.* 25(19), 3697-3700.
- Herd, R.A.; Edmonds, M. & Bass, V.A. (2005), 'Catastrophic lava dome failure at Soufriere Hills Volcano, Montserrat, 12-13 July 2003', *J.Volcanol.Geochem.Res.* 148(3-4), 234-252.
- 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.
- Komorowski, J-C., Boudon, G., Semet, M., Villemant, B., Hammouya, G., 2002. La Soufrière de Guadeloupe: une histoire d'effondrements sectoriels récurrents et de fluides hydrothermaux acides: Quo vadimus ? Réunion des Sciences de la Terre, Nantes, 9-12 avril 2002.
- Komorowski, J. C., Boudon, G., Semet, M., Beauducel, F., Ante' nor-Habazac, C., Bazin, S., and Hammouya, G., 2005. Guadeloupe, in: J. Lindsay, R. Robertson, J. Shepherd & S. Ali (eds), *Volcanic Hazard Atlas of the Lesser Antilles.*, Trinidad and IAVCEI: University of the West Indies, Seismic Research Unit, pp. 65-102.
- Le Friant, A.; Boudon, G.; Komorowski, J.; Heinrich, P. & Semet, M.P. (2006), 'Potential flank-collapse of Soufriere Volcano, Guadeloupe, Lesser Antilles? Numerical simulation and hazards', *Nat.Hazards* 39(3), 381-393.
- Le Friant, A.; Harford, C.L.; Deplus, C.; Boudon, G.; Sparks, R.S.J.; Herd, R.A. & Komorowski, J.C. (2004), 'Geomorphological evolution of Montserrat (West Indies): importance of flank collapse and erosional processes', *Journal of the Geological Society* 161, 147-160.
- Okada, Y. (1985). 'Surface May, deformation due to shear and tensile faults in a half-space'. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.
- Pelinovsky E., Zahibo N., Dunkley P., Edmonds M., Herd R., Talipova T., Kozelkov A., Nikolkina I. (2004). Tsunami generated by the volcano eruption on July 12-13 2003 at Montserrat, Lesser Antilles. *Science of Tsunami Hazards*, 22, 44-57.

- Poisson, B. (2007). Etude préliminaire de l'aléa tsunami aux Antilles : synthèse bibliographique sur les mouvements de terrain tsunamigènes aux Antilles. Rapport intermédiaire, RP-55783-FR, BRGM.
- Sainte-Claire Deville, C.J. (1867), 'Sur le tremblement de terre du 18 novembre 1867 aux Antilles', Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, 1110–1114.
- Tanguy, J. (1994), 'The 1902-1905 eruptions of Montagne Pelee, Martinique: anatomy and retrospection', J.Volcanol.Geotherm.Res. 60(2), 87–107.
- Terrier, M., coll. Bes-de-Berc S. (2007). Réalisation d'un zonage sismique de la plaque caraïbe préalable aux choix de scénarios de tsunamis aux Antilles françaises. Rapport BRGM-RP-55376-FR.
- Trofimovs, J.; Amy, L.; Boudon, G.; Deplus, C.; Doyle, E.; Fournier, N.; Hart, M.B.; Komorowski, J.C.; Le Friant, A.; Lock, E.J.; Pudsey, C.; Ryan, G.; Sparks, R.S.J. & Talling, P.J. (2006), 'Submarine pyroclastic deposits formed at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat (1995-2003); what happens when pyroclastic flows enter the ocean?', Geology (Boulder) 34(7), 549–552.
- Walder, J.S., Watts, P., Sorensen, O.E., and Janssen, K., (2003). 'Tsunamis generated by subaerial mass flows'. Journal of Geophysical Research, Vol.108, B5, 2236.
- Watts P., S.T. Grilli, J.T. Kirby, G.J. Fryer and D.R. Tappin (2003). Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 3, pp. 391–402.
- 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.
- 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, 1-16.

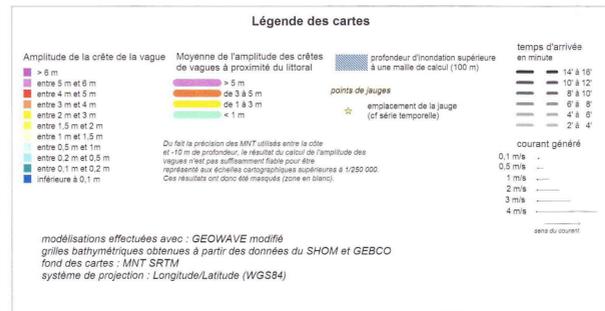
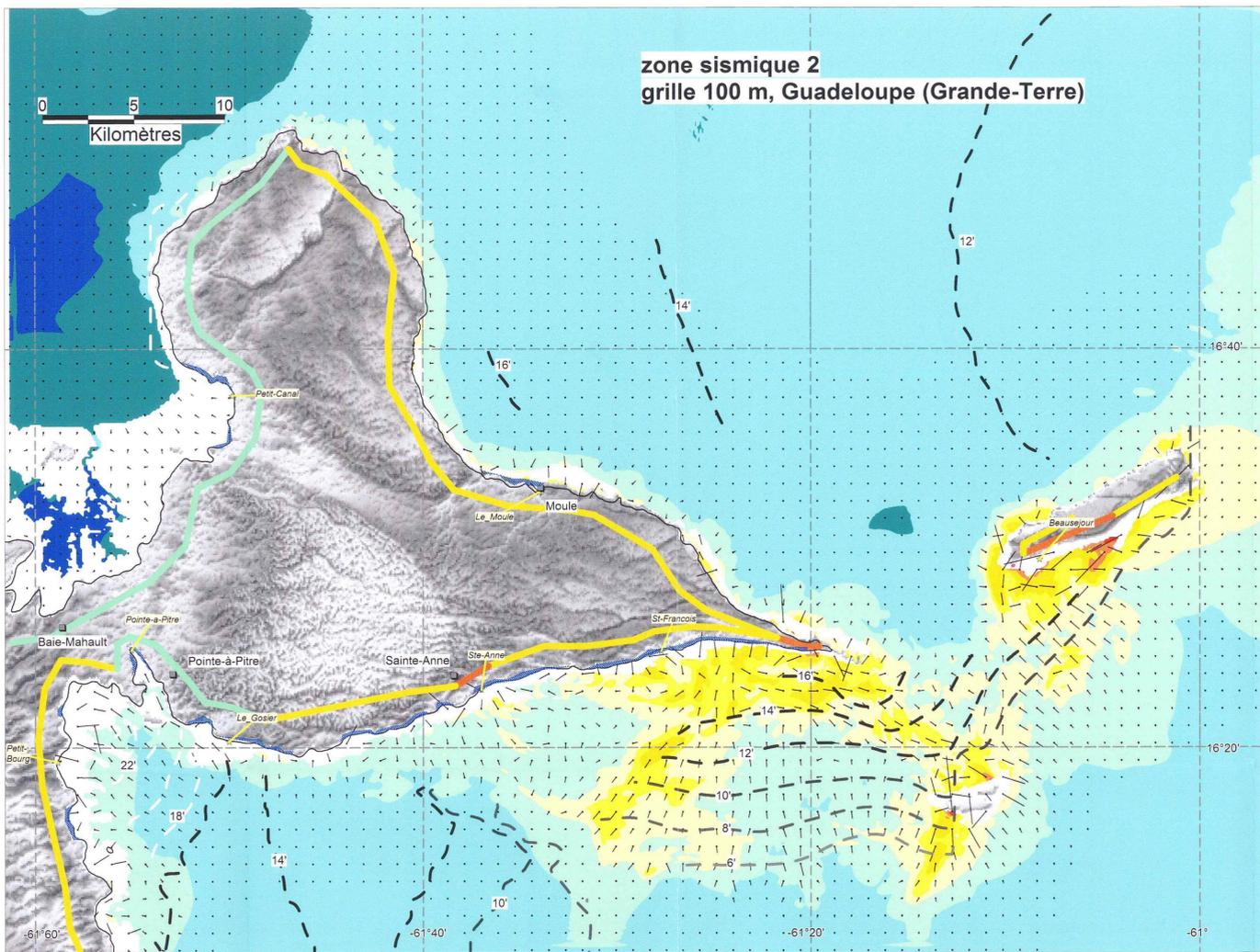


Géosciences pour une Terre durable

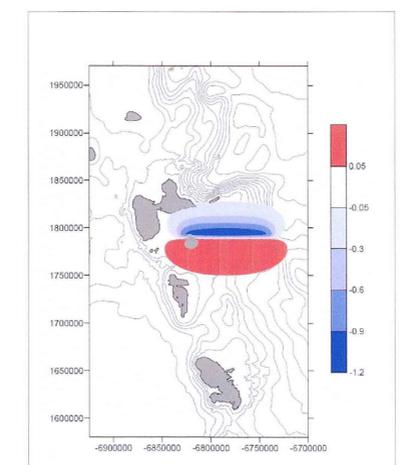
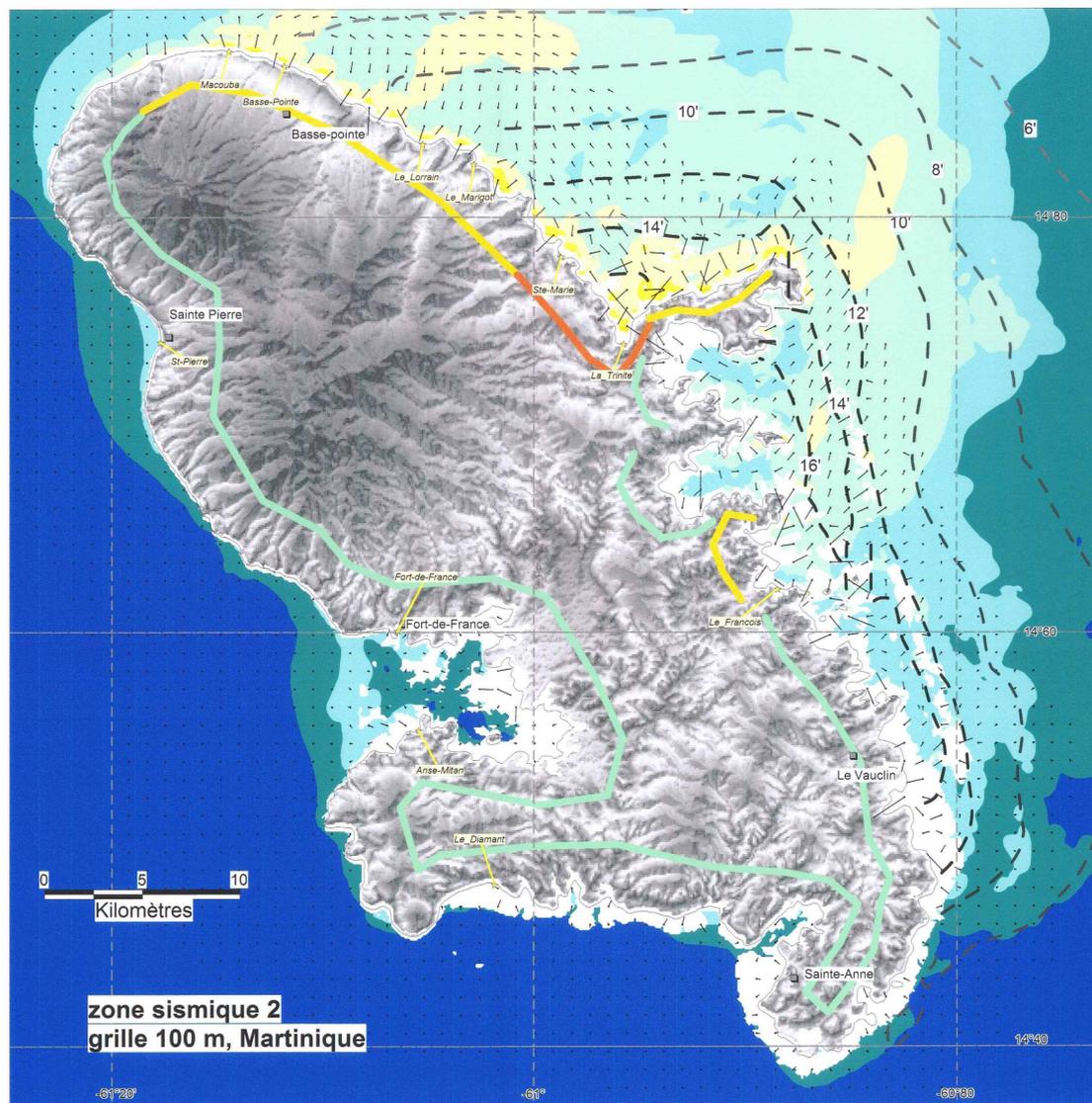
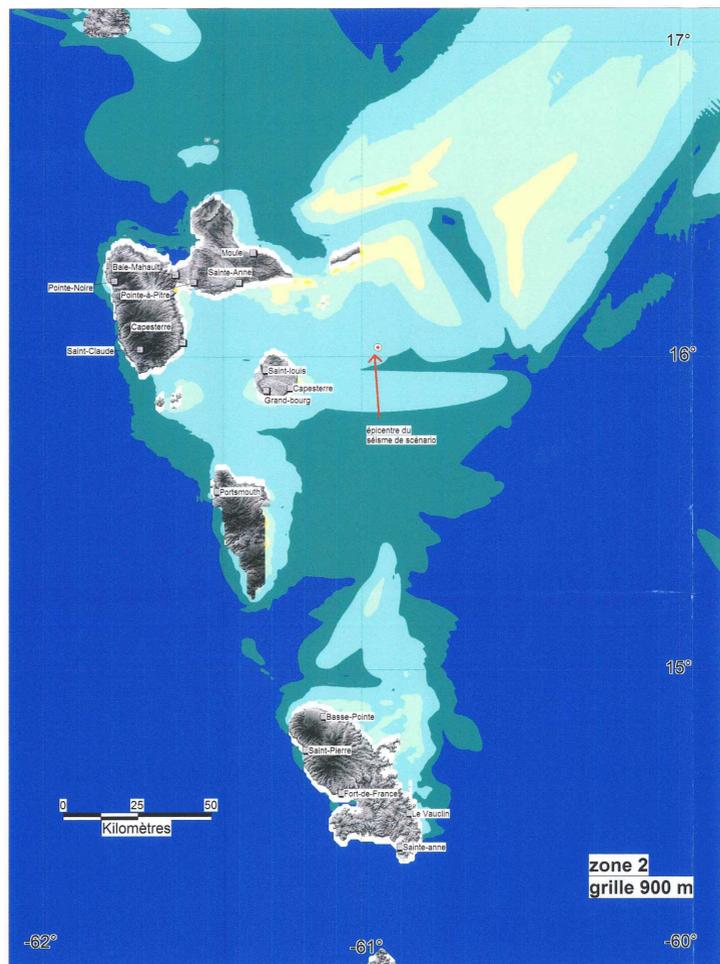
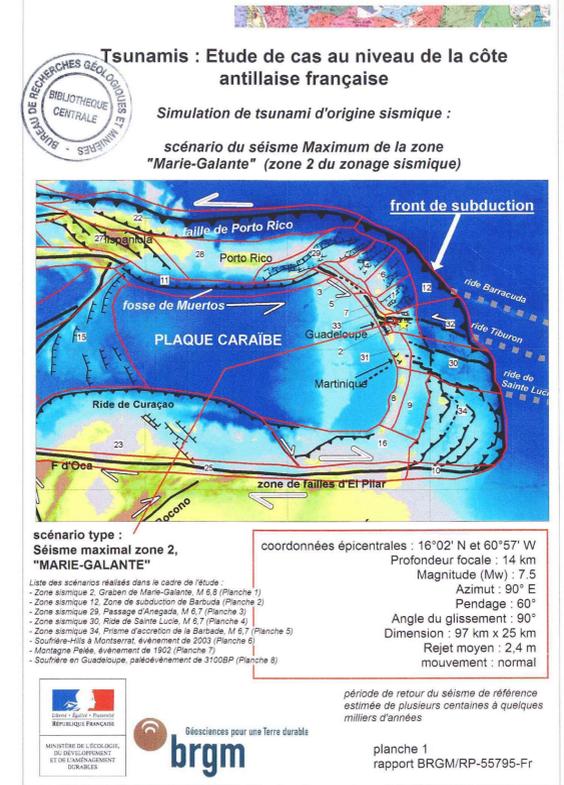
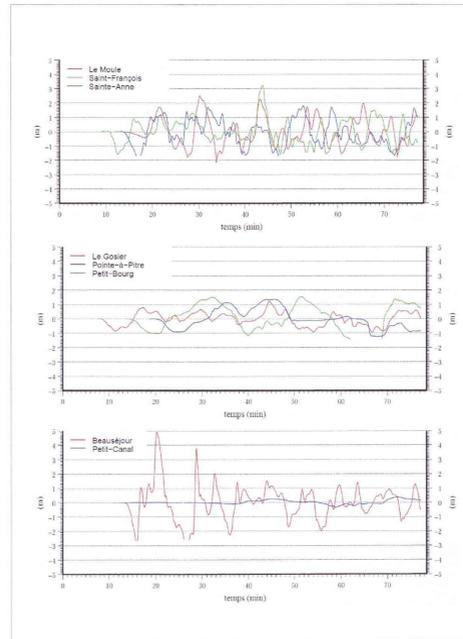
brgm

Centre scientifique et technique
Service Aménagement et Risques Naturels
3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34

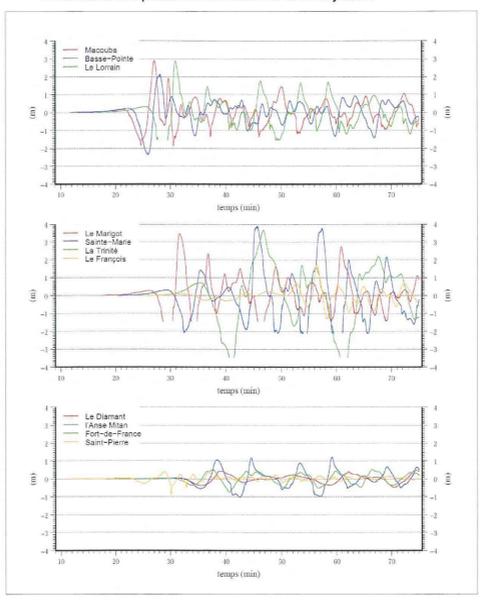


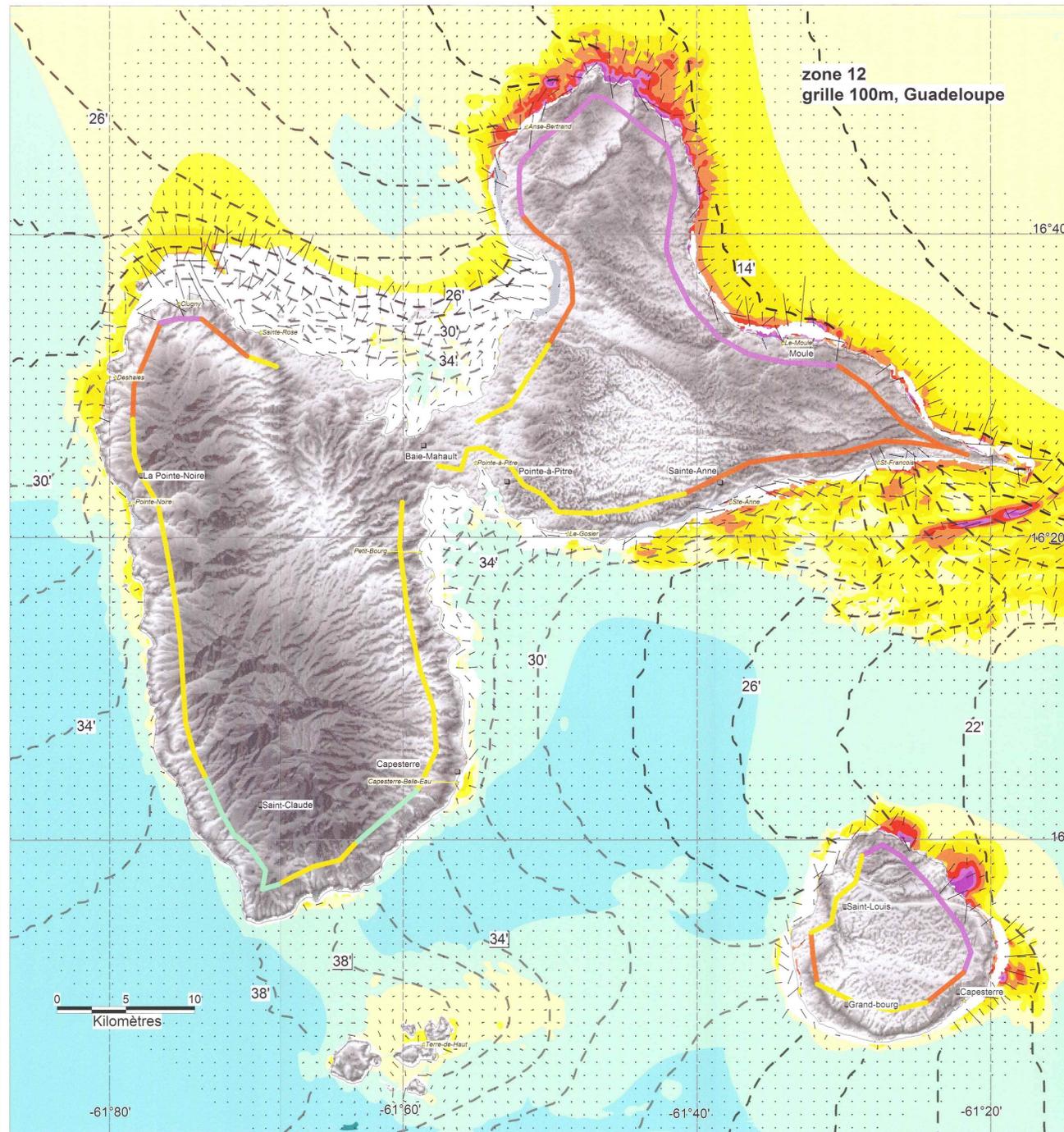
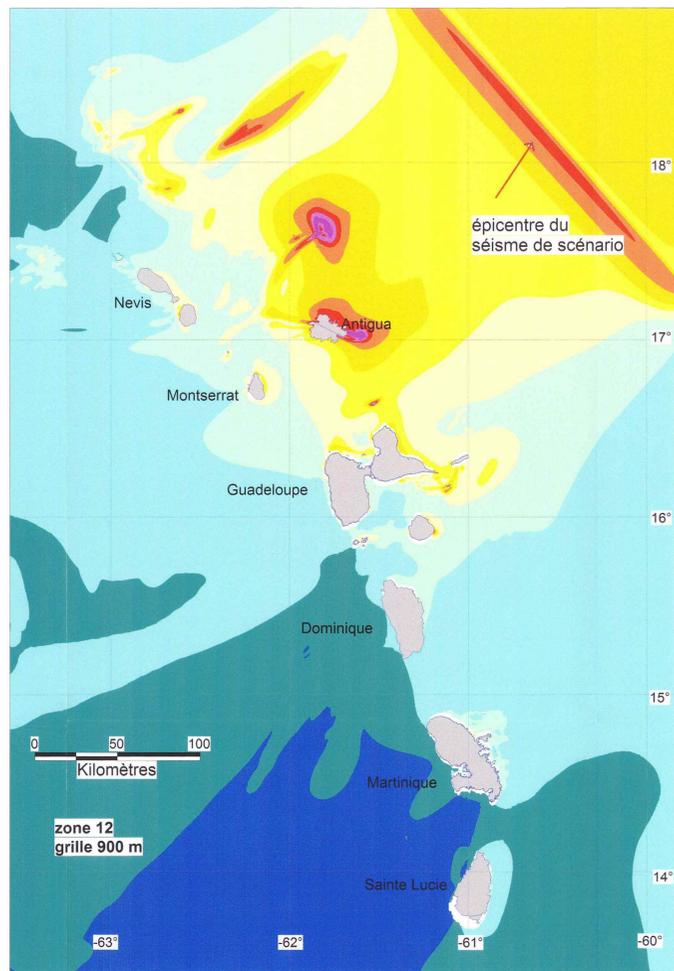
GUADELOUPE, Série temporelle pour la cote de la surface libre, localisation des points de référence sur la carte jointe :



Scénario zone 2 : Cote de la surface libre (en m) à la génération du tsunami

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





Tsunamis : Etude de cas au niveau de la côte antillaise française

Simulation de tsunami d'origine sismique : scénario du séisme Maximum de la zone "Prisme d'accrétion de Barbuda" (zone 12 du zonage sismique)

scénario type :
Séisme maximal zone 12, "PRISME D'ACCRETION DE BARBUDA"

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

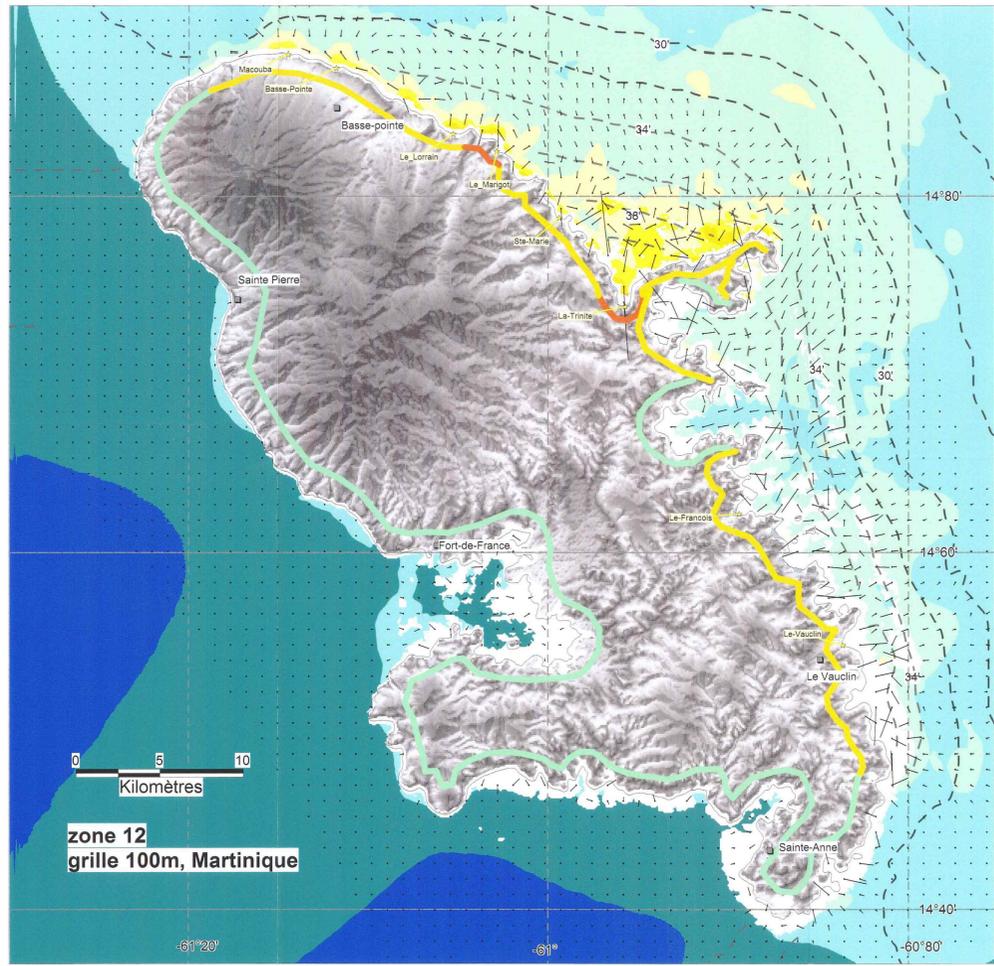
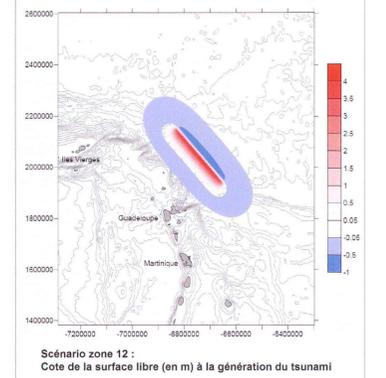
- Zone sismique 3 : Gabon de Marie-Galante, M 7.5 (Planche 1)
- Zone sismique 12 : Zone de subduction de Barbuda, M 8.3 (Planche 2)
- Zone sismique 20 : Passage d'Argaignon, M 7.5 (Planche 3)
- Zone sismique 30 : Rive de Sainte-Lucie, M 7.8 (Planche 4)
- Zone sismique 34 : Prisme d'accrétion de la Barbuda, M 7.1 (Planche 5)
- Souffrière à Montserrat, Avancement de 2003 (Planche 6)
- Montagne Pelee, éruption de 1902 (Planche 7)
- Souffrière en Guadeloupe, paroxysme de 3700BP (Planche 8)

coordonnées épicentrales : 18°06' N et 60°39' W
Profondeur focale : 23 km
Magnitude (Mw) : 8.3
Azimut : 320°
Pendage : 50°
Angle du glissement : 270°
Dimension : 285 km x 44 km
Rajet moyen : 8.5 m
mouvement : inverse

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

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie
bgrm
plateforme pour une terre durable

planche 2
rapport BRGM/RP-55795-Fr

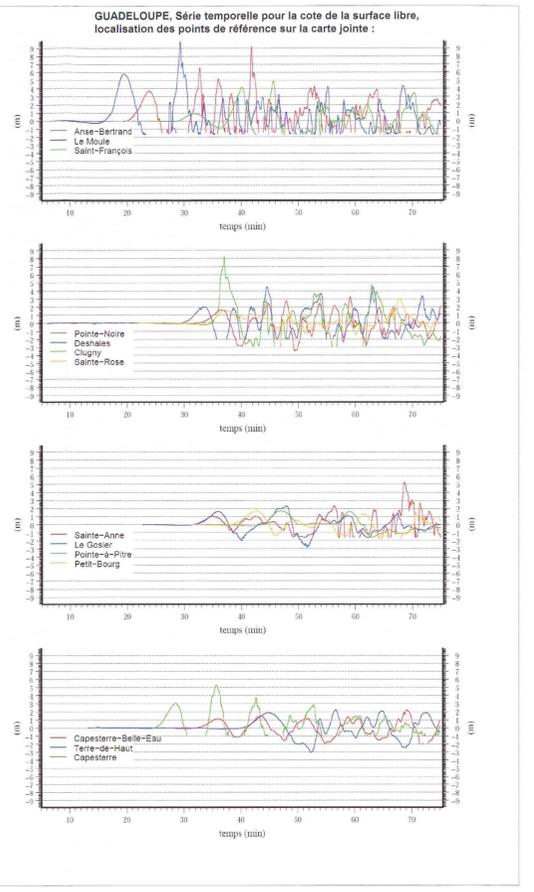
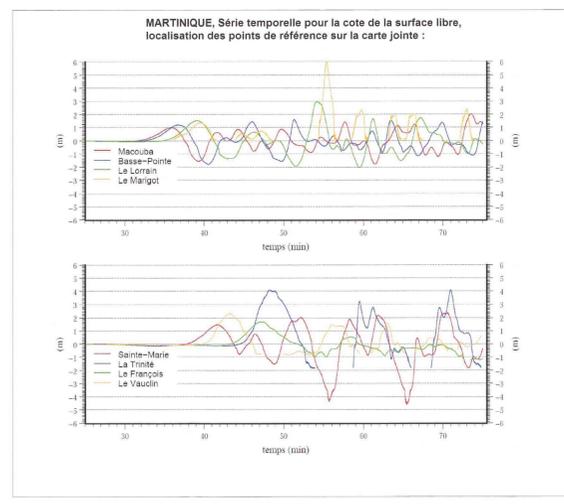


Légende des cartes

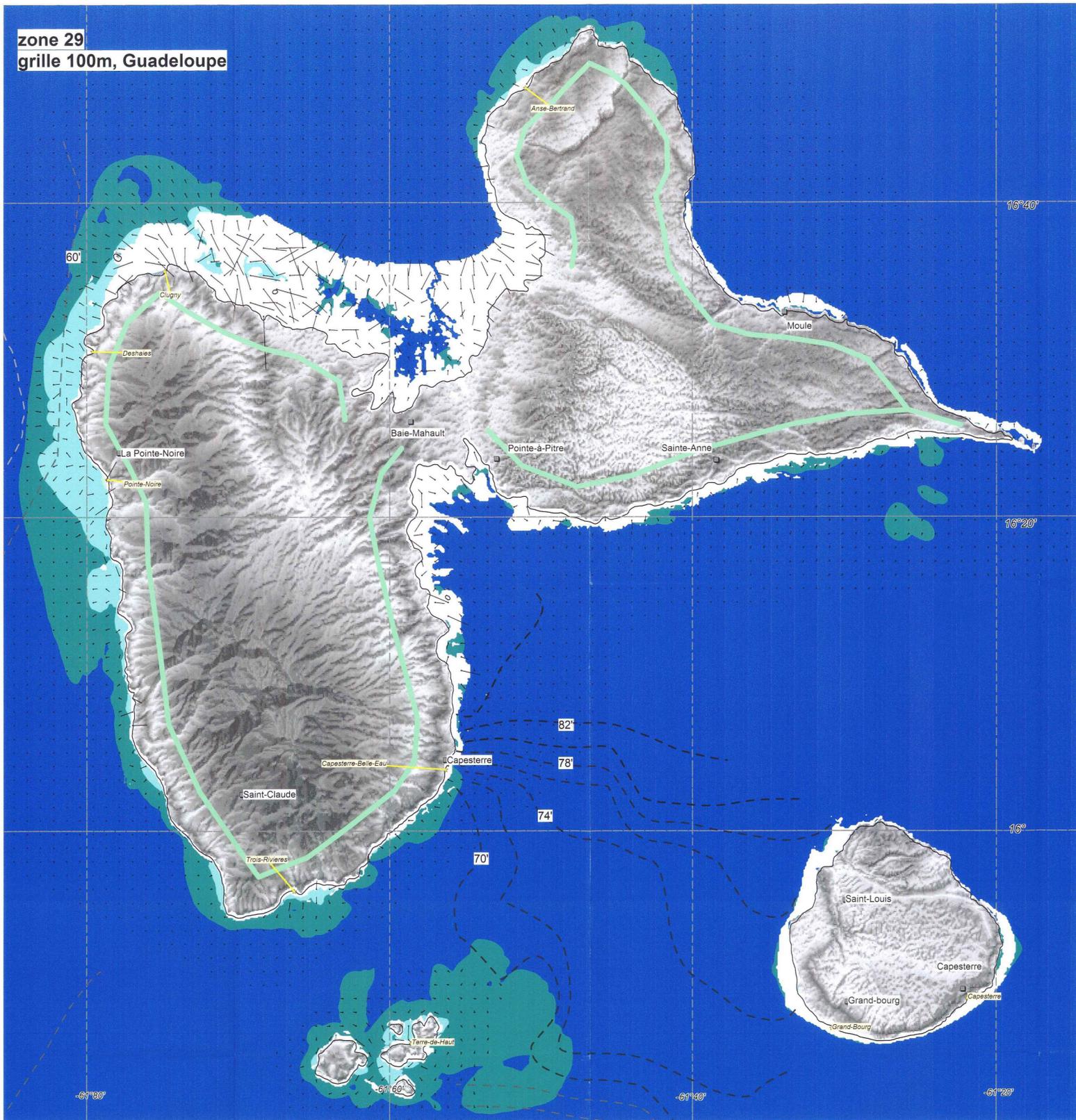
Amplitude de la crête de la vague	Moyenne de l'amplitude des crêtes de vagues à proximité du littoral	temps d'arrivée en minute	courant
> 6 m	> 5 m	> 70	0.1 m/s
entre 5 m et 6 m	entre 3 à 5 m	60 à 70'	0.5 m/s
entre 4 m et 5 m	de 3 à 5 m	50 à 60'	1 m/s
entre 3 m et 4 m	de 1 à 3 m	40 à 50'	2 m/s
entre 2 m et 3 m	< 1 m	30 à 40'	3 m/s
entre 1.5 m et 2 m	profondeur d'inondation supérieure à une maille de calcul (250 m)	20 à 30'	4 m/s
entre 1 m et 1.5 m	points de jauges	10 à 20'	sans de courant
entre 0.5 m et 1 m	emplacement de la jauge (cf série temporelle)	< 10'	
entre 0.2 m et 0.5 m			
entre 0.1 m et 0.2 m			
inférieure à 0.1 m			

Du fait de la précision des MNT utilisés entre la côte et -10 m de profondeur, le résultat ou 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 blanc).

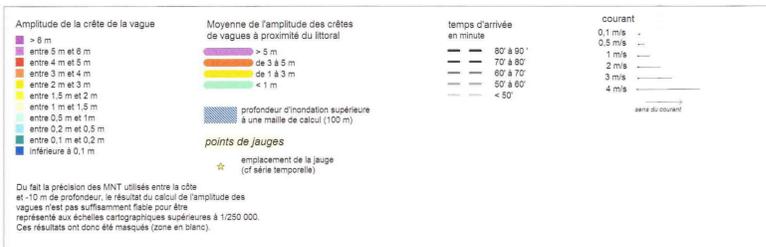
modélisations effectuées avec : GEOWAVE modifié
grilles bathymétriques obtenues à partir des données du SHOM et GEBCO
fond des cartes : MNT SRTM
système de projection : Longitude/Latitude (WGS84)



zone 29
grille 100m, Guadeloupe

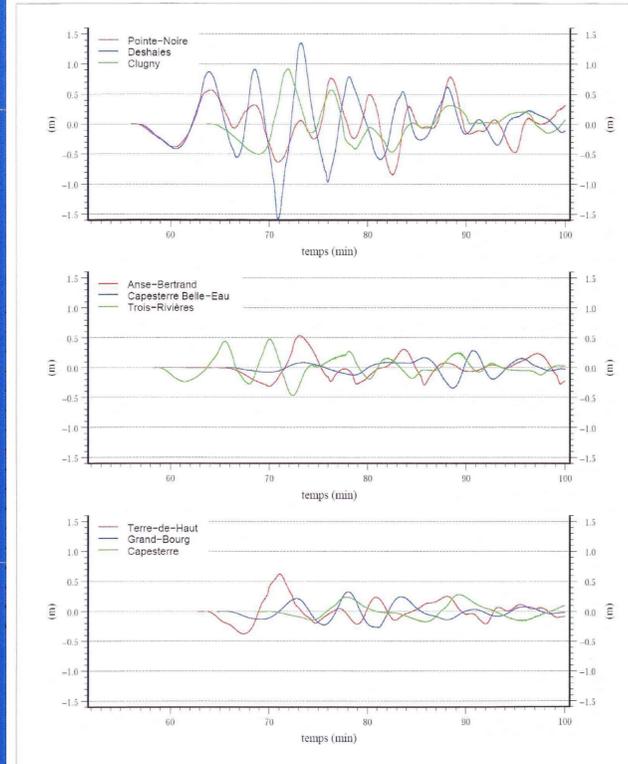


Légende des cartes



modifications effectuées avec : GEOWAVE modifié
grilles bathymétriques obtenues à partir des données du SHOM et GEBCO
fond des cartes : MNT SRTM
système de projection : Longitude, Latitude (WGS84)

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



Tsunamis : Etude de cas au niveau de la côte antillaise française

Simulation de tsunami d'origine sismique :
scénario du séisme Maximum de la zone "Passage d'Anegada" (zone 29 du zonage sismique)

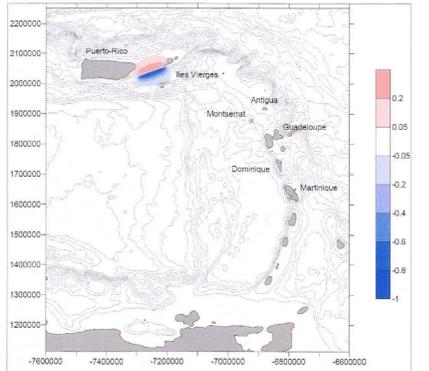
scénario type :
Séisme maximal zone 29, "PASSAGE D'ANEAGADA"

coordonnées épicentrales : 18°06' N et 60°08' W
Profondeur focale : 14 km
Magnitude (Mw) : 7,5
Azimut : 250°
Pendage : 70°
Angle du glissement : 90°
Dimension : 97 km x 25 km
Rejet moyen : 2,4 m
mouvement : normal

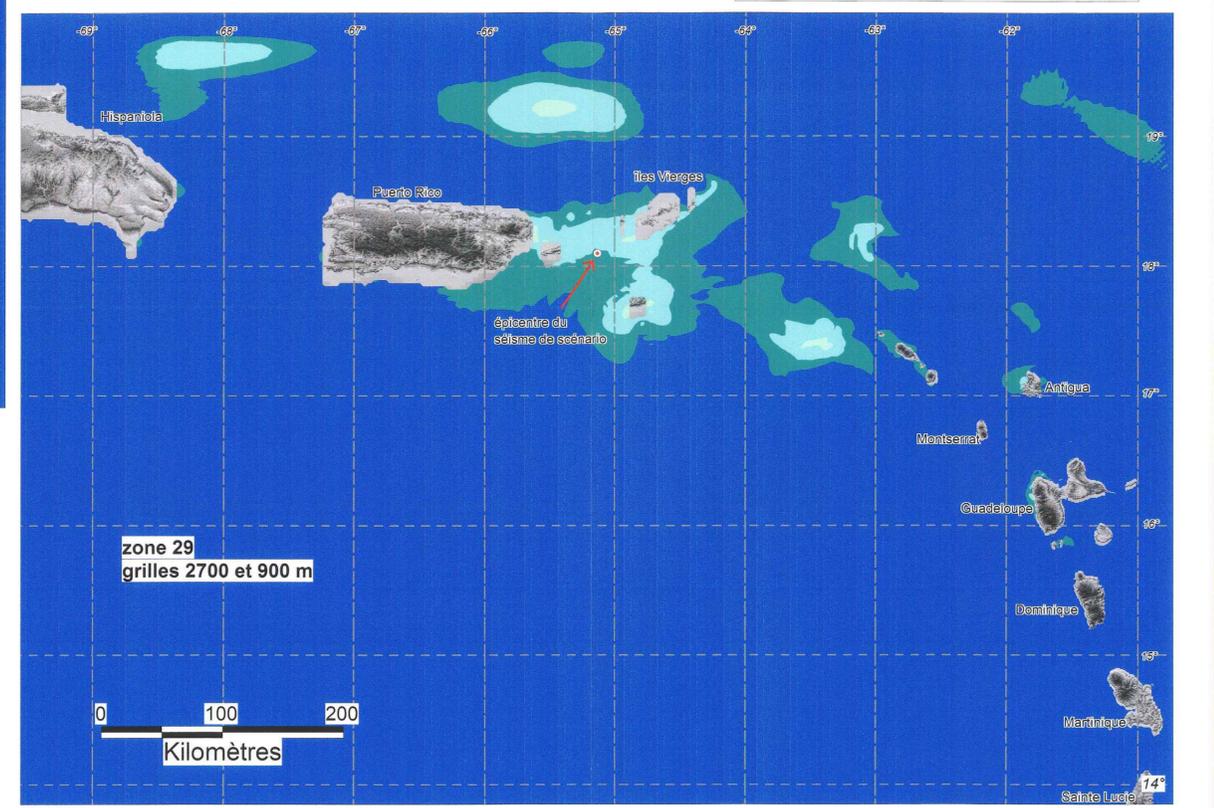
periode de retour du séisme de référence estimée de plusieurs centaines à quelques milliers d'années

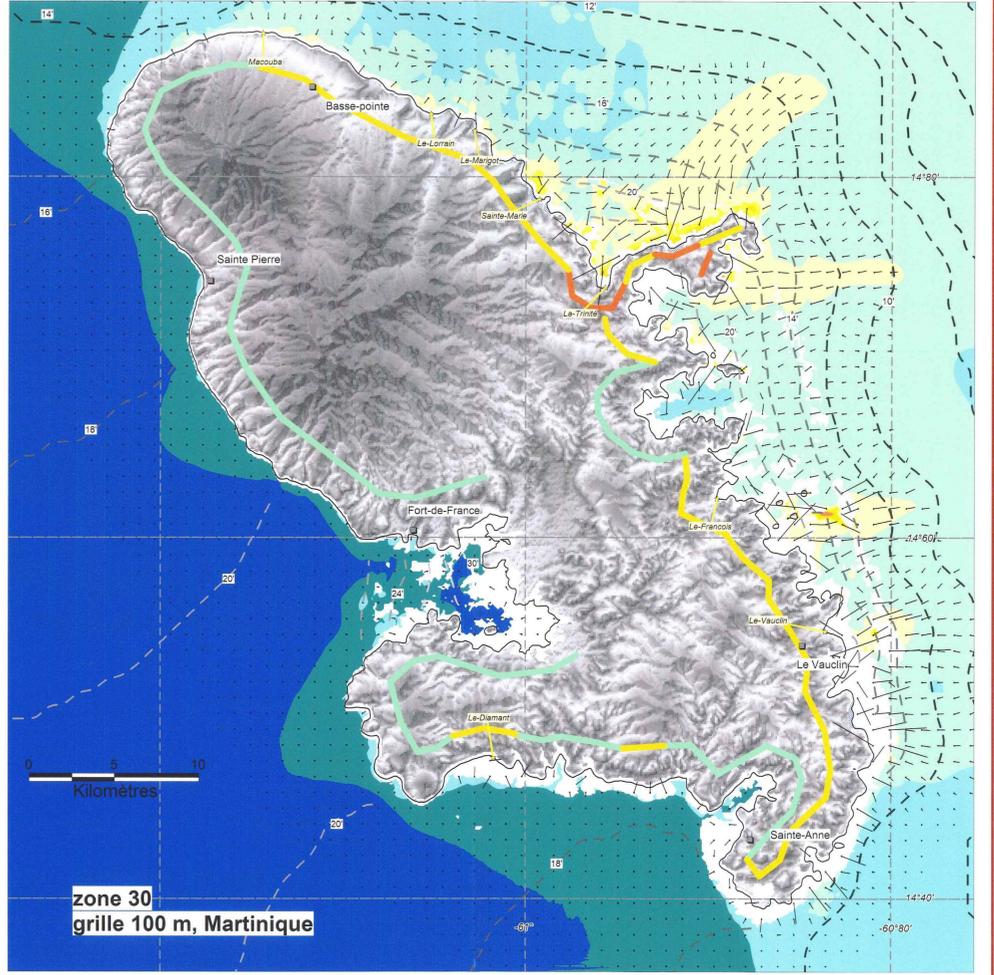
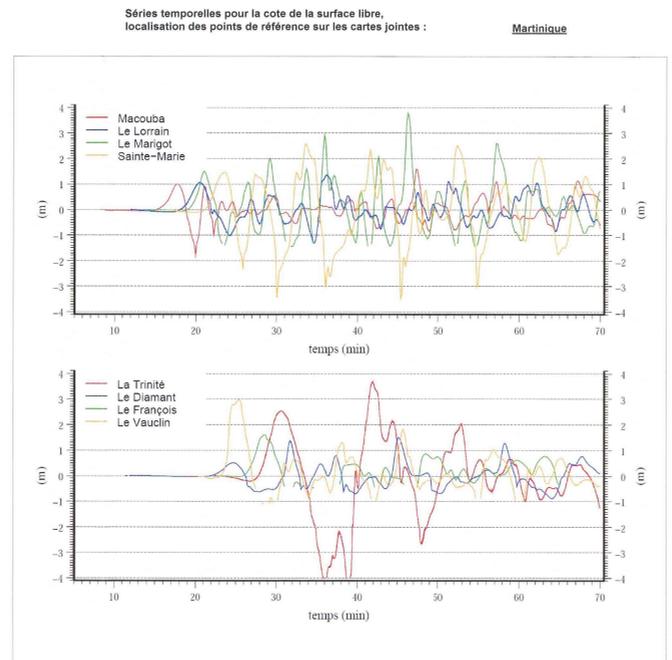
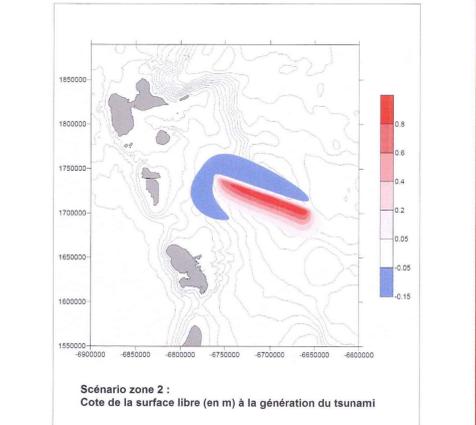
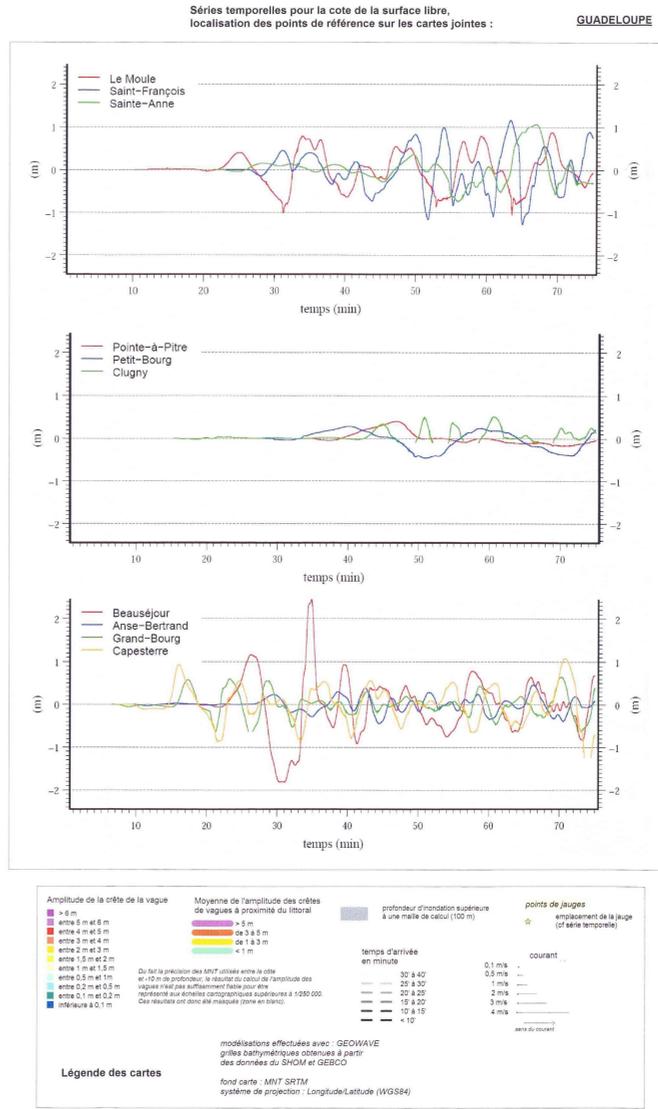
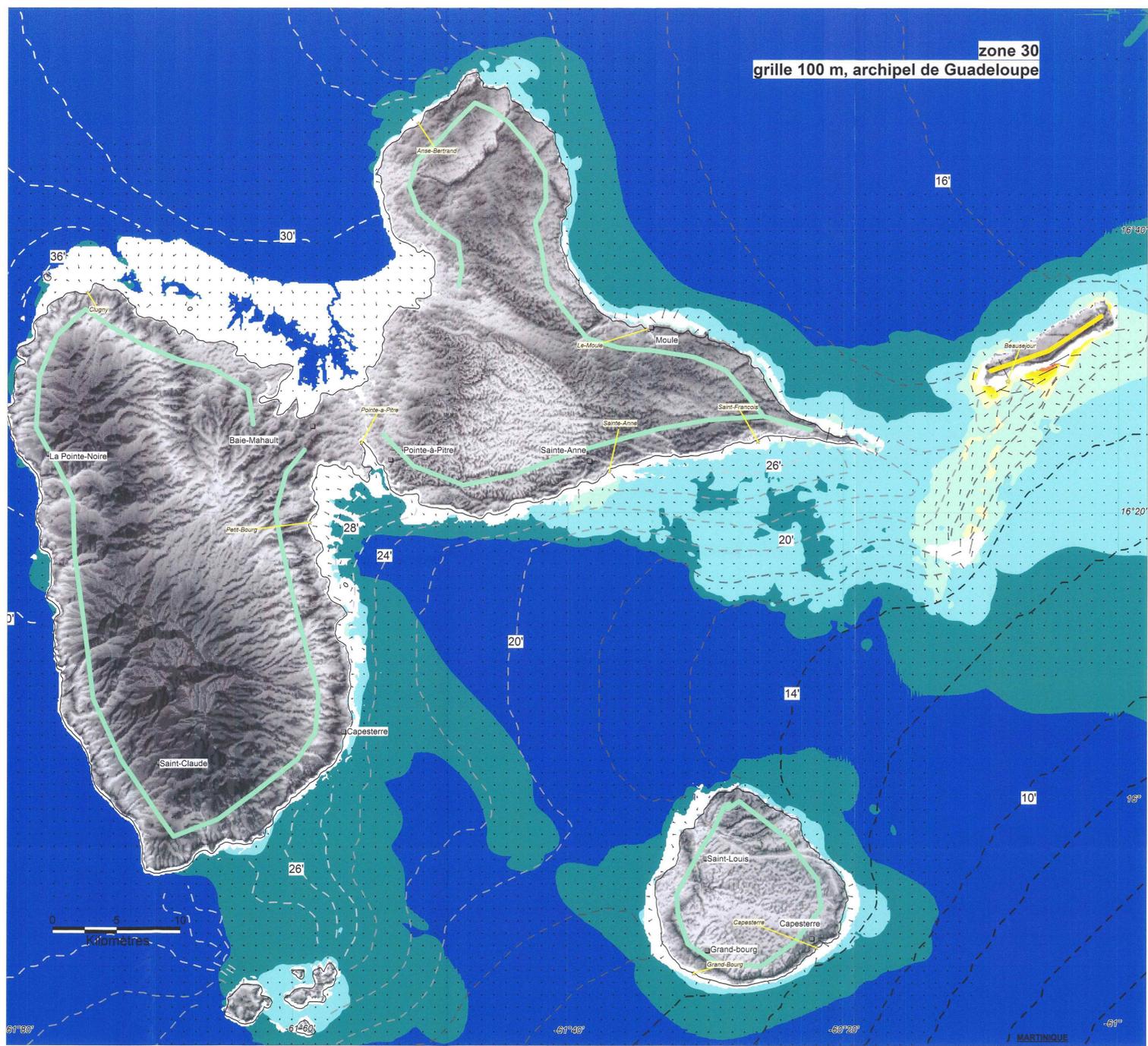
brgm
Géosciences pour une Terre durable

planche 3
rapport BRGM/RP-55795-Fr



Scénario zone 29 : Cote de la surface libre (en m) à la génération du tsunami







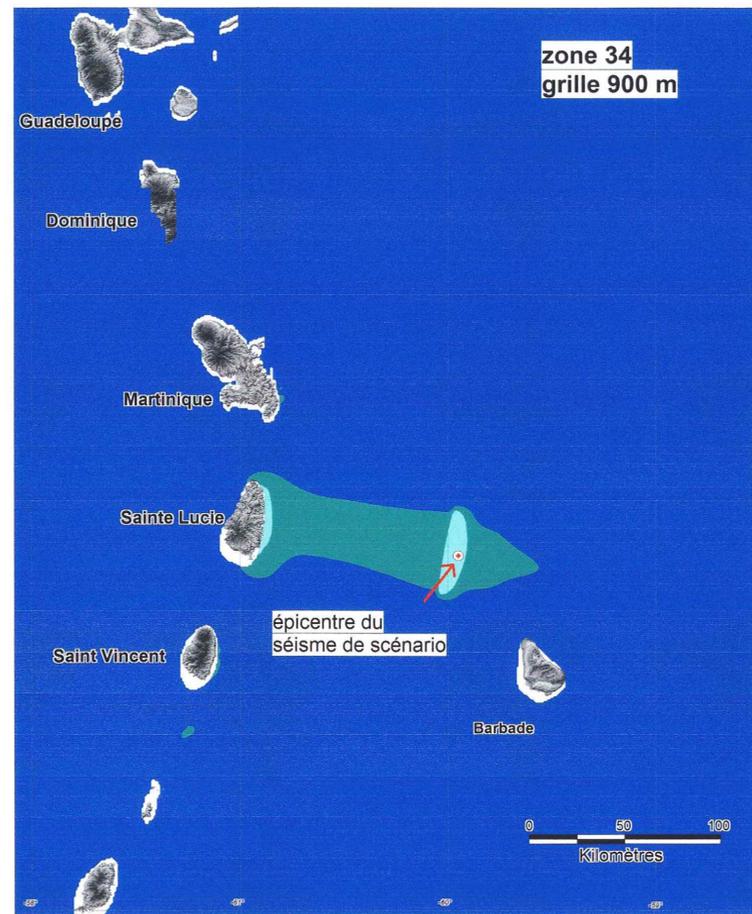
zone 34 :
grille 100m, Martinique

Amplitude de la crête de la vague	Moyenne de l'amplitude des crêtes de vagues à proximité du littoral	profondeur d'inondation supérieure à une maille de calcul (100 m)	temps d'arrivée en minute	courant
> 6 m	> 5 m	[shaded area]	30' à 40'	0,1 m/s
entre 5 m et 6 m	de 3 à 5 m	[shaded area]	25' à 30'	0,5 m/s
entre 4 m et 5 m	de 1 à 3 m	[shaded area]	20' à 25'	1 m/s
entre 3 m et 4 m	< 1 m	[shaded area]	15' à 20'	2 m/s
entre 2 m et 3 m		[shaded area]	10' à 15'	3 m/s
entre 1,5 m et 2 m		[shaded area]		4 m/s
entre 1 m et 1,5 m		[shaded area]		
entre 0,5 m et 1 m		[shaded area]		
entre 0,2 m et 0,5 m		[shaded area]		
entre 0,1 m et 0,2 m		[shaded area]		
inférieure à 0,1 m		[shaded area]		

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 blanc).

modélisations effectuées avec : GEOWAVE
grilles bathymétriques obtenues à partir des données du SHOM et GEBCC
fond des cartes : MNT SRTM
système de projection : Longitude/Latitude (WGS84)

Légende des cartes



zone 34
grille 900 m

épicentre du séisme de scénario

Kilomètres

Tsunamis : Etude de cas au niveau de la côte antillaise française

Simulation de tsunami d'origine sismique :

scénario du séisme Maximum de la zone "Prisme d'accrétion la Barbade" (zone 34 du zonage sismique)

scénario type :
Séisme maximal zone 34, "PRISME D'ACCRETION LA BARBADE"

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

- Zone sismique 2, Graben de Marie-Galante, M 6,8 (Planche 1)
- Zone sismique 12, Zone de subduction de Barbuda (Planche 2)
- Zone sismique 29, Passage d'Anegada, M 6,7 (Planche 3)
- Zone sismique 30, Ride de Sainte-Lucie, M 6,7 (Planche 4)
- Zone sismique 34, Prisme d'accrétion de la Barbade, M 6,7 (Planche 5)
- Soufrière-Hills à Montserrat, événement de 2003 (Planche 6)
- Montagne Pelée, événement de 1902 (Planche 7)
- Soufrière en Guadeloupe, paléodéplacement de 3100BP (Planche 8)

coordonnées épicentrales : 13°44' N et 59°57' W

Profondeur focale : 10 km

Magnitude (Mw) : 7,1

Azimut : 190°

Pendage : 45°

Angle du glissement : 270°

Dimension : 50 km x 20 km

Rejet moyen : 0,7 m

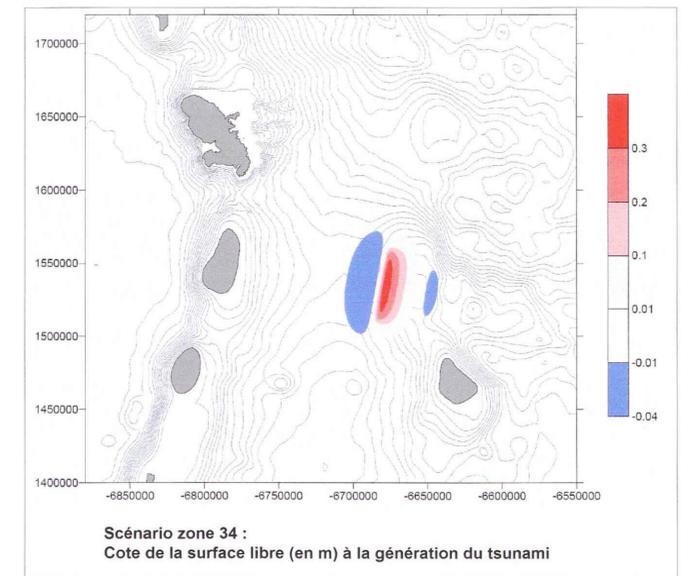
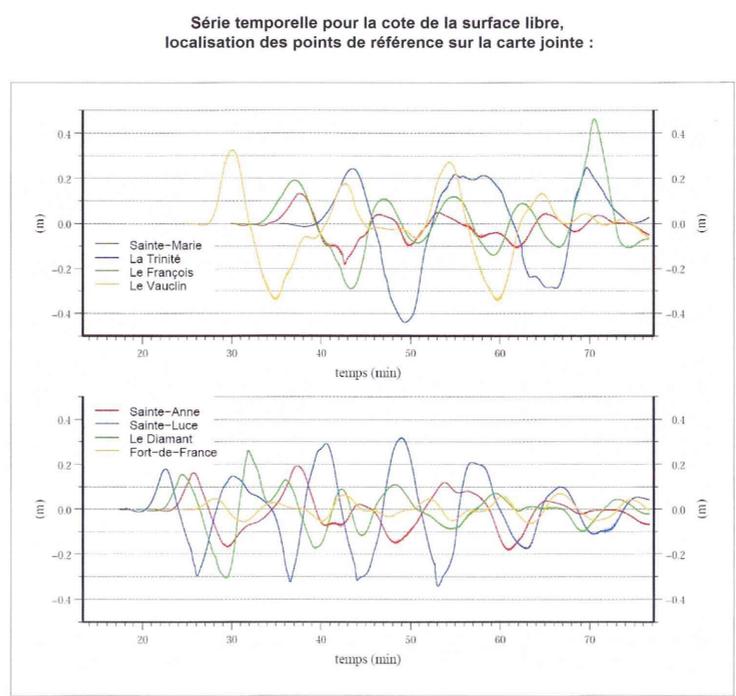
mouvement : inverse

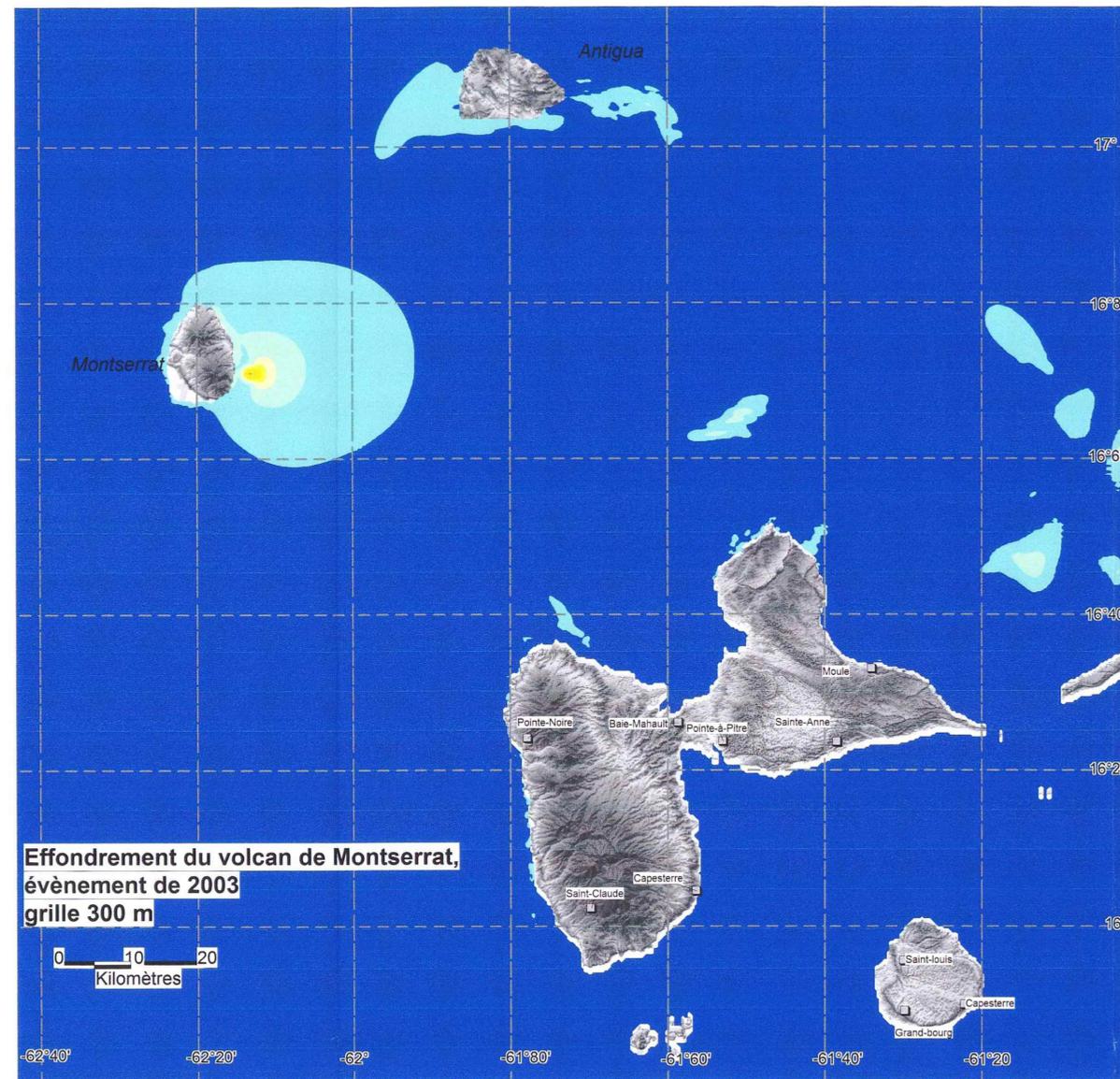
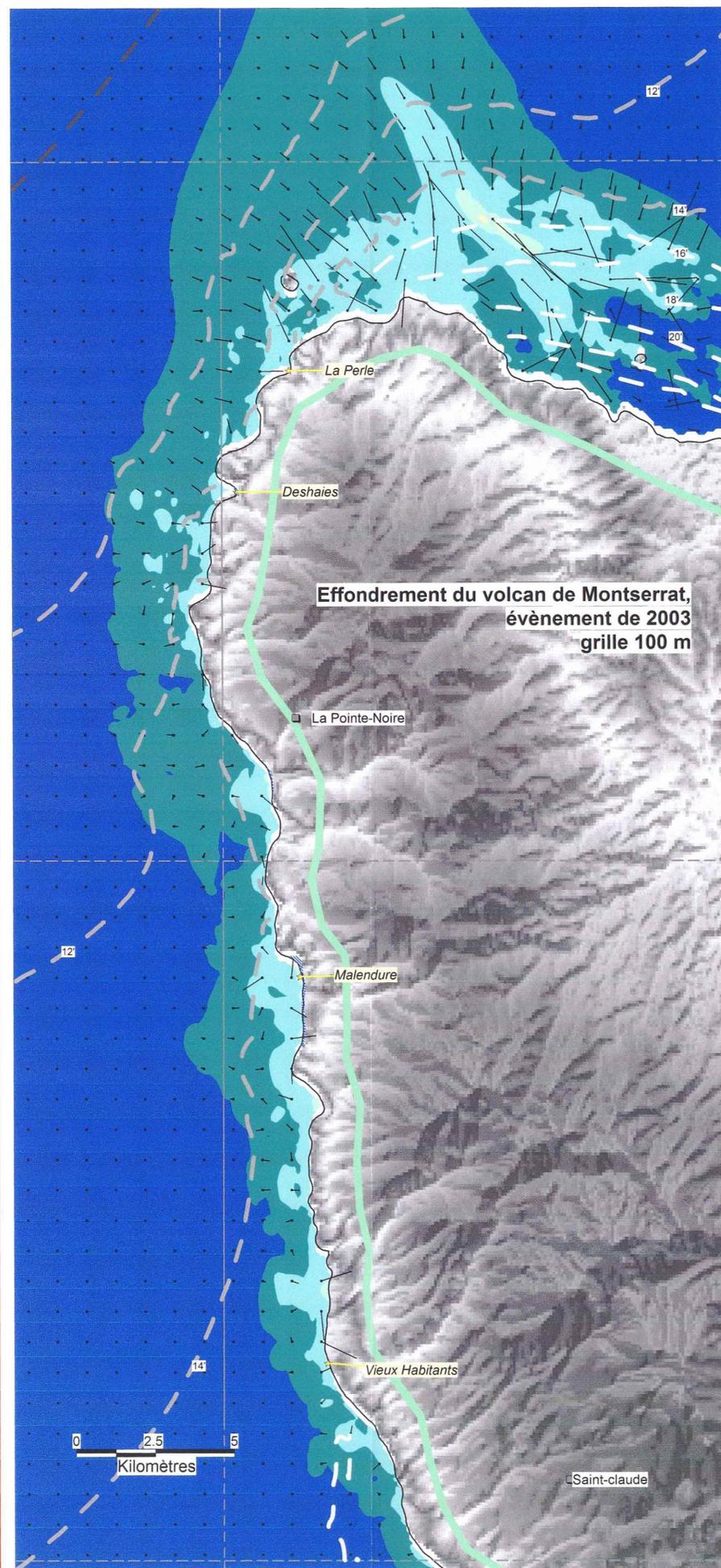
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT ET DE L'AMÉNAGEMENT DURABLES

Géosciences pour une Terre durable

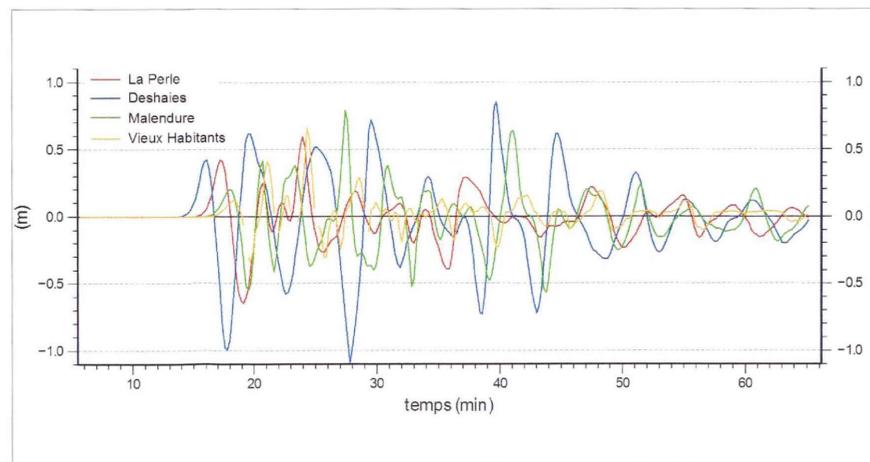
planche 5
rapport BRGM/RP-55795-Fr

période de retour du séisme 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 :



Tsunamis : Etude de cas au niveau de la côte antillaise française
Simulation de tsunami d'origine gravitaire :
scénario d'effondrement du volcan La Soufrière - Montserrat événement type année 2003

scénario type :
Effondrement du volcan La Soufrière - Montserrat événement type année 2003

coordonnées centrales de la zone de départ : 16°42' N et 62°09' W
 Profondeur : 120 m
 Azimut : 45° E
 Volume de l'effondrement : 16 millions de m³
 Vitesse à l'entrée dans l'eau : 50 m.s⁻¹
 Largeur à l'entrée dans l'eau : 600 m
 Distance de parcours sous l'eau : 1 000 m
 Temps de parcours sous l'eau : 120 s

Les scénarios volcaniques/mouvements de terrain simulés Soufrière-Guadeloupe et Montagne Pelée - Martinique correspondent à des événements historiques dont la probabilité qu'ils se reproduisent dans des conditions identiques est nulle à faible. A terme, d'autres scénarios seraient à envisager (travaux de recherche en cours).

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

- Zone sismique 2, Graben de Marie-Galante, M 6,8 (Planche 1)
- Zone sismique 12, Zone de subduction de Barbuda (Planche 2)
- Zone sismique 29, Passage d'Anegada, M 6,7 (Planche 3)
- Zone sismique 30, Ride de Sainte Lucie, M 6,7 (Planche 4)
- Zone sismique 34, Prisme d'accrétion de la Barbade, M 6,7 (Planche 5)
- Soufrière-Hills à Montserrat, événement de 2003 (Planche 6)
- Montagne Pelée, événement de 1902 (Planche 7)
- Soufrière en Guadeloupe, paléopluviométrique de 3100BP (Planche 8)

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT ET DE L'AMÉNAGEMENT DURABLES

brgm

Planche 6
 Rapport BRGM/RP-55795-Fr

Légende des cartes

<p>Amplitude de la crête de la vague</p> <ul style="list-style-type: none"> > 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 	<p>Moyenne de l'amplitude des crêtes de vagues à proximité du littoral</p> <ul style="list-style-type: none"> > 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 blanc).

profondeur d'inondation supérieure à une maille de calcul (100 m)

points de jauges

- ★ emplacement de la jauge (cf série temporelle)

temps d'arrivée en minutes

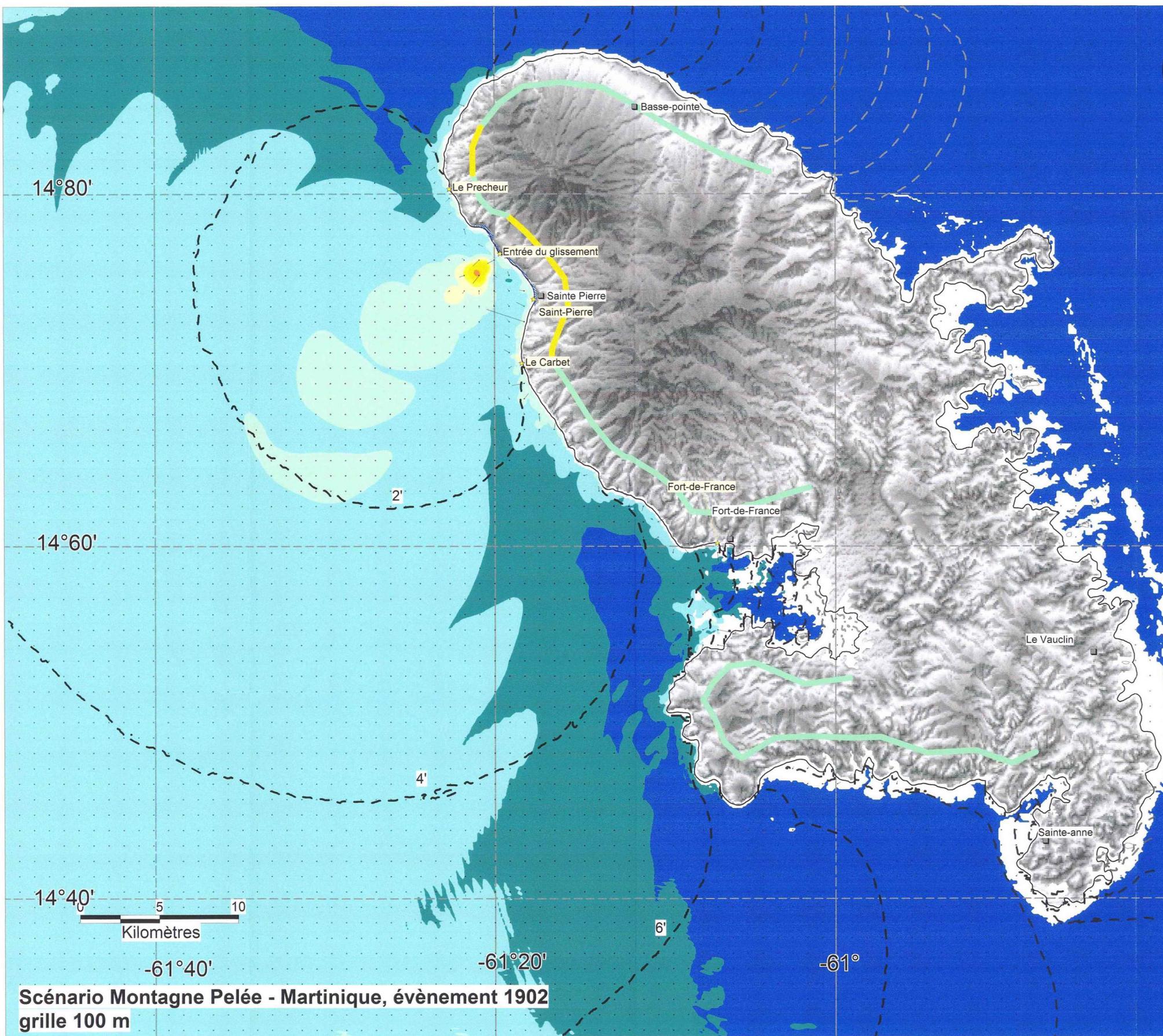
- 15' à 20'
- 10' à 15'
- 5' à 10'
- < 5'

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
 grilles bathymétriques obtenues à partir des données du SHOM et GEBCO
 fond des cartes : MNT SRTM
 système de projection : Longitude/Latitude (WGS84)



Scénario Montagne Pelée - Martinique, événement 1902
grille 100 m

Légende de la carte

modélisations effectuées avec : GEOWAVE modifié
grilles bathymétriques obtenues à partir des données du SHOM et GEBCO
fond des cartes : MNT SRTM
système de projection : Longitude/Latitude (WGS84)

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 blanc).

profondeur d'inondation supérieure à une maille de calcul (100 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 jauges

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

sens du courant

Tsunamis : Etude de cas au niveau de la côte antillaise française

Simulation de tsunami d'origine gravitaire :

scénario de l'éruption du volcan Montagne Pelée - Martinique événement 1902

scénario type :
Eruption du volcan Montagne Pelée - Martinique événement 1902

coordonnées centrales de la zone de départ : 14°46' N et 62°48' W
 Profondeur : 300 m
 Azimut : 225° E
 Volume de l'effondrement : 5 millions de m3
 Vitesse à l'entrée dans l'eau : 40 m.s-1
 Largeur à l'entrée dans l'eau : 150 m
 Distance de parcours sous l'eau : 900 m
 Temps de parcours sous l'eau : 45 s

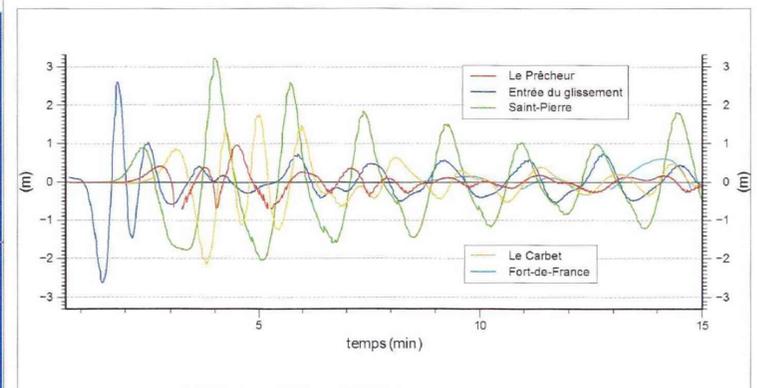
Les scénarios volcaniques/mouvements de terrain simulés Soufrière-Guadeloupe et Montagne Pelée - Martinique correspondent à des événements historiques dont la probabilité qu'ils se reproduisent dans des conditions identiques est nulle à faible. A terme, d'autres scénarios seraient à envisager (travaux de recherche en cours).

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

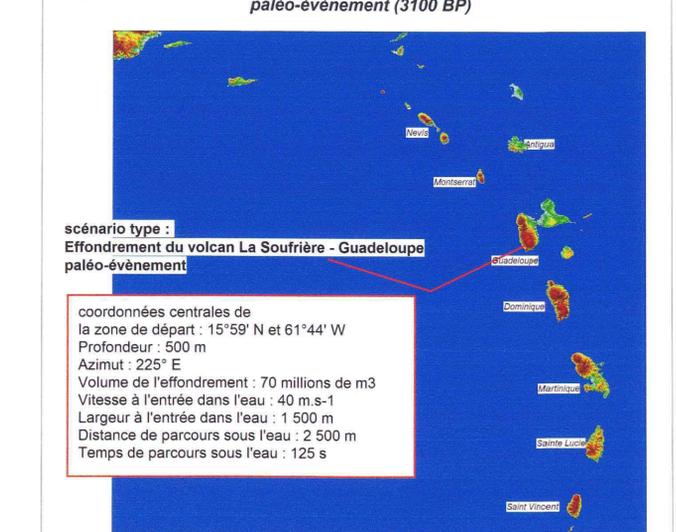
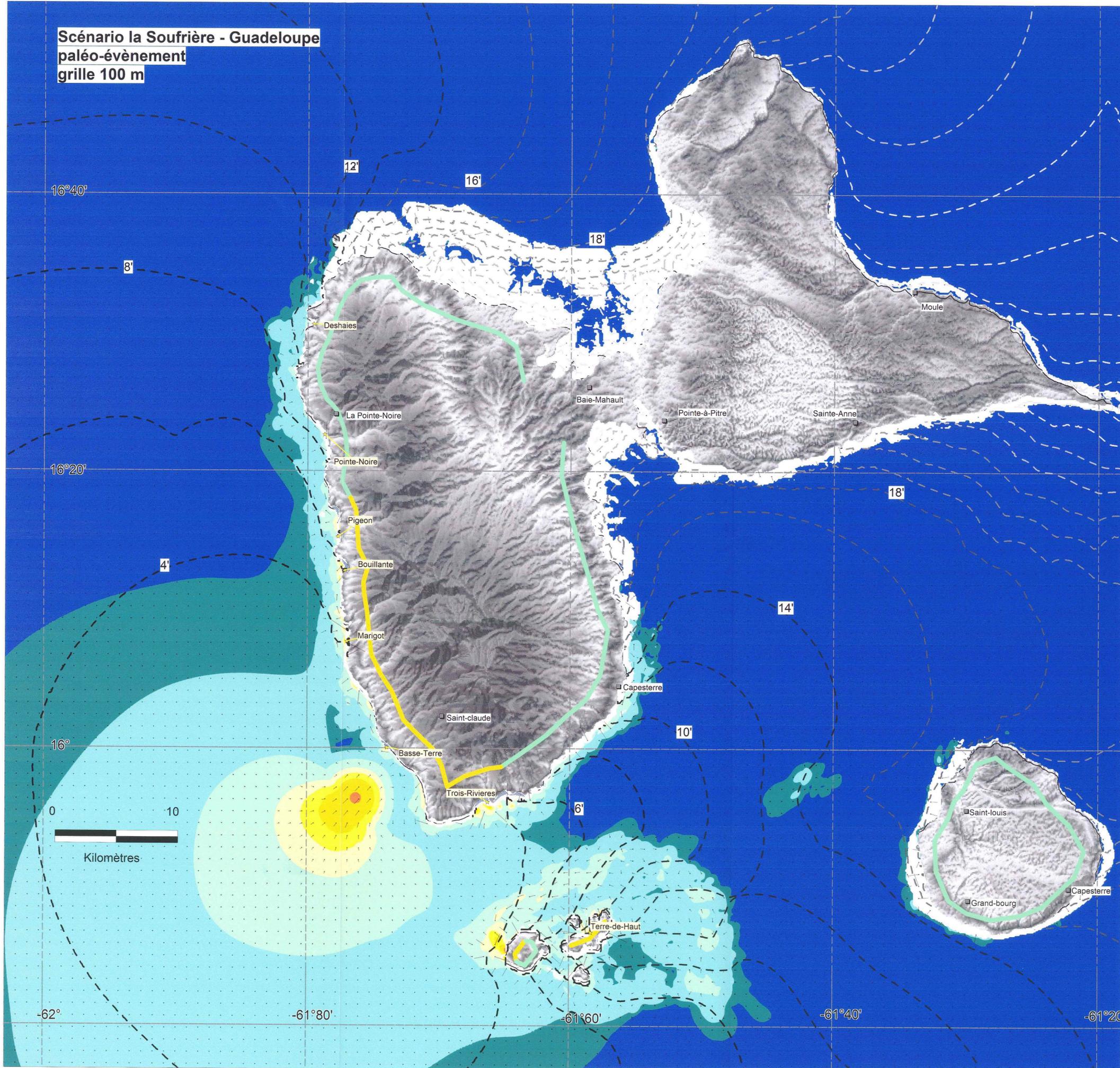
- Zone sismique 2, Graben de Marie-Galante, M 6,8 (Planche 1)
- Zone sismique 12, Zone de subduction de Barbuda (Planche 2)
- Zone sismique 28, Passage d'Anegada, M 6,7 (Planche 3)
- Zone sismique 30, Ride de Sainte Lucie, M 6,7 (Planche 4)
- Zone sismique 34, Prisme d'accrétion de la Barbade, M 6,7 (Planche 5)
- Soufrière-Hills à Montserrat, événement de 2003 (Planche 6)
- Montagne Pelée, événement de 1902 (Planche 7)
- Soufrière en Guadeloupe, paléoenvenement de 3100BP (Planche 8)

Planche 7
Rapport BRGM/RP-55795-Fr

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



**Scénario la Soufrière - Guadeloupe
paléo-événement
grille 100 m**



scénario type :
Effondrement du volcan La Soufrière - Guadeloupe paléo-événement

coordonnées centrales de la zone de départ : 15°59' N et 61°44' W
Profondeur : 500 m
Azimut : 225° E
Volume de l'effondrement : 70 millions de m³
Vitesse à l'entrée dans l'eau : 40 m s⁻¹
Largeur à l'entrée dans l'eau : 1 500 m
Distance de parcours sous l'eau : 2 500 m
Temps de parcours sous l'eau : 125 s

Les scénarios volcaniques/mouvements de terrain simulés Soufrière-Guadeloupe et Montagne Pelée - Martinique correspondent à des événements historiques dont la probabilité qu'ils se reproduisent dans des conditions identiques est nulle à faible. A terme, d'autres scénarios seraient à envisager (travaux de recherche en cours).

Liste des scénarios réalisés dans le cadre de l'étude :
- Zone sismique 2, Graben de Marie-Galante, M 6,8 (Planche 1)
- Zone sismique 12, Zone de subduction de Barbade (Planche 2)
- Zone sismique 29, Passage d'Anegada, M 6,7 (Planche 3)
- Zone sismique 30, Ride de Sainte Lucie, M 6,7 (Planche 4)
- Zone sismique 34, Prisme d'accrétion de la Barbade, M 6,7 (Planche 5)
- Soufrière-Hills à Montserrat, événement de 2003 (Planche 6)
- Montagne Pelée, événement de 1902 (Planche 7)
- Soufrière en Guadeloupe, paléoévénement de 3100BP (Planche 8)

Légende des cartes

Amplitude de la crête de la vague	Moyenne de l'amplitude des crêtes de vagues à proximité du littoral
> 6 m	> 5 m
entre 5 m et 6 m	de 3 à 5 m
entre 4 m et 5 m	de 1 à 3 m
entre 3 m et 4 m	< 1 m
entre 2 m et 3 m	profondeur d'inondation supérieure à une maille de calcul (100 m)
entre 1,5 m et 2 m	points de jauge
entre 1 m et 1,5 m	emplacement de la jauge (cf série temporelle)
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	

temps d'arrivée de la vague de tsunami en minute

30' à 40'	courant 0,1 m/s
25' à 30'	0,5 m/s
20' à 25'	1 m/s
15' à 20'	2 m/s
10' à 15'	3 m/s
< 10'	4 m/s

modélisations effectuées avec : GEOWAVE modifié
grilles bathymétriques obtenues à partir des données du SHOM et GEBCO
fond des cartes : MNT SRTM
système de projection : Longitude/Latitude (WGS84)

