



**ADMINISTRATION SUPERIEURE
DES ILES WALLIS-ET-FUTUNA**

L'aléa tsunami à Wallis et Futuna

Modélisation numérique et inventaire des tsunamis

Préparé pour l'Administration supérieure du Territoire de Wallis et Futuna

Janvier 2013



Auteurs/Contributeurs :

Geoffroy Lamarche, NIWA
Joshu Mountjoy, NIWA
Stéphane Popinet, NIWA
Bernard Pelletier, IRD Nouméa
James Goff, UNSW
Jochen Bind, NIWA
Susi Woelz, NIWA

Pour toute information concernant ce rapport, veuillez prendre contact avec :

Geoffroy Lamarche
Directeur de recherche
+64-4-386 0465
g.lamarche@niwa.co.nz

National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd (*Institut néo-zélandais de recherche sur l'eau et l'atmosphère*)
301 Evans Bay Parade, Greta Point
Wellington 6021
Private Bag 14901, Kilbirnie
Wellington 6241
Nouvelle-Zélande

Téléphone +64-4-386 0300
Télécopie +64-4-386 0574

N° de rapport client NIWA : WLG2013-2
Date du rapport : Janvier 2013
Projet NIWA : SOP12302

©

Tous droits réservés. Le présent document ne peut être reproduit ou copié, sous quelque forme que ce soit, sans l'autorisation de(s) titulaire(s) du droit d'auteur. Cette autorisation ne pourra être accordée que dans les conditions stipulées dans le contrat conclu entre le Client et le NIWA. La protection du droit d'auteur s'applique à toutes les formes de copie ou de stockage du document, et à tous types de systèmes de recherche d'information.

Le NIWA s'est efforcé, dans la mesure du possible, de vérifier l'exactitude des informations contenues dans le présent document. Le NIWA ne garantit, ni expressément ni implicitement, que les informations contenues dans le présent document soient complètes, ni qu'elles soient adaptées à des usages autres que ceux prévus spécifiquement pour les besoins du Projet ou convenus entre le NIWA et le Client.

SOMMAIRE

Synthèse	7
1 Introduction	13
1.1 Contexte.....	13
1.2 Aperçu du projet et objectifs de l'étude.....	14
1.3 Limites de l'étude	15
1.4 Analyse du Risque Tsunamique.....	15
2 Situation de Wallis et Futuna dans le Pacifique	17
3 L'aléa sismique et tsunamique	21
3.1 Les sources sismiques régionales.....	21
3.2 L'aléa sismique local	23
3.3 Le tsunami du 30 septembre 2009 à Futuna	23
3.4 Etude des paléotsunamis à Wallis et Futuna.....	26
3.5 L'aléa tsunami.....	27
4 Données et méthode	29
4.1 Paramètres générés par les modèles numériques	29
4.2 Données topographiques et bathymétriques	30
4.3 Modélisation numérique : principes et méthode.....	31
5 RÉSULTATS	32
5.1 Sources transpacifiques	32
5.2 Sources Régionales	32
5.3 Sources Locales.....	32
5.4 Scénario 1 : Source transpacifique - Fosse des Kouriles.....	36
5.5 Scénario 2 : Source régionale - rupture le long de la fosse des Tonga.....	40
5.6 Scénario 3 : Source régionale - arrière-arc de Vanuatu.....	46
5.7 Scénario 4 : Source locale - Futuna	48
5.8 Synthèse des 14 scénarios	50
6 Recommandations	60
7 Conclusion	62
8 Remerciements	65

9	Glossaire des termes et abréviations	66
10	Bibliographie	68
11	Sites Web.....	71

Tableaux

Tableau 1-	Principaux séismes survenus dans le Pacifique depuis 1900 et séismes régionaux de $M_w > 8,1$ depuis 1950*.	22
Tableau 2 -	Tsunamis historiques et paléohistoriques à Futuna (voir aussi Figure 3-3)	28
Tableau 3 –	Synthèse des paramètres d'entrée et des résultats des modèles présentés	33
Tableau 4 –	Paramètres du modèle et résultats pour une source le long de la fosse des Kouriles.	36
Tableau 5 -	Paramètres du modèle et résultats pour une source le long de l'ensemble de la fosse des Tonga.	41
Tableau 6 -	Paramètres du modèle et résultats pour une source le long de l'arrière-arc de Vanuatu.	46
Tableau 7 -	Paramètres du modèle et résultats pour une source le long de la zone de facture de Futuna.	48

Figures

Figure 1-1 -	Morphologie des fonds marins du bassin du Pacifique et zones sources des séismes majeurs le long de la "Ceinture Pacifique."	14
Figure 1-2 -	Carte du risque tsunamique à Wallis, d'après Giffon et Dolfo [7, 8]	16
Figure 1-3 -	Carte du risque tsunamique à Futuna, d'après Giffon et Dolfo [7, 8]	16
Figure 2-1 –	Schéma tectonique du Pacifique Sud-Ouest [9].	17
Figure 2-2 –	Vue satellite de l'archipel de Wallis (source: Google Earth)	18
Figure 2-3 -	Vue satellite de Alofi (Google Earth)	19
Figure 2-4 -	Vue satellite de Futuna (Source: Google Earth)	20
Figure 3-1 –	Structure du plancher océanique autour de Futuna.	23
Figure 3-2 –	Mesure des hauteurs maximales de vagues et des distances maximales d'inondation à Futuna et à Alofi lors du tsunami du 30 septembre 2009.	25
Figure 3-3 –	Sources sismiques de tsunamis d'après Goff et al. [25].	26
Figure 3-4 –	Temps de parcours d'un tsunami transpacifique formé le long de la fosse des Aléoutiennes (gauche) et de la fosse du Chili (droite).	27
Figure 4-1 –	Exemple de bathymétrie détaillée dans la partie nord de Wallis, campagne WALFUT (septembre 2011, avec l'aimable autorisation de l'IRD ; [35])	30
Figure 4-2 –	Bathymétrie multifaisceaux (image ombrée) de Futuna et d'Alofi, campagne WALFUT (septembre 2011, avec l'aimable autorisation de l'IRD ; [35]).	31
Figure 5-1 -	Tableau schématique des heures estimatives d'arrivée et de durée d'activité des tsunamis	34
Figure 5-2 –	Hauteurs des vagues à la côte et profondeurs d'inondation pour les scénarios testés.	35
Figure 5-3 –	Modélisation de la hauteur maximale des vagues dans le bassin du Pacifique pour un séisme $M_w = 9,3$ le long de la fosse des Kouriles.	36

Figure 5-4 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Wallis pour un tsunami originaire de la fosse des Kouriles	38
Figure 5-5 - Elévation maximum des vagues pour le scénario des Kuriles.	39
Figure 5-6 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Futuna pour un tsunami originaire de la fosse des Kouriles	40
Figure 5-7 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues pour un séisme de $M_w = 9,1$ le long de l'ensemble de la fosse des Tonga	41
Figure 5-8 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Wallis pour un tsunami formé le long de l'ensemble de la fosse des Tonga	42
Figure 5-9 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Falaleu pour une rupture totale de la fosse des Tonga.	44
Figure 5-10 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Futuna pour un tsunami formé le long de l'ensemble de la fosse des Tonga	45
Figure 5-11 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues pour un séisme de $M_w = 7,9$ le long du système de failles chevauchantes de l'arrière-arc de Vanuatu.	47
Figure 5-12 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Futuna pour un tsunami formé le long du système de failles chevauchantes de l'arrière-arc de Vanuatu.	48
Figure 5-13 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Futuna pour un tsunami formé par un séisme de $M_w = 7$ survenu le long du segment Futuna-Alofi de la zone de fracture nord-fidjienne.	49
Figure 5-14 – Hauteur maximale des vagues à Wallis pour les 14 scénarios de cette étude.	51
Figure 5-15 – Synthèse des scénarios pour Nord Wallis	52
Figure 5-16 - Synthèse des scénarios pour Sud-Est Wallis	53
Figure 5-17 – Synthèse des scénarios pour Sud Wallis.	54
Figure 5-18 - Synthèse des scénarios pour Wallis Est	55
Figure 5-19 – Hauteur maximale des vagues à Futuna pour les 14 scénarios de cette étude	56
Figure 5-20 – Synthèse des scénarios pour Sud-Est Futuna et NW Alofi	57
Figure 5-21 – Synthèse des scénarios pour SE Futuna.	58
Figure 5-22 – Synthèse des scénarios pour NW Futuna.	59
Figure 7-1 - Sévérité de l'impact potentiel de tsunami à Futuna.	63
Figure 7-2 - Sévérité de l'impact potentiel de tsunami à Alofi	63
Figure 7-3 - Sévérité de l'impact potentiel de tsunami à Uvéa.	64

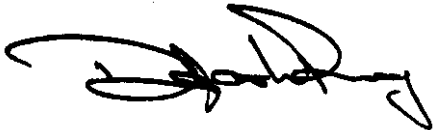
Revu par



Scott Nodder,
Group Manager, Ocean Geology

.....

Approuvé par



Doug Ramsay
Manager, Pacific Rim

.....

Synthèse

Ce rapport sur l'aléa tsunami à Wallis et Futuna a été réalisé par l'Institut National de Recherche sur l'Eau et l'Atmosphère de Nouvelle-Zélande (NIWA), l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) en Nouvelle-Calédonie, l'Université de New South Wales en Australie et la Division Géosciences et Technologies Appliquées du Secrétariat Général de la Communauté du Pacifique à Fidji (SPC-SOPAC).

- **Un tsunami est-il possible à Wallis et Futuna ?**

La réponse est oui. Deux tsunamis ont touché Futuna en 1993 et 2009. Le dernier événement destructeur, consécutif au séisme du 29 septembre 2009 aux Tonga, a rappelé la puissance et l'impact possible des tsunamis dans la région. Ce tsunami a frappé Futuna à 7 h du matin. Malgré une



inondation côtière, l'impact sur les îles fut heureusement assez faible. Au cours de l'histoire, d'autres tsunamis ont probablement déjà affecté Wallis et Futuna.

Figure 1 –Débris provenant de la plage et de la mer, échoués sur la route territoriale n° 1 à Poi (côte est de Futuna) suite au tsunami du 29 septembre 2009 (Photo Mme Hasser, Futuna).

- **Quelles sont les régions du Pacifique susceptibles de générer des tsunamis pouvant impacter Wallis et Futuna ?**

Quatorze sources possibles ont été identifiées (figure 2). Pour chacune d'elles, une modélisation prédisant la hauteur des vagues sur les côtes de Wallis et Futuna a été faite. Les zones sources potentielles de tsunamis, capables d'impacter Wallis et Futuna sont:

- Tsunamis transpacifiques: en particulier la région des Kuriles, du Chili et du Sud Pérou. Il est peu probable que les tsunamis originaires des régions du Japon, des Aléoutiennes et des Cascades aient un impact significatif sur Wallis et Futuna.
- Tsunamis régionaux: la région des Tonga et celle de la partie centrale de l'arrière arc du Vanuatu.
- Tsunamis locaux: le sud immédiat de Futuna.

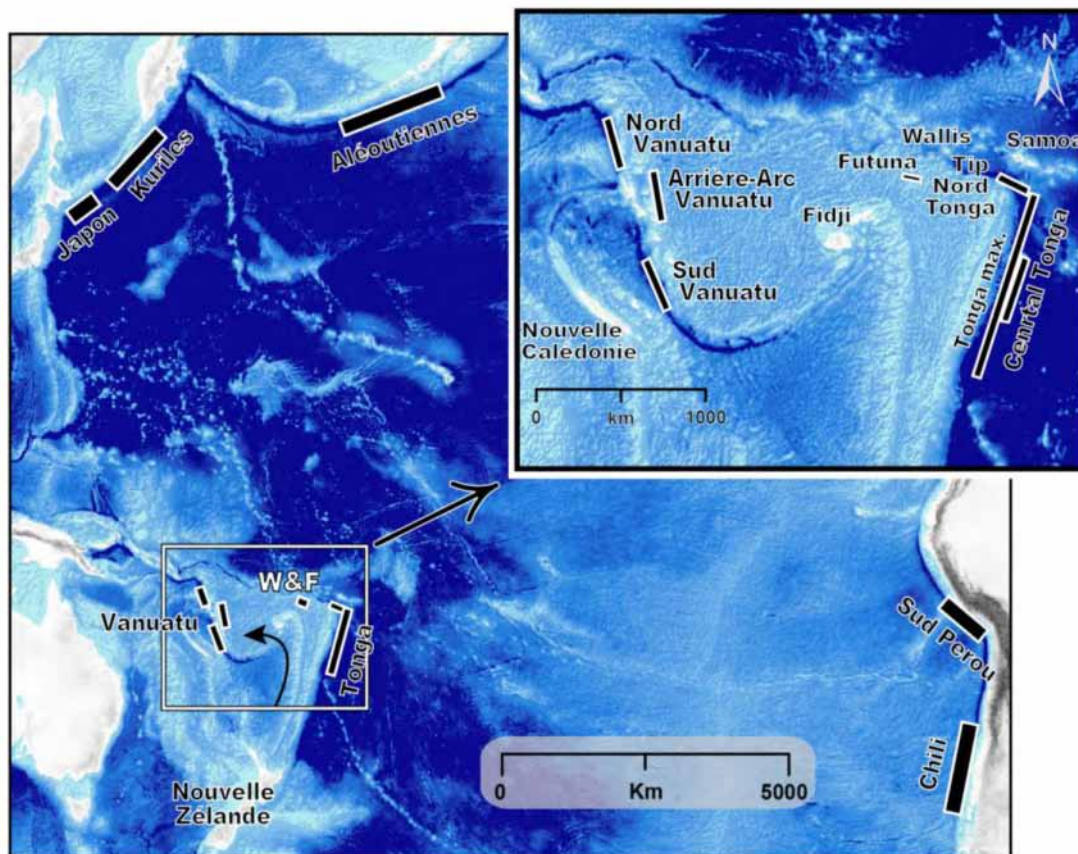


Figure 2 – Zones sources de tsunamis (position et taille approximatives) sur le pourtour de l’océan Pacifique, susceptibles de générer des dégâts à Wallis et Futuna.

Les résultats de modélisation indiquent que l’impact le plus important sur Wallis et Futuna pourrait provenir d’un tsunami généré par la rupture de toute la fosse des Tonga.

Pour Wallis, la zone source identifiée, ayant le second plus fort impact, est la fosse des Kuriles.

Pour Futuna, la seconde zone à risque se trouve dans le sud immédiat de l’île, où une rupture pourrait générer localement un fort tsunami.

Le danger d’un tsunami, capable de provoquer des dégâts significatifs, est plus important à Futuna qu’à Wallis, en raison de la protection du récif barrière dont bénéficie Wallis.

- **Quel est le temps d’alerte à Wallis et Futuna en cas de tsunami dans le Pacifique ?**

Le laps de temps entre le déclenchement éventuel d’un tsunami par un séisme et son arrivée à Wallis et Futuna, dépend de la position géographique du séisme. Pour des événements provoqués localement ou régionalement, le laps de temps est de très courte durée. L’alerte la plus évidente est donnée par le mouvement du sol qu’engendre le séisme.

Le tableau (figure 3) fournit d’une part, des estimations sur les laps de temps calculés entre la formation d’un séisme et l’arrivée d’un éventuel tsunami (c’est-à-dire, concrètement, le temps dont dispose les autorités pour alerter la population) et d’autre part, un estimatif sur la durée du phénomène en fonction des différentes zones sources de tsunamis.

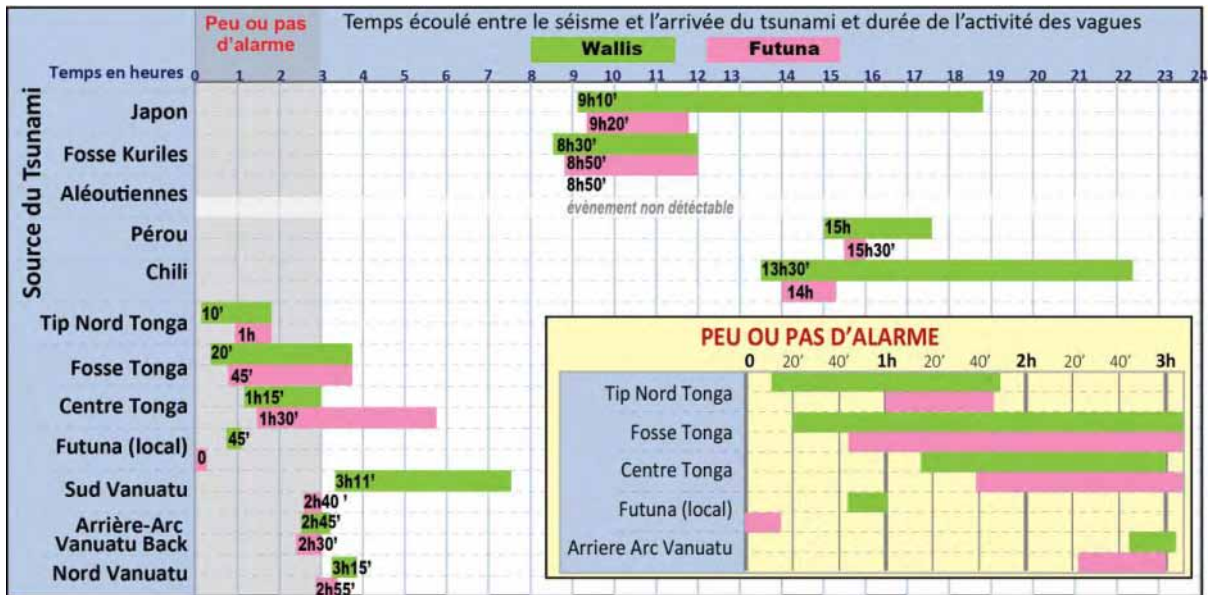


Figure 3 - Tableau récapitulatif des temps d'arrivée et de retour au calme suite aux séismes modélisés dans cette étude.

- **Quelles sont les zones les plus menacées par un tsunami à Wallis et Futuna ?**

Les résultats de modélisation indiquent que les plus grandes vagues seraient générées sur les zones côtières entre Futuna et Alofi (figures 4 et 5). Le chenal entre les deux îles amplifie la hauteur des vagues dans la région de Vélé, ce qui augmente le risque d'inondation de la zone où est construite la piste d'aviation.



Figure 4 – Estimation de la hauteur maximale potentielle d'un tsunami à Futuna.

Les régions peuplées le long des côtes sud, nord et est de Futuna, ainsi que les zones non habitées du sud-est et du nord-ouest d'Alofi sont sujettes à des inondations de tsunami. Pour toute alerte à tsunami, la population devra être informée de ne pas rester sur les plages et dans les zones côtières.

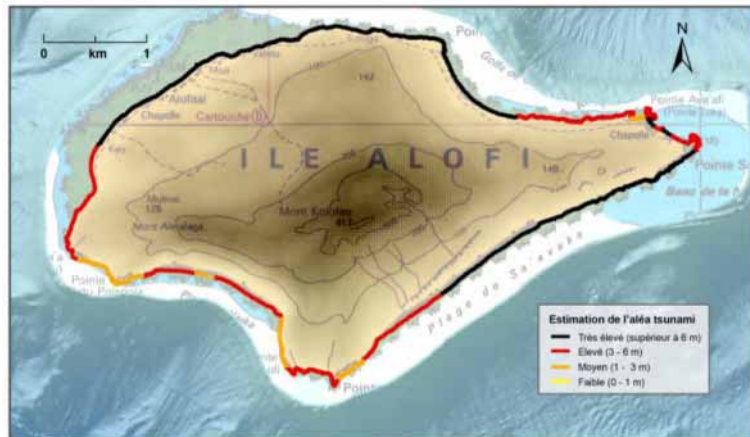


Figure 5 – Estimation de la hauteur maximale potentielle d'un tsunami à Alofi.

A Wallis, les côtes des îles du récif barrière sont les plus menacées par les inondations de tsunami. L'île principale de Wallis est relativement peu exposée. Cependant les résultats de modélisation indiquent, qu'en cas de tsunamis touchant Wallis, les tarodières de Tapa et de Falaleu ainsi que la place principale et la zone de portuaire de Mata'Utu, sont les zones où le risque est le plus élevé (figure 6).

• Comment se servir de ces informations ?

La majeure partie de la population de Wallis et Futuna vit en bord de rivage, à quelques mètres seulement au-dessus du niveau de la mer. Toutes les zones côtières d'une altitude inférieure à 5 m sont des zones à risque pour toute inondation consécutive à un tsunami.

Par conséquent, le principal message à transmettre est : « **Si vous ressentez fortement un séisme ou si la mer se retire rapidement de manière anormale, dirigez-vous immédiatement vers les hauteurs de l'île** ».

L'objectif principal de ce projet est d'aider Wallis et Futuna à préparer une réponse efficace en cas de tsunami, en définissant des plans d'évacuation opérationnels et concertés. Cela pourrait inclure l'application de procédures d'alerte aux tsunamis, l'identification de routes d'évacuation ainsi que la construction d'abris par les communautés locales.

L'estimation du risque, qui est fournie par cette étude, pourrait également influencer les décideurs dans leur plan d'aménagement et dans le choix des emplacements des infrastructures vitales, tel que l'hôpital. Les nouveaux plans d'aménagement devraient en effet tenir compte des risques d'inondation potentielle liée aux tsunamis et à l'impact éventuel d'autres aléas naturels.

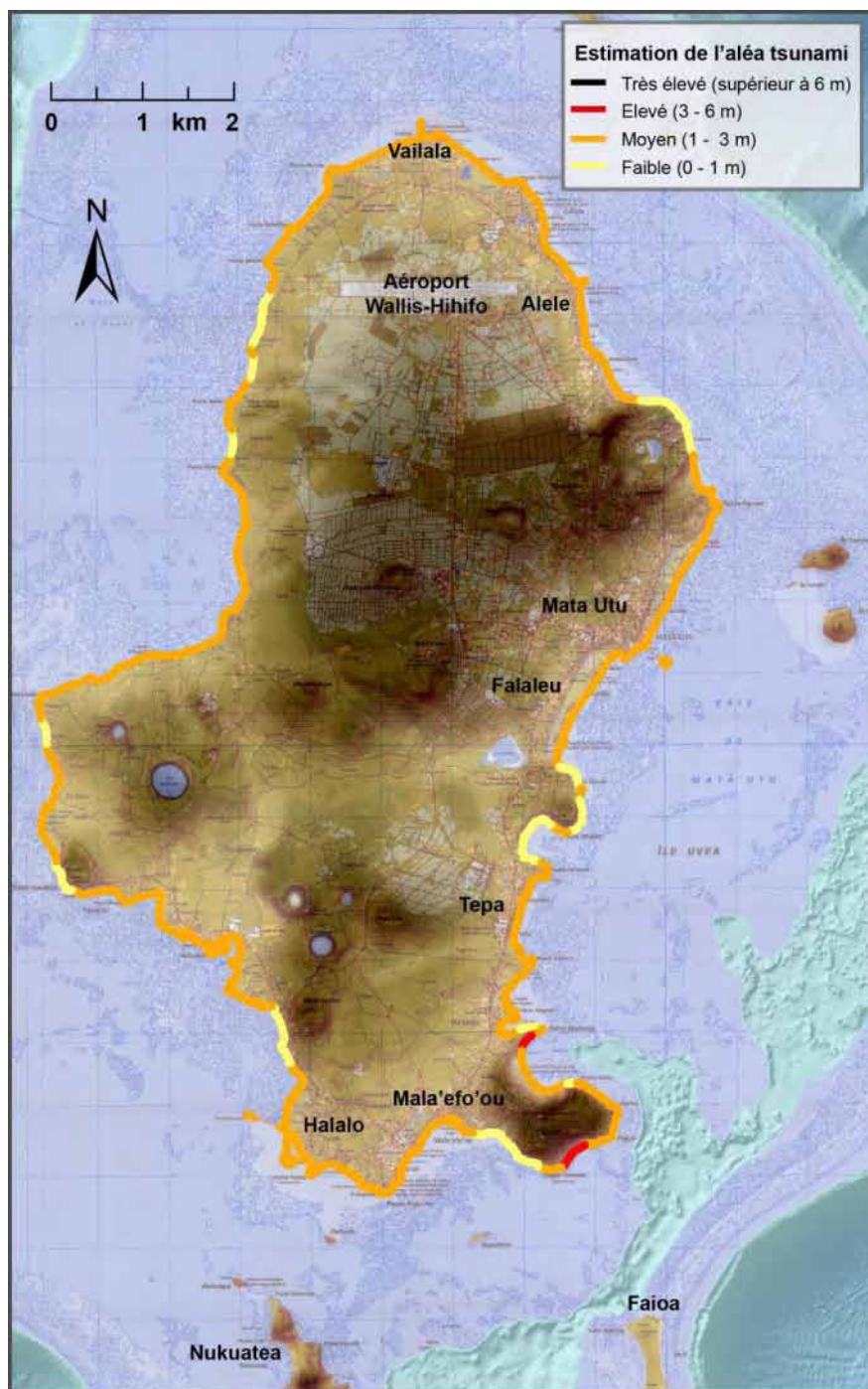


Figure 6 - Estimation de la hauteur maximale potentielle d'un tsunami à Wallis.

- **A propos des travaux sur l'étude des tsunamis à Wallis et Futuna**

Des travaux de recherche sur les précédents tsunamis ayant affecté Wallis et Futuna, sont conduits depuis plusieurs années par l'Institut National de Recherche sur l'Eau et l'Atmosphère de Nouvelle-Zélande (NIWA), l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et l'Université de New South Wales.

Ces travaux ont permis de mettre en évidence des traces d'inondation de tsunamis anciens, d'identifier les séismes potentiellement générateurs de tsunami sur le pourtour du Pacifique et d'utiliser des outils de modélisation sur ordinateur permettant d'appréhender :

- les zones sismogènes susceptibles de provoquer des tsunamis allant vers Wallis et Futuna,

- la taille de ces tsunamis
- et le laps de temps estimé de leur apparition dans les îles.

Ce travail est complémentaire des études de vulnérabilité menées par l'Institut Géographique National.

Cette étude a été financée par l'Union Européenne, dans le cadre du 9^{ème} Fonds européen de développement, enveloppe C, sur la réduction des risques dans les pays et territoires d'outre-mer du Pacifique, le Fonds français du Pacifique du ministère français des Affaires étrangères, NIWA et l'IRD.

- **Quelles sont les limites de cette étude des tsunamis à Wallis et Futuna ?**

Les données disponibles les plus fines ont été utilisées dans le cadre de cette recherche. La modélisation est considérée comme suffisamment fiable pour permettre l'identification des zones de risque aux tsunamis autour de Wallis et Futuna et ainsi d'aider à la préparation de plan de prévention et d'évacuation. Cependant des données plus précises de bathymétrie dans la zone côtière proche (profondeurs inférieures à 10 m) et de topographie des franges côtières, permettraient d'affiner les estimations sur les hauteurs et les profondeurs d'inondation. A ce stade, les estimations sur la profondeur de pénétration des inondations dans les terres qui sont reportées sur les cartes, ne doivent être considérées qu'à titre indicatif.

Cette étude est essentiellement focalisée sur l'aléa tsunami. Elle ne traite ni de l'impact d'une inondation sur la population ni de l'impact sur les infrastructures de Wallis et Futuna.

Ce rapport ne tient pas compte non plus de la probabilité d'occurrence du phénomène des tsunamis.

Ces éléments pourraient faire l'objet d'une étude complémentaire.

- **Comment obtenir plus d'informations ?**

Pour plus d'informations sur l'aléa et le risque tsunami à Wallis et Futuna, merci de contacter:

Dr Geoffroy Lamarche
Directeur de recherche
National Institute of Water and
Atmospheric Research Ltd (NIWA)
Wellington, New Zealand
Geoffroy.Lamarche@niwa.co.nz
Tel: + 64 4 386 0465

Dr Bernard Pelletier
Directeur de recherche
Grand Observatoire de
l'environnement et de la
biodiversité terrestre et marine du
Pacifique Sud (GOPS)
Nouméa, Nouvelle-Calédonie
Bernard.Pelletier@ird.fr
Tél. +687 260 772

M. Benjamin Gérard,
Chef des services du Cabinet du
Préfet
Administration Supérieure des îles
Wallis et Futuna
MATA-UTU, Iles Wallis et Futuna
benjamin.gerard@wallis-et-futuna.pref.gouv.fr
Tél : +681 72 10 12

1 Introduction

1.1 Contexte

Au cours des dix dernières années, une série de catastrophes naturelles a démontré les dégâts potentiels qu'un tsunami peut générer sur les régions côtières (Sumatra, en 2004 ; Tonga-Samoa, en 2009 ; et Tohoku, au Japon, en 2011). En raison de l'étendue des dégâts, du nombre élevé de victimes et de la large couverture médiatique de ces catastrophes, le grand public est maintenant bien sensibilisé aux dangers des tsunamis. Ces événements ont cependant mis en évidence une certaine méconnaissance du phénomène des tsunamis et de leur impact tant sur les populations que sur les infrastructures territoriales. Il est à noter une méconnaissance similaire du risque tsunami dans les Pays et les Territoires d'Outre-mer (PTOM) du Pacifique.

Le Territoire de Wallis et Futuna n'est pas à l'abri de catastrophes de ce type. Par le passé, plusieurs tremblements de terre (1840, 1986, 1993) et deux tsunamis (1993 et 2009) ont affecté Futuna [1-4]. Paradoxalement pourtant, peu d'informations sont disponibles sur les tsunamis et les séismes qui se sont produits à Wallis et Futuna. Le séisme, suivi d'un tsunami, qui a frappé les Tonga et l'archipel des Samoa le 29 septembre 2009 constitue la plus récente catastrophe en date dans le Pacifique sud-ouest. Cet événement fut un douloureux rappel de la puissance et des conséquences d'un tsunami dans la région. Le tsunami a atteint les îles de Futuna et d'Alofi à 7 heures du matin, ne causant heureusement que des dégâts très limités dans les villages côtiers.

La présente étude s'inscrit comme la suite logique de deux précédents projets de recherche financés par le Fonds Pacifique du Ministère français des Affaires étrangères (FP-MAE). La première étude fut conduite à Futuna de 2009 à 2011 [5], la seconde à Wallis de 2011 à 2012 [6]. Ces études avaient pour objectif d'identifier et de caractériser les tsunamis historiques et paléohistoriques ayant affectés ces îles. Ces recherches ont par ailleurs permis à l'équipe scientifique d'analyser l'impact du tsunami de septembre 2009 à Futuna et Alofi. C'est dans le cadre de cette étude qu'a été initiée la modélisation numérique de tsunamis susceptible d'affecter le Pacifique Sud.

En Océanie, un des services compétents en matière de risques et de catastrophes, relève de la Division géosciences et technologies appliquées (SOPAC) du Secrétariat général de la Communauté du Pacifique. Ce service est maître d'œuvre d'un large projet financé sur l'enveloppe 9C du Fonds Européen de Développement (FED) intitulé « Soutien à la réduction des risques de catastrophe dans les PTOM du Pacifique ». Dans le cadre de cette initiative, la Division SOPAC a pu renforcer son engagement auprès de l'Administration supérieure de Wallis et Futuna, afin de poursuivre l'élaboration et la mise en œuvre de solutions spécifiquement adaptées au Territoire en matière de gestion des risques de catastrophe. L'un des objectifs étant d'améliorer la protection des populations menacées en : les sensibilisant au risque de catastrophe, en améliorant les informations pour permettre d'évaluer le risque et de trouver une réponse opérationnelle efficace et en adoptant des solutions durables concernant l'accès aux ressources et à leur exploitation. Une convention a été signée en ce sens par l'UE et la SOPAC en décembre 2008.

En août 2010, la SOPAC a invité l'Institut néo-zélandais de recherche sur l'eau et l'atmosphère (NIWA) en collaboration avec l'IRD de Nouméa à soumettre une offre de service pour l'évaluation et la modélisation numérique de tsunamis à Wallis et Futuna. Le programme de travail a été adopté en septembre 2011 et signé le 1^{er} mars 2012.

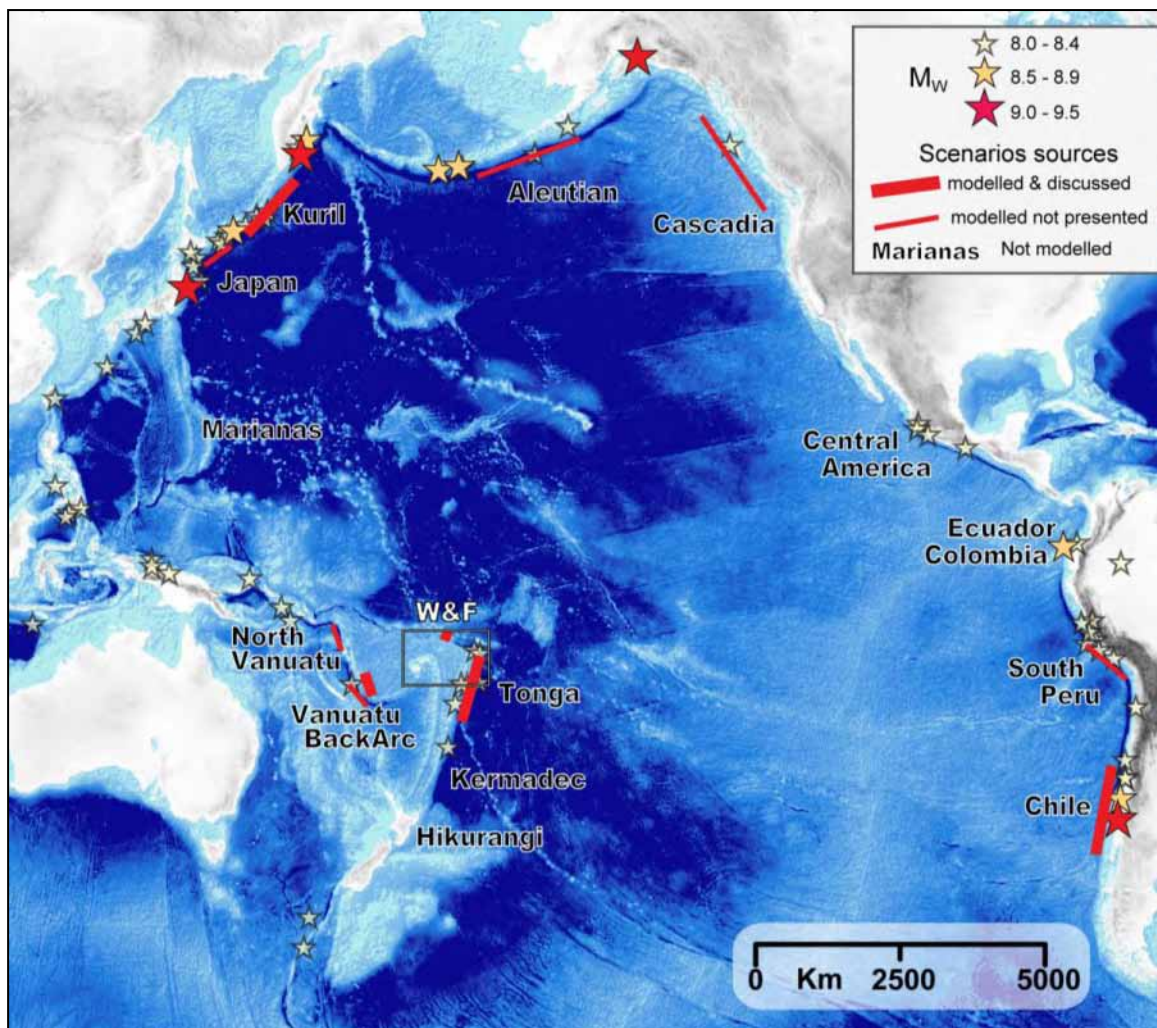


Figure 1-1 - Morphologie des fonds marins du bassin du Pacifique et zones sources des séismes majeurs le long de la "Ceinture Pacifique."
 Les traits rouges indiquent l'emplacement des sources sismiques retenues pour la modélisation de tsunamis de cette étude. Les étoiles indiquent la localisation de séismes majeurs (source; USGS ; <http://earthquake.usgs.gov>)

1.2 Aperçu du projet et objectifs de l'étude

Les grandes lignes de l'étude ont été établies à partir de l'offre de services initiale transmise à la SOPAC le 17 août 2010 (courrier adressé par Geoffroy Lamarche à Michael Bonte), et d'entretiens entre le NIWA et la SOPAC en 2010 et 2011. Elles reflètent également les souhaits exprimés par l'Administration supérieure des îles Wallis et Futuna, tels qu'énoncés dans l'accord signé le 17 mai 2011.

Le présent rapport fournit toutes les informations utilisées et produites dans le cadre de l'étude, notamment :

- Une description succincte des structures tectoniques de la région ;
- Une brève explication de la méthode et des limites de la modélisation numérique ;
- La détermination et caractérisation des séismes tsunamigènes potentiels dans l'ensemble de la région Pacifique ;

- La mise au point de modèles numériques relatifs à la formation et à la propagation des tsunamis ainsi qu'aux inondations qui en résultent sur les zones côtières de Wallis et Futuna ;
- L'inclusion de travaux de recherche sur les tsunamis historiques et les paléotsunamis entrepris à Futuna et à Alofi en 2009, ainsi qu'à Wallis en 2011 ;
- Des cartes de la propagation et des inondations pour un certain nombre de scénarios ;
- Des tableaux présentant les résultats ;
- Les informations numériques sur DVD, incluant des données de type SIG et des animations/vidéos décrivant les scénarios.

1.3 Limites de l'étude

La présente étude porte sur le développement de modèles numériques de tsunamis générés par des séismes sous-marins. Elle ne traite pas de la modélisation de tsunamis provoqués par d'autres phénomènes, tels que les éruptions volcaniques, les glissements de terrain sous-marins ou terrestres, ou les impacts de météorites.

Cette étude ne prévoit pas la modélisation d'ondes de tempête.

Ce rapport contient un nombre fini de scénarios de tsunamis, générés à partir des sources tectoniques les mieux connues, susceptibles d'engendrer des tsunamis très importants. Nous n'avons pas cherché à modéliser tous les scénarios envisageables pour le Pacifique Sud-Ouest.

Ce document n'inclut pas la présentation des données bathymétriques qui seront uniquement utilisées aux fins de la modélisation numérique des tsunamis.

Les résultats du projet pourront faire l'objet d'une publication scientifique.

1.4 Analyse du Risque Tsunamique

Cette étude est une évaluation de l'aléa et non du risque. Le risque est la confrontation d'un aléa (phénomène naturel dangereux) et de la vulnérabilité d'une zone géographique (voir www.uved.fr).

L'aléa, (ou événement ou processus), est défini par une intensité (l'importance de l'évènement), une occurrence spatiale (où ?) et temporelle (quand ?, durée ?).

La vulnérabilité (ou les enjeux) est liée à la présence humaine (personnes, habitations, activités économiques, infrastructure, ...). Les enjeux ont des implications sociales, économiques ou environnementales. Ces critères ne sont pas pris en compte dans cette étude.

La probabilité d'occurrence d'un évènement n'est pas non plus considérée dans cette étude. Celle-ci peut être estimée qualitativement (négligeable, faible, forte) ou quantitativement (période de récurrence de 10 ans, 30 ans, 100 ans par exemple).

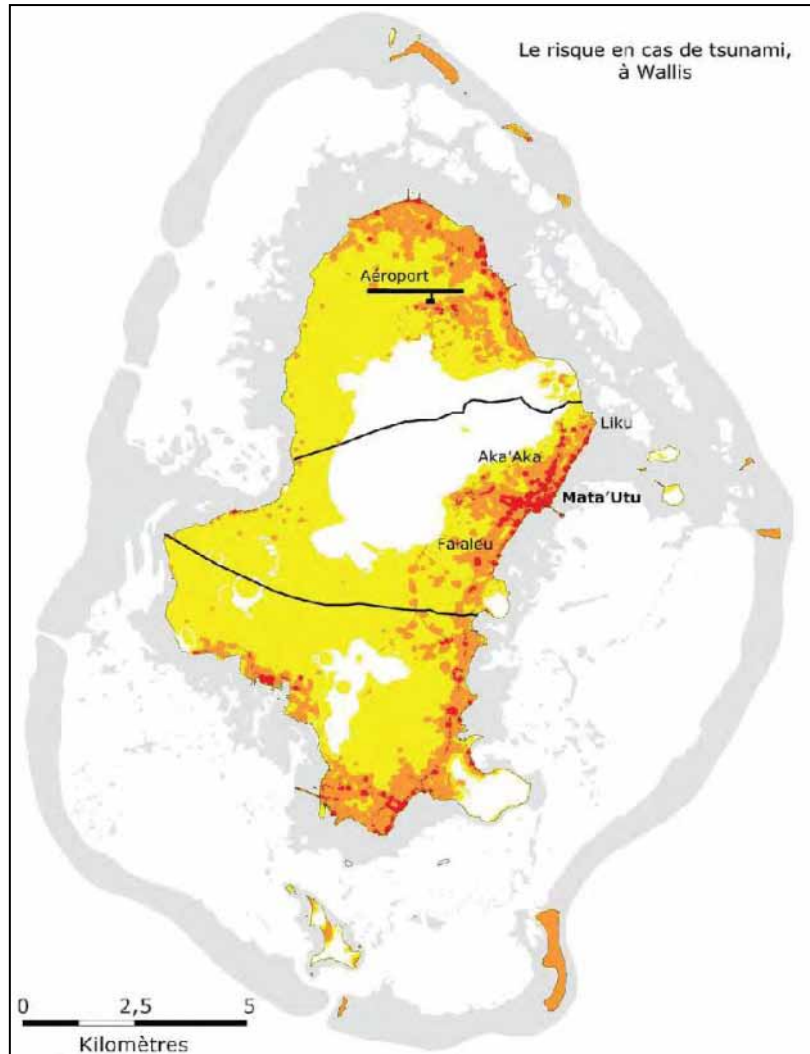


Figure 1-2 - Carte du risque tsunamique à Wallis, d'après Giffon et Dolfo [7, 8]

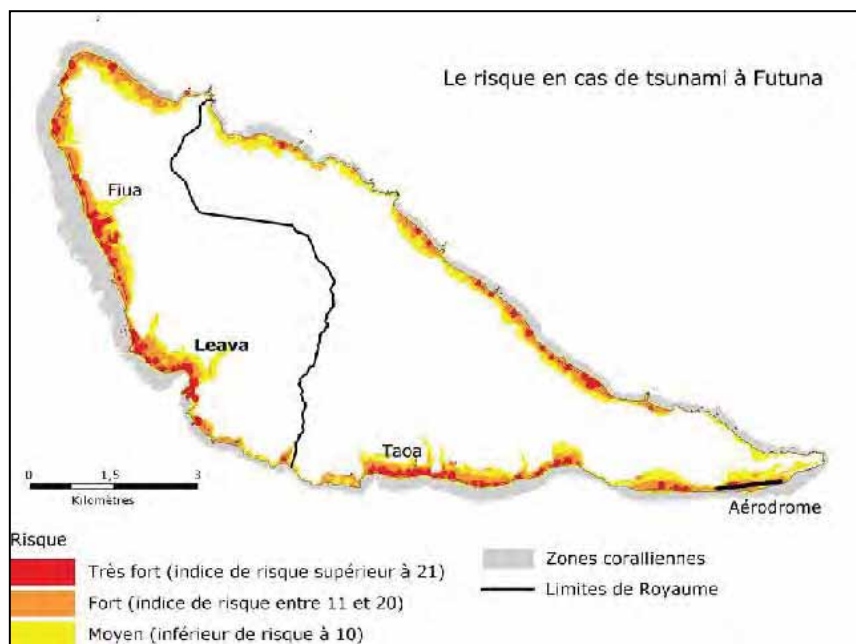


Figure 1-3 - Carte du risque tsunamique à Futuna, d'après Giffon et Dolfo [7, 8]

Une étude préliminaire récente [7, 8] propose une première évaluation du risque tsunamique à W & F. Les auteurs fournissent une estimation des zones à plus haut risque en fonction d'un indice de vulnérabilité généré à partir de 6 facteurs aggravants, leur permettant de fournir une estimation chiffrée du risque. Les facteurs aggravants comprennent la présence ou l'absence d'habitations, d'infrastructures publiques, de champs de taro, l'altitude et la pente du terrain. Les auteurs estiment l'aléa sur la base des facteurs limitant tels que falaises, mangroves, récifs des îles extérieures et récifs de corail. Cela leur permet de fournir des estimations approximatives du coût associé à l'impact d'un tsunami à Wallis ou à Futuna. Les auteurs proposent également des emplacements des zones de refuge et certaines mesures initiales à prendre (emplacement des sirènes d'alerte par exemple). L'étude de Giffon et Dolfo [7, 8] vient donc avantageusement compléter notre étude de l'aléa tsunami à W & F.

2 Situation de Wallis et Futuna dans le Pacifique

Le Territoire de Wallis et Futuna se trouve dans le Pacifique Sud-Ouest, le long, ou à proximité, de la limite de plaques tectoniques Australie-Pacifique (Figure 2-1). Compte tenu de son cadre tectonique, la région est sujette à une activité tectonique, sismique et volcanique intense. Cependant, malgré la proximité entre Wallis et Futuna, qui ne sont éloignées que de 240 km, l'environnement géologique et géodynamique de ces deux îles diffère fortement.

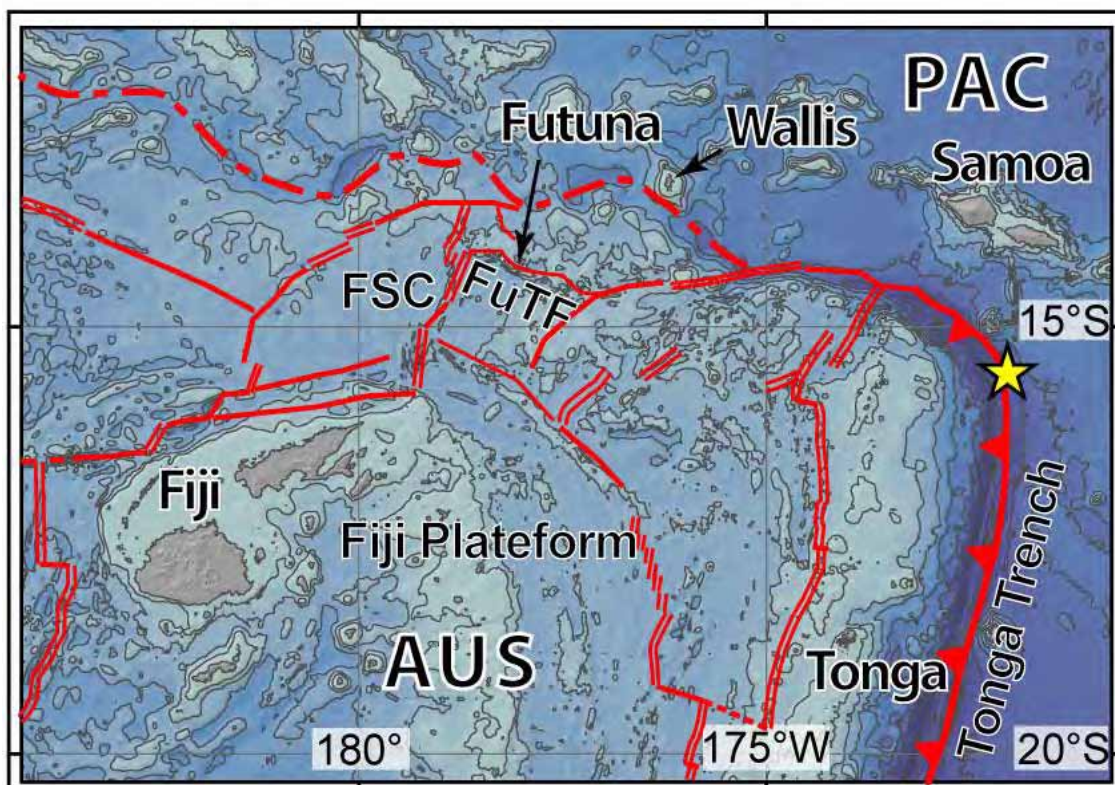


Figure 2-1 – Schéma tectonique du Pacifique Sud-Ouest [9].
En rouge: limites de plaques tectoniques régionales où se concentrent les séismes. Etoile jaune : épicentre du séisme de septembre 2009.



Figure 2-2 – Vue satellite de l'archipel de Wallis (source: Google Earth)

Wallis (176°10' O, 13°18' S) se compose d'une île basse d'environ 70 km², Uvéa, qui s'élève à 115 mètres d'altitude et est entourée d'un lagon délimité par un récif barrière (Figure 2-2). Seule Uvéa est peuplée en permanence, et compte approximativement 9 200 habitants (recensement juillet 2008). Uvéa se trouve à environ 800 km au nord-est de Viti Levu (Fidji) et 480 km à l'ouest d'Upolu (Samoa). Wallis se situe sur la plaque Pacifique, à l'écart de la limite de plaques sismiquement active. L'île est implantée au sommet d'un mont sous-marin isolé, et sa formation fait suite à de multiples périodes d'activité volcanique, d'où la formation de nombreux cratères caractéristiques du paysage d'Uvéa. Wallis ne présente pas de volcanisme actif.

Les îles de Futuna (83 km²) et d'Alofi (32 km²) se trouvent à environ 560 km au nord-est de Viti Levu (Fidji) et à 700 km à l'ouest d'Upolu (Samoa ; Figure 2-4). La population de Futuna est d'environ 4 250 habitants (recensement juillet 2008). L'île est constituée d'une bande côtière basse et étroite (50 à 400 mètres de largeur) contiguë à des falaises littorales et s'élève à plus de 500 mètres d'altitude. Alofi, dont l'altitude maximale est supérieure à 400 mètres, est inhabitée, mais des pêcheurs et des propriétaires terriens s'y rendent quotidiennement.

Futuna et Alofi n'ont pas de lagon, elles sont entourées par un récif frangeant. Ce dernier s'étend sur 400 à 500 mètres dans sa partie la plus large, au sud-ouest de Futuna et à l'ouest d'Alofi; sa largeur est généralement inférieure à 150 mètres. Le littoral nord-est de Futuna est doté de plages de sable, tandis qu'au sud-ouest, la côte est directement reliée au récif. Le littoral d'Alofi se compose de plages de sable séparées par de petits promontoires.



Figure 2-3 - Vue satellite de Alofi (Google Earth)



Figure 2-4 - Vue satellite de Futuna (Source: Google Earth)

Futuna et Alofi émergent de la ride volcanique immergée de Futuna-Alofi, qui s'est formée le long de la zone de faille transformante nord-fidjienne, laquelle s'étend sur 1 500 km de longueur et 200 km de largeur [3, 9-14] (Figure 2-1 et Figure 3-1). La zone de faille constitue un segment de la limite de plaques Australie-Pacifique, et compte parmi les zones les plus tectoniquement actives au monde. La ride de Futuna-Alofi s'est formée au droit d'un relais compressif le long de la faille transformante, qui a entraîné la création d'une série de failles chevauchantes à moins de 10 km au sud-ouest de Futuna, permettant ainsi la surrection et l'émergence des îles [3, 9]. Cette situation engendre une activité sismique superficielle intense autour de Futuna [4, 9, 12, 15]. Les différences d'altitude observées le long du récif entourant les deux îles suggèrent que les taux de surrection associés aux tremblements de terre varient géographiquement et que la ride est composée de blocs tectoniques indépendants, avec des failles actives entre les îles d'Alofi et de Futuna [3, 12].

L'amplitude maximum des marées (vive-eau équinoxiale moyenne) est de 1.55 m à Wallis et 1.65 à Futuna [16].

3 L'aléa sismique et tsunamique

Le présent rapport s'intéresse aux séismes susceptibles de provoquer des tsunamis par le déplacement soudain du plancher océanique (ou fonds marins). La magnitude de moment (M_W) et les paramètres physiques de la faille à l'origine d'un séisme jouent un rôle clé dans la formation d'un tsunami. Ils déterminent, en effet, la quantité de fonds marins déplacés lors de la rupture. Les séismes tsunamigènes peuvent affecter un océan entier, comme cela fut le cas en mars 2011 au Japon (Tohoku ; $M_W = 9,0$), Ils peuvent affecter une région, comme ce fut le cas en septembre 2009 aux Tonga ($M_W = 8,1$), ou encore une zone restreinte (locale), comme lors du séisme de mars 1993 à Futuna ($M_W = 6,5$). Pour qu'un séisme à l'échelle de la région ou de l'océan parvienne à provoquer un tsunami suffisamment important pour atteindre Wallis ou Futuna, il est généralement admis que sa magnitude de moment doive être supérieure à 8,0.

Les séismes tsunamigènes peuvent également être locaux, et n'avoir d'effet que sur les terres proches de la source. Futuna est exposée à l'aléa sismique local et régional, tandis que seules les secousses sismiques, d'envergure régionale, sont susceptibles d'affecter Wallis. Les séismes locaux d'une magnitude inférieure à $M_W = 8,0$ sont capables d'engendrer des tsunamis pouvant avoir une incidence sur les côtes avoisinantes.

3.1 Les sources sismiques régionales

Pour le Pacifique Sud-Ouest, les sources sismiques transocéaniques et régionales sont liées à la subduction des plaques tectoniques sur l'ensemble de la Ceinture du Pacifique. Ces zones de subduction se caractérisent par de profondes fosses océaniques (Figure 1-1), et sont capables de générer des séismes majeurs, d'une magnitude de moment égale ou supérieure à 8,5, comme au Chili (1960, 2010), aux îles Aléoutiennes et en Alaska (1957, 1964, 1965) [17-19], aux Cascades (1700), au large du Pérou [20-22] et de l'Équateur-Colombie (1906), dans la fosse des Kouriles-Kamchatka (1952), aux Tonga (1917 et 1977) et au Japon (2011) (voir Tableau 1).

Tableau 1- Principaux séismes survenus dans le Pacifique depuis 1900 et séismes régionaux de $M_w > 8,1$ depuis 1950*.

Date	Latitude	Longitude	M_w	Observation
22/05/1960	-38,29	-73,05	9,5	Chili
28/03/1964	61,02	-147,65	9,2	Baie du Prince-William, Alaska
4/11/1952	52,76	160,06	9	Kamchatka (Russie)
11/03/2011	38,322	142,369	9	Au large d'Honshu (Japon)
31/01/1906	1	-81,5	8,8	Colombie-Équateur
27/02/2010	-35,846	-72,719	8,8	Au large de Maule (Chili)
4/02/1965	51,21	-178,5	8,7	Îles Rat, Alaska
9/03/1957	51,56	-175,39	8,6	Îles Andreanof, Alaska
3/02/1923	54	161	8,5	Kamchatka
13/10/1963	44,9	149,6	8,5	Îles Kouriles
23/06/2001	-16,264	-73,641	8,4	À proximité des côtes dans le sud du Pérou
6/11/1958	44,329	148,623	8,3	Îles Kouriles
19/08/1977	-11,085	118,464	8,3	Sud de l'île de Sumbawa (Indonésie)
4/10/1994	43,773	147,321	8,3	Îles Kouriles
25/09/2003	41,815	143,91	8,3	Île d'Hokkaido (Japon)
15/11/2006	46,592	153,226	8,3	Îles Kouriles
4/05/1959	53,351	159,645	8,2	À proximité de la côte orientale de Kamchatka
16/05/1968	40,903	143,346	8,2	Au large de la côte orientale de l'île d'Honshu (Japon)
11/08/1969	43,478	147,815	8,2	Îles Kouriles
17/02/1996	-0,891	136,952	8,2	Région d'Irian Jaya (Indonésie)
4/03/1952	42,5	143	8,1	Île d'Hokkaido (Japon)
17/10/1966	-10,807	-78,684	8,1	À proximité des côtes dans le centre du Pérou
10/01/1971	-3,132	139,697	8,1	Papouasie (Indonésie)
3/10/1974	-12,254	-77,524	8,1	À proximité des côtes dans le centre du Pérou
22/06/1977	-22,878	-175,9	8,1	Région des Tonga
12/12/1979	1,598	-79,358	8,1	À proximité du littoral de l'Équateur
13/01/2007	46,243	154,524	8,1	À l'est des îles Kouriles
1/04/2007	-8,466	157,043	8,1	Îles Salomon
29/09/2009	-15,489	-172,095	8,1	Région de l'archipel des Samoa

*Données USGS (Pour l'historique complet des séismes, voir <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes>)

3.2 L'aléa sismique local

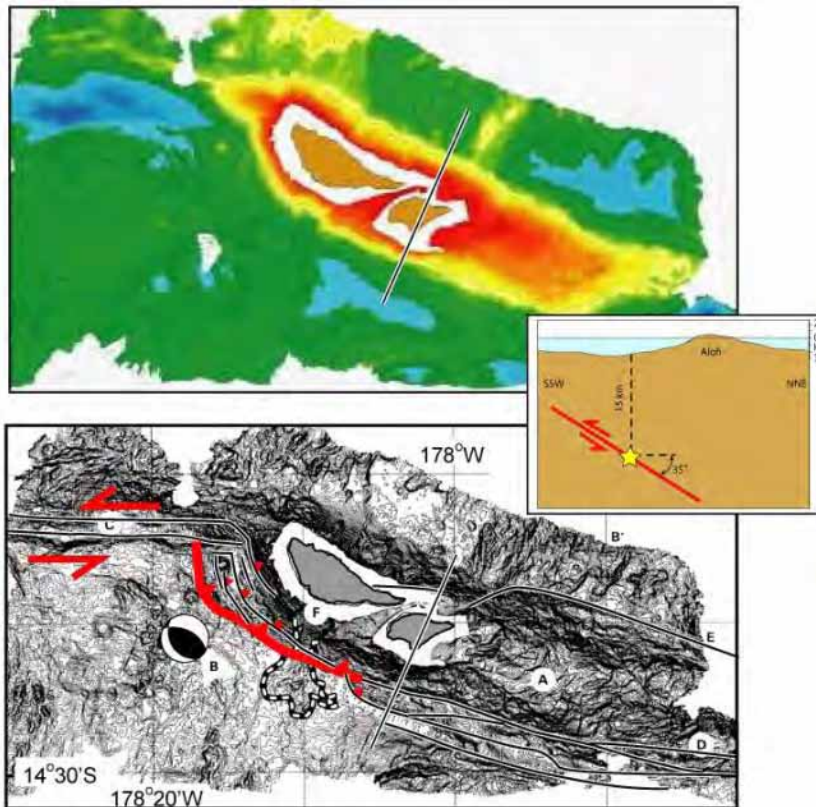


Figure 3-1 – Structure du plancher océanique autour de Futuna.

Etoile: épicentre du séisme de 1993; Ligne rouge: rupture associée au séisme de 1993; Lignes noires: autres failles actives [9, 12].

À Futuna, l'aléa sismique local est directement lié à l'activité tectonique du segment Futuna-Alofi de la faille transformante nord-fidjienne (Figure 3-1). Les derniers grands séismes locaux se sont produits en mars 1986 [2] et en mars 1993 [4]. Le 12 mars 1993, un séisme de magnitude de moment 6,4 a entraîné une surrection d'environ 0,5 mètre du récif moderne le long de la côte sud-ouest de Futuna [2, 4, 23, 24]. Ce phénomène a provoqué un tsunami d'un à deux mètres de hauteur dans la baie de Léava, sur le littoral sud-ouest de Futuna.

3.3 Le tsunami du 30 septembre 2009 à Futuna

Le 29 septembre 2009, à 17h48 TU, un séisme de magnitude de moment 8,1 frappe le nord de la région des Tonga. Le tsunami généré par ce séisme atteint Samoa, les Samoa américaines et Tonga en moins de 20 minutes, avec des conséquences dramatiques.

Le séisme s'est produit à 5h48 heure locale, le 30 septembre, à Wallis et Futuna. La marée était basse. Le centre d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique (PTWC) a estimé que le tsunami toucherait Wallis à 6h35. Il n'était pas fait mention de Futuna dans l'alerte. Cependant, le tsunami a frappé Futuna et Alofi entre 7h00 et 7h20 le 30 septembre heure locale. Un habitant du hameau de Tamana, sur la côte nord de Futuna, averti par la chaîne de télévision LCI à 6h30, a pu observer le tsunami arriver sur le littoral et recouvrir la route. Nous avons mesuré une vague d'une hauteur de 2,7 mètres et une distance maximale d'inondation de 30 mètres à cet endroit, en nous fondant sur le témoignage de cet habitant et sur les débris accumulés le long de la route.

Durant une enquête de dix jours menée en octobre 2009, nous nous sommes rendus sur 41 sites de Futuna et d'Alofi, et avons procédé à la mesure de l'extension verticale (run-up, voir Glossaire en fin de rapport) et des distances d'inondation du tsunami (Figure 3-2). La hauteur maximale des vagues au-dessus du niveau moyen de la mer a été estimée d'après les impacts alors récents observés sur le littoral, comme des plantes et des herbes brûlées, du sable et d'autres débris déplacés. Nous avons également interrogé plusieurs habitants de l'île.

Nous avons estimé que l'extension verticale maximum avait été de 4,5 mètres sur la partie orientale de la plage d'Alofitai, à Alofi, associé à une distance maximale d'inondation de 85 mètres et à une profondeur d'inondation maximale de 3 mètres. À Futuna, nous avons mesuré une extension verticale maximum de 4,4 mètres à la pointe orientale et de 4,3 mètres à la pointe nord-ouest de l'île, avec des distances d'inondation maximales de respectivement 95 et 72 mètres. Nous avons déduit que la profondeur d'inondation maximale avait été de 2 mètres à Tavai, à la pointe nord-est de Futuna. Dans l'ensemble, l'impact du tsunami a été plus important sur la côte nord de Futuna, avec des extensions verticales allant de 1,6 à 4,3 mètres. Des extensions verticales et des distances d'inondation très faibles ont été observées le long des côtes sud et ouest, avec une extension verticale de 1,0 mètre et une distance maximale d'inondation de 10 mètres à Léava.

À Léava, la plupart des témoins ont fait état de deux – parfois trois - vagues principales d'amplitude similaire, la seconde ayant parfois été décrite comme la plus grande. Tous les témoins ont indiqué que la mer s'était tout d'abord retirée. Sur la base des témoignages, il est difficile d'évaluer précisément le temps qui s'est écoulé entre le retrait de la mer et l'inondation. D'après une vidéo réalisée par un ingénieur des ponts et chaussées, il semblerait que quelques minutes seulement (4 minutes) aient séparé les vagues successives (probablement pas les premières) à Léava. Sur cette vidéo, le récif apparaît nettement plus exposé que lors des marées les plus basses, et on voit clairement un bateau posé sur le fond de la baie, ainsi que le récif à nu sur plusieurs mètres.

Les témoignages, relatifs à un possible tsunami, lié au séisme de 1993, sont ambigus et parfois difficiles à suivre. Leurs témoins font manifestement la confusion entre le cyclone Raja de 1986, le séisme de 1993 et une tempête survenue en 1995.

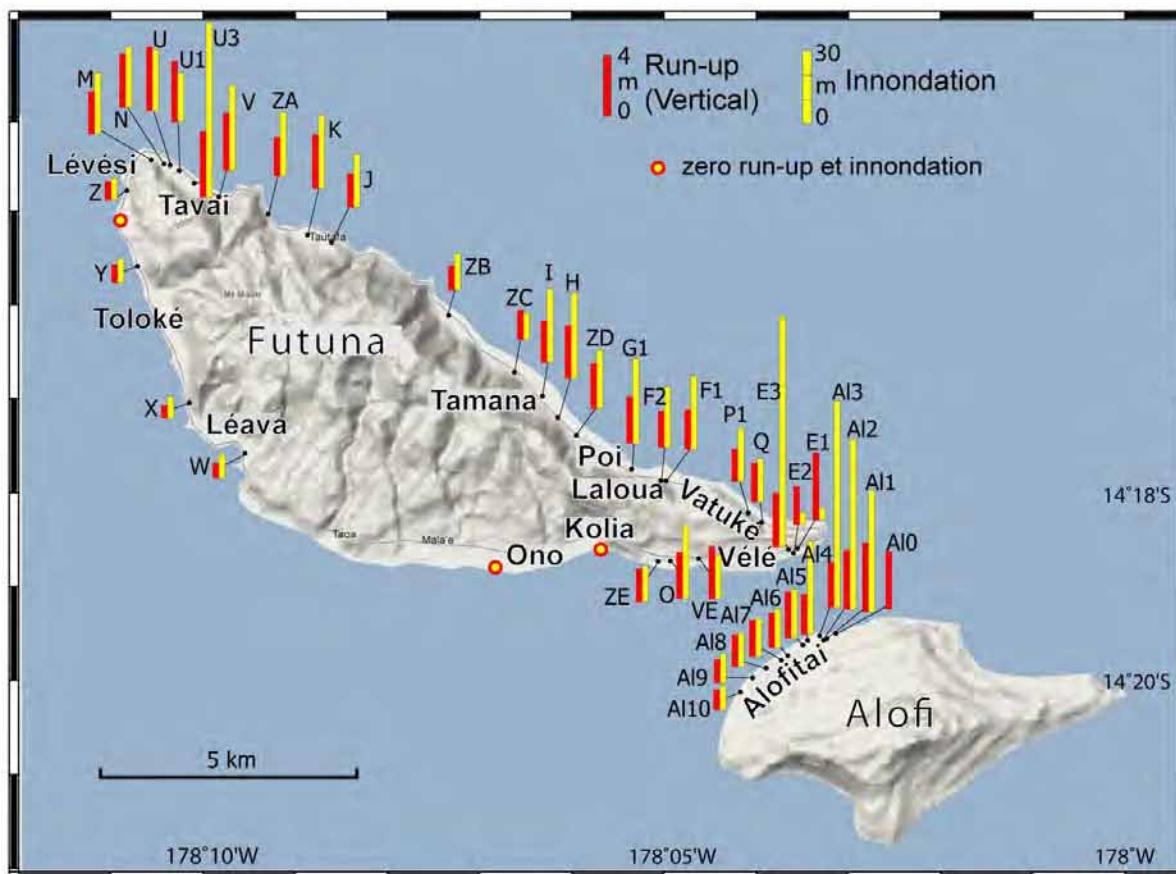


Figure 3-2 – Mesure des hauteurs maximales de vagues et des distances maximales d’inondation à Futuna et à Alofi lors du tsunami du 30 septembre 2009.

De manière générale, trois zones où les tsunamis sont susceptibles d’avoir un impact considérable ont été repérées lors de l’enquête :

1. Chenal Vasia, entre Futuna et Alofi (aéroport de Vélé et nord-est d’Alofi), où la hauteur maximale des vagues et la distance maximale d’inondation ont été estimées à respectivement 4,5 mètres et 95 mètres à l’extrémité est de la piste durant notre enquête,
2. Tamana (nord-ouest de Futuna) avec une hauteur maximale des vagues de 3,6 mètres et une distance maximale d’inondation de 40 mètres,
3. Laloua-Poi (côte est), avec une distance maximale d’inondation maximale de 60 mètres à Laloua et une hauteur maximale des vagues inconnue.

Si un tsunami d’une magnitude similaire se produisait à marée haute, la vague gagnerait entre 0,8 et 1 mètre de hauteur, ce qui pourrait entraîner un lourd bilan matériel et humain.

3.4 Etude des paléotsunamis à Wallis et Futuna

L'étude des paléotsunamis s'appuie sur la recherche de preuves géologiques de tsunamis passés. Les dépôts liés aux tsunamis diffèrent fortement en fonction des lieux, mais ils sont généralement composés de matériaux ne provenant pas de l'environnement géologique immédiat où ils sont observés (par exemple, présence de blocs coralliens sur une surface volcanique).

Durant notre enquête de dix jours, menée à Futuna (octobre 2009), plus de 200 échantillons ont été prélevés dans dix tranchées creusées spécifiquement pour cette étude.

Parallèlement, une étude des paléotsunamis a également été réalisée à Wallis, et des échantillons recueillis dans neuf tranchées (août-septembre 2011) sont en cours d'analyse.

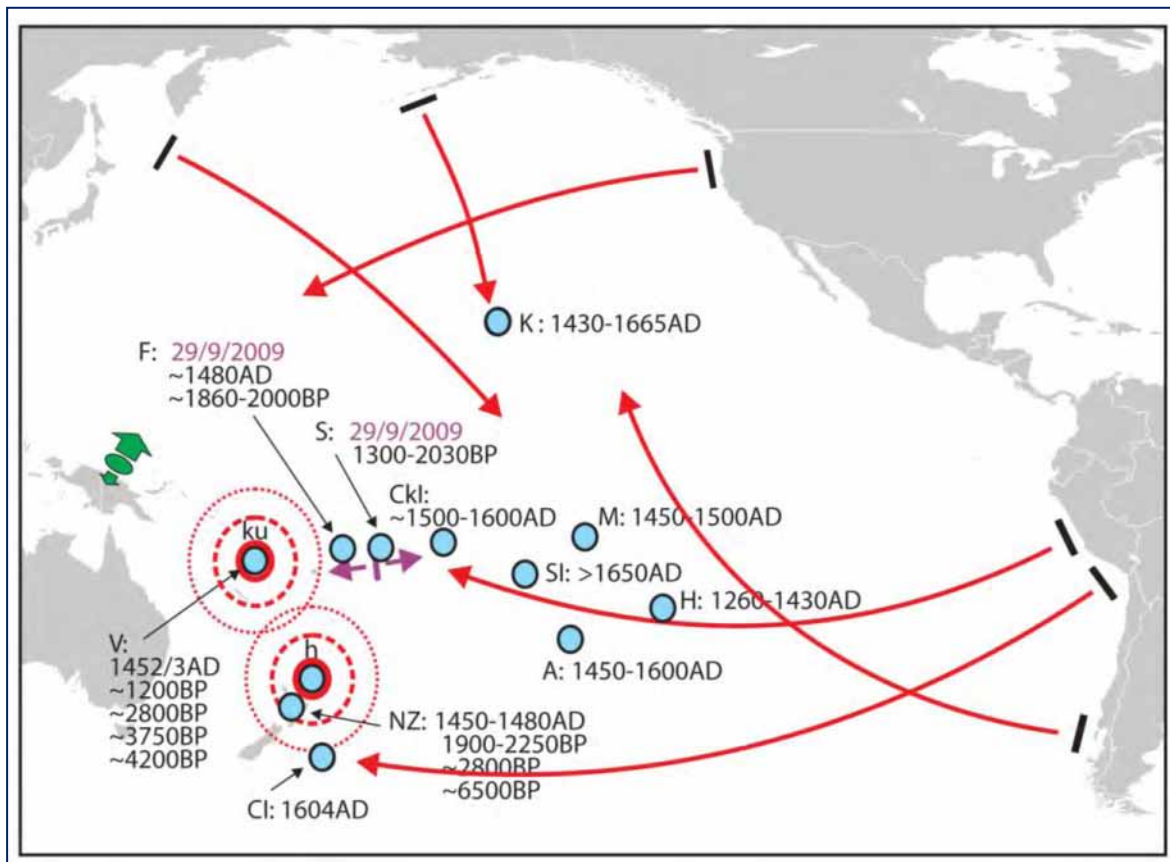


Figure 3-3 – Sources sismiques de tsunamis d'après Goff et al. [25].

Îles Australes (A), îles Chatham (Cl), Îles Cook (Ckl), Futuna (F), île Henderson (H), Kauai (K ; Hawaii), archipel des Marquises (M), Nouvelle-Zélande (NZ), Samoa/Samoa américaines (S), îles de la Société (SI), Vanuatu (V).

À Futuna, la plupart des tranchées présentaient une couche de terre recouverte de sable marin et de débris coralliens, ce qui indique une transgression marine potentielle. L'une de ces transgressions correspondait en fait à la légende de Fatuloli, selon laquelle le village de Tavai aurait été ravagé par une vague. Les échantillons prélevés dans les tranchées ont servi à déterminer l'époque des phénomènes et permis de les dater vers 470 BP (avant le présent, c'est-à-dire XIV^e ou XV^e siècle).

À Wallis, les tranchées analysées dans le cadre de l'étude des paléotsunamis ont montré la présence de dépôts de débordement sur la côte occidentale, à Utuluvé. Il pourrait s'agir de dépôts de tsunami qui auraient enseveli un site archéologique lié à un peuplement polynésien ancien. Sur la côte orientale d'Uvéa, de nombreux indices d'inondations dues à des tempêtes ou à des cyclones ont été observés, notamment les dépôts de débordement en question et de gros blocs posés sur le récif barrière. Sur la côte est, aucune preuve manifeste de dépôts liés à des tsunamis majeurs n'a été observée.

3.5 L'aléa tsunami

En fonction de leur source sismique (voir sections 3.1 et 3.2), il existe trois types de tsunamis distinct [26].

- Les télétsunamis (aussi appelés tsunamis transocéaniques) sont, dans le cas de Wallis et Futuna, des tsunamis à l'échelle du Pacifique (transpacifiques) générés par des sources sismiques comme au Chili ou au Japon.
- Les tsunamis régionaux qualifient les phénomènes qui peuvent toucher les côtes moins de 2 heures après leur formation (par exemple, séismes dans la fosse des Tonga ou à Vanuatu).
- Les tsunamis locaux correspondent aux phénomènes dont la source se situe à moins de 100 km des côtes et qui s'abattent sur celles-ci quelques minutes après leur formation (par exemple, faille transformante de Futuna dans le cas de Futuna et d'Alofi).

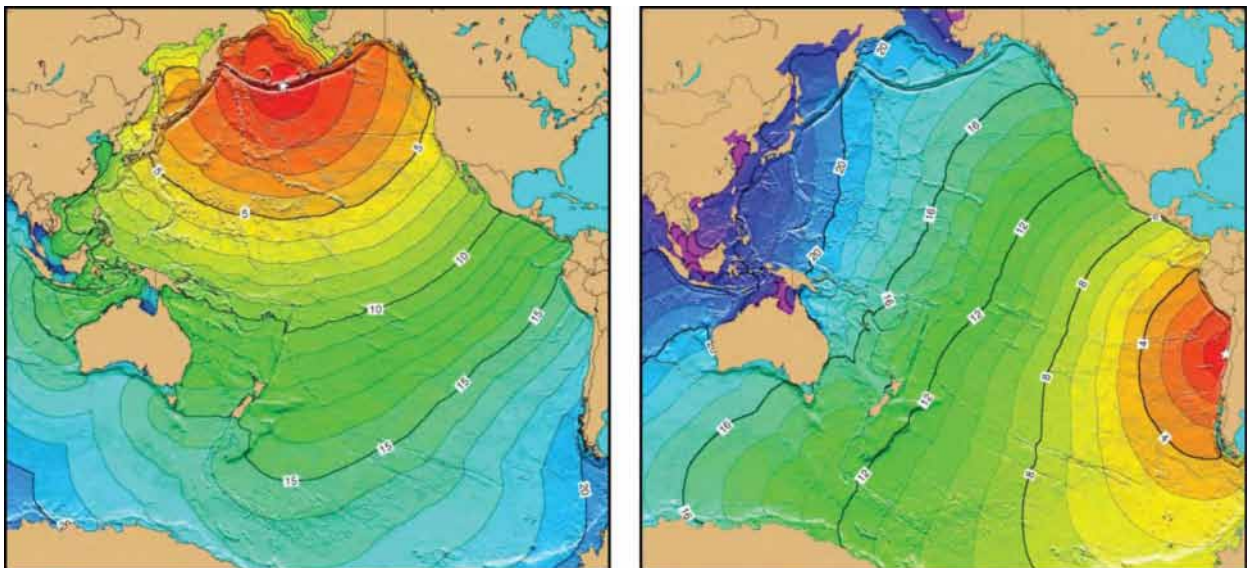


Figure 3-4 – Temps de parcours d'un tsunami transpacifique formé le long de la fosse des Aléoutiennes (gauche) et de la fosse du Chili (droite). Graphiques obtenus auprès de la NOAA. Ces tsunamis ont été modélisés à l'aide du logiciel Gerris dans le cadre de la présente étude, mais ne sont pas présentés dans le détail.

De manière générale, l'aléa tsunami à Wallis et Futuna est mal connu. Bien qu'un certain nombre d'informations historiques et paléohistoriques soient disponibles sur l'aléa tsunami à Futuna et à Alofi, nous n'avons pas pu rassembler de données concrètes sur un tsunami qui aurait touché Wallis. Parmi les tsunamis ayant frappé Futuna ou Alofi figurent les événements suivants (Tableau 2) :

1. Le tsunami du 30 septembre 2009, généré par le séisme de magnitude $M_W = 8,1$ survenu aux Tonga le 29 septembre 2009 (voir section 3.3).
2. Un tsunami de faible ampleur a été signalé sur le littoral sud de Futuna juste après le séisme du 12 mars 1993 ($M_W = 6,4$) et, par conséquent, il a été supposé que ces deux phénomènes étaient liés. Aucune autre observation concernant la vague n'a toutefois été relevée [23, 27]. Les études réalisées dans la foulée ont été axées sur les dégâts considérables occasionnés par le séisme, notamment la destruction de presque toutes les églises construites avant le XX^e siècle [4].
3. Les missionnaires de Saint-Pierre Chanel ont décrit en 1840 un séisme [4], accompagné de puissantes secousses ayant généré d'importants dommages sur les bâtiments, mais aucun tsunami n'a été signalé.
4. Une tradition orale évoque un phénomène meurtrier qui ravagea le littoral (légende de Fatuloli [28]) et suggère l'occurrence d'un événement préhistorique, peut-être un tsunamis dévastateur, mais dont l'âge est peu précis [29]. D'après notre étude, le phénomène en question aurait pu se produire vers 470 BP (env. 1 450 ans après J.-C.) [25].
5. Les travaux conduits sur les tsunamis préhistoriques et les paléotsunamis ont permis d'obtenir des informations supplémentaires sur l'aléa tsunami à Wallis et Futuna. Deux projets relatifs aux paléotsunamis ont été entrepris à Futuna et à Alofi en octobre 2009 [5] et à Wallis en août-septembre 2010 [6], en vue de déterminer la magnitude et la fréquence des tsunamis qui avaient touché ces îles. Les conclusions de ces deux projets sont résumées dans la section 3.4 et dans deux publications [25, 30].

Tableau 2 - Tsunamis historiques et paléohistoriques à Futuna (voir aussi Figure 3-3)

Date	Source/origine	Références
30 sept. 2009	Séisme dans la fosse des Tonga	[1, 5]
12 mars 1993	Séisme au niveau de la ride de Futuna	[23]
Vers 470 BP (env. 1 450 après J.-C.)		[30, 31]
1 860-2000 BP		[30, 31]

4 Données et méthode

Les méthodes et données utilisés dans cette étude sont détaillées en annexe C

C'est essentiellement le déplacement du plancher océanique, provoqué par la rupture de la faille lors d'un séisme, qui entraîne la formation d'un tsunami. L'intensité d'un tsunami est fonction de la magnitude du séisme générateur [32], d'où l'importance de ce paramètre pour la modélisation numérique.

La propagation d'un tsunami est déterminée par la topographie et la profondeur des fonds marins. Les inondations dépendent de la bathymétrie côtière, de la topographie du littoral et des modifications anthropiques.

Les paramètres utilisés pour la modélisation numérique de tsunamis sont la géométrie de la source (faille), les données bathymétriques et les données topographiques terrestres correspondant aux zones d'inondation.

Les paramètres caractérisant la rupture sismique utilisés dans cette étude proviennent de la littérature scientifique basée sur des relations empiriques reliant les paramètres de la rupture (longueur, largeur, profondeur, pendage) à la magnitude et la magnitude de moment [22, 33, 34].

Par ailleurs, les données bathymétriques multifaisceaux recueillies lors des campagnes océanographiques ALAUF1 de mars 2000 [9, 12] et WALFUT de juin 2011 [35] ont permis de déterminer les zones sources de séismes locaux dans la région de Futuna.

4.1 Paramètres générés par les modèles numériques

Nous avons retenu les paramètres susceptibles de provoquer les plus importants séismes plausibles dans la région d'après les données disponibles. Dans la plupart des cas, ces séismes ne se sont pas produits, mais constituent des scénarios «catastrophes».

Dans la présente étude, nous avons sélectionné les paramètres clés suivants pour caractériser les tsunamis issus des modèles :

1. **Hauteur maximale de vague** générée par le modèle. Il s'agit de l'altitude maximale atteinte à terre par les vagues par rapport au niveau moyen de la mer, à l'intérieur du maillage du modèle correspondant au lieu concerné.
2. **Profondeur d'inondation maximale** théorique générée par le modèle. Il s'agit de la hauteur maximale atteinte par l'inondation causée par le tsunami par rapport au niveau moyen de la mer, au-dessus de la surface terrestre.
3. **Distance maximale d'inondation** théorique générée par le modèle. Il s'agit de la distance sur laquelle l'eau pénètre à l'intérieur des terres. Elle est mesurée de façon linéaire à partir du rivage.
4. **Heure estimative d'arrivée** à Wallis et à Futuna. Heure d'arrivée du tsunami généré par le modèle. L'heure estimative d'arrivée peut-être calculée avec grande précision si l'on connaît la bathymétrie et la source.

Un glossaire des termes et des abréviations utilisés figure à la fin du présent rapport.

4.2 Données topographiques et bathymétriques

Une topographie régionale du plancher océanique est suffisante pour modéliser la propagation d'un tsunami en milieux profonds. Pour les zones côtières, la meilleure précision possible est nécessaire. Une attention particulière a été consacrée à l'élaboration d'un modèle numérique de terrain (MNT) intégré pour la bathymétrie-topographie à Wallis (cette approche n'a pas été développée à Futuna). Le MNT final inclut les données bathymétriques et topographiques existantes et mises à notre disposition et les données spécialement produites dans le cadre du projet.

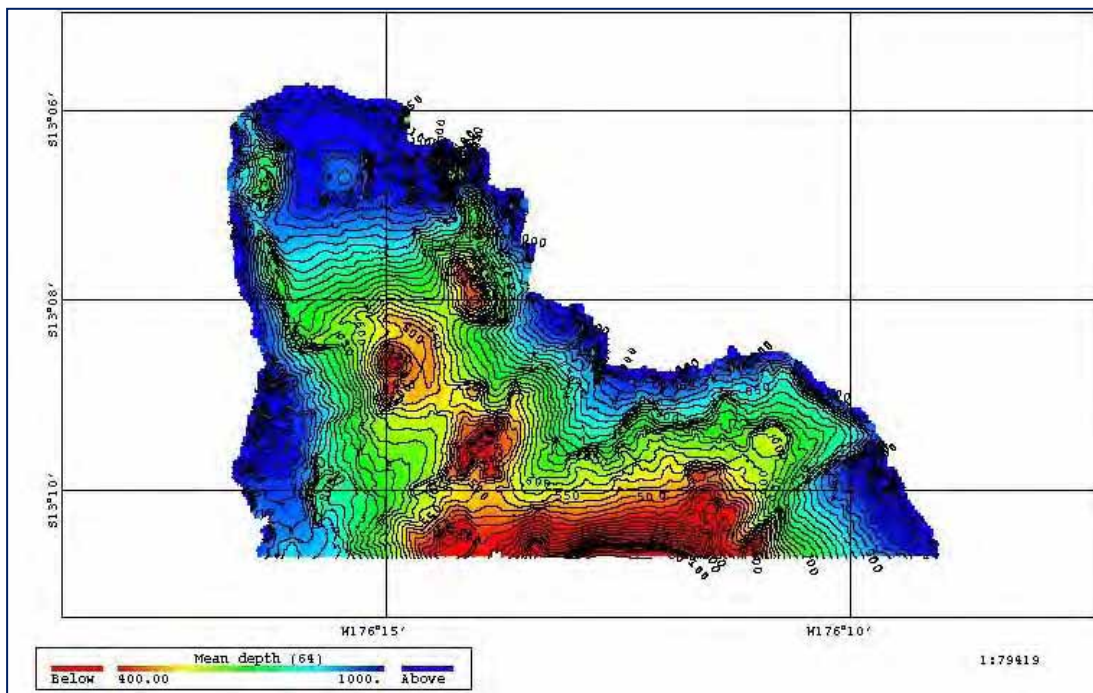


Figure 4-1 – Exemple de bathymétrie détaillée dans la partie nord de Wallis, campagne WALFUT (septembre 2011, avec l'aimable autorisation de l'IRD ; [35])

La bathymétrie du Bassin Pacifique, est celle de la base de données GEBCO.

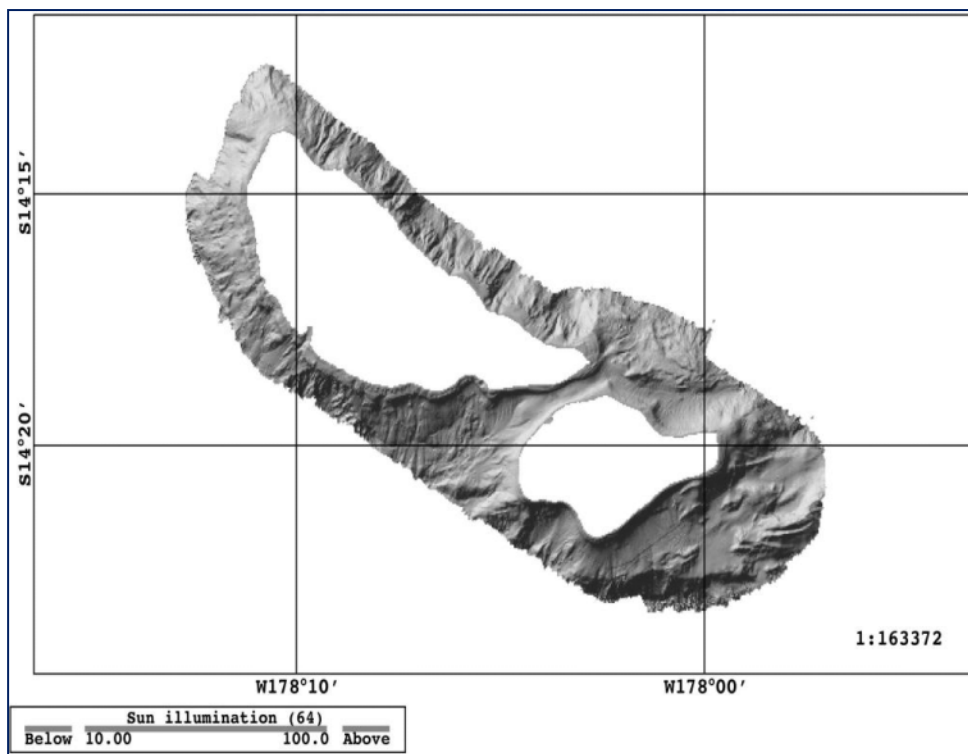


Figure 4-2 – Bathymétrie multifaisceaux (image ombrée) de Futuna et d’Alofi, campagne WALFUT (septembre 2011, avec l’aimable autorisation de l’IRD ; [35]).

Autour des îles, nous avons utilisé les données bathymétriques multifaisceaux recueillies par l’IRD dans la région de Futuna (campagne ALAUFI, mars 2001 ; [9, 12]) et de Wallis et Futuna (campagne WALFUT, juin 2011 ; [35]). Ces deux jeux de données ne relèvent pas du domaine public et ont été communiqués par l’IRD aux fins de la présente étude.

Les cartes de navigation du SHOM ont aussi été intégrées dans le MNT final.

À terre, nous avons utilisé des données topographiques IGN au 1/25 000, sous la forme de courbes de niveau de 5 mètres, tirées des cartes topographiques 4901 (Wallis) et 4902 (Futuna).

A Uvéa, des travaux spécifiques ont été conduits, afin d’obtenir un MNT intégré allant des eaux de profondeur moyenne (-150 mètres) jusqu’à la région côtière (+15 mètres), lagon compris (voir la procédure adoptée, détaillée en annexe B).

4.3 Modélisation numérique : principes et méthode

Le groupe de recherche "hydrodynamique" du NIWA a développé le logiciel Gerris (voir site gfs.sf.net, en anglais, [36]) capable de modéliser le déclenchement et la propagation des tsunamis, ainsi que les inondations correspondantes . La fiabilité des modèles a été validée en comparant les modèles d’évènements récents comme au Samoa, ainsi qu’avec les bouées DART situées en mer [37]. Cet exercice de validation démontre la fiabilité des résultats obtenus dans le cadre de la présente étude.

5 RÉSULTATS

Au total, quatorze sources sismiques jugées capables d'entraîner la formation de tsunamis suffisamment importants pour toucher Wallis ou Futuna, ont été sélectionnées (Tableau 3). Celles-ci sont classées en six sources transpacifiques, sept sources régionales et une source locale pour Futuna.

5.1 Sources transpacifiques

Les sources de tsunamis transpacifiques se trouvent toutes dans les fosses de subduction de la Ceinture du Pacifique, à savoir Japon, Kouriles, Aléoutiennes, Cascades, Pérou et Chili (Figure 1-1). Les paramètres des failles sismiques ont été obtenus à partir des séismes historiques, les informations correspondantes provenant de la base de données de l'USGS (<http://earthquake.usgs.gov>).

En règle générale, les heures estimatives d'arrivée des tsunamis transpacifiques fournies dans le bulletin d'alertes du PTWC sont assez précises. Les heures estimatives d'arrivée à Wallis et à Futuna sont fonction de l'origine du tsunami, mais sont supérieures à 9 heures pour les tsunamis transpacifiques (Figure 1-1).

5.2 Sources Régionales

Les sources régionales sont la fosse du sud de Vanuatu, l'arrière-arc du centre de Vanuatu, la fosse du nord de Vanuatu et la fosse des Tonga. Pour cette dernière, quatre scénarios ont été élaborés : nord et centre de la fosse des Tonga (pour la partie centrale, séisme de septembre 2009 ; voir 5.5), rupture de l'ensemble de la fosse, et rupture de l'ensemble de la fosse simulée à marée haute, en ajoutant de manière arbitraire un mètre au niveau de la mer à l'heure de déclenchement du tsunami. Les heures estimatives d'arrivée du premier train de vague en provenance du nord de la Fosse des Tonga, 30 minutes environ à Wallis et 1h20 à Futuna, sont nettement inférieures à celles d'un évènement transpacifique.

5.3 Sources Locales

Le scénario local correspond à une rupture le long du segment Futuna-Alofi de la zone de faille transformante nord-fidjienne ; il est fondé sur des travaux menés par Pelletier et al. [9, 12]. L'heure estimative d'arrivée du premier train de vague à Futuna est de moins de 15 minutes. Cet évènement n'a pas d'effet notable sur Wallis.

Plusieurs tests ont été réalisés pour chaque scénario, en utilisant un maillage topographie-bathymétrie d'une résolution minimale de 60 mètres. Quatre scénarios jugés représentatifs de l'aléa tsunami à Wallis et Futuna ont été sélectionnés. Les scénarios retenus ont été étudiés avec un maillage topographie-bathymétrie de 15 mètres ; ils sont décrits en détail dans les sections suivantes. Un certain nombre de scénarios ont été modélisés, sans pour autant être développés dans le présent rapport, car leurs effets sont minimes ou très similaires aux autres cas de figure. Le Tableau 3 fournit une synthèse de tous les résultats des scénarios. De plus, nous nous sommes appuyés sur l'ensemble des résultats pour établir une carte des profondeurs d'inondations maximales, à partir de tous les scénarios modélisés (voir section 5.8).

Tableau 3 – Synthèse des paramètres d'entrée et des résultats des modèles présentés

Nom	Référence ¹	M _w ²	Long ³ (m)	Larg ⁴ (m)	Gliss ^{1,5} (m)	Hmax ⁶ Wallis (m)	Hmax ⁶ Futuna (m)	Prof max ⁷ Wallis (m)	Prof max ⁷ Futuna (m)	Arrivée ⁸ Wallis	Arrivée ⁸ Futuna
Tonga 2009	29 sept. 2009	8,1	200 ⁹	342,5	61	2,7	8,7	2,2	8	0h30' to 2h45'	1h20' to 6h45'
Nord Vanuatu	extrême	8,39	400	40	10	0,5	1,1	0,2	1,0	3h15' to 3h40'	2h55' to 3h10'
Source locale, Futuna	12 mars 1993	7	40	15	2	0,1	4,9	0,1	3,6	0h45' to 1h	0h0 to 0h15'
Vanuatu, Arrière-arc	extrême	7,96	200	30	6	0,9	3,3	0,4	2,6	2h25' to 3h	2h45' to 3h15'
Fosse sud, Vanuatu	extrême	8,24	300	40	8	0,4	0,9	0,4	0,3	3h10' to 7h30'	2h45' to 2h55'
Tonga	extrême	9,06	1000	80	20	6,8	11,1	5,6	9,8	0h20' to 3h55'	0h45' to 3h45'
Tonga + 1 mètre	extrême	9,06	1000	80	20	6,9	13,4	6,5	11,7	0h25' to >7h	0h45' to >7h
Nord des Tonga	extrême	8,16	300	40	6	3,0	1,7	2,7	1,4	0h10' to 1h50'	1h to 1h45'
Centre des Tonga	extrême	8,57	600	50	10	1,7	1,2	1,3	1,1	1h15' to 3h	1h25' to 5h45'
Japon	11 mars 2011	9,0	700	?	81	1,0	0,5	0,6	0,3	9h05' to 18h50'	9h20' to 11h20'
Chili	22 mai 1960	9,29	920	120	32	0,7	0,5	0,4	0,1	13h30' to 22h25'	14h to 15h15'
Pérou	13 août 1868	9,0	900	150	15	2,2	3,2	1,5	1,5	15h to 17h30'	15h30' to 15h40'
Aléoutiennes	9 mars 1957	8,6	850	150	10	0,9	0,1	0,9	0	8h50' to 13h40'	
Cascades	extrême	9,1	1050	70	17,5	0,4	0	0,2	0	11h40' to 23h40'	
Kouriles	extrême	9,28	1000	200	17	3,9	4,5	3,1	3,5	8h35' to >12h	8h50' to >12h

1: Date du séisme de référence ou scénario extrême; **2:** magnitude retenue pour le modèle, susceptible de différer de celle du cas de référence (colonne de gauche).
3: Longueur de la faille source; **4:** largeur de la faille source; **5:** Longueur du glissement le long du plan de faille lors du séisme; **6:** Hauteur maximum modélisée de la vague au-dessus du niveau moyen de la mer; **7:** Hauteur d'eau maximum modélisée au-dessus du sol; **8:** heure estimative d'arrivée de la 1^{ère} vague et de retour à la normale; **9:** Estimation à partir du modèle de l'USGS. Voir http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2009/us2009mdbi/finite_fault.php et Annexe C

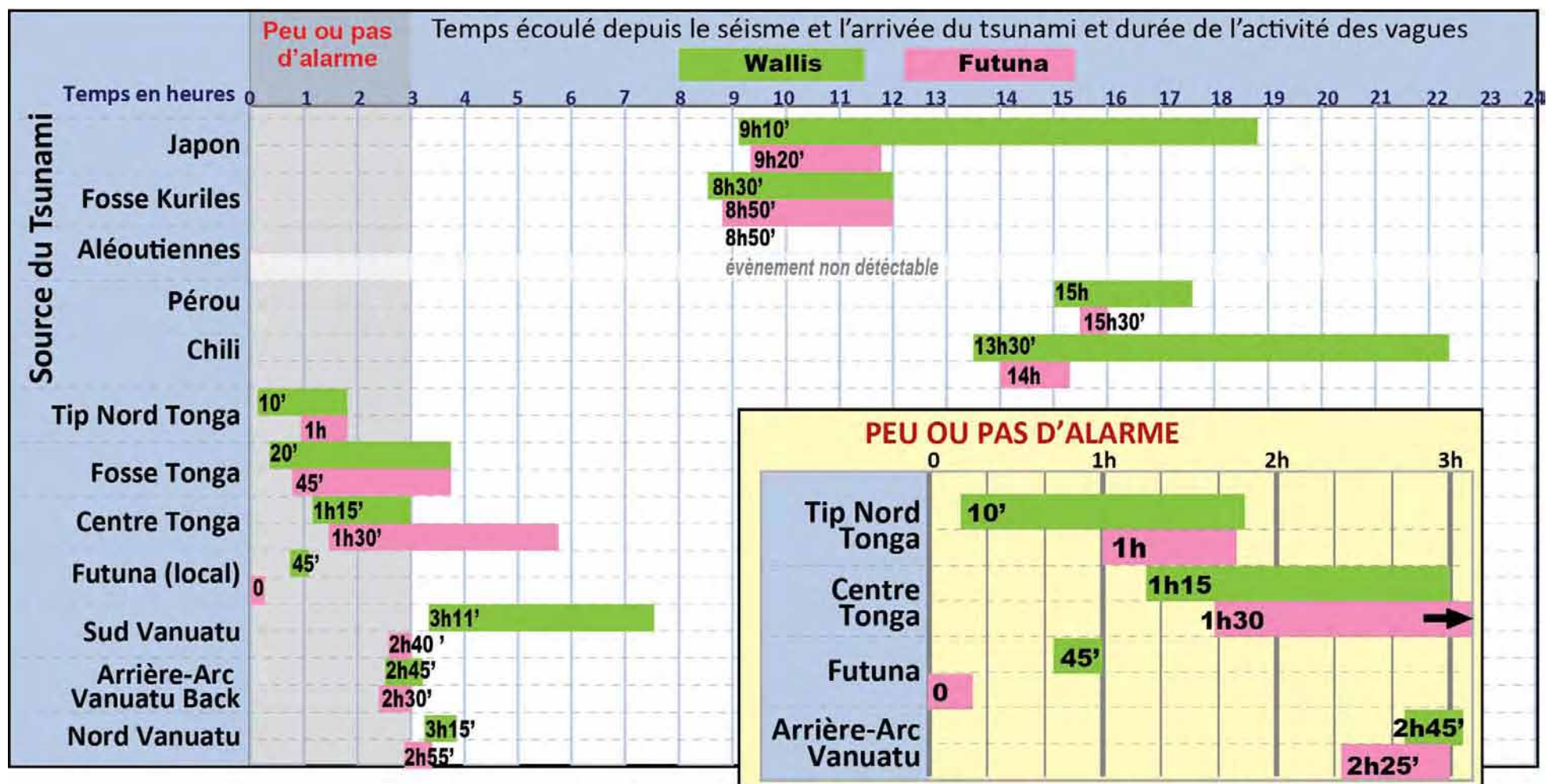


Figure 5-1 - Tableau schématique des heures estimatives d'arrivée et de durée d'activité des tsunamis

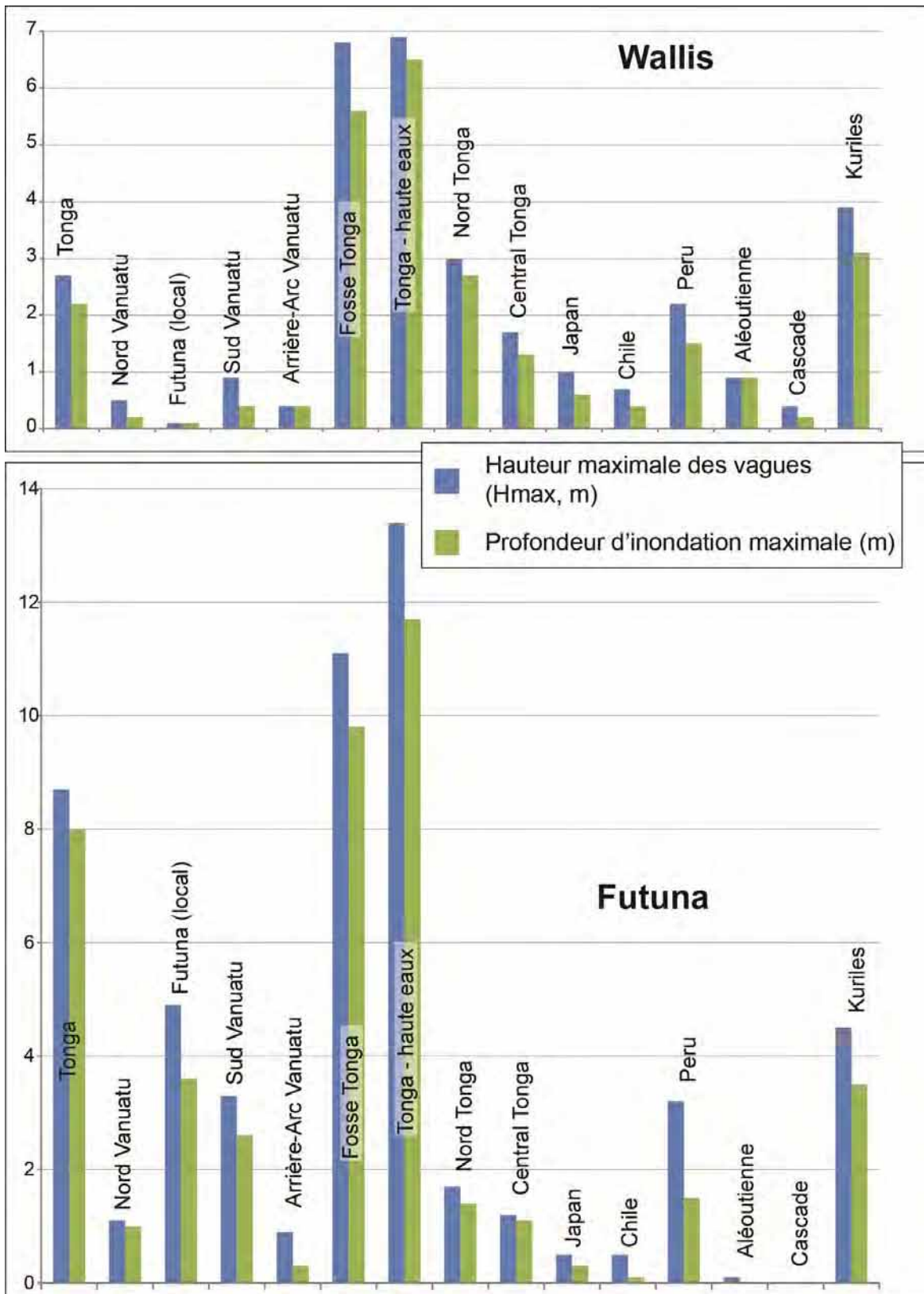


Figure 5-2 –Hauteurs des vagues à la côte et profondeurs d'inondation pour les scénarios testés.

Les informations détaillées sur les quatre scénarios exécutés à haute résolution sont indiquées dans les sections suivantes.

5.4 Scénario 1 : Source transpacifique - Fosse des Kouriles

Ce scénario s'appuie sur le séisme survenu le 15 novembre 2006 ($M_W = 8,3$) dans l'archipel des Kouriles [e.g., 38]. L'épicentre du séisme était situé sur la pente continentale de la fosse des Kouriles–Kamtchatka. Le 13 janvier 2007, un autre séisme ($M_W = 8,1$) s'est produit dans la même région. Ces deux phénomènes ont entraîné la formation de tsunamis transocéaniques enregistrés dans l'ensemble du bassin du Pacifique, notamment sur les côtes d'Hawaii, sur le littoral occidental des États-Unis d'Amérique, au Pérou, au Chili et en Nouvelle-Zélande.

Tableau 4 – Paramètres du modèle et résultats pour une source le long de la fosse des Kouriles.

Paramètres de la faille		Statistiques du tsunami	Wallis	Futuna
Longitude, latitude	153,224 ; 46,616	Hauteur max. des vagues	3,9 m	4,5 m
Long., larg., prof.	1 000, 200, 1 km	Prof. d'inondation max.	3,1 m	3,5 m
Dir., pendage, glissement*	220°, 30°, 90°	Heure estimative d'arrivée	8h33-12h	8h49-12h
Glissement	17 m	Magnitude	9,28	

*Direction, pendage angle de glissement le long de la faille.

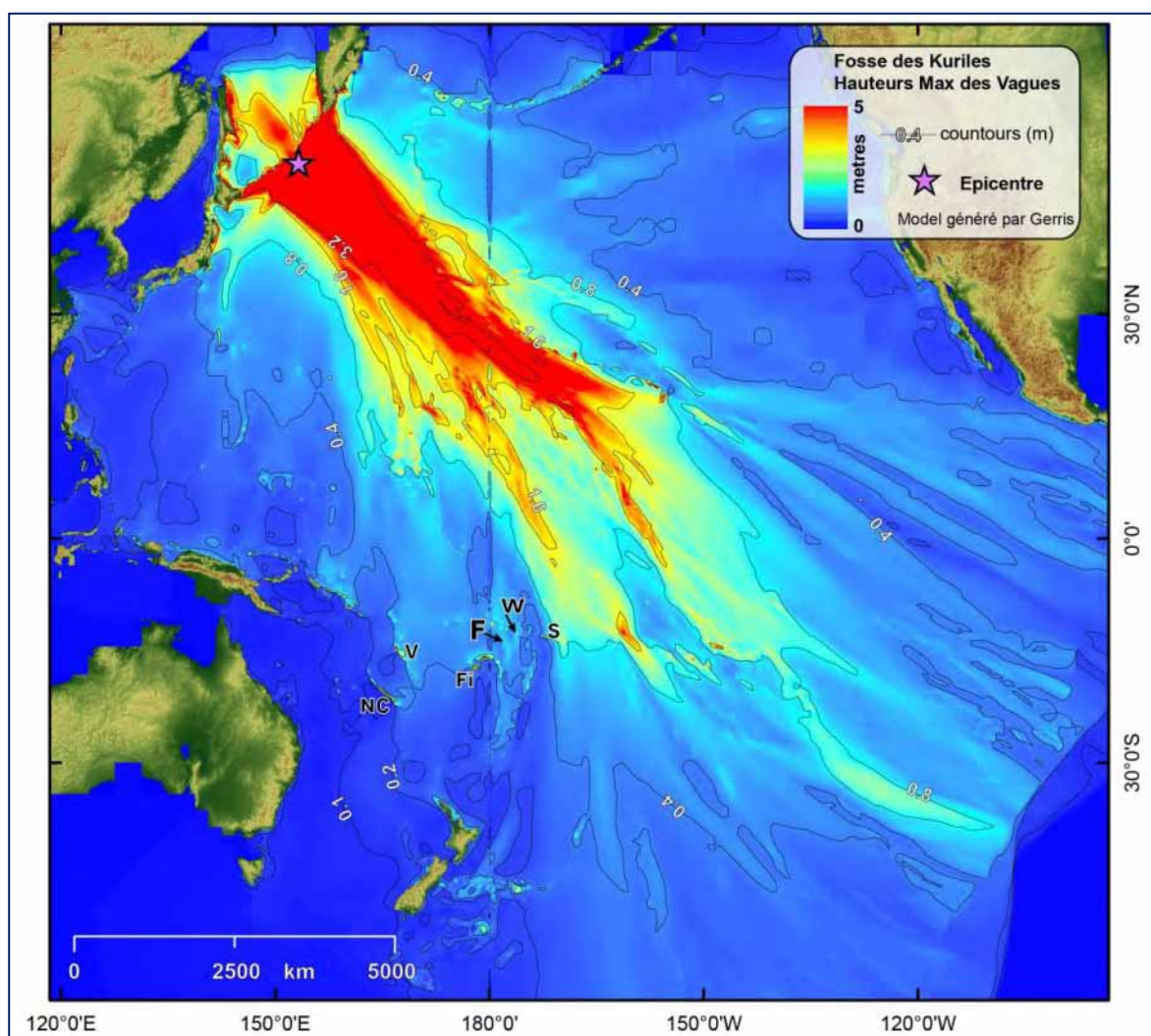


Figure 5-3 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues dans le bassin du Pacifique pour un séisme $M_W = 9,3$ le long de la fosse des Kouriles.

Wallis (W), Futuna (F), Samoa (S), Fidji (Fi), Vanuatu (V) et la Nouvelle-Calédonie (NC) sont indiqués sur la carte.

Pour le séisme de 2007, une rupture d'une longueur de 400 km a été observée, mais des phénomènes plus anciens (comme le séisme de 1952, $M_w = 9$) donnent à penser que des ruptures plus longues sont possibles sur le même plan de faille. En conséquence, nous avons utilisé une rupture de 1 000 km pour ce modèle. Il s'agit là d'un scénario extrême. D'après les « relations empiriques » publiées, ce modèle entraînerait une magnitude de moment de 9,28 et un glissement d'environ 17 mètres.

Le tsunami correspondant atteint Wallis 8h30' après le séisme et Futuna environ 20' plus tard (8h50' après le séisme). Les hauteurs maximales des vagues sont respectivement de 3,9 et 4,5 mètres, ce qui est suffisamment important pour que la population et, surtout, les capitaineries soient alertées.

Wallis

Le lagon protège bien Uvéa, et la hauteur des vagues modélisées sur le littoral d'Uvéa ne dépasse jamais 30 cm. Au quai du dépôt d'hydrocarbures et au quai de Mata-Utu, plus particulièrement, les modèles suggèrent des amplitudes de vagues d'à peu près 25 cm. Dans le lagon, les amplitudes des vagues des modèles n'excèdent pas 70 cm.

Une hauteur maximale des vagues de 3,9 mètres est modélisée au niveau du récif situé immédiatement à l'est de Faioa. Au nord de Nukufotu et de Nukuloa, des vagues d'une hauteur supérieure à 3 mètres sont ainsi prévues. Le chenal entre Nukufotu et Nukuloa provoque la focalisation des vagues, ce qui entraîne une inondation sur la côte sud-est de Nukufotu et la côte occidentale de Nukuloa. Bien que le tsunami ne semble pas avoir d'effet préjudiciable sur les structures situées sur les îlots, le principe de précaution s'impose compte tenu des incertitudes liées au modèle, et il convient d'envisager que les îlots pourraient être inondés en cas de tsunami transpacifique majeur.

De manière générale, l'ensemble du récif est inondé, mais hormis à Faioa et Nukulofa, où les hauteurs maximales des vagues atteignent respectivement 4 et 3,5 mètres, la profondeur d'inondation n'excède pas 1,5 mètre au niveau du récif.

Futuna

C'est sur la côte nord-est que l'impact est manifestement le plus fort, avec des vagues atteignant 2,5 mètres à Tavai, 3,2 mètres à l'anse d'Ava Vai, 2 mètres à Poi et 1,7 mètre à Laloua. Il est probable que la péninsule de Laloua soit inondée à un moment ou à un autre. Le tsunami s'amplifie dans le chenal Vasia entre Alofi et Futuna, mais n'a qu'une incidence limitée sur la piste de l'aéroport de Vélé.

À Léava, nous prévoyons une amplification, comme observé lors des quelques tsunamis historiques, avec une hauteur maximale des vagues de 1 mètre dans la baie de Léava. D'après le modèle, la distance maximale d'inondation à Léava ne dépasse pas 50 mètres. Il est important de souligner que, quel que soit le scénario, la bathymétrie est mal contrainte dans la baie de Léava. Par conséquent, l'incertitude associée aux résultats du modèle est importante. Ceci est particulièrement vrai pour ce qui est de l'impact potentiel sur le quai.

Il est très probable que le récif qui ceint Futuna soit inondé à plusieurs reprises si un phénomène de ce type se produisait. Les témoins du tsunami survenu en septembre 2009 font ainsi état de trois vagues consécutives, la deuxième ayant été perçue comme la plus forte.

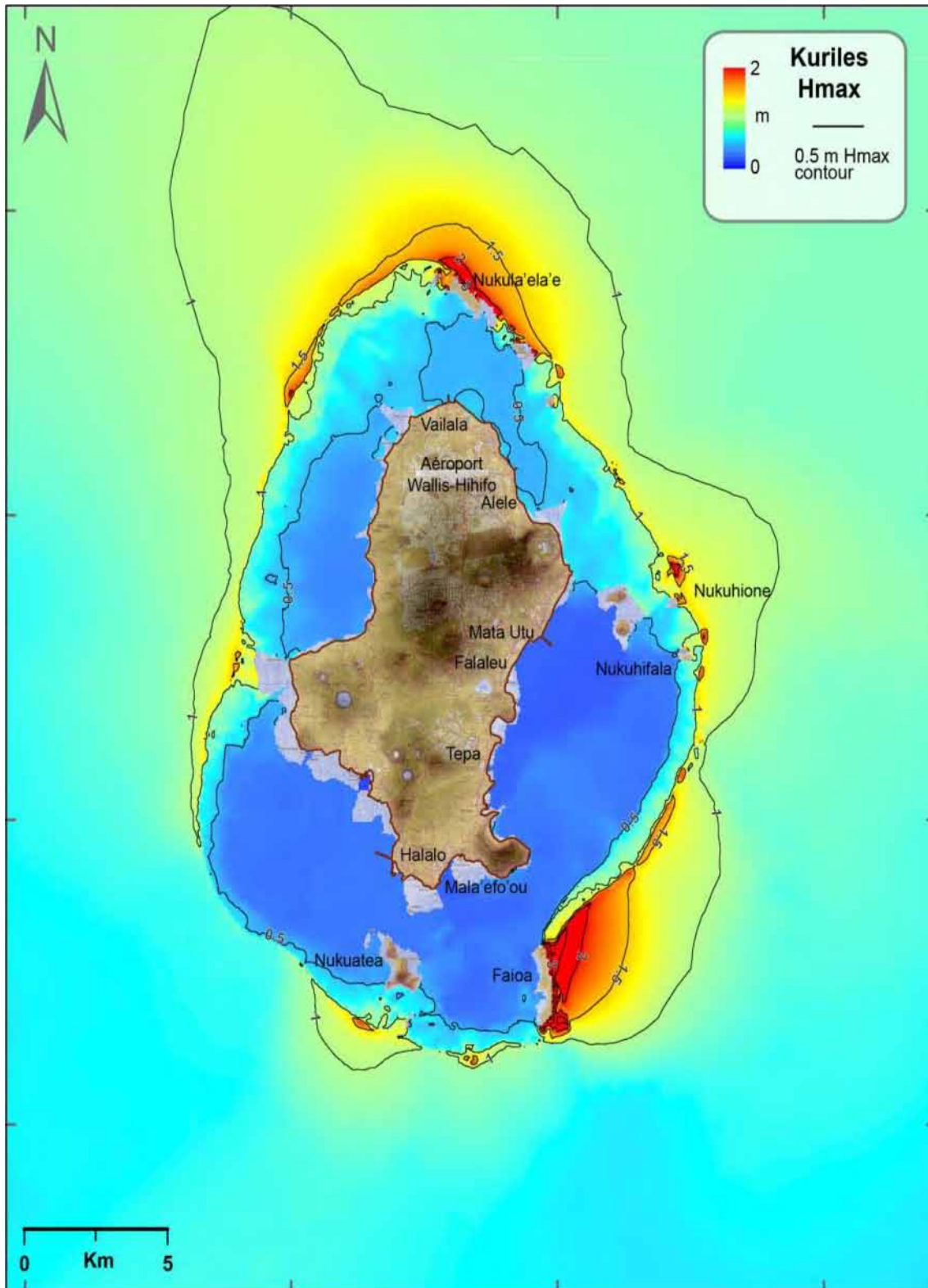


Figure 5-4 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Wallis pour un tsunami originaire de la fosse des Kouriles

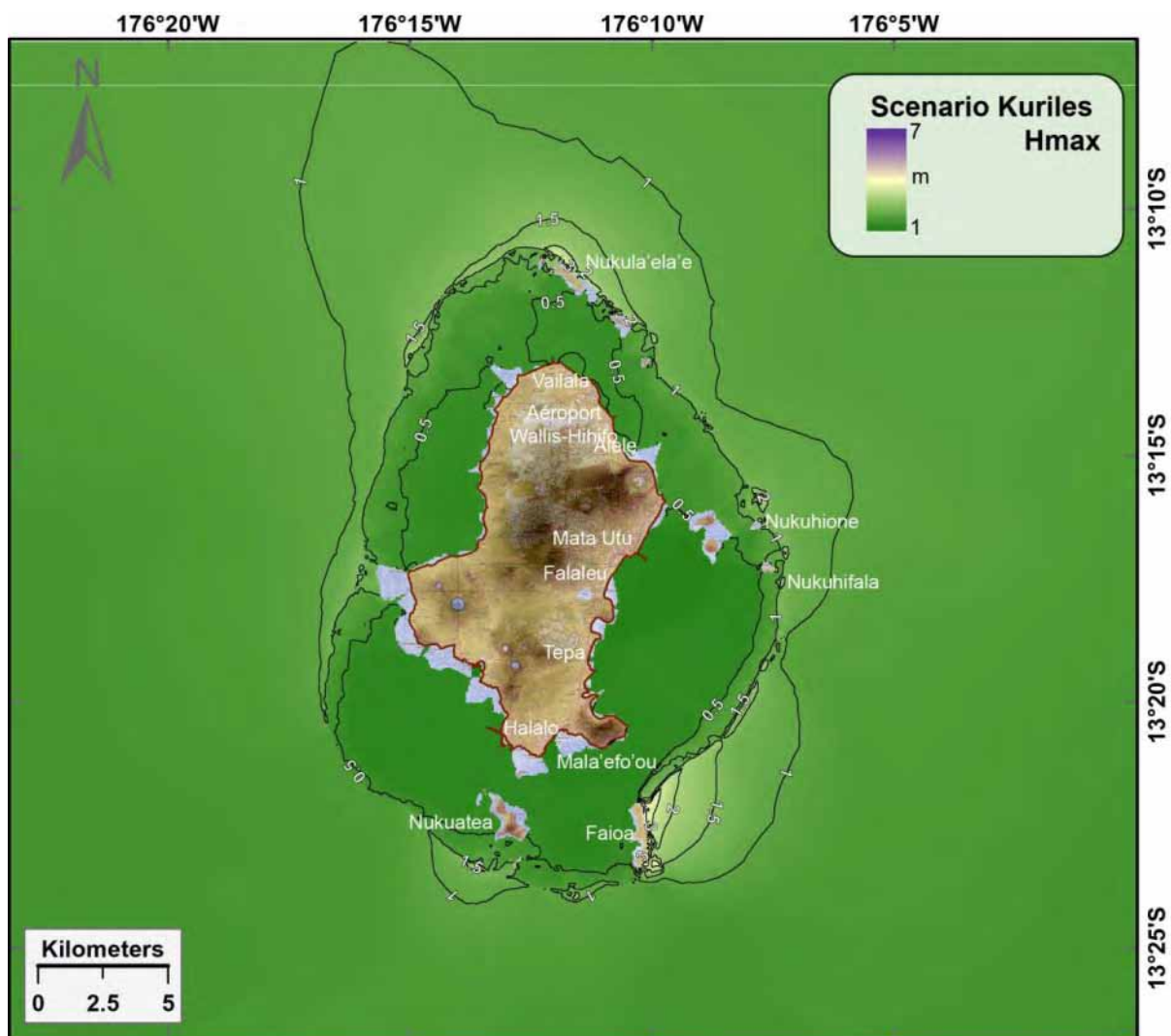


Figure 5-5 - Elévation maximum des vagues pour le scénario des Kuriles.
 Echelle de couleur similaire aux autres scénarios de Wallis pour permettre une comparaison

Dans ce scénario, l'île d'Alofi est exposée à des amplitudes de vagues considérables, avec une hauteur maximale des vagues de 2,5 mètres dans le golfe de Ganiu. La plage d'Alofitai serait certainement inondée, les vagues s'élevant jusqu'à 1,5 mètre sur la côte, ce qui aurait probablement une incidence sur les falés d'Alofitai.

Parmi les autres tsunamis transpacifiques les plus susceptibles d'impacter Wallis et Futuna, figurent ceux en provenance des fosses de subduction du Pérou et de l'Équateur-Colombie (aucun modèle n'a été établi dans cette étude pour la fosse de l'Équateur-Colombie, mais un phénomène de magnitude de moment 8,8 a été enregistré en 1906). Cette situation s'explique par la topographie régionale du bassin du Pacifique et la focalisation de l'énergie des tsunamis. Quant aux tsunamis découlant de séismes survenus dans les fosses du Japon, du Chili ou des Cascades, leur incidence est minime, voire nulle, dans nos modèles.

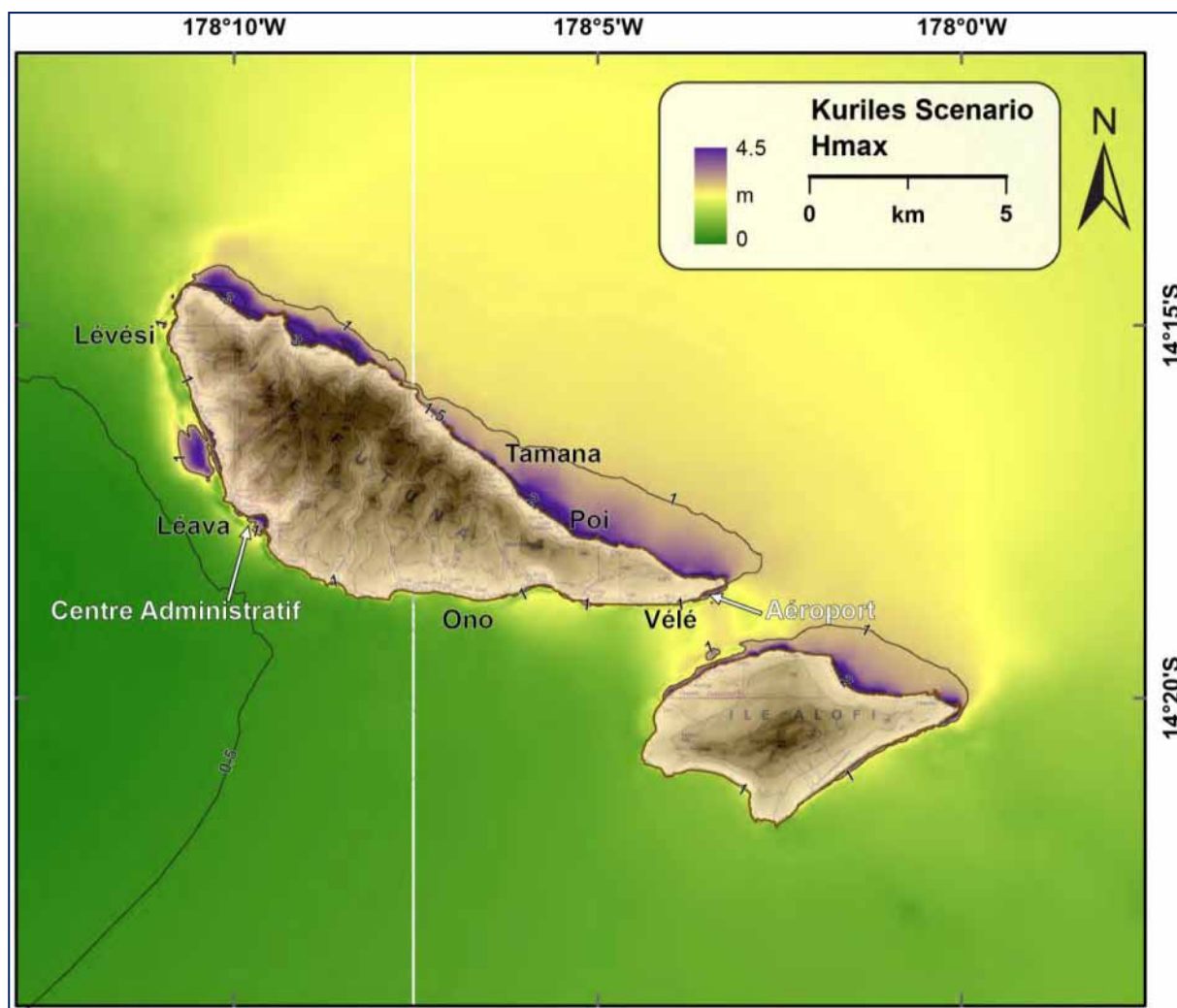


Figure 5-6 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Futuna pour un tsunami originaire de la fosse des Kouriles

5.5 Scénario 2 : Source régionale - rupture le long de la fosse des Tonga

Nous avons modélisé trois tsunamis différents provoqués par une rupture le long de la fosse des Tonga (Tableau 3).

1. Le séisme survenu aux Tonga en 2009 ($M_W = 8,1$; centre des Tonga) sert à valider notre modèle (voir Appendice C).
2. La rupture le long de la fosse Nord Tonga est nettement plus proche de Wallis et Futuna que les autres scénarios transpacifiques, et l'orientation de la rupture est susceptible d'entraîner des conséquences plus importantes.
3. Le modèle, relatif à un scénario extrême, utilise les paramètres relatif à un séisme de magnitude de moment 9,1 provoqué par une rupture de l'ensemble du segment des Tonga (Figure 5-7 ; Tableau 5). Ce segment est contraint par la Ride de Louisville au sud et la terminaison nord de la fosse, entraînant une rupture d'une longueur de 1 000 km.

Nous nous intéressons ci-après au scénario le plus défavorable (rupture de l'ensemble de la fosse des Tonga, Tableau 5).

Tableau 5 - Paramètres du modèle et résultats pour une source le long de l'ensemble de la fosse des Tonga.

Paramètres de la faille		Statistiques du tsunami	Wallis	Futuna
Longitude, latitude	-173,7 ; -20,5	Hauteur max. des vagues	6,8 m	11,1 m
Long., larg., prof.	1 000, 80, 10 km	Prof. d'inondation max.	5,6 m	9,8 m
Dir., pendage, glissement*	195°, 30°, 90°	Heure estimative d'arrivée	0h19-3h55	0h45-3h44
Glissement	20 m	Magnitude	9,06	

*Direction, pendage angle de glissement le long de la faille.

Dans ce modèle, le tsunami est provoqué par une rupture totale de la fosse des Tonga et, comme lors du phénomène de 2009, se propage avant tout vers l'est, à l'écart de Wallis et Futuna. Néanmoins, la magnitude de l'événement entraîne des vagues d'une hauteur maximale très élevée aussi bien à Wallis (6,8 mètres) qu'à Futuna (11 mètres). De même que pour le tsunami de 2009, Futuna est davantage exposée, en raison de la focalisation des vagues dans la fosse nord-fidjienne. Comme nous nous y attendions, c'est dans ce scénario que l'impact sur Wallis et Futuna est le plus important.

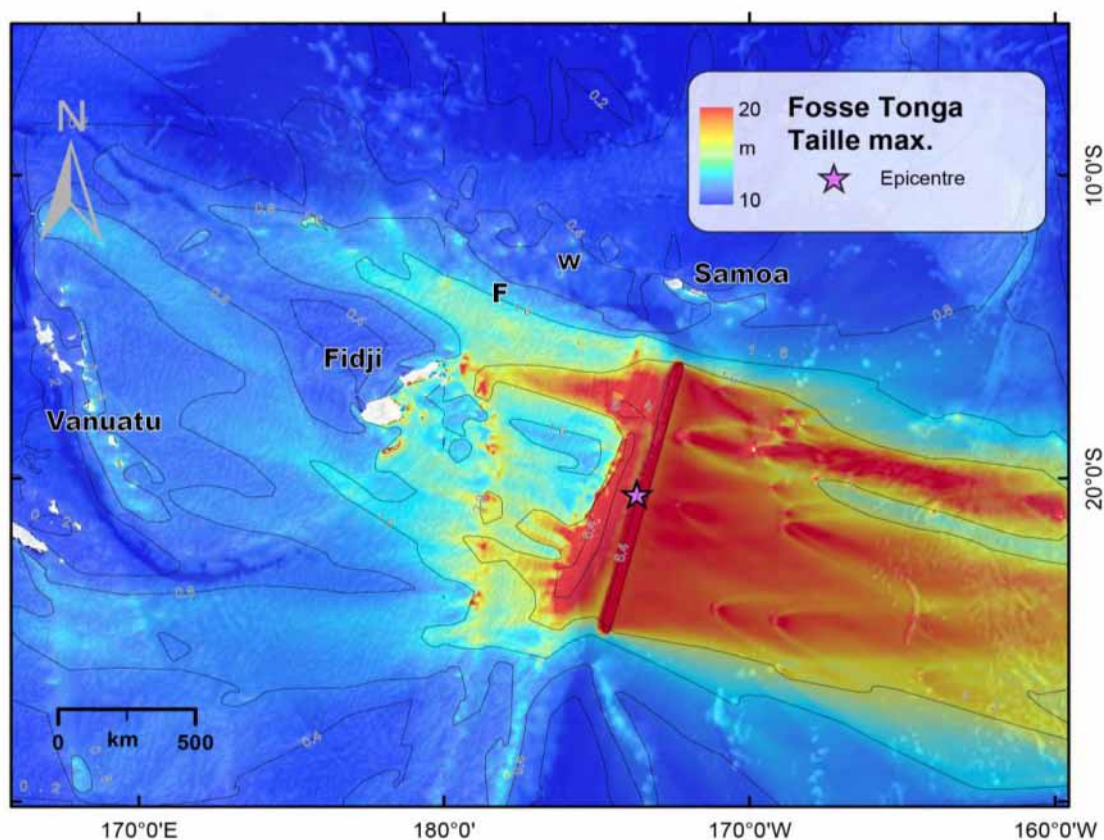


Figure 5-7 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues pour un séisme de $M_w = 9,1$ le long de l'ensemble de la fosse des Tonga

La première vague arrive en moins de 20 minutes à Wallis et 45 minutes à Futuna. Par conséquent, l'alerte émise par le PTWC, basé à Hawaii, ne sera pas communiquée à temps pour Wallis. Quant à la population de Futuna, elle n'aura que quelques dizaines de minutes pour réagir. Par ailleurs, étant donné que le séisme ne sera peut-être pas ressenti très fortement ni à Wallis ni à Futuna, il est possible qu'une grande partie de la population ne soupçonne pas l'arrivée imminente d'un tsunami. Il est donc essentiel que les habitants connaissent les signes annonciateurs d'un tsunami (retrait de la mer).

Wallis

À Wallis, c'est sur la côte au sud-est du récif que le risque est le plus important. Il est probable qu'une partie, voire l'ensemble, du littoral sud-est de Faioa soit inondé, avec une hauteur maximale des vagues de 5,5 mètres sur la côte et une profondeur d'inondation maximale potentiellement supérieure à 100 mètres dans le centre et le nord de l'îlot. D'après le modèle, la vague traversera l'isthme de Faioa dans sa moitié sud, avec des vagues s'élevant jusqu'à 4 mètres sur la côte ouest. Au sud de Faioa, la modélisation indique des vagues d'une hauteur maximale de 3 mètres au-dessus du récif.

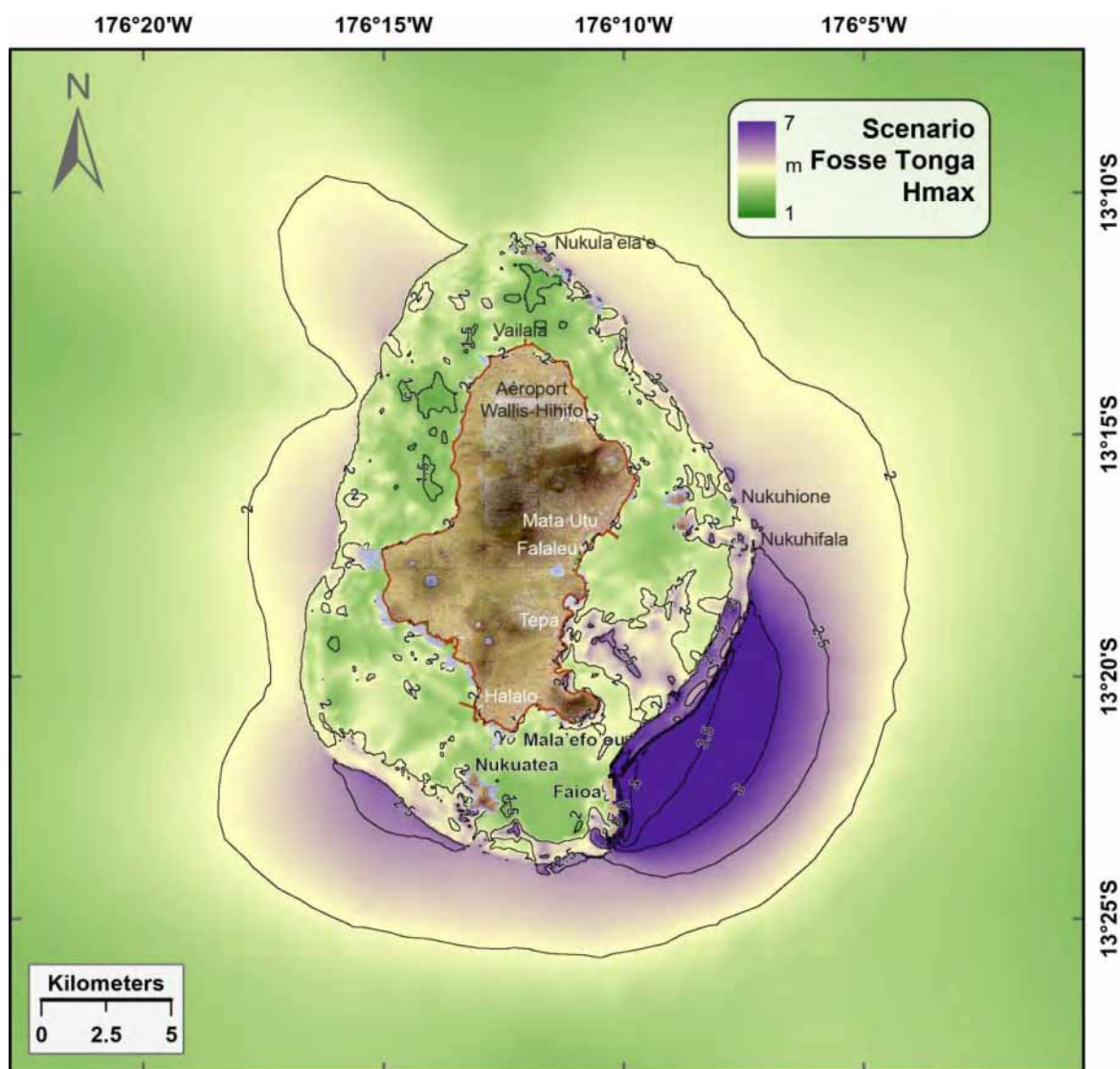


Figure 5-8 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Wallis pour un tsunami formé le long de l'ensemble de la fosse des Tonga

Il est possible que d'importantes inondations se produisent à Nukuhifala et Nukuhione, car, d'après la modélisation, la hauteur des vagues dépasse 2 mètres sur les côtes orientales de ces îlots.

De manière générale, au niveau du récif qui entoure Wallis, de Nukufotu (nord) jusqu'au sud de la passe d'Avatolu (sud-ouest ; sens horaire), des vagues d'une hauteur maximale supérieure à 2 mètres pourraient se produire.

Sur l'île d'Uvéa, la modélisation indique que les inondations sont les plus fortes à Falaleu (centre ; Figure 5-9), Vailala (nord), ainsi qu'à Gahi et Mala'efo'ou (sud).

À Falaleu, le tsunami entraînerait probablement l'inondation des champs de taro situés derrière les dunes côtières, ce qui fait peser un risque sérieux sur la principale ressource alimentaire de l'île .

Le lieu d'assemblée, en face de la cathédrale de Mata-Utu pourrait être submergé et le quai serait alors probablement inondé. En effet, la hauteur maximale des vagues modélisée s'élève entre 2 et 2,2 mètres sur le littoral de Mata-Utu.

À Vailala, la distance maximale d'inondation modélisée est supérieure à 300 mètres, et les champs de taro de l'intérieur des terres, de l'autre côté des dunes côtières, seraient probablement inondés.

Dans le sud, les inondations sont importantes dans la baie de Gahi, avec des vagues s'élevant jusqu'à 2,7 mètres et une distance maximale d'inondation d'environ 150 mètres dans la partie nord de la baie.

D'après le modèle, les côtes est et sud de la pointe Matalaa seraient submergées, la hauteur maximale des vagues dépassant en effet 3 mètres. Il serait alors difficile de trouver des voies d'évacuation, le long des falaises de la presqu'île de Matalaa, ce qui pourrait représenter un risque, étant donné l'absence de zones de replis.

Dans la partie occidentale de la baie de Mala'efo'ou, une profondeur d'inondation de 2,2 mètres sur la côte et une distance maximale d'inondation allant jusqu'à 350 mètres sont anticipées.

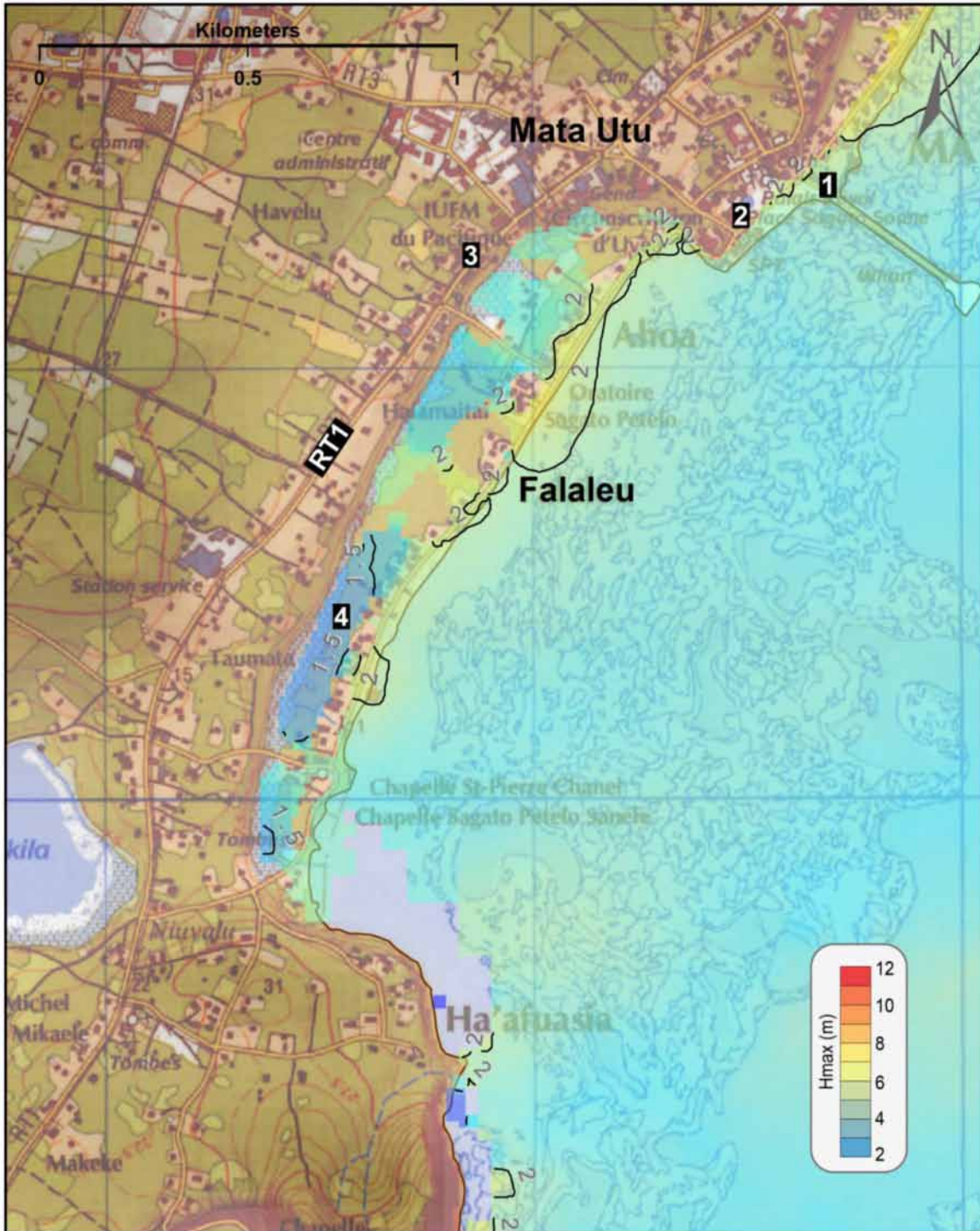


Figure 5-9 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Falaleu pour une rupture totale de la fosse des Tonga.
 1: Port, 2: Poste et Télécommunication, centre de rassemblement; 3: IUFM; 4: Champ de Tarot.

Futuna

Les impacts prévus sont les plus importants au niveau du chenal Vasia qui sépare Futuna d’Alofi, le long de la côte sud de Futuna, sur le littoral nord-est et aux alentours de Poi.

Sur la côte sud, des vagues d'une hauteur maximum de 7 à 11 mètres sont modélisées entre Vélé et Taa, tandis que la distance maximale d'inondation atteint 130 mètres à Taa et 200 mètres à Kola.

Dans le nord-est, d'après le modèle, les vagues peuvent atteindre jusqu'à 7 mètres à Tavai et dans l'anse d'Ava Vai, avec des distances d'inondation inférieures à 100 mètres. En 2009, nous avons ainsi constaté une distance maximale d'inondation de 45 mètres au niveau de l'anse d'Ava Vai.

À Poi et à Laloua, la hauteur maximale des vagues s'élève à 6 à 7 mètres, avec une distance maximale d'inondation atteignant 80 mètres, ce qui serait suffisant pour submerger la route. Il est probable que la péninsule de Laloua soit inondée à un moment ou à un autre. Le tsunami s'amplifierait dans le chenal Vasia entre Alofi et Futuna, mais n'aurait qu'une incidence limitée sur la piste de l'aéroport de Vélé.

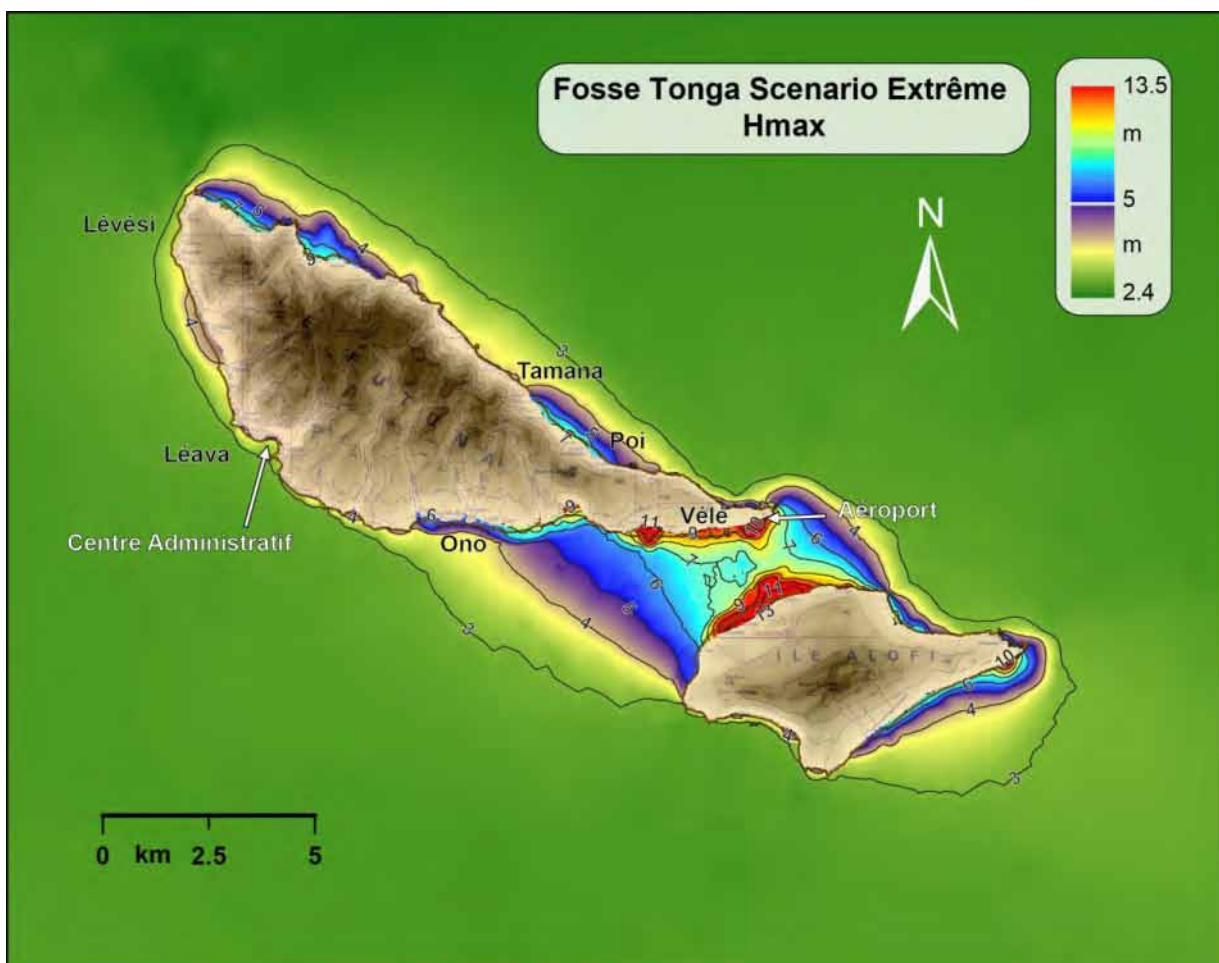


Figure 5-10 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Futuna pour un tsunami formé le long de l'ensemble de la fosse des Tonga

À Léava, nous prévoyons une amplification, comme observé lors des quelques tsunamis historiques, avec une hauteur maximale des vagues de 1 mètre dans la baie de Léava. D'après le modèle, la distance maximale d'inondation à Léava ne dépasserait pas 50 mètres. Il est important de souligner que, quel que soit le scénario, la bathymétrie est mal contrainte dans la baie de Léava et, par conséquent, qu'une incertitude raisonnable entoure les résultats du modèle. Ceci est particulièrement vrai pour un potentiel impact du quai.

Il est très probable que le récif qui ceint Futuna soit inondé à plusieurs reprises lors d'un phénomène de type rupture totale le long de la fosse des Tonga. Les témoins du tsunami survenu en septembre 2009 font ainsi état de trois vagues consécutives, la deuxième ayant été perçue comme la plus forte.

D'après ce modèle, Alofi est exposée à des amplitudes considérables, avec une hauteur maximale des vagues de 2,5 mètres dans le golfe de Ganiu. La plage d'Alofitai pourrait être inondée, les vagues s'élevant jusqu'à 1,5 mètre sur la côte, ce qui aurait probablement de graves conséquences sur les falés d'Alofitai.

5.6 Scénario 3 : Source régionale - arrière-arc de Vanuatu

Ce scénario se base sur la rupture du système de failles chevauchantes situé à l'est des îles d'Ambrym, de Pentecôte et de Maewo, à Vanuatu. Un séisme de magnitude de moment 7,5 survenu à Ambrym en 1999 s'est produit dans la partie sud du système en question [39] et a provoqué un tsunami destructeur qui a frappé l'est d'Ambrym et l'extrême sud de Pentecôte [40, 41]. Nous nous sommes appuyés sur les connaissances néotectoniques relatives à cette zone [42] pour fixer une longueur de faille de 200 km, capable de générer une magnitude de 7,96, afin de modéliser un tsunami associé à un déplacement des fonds marins de 8 mètres (Tableau 6). Le tsunami engendré se propage directement en direction de Futuna et, par conséquent, présente un risque potentiel pour Futuna et Alofi (Figure 5-11).

Tableau 6 - Paramètres du modèle et résultats pour une source le long de l'arrière-arc de Vanuatu.

Paramètres de la faille	Statistiques du tsunami	Wallis	Futuna	
Longitude, latitude	168 , 16, -15,3	Hauteur max. des vagues	0,9 m	3,3 m
Long., larg., prof.	200, 30, 0 km	Prof. D'inondation max.	0,4 m	2,6 m
Dir., pendage, glissement*	170°, 30°, 90°	Heure estimative d'arrivée	2h47-3h13	2h26-2h58
Glissement	6 m	Magnitude	7,96	

* Direction, pendage angle de glissement le long de la faille.

Dans ce scénario, une hauteur maximale des vagues de 3,3 mètres est modélisée dans la partie nord de la baie de Léava, à Futuna. D'après notre modèle, les distances d'inondation sont de quelques mètres dans le nord de la baie, tandis que, dans la partie sud de la baie, une vague d'une hauteur de 2 mètres pénètre sur 50 mètres à l'intérieur des terres. La route et les habitations longeant celle-ci seraient probablement inondées.

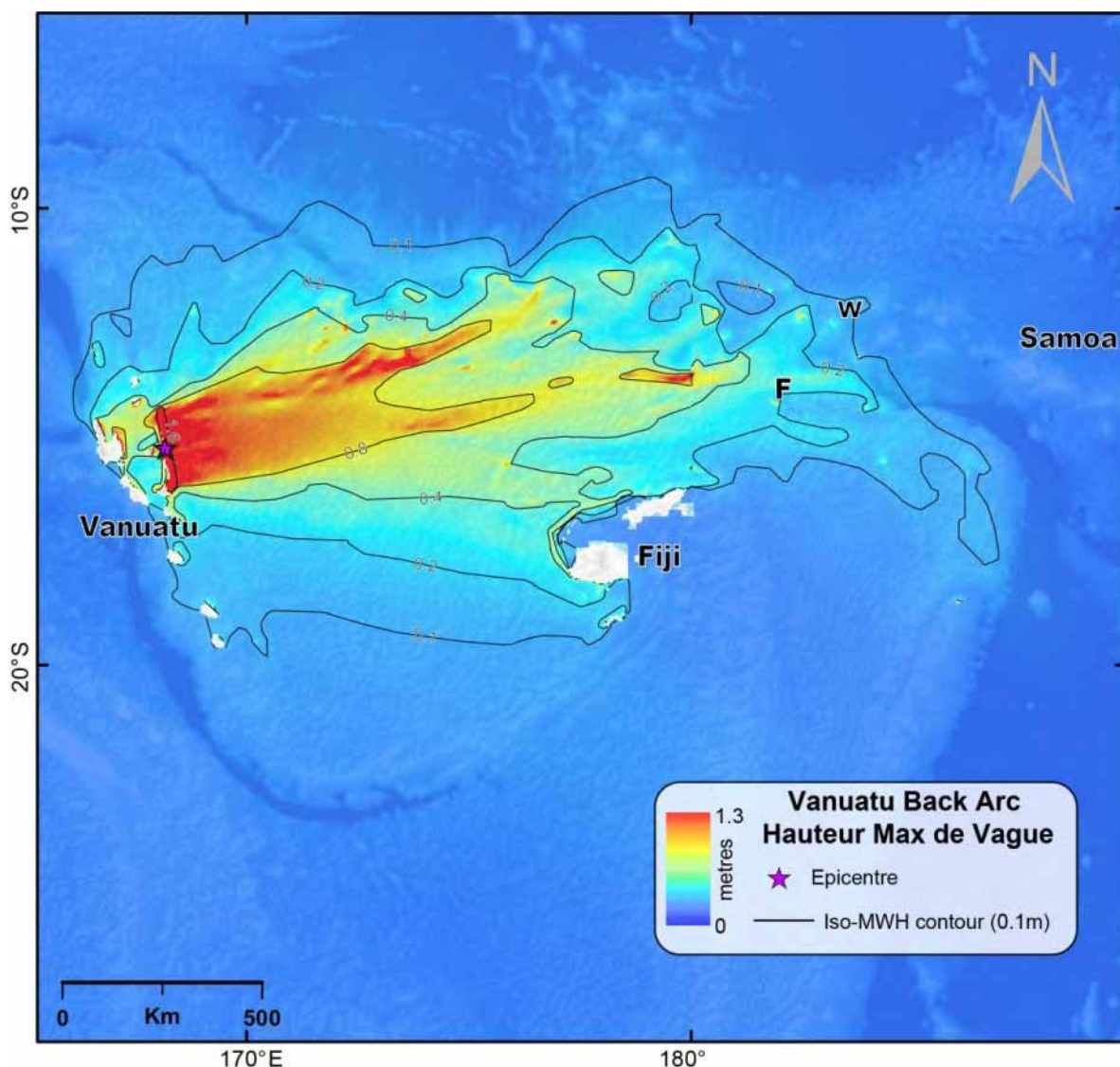


Figure 5-11 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues pour un séisme de $M_w = 7,9$ le long du système de failles chevauchantes de l'arrière-arc de Vanuatu. Wallis (W) et Futuna (F) sont indiquées sur la carte.

Nous avons modélisé une hauteur maximale des vagues de 1,7 mètre à la plage de Vaisei, avec une distance maximale d'inondation de 150 mètres, se produisant 2h30 après le déclenchement du tsunami à Vanuatu. D'après la modélisation de la hauteur maximale des vagues, la route et les bâtiments situés sur la côte seraient inondés au nord de Léava.

Le modèle indique que la plus haute vague serait observée à Léava.

Sur le littoral nord-est (entre la pointe de Tavai et Tavai), les vagues atteignent jusqu'à 1,7-1,9 mètre au niveau de la plage, ce qui entraîne, là encore, la submersion de la route.

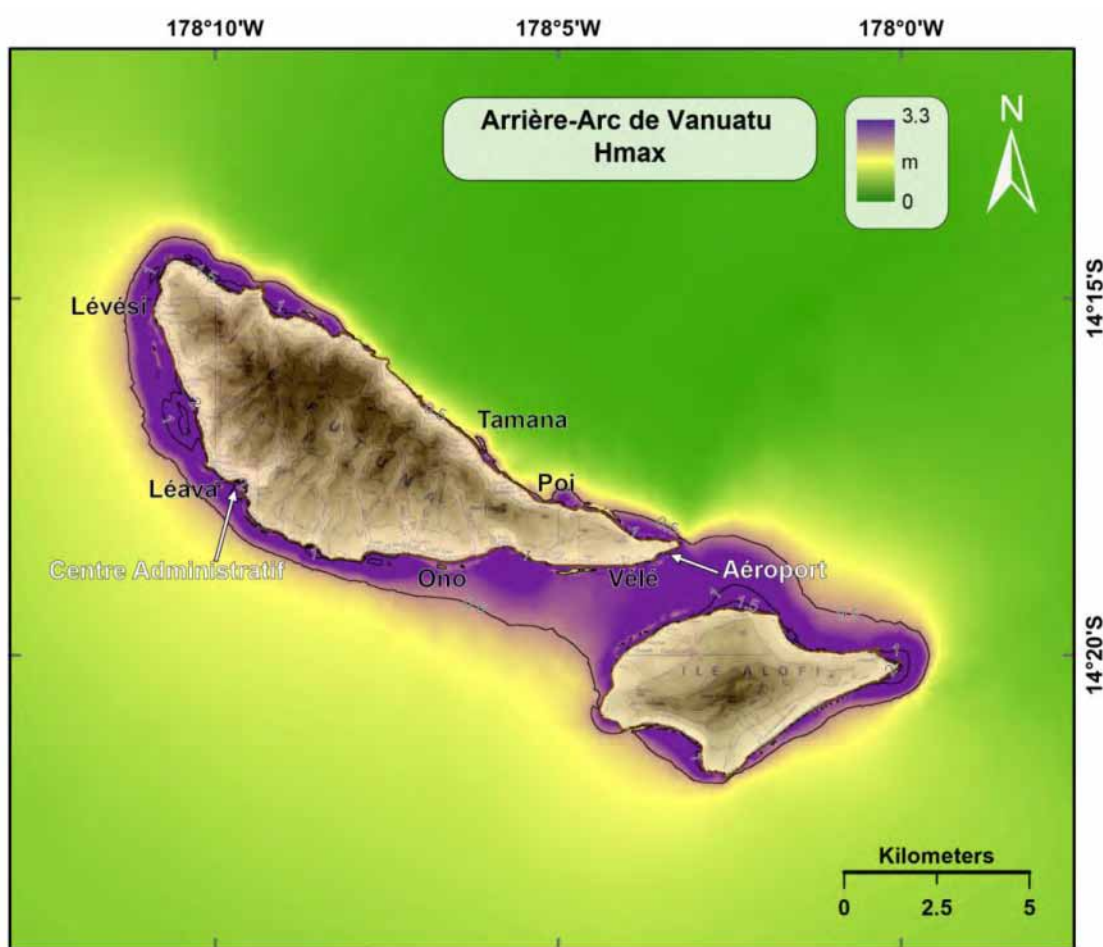


Figure 5-12 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Futuna pour un tsunami formé le long du système de failles chevauchantes de l’arrière-arc de Vanuatu.

L’impact sur Wallis est minime, et la modélisation n’indique pas la formation de vagues à l’intérieur du lagon.

5.7 Scénario 4 : Source locale - Futuna

Ce scénario se base sur les connaissances néotectoniques dont nous disposons pour Futuna ainsi que sur le séisme survenu en mars 1993 ($M_w = 6,5$) à Futuna, qui a engendré un tsunami local à Léava. Il reste à déterminer si le tsunami a été causé par le séisme ou, indirectement, par un glissement de terrain qui aurait été provoqué par le séisme. Quoi qu’il en soit, des habitants ont signalé un tsunami.

Tableau 7 - Paramètres du modèle et résultats pour une source le long de la zone de facture de Futuna.

Paramètres de la faille		Statistiques du tsunami	Wallis	Futuna
Longitude, latitude	-178,13 ; -14,32	Hauteur max. des vagues	0,1 m	4,9 m
Long., larg., prof.	40, 15, 0 km	Prof. d’inondation max.	0,1 m	3,6 m
Dir., pendage, glissement*	300°, 60°, 90°	Heure estimative d’arrivée	0h47-1h3	0h0-0h15
Glissement	2 m	Magnitude	6,97	

*Direction, pendage angle de glissement le long de la faille.



Figure 5-13 – Modélisation de la hauteur maximale des vagues à Futuna pour un tsunami formé par un séisme de $M_w = 7$ survenu le long du segment Futuna-Alofi de la zone de fracture nord-fidjienne.

Nous nous sommes appuyés sur les données relatives à la topographie des fonds marins recueillies en octobre 1999, en mars 2000 et en juin 2011 [9, 12, 35] pour retenir une faille source de 40 km de long associée à un glissement de 2 mètres du plancher océanique. D’après le modèle, un tel phénomène entraîne un tsunami de 3,6 mètres frappant Futuna quelques minutes seulement après sa formation. Wallis n’est pas touchée.

Comme on pouvait le pressentir, la côte nord-est de Futuna est bien protégée de ce tsunami. Il est en revanche surprenant de constater que le littoral sud entre Vélé et Taa est peu affecté, même si le récif est submergé (hauteur maximale des vagues prévue de 1 mètre).

Les effets sont les plus marqués entre Taa et Tavai, avec une hauteur maximale des vagues de 4,9 mètres à Vaisei, Toloké et Tavai. Les distances d’inondation modélisées atteignent une valeur maximale de 150 mètres à Léava.

Les résultats donnent à penser que d’importantes profondeurs d’inondation pourraient être constatées à trois endroits d’Alofi :

1. Hauteur maximale des vagues de 2,5 mètres dans la partie est de la plage de Vaika,
2. Hauteur maximale des vagues de 2 mètres à l’extrémité est de l’île,
3. Hauteur maximale des vagues de 2 mètres à Vateta.

5.8 Synthèse des 14 scénarios

Les quatre scénarios modélisés et discutés dans les sections précédentes indiquent les zones côtières de Wallis et Futuna les plus exposées à l'aléa inondation par tsunami. L'ensemble des hauteurs maximales des vagues modélisées dans les quatorze scénarios étudiés sont présentées de la Figure 5-14 à la Figure 5-19. A noter que ce cas de figure n'est pas réaliste, et que les inondations ne se produiraient pas toutes simultanément quel que soit le scénario. Les modèles fournissent toutefois des informations et des cartes utiles concernant les inondations potentielles toutes sources de tsunami confondues sur l'ensemble du littoral de Wallis et Futuna.

Comme on pouvait s'y attendre, c'est le scénario associé à la rupture totale de la fosse des Tonga qui s'approche le plus de ce cas de figure artificiel. Ceci est tout particulièrement vrai pour Wallis. À Futuna cependant, l'impact d'une rupture locale est également à prendre sérieusement en considération.

Wallis

Les résultats pour Wallis, tous modèles confondus, indiquent clairement que ce sont les îles situées dans la partie sud-est du récif barrière qui sont le plus exposées. Des inondations liées à des tsunamis sont susceptibles de se produire dans les zones d'habitation permanente du littoral oriental d'Uvéa.

Les observations relatives aux inondations et aux distances d'inondation à Uvéa sont les mêmes qu'en cas de rupture totale de la fosse des Tonga, les effets étant les plus marqués à Vailala (nord ; Figure 5-15), à Mata-Utu (est, Figure 5-9) et le long de la côte sud (Figure 5-17).

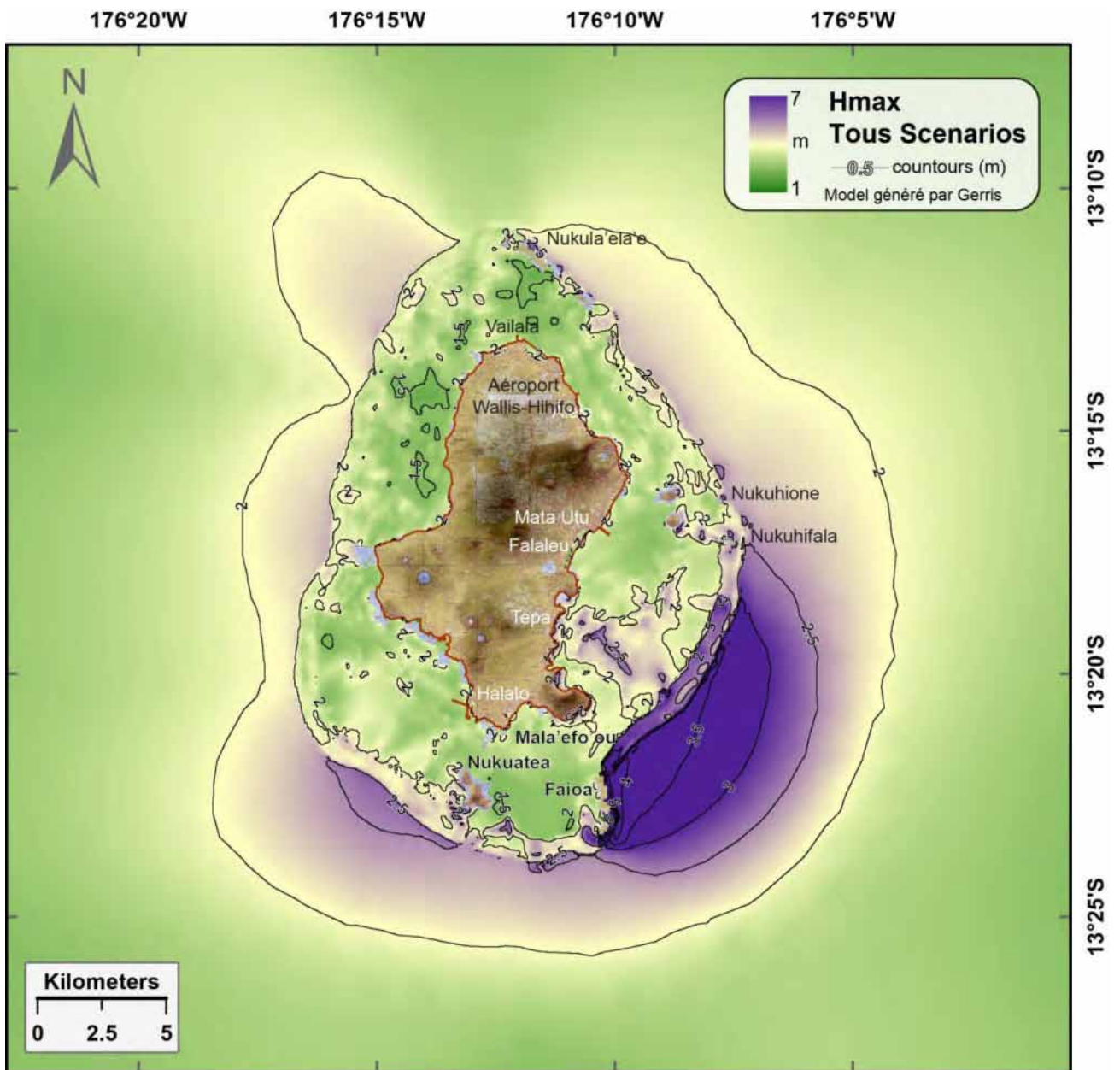


Figure 5-14 – Hauteur maximale des vagues à Wallis pour les 14 scénarios de cette étude.

Les Figure 5-15 à Figure 5-18 sont des agrandissements des régions habitées de Wallis.

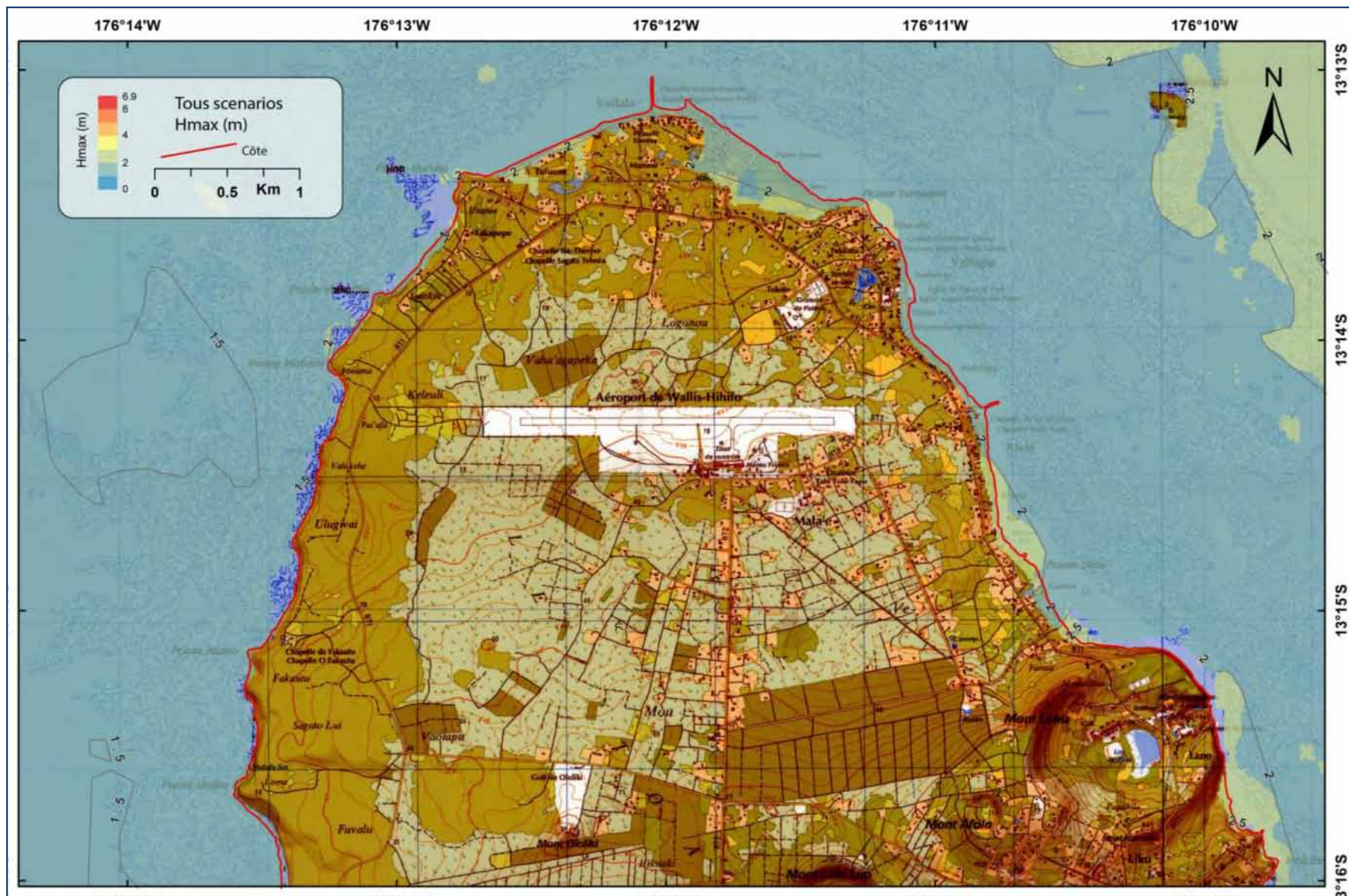


Figure 5-15 –Synthèse des scénarios pour Nord Wallis

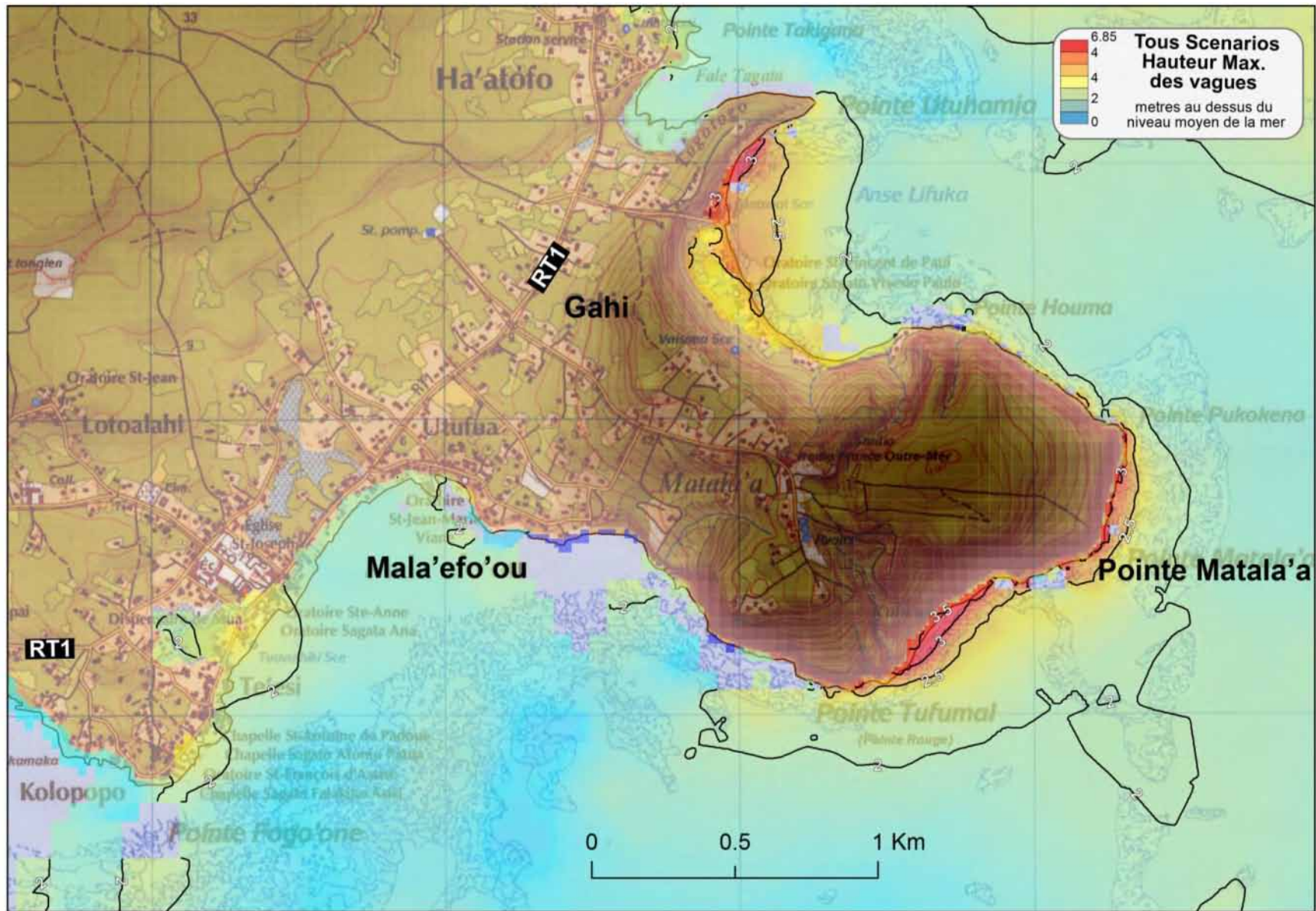


Figure 5-16 - Synthèse des scénarios pour Sud-Est Wallis

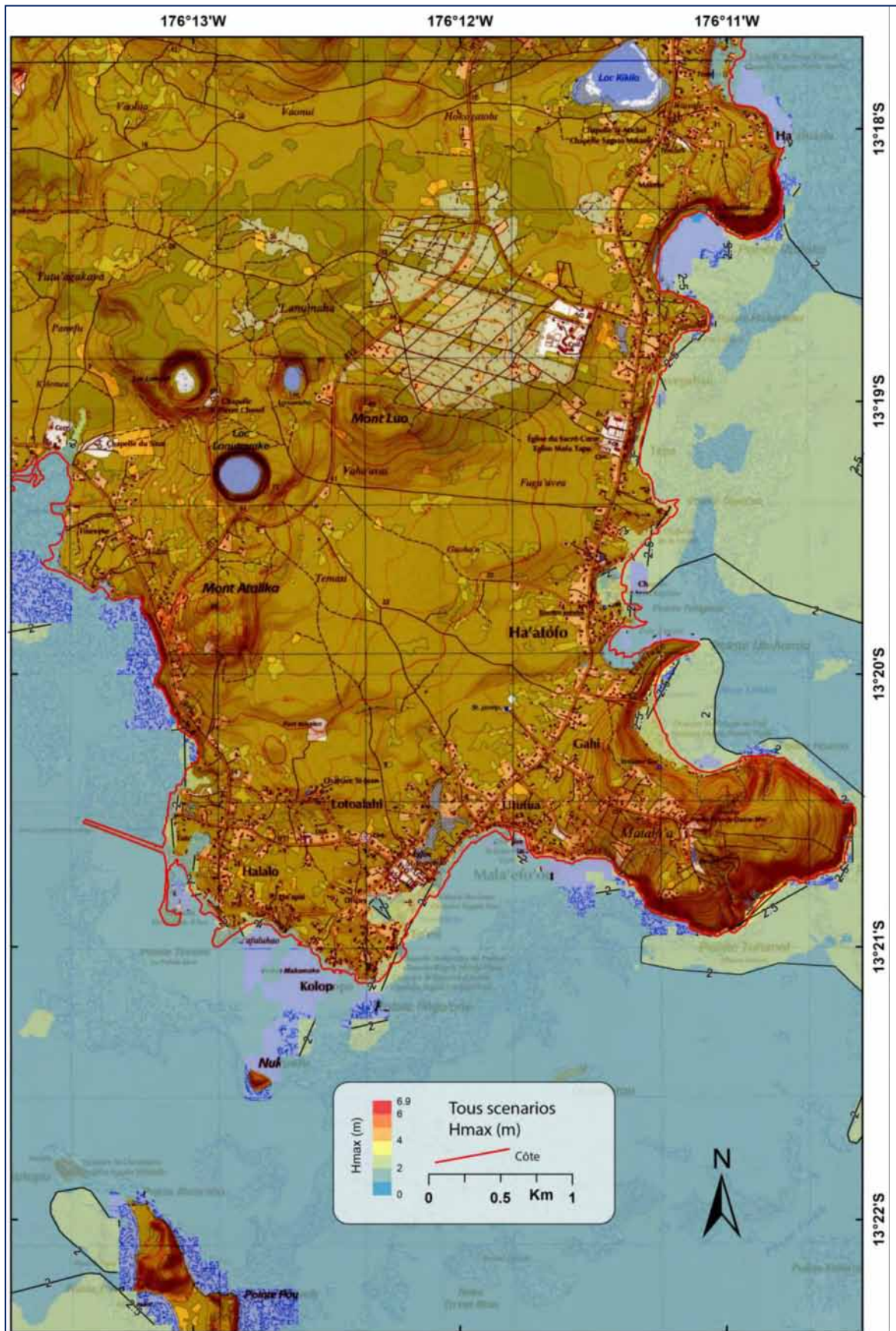


Figure 5-17 – Synthèse des scénarios pour Sud Wallis.



Figure 5-18 - Synthèse des scénarios pour Wallis Est

Futuna

C'est sur le littoral entre Futuna et Alofi que se produisent les plus grandes vagues. Les autres endroits exposés à des inondations majeures sont les zones peuplées le long des côtes sud, nord et est de Futuna, ainsi que la côte sud-est inhabitée d'Alofi.

Dans le chenal Vasia entre Alofi et Futuna, l'énergie des vagues se focalise, ce qui entraîne les vagues de plus grande hauteur dans la modélisation.

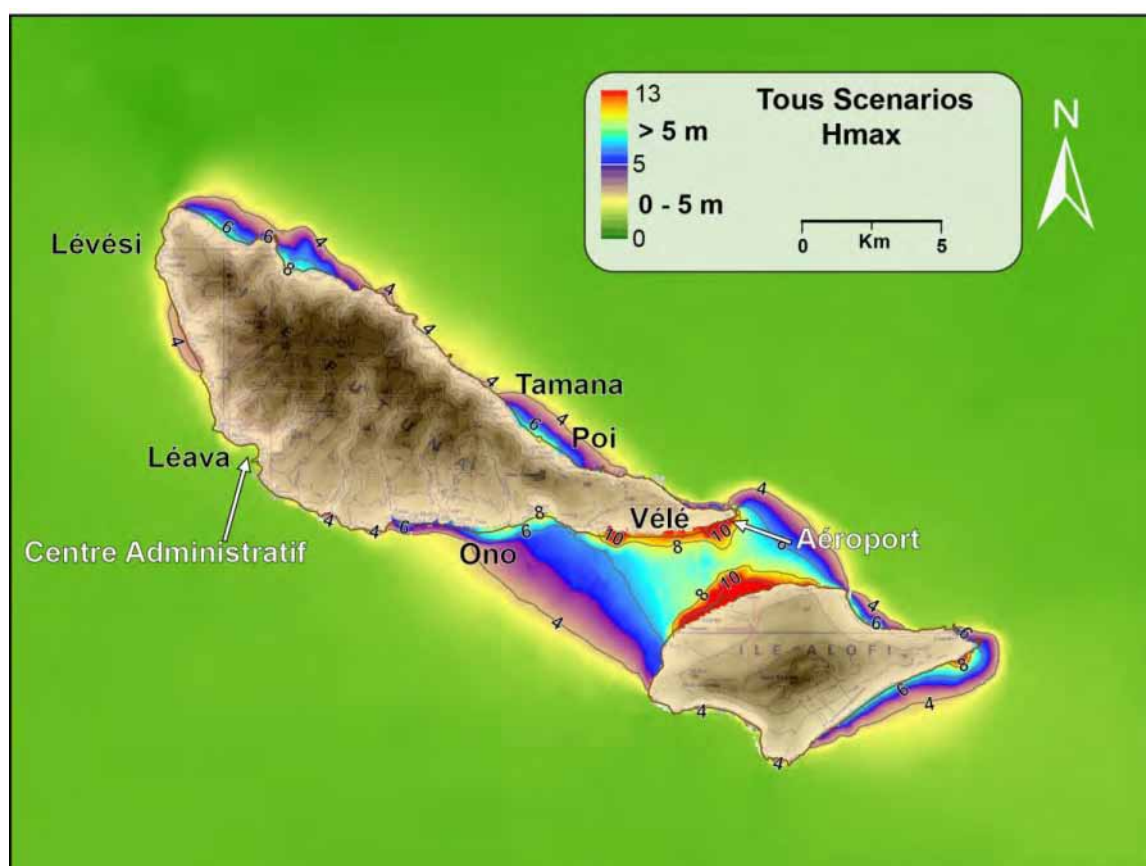


Figure 5-19 – Hauteur maximale des vagues à Futuna pour les 14 scénarios de cette étude

Les Figure 5-20 à Figure 5-22 sont des gros plans des zones les plus affectées de Futuna.

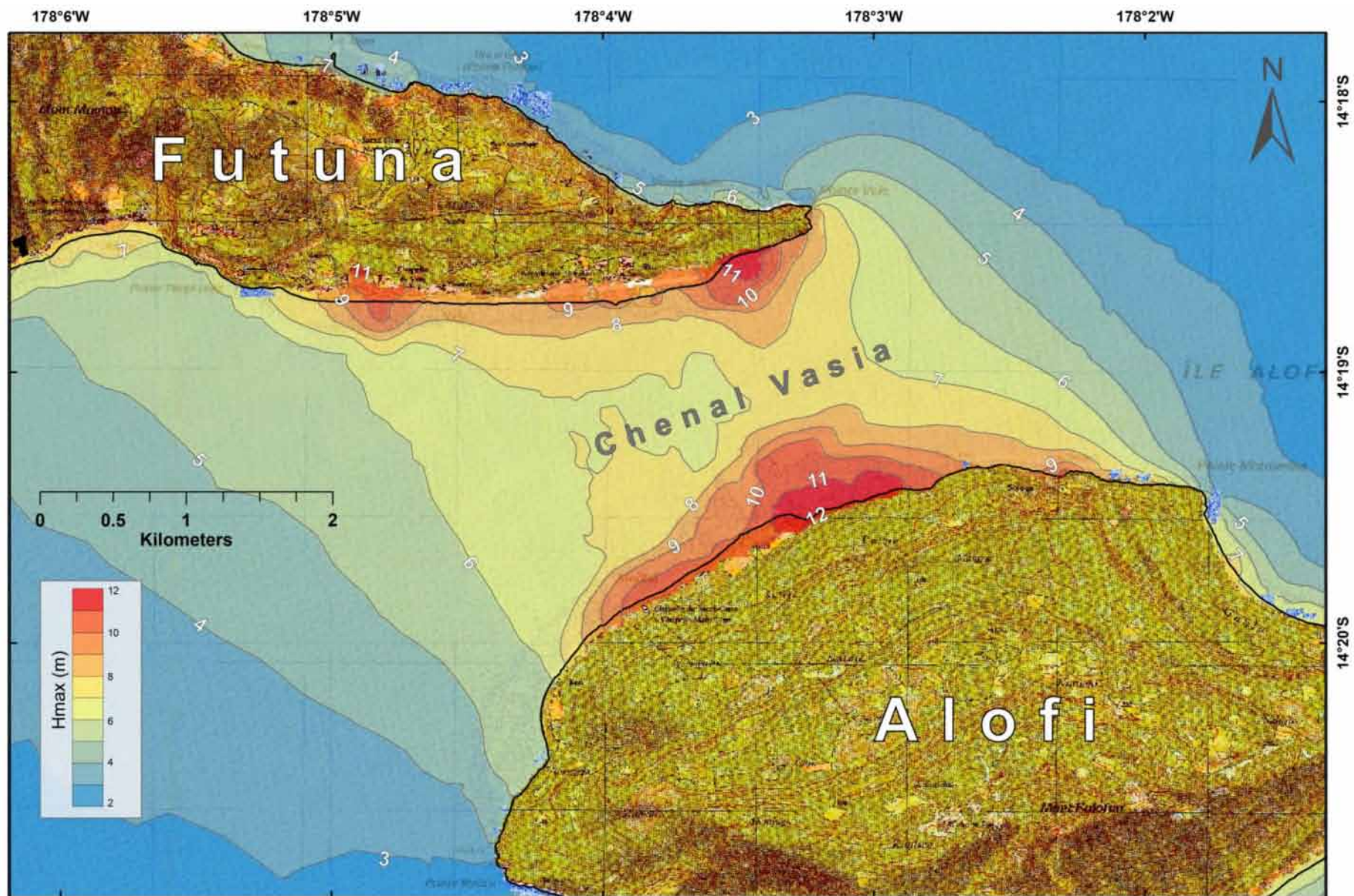


Figure 5-20 – Synthèse des scénarios pour Sud-Est Futuna et NW Alofi

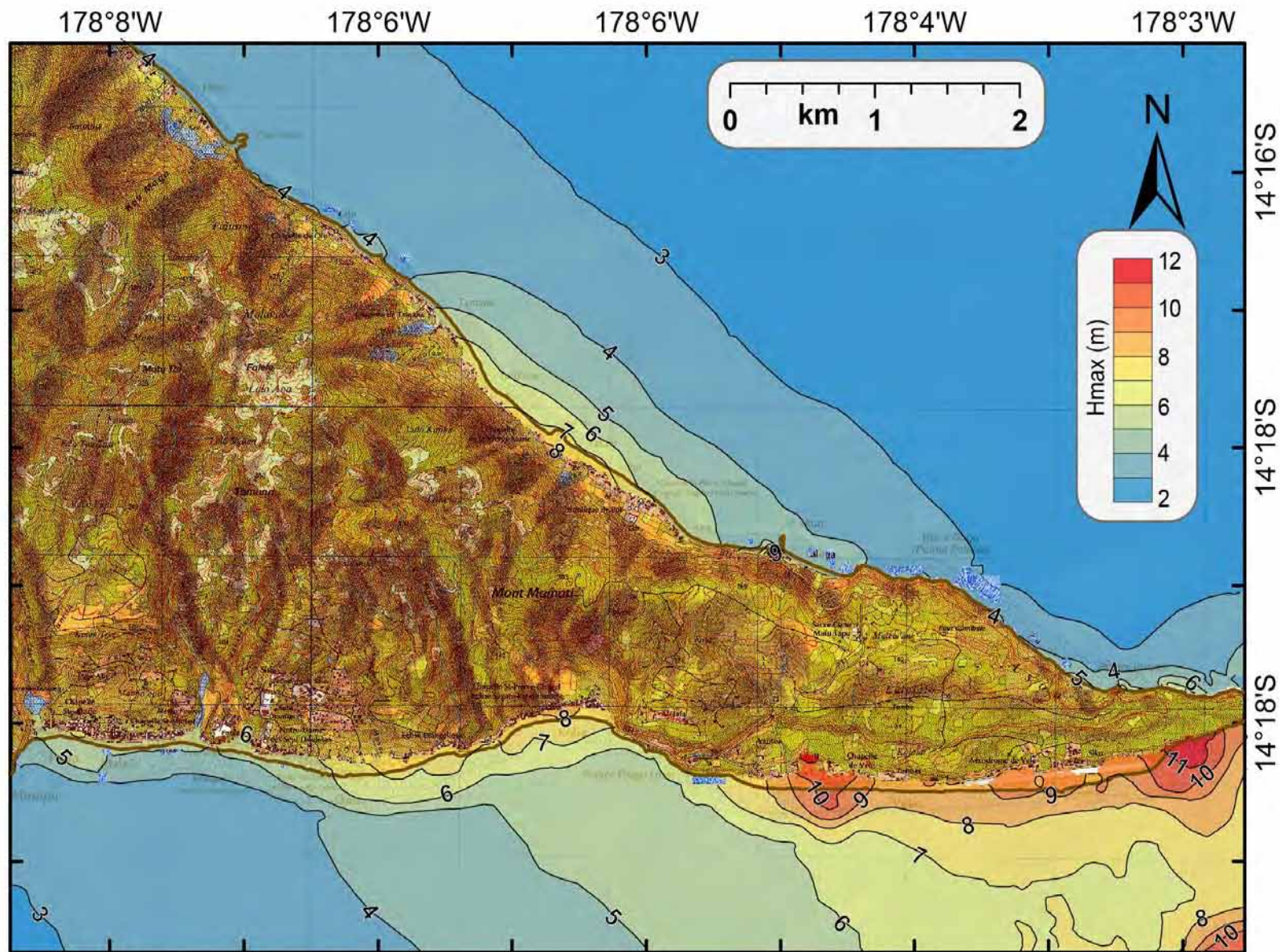


Figure 5-21 – Synthèse des scénarios pour SE Futuna.

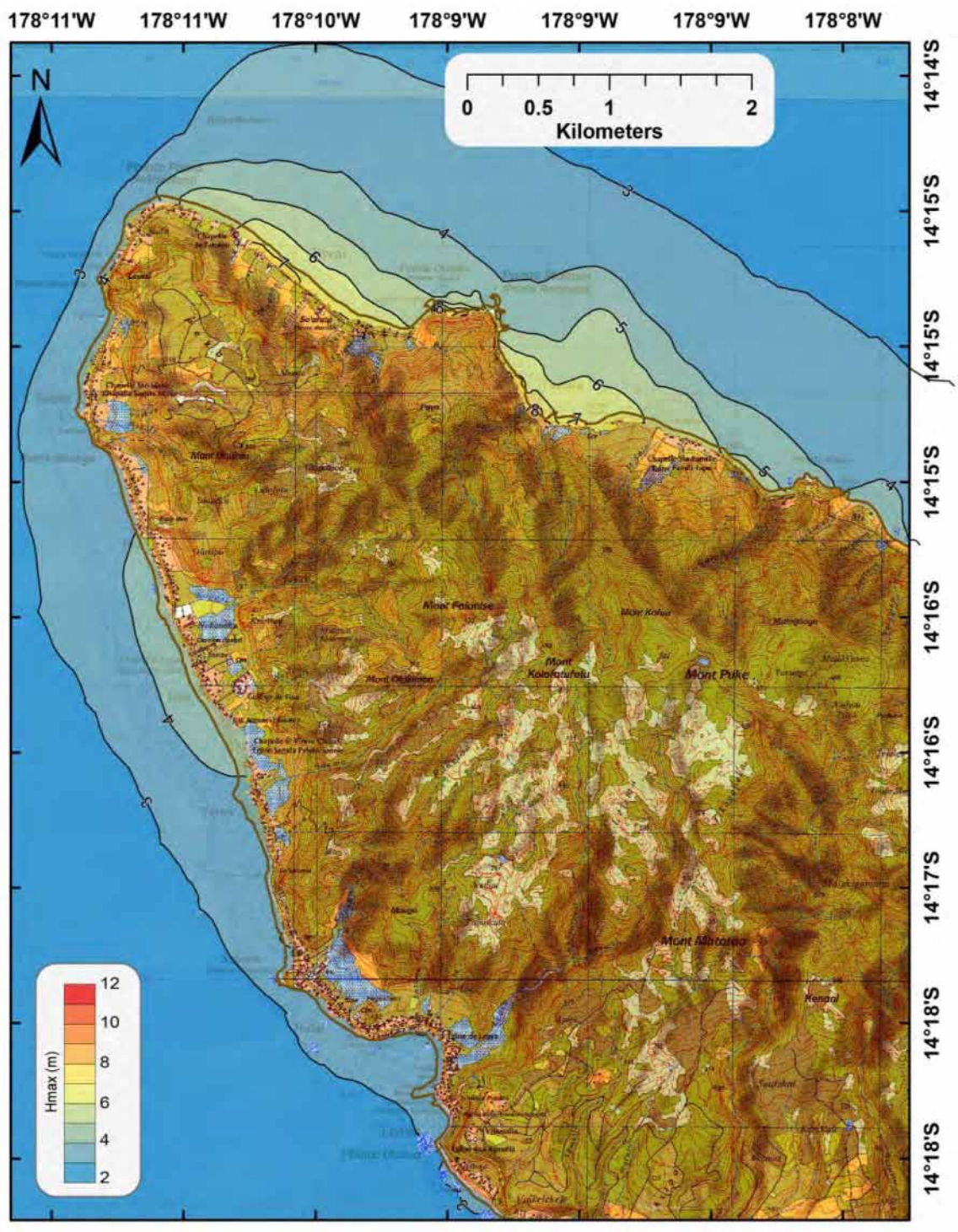


Figure 5-22 – Synthèse des scénarios pour NW Futuna.

6 Recommandations

Recommandation N°1 - Réponse opérationnelle et atténuation des catastrophes

Une grande partie de la population de Wallis et Futuna habite à des altitudes d'à peine quelques mètres au-dessus du niveau de la mer. La mise en place de procédures d'intervention d'urgence, sous la forme de plans de préparation et d'évacuation des populations, permet d'atténuer les répercussions des catastrophes naturelles et procurent ainsi un cadre de référence pour l'élaboration de procédures de ce type à Wallis et Futuna. Les résultats de la présente étude montrent que l'impact potentiel de tsunami sur Wallis et sur Futuna est très important. Par ailleurs, il conviendra à l'avenir de prendre en considération les risques associés aux inondations provoquées par les tsunamis dans les politiques d'aménagement du Territoire. Les estimations de risque tsunamique de Giffon et Dolfo [7, 8] sont, en ce sens, complémentaires notre étude et devrait être utilisées conjointement.

Élaborer des stratégies d'aménagement du Territoire et d'évacuation fondées sur les informations relatives à la hauteur maximale des vagues contenues dans l'ensemble des modèles.

Recommandation N°2 - Éducation des populations

Les populations préparées à des catastrophes naturelles se révèlent beaucoup plus résilientes lorsque de tels phénomènes se produisent. Il est essentiel de communiquer aux habitants de Wallis et Futuna des informations utiles concernant l'aléa tsunami; ces informations doivent être facilement compréhensibles et accessibles au plus grand nombre.

Éduquer les populations en leur procurant des informations pertinentes et claires (cartes et vidéos).

Recommandation N°3 - Analyse du risque

Afin de mieux représenter les tsunamis, il convient d'effectuer une analyse de la probabilité du risque, en tenant compte tout à la fois de la probabilité d'occurrence pour chaque source, de la distribution et de la fragilité des infrastructures clés du territoire et de la répartition de la population. Le même ensemble de données pourrait s'appliquer aux ondes de tempête. Les données rassemblées par Giffon et Dolfo [7, 8] dans leur étude sur le risque forme une bonne base de départ pour cette approche.

Procéder à une analyse probabilistique du risque lié aux inondations consécutives à des tsunamis à Wallis et Futuna.

Recommandation N°4 - L'aléa ondes de tempête

Dans la présente étude, il a été démontré que le territoire de Wallis et Futuna était particulièrement exposé à l'aléa tsunami. Or, les ondes de tempête produisent des effets similaires sur les zones côtières des îles océaniques, et ces phénomènes sont généralement beaucoup plus fréquents que les tsunamis. Une méthode semblable à celle utilisée ici peut être adoptée pour les ondes de tempête, en reprenant le modèle employé et en y intégrant les caractéristiques propres aux ondes de tempête. Une étude de ce type permettrait de compléter les travaux conduits sur l'aléa tsunami et d'améliorer la compréhension par les autorités des inondations catastrophiques provoquées par les aléas marins naturels.

Réaliser une étude sur les ondes de tempête, en adoptant une méthode semblable à celle retenue dans les présents travaux. Le logiciel Gerris serait parfaitement adapté.

Recommandation N°5 - Bathymétrie et topographie côtières

Les présents travaux se fondent sur une série de modèles numériques établis à l'aide des meilleures données topographiques et bathymétriques disponibles. Ce travail présente les tous premiers modèles numériques réalisés aussi bien pour Wallis que pour Futuna, et donne une vue d'ensemble inédite de l'impact des tsunamis dans la région. Il convient toutefois d'interpréter les résultats avec une grande prudence. Nous savons notamment que les données bathymétriques relatives aux zones très proches des côtes (profondeur inférieure à 10m.) demeurent très insuffisantes. De même, la topographie de la frange littorale est mal connue à Futuna, tandis qu'à Wallis, nous avons pu recueillir un certain nombre de données topographiques très détaillées.

Les modèles pourraient être optimisés une fois acquises la bathymétrie complète des zones côtières très peu profondes (profondeur inférieure à 20 mètres) et la topographie précise du littoral de Wallis et de Futuna (par ex. via l'utilisation d'un système Lidar). Les données de bathymétrie et topographie ainsi obtenues devraient être intégrées aux données topographiques au 15^{ème} de l'IGN, qui ne nous ont malheureusement pas été fournies. Les algorithmes et scripts étant prêts, de nouveaux modèles ne devraient pas être trop coûteux en temps de calcul.

Les données bathymétriques relatives à la baie de Léava, fournies par le SHOM, ainsi que des données topographiques très précises devraient en particulier être incluses dans les modèles portant spécifiquement sur la baie.

Les données IGN et SHOM devraient être mises à la disposition de toutes futures études.

Recueillir des données bathymétriques relatives aux zones côtières très peu profondes (profondeur inférieure à 10 mètres) aussi bien à Wallis qu'à Futuna, et des données topographiques sur la frange littorale de Futuna (LIDAR, GPS-RTK), afin de les intégrer dans des modèles représentant de manière plus précise les inondations dues aux tsunamis et aux ondes de tempête.

7 Conclusion

La présente étude de modélisation constitue la première évaluation de l'aléa tsunami à Wallis et Futuna. Nous avons appliqué un modèle solide et vérifié, en nous appuyant sur les meilleures données bathymétriques et topographiques disponibles. Les mécanismes des sources tsunamigènes sont basés sur des études publiées, et considérés comme les cas les plus défavorables. Les cartes établies signalent les zones côtières de Wallis et Futuna exposées aux inondations en cas de tsunami provoqué par un séisme transpacifique, régional ou local. Nous n'avons pas évalué la probabilité de survenue des phénomènes, mais estimons que des scénarios pessimistes de ce type ne se produisent que rarement.

Les résultats indiquent que l'île principale d'Uvéa, à Wallis, est en règle générale protégée des tsunamis, grâce au récif barrière qui l'entoure. Il ressort de la modélisation que des vagues de 2 à 3 mètres de hauteur peuvent s'abattre sur le littoral sud-est peuplé d'Uvéa. Les cartes des inondations correspondantes devraient par conséquent être consultées lors de l'élaboration des politiques d'aménagement du Territoire et des plans de sécurité civile.

À Wallis, c'est sur les îles du récif barrière de la côte sud-est que le risque est le plus grand ; or, ces îles sont fréquemment visitées par des familles et des touristes durant le week-end et les vacances. Il est donc essentiel que la population locale et les voyageurs soient informés de ce risque ; ces îles offrent en effet peu de protection en cas de tsunami.

À Futuna, l'aléa tsunami est important. Pour plusieurs scénarios modélisés, les profondeurs d'inondation dépassent 2 mètres dans des zones peuplées. Étant donné que la majorité des infrastructures et des habitations privées sont très proches du littoral et, dans la plupart des cas, implantées moins de 2 mètres au-dessus du niveau de la mer, les tsunamis auraient des effets désastreux sur les infrastructures et la communauté.

Il est crucial que les résultats de la présente étude soient :

1. pris en considération dans les politiques d'aménagement du Territoire et les plans de réponse opérationnelle aux catastrophes,
2. communiqués à la population de Wallis et Futuna dans un format compréhensible,
3. intégrés aux études de risque actuellement en cours.

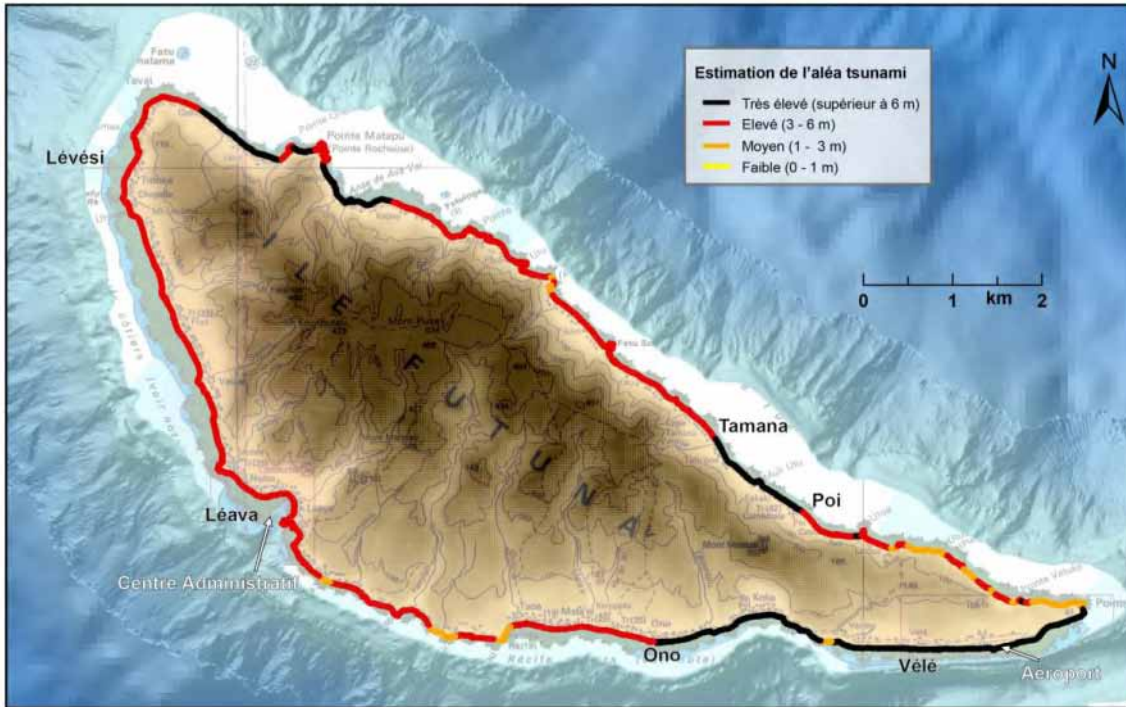


Figure 7-1 - Sévérité de l'impact potentiel de tsunami à Futuna.

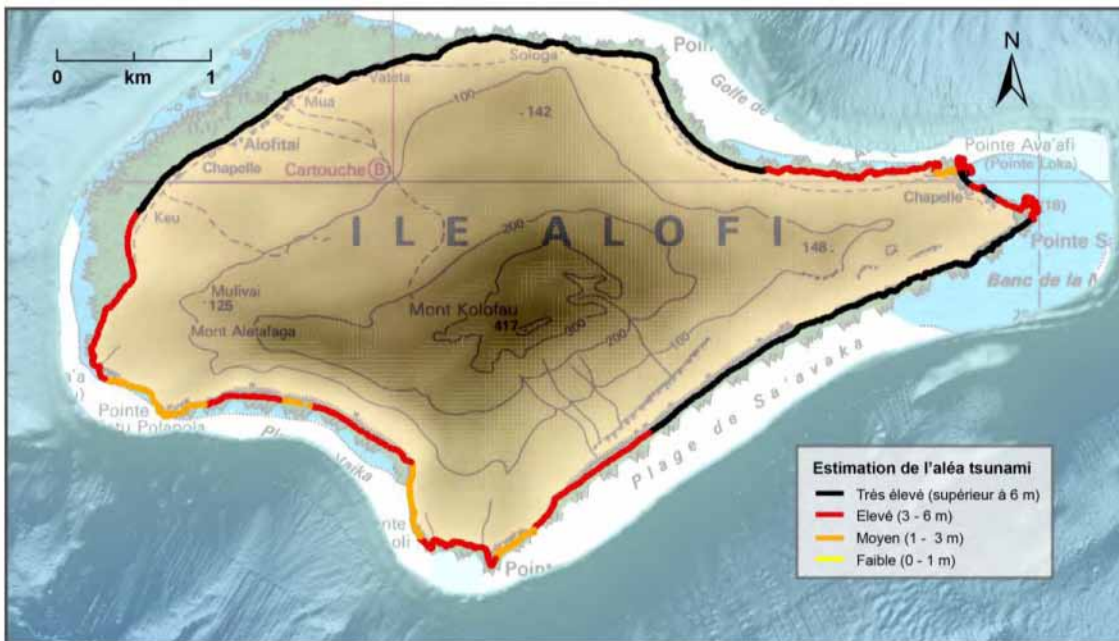


Figure 7-2 - Sévérité de l'impact potentiel de tsunami à Alofi

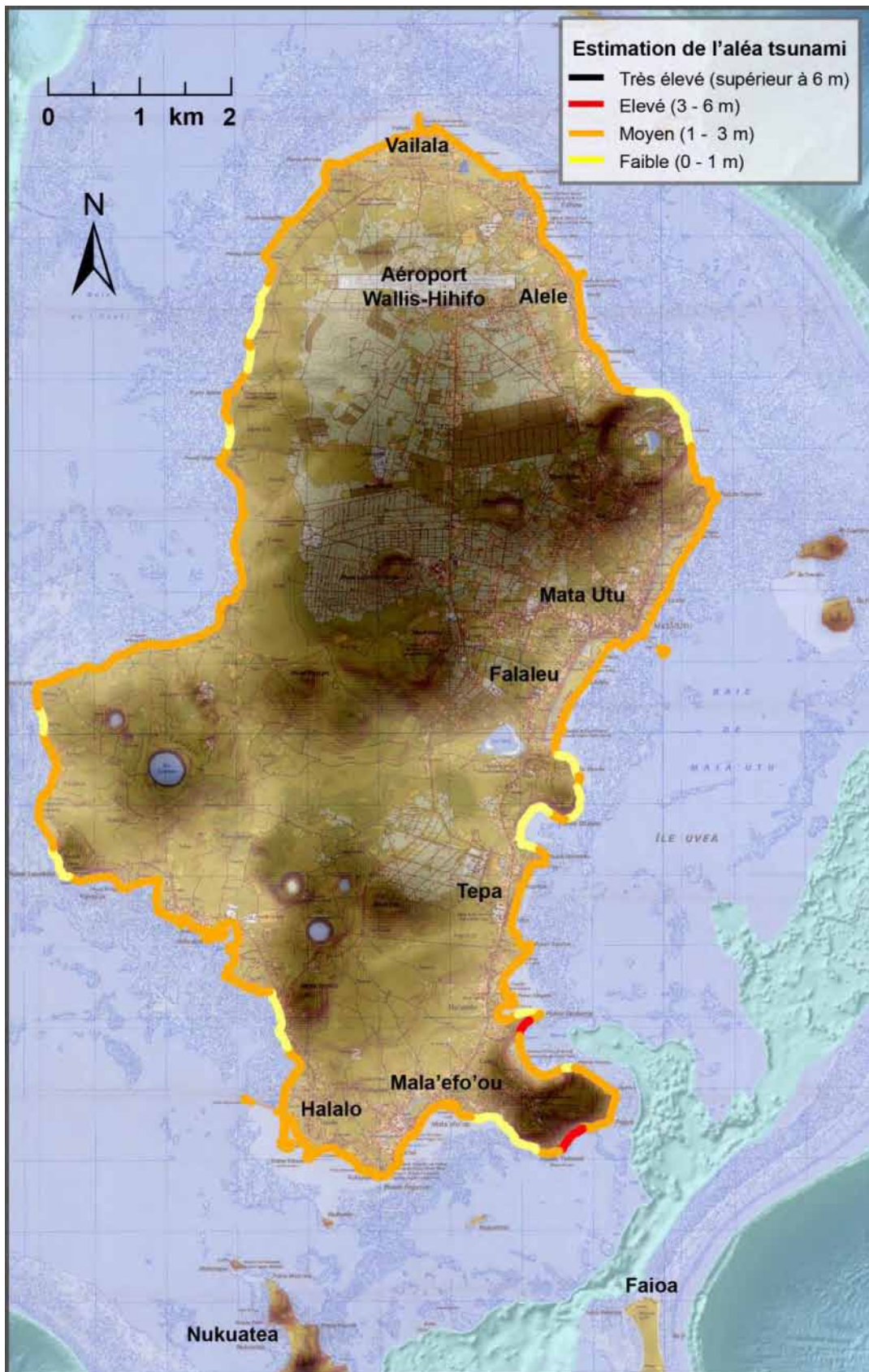


Figure 7-3 - Sévérité de l'impact potentiel de tsunami à Uvée.

8 Remerciements

Cette étude a été réalisée grâce au soutien financier essentiel du Ministère français des Affaires étrangères, par le biais du Fonds Pacifique et du Service de Coopération et d'Action Culturelle de l'Ambassade de France en Nouvelle Zélande. C'est grâce à ce Fonds Pacifique que d'une part, des travaux de recherche sur les paléotsunamis ont pu être engagés à Futuna et à Alofi, et que d'autre part, une enquête a pu être conduite suite au tsunami survenu en 2009 au large de Tonga.

Le succès de ce premier volet fut une incitation pour mener à bien une entreprise similaire à Wallis, toujours grâce à l'appui financier du MAE par le biais du Fonds Pacifique. Ces deux projets ont démontré l'intérêt de la recherche sur les tsunamis à Wallis et Futuna.

Nous avons pu compter sur le soutien sans faille des agents de la Direction de l'environnement de Futuna comme de Wallis. L'aide de Monsieur Enelio Liaufau, en poste à Wallis, nous fut particulièrement précieuse.

De son côté, le Territoire de Wallis et Futuna, a lui aussi soutenu notre projet et servi de relais pour les financements émanant de la Division SOPAC de la CPS.

Nous remercions également les propriétaires terrains de Wallis et de Futuna qui, conscients de l'utilité de nos recherches, nous ont autorisés à creuser des tranchées pour les besoins de l'enquête sur les paléotsunamis.

Les données bathymétriques relatives à Wallis et à Futuna proviennent de missions menées entre 1999 et 2000, ainsi que de la campagne WALFUT conduite en 2011. Elles nous ont été généreusement communiquées par l'IRD aux fins du présent projet et, sans elles, nous n'aurions pu obtenir de résultats d'une telle pertinence et d'une telle qualité lors de la modélisation numérique.

Nos remerciements vont également au service de traduction de la CPS-SOPAC et à la relecture effectuée par Madame Hélène Pont.

9 Glossaire des termes et abréviations¹

Heure estimative d'arrivée	Heure d'arrivée de la première vague d'un tsunami généré par le modèle numérique.
Relais compressif	Un relais compressif est une zone de failles où des morceaux d'écorce terrestre se pressent les uns contre les autres, c'est-à-dire qu'une compression se produit le long du plan de faille. Cette zone fait office de relais entre les failles transformantes (voir définition ci-après).
Chute	Baisse ou descente du niveau de la mer associée à un tsunami.
FP-MAEE	Le Fonds Pacifique du Ministère des Affaires étrangères, géré par le Secrétariat permanent pour le Pacifique et inscrit au budget du Ministère des Affaires étrangères et européennes (MAE), a été créé en 1986. Son objectif est de promouvoir la coopération économique, sociale, scientifique et culturelle dans le Pacifique. Il contribue à l'insertion régionale de la Nouvelle-Calédonie, de la Polynésie et des îles Wallis et Futuna.
Distance maximale d'inondation	Distance horizontale maximale sur laquelle un tsunami pénètre à l'intérieur des terres (mesurée à partir du rivage au niveau moyen de la mer) ; elle est mesurée perpendiculairement au rivage.
COI	Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO. Plus d'informations sur le site http://ioc-unesco.org/ .
Extension Verticale (run-up)	Différence d'altitude entre le point de pénétration maximale du tsunami et le niveau de la mer au moment où le phénomène survient. Dans la pratique, l'extension verticale n'est mesurée que s'il existe des traces délimitant clairement la ligne d'inondation sur le rivage.
IRD	Institut de recherche pour le développement
Profondeur d'inondation maximale	Hauteur maximale atteinte par la mer par rapport au sol à un moment donné durant le phénomène. Il s'agit de la hauteur maximale des vagues moins l'altitude du sol au-dessus du niveau moyen de la mer au point correspondant.
Hauteur maximale des vagues	Hauteur maximale atteinte par la mer par rapport au niveau moyen de la mer à un moment donné durant le phénomène.
Hauteur moyenne	Hauteur moyenne d'un tsunami mesurée de creux à crête, déduction faite de la variation des marées.
Modélisation de la profondeur d'inondation maximale	Estimation de la profondeur d'inondation maximale réalisée à l'aide du logiciel Gerris Flow Solver.
Modélisation de la hauteur maximale des vagues	Estimation de la hauteur maximale des vagues réalisée à l'aide du logiciel Gerris Flow Solver.

¹ Pour un glossaire complet voir: http://itic.ioc-unesco.org/images/docs/tsunami_glossary_fr_small.pdf

Magnitude de moment (M_w)	Mesure de l'énergie libérée lors d'un séisme. Il s'agit de l'échelle standard à présent utilisée pour quantifier un séisme. C'est lors d'un séisme survenu au Chili en 1960 que la plus forte magnitude de moment jamais enregistrée a été constatée ($M_w = 9,5$).
M_w	Voir magnitude de moment.
NIWA	National Institute of Water and Atmospheric Research / Institut néo-zélandais de recherche sur l'eau et l'atmosphère. Il s'agit de l'un des « Crown Research Institute » (CRI) de Nouvelle-Zélande. Plus d'informations sur le site www.niwa.co.nz .
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Administration des États-Unis d'Amérique. Plus d'informations sur le site http://www.noaa.gov/ .
Tsunami transocéanique	Tsunami qui touche un océan entier. Tous les tsunamis transocéaniques sont provoqués par des séismes majeurs. Synonymes : télétsunami et tsunami en champ lointain.
PTOM	Pays et Territoires d'Outre-mer
Paléotsunami	Tsunami supposé s'être produit antérieurement aux archives historiques et pour lequel seules des preuves indirectes existent. Le terme « tsunami préhistorique » est également utilisé.
Période	Durée nécessaire à une vague pour accomplir un cycle complet. La période d'un tsunami est généralement comprise entre cinq minutes et deux heures.
PTWC	Centre d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique de la NOAA. Il s'agit de l'organisation chargée d'assurer le suivi des tsunamis et d'émettre des alertes le cas échéant. Plus d'informations sur le site http://ptwc.weather.gov/ .
Run-up	voir extension verticale
SHOM	Service hydrographique et océanographique national de la Marine
SOPAC	Division géosciences et technologies appliquées du Secrétariat général de la Communauté du Pacifique ; avant tout son Département réduction des risques de catastrophe dans le cadre de la présente étude.
Télétsunami	Synonyme de tsunami transocéanique (voir définition de ce terme).
Faïlle chevauchante	Faïlle inclinée où le bloc supérieur se déplace vers l'avant sur le bloc inférieur. Il s'agit d'un phénomène typique de la tectonique compressive.
Faïlle transformante	Frontière importante entre deux plaques lithosphériques où le déplacement de la plaque tectonique de chaque côté de la faille s'effectue essentiellement à l'horizontale, à savoir que les deux plaques coulissent l'une contre l'autre.
Longueur d'onde	Distance horizontale entre des points similaires de deux vagues successives, mesurée perpendiculairement à la crête.

10 Bibliographie

1. Lamarche, G., Pelletier, B., Goff, J. (2010) Impact of the 29 September 2009 South Pacific Tsunami on Wallis and Futuna. *Mar. Geol.* **271**.
2. Louat, R., et al. (1989) Sismicité superficielle à proximité des îles de Horn (Territoire de Wallis et Futuna-Pacifique Sud): caractéristiques et conséquences [Shallow seismicity near the Horn Islands (Territory of Wallis and Futuna - South Pacific): origins and hazards]. *Comptes Rendus Acad. Sc., 2, Paris.* **308**: 489-494.
3. Pelletier, B. (2003) Apport des travaux de géologie et de géophysique de l'équipe IRD (Ex. ORSTOM) du centre de Nouméa à la compréhension de l'origine et de l'évolution des archipels de Wallis et Futuna. *Revue des Géologues.* **137**: 81-88.
4. Régnier, M. (1994) Sismotectonique de la ride de Horn (îles de Futuna et Alofi), un segment en compression dans la zone de fracture Nord-Fidjienne [Seismotectonics of the Horn ridge (Futuna and Alofi islands), a segment uplifted by compression in the Fiji fracture zone]. *Comptes Rendus Acad. Sc., 2, Paris.* **318**: 1219-1224.
5. Lamarche, G., Pelletier, B., Goff, J. (2009) Historique des tsunamis sur l'Archipel de Futuna : Fréquence, magnitude et impact sur la communauté insulaire. Rapport de Mission 6 - 17 Octobre 2009, projet financé par le Fonds de Coopération Economique, Sociale et Culturelle pour le Pacifique du Ministère des Affaires Etrangères et Européennes [*Historical tsunami in the Futuna Archipelago: Frequency, magnitude and impact on the community. Project funded by the Pacific Funds of the French Ministry of Foreign and European Affairs*], National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA) Ltd: Wellington. p. 15.
6. Mountjoy, J., et al. (2011) Les Grands Tsunamis Historiques et Paléo-Historiques à Uvéea (Wallis et Futuna): Fréquence, Magnitude et Impact sur les Communautés Insulaires. Rapport de mission 29 Aout – 10 Septembre 2011 [*Large Historic and Paleo-Historic Tsunami on Uvéea (Wallis et Futuna) : Origin, Timing and Associated Hazard and Risk. Field trip report 29 August – 10 September 2011*]. Unpublished report to the Fonds de Coopération Economique, Sociale et Culturelle pour le Pacifique, N.200. NIWA, Wellington. 19pp.
7. Giffon, S., Dolfo, B. (2011) L'emploi des SIG et des bases de données IGN dans la prévention du risque tsunamique à Wallis et Futuna (2) : le coût et les moyens de lutte. in *25th International Cartographic Conference*. Paris: CO-105
8. Giffon, S., Dolfo, B. (2011) L'emploi des SIG et des Bases de Données IGN dans la Prévention du Risque Tsunamique à Wallis et Futuna (1) : Les Cartes du Risque Potentiel. in *25th International Cartographic Conference*. Paris: http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2011/.
9. Pelletier, B., et al. (2001) Newly identified segments of the Pacific-Australia plate boundary along the North Fiji transform zone. *Earth Planet. Sci. Lett.* **193**: 347-358.
10. Eguchi, T. (1984) Seismotectonics of the Fiji Plateau and Lau Basin. *Tectonophysics.* **102**: 17-32.
11. Isacks, B.L., Sykes, L.R., Oliver, J. (1969) Focal mechanisms of deep and shallow earthquakes in the Tonga-Kermadec region and the tectonics of island arcs. *Geol. Soc. Am. Bull.* **80**: 1443-1470.
12. Pelletier, B., et al. (2000) Transpression active le long de la frontière décrochante Pacifique-Australie: Les apports de la cartographie multifaisceaux autour des îles Futuna et Alofi (Pacifique sud-ouest) [Active transpression along the fast Pacific-Australian transform boundary revealed by swath mapping around the Futuna-Alofi Islands]. *Comptes Rendus Acad. Sc., 2, Paris.* **331**: 127-132.
13. Pelletier, B., Louat, R. (1989) Mouvements relatifs des plaques dans le Sud-Ouest Pacifique. *Comptes Rendus Acad. Sc., 2, Paris.* **308**: 123-130.
14. Pelletier, B., Louat, R. (1989) Seismotectonics and present-day relative plate motions in the Tonga-Lau and Kermadec-Havre region. *Tectonophysics.* **165**: 237-250.

15. Louat, R., Baldassari, C. (1989) Chronologie des séismes et des tsunamis ressentis dans la région Vanuatu Nouvelle Calédonie (1729-1989) [*Chronology of felt earthquakes and tsunamis in the region Vanuatu New Caledonia (1729-1989)*]. *Sciences de la Terre. Géophysique. Rapports Scientifiques et Techniques*. Nouméa: ORSTOM. 47.
16. Egbert, G.D., Erofeeva, S.Y. (2002) Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, . *J. Atmos. Oceanic Technol.* **19**: 183-204.
17. Christensen, D.H., Beck, S.L. (1994) The rupture process and tectonic implications of the great 1964 Prince-William-Soun earthquake. *PAGEOPH.* **142**: 29-53.
18. Johnson, J.M., Satake, K. (1993) Source parameters of the 1957 Aleutian Earthquake from tsunami waveforms. *Geophys. Res. Lett.* **20**: 1487–1490.
19. Johnson, J.M., et al. (1996) The 1964 Prince William Sound earthquake: Joint inversion of tsunami and geodetic data. *J. Geophys. Res -Solid Earth.* **101**: 523-532.
20. Beck, S.L., Nishenko, S.P. (1990) Variations in the mode of great earthquake rupture along the Central Peru Subduction Zone. *Geophys. Res. Lett.* **17**: 1969-1972.
21. Heinrich, P., et al. (1998) Modeling of the February 1996 Peruvian Tsunami. *Geophys. Res. Lett.* **25**: 2687–2690.
22. Okal, E.A., Borrero, J.C.,Synolakis, C.E. (2006) Evaluation of Tsunami Risk from Regional Earthquakes at Pisco, Peru. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **96**: 1634-1648.
23. Monzier, M., Régnier, M.,Decourt, R. (1993) Rapport sur la crise sismique de mars 1993 à Futuna (TOM des îles Wallis et Futuna), rapport de missions, centre Orstom de Nouméa, 30.
24. Cabioch, G., et al. (1999) Apports de la croissance des coraux à l'étude sismo-tectonique de Futuna (Territoire de Wallis et Futuna, Pacifique Sud-Ouest) [Data provided by coral growth for dcsismotectonic studies in Futuna (French Overseas Territory of Wallis and Futuna, southwest Pacific)]. *Comptes Rendus Acad. Sc., 2, Paris.* **329**: 429-434.
25. Goff, J., et al. (2010) Predecessors to the 2009 South Pacific tsunami in the Wallis and Futuna archipelago. *Earth Sc. Rev.* **107**: 91-106.
26. Intergovernmental Oceanographic Commission (2008) Tsunami Glossary (English), in IOC Technical Series UNESCO: Paris. p. 37.
27. Capecchi, B. (1995) Les Conséquences de l'instabilité tectonique à Wallis et Futuna [consequences of tectonic instability in Wallis and Futuna]. *Cahiers d'Outre-Mer.* **48**: 381-400.
28. Frimigacci, D., et al. (1995) La tortue au dos moussue - Ko le fonu tu'a limulimua. Texte de tradition orale de Futuna. Peeters Press, Paris. .
29. Di Piazza, A., Frimigacci, D. (1991) A thousand years of gardening: a history of subsistence on Futuna. *Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association.* **11**: 124-140.
30. Goff, J., et al. (2009) Identifying Precursors to the 2009 South Pacific tsunami? in *American Geophysical Union Fall Meeting*. San Francisco:
31. Goff, J., et al. (2011) Palaeotsunamis in the Pacific Islands. *Earth Sc. Rev.* **107**: 141-146.
32. Okal, E.A. (1988) Seismic parameters controlling far-field tsunami amplitudes: A review. *Natural Hazards.* **1**: 67-96.
33. Hanks, T.C., Kanamori, H. (1979) A moment magnitude scale. *J. Geophys. Res.* **84**: 2348-2350.
34. Wells, D.L., Coppersmith, K.J. (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **84**: 974-1002.
35. Pelletier, B., et al. (2011) Cartographie des pentes externes des récifs barrière de Wallis et Futuna. Campagne WALFUT du N.O. ALIS (13-19 juin 2011). Unpublished voyage report, IRD: Nouméa, New Caledonia. p. 15.
36. Popinet, S. (2003) Gerris: a tree-based adaptive solver for the incompressible Euler equations in complex geometries. *Journal of Computational Physics.* **190**: 572–600.

37. Delaux, S., et al. (in prep) Adaptive simulation of tsunamis: the case of the 2009 Samoa-Tonga great earthquake.
38. Rabinovich, A.B., et al. (2008) Near-source observations and modeling of the Kuril Islands tsunamis of 15 November 2006 and 13 January 2007. *Advances in Geosciences*. 10.5194/adgeo-14-105-2008.
39. Regnier, M., et al. (2003) The M w 7.5 1999 Ambrym earthquake, Vanuatu: A back arc intraplate thrust event. *Tectonics*. **22**: 1034.
40. Pelletier, B., et al. (2000) Le séisme d'Ambrym-Pentecôte (Vanuatu) du 26 novembre 1999: données préliminaires sur la sismicité, le tsunami et les déplacements associés. *Comptes Rendus Acad. Sc., 2, Paris*. **331**: 21-28.
41. Ioualalen, M., et al. (2006) Numerical modeling of the 26th November 1999 Vanuatu tsunami. *J. Geophys. Res.* **111**: C06030.
42. Pelletier, B., Calmant, S., Pillet, R. (1998) Current tectonics of the Tonga–New Hebrides region. *Earth Planet. Sci. Lett.* **164**: 263-276.
43. Andréfouët, S., Diberg, G. (2006) Cartographie et inventaire du système récifal de Wallis, Futuna et Alofi par imagerie satellitaire Landsat 7 ETM+ et orthophotographiques aériennes à haute résolution spatiale, in Conventions Sciences de la Mer Biologie Marine IRD: Nouméa, New Caledonia. p. 55.
44. Popinet, S. (2012) Adaptive modelling of long-distance wave propagation and fine-scale flooding during the Tohoku tsunami. *Nat. Haz. Earth Syst. Sc.* **12**: 1213-1227.
45. Beavan, J., et al. (2010) Near-simultaneous great earthquakes at Tongan megathrust and outer rise in September 2009. *Nature*. **466**: 959-963.
46. Dominey-Howes, D., Thaman, R., Goff, J. (2009) UNESCO-IOC International Tsunami Survey Team Samoa (ITST Samoa); Interim Report of Field Survey 14th – 21st October 2009. Report presented to the Government of Samoa, Monday 26th October 2009, in Australian Tsunami Research Centre Miscellaneous Report No. 2: University of New South Wales: Sydney 2052, NSW, Australia.
47. Herman, F., et al. (2009) (International Tsunami Survey Team) Preliminary Runup data for September 29, 2009 tsunami in American Samoa. ID 5403. 2009; Available from:
http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?EQ_0=16720&t=101650&s=10&d=99,185,186,76,78&nd=display (December 2009).
48. Koshimura, S., et al. (2009) (International Tsunami Survey Team) Preliminary Runup data for September 29, 2009 tsunami in American Samoa. ID 5404. 2009; Available from:
http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?EQ_0=16720&t=101650&s=10&d=99,185,186,76,78&nd=display (December 2009).
49. Okal, E.A., et al. (2010) Field Survey of the Samoa Tsunami of 29 September 2009. *Seismological Res. Lett.* **81**: 577-591.

11 Sites Web

<http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/> : Natural Hazards Data, Images and Education, National Geophysical Centre, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_travel_time.shtml : provide

<http://www.ioc-tsunami.org/> également en français <http://www.ioc-tsunami.org/index.php?lang=fr>

<http://itic.ioc-unesco.org/index.php>

http://itic.ioc-unesco.org/index.php?option=com_content&view=article&id=1328&Itemid=1142&lang=en : Vous trouverez sur ce site diverses publications relatives aux tsunamis, notamment des glossaires en français.

http://itic.ioc-unesco.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=2000&Itemid=2000&lang=en : diverses informations sur les tsunamis (en anglais)

<http://tsunami.noaa.gov/>

<http://ptwc.weather.gov/?region=1> - Site Internet du Centre d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique. Il s'agit du site le plus important pour se tenir informé des alertes aux tsunamis dans la région (avec flux RSS).

Annexe A – L'équipe du projet

Geoffroy Lamarche est titulaire d'une thèse de l'Université de Grenoble obtenue en 1987. Après 25 années d'expérience dans la recherche en géologie marine et géophysique, il est actuellement directeur de recherche au NIWA, à Wellington où il est responsable du programme national de recherche sur les ressources marines. Ses travaux sont axés sur la déformation géologique active de la plateforme continentale et le plancher océanique autour de la Nouvelle-Zélande et dans le Pacifique sud-ouest, ainsi que sur les ressources associées. Ses travaux de recherche fondamentale de recherche appliquée et de conseil concernent la déformation tectonique, l'aléa géologique, la caractérisation des substrats marins et la cartographie des habitats. Il est responsable du projet sur les paléotsunamis à Futuna financé par le Fonds Pacifique. Il a publié plus de 40 articles dans des revues internationales. Geoffroy est à la fois le responsable et le coordonnateur de la présente étude.

Joshu Mountjoy travaille dans le domaine de la géologie marine et de la géophysique au NIWA, à Wellington. Ses travaux portent sur la tectonique, sur les processus sédimentaires et d'instabilité, ainsi que sur l'aléa et les risques géologiques sous-marins, notamment les tsunamis et les sources sismiques. Il est le responsable du projet d'inventaire des paléotsunamis à Wallis financé par le Fonds Pacifique. Préalablement, Joshu assurait des services de génie-conseil, et il dispose d'une vaste expérience pratique à terre et en mer. Il a contribué à dix publications internationales et à de nombreuses conférences.

Stéphane Popinet est chercheur au NIWA, à Wellington. Les mathématiques appliquées constituent son principal domaine d'expertise, notamment les méthodes numériques relatives à la dynamique des fluides. Stéphane est le créateur du logiciel libre Gerris Flow Solver. Gerris est utilisé par un nombre important et croissant de personnes dans le monde entier, pour des applications allant de l'étude de l'écoulement turbulent polyphasique dans les moteur-fusée à la modélisation des tsunamis à l'échelon mondial. Ses travaux de recherche ont débouché sur la publication de plus de 20 articles dans des revues internationales. Stéphane est titulaire d'une thèse obtenue à l'Université de Paris (2000).

Bernard Pelletier est géologue marin et terrestre en néotectonique à l'UMR Géosciences Azur (IRD). Il étudie depuis plus de 25 ans la géologie et la tectonique active dans le Pacifique Sud-Ouest. Bernard est responsable du laboratoire de géologie-géophysique à l'IRD de Nouméa depuis 1993. Il dirige depuis 2000 une étude sur les processus tectoniques dans les zones côtières de la Nouvelle-Calédonie, de Vanuatu et de Futuna, et, depuis 2003, une étude sur les aléas naturels tsunamis. Il est titulaire d'une thèse de l'Université de Brest (1985) et d'une HDR de l'Université de Paris VI (1999). Il a publié plus de 70 articles dans des revues internationales. Bernard a assumé le rôle de responsable des équipes de recherche lors des campagnes océanographiques en 1999, 2000 et 2011, dans le secteur de Wallis et Futuna, et il est le coresponsable des projets du Fonds Pacifique sur les paléotsunamis de Futuna et de Wallis.

Jochen Bind appartient au groupe en charge des processus sédimentaires et côtiers du NIWA, à Christchurch. Ses recherches portent notamment sur la modélisation numérique de la submersion des zones côtières et des inondations, l'analyse SIG, les levés topographiques et la télédétection. Il a réalisé de nombreux levés topographiques à l'aide d'un GPS cinématique en temps réel extrêmement précis. Avant de rejoindre le NIWA, Jochen a travaillé à l'Observatoire volcanologique de l'USGS, à Hawaii et du Centre de recherche en géosciences de Potsdam en Allemagne. Il a également occupé un poste d'analyste-programmeur pour une société d'exploitation de satellites.

Annexe B : Obtention des données relatives à l'altitude du littoral et à la bathymétrie du lagon à Wallis

Procédure d'étalonnage des levés GPS

À Wallis, la plupart des repères géodésiques sont donnés par rapport à l'ellipsoïde GRS1980 ; leur cote ou altitude orthométrique (c'est-à-dire relativement au niveau de la mer) n'est pas connue. Leur altitude ellipsoïdale précise est connue ; elle correspond à la hauteur par rapport à un ellipsoïde de référence mathématique. Pour les besoins du projet, ce sont les altitudes par rapport au niveau de la mer qui étaient requises, et toutes les données de levés ont donc dû être converties en altitudes orthométriques. Étant donné que seuls quelques repères de référence étaient dotés de cotes orthométriques précises, chaque mesure a été effectuée en utilisant comme étalon deux ou trois repères géodésiques, en s'appuyant sur l'altitude ellipsoïdale de ceux-ci.

Afin qu'un modèle numérique de Terrain (MNT) basé sur des cotes orthométriques puisse être élaboré, les données recueillies sur le terrain (altitudes ellipsoïdales) devaient être converties en altitudes orthométriques. En règle générale, cette conversion s'effectue en créant une surface de compensation pour la zone d'étude et en déduisant cette compensation de l'altitude ellipsoïdale des points de levé. Malheureusement, sur l'île de Wallis, les cotes orthométriques ne sont connues que pour cinq repères géodésiques. Les cinq repères en question ont été utilisés conjointement avec un repère supplémentaire, afin de générer une surface de compensation ellipsoïdale pour l'île (voir Figure B1). Ce repère supplémentaire (Nukutapu) présente une cote orthométrique moins précise, mais a néanmoins été intégré dans l'ensemble de données afin d'élargir le modèle de compensation vers le sud et de prendre en compte les données de levé recueillies au sud d'Halalo. Seule autre modification apportée aux données de base des repères géodésiques, la station B de Mata-Utu a été déplacée d'à peu près 1 km vers l'est, de manière à ce que le modèle de compensation couvre aussi la route de la plage au nord de Mata-Utu.

La surface de compensation a été interpolée d'après la différence entre l'altitude orthométrique et l'altitude ellipsoïdale à chaque repère géodésique, à l'aide de la méthode de krigeage avec semivariogramme exponentiel, jusqu'à disposer d'une matrice de 30 mètres (Figure B2). À partir de la surface obtenue, les cotes orthométriques ont alors été calculées pour chacun des points de levé, en appliquant la compensation aux altitudes ellipsoïdales.



Figure B1 – Repères géodésiques avec leurs altitudes orthométriques

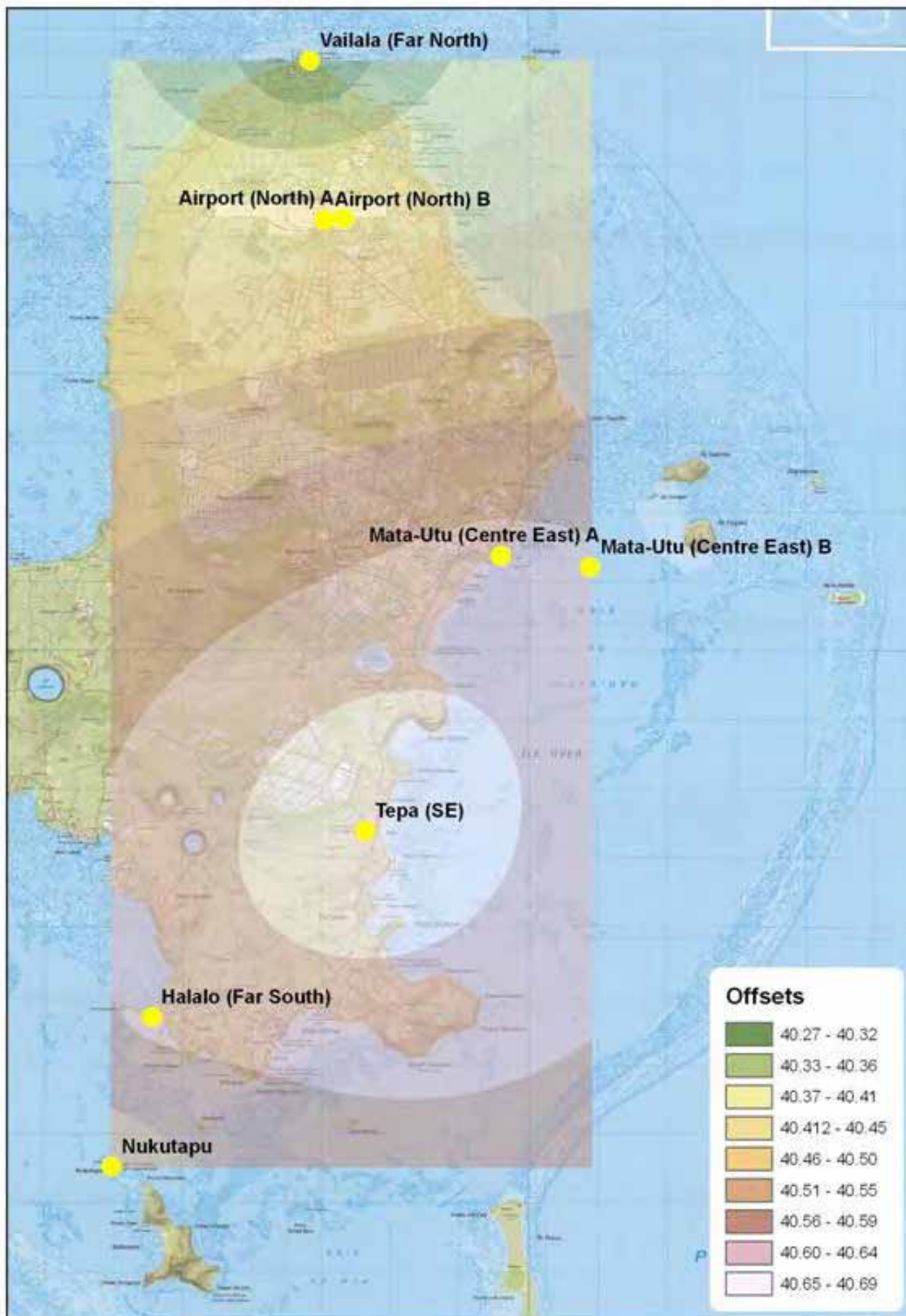


Figure B2 – Surface de compensation ellipsoïdale (krigeage avec semivariogramme exponentiel)

Extraction de la bathymétrie du lagon

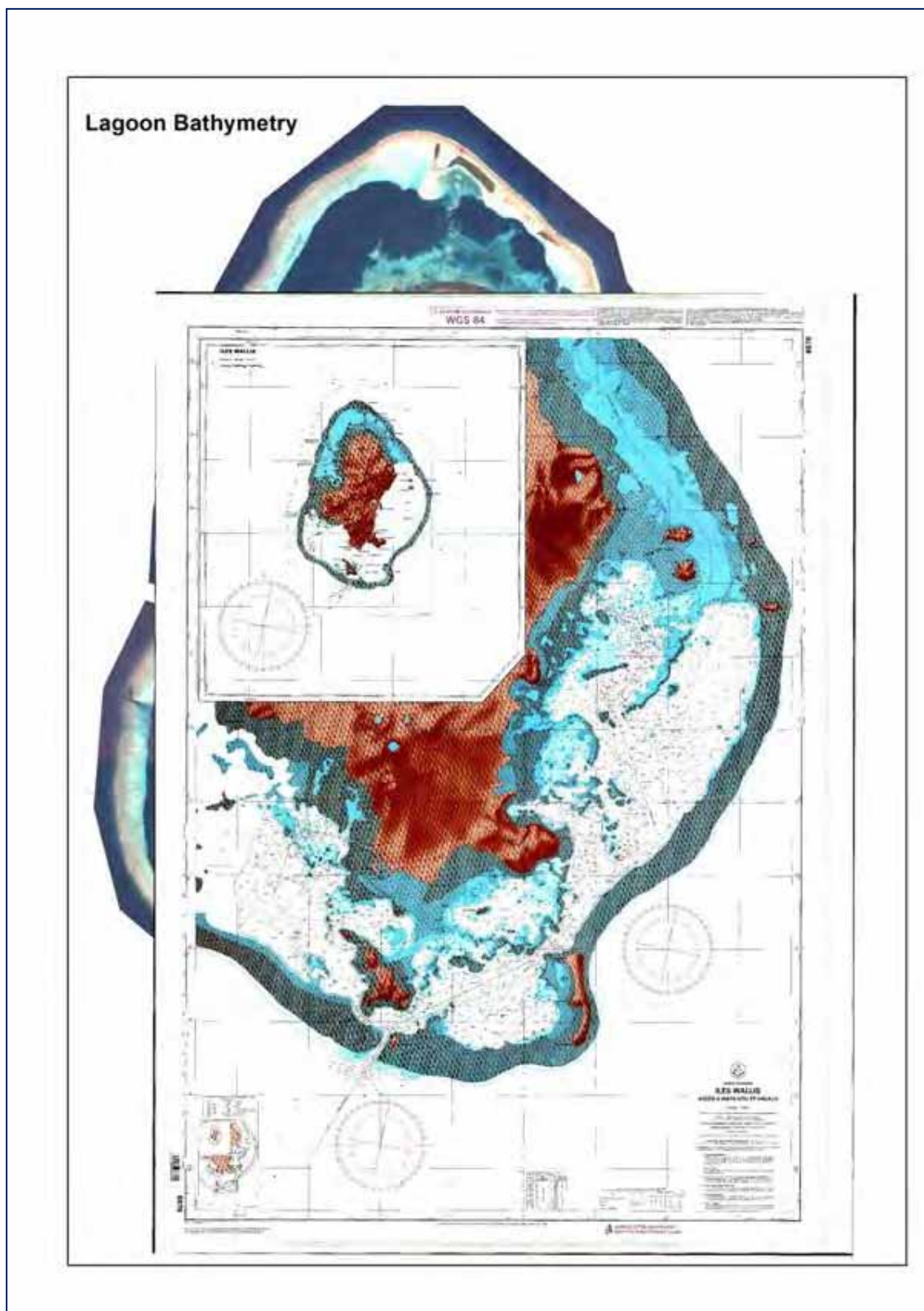


Figure B3 – Carte des profondeurs disponible pour l'île de Wallis

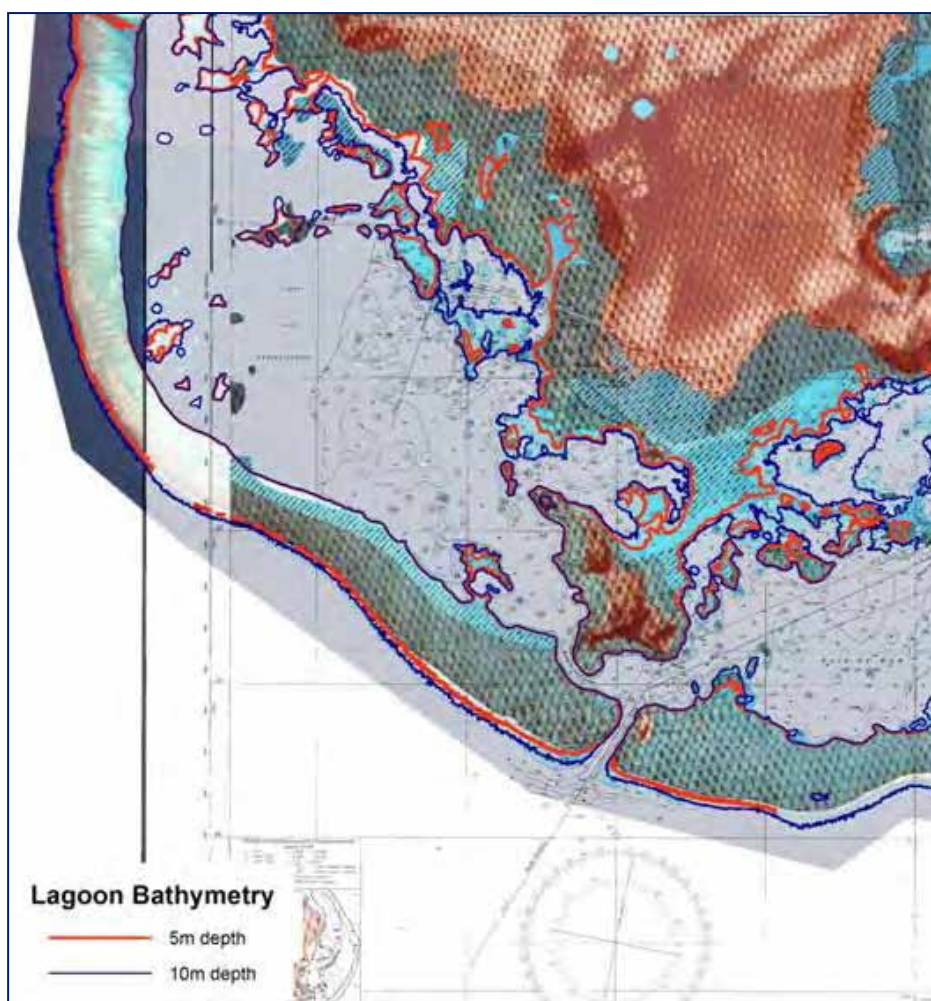


Figure B4 – Ajustement entre les profondeurs cartographiées et les profondeurs obtenues par télédétection

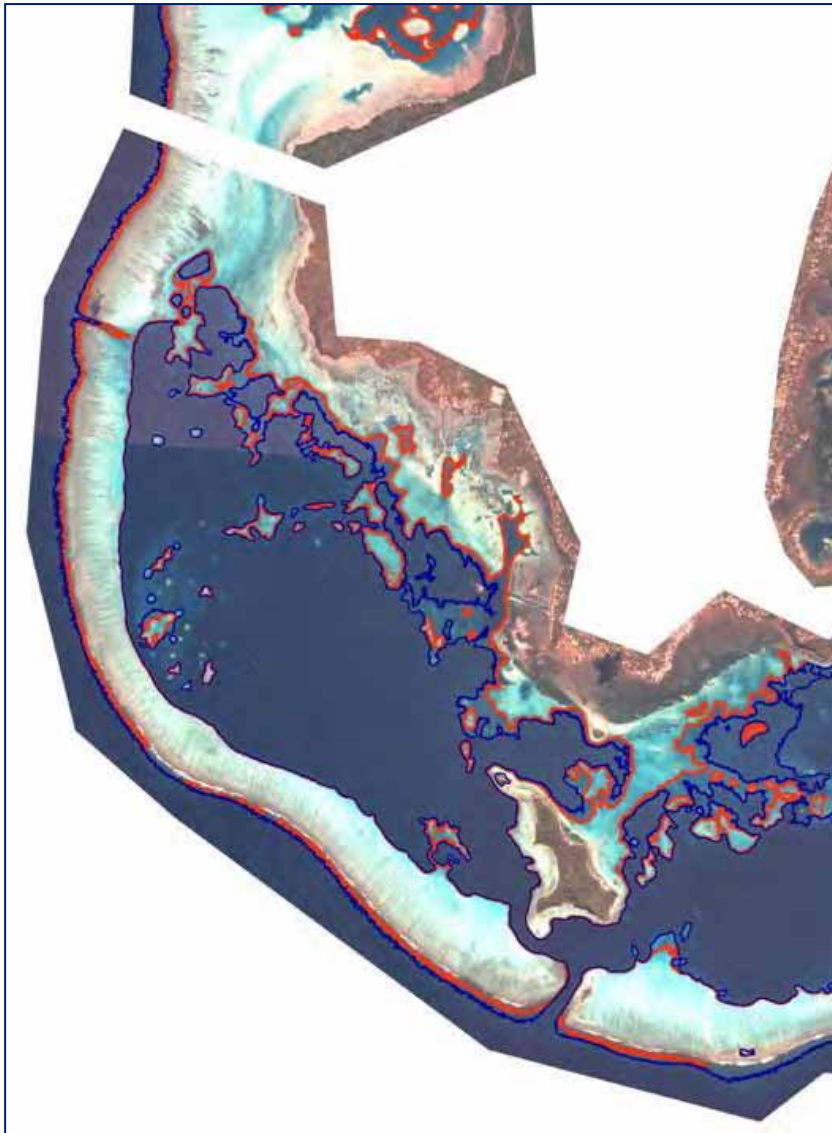


Figure B5 – Courbes de profondeur obtenues par télédétection le long du littoral sud-ouest de l’île de Wallis

Annexe C - Données et méthode

En cas de séisme, c'est essentiellement le déplacement du plancher océanique, provoqué par la rupture de la faille, qui entraîne la formation d'un tsunami. La propagation d'un tsunami est déterminée par la topographie des fonds marins et par la profondeur d'eau sur la trajectoire du tsunami, tandis que les inondations dépendent de la bathymétrie côtière, de la topographie du littoral et des modifications anthropiques. Les principaux paramètres physiques des sources sismiques influent sur l'amplitude d'un tsunami à des distances transocéaniques, notamment la profondeur du foyer et le glissement total. En règle générale, l'amplitude finale à l'arrivée sur la rive est fortement tributaire des effets de focalisation et de défocalisation, dus aux variations bathymétriques sur la trajectoire du tsunami. La présente étude a confirmé que c'est le moment sismique qui constitue le paramètre le plus important dans la formation d'un tsunami consécutif à un séisme. L'excitation d'un tsunami croît de manière directement proportionnelle à la magnitude de moment du séisme qui l'a provoqué [32].

Les résultats de la modélisation numérique de tsunamis dépendent fortement de la qualité de la paramétrisation des sources sismiques, des données topographiques (bathymétriques) relatives au plancher océanique, et des données topographiques terrestres correspondant aux zones d'inondation.

Paramétrisation des failles sismiques

Nous avons déterminé les paramètres sismiques en nous fondant sur les informations contenues dans des publications scientifiques et sur des relations empiriques universellement acceptées, de manière à déduire la magnitude de moment d'un séisme à partir des paramètres des failles géologiques. Nous avons utilisé les relations empiriques les plus communément acceptées entre les paramètres physiques des failles sismiques (longueur, largeur, profondeur, pendage, etc.) et la magnitude de moment [22, 33, 34].

Les paramètres physiques des failles sismiques ont été établis à partir d'informations disponibles dans la littérature scientifique internationale, ainsi que de nos connaissances concernant la tectonique et la géodynamique du Pacifique. Par ailleurs, les données bathymétriques multifaisceaux recueillies lors des campagnes océanographiques ALAUF1 en mars 2000 [9, 12] et WALFUT en 2011 [35] ont permis de déterminer les zones sources de séismes locaux dans la région de Futuna.

Nous avons systématiquement choisi de retenir les paramètres susceptibles de provoquer les plus importants séismes plausibles dans la région d'après les données disponibles. Dans la plupart des cas, ces séismes ne se sont encore jamais produits, mais constituent des scénarios « pessimistes » (ou « les plus défavorables »).

Paramètres générés par les modèles numériques

Les paramètres physiques de tsunamis sont extraits des modèles afin de caractériser l'ampleur des inondations provoquées. Ce rapport s'appuie sur les paramètres clés suivants :

1. Hauteur maximale théorique de vague générée par le modèle. Il s'agit de l'altitude maximale atteinte à terre par les vagues par rapport au niveau moyen de la mer, à l'intérieur du maillage du modèle correspondant au lieu concerné.
2. Profondeur d'inondation maximale théorique générée par le modèle. Il s'agit de la hauteur maximale atteinte par l'inondation causée par le tsunami par rapport au niveau moyen de la mer, au-dessus de la surface terrestre.
3. Distance maximale d'inondation théorique générée par le modèle. Il s'agit de la distance sur laquelle l'eau pénètre à l'intérieur des terres. Elle est mesurée de façon linéaire à partir du rivage.
4. Heure estimative d'arrivée à Wallis et à Futuna. Heure d'arrivée du tsunami généré par le modèle. L'heure estimative d'arrivée peut-être calculée avec grande précision si l'on connaît la bathymétrie et la source.

Un glossaire des termes et des abréviations utilisés figure à la fin du présent rapport.

Données topographiques et bathymétriques

Alors que, pour les milieux océaniques profonds, une topographie régionale du plancher océanique est suffisante, pour ce qui est des zones côtières, la plus grande précision est requise. Une attention particulière a été portée et un temps considérable consacré à l'élaboration d'un modèle numérique de terrain (MNT) intégré pour la bathymétrie-topographie à Wallis. Le MNT final inclut les données bathymétriques et topographiques existantes et mises à notre disposition ainsi que les données spécialement produites dans le cadre du projet.

La bathymétrie du bassin du Pacifique, requise pour les modèles transpacifiques, correspond essentiellement à la base de données publiques de la GEBCO. Aux alentours des îles, nous avons utilisé les données bathymétriques multifaisceaux recueillies par l'IRD dans la région de Futuna (campagne ALAUF1, mars 2001 ; [9, 12]) et de Wallis et Futuna (campagne WALFUT, juin 2011 ; [35]). Ces deux jeux de données ne relèvent pas du domaine public et ont été communiqués par l'IRD aux fins de la présente étude.

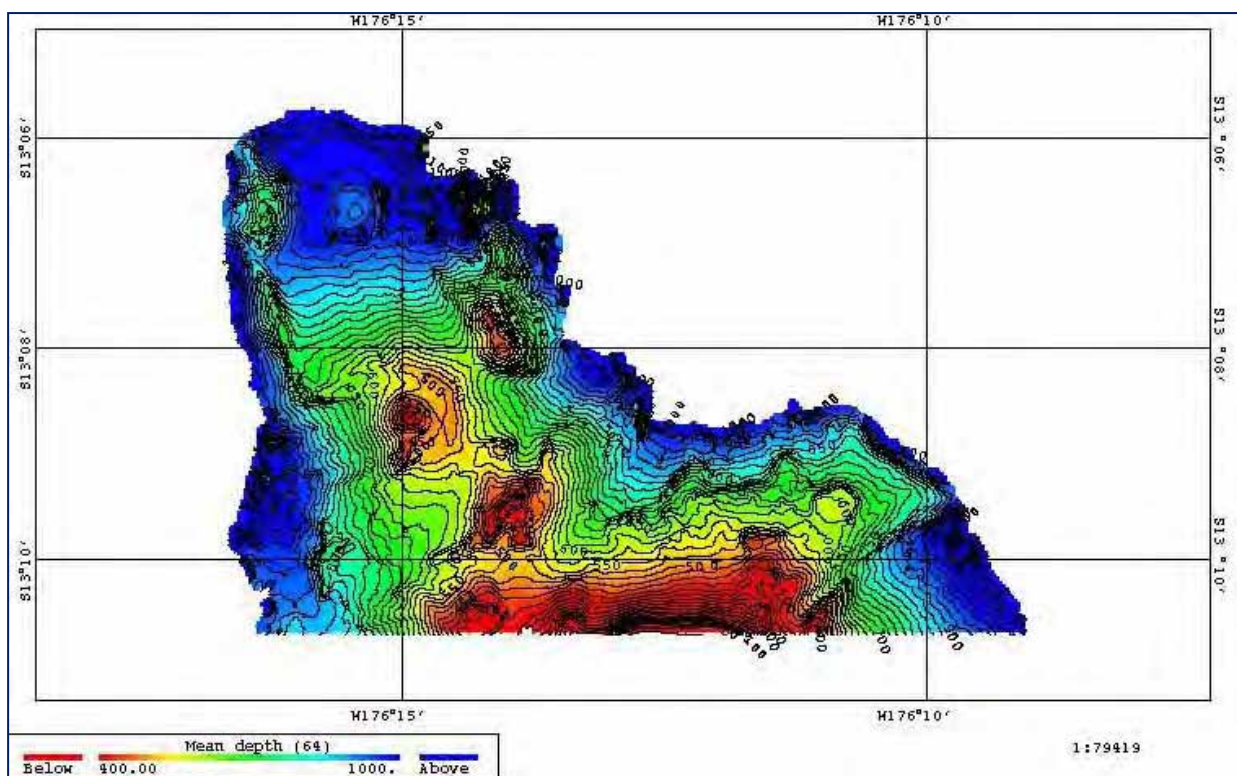


Figure C6 – Exemple de bathymétrie détaillée dans la partie nord de Wallis, campagne WALFUT (septembre 2011, avec l’aimable autorisation de l’IRD ; [35])

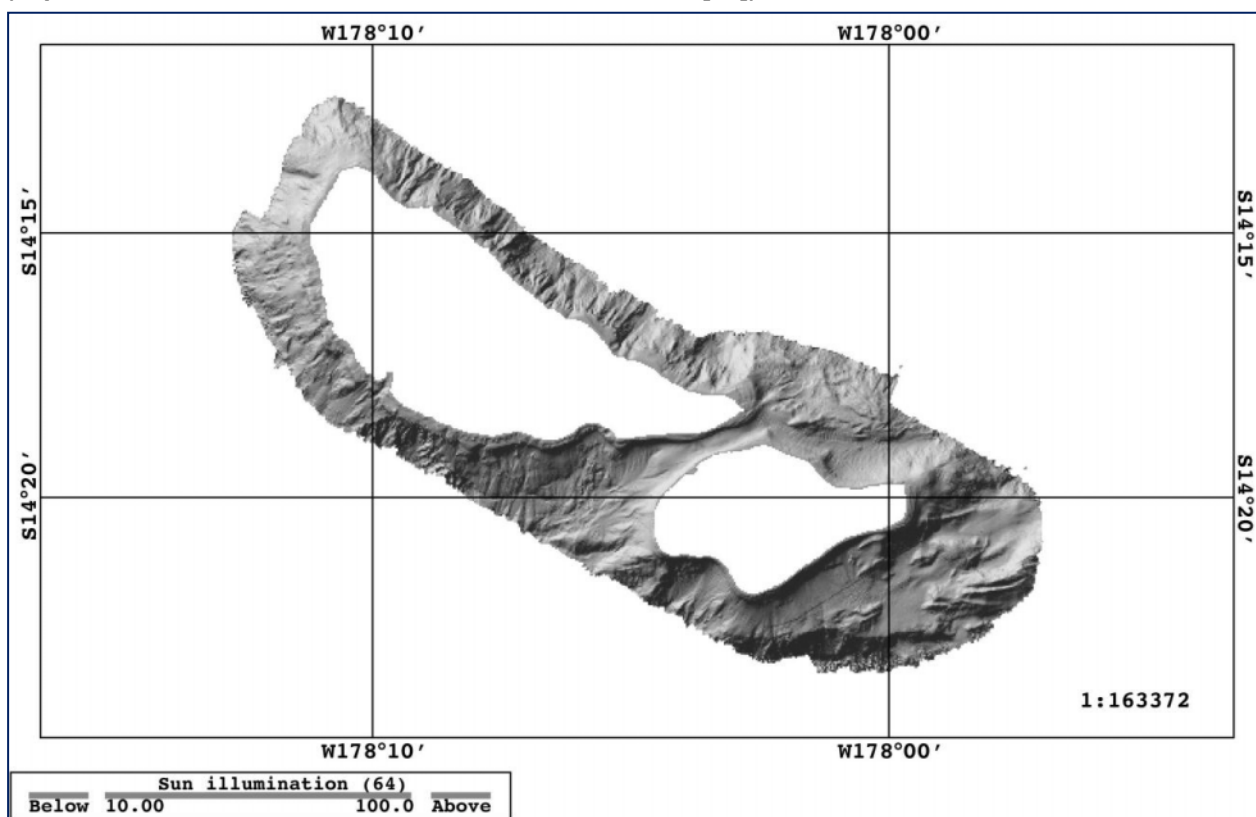


Figure C7 – Bathymétrie multifaisceaux (image ombrée) de Futuna et d’Alofi, campagne WALFUT (septembre 2011, avec l’aimable autorisation de l’IRD ; [35]).

À terre, nous avons utilisé des données topographiques à l'échelle 1/25 000, sous la forme de courbes de niveau de 5 mètres, extraites des cartes topographiques 4901 (Wallis) et 4902 (Futuna) établies par l'IGN.

À proximité du littoral, lorsque cela était possible, nous avons utilisé les cartes bathymétriques du SHOM, aussi bien pour Wallis que pour Futuna.

Pour ce qui est d'Uvéa, des travaux spécifiques ont été conduits, afin d'obtenir un MNT intégré allant des eaux de profondeur moyenne (-150 mètres) jusqu'à la région côtière (+15 mètres), lagon compris (voir la procédure adoptée, détaillée dans la section suivante et en annexe B).

Topographie du littoral à Wallis

Pour l'île de Wallis, les mesures relatives à l'altitude des terres ont été réalisées à l'aide d'un GPS cinématique en temps réel (GPS-RTK) sur une période de quatre jours, en septembre 2011. Le matériel utilisé consistait en une station de base (GPS fixe) et une unité mobile montée sur le toit d'une voiture. La position de la station de base a été calibrée au moyen de repères géodésiques existants situés à différents endroits de l'île (procédure d'étalonnage détaillée à l'annexe B). Les positions corrigées ont été calculées à la base et transmises par signal radio au GPS mobile, ce qui a permis de mesurer les points avec une précision supérieure à 5 cm horizontalement et verticalement. Au total, près de 10 000 points ont été relevés le long des routes des côtes nord, est et sud-est de l'île. Aucune mesure GPS n'a été réalisée sur le littoral occidental, en raison de l'absence conjuguée de routes à proximité du rivage et de repères géodésiques.



Figure C8 – Unité mobile pour les levés GPS-RTK sur le littoral de Wallis, en septembre 2011, à Wallis (photo Jo Bind, NIWA)

L'objectif était de recueillir des informations topographiques jusqu'à 15 mètres au-dessus du niveau de la mer, afin de permettre une modélisation précise des tsunamis. Par manque de

temps, les mesures GPS ont été limitées aux routes et aux zones relativement faciles d'accès.

Afin d'établir un Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour le littoral, les courbes de niveau à zéro et 15 mètres ont été numérisées à partir de la carte topographique à l'échelle 1/200 000 et associées aux données GPS-RTK. L'interpolation a été réalisée à l'aide de l'outil « Topo vers raster » du système ArcGIS, afin d'élaborer un MNT hydrologiquement correct, tenant compte des cours d'eau et des crêtes.

Bathymétrie du lagon à Wallis

Il est indispensable de disposer d'informations bathymétriques détaillées pour établir des modèles de tsunamis pertinents. Or, il existe très peu de données de ce type pour le lagon qui entoure l'île de Wallis. Une seule carte couvre de manière suffisamment précise les côtes sud et sud-est, mais pour la majeure partie du lagon qui entoure l'île, aucune information détaillée n'est disponible. Étant donné que l'obtention de données bathymétriques relatives à l'ensemble de l'île par le biais de mesures sur le terrain représentait une solution coûteuse et compliquée à mettre en œuvre, nous avons opté pour la télédétection afin d'estimer la profondeur du lagon. À cet effet, des données-images prises par le satellite Quickbird ont été utilisées pour estimer la profondeur en fonction de la couleur de l'eau. Nous avons dû nous appuyer sur des images émises à deux dates différentes (13 novembre 2004 et 2 juin 2006) afin de couvrir l'intégralité du lagon. Étant donné que, pour la majeure partie du littoral est, les données de profondeur ont pu être numérisées à partir de la carte existante, nous n'avons utilisé que des images du 13 novembre 2004 pour traiter les zones manquantes. Le satellite Quickbird capture des images dans quatre bandes spectrales : rouge, vert, bleu et proche infrarouge. Des tests, relatifs aux rapports entre les différentes bandes, ont été réalisés, afin d'obtenir la meilleure correspondance avec les contours bathymétriques de la zone cartographiée du lagon.

Dans un premier temps, les canal bleu et le canal vert sont normalisés à l'aide du canal rouge en calculant les rapports [bleu/rouge] et [vert/rouge]. Cette approche nous a permis d'obtenir les meilleures correspondances entre les données-images du 13 novembre 2004 et les profondeurs cartographiées. Nous avons ensuite réparti les résultats en 255 catégories, et déterminé les « catégories seuils » correspondant le mieux aux profondeurs cartographiées à 5 et 10 mètres (respectivement catégories 170 et 185). Des cartes présentant l'extraction des données bathymétriques du lagon figurent à l'annexe B. Les courbes de profondeur ont alors été interpolées à partir de l'image tenant compte de la classification.

Il n'a pas été possible d'employer cette méthode pour des profondeurs supérieures à 10 mètres. Dans la partie nord-ouest du lagon de Wallis, où aucune donnée n'était disponible (aucune carte du SHOM), nous avons utilisé des données émanant de travaux de cartographie (voir [43]). En nous servant du littoral comme d'une courbe de profondeur supplémentaire à 0 mètre, nous sommes parvenus à obtenir des données bathymétriques relativement détaillées pour l'ensemble du lagon.

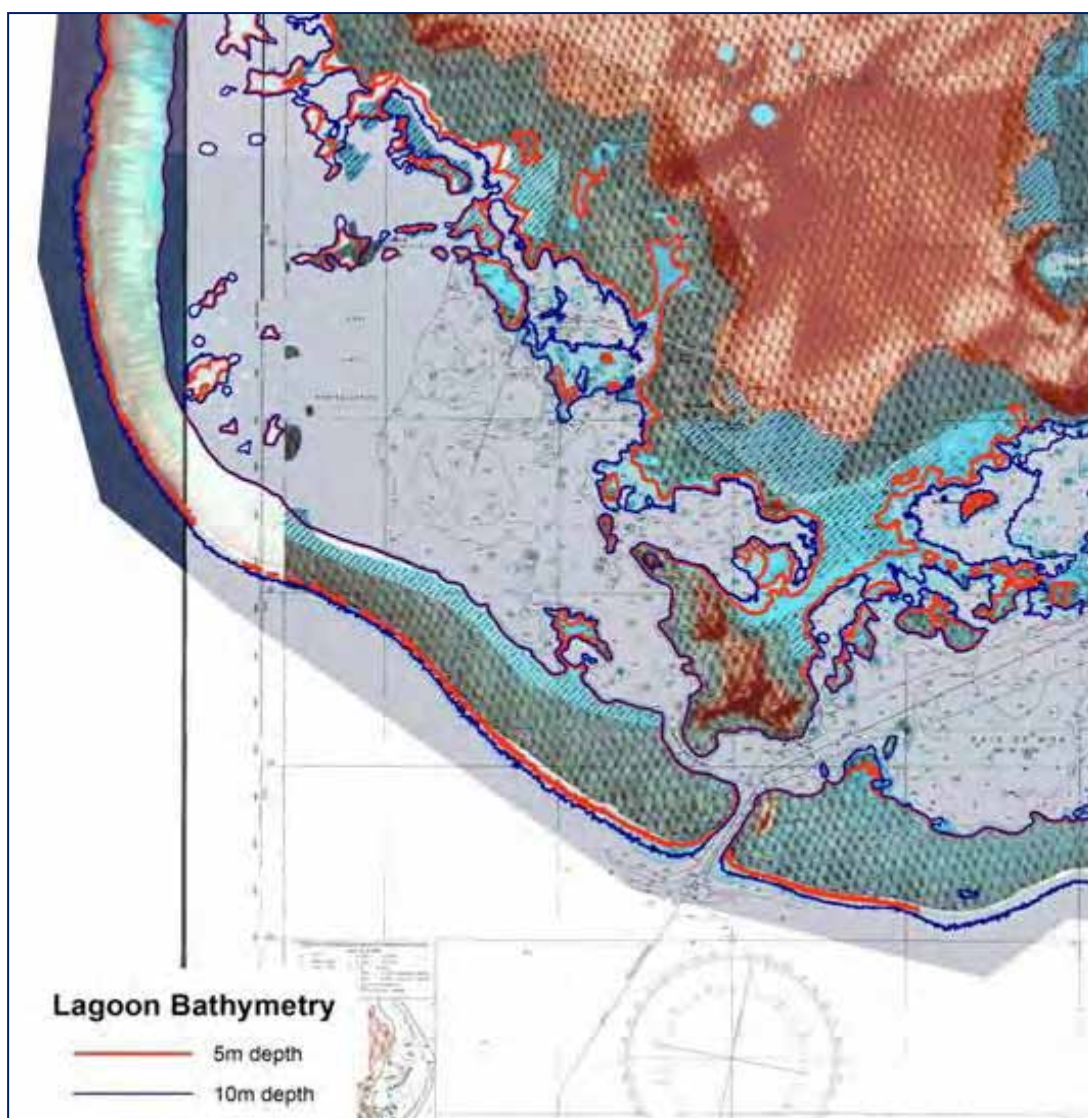


Figure C9 – Extraction des données bathymétriques du lagon, lorsque des données multifaisceaux n'étaient pas disponibles

Le récif de Futuna a été numérisé à partir d'images Google Earth et de cartes topographiques établies par l'IGN.

Enfin, nous avons fusionné dans un seul MNT les différents jeux de données terrestres des bathymétriques du lagon et de l'océan environnant.

Modélisation numérique : principes et méthode

La propagation de la vague sur une grande distance et les inondations à petite échelle survenues lors du tsunami de Tohoku, le 11 mars 2011, ont été simulées à l'aide du logiciel Gerris Flow Solver (voir site gfs.sf.net, en anglais, [36]). La résolution spatiale est adaptée dynamiquement à partir de 250 mètres dans les zones inondées et jusqu'à 250 km dans les autres zones, et les vagues suivies à une résolution de 1,8 km en eaux profondes. La hauteur de la première vague est obtenue à partir d'un modèle source établi en n'utilisant que des données sismiques. Le domaine de simulation recouvre une grande partie du Pacifique Nord-Ouest. La précision des prédictions relatives aux vagues se propageant sur de grandes distances est démontrée au moyen de comparaisons avec des séries chronologiques issues de relevés de bouées DART et de marégraphes du GLOSS. De plus,

par rapport aux données émanant des levés et des satellites, le modèle permet de prévoir avec justesse les inondations à petite échelle. Le raffinement adaptatif de maillage permet des calculs nettement plus efficaces que ceux des méthodes non adaptatives. L'étude confirme qu'il est possible d'obtenir des modèles sources cohérents sur la formation des tsunamis uniquement à partir de données sismiques. Toutefois, bien que les hauteurs extrêmes des vagues observées soient reproduites par le modèle, les vagues correspondantes sont localisées plus au sud que dans les données d'enquête. D'après les comparaisons effectuées avec les données des bouées houlographes côtières, ces différences pourraient découler d'une compréhension imparfaite des mécanismes de formation des vagues à l'échelon local. Ces travaux ont été publiés dans la revue *Natural Hazards and Earth System Sciences* [44].

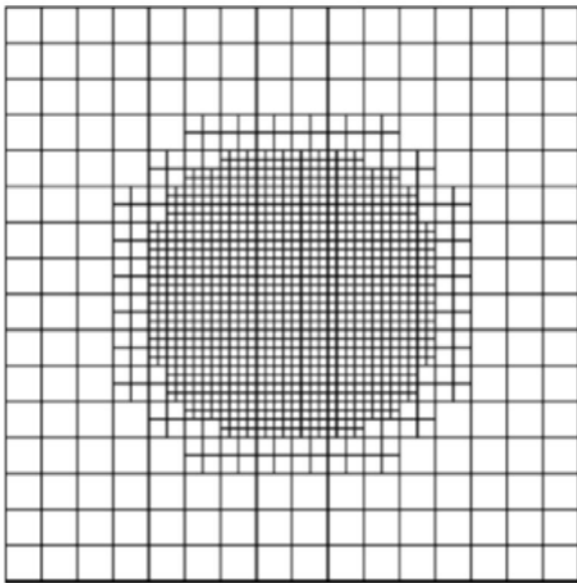


Figure C10 – Principes du maillage adaptatif. Le centre de la grille présente une haute définition (petites cellules), tandis que la résolution est faible sur l'extérieur ([36])

Le groupe "hydrodynamique" du NIWA a développé son propre logiciel d'hydrodynamique, capable de modéliser le déclenchement et la propagation des tsunamis, ainsi que les inondations correspondantes. De nombreuses études sur les inondations provoquées aussi bien par les tsunamis que par les ondes de tempête ont été menées à l'intention des autorités régionales de Nouvelle-Zélande. Depuis deux ans, la modélisation des tsunamis et des ondes de tempête dans le Pacifique Sud-Ouest, à savoir dans la région environnant les Tonga (Wallis et Futuna compris), est entreprise dans le cadre du projet FP-MAEE. L'équipe de recherche c'est fondée sur les données de référence des laboratoires, les relevés relatifs au niveau de la mer lors de récents tsunamis et les données sur les paléotsunamis pour valider les prédictions modélisées concernant la hauteur des vagues en cas de tsunami. Les modèles générés reposent entièrement sur la qualité des données bathymétriques disponibles (morphologie des fonds marins), en particulier dans les zones côtières peu profondes. Le logiciel de modélisation s'appuie sur une technique de maillage adaptatif et représente ce qui se fait de mieux en matière de modèles de la dynamique des fluides géophysiques.

Validation du modèle : le séisme de Tonga (MW = 8,1), septembre 2009

Afin de valider le modèle numérique établi à l'aide de Gerris, nous avons modélisé le tsunami qui s'est produit le 29 septembre 2009, puis comparé les résultats obtenus avec les dégâts observés au Samoa, aux Samoa américaines, aux Tonga et à Futuna, ainsi qu'avec plusieurs bouées DART situées en mer [37]. Les paramètres de la faille étaient bien établis [45] et ceux relatifs aux inondations engendrées ont été obtenus grâce à plusieurs études de terrain consécutives au tsunami menées à Samoa [46-49] et à Futuna [1, 5].

Cet exercice de validation démontre la fiabilité des résultats obtenus dans le cadre de la présente étude.

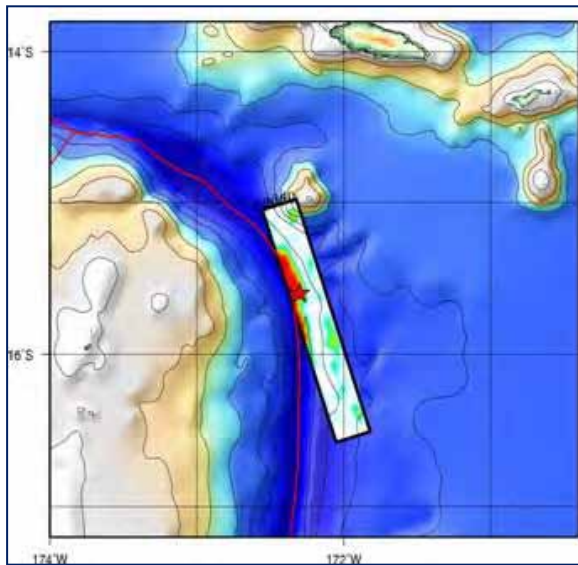


Figure C11 – Source sismique du séisme des Tonga utilisée pour la modélisation sous Gerris, (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2009/us2009mdbi/finite_fault.php)