



La Rochelle
Université

Rapport de stage de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master Sciences Pour l'Environnement (SPE)
Mention Géographie Appliquée à la Gestion des Littoraux (GAGL)

Année 2019 - 2020

CARTOGRAPHIE DE L'ALEA TSUNAMI EN NOUVELLE-CALEDONIE

Présenté par *Maxime Duphil*

Soutenu le 18 juin 2020 devant le jury :

Dr. Frédéric Pouget et Dr. Valérie Ballu (LIENSs)

Dr. Jérôme Aucan et Dr. Jean Roger (IRD)



Avant-Propos

L'un des enjeux du stage de fin d'étude est de réussir à s'approprier une problématique scientifique en lien avec les missions qui nous sont confiées. Engagé dans une formation universitaire en Géographie du littoral, ce stage de cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie semblait correspondre à mon profil de géographe.

Au fil des semaines passées à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), j'ai eu l'occasion de découvrir le monde de la modélisation de tsunamis. J'ai d'abord commencé à organiser mon environnement numérique de travail avec une triple répartition des machines Linux/Windows/Mac.

Après quelques jours d'adaptation et de mise en contexte bibliographique, j'ai été formé pour compiler, sur ma machine, le code Method Of Splitting Tsunami (MOST) utilisé dans le projet Tsunami en Nouvelle-Calédonie (TSUCAL). Après plusieurs semaines de manipulation, j'étais en mesure de configurer, lancer et extraire des résultats de simulations numériques.

Finalement, ce stage se caractérise par un double apport scientifique : utilisation d'outils de modélisation de tsunami et traitement cartographique de scénarios en Nouvelle-Calédonie.

Résumé

L'objectif de ce stage de fin d'étude était de cartographier l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie grâce à la modélisation de centaines de scénarios prédéfinis dans la région du Pacifique. Dans une première partie, une synthèse bibliographique est présentée afin de mettre en évidence les apports de la cartographie de l'aléa tsunami dans une stratégie de gestion du risque. Dans une seconde partie, les méthodes utilisées pour effectuer les simulations avec le code de modélisation numérique de tsunami MOST (*Method Of Splitting Tsunami*) sont détaillées. Une partie importante du travail a porté sur la conception de grilles bathymétriques à différentes résolutions. Dans une troisième partie, les résultats de modélisation qui amènent à fournir à la Sécurité Civile des outils opérationnels d'évaluation de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie sont présentés. La livraison d'une base de données de scénarios, contenant les hauteurs de vagues maximums à la côte et les temps de trajet de tsunami (TTT), ainsi que la production d'un atlas des scénarios, constituent les produits finaux du projet. Dans une dernière partie, les cartes d'aléa sont abordées avec un regard critique, en analysant la robustesse et la sensibilité des résultats obtenus sur la Nouvelle-Calédonie. Enfin, une réflexion scientifique portant sur le rôle des changements globaux et des zones naturelles littorales complète l'analyse géographique du risque tsunami.

Mots clés : Tsunami, modélisation numérique, cartographie de l'aléa, atlas des scénarios, gestion des risques côtiers, Nouvelle-Calédonie

Abstract

The objective of this end-of-study internship is to map the tsunami hazard in New Caledonia using numerical modeling of hundreds of predefined scenarios located within the Pacific region. In the first part, a bibliographic synthesis is carried out in order to highlight the contributions of the tsunami hazard mapping in a risk management strategy. In a second part, the methods used to carry out the simulations with the digital modeling code of tsunami MOST (*Method Of Splitting Tsunami*) are detailed, with an important part of the work focused on the design of bathymetric grids at different resolutions. In a third part, the modeling results which lead to delivering Civil Security with operational tools for assessing the tsunami hazard in New Caledonia are presented. The delivery of a scenario database, containing maximum coast wave heights and tsunami travel times (TTT), as well as the production of a scenario atlas, are the final products of the project. In a final part, the hazard maps were approached with a critical eye, by analyzing the robustness and the sensitivity of the results obtained in New Caledonia. Scientific reflection on the consequences of global climate change and coastal natural areas will feed into a geographical analysis of the tsunami risk.

Keywords: Tsunami, numerical modeling, hazard mapping, scenarios atlas, coastal risks management, New Caledonia

Remerciements

Un stage de fin d'étude correspond souvent à une étape singulière dans un cursus universitaire, marquant la fin d'un cycle de cinq ans dans le domaine des études supérieures. Le stage de Master 2 n'est pas simplement l'équivalent d'un semestre universitaire mais plutôt une expérience professionnelle à part entière. Je tiens donc à remercier l'ensemble des personnes que j'ai côtoyé durant mes vingt-deux semaines passées au centre IRD de Nouméa.

Tout d'abord je souhaite remercier le centre IRD de Nouméa et plus particulièrement le laboratoire Entropie qui m'a accueilli à mon arrivée sur le territoire. Un grand merci à mes tuteurs sur place Mr Jean Roger et Mr Jérôme Aucan pour leur gentillesse, leur bienveillance et leur disponibilité. Merci à Mr Bernard Pelletier pour toutes les discussions géologiquement enrichissantes. Merci à Mr Pascal Douillet pour ses visites dans mon bureau et surtout son aide précieuse concernant le monde de la modélisation. Merci à Mr Jérôme Lefèvre pour m'avoir aidé sur toutes les manipulations à effectuer sur le cluster informatique. Merci également aux informaticiens et aux personnes de l'administration de l'IRD qui se sont occupées du suivi de mon dossier de stage, notamment Mme Catherine Koteureu et Mme Véronique Perrin. Merci également à tous les doctorants (Andreas, Valentine, Marie, Frederica, Laëtitia), post-doc (Lucas), VSC (Renault) et autres stagiaires (Hadrien, Arnault, etc.) pour toutes les sorties et repas sur le caillou. Merci au personnel de la Direction de la Sécurité Civile et Gestion des Risques (DSCGR), Mr Alex Ferrand et Mme Doriane Brehe pour nos discussions sur la livraison des produits finaux du projet mais également pour votre accueil au centre opérationnel.

Ensuite, je veux également remercier mes encadrants à l'Université de La Rochelle, Mr Frédéric Pouget, pour sa présence hebdomadaire et son soutien pédagogique. Merci aussi à Mme Virginie Duvat Magnan, responsable de formation du Master SPE GAGL, pour tous les échanges constructifs par mail et ses points d'éclairage sur mon travail.

Merci infiniment à Mme Anne Porcher pour son accueil dans sa maison pendant près de six mois. A tous les moments passés à cuisiner de bons petits plats ou encore discuter autour d'un verre sur la terrasse en fin de journée. Vivre l'insularité est une expérience, merci à tous les colocataires d'avoir partagé tous ces moments inoubliables, en particulier Anthony, Jill, Antoine, Jo, Benoit, Camille, Ludivine et Thibaud.

Enfin, je souhaite remercier mes parents, sans lesquels ce voyage aux antipodes de la France aurait été impossible. Merci pour leur investissement financier engagé dans le transport pour rejoindre la Nouvelle-Calédonie et merci pour leur soutien psychologique et les nombreux Skype en début ou fin de journée. Merci à tout le reste de ma petite famille qui m'a encouragé à partir ici. Merci à tous mes collègues et amis restés en France, en particulier Morgane et Alexis pour les contacts réguliers et chaleureux.

Sommaire

AVANT-PROPOS	2
RESUME	3
ABSTRACT	3
REMERCIEMENTS	4
SOMMAIRE	5
INTRODUCTION GENERALE	6
CONTEXTE DU STAGE DE MASTER 2	6
PRESENTATION DE L'ORGANISME : IRD.....	6
OBJECTIFS DU STAGE (PARTICIPATION AU PROJET TSUCAL).....	7
1. ETAT DE L'ART AUTOUR D'UN ALEA COTIER : LE TSUNAMI	8
1.1 APPREHENDER LES RISQUES COTIERS PAR LA DIMENSION INSULAIRE	8
1.2 L'ALEA TSUNAMI : PROCESSUS DE FORMATION ET DYNAMIQUES OCEANIQUES	11
1.3 MODELISER POUR MIEUX PREVOIR L'ALEA TSUNAMI : APPORTS DE LA CARTOGRAPHIE.....	15
2. MISE EN CONTEXTE DE L'ETUDE	20
2.1 LA NOUVELLE-CALEDONIE : UN TERRITOIRE ULTRAMARIN FRANÇAIS DANS LA CEINTURE DE FEU DU PACIFIQUE	20
2.2 ETAT DES LIEUX DE LA CONNAISSANCE DE L'ALEA TSUNAMI EN NOUVELLE-CALEDONIE	24
3. MATERIEL ET METHODES	28
3.1 LE CODE MOST ET LES DONNEES UTILISEES.....	28
3.2 METHODOLOGIE DE CONCEPTION DES GRILLES BATHYMETRIQUES	30
3.3 AJUSTEMENT DES SOURCES DES SCENARIOS DE TSUNAMI	33
3.4 VALIDATION DU CODE MOST AVEC LE TSUNAMI DU 5 DECEMBRE 2018	40
4. RESULTATS	43
4.1 LA CREATION DE LA BASE DE DONNEES DE SCENARIOS DE TSUNAMI POUR LA NOUVELLE-CALEDONIE	43
4.2 CARTOGRAPHIE DE L'ALEA TSUNAMI EN NOUVELLE-CALEDONIE	45
4.3 LES PREMIERS MODELES DE L'ATLAS DES SCENARIOS DE TSUNAMI EN NOUVELLE-CALEDONIE	51
5. DISCUSSION	53
5.1 LES LIMITES DES RESULTATS DE MODELISATION SOUS MOST	53
5.2 LES ENJEUX DE LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA TSUNAMI	55
5.3 LES PISTES D'AMELIORATION ET PERSPECTIVES SUR LE TRAVAIL	58
CONCLUSION	61
REPONSE A LA PROBLEMATIQUE	61
RETOUR D'EXPERIENCE	63
TABLE DES MATIERES	64
TABLE DES FIGURES	66
TABLE DES TABLEAUX	69
BIBLIOGRAPHIE :	70

Introduction générale

Contexte du stage de Master 2

Le Master Sciences Pour l'Environnement (SPE) mention Géographie Appliquée à la Gestion des Littoraux (GAGL) dispensé à l'Université de La Rochelle constitue une formation pluridisciplinaire dans le domaine de la Géographie des littoraux. L'étude approfondie des relations entre les sociétés et l'environnement permet à la fois d'appréhender la complexité de ces interactions mais également d'analyser les grandes dynamiques territoriales côtières. Le Master est une voie de spécialisation dans les études supérieures et le stage de fin d'étude correspond à l'étape de finalisation. Le travail de fin d'étude (TFE) vise donc à mettre en application et développer ses connaissances théoriques mais aussi à consolider ses compétences techniques. Pour ma part, l'objectif du TFE est simple : s'insérer professionnellement dans le domaine de la recherche scientifique en participant activement à un projet de recherche. Dans ce contexte, j'ai eu l'opportunité de réaliser mon stage de fin d'étude à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) à Nouméa en Nouvelle-Calédonie.

Présentation de l'organisme : IRD

L'IRD est un établissement public français placé sous la double tutelle des ministères de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et de l'Europe et des Affaires étrangères. Acteur majeur de la recherche scientifique avec une communauté riche de plus de 7000 personnes, l'organisme propose une démarche originale d'étude, d'expertise et de formation afin de répondre aux défis du développement à l'échelle globale. Reconnu internationalement, l'IRD travaille principalement en partenariat avec les pays méditerranéens et de la ceinture intertropicale.



Figure 1 : Vue aérienne du centre Institut de Recherche pour le Développement (IRD) situé sur l'Anse Vata à Nouméa en Nouvelle-Calédonie (Source : IRD)

Le centre IRD de Nouméa (**Figure 1**) constitue l'implantation majeure de l'organisme dans les territoires ultramarins français. Visant à soutenir le développement économique, social et culturel, ce centre de recherche scientifique aborde de multiples thématiques, en particulier les changements socio-environnementaux globaux en milieu insulaire. Le stage présenté dans ce document a été réalisé au sein de l'Unité Mixte de Recherche (UMR) 250 - Écologie Marine Tropicale des Océans Pacifique et Indien (ENTROPIE). Cette UMR est impliquée notamment dans la compréhension du fonctionnement des socio-écosystèmes marins et insulaires de l'Indopacifique tropical dans le contexte du changement climatique.

Objectifs du stage (participation au projet TSUCAL)

Ce stage s'insère dans le cadre du projet de recherche intitulé Tsunami en Nouvelle-Calédonie (TSUCAL). Financé par le gouvernement de Nouvelle-Calédonie, le projet a démarré en août 2018 pour une durée de deux ans. Résultat direct d'une coopération entre l'IRD, porteur de projet, et le gouvernement, l'objectif est de mettre à disposition des acteurs de la sécurité civile des outils d'évaluation de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie (Convention N°CS17-4010-000017). Ces outils sont représentés par une base de données de scénarios prédéfinis sur l'ensemble du bassin Pacifique et des cartes d'aléa à l'échelle du territoire regroupées sous la forme d'un atlas des différents scénarios de tsunamis pour l'utilisateur final du projet : la Direction de la Sécurité Civile et Gestion des Risques (DSCGR).

Mes missions vont s'organiser selon trois étapes principales : une première étape de préparation de la base de données de scénarios via la conception de grilles bathymétriques et la modélisation numérique de tsunamis pour plusieurs centaines de scénarios ; une seconde étape d'intégration des résultats de modélisation au format NetCDF dans une base de données ; une troisième étape consistant en l'élaboration des outils d'évaluation de l'aléa tsunami à travers une cartographie de l'aléa et l'intégration des résultats dans un logiciel de visualisation rapide.

Une partie du travail réalisé au cours de ce stage sert à la préparation d'une publication scientifique : *Roger J., Pelletier B., Duphil M., Aucan J., Lefèvre J., Lebellegard P., Thomas B., Bachelier C., Varillon D. (in prep.). The Mw 7.5 Tadine (Mare, Loyalty Is.) earthquake and related tsunami of December 5, 2018: implications for tsunami hazard assessment in New Caledonia. To be submitted in Natural Hazards and Earth System Sciences.*

1. Etat de l'art autour d'un aléa côtier : le tsunami

1.1 Appréhender les risques côtiers par la dimension insulaire

1.1.1 Le littoral : un objet d'étude géographique

Par définition, le littoral est un objet d'étude dynamique et complexe. Appréhender le littoral avec une approche géographique, c'est avoir une vision holistique de la notion. Effectivement, Les géographes « littoralistes » privilégient une approche globale de cet espace pouvant être distingué en trois dimension (**Bousquet, 1990**) : le littoral de nature, sous la dépendance de la dynamique et de l'énergie du milieu, le littoral d'écoumène, habité et mis en valeur par l'homme et le littoral d'institution que régissent les textes législatifs et règlementaires. Néanmoins, sommes-nous réellement capables de le délimiter et de le mesurer (**Thomas, 2019**) ? Ne faisant pas l'objet d'une définition claire et précise, le littoral est pourtant au cœur des enjeux liés aux changements sociétaux et environnementaux présents et futurs. Analyser le littoral par une approche centrée sur les risques permet de rendre compte de la complexité des interactions Homme/Milieu.

1.1.2 Définition de l'aléa

La connaissance du risque passe d'abord par une évaluation de l'aléa à travers l'exposition des zones sensibles, l'intensité du phénomène et la probabilité d'occurrence (**Terrier, 2010**). Un aléa correspond à une occurrence potentielle d'un événement d'origine naturelle (exemple : tsunami, séisme, feu de forêt, etc.) ou anthropique (exemple : explosion, pollution, etc.) pouvant entraîner des pertes humaines, des dégâts matériels et des dommages socio-environnementaux (**IPCC, 2018**). Les impacts d'un aléa peuvent se combiner entre eux et ainsi constituer une chaîne d'impacts interdépendants (**Duvat et al., 2017**). Considérer des temps moyens et longs permet de saisir ce qu'une étude, même diachronique, d'aléa ne peut mettre en évidence : la nature des éléments exposés et les vulnérabilités (**Metzger & Reghezza, 2019**).

1.1.3 Définition de la vulnérabilité

La vulnérabilité est définie comme la propension ou la prédisposition à être affectée négativement par un évènement. Elle englobe notamment la sensibilité aux dommages et la capacité de résilience (**IPCC, 2018**). Depuis les années 90, la place de la vulnérabilité n'a cessé d'évoluer dans la recherche sur les risques et les rapports de force entre étude d'aléa et de vulnérabilité se sont modifiés, fait s'expliquant par des incertitudes de plus en plus reconnues en matière d'aléa (prédictions, zonages, etc.) et une approche de la vulnérabilité devenue plus solide scientifiquement (**D'Ercole, 2014**). Par ailleurs, le caractère dynamique du concept peut s'illustrer grâce aux trajectoires de vulnérabilité qui permettent de renseigner le passé pour informer le futur d'un

territoire (**Magnan et al., 2012**). De fait, comment envisager la relation entre vulnérabilité socio-territoriale et dimension spatiale ?

Le concept de risque correspond à la convolution entre un aléa naturel et/ou anthropique et la/les vulnérabilité(s) des enjeux d'un système donné. Finalement, il est désormais impossible de concevoir les risques littoraux sans cette double approche basée sur l'identification d'un aléa croisée avec un diagnostic de vulnérabilité d'un territoire exposé. La vulnérabilité des territoires et des sociétés exposées aux menaces d'origine naturelle est une composante fondamentale de l'appréciation du risque sur laquelle doit porter l'effort d'évaluation et de mitigation (**Leone, 2008**).

1.1.4 Des milieux insulaires côtiers plus à risque ?

Les milieux insulaires peuvent tous être plus ou moins exposés aux phénomènes naturels extrêmes, en particulier les tsunamis provenant de sources lointaines comme les télétsunamis (**Jackson et al., 2005**). Néanmoins, la configuration socio-spatiale des territoires insulaires peut ainsi renforcer partiellement la vulnérabilité des enjeux humains aux aléas naturels. Considérer la vulnérabilité littorale d'une île, c'est donc prendre en compte l'analyse morphologique du système (**Woodroffe, 2008**). D'ailleurs, il a été démontré que les événements extrêmes, comme les cyclones et les tsunamis, ont pu participer aux transformations morphologiques de certaines îles, en jouant un rôle majeur dans la dynamique sédimentaire côtière.

Les processus de littoralisation des hommes et des activités génèrent une augmentation de l'urbanisation côtière en lien avec un nécessaire renforcement des protections littorales et donc un accroissement des pressions d'origine anthropiques sur les systèmes naturels. Par exemple, les travaux de **Neumann et al. (2015)** visent à prédire la population mondiale côtière par des scénarios démographiques. L'augmentation de l'empreinte humaine a contribué à des changements majeurs dans la morphologie des îles et des récifs, principalement par l'expansion artificielle des îles et le blindage des littoraux (**Duvat & Magnan, 2019**).

Considérer la vulnérabilité littorale d'une île, c'est aussi approfondir une approche par reconstruction historique basée sur l'occupation et l'utilisation des sols ainsi que la distribution de la population et des infrastructures (**Yamano et al., 2007**). En effet, certains pays insulaires comme Tuvalu ou les Maldives concentrent de très fortes densités de population côtière : 8 300 habitants par km² à Fongafale et 47 000 habitants par km² à Malé (**Webb & Kench, 2010**). La répartition des populations sur le littoral renforce *in situ* la vulnérabilité côtière. Une approche quantitative de la distribution des populations littorales, prenant en compte les composantes de la structure des populations et les dynamiques démographiques associées, est nécessaire pour mieux appréhender la vulnérabilité. Dans le cas des petites îles, les installations portuaires critiques sont nécessairement situées sur la côte et une grande partie des infrastructures est vulnérable aux dommages causés par les tsunamis proches comme lointains, les vagues et surcote de tempêtes ou les marées exceptionnelles (**Salomon & Forbes, 1999 ; Jackson et al., 2005 ; Fritz et al., 2011 ; Donner, 2012**).

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

La présence d'infrastructures sensibles, comme les ports ou aéroports sur les zones littorales de faible altitude, peut participer activement à l'accroissement de la vulnérabilité côtière.

Pour ce qui concerne le risque tsunami, il s'agit d'une combinaison de facteurs liés à l'exposition d'un territoire et la vulnérabilité des enjeux (**Figure 2**). Définir l'aléa tsunami c'est bien prendre en compte les paramètres de source tsunamigène, le comportement des ondes à plusieurs échelles spatio-temporelles et les impacts attendus sur le littoral. *In fine*, les écosystèmes côtiers et la configuration du littoral, ainsi que leurs évolutions, jouent un rôle majeur dans l'appréciation de l'aléa tsunami.

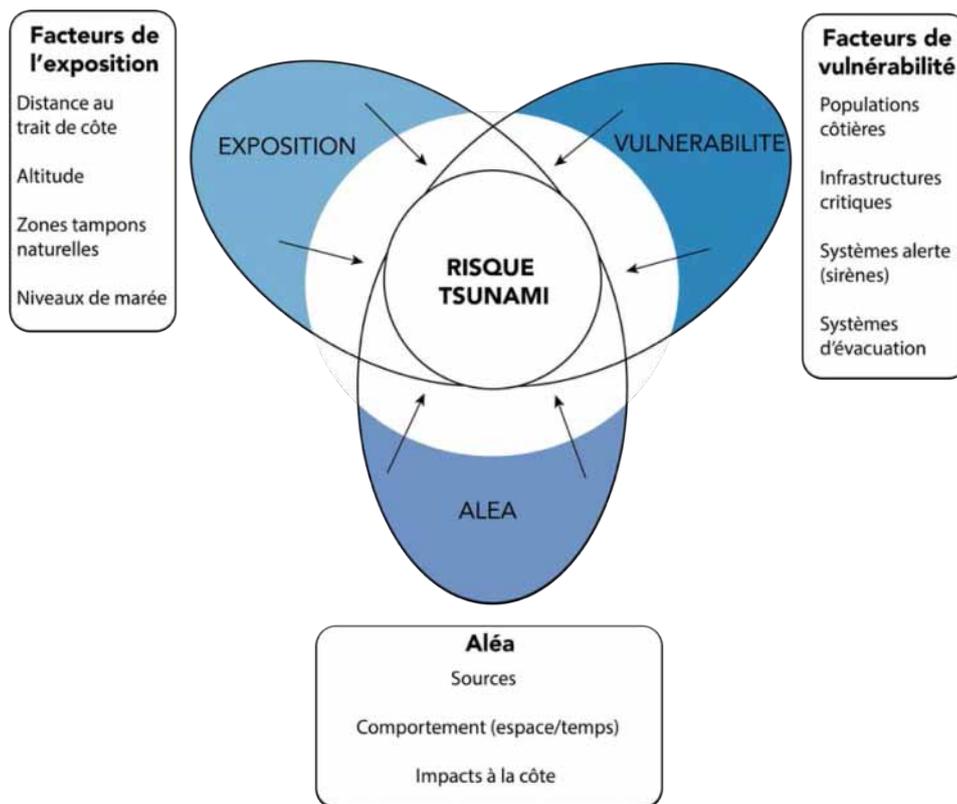


Figure 2 : Schéma conceptuel des facteurs de contrôle à prendre en compte dans l'analyse du risque tsunami. L'aléa tsunami se caractérise par une source, par un comportement dans l'espace et dans le temps et par des impacts attendus sur le littoral. Le degré d'exposition d'un territoire peut dépendre d'une relation simple basée sur la topographie et la distance au trait de côte, mais il peut également être analysé en intégrant la présence de zones naturelles tampons (mangroves et récifs) ainsi que les niveaux d'eaux (marée haute ou basse). La vulnérabilité côtière est une composante du risque tsunami qui intègre la répartition des populations sur le littoral ainsi que la distribution des infrastructures critiques. Analyser la vulnérabilité c'est aussi qualifier les systèmes d'alerte, notamment les sirènes, mais aussi identifier les voies d'évacuation vers des zones refuges (Source : Inspiré de l'IPCC - 2020)

Dans ce contexte, comment un territoire insulaire peut-il répondre en cas d'alerte tsunami ? L'étude présentée ici est intéressante puisque l'aléa tsunami peut tout autant concerner des atolls et îlots de faible altitude mais également des îles hautes. Par ses caractéristiques géographiques spécifiques abordées ultérieurement, la Nouvelle-Calédonie semble donc s'apparenter à un terrain d'étude de choix pour analyser les tsunamis. A noter que la caractérisation des enjeux littoraux exposés et vulnérables sur les zones les plus sensibles, a d'ores et déjà été abordée par **Thomas et al. (2019)**.

Un séisme se caractérise par différents paramètres. Les premiers paramètres calculés par l'intermédiaire des données acquises par les stations (sismomètres) des réseaux sismologiques sont la localisation de la source (longitude et latitude) puis la magnitude et la profondeur. Un séisme est lié à une rupture sur un ou plusieurs plan(s) de faille auquel(s) on peut attribuer une longueur, largeur, profondeur, un azimut et un pendage du plan ainsi qu'une valeur et un angle du glissement (**Figure 4**). Une comparaison entre les différentes zones de subduction (passage d'une plaque tectonique sous une autre) révèle une forte corrélation entre la taille du séisme avec deux autres variables : l'âge de la lithosphère subduite et le taux de convergence (**Ruff & Kanamori, 1983**). D'après ces auteurs, les séismes les plus importants se produiraient dans les zones avec une lithosphère jeune et des taux de convergence rapides, typiquement ce qui se passe au niveau de la subduction de l'arc du Vanuatu. A l'heure actuelle, les études scientifiques permettent d'affirmer que le bassin Pacifique (**Figure 3**) regroupe 50% des tsunamis récents (**Sahal, 2011**). Les plus grands séismes observés ($M_w > 9$) sont des séismes de subduction et ils ont tous déclenché des tsunamis transocéaniques majeurs (**Hébert et al., 2005**).

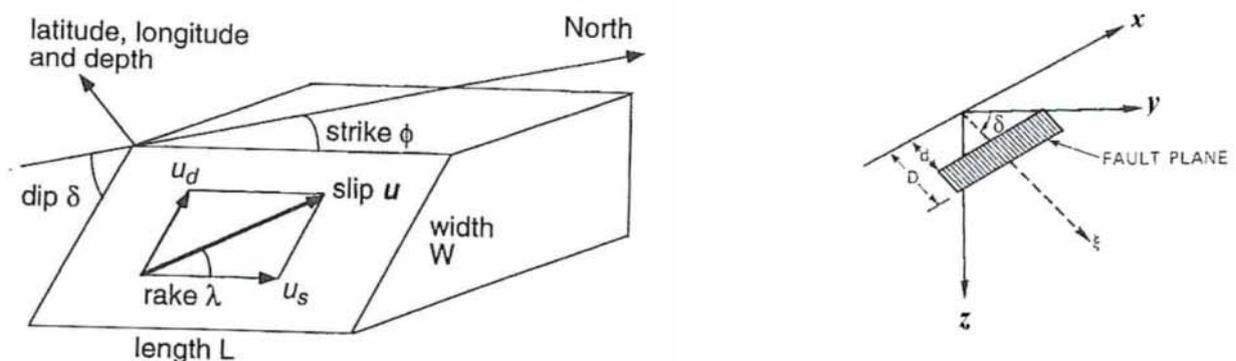


Figure 4 : Les différents paramètres géologiques d'un plan de faille à prendre en compte dans la déformation initiale d'un tsunami. Un plan de faille possède une géométrie (longueur (L) x largeur (W)) qui dispose d'une localisation en longitude/latitude et une profondeur associée. Le déplacement du plan de faille est caractérisé par un glissement (u), un angle de glissement (γ), un pendage (δ) et un azimut (ϕ) (Source : MOST - 2006)

1.2.2 Comment se comporte un tsunami en mer et à la côte ?

Un tsunami se caractérise par une grande longueur d'onde et une période importante, allant de plusieurs minutes pour les tsunamis générés par des glissements de terrain, à parfois jusqu'à une heure pour ceux générés par des séismes. Quand on considère une région donnée, il existe trois catégories de tsunamis : les tsunamis locaux générés localement, les tsunamis régionaux générés à plus grande distance avec un impact régional et les tsunamis transocéaniques ou télétsunamis pouvant avoir un impact à l'échelle d'un bassin océanique (tsunami d'Indonésie en 2004, du Japon en 2011, etc.). Un tsunami se propage dans toutes les directions mais pour ceux d'origine sismique, l'énergie reste généralement concentrée perpendiculairement à la zone de rupture. Les heures d'arrivées estimées grâce à la modélisation numérique (ETA ou « *estimated time of arrival* ») fournissent le moment où la première vague est susceptible d'arriver. Néanmoins, les temps de trajets de tsunami (TTT ou « *tsunami travel times* ») dépendent de la précision de localisation de la

source et de la qualité de la bathymétrie proche des stations de mesure (Wessel, 2009). Tandis que la vitesse de propagation d'un tsunami peut dépasser les 900 km/h en pleine mer, celle-ci diminue à l'approche des côtes du fait de la remontée de la bathymétrie. Ce changement de vitesse directement lié à la bathymétrie peut amener à une déviation des ondes notamment aux abords des îles, c'est la réfraction. Ainsi, la vitesse d'un tsunami peut être définie selon la formule mathématique suivante reprenant l'approximation linéaire d'une onde longue (Airy, 1845) :

$$C \text{ (Vitesse propagation)} = \sqrt{(g(\text{Accélération gravité}) \times h \text{ (Profondeur)})}$$

Par ailleurs, les ondes de tsunamis ont la capacité de se déformer en fonction de la géomorphologie littorale (UNESCO, 2013) : par exemple, les récifs coralliens, mangroves et lagunes peuvent ralentir la propagation des tsunamis par friction alors que les baies, plages et ports peuvent les amplifier (Gutton et al., 2012). De fait, plusieurs processus physiques dépendants du contexte local, peuvent affecter le comportement d'un tsunami à la côte, notamment les effets de pente (shoaling), la réfraction des vagues (focusing) et la résonance (Figure 5). Un tsunami peut avoir des impacts directs, comme la modification de la courantologie, des submersions ou des phénomènes ponctuels d'érosion, et des impacts indirects, notamment le transport de débris, des explosions et incendies ou encore des pollutions (Gutton et al., 2012).

Afin de mesurer l'étendue d'une submersion par un tsunami, il est nécessaire de prendre en compte les hauteurs maximales des vagues, les vitesses de propagation et les distances/hauteurs de run-up (Sahal, 2011). Les variations du niveau marin sur les marégraphes côtiers ou sur les bouées de détection au large (comme les bouées DART), constituent des marqueurs d'un tsunami (Plan ORSEC Tsunami, 2012).

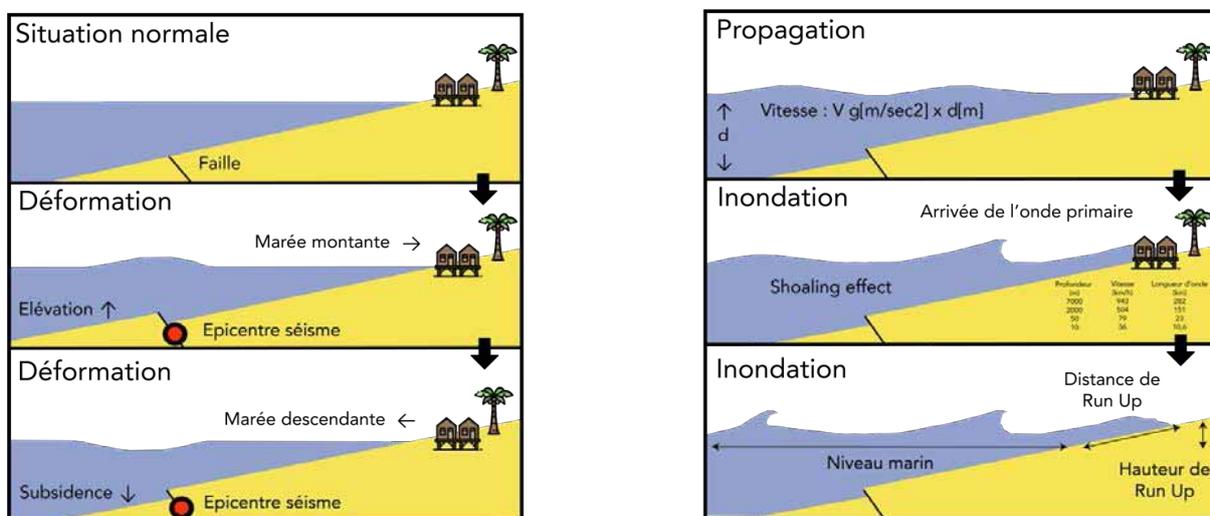


Figure 5 : Les différents stades de formation et d'évolution d'un tsunami d'origine sismique. A gauche, la déformation initiale peut avoir deux configurations différentes en fonction du mécanisme au foyer (élévation ou subsidence). A droite, la propagation des ondes dans l'océan est vérifiée par une équation qui détermine la vitesse du tsunami. La phase d'inondation se caractérise par un changement de comportement du/des train(s) d'onde (shoaling effect) et se mesure avec la distance/hauteur du run-up à la côte (Source : Inspiré de la COI - 2020)

1.2.3 Un bref panorama sur les tsunamis historiques

Les tsunamis provoqués par un séisme peuvent causer de graves dommages aux communautés côtières à la fois dans la zone du séisme et à des lieux distants (**Liu et al. 2005**). L'exemple du tsunami du Chili de 1960 illustre bien les dommages pouvant être causés à plusieurs milliers de kilomètres de la zone source, notamment sur l'archipel d'Hawaï et le Japon.

La connaissance des événements historiques ou récents constituent un moyen de validation efficaces pour les outils de modélisation numériques tels que MOST. Comparer les temps d'arrivée, périodicités, hauteurs de vagues, distance d'inondation, etc. obtenues par simulation, avec les données historiques permet de vérifier la précision du code de modélisation utilisé. Plusieurs études scientifiques se sont également intéressées à la reconstitution des mécanismes à la source pour des événements historiques majeurs (ex. Alaska, 1946 ; Chili, 1960), en analysant la sensibilité des paramètres de rupture (**Gica, 2007**).

Le 26 décembre 2004, un séisme de magnitude 9.2 frappe le nord de l'île de Sumatra en Indonésie. Il a déclenché le tsunami enregistré le plus dévastateur de l'histoire. Des vagues géantes se sont propagées dans l'océan Indien à une vitesse moyenne de 700 km/h (**Wang & Liu, 2006**). Dans le nord de l'île de Sumatra, le run-up maximum a été mesuré à environ 35 m d'altitude (**Prasetya et al., 2011**)

Le 11 mars 2011, un tremblement de terre de magnitude 9.0 secoue l'Est du Japon et génère l'un des plus gros tsunamis de l'époque contemporaine causant des centaines de morts et des dizaines de milliers de blessés et disparus ainsi que 220 milliards de dollars de dégâts matériels autour de la source (**Wei et al., 2012**). Après le séisme, pas moins de 345 incendies se sont déclarés dans 12 préfectures, dont certains déclenchés directement par le tsunami (**Mimura et al., 2011**). D'importants dommages aux infrastructures ont également été causés, notamment à la centrale nucléaire de Fukushima (**Kajitani et al., 2013**) et le long des axes de communication routiers et ferroviaires (**NPA du Japon, 2012**). Immédiatement après le tsunami, des groupes de scientifiques japonais ont mené des enquêtes sur le terrain le long de la côte Est du Japon, collectant plus de 5300 points de données sur la hauteur et le run-up du tsunami (**Mori et al., 2011**). La hauteur de run-up maximum a été mesurée à 39,7 m à Aneyoshi au sud de la ville de Miyako au Japon.

Les tsunamis sont de plus en plus considérés dans les politiques globales de gestion des risques naturels. En effet, ils sont souvent perçus, à juste titre, comme une menace importante pour les communautés littorales et les infrastructures côtières. L'intégration du risque tsunami est donc devenue un enjeu clé dans l'établissement de politiques de réduction des risques.

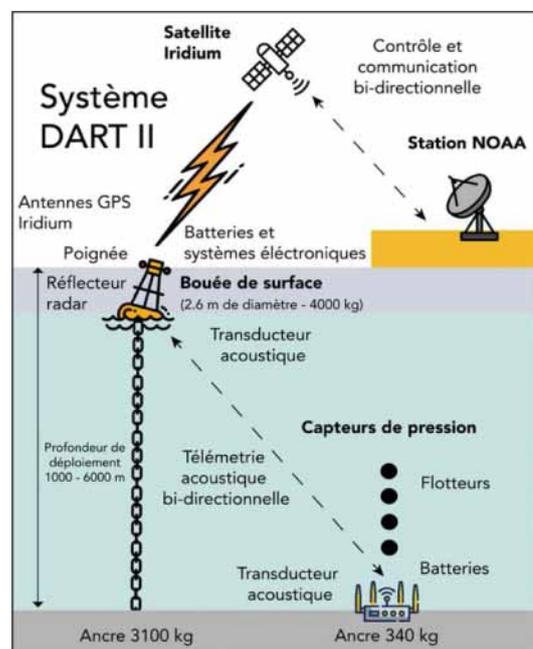
En ce sens, la coopération internationale doit être placée au centre des préoccupations afin de mieux comprendre la formation et l'évolution des tsunamis et d'améliorer les capacités de prévision pour atténuer leurs conséquences, la plupart du temps, désastreuses (**Kontar et al., 2014**).

1.3 Modéliser pour mieux prévoir l'aléa tsunami : apports de la cartographie

1.3.1 Surveillance, détection et système d'alerte au tsunami

Les tsunamis sont des événements exceptionnels qui, par nature, ne sont pas prévisibles dans le temps et dans l'espace. Néanmoins, il existe plusieurs systèmes d'alerte aux tsunamis dans le monde. Le PTWS (Pacific Tsunami Warning System) fut mis en place en 1968 après plusieurs tsunamis destructeurs affectant tout le Pacifique (ex. Alaska, 1946 ; Chili, 1960). Suite à la catastrophe de 2004 dans l'Océan Indien, la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) de l'UNESCO a décidé de mettre en place des systèmes régionaux d'alerte anticipée dans l'Océan Indien (IOTWS), dans la mer Caraïbe et régions adjacentes (CTWS), et dans l'Atlantique Nord-Est et Méditerranée (NEAMTWS), rejoignant le système déjà opérationnel dans le Pacifique (PTWS). Ces centres d'alerte régionaux ont alors pour objectif la détection d'événements tsunamigènes pour informer les états concernés par l'arrivée d'un potentiel tsunami via la transmission de bulletins d'informations. Parallèlement, la France a souhaité disposer d'une meilleure connaissance du risque tsunami susceptible d'affecter son territoire, entraînant la création d'une base de données historique sur les tsunamis (Terrier, 2013). Le service géologique américain USGS ainsi que d'autres institutions enregistrent l'ensemble des événements sismiques mondiaux. A une échelle plus fine, les réseaux d'observation constitués de stations locales permettent d'améliorer les systèmes régionaux de surveillance sismologique et de détecter plus rapidement les séismes. Les sismomètres enregistrent les mouvements du sol. Une fois le séisme enregistré, il est nécessaire de déterminer son potentiel tsunamigène, compte tenu de sa magnitude, son mécanisme de rupture, la zone d'occurrence et l'historique des tsunamis de la région. Pour ce faire, la communauté internationale dispose par exemple de marégraphes côtiers et de bouées DART installés au large (Figure 6) un peu partout dans le monde, et qui permettent de détecter des vagues au large de très faible amplitude (quelques centimètres) par le biais de capteurs de pression installés au large (NOAA, 2008).

Figure 6 : Fonctionnement du système de bouées Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART) dans la détection des tsunamis. Le système enregistre les variations de pression du niveau marin jusqu'à 0,5cm grâce à un capteur de pression situé au fond de l'océan. La sonde envoie des informations par télémétrie acoustique jusqu'à la bouée de surface. Celle-ci transmet ensuite l'information en utilisant des ondes électromagnétiques vers un satellite. La station de la NOAA reçoit mais peut aussi émettre des signaux vers la bouée DART (relais de l'information bidirectionnelle) (Source : NOAA)



Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

Ces deux systèmes mesurent le niveau marin à un point donné et renseignent sur l'heure d'arrivée et l'amplitude d'un tsunami (**NOAA, 2017**). L'ensemble de ces données hydrodynamiques constituent des moyens fiables d'identification et de suivi d'un tsunami avant et pendant son arrivée sur le littoral.

1.3.2 Les outils de prévision de l'aléa tsunami

Les outils de modélisation sont devenus incontournables dans le domaine de la « prévision » de l'aléa tsunami (**Figure 7**). Un tsunami peut être modélisé en trois phases distinctes : la déformation initiale, la propagation océanique et l'interaction/inondation côtière. Lors de la phase de déformation, si le fluide est considéré par le modèle comme étant incompressible et la déformation est transmise intégralement du fond de la mer à l'ensemble de la colonne d'eau sus-jacente. Les calculs de déformation dépendent des caractéristiques intrinsèques du séisme vues précédemment à savoir : la taille et la géométrie du plan de faille et du glissement cosismique. Ces modèles de déformation mathématiques s'accompagnent de modèles hydrodynamiques permettant de calculer la propagation des ondes de tsunami et leurs impacts potentiels à la côte. Si la modélisation permet de mener des études quantitatives (**Figure 8**), son efficacité varie en fonction de la qualité des données, notamment les sources de tsunami utilisées, les grilles bathymétriques utilisées (dérivants des MNT) ainsi que le type de code de modélisation choisi. Une bonne caractérisation des sources de tsunami est primordiale pour une meilleure compréhension du risque tsunami local, régional et transocéanique (**Angrove et al., 2019**).

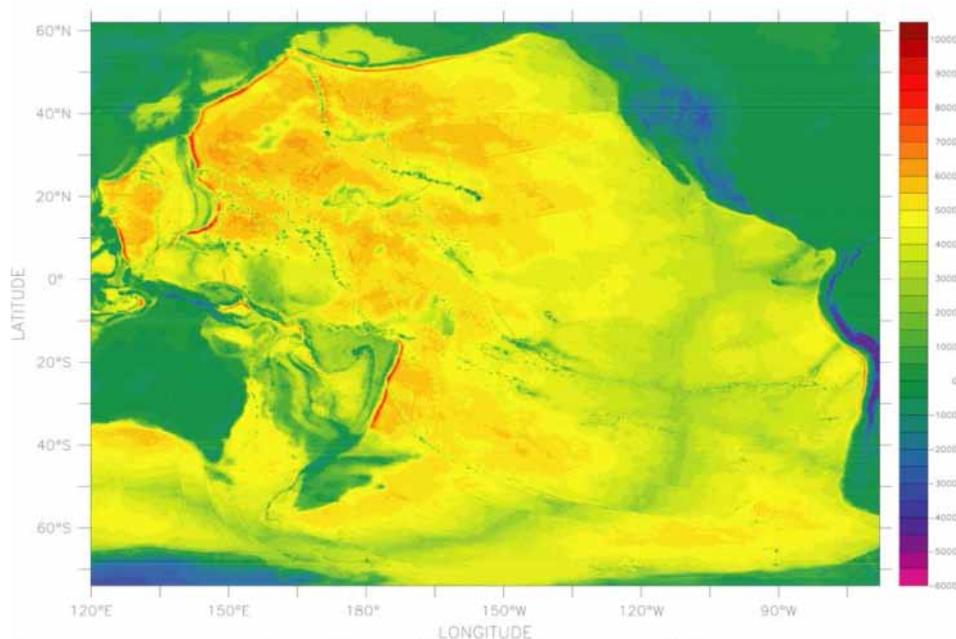


Figure 7 : Visualisation de la bathymétrie dans le Pacifique (en mètres). Les zones rouges correspondent aux grandes profondeurs supérieures à 8000 m et les zones bleues à des zones de relief supérieures à 2000 m (Source : NOAA)

L'étude des évènements de tsunamis peut également être appréhendée par un travail de recherche dans les archives historiques (témoignages, presse, photographies) mené conjointement avec des analyses sédimentaires. Après le passage d'un tsunami, les dépôts sédimentaires appelés tsunamites, peuvent constituer un moyen d'authentifier le passage d'un tsunami dans le passé. Par exemple, les travaux de **Minoura & Nakata (1994)** identifient un dépôt de tsunami associé à l'évènement du 16 juin 1026 dans la plaine côtière du Masuda au sud-ouest du Japon. La connaissance des évènements passés est indispensable à une évaluation de l'aléa tsunami : sensibilisation des populations, localisation des côtes exposées par le passé, calages des modèles numériques, information sur la probabilité de survenance d'un tsunami d'intensité donnée pour un secteur côtier donné (**Lambert et al., 2013**).

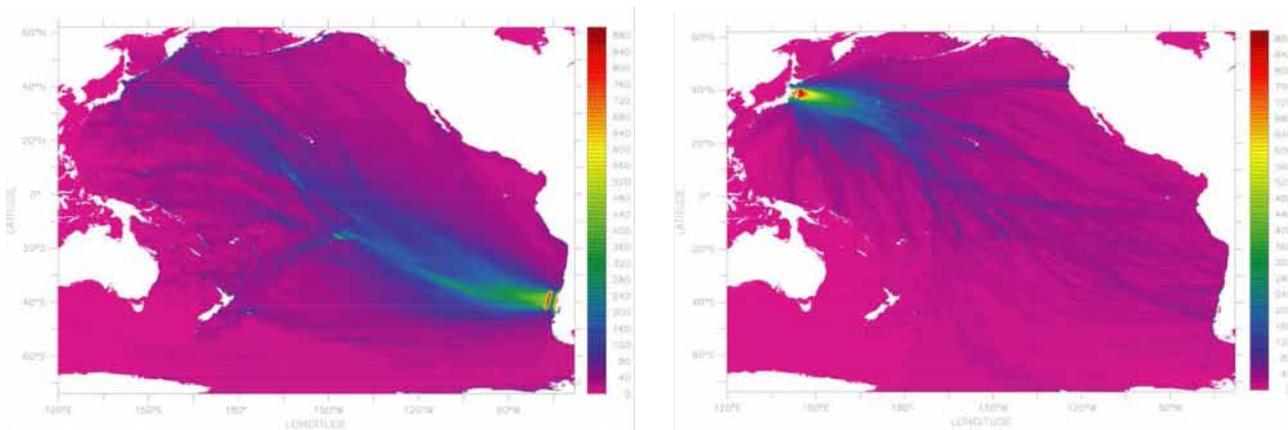


Figure 8 : Résultats de modélisation avec MOST des hauteurs de vagues maximums de deux évènements historiques. A gauche le tsunami du Chili en 1960 (Mw 9.5) qui a touché une grande partie des archipels du Pacifique jusqu'aux côtes japonaises. A droite, le tsunami du Japon en 2011 (Mw 9.0) qui a généré des vagues de plus de 8 m sur les côtes hawaïennes (Utilisation de paramètres de source ComMIT)

1.3.3 Vers la gestion du risque tsunami

La gestion du risque tsunami est menée en interne dans chaque pays, associant *in fine*, centres de recherches scientifiques et acteurs décisionnels du territoire. En France, les documents réglementaires de zonage, en particulier les Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL), définissent des zones de prescriptions spéciales et des mesures de prévention, protection et sauvegarde face aux risques (**Arnaud, 2015**). Les systèmes d'alerte au tsunami s'organisent entre déclenchement des sirènes pour prévenir la population et mise en place d'itinéraires d'évacuation coordonnée vers des zones refuges sécurisées. L'efficacité d'une évacuation dépend considérablement des délais d'alerte, de réaction et d'évacuation (**Leone et al., 2014**). Différentes méthodes existent pour construire un plan d'évacuation tsunami : les macro-simulations basées sur les temps de trajet de l'aléa et les micro-simulations qui introduisent les comportements des individus par exemple via l'utilisation de simulations avec systèmes multi-agents (**Sahal et al., 2012**). Un système d'alerte cohérent devrait se constituer d'une bonne connaissance de l'aléa, d'un réseau d'acteurs organisé, d'une population sensibilisée (connaissances sur le phénomène, gestes à avoir, signalisation et panneaux informatifs) et d'un budget pérenne (**Courteau, 2007**). Dans ce contexte de gestion de crise, les apports de la cartographie sont majeurs. La qualité de la représentation de l'aléa tsunami s'appuie sur des choix sémiologiques pertinents, un degré d'information livrée et l'interopérabilité des données dans un cadre opérationnel (**Arnaud, 2015**).

La gestion anticipée d'un risque imprévisible est très complexe pour les acteurs du territoire. L'aléa tsunami est donc souvent étudié dans des rapports d'évaluation du risque ou programme de recherche scientifique. En 2018, le gouvernement australien, notamment le ministère de l'industrie, de l'innovation et de la science a réalisé un rapport d'évaluation probabiliste du risque de tsunami pour l'Australie (**PTHA18 - Davies & Griffin, 2018**). Celui-ci représente une mise à jour majeure de la version 2008 (**Burbidge et al., 2008**) s'alimentant des diverses avancées scientifiques récentes pour aboutir à des résultats de modélisation optimaux. Les principales avancées du PTHA18 comprennent : un traitement explicite de l'hétérogénéité des glissements sismique (*slip*), des tests de méthodes de génération de tsunami avec 18 tsunamis récents (2006-2016), la quantification explicite des incertitudes dans les taux d'occurrence sismique et les fréquences de tsunami associées, et enfin la fourniture de résultats de modélisation dans de nombreux autres sites, y compris les territoires *offshores* qui n'étaient pas couverts par le PTHA08 (**Davies & Griffin, 2018**).

L'étude vise donc à estimer la fréquence à laquelle un tsunami d'origine sismique atteint une taille donnée sur l'ensemble du territoire australien. Plus concrètement, cette estimation permet d'obtenir des indications quant aux niveaux potentiels de run-up atteints pour une portion de territoire.

Le PTHA18 comprend une liste de sources de tsunami classées en zones homogènes chacune associée à un plan de faille avec des paramètres géologiques prédéfinis. Les sources unitaires se caractérisent par des géométries régulières de 50x50 km avec 1 m de glissement et prennent en compte le détail géométrique du plan de faille en le divisant en un grand nombre de sous-sources. Sur chacune des sous-sources, la déformation cosismique verticale a été calculée en utilisant le modèle standard d'**Okada (1985)**. Ces déformations sont additionnées pour obtenir la déformation co-sismique verticale de l'unité-source dans son ensemble (**Davies & Griffin, 2018**). Les sources unitaires peuvent être combinées entre elles pour correspondre à une magnitude de moment sismique donnée. Dans le cadre du PTHA18, trois types de scénarios ont été créés : les scénarios à glissement uniforme en surface fixe (FAUS), les scénarios à glissement uniforme en surface variable (VAUS) et les scénarios à glissement hétérogène (HS). La propagation du tsunami pour le PTHA18 a été modélisée avec les équations linéaires en eau peu profonde (LSWE). Le code de modélisation est disponible en open source <<https://github.com/GeoscienceAustralia/ptha>> et plusieurs phases de validation du modèle ont été réalisées à partir des événements historiques. L'objectif est de faire tourner le code avec des paramètres sources historiques afin de mesurer les écarts entre la réalité et les résultats obtenus. Le domaine du modèle s'étendait de [-40, 320] degrés de longitude et [-72, 65] degrés de latitude avec une résolution spatiale de grille spatiale à 1 minute d'arc. Les données bathymétriques implémentées sont majoritairement tirées du fichier GEBCO_2014 Grid, version 20141103, <<http://www.gebco.net>> et du modèle d'élévation numérique de **Whiteway (2009)**. Les séries chronologiques de propagation du tsunami sont stockées dans un ensemble de points (**Figure 9**) au large appelés « points d'aléa ». Les emplacements de ces points sont principalement choisis pour aider à la construction des conditions aux limites (ou conditions initiales) pour les modèles d'inondation des tsunamis le long du littoral australien (**Davies & Griffin, 2018**).

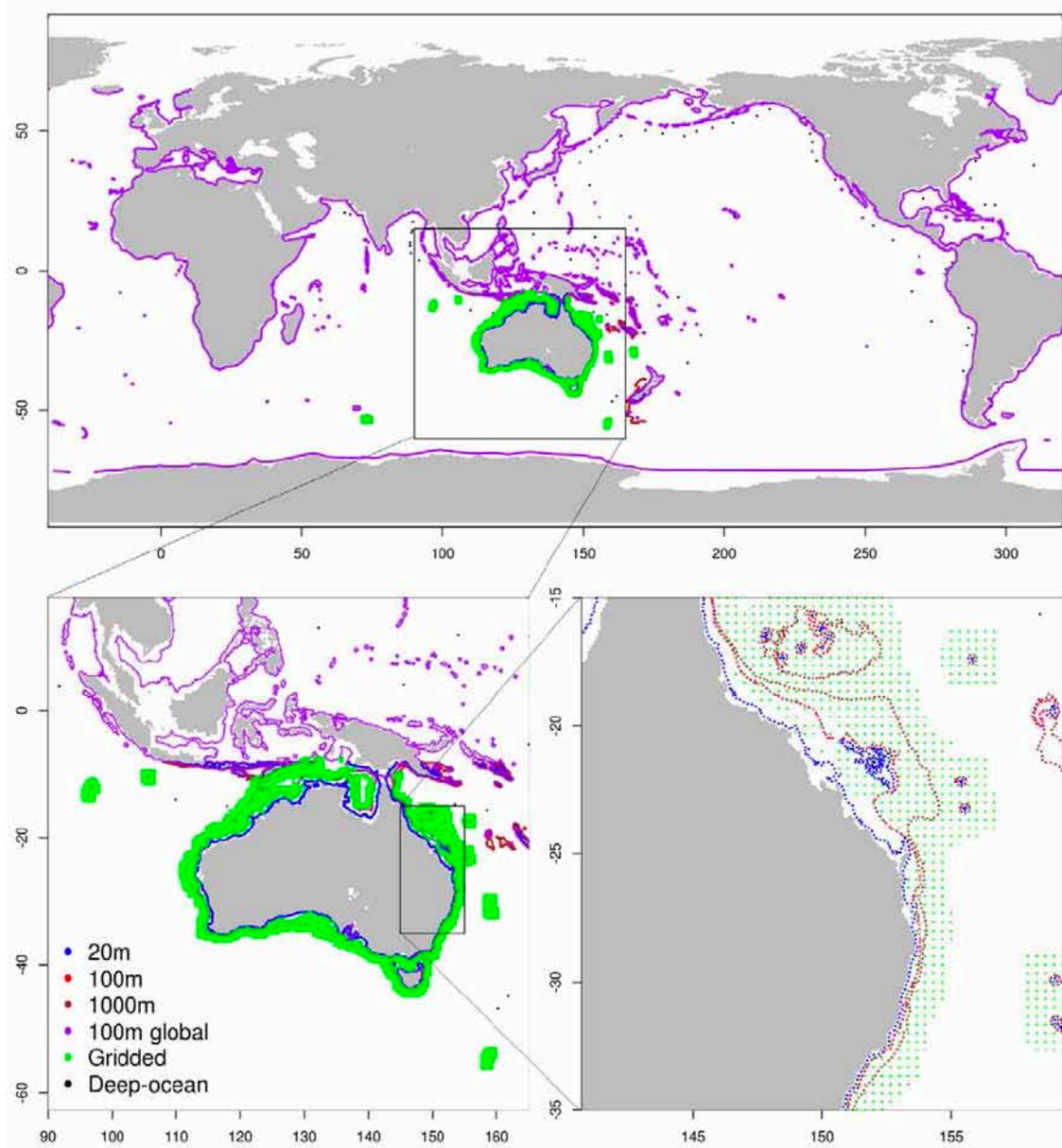


Figure 9 : Carte des points d'aléa sur le littoral australien utilisés pour les modèles de prévision des hauteurs de vagues maximums en cas de tsunami (Source : Davies & Griffin, 2018)

Le rapport de **Davies & Griffin (2018)** présente une cartographie de l'aléa tsunami à partir d'une méthodologie vérifiée par des tests de validation du code de modélisation utilisé. Néanmoins, il existe encore peu de données mesurées *in situ* sur les tsunamis récents ce qui entraîne une part légère d'incertitudes dans l'interprétation des résultats. La méthode d'instauration des points d'aléa interpolés, par probabilité d'occurrence de l'aléa, permet d'avoir une idée concrète du comportement et des impacts attendus d'un tsunami sur le territoire. Ce document constitue donc une base scientifique solide pour modéliser et cartographier l'aléa tsunami dans un objectif de gestion du risque, notamment pour construire des cartes d'évacuation des populations en zone littorale. Finalement, l'étude des tsunamis ne serait pas comme « un jeu de hasard dont nous ne connaissons toujours pas les règles » (**Lomnitz, 1989 ; AIDR, 2018**).

2. Mise en contexte de l'étude

2.1 La Nouvelle-Calédonie : un territoire ultramarin français dans la ceinture de feu du Pacifique

2.1.1 Les caractéristiques géographiques de la Nouvelle-Calédonie

La Nouvelle-Calédonie est un archipel français ultramarin (**Figure 10**) composé d'une île principale, la Grande Terre, des îles Loyauté à l'Est, de l'île des Pins au Sud et des îles Belep au Nord. La Zone Économique Exclusive (ZEE) du territoire s'étend sur 1200 km du Nord au Sud (de 15°S à 26°S) et sur 1800 km d'Ouest en Est (de 157°E à 174°E). La Nouvelle-Calédonie dispose d'une richesse écologique et biologique exceptionnelle (**Andrefouët et al., 2009**) avec pas moins de 40 000 km² de surface récifale et environ 200 km² de surface de mangrove. L'importance et le caractère exceptionnel de ce patrimoine naturel ont motivé la mise en place de nombreuses Aires Marines Protégées à partir des années 1970, ainsi que l'inscription de ses lagons au Patrimoine Mondial de l'UNESCO (**Gonson, 2017**).



Figure 10 : Carte de localisation de la Nouvelle-Calédonie (Source : Éric Gaba, Commons Wikimedia)

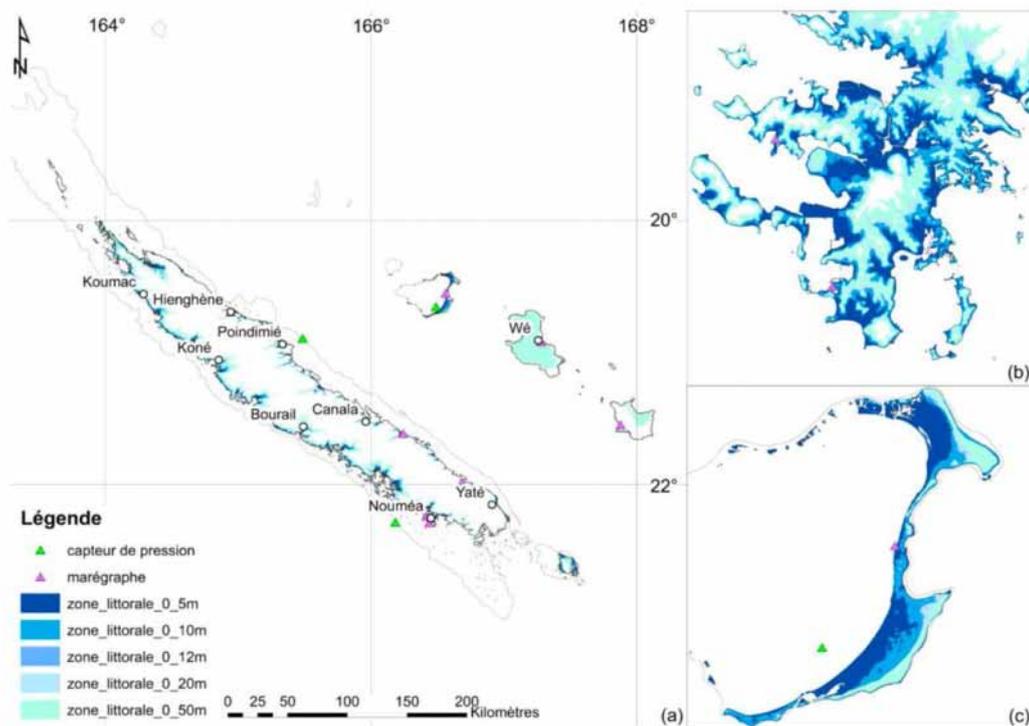
Espace d'enjeux patrimoniaux et socio-économiques, le littoral calédonien est très attractif, regroupant la majorité des activités économiques notamment le tourisme et les activités de pêche. Malgré tout, une grande partie du littoral reste peu institutionnalisée et les politiques d'aménagement et de protection des côtes sont encore discrètes (**Dumas, 2009**). La Nouvelle-Calédonie dispose d'un statut juridique *sui generis* particulier. Tandis qu'en métropole, la gestion des risques repose sur un document règlementaire basé sur un cadastre, le Plan de Prévention des Risques (PPR), en Nouvelle-Calédonie un quart des ressources foncières sont des terres coutumières, ce qui a permis aux propriétaires de conserver leur mode de gestion du territoire (**Le Duff et al., 2014**). Ainsi, la culture kanak est fortement ancrée à l'accès à la terre et rend plus complexes les opérations globales de gestion et d'aménagement des territoires côtiers (**Le Duff et al., 2014**).

2.1.2 La gestion du littoral en Nouvelle-Calédonie

Les compétences en matière de protection de l'environnement sont données aux provinces et ici encore, la législation française reste applicable uniquement après un vote du congrès. La Nouvelle-Calédonie compte près de 269 000 habitants selon le dernier recensement de 2014 dont les ¾ vivent sur une plaine littorale à moins de 1 km de la côte (Thomas, 2019).

Étudier les impacts d'un aléa marin, tel que le tsunami, sur un territoire côtier, c'est tout d'abord bien définir la notion de population littorale. En Nouvelle-Calédonie, la seule délimitation terrestre juridique du littoral est la zone marine terrestre, définie sur une largeur de 81,6 m à partir du trait de côte (Dumas *et al.*, 2005). Actuellement l'altitude minimale d'évacuation en cas de tsunami en Nouvelle-Calédonie, en application du Code de la Sécurité Intérieure (CSI) de l'arrêté n°52 du 25 juillet 2011 relatif au dispositif ORSEC (DSCGR, 2012), est fixée à 12 m. Les travaux de Thomas *et al.* (*in prep.*) approfondissent ces questions de répartition des populations sur la frange littorale dans le cadre de l'étude du risque tsunami en Nouvelle-Calédonie (Figure 11).

Dans le cadre du projet TSUCAL, la zone littorale en Nouvelle-Calédonie soumise au risque de submersion marine correspond à la zone terrestre comprise entre le niveau de la mer (altitude 0 – délimitation du trait de côte) et une altitude x donnée (Thomas, 2019). Cette altitude x varie en fonction des éléments d'étude, en allant de 50 m, ce qui correspond au run-up maximum observé en Indonésie (NOAA, 2019), jusqu'à 10 m et moins pour se concentrer sur les zones les plus à risque.



2.1.3 Géodynamique locale et historique des séismes

La région Pacifique Sud-Ouest se divise en deux zones actives de subduction : la partie Est correspondant à la région des Tonga-Kermadec et la partie Ouest à celle du Vanuatu-Salomon (**Collot *et al.*, 2011**). La Nouvelle-Calédonie se situe à proximité de la zone de subduction du Vanuatu, dans un contexte structural et tectonique très actif (**Pillet & Pelletier, 2004**). Les mouvements horizontaux liés à la convergence des plaques tectoniques et plus particulièrement de la plaque australienne entrant en subduction sous l'arc insulaire du Vanuatu forment un contexte favorable à l'occurrence de séismes (**Figure 12**) et donc de tsunamis. **Dubois *et al.* (1977)** furent les premiers à estimer la vitesse de convergence (12 cm/an) au niveau de la fosse du Vanuatu, entre les îles Loyauté et l'archipel du Sud Vanuatu (**Figure 13**), ce qui en fait une des zones de convergence les plus rapides de la planète.

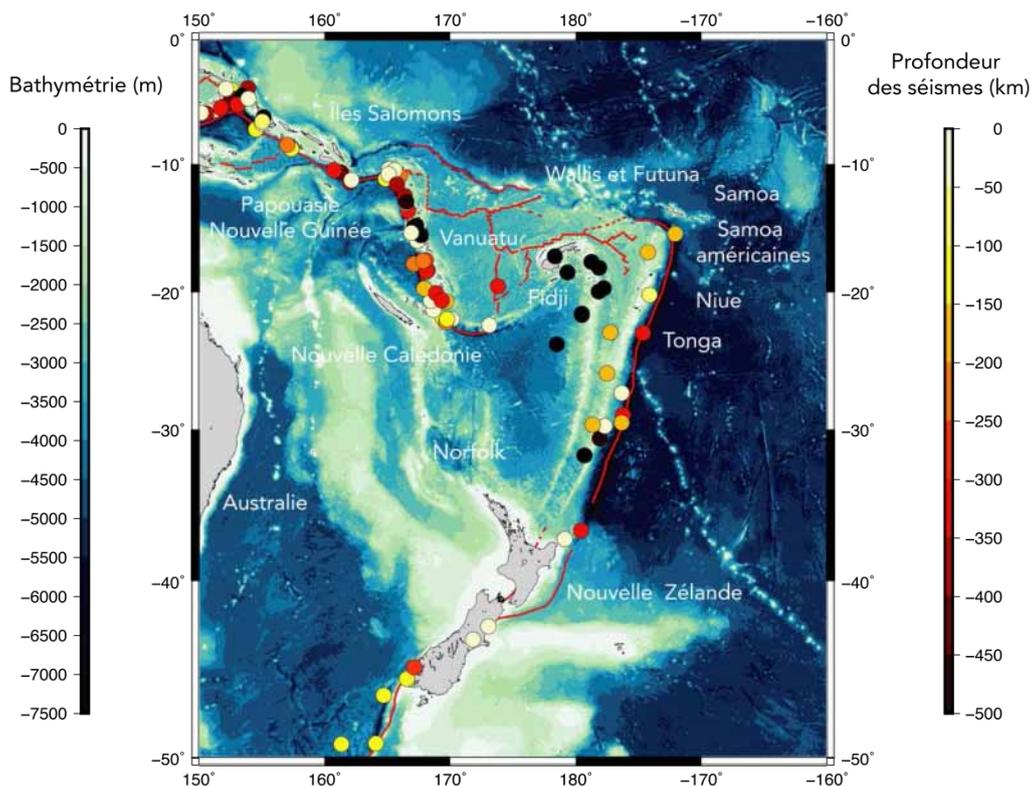


Figure 12 : Contexte tectonique dans le bassin Pacifique Sud-Ouest qui représente les séismes de magnitude supérieure à 7.0 (Mw) sur la période 2000 – 2020. Le fond bathymétrique provient du jeu de données GEBCO 2014. Chaque séisme est identifié par un cercle dont la couleur indique la profondeur de l'évènement en km (source : USGS). Les zones de rupture de faille sont dessinées en rouge (source : USGS) et les principaux territoires insulaires sont mentionnés en blanc.

Par ailleurs, le bombement de la lithosphère océanique avant la zone de subduction associé à la croissance verticale de certaines formations récifales par surrection peut induire des variations topographiques plus ou moins significatives (île des Pins = 0.25mm/an). En effet, les mouvements verticaux récents (Pléistocène supérieur, depuis 125 000 ans) ont pu être décryptés à partir d'un échantillonnage systématique des récifs soulevés des îles et de très nombreux forages sur les récifs frangeants et barrières autour de la Grande Terre (**Launay & Récy, 1972 ; Dubois *et al.*, 1974 ; Coudray, 1976 ; Marshall & Launay, 1978 ; Cabioch, 1988 ; Cabioch *et al.*, 1996**).

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

Le bassin de Nouvelle-Calédonie correspond de fait à une unité géologique de nature océanique/continentale amincie formée par une série de horsts/grabens. Tandis que la ride de Nouvelle-Calédonie est quant à elle un simple fragment continental. Le bassin des Loyautés se compose d'une croute océanique (crétacé supérieur ou paléocène) et de formations récifales soulevées (miocène supérieur ou pléistocène).

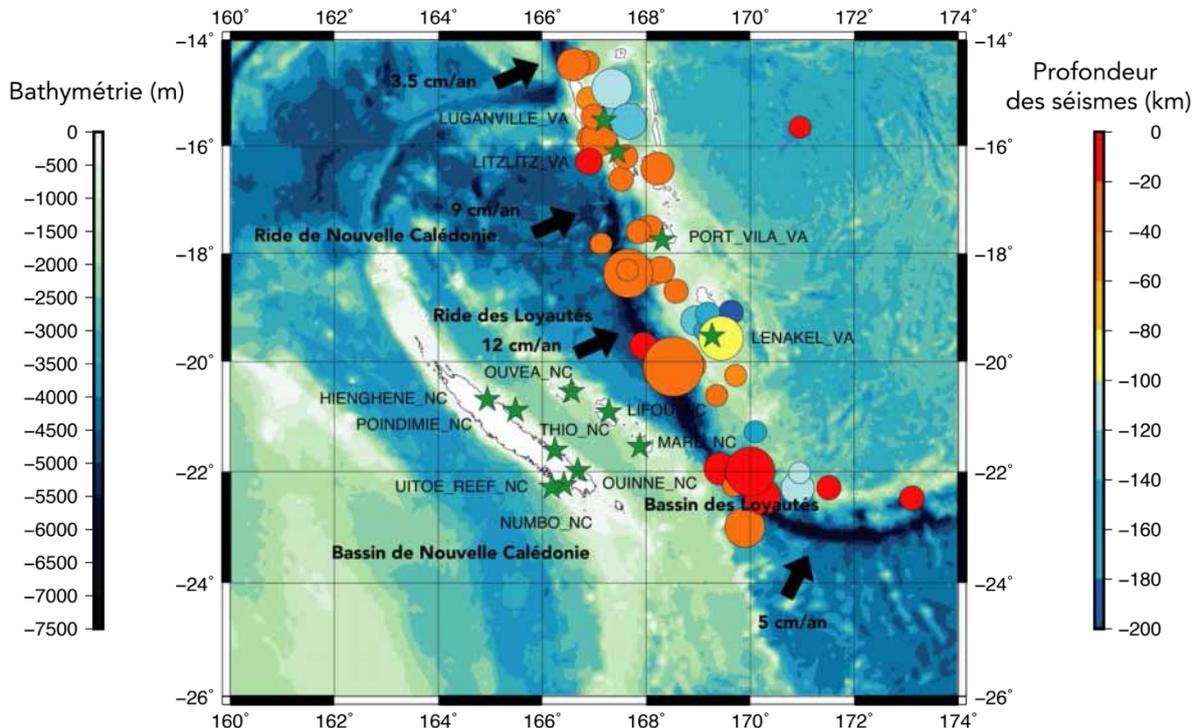


Figure 13 : Localisation des séismes historiques avec une magnitude supérieure à 7.0 (Mw) dans l'arc du Vanuatu sur la période 1973 - 2020. Le fond bathymétrique provient du jeu de données GEBCO 2014. Chaque événement est représenté par un cercle dont le diamètre correspond à la magnitude et la couleur à la profondeur en km (source : USGS). Les mouvements horizontaux sont représentés par les flèches noires associées à une vitesse de déplacement moyenne en cm par an (source : Pillet & Pelletier – 2004). Les grandes unités géologiques (bassin et ride) sont mentionnées en gras (source : Pillet & Pelletier – 2004). Les étoiles vertes correspondent à la position des marégraphes en Nouvelle-Calédonie et au Vanuatu (source : COI).

Les formations géologiques ont une influence sur la géomorphologie océanique et littorale locale. En effet, les systèmes côtiers en Nouvelle-Calédonie sont affectés par plusieurs problématiques identifiées dans les rapports du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), notamment la mobilité des îlots coralliens, l'aléa érosion et le recul du trait de côte et l'aléa submersion marine par les cyclones et les tsunamis. L'étude diachronique des évolutions du trait de côte, l'analyse des impacts du changement climatique et plus particulièrement la hausse du niveau marin sont des données centralisées sur un portail numérique accessible en ligne <<https://georep.nc>>.

Les littoraux calédoniens sont dynamiques et les évolutions spatio-temporelles varient selon la morphologie côtière et les situations météorologiques marines (Garcin & Vendé-Leclerc, 2015). Il semble ainsi essentiel de comprendre et d'intégrer la géomorphologie littorale en relation avec l'hydrodynamisme local dans l'analyse de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie.

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

2.2 Etat des lieux de la connaissance de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

2.2.1 Les catalogues historiques de tsunamis en Nouvelle-Calédonie

Les premières études géophysiques sur les tsunamis historiques dans la région Vanuatu/Nouvelle-Calédonie ont été publiées par **Louat & Baldassari, (1989)**. Les travaux de **Pelletier, (2005)** constitue également une référence pour l'évaluation de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie. De fait, elle est considérée comme un territoire exposé à l'aléa tsunami, néanmoins il est intéressant de chercher à mesurer le degré d'exposition de l'archipel en termes d'intensité et de fréquence de tsunami. En 2008, le secrétaire d'Etat des Affaires d'Outremer et la Commission Française de l'UNESCO cherchent à établir un système d'alerte tsunami en Nouvelle-Calédonie. Un premier catalogue des tsunamis historiques ayant été rapportés en Nouvelle-Calédonie a donc été réalisé par **Sahal et al. (2009)**.

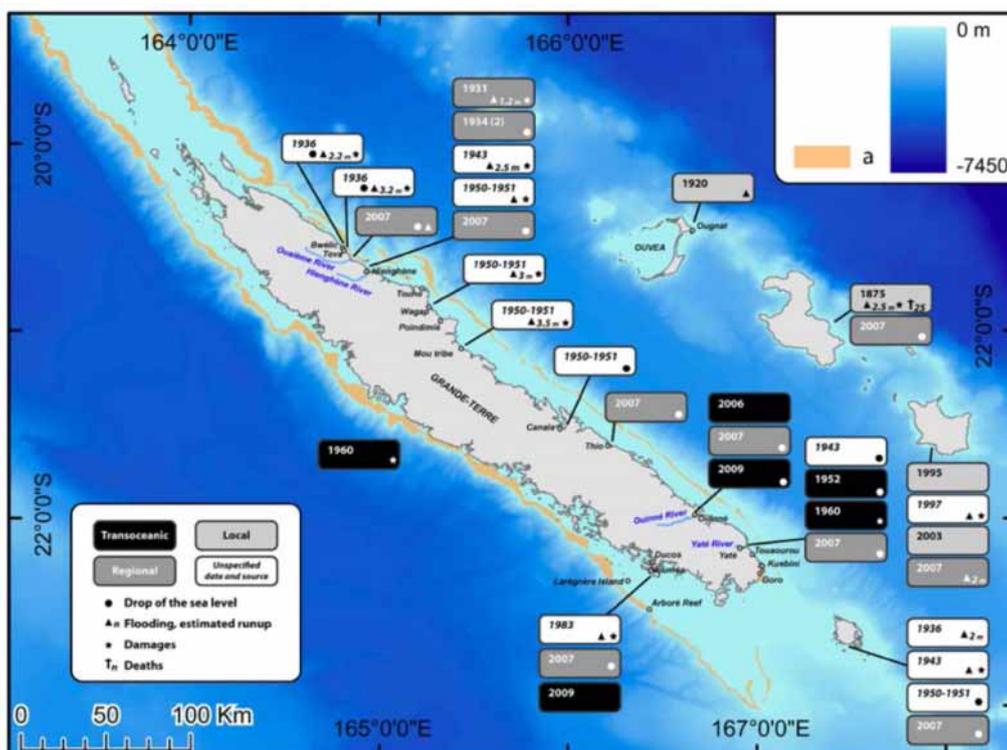


Figure 14 : Régions de la Nouvelle Calédonie ayant subis les impacts des tsunamis entre 1875 et 2009. Chaque tsunami est caractérisé par sa source (transocéanique, régionale ou locale) et par des compléments d'informations sur l'identification de dégâts (étoile), l'estimation des run-up (triangle) et le nombre de décès (croix). Le récif barrière est représenté en orange sur la carte (Source : Sahal et al., 2010)

Basé sur un travail d'archives dans les journaux, rapports météorologiques et témoignages, l'objectif était d'identifier les séismes tsunamigènes ($M_w > 7$). Ainsi, la Nouvelle-Calédonie est exposée aux tsunamis locaux (< 30 min), régionaux (quelques heures) et transocéaniques (**Figure 14**). Au total, 18 évènements de tsunamis ont été recensés entre le 28 mars 1875 et le 30 septembre 2009. L'évènement historique le plus important correspond à celui de mars 1875 qui a touché l'île de Lifou, causant la mort de 25 personnes (**Ella, 1890**). Cependant les témoignages illustrent bien les incertitudes scientifiques qui pèsent sur les impacts générés (**Sahal et al., 2010**).

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

Dans le but de mettre à jour ce catalogue de 2010 sur les tsunamis en Nouvelle Calédonie, une nouvelle approche a été proposée par **Roger et al. (2019)**. L'objectif visait à sélectionner les évènements tsunamigènes (USGS et NOAA) et d'étudier ensuite les enregistrements marégraphiques disponibles afin d'identifier des tsunamis, même de très faibles amplitudes, ayant touchés la Nouvelle-Calédonie et n'ayant pas obligatoirement fait l'objet d'une alerte. Les données ont d'abord été triées par critère de magnitude ($M_w > 6.3$), selon la profondeur (> 100 km) et en fonction de la distance à l'épicentre ($< \text{ou} > 2500$ km). Au total, 25 évènements tsunamigènes sont répertoriés après septembre 2009 dont 6 qui n'étaient pas recensés par la NOAA (**Figure 15**).

Le dernier tsunami en date est celui du 5 décembre 2018, causé par un séisme de magnitude 7.5 au sud de la zone de subduction du Vanuatu : il a été estimé à 2 m sur l'île des Pins et Yaté sur la Grande Terre et associé à quelques dégâts matériels.

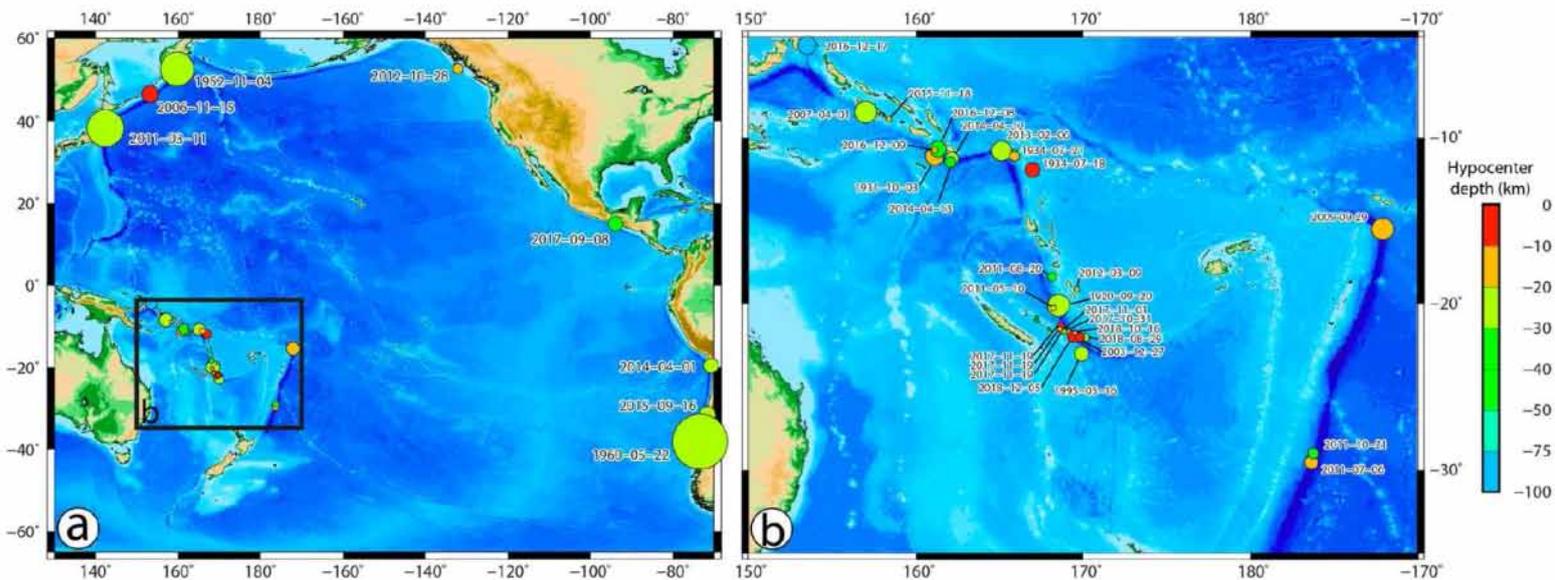


Figure 15 : Localisation des séismes qui ont déclenché des tsunamis enregistrés en Nouvelle-Calédonie a) Échelle du Pacifique b) Échelle régionale. La profondeur des séismes est indiquée par une échelle de couleur (-100 km / 0 km). La magnitude est associée au diamètre des cercles (Source : Roger et al., 2019)

Les 25 évènements s'ajoutent donc aux 12 évènements de **Sahal et al. (2010)**, conduisant à une liste de 37 évènements, dont 45,94 % sont des tsunamis locaux, 32,42 % sont des tsunamis régionaux et 21,62 % sont des télé tsunamis, signalés ou enregistrés pour la Nouvelle-Calédonie au cours des 144 dernières années (**Roger et al., 2019**). Finalement en termes d'évaluation de l'aléa et de gestion du risque tsunami en Nouvelle Calédonie, les séismes tsunamigènes suivants peuvent être considérés : les séismes locaux (< 500 km) de magnitude supérieure à 6.3, les séismes régionaux (> 1000 km) de magnitude supérieure à 6.7 et les séismes suprarégionaux (> 6000 km) de magnitude supérieure à 7.7 (**Roger et al., 2019**).

2.2.2 Comment coordonner la gestion du risque tsunami sur le territoire ?

L'archipel calédonien est ainsi exposé à l'aléa tsunami à plusieurs échelles spatio-temporelles et le gouvernement local se devait de proposer des solutions adaptées de prévention et d'évacuation des populations en cas de risque tsunami. Les répercussions médiatiques de l'évènement de 2004 en Indonésie n'ont fait qu'accélérer la mise en place d'un système d'alerte. La première alerte tsunami de Nouvelle-Calédonie a ainsi été déclenchée le 2 avril 2007. En 2012, le plan ORSEC Tsunami voit le jour suite à un arrêté d'approbation du haut-commissaire de la République en Nouvelle-Calédonie. Ce dispositif a pour objectif d'organiser la capacité de réponse de la Sécurité Civile en cas d'alerte tsunami à l'échelle du territoire. La prévision d'un tsunami est impossible, il convient donc de mettre en place une démarche globale de prévention du risque en partenariat avec les acteurs locaux.

Il est néanmoins possible d'anticiper les conséquences potentielles d'un tsunami post-séisme. Des organismes de recherche scientifiques (Pacific Tsunami Warning Center, Centre Polynésien de Prévention des Tsunamis du CEA, etc.) ont notamment pour objectif d'aider à informer de l'occurrence de l'aléa en particulier dans le Pacifique. Le plan ORSEC se base sur un principe de précaution par gestion binaire en évacuant des secteurs cibles uniquement si le risque est avéré, sinon aucune réponse opérationnelle n'est engagée.

L'Etat puis le gouvernement néocalédonien, depuis le transfert des compétences de gestion des risques à la sécurité civile en 2014 proposent une stratégie de réponse structurelle se matérialisant par le déploiement d'un dispositif d'alerte des populations : les sirènes (**Le Duff et al., 2016**). Depuis 2014, la DSCGR gère le réseau des 70 sirènes distribuées sur la côte est de la Grande Terre et dans les îles. A noter que 9 sirènes sont gérées exclusivement par la commune de Poindimié. Le rayon d'action d'une sirène est de 2 km. La Sécurité Civile envisage d'en installer de nouvelles dans des zones stratégiques exposées et avec une densité de population élevée comme à Nouméa (**Thomas, 2019**). Ce dispositif de sirènes est géré directement au centre opérationnel de la DSCGR en Nouvelle-Calédonie.

En 2018, lors de la mise en route du projet TSUCAL, il existe d'ores et déjà une cartographie du risque tsunami en Nouvelle-Calédonie disponible sur le portail <<https://georep.nc>>. Cependant, celle-ci caractérise le risque tsunami uniquement en fonction de critères de distance à la côte et d'altitude (**figure 16**). La zone d'évacuation, qui est fixée aux zones situées à plus de 12 m d'altitude, est issue de la réglementation mise en place à la Réunion transposée en Nouvelle-Calédonie.

Cette méthode d'évaluation du risque offre un intérêt limité car elle ne prend pas en compte l'aléa de façon objective. La définition des zones d'évacuation doit également être améliorée car elle ne prend en compte ni l'aléa, ni les aménagements et enjeux littoraux. Néanmoins, cette cartographie est informative et reste à la disposition des populations gratuitement.

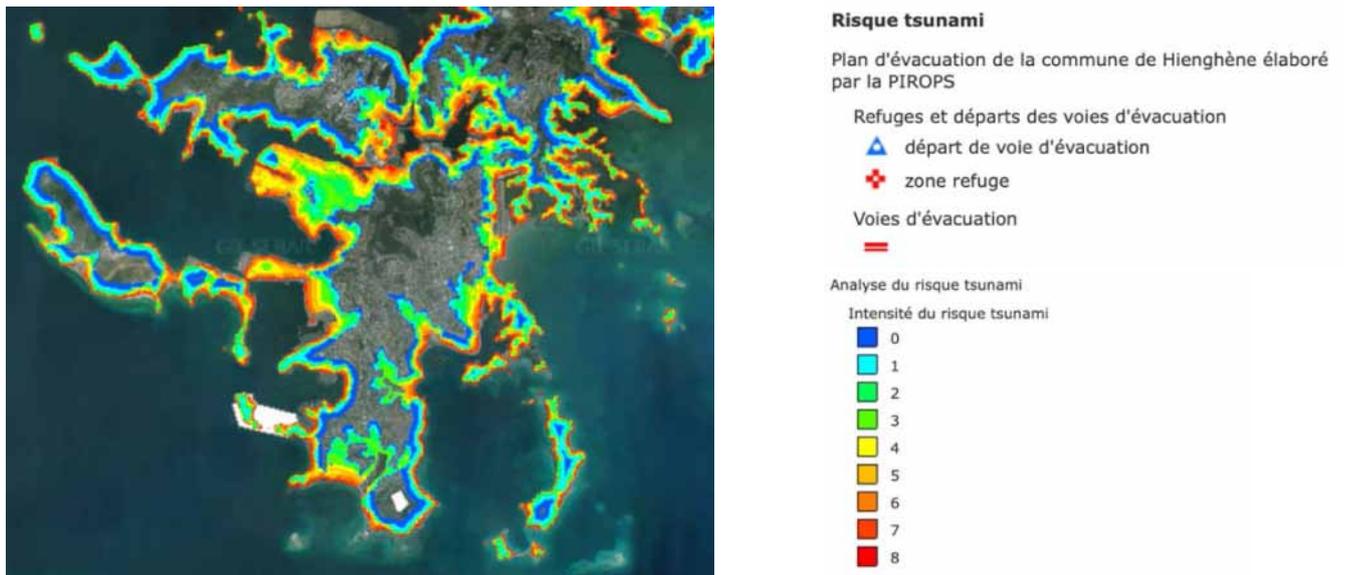


Figure 16 : Cartographie existante du risque tsunami sur Nouméa en Nouvelle Calédonie. L'échelle de couleur représente un gradient d'intensité du risque tsunami compris entre 0 (bleu) et 8 (rouge) selon un critère topographique. La commune de Hienghène dispose d'un plan d'évacuation élaboré par la PIROPS qui n'est pas visible sur la carte. La zone blanche sur l'îlot Brun correspond à une zone militaire (Source : <https://georep.nc>)

2.2.3 Vers une amélioration du système d'alerte tsunami en Nouvelle-Calédonie

Dans un objectif d'amélioration du système d'alerte aux populations en Nouvelle-Calédonie en cas de tsunami, le projet TSUCAL mené par l'IRD a pour objectif de remplacer à court terme la cartographie de l'aléa tsunami existante grâce à une approche multi scénarios. L'idée n'est plus de représenter l'intensité du risque en fonction d'un événement extrême de tsunami mais plutôt l'intensité de l'aléa par les hauteurs de vagues maximums atteintes à la côte au cas par cas (banque de scénarios). Puis, une analyse probabiliste sur le pourcentage d'occurrence de chaque scénario à l'extérieur et à l'intérieur du lagon pourrait être envisagée. L'objectif est de cibler les efforts déployés par les acteurs de la Sécurité Civile sur les zones littorales sensibles après un travail sur la vulnérabilité côtière des populations et des enjeux en Nouvelle-Calédonie. Le projet vise donc à proposer aux acteurs de la DSCGR plusieurs instruments d'évaluation de l'aléa à travers la cartographie de milliers de scénarios de tsunami prédéfinis : une base de données de scénarios, un atlas des scénarios et un outil de visualisation rapide des scénarios. Dans ce rapport, une réflexion géographique basée sur une méthodologie scientifique est apportée pour répondre à la question suivante :

Comment appréhender les techniques d'évaluation de l'aléa tsunami afin d'orienter une gestion coordonnée dans la mise en sécurité des populations côtières de Nouvelle Calédonie ?

Dans un premier temps, les différentes méthodes utilisées pour concevoir des grilles bathymétriques sont abordées et plusieurs tests de sensibilité sur le modèle MOST sont présentés. Dans un second temps, plusieurs cartes d'aléas sont présentées. Enfin, les produits finaux du projet sont discutés avec un regard critique afin d'apporter des pistes d'amélioration sur les représentations de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie dans le cadre de ce projet.

3. Matériel et méthodes

3.1 Le code MOST et les données utilisées

3.1.1 Fonctionnement et paramétrisation du code

Dans le cadre de cette étude sur l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie, il a été décidé d'utiliser le code de modélisation de tsunamis MOST (*Method Of Splitting Tsunami*) mis à disposition par la NOAA. A l'origine développé par la Division de Sibérie de l'Académie des Sciences Russes (SDRAS) à partir des années 1984, puis par la NOAA et le PMEL, cette méthode est basée sur des étapes de fractionnement dimensionnel, c'est-à-dire des calculs de propagation sur deux systèmes hyperboliques en longitude et en latitude (**Titov et al., 2016**). A partir des années 1992, la phase d'inondation est ajoutée au code, gagnant ainsi en précision quant au comportement côtier du tsunami. D'autant plus qu'aujourd'hui, la localisation des séismes et les données DART fournissent les informations nécessaires pour définir correctement l'état initial de la mer et proposer les données pour les modèles à haute résolution d'inondation afin de produire les prévisions d'impacts côtiers d'un tsunami (**Titov, 2009 ; Percival et al., 2011**).

Dans le cadre du projet, les calculs d'inondation ne seront pas effectués en raison de l'indisponibilité de données bathymétriques/topographiques côtières à haute résolution. Le code MOST permet de modéliser un évènement de tsunami en trois phases distinctes : déformation initiale de surface, propagation des ondes et inondations à la côte. Le code MOST dispose d'un premier exécutable pour la déformation/propagation (*most_db_lin_cpu*) associé à un fichier de paramètres (*most_db.in*) et un second pour les imbrications/inondations (*most3_fact_cpu*), lui aussi associé à un fichier de paramètres (*most3_fact.in*).

Pour modéliser plusieurs centaines de scénarios, les calculs s'effectuent dans le cluster informatique de l'IRD. Des tests ont aussi été menés sur un poste fixe Dell. Comme nous l'avons vu précédemment, la modélisation de tsunami nécessite deux types de données en entrée : la bathymétrie sous la forme d'une ou plusieurs grille(s) et les paramètres de la/les source(s) sismique(s). Avant de démarrer tout calcul dans MOST, il est essentiel de bien vérifier la condition CFL : la condition Courant – Friedrichs – Lewy (ou CFL) est une condition de la stabilité des méthodes numériques qui modélisent les phénomènes de convection ou de vagues (**Caminha, 2019**) :

$$C \text{ (Vitesse)} = \text{Distance (Taille des noeuds en } x \text{ et en } y) \div \text{Temps (Pas de temps)}$$

$$C \text{ (Vitesse)} = \sqrt{(g \text{ (Accélération gravité)} \times h \text{ (Profondeur)})}$$

$$\text{Temps (D)} = \text{Distance} \div \text{Vitesse}$$

$$\text{Stabilité du modèle (CFL)} = D' = D \times \frac{1}{2}$$

Afin de pouvoir respecter le CFL, il est important de bien conserver les données d'information sur la grille bathymétrique, en particulier le nombre de nœuds en x et en y (n_x et n_y) ainsi que la profondeur maximum atteinte dans la grille (z_{min}). Le manuel d'utilisation de MOST propose néanmoins des résolutions minimales et conseillées pour les grilles bathymétriques (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Les résolutions minimales requises (colonne 3) et recommandées (colonne 2) par MOST pour la grille 0 (déformation et propagation) et les sous-grilles 1, 2 et 3 (inondation) (Source : MOST, 2006)

Étapes MOST	Résolution recommandée	Résolution requise
Déformation/Propagation	1 arc minute (1800m)	4 arc minutes (7300m)
Inondation : GRID 1	36 arc secondes (1080m)	2 arc minutes (3600m)
Inondation : GRID 2	6 arc secondes (180m)	18 arc secondes (500m)
Inondation : GRID 3	1 arc seconde (30m)	2 arc secondes (60m)

3.1.2 Récupération des données bathymétriques et topographiques

Les données GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Ocean*) correspondent à une collection de données bathymétriques à l'échelle mondiale avec une résolution de 30 secondes soit environ 921 m à l'équateur, et seront utilisées au format NetCDF dans le cadre des tests avant modélisation. Ces données sont accessibles directement en ligne gratuitement sur la plateforme BODC : https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/

Les données bathymétriques du Modèle Numérique de Terrain de Nouvelle-Calédonie représentent une compilation de données bathymétriques et topographiques issues de sources différentes (**Roger, 2020**). La collecte et l'assemblage des jeux de données s'accompagnent d'un travail de lissage par des méthodes d'interpolation permettant de produire un MNT propre, sans trop de discontinuités spatiales ni d'aberrations numériques. Le MNT final sert de point de départ à la conception de grilles à haute résolution spatiale (jusqu'à 100 m par exemple) et sera prochainement disponible sur le site du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) comme MNT de façade pour la Nouvelle-Calédonie.

La réalisation de certaines grilles à très haute résolution sur certains sites en Nouvelle-Calédonie a nécessité un travail de digitalisation et d'édition des données bathymétriques. Les cartes marines de la Nouvelle-Calédonie digitalisées au format TIFF, puis géoréférencées par Jean Roger, ont également été utilisées pour vérifier la spatialisation des données bathymétriques sur certaines grilles (**Roger, 2020**). Les données des cartes marines du Vanuatu ont également été récupérées sur <http://fishing-app.gpsnauticalcharts.com/i-boating-fishing-web-app/>. Les données de sondes des Cartes Électroniques de Navigation officielles (ENC), en format SHP, ont été transmises par le SHOM dans le cadre d'une convention. Par ailleurs, les données bathymétriques multifaisceaux, en format xyz, issues des récentes campagnes bathymétriques menées par le SHOM ont été privilégiées dans la construction de ces grilles.

En ce qui concerne les données terrestres, elles sont issues de la deuxième version du produit de données du modèle numérique SRTM30 (*Shuttle Radar Topography Mission*) créé à partir des campagnes topographique de la NASA disposant d'une résolution spatiale d'une seconde soit environ 30 m. Les données sont disponibles directement en ligne sur la plateforme de l'USGS : <<https://earthexplorer.usgs.gov>>. Un MNT terrestre distribué par la DTSI en format TIFF a également permis d'utiliser des données topographiques à 10 m de résolution spatiale sur la Nouvelle-Calédonie : <<http://georep-dtsi-sgt.opendata.arcgis.com/pages/altitude>>.

3.2 Méthodologie de conception des grilles bathymétriques

3.2.1 Des données bathymétriques brutes vers un maillage

Une grille bathymétrique utilisée en entrée par tous les codes de modélisation numérique de tsunamis est un maillage de points dans lequel chaque point dispose d'informations de localisation en longitude/latitude et d'une valeur de profondeur/altitude. Avant de créer une grille, il est nécessaire de pouvoir visualiser correctement l'emprise spatiale des grilles bathymétriques. Pour se faire, nous allons utiliser le logiciel GMT (*Generic Mapping Tools*, **Wessel et al. (2013)**) qui permet de réaliser des cartes à partir de jeux de données, et notamment d'introduire des données ou des formes géométriques dans une carte géoréférencée grâce à des lignes de commandes Bash sous UNIX.

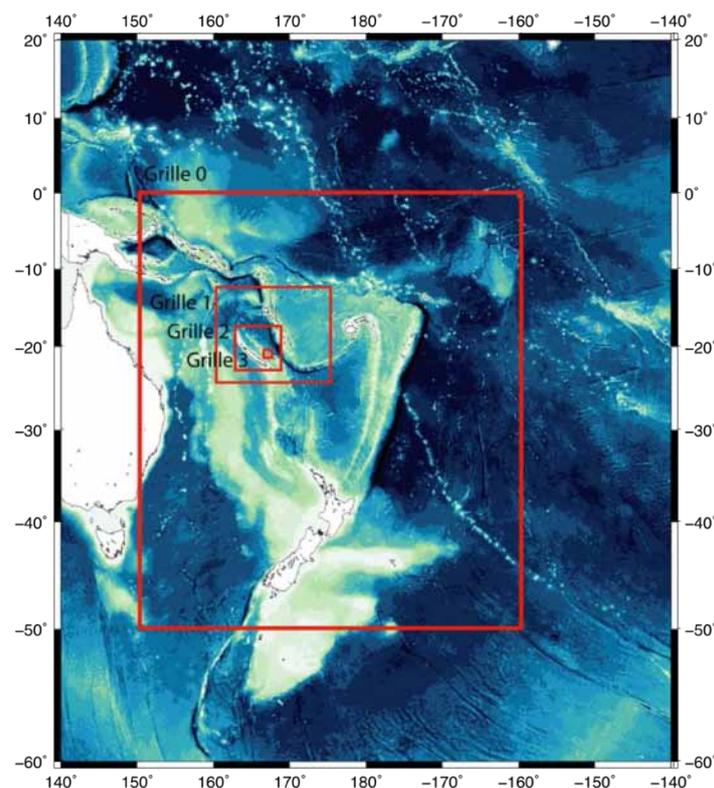


Figure 17 : Emprise spatiale et imbrication des différentes grilles bathymétriques (en rouge). Le fond bathymétrique provient du jeu de données GEBCO 2014. La grille 0 correspond au domaine dans lequel MOST calcule la déformation initiale et la propagation. Les sous-grilles 1, 2 et 3 correspondent aux domaines avec une résolution plus fine et dans lesquels MOST effectue les calcul d'imbrication.

Un script a été réalisé pour automatiser la séquence de découpage des données bathymétriques selon plusieurs étapes : insertion d'un fichier de bathymétrie, du trait de côte mondial et des fichiers contenant les cadres des grilles. Chaque fichier de grille contient les coordonnées géographiques des sommets de la grille associée. Le script génère ensuite une carte avec la superposition de chaque grille, c'est une étape primordiale pour la suite du travail afin de bien connaître les délimitations des grilles bathymétriques (**Figure 17**).

Le logiciel QGIS 3.0 et l'outil de découpage d'un fichier raster va permettre d'extraire la zone d'étude à partir du MNT en renseignant les coordonnées géographiques de l'emprise (Xmin, Xmax, Ymin, Ymax). Avec l'extension GRASS et l'option r.resample, la résolution d'un fichier image peut être modifiée en modifiant la taille au pixel (100m vers 180m = 0.0009 vers 0.00162). Enfin, avec l'extension GDAL et l'option GDAL2XYZ, il est possible d'exporter un fichier raster vers un fichier xyz qui sera enregistré en format csv dans un dossier de sortie. Une fois que le fichier xyz est créé, il est inséré dans un script GMT pour le nettoyer, c'est-à-dire basculer les valeurs de profondeur en positif et remplacer les séparateurs espace/tabulation par des virgules.

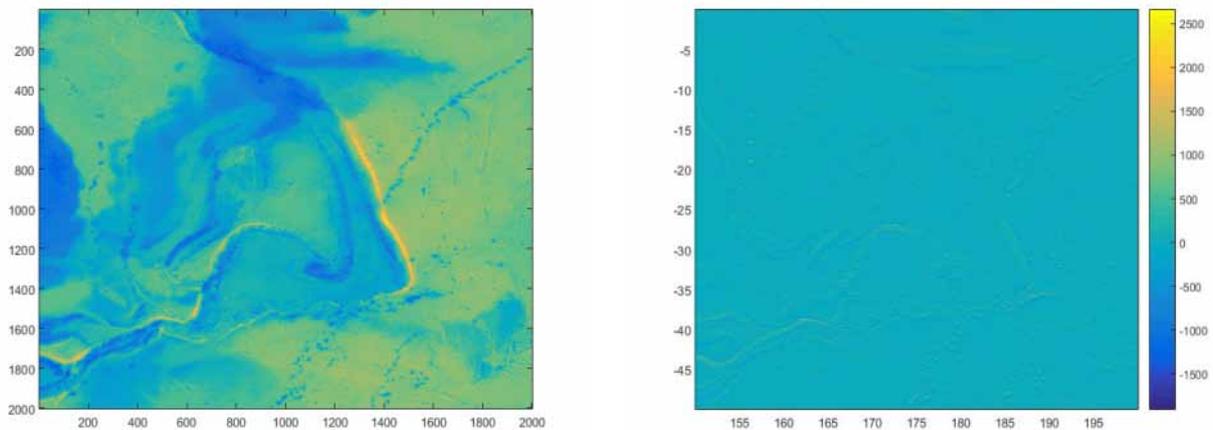


Figure 18 : Grille bathymétrique lisible au format MOST (à gauche) et gradients de bathymétrie permettant d'identifier une valeur de bathymétrie extrême (à droite) (Source : NOAA)

Enfin, la finalisation d'une grille bathymétrique s'effectue directement dans MATLAB, un fichier .m contenant les commandes a été réalisé par J. Roger et P. Douillet. Après avoir déclaré les variables n_x et n_y , contenues dans le fichier `grd` pour les données GEBCO et dans le fichier raster pour les données MNT, le fichier d'entrée `xyz` va être converti en fichier texte par un second script `writemostgrid` qui permet de convertir les données `xyz` en grille bathymétrique lisible par le code de modélisation MOST (**Figure 18**).

3.2.2 Tester la sensibilité du modèle avec les grilles

Dans notre cas et à l'issue des tests réalisés à partir des données GEBCO, plusieurs grilles ont été définies avec l'ensemble de l'équipe afin de les introduire dans MOST (**Tableau 2**). Le projet se compose d'une architecture de grilles avec des résultats de modélisation pour la Nouvelle-Calédonie

et des résultats pour le Vanuatu. Les grilles 0 servent à calculer la déformation initiale puis la propagation du tsunami. La grille 0 Pacifique va être utilisée pour les scénarios en champ lointain et la grille 0 Pacifique Sud-Ouest va être utilisée pour les scénarios en champ proche afin d'optimiser les temps de calculs. Ce sont ensuite trois types de fichiers de sorties qui sont créés en format NetCDF : les hauteurs en tous points (ha) et les vitesses horizontales en x et en y (ua et va). Les grilles imbriquées A, B et C sont à plus haute résolution et extraites à partir de données MNT à 100 m.

Tableau 2 : Paramètres des grilles du schéma d'imbrication MOST pour le projet. Chaque grille est associée à un domaine géographique (colonne 2), une résolution spatiale (colonne 3) et la source des données (colonne 4) (Source : IRD - 2020)

Numéro de grille	Emprise spatiale	Résolution	Source
Grille 0	Pacifique	4 minutes	NOAA
Grille A	Pacifique Sud-Ouest	2 minutes	GEBCO / NOAA
Grille B	Nouvelle-Calédonie / Vanuatu	30 secondes	IRD
Grille C	Nouvelle-Calédonie / Loyautés	180 m	IRD

La première série de test du code MOST concerne la phase de déformation/propagation d'un tsunami. Chaque modélisation lance un exécutable (*most_db_lin_cpu*) et tourne avec un fichier de paramètre (*most_db.in*) dans lequel il faut renseigner le répertoire où se trouve la grille bathymétrique ainsi que les paramètres de propagation à utiliser avec cette grille, notamment la durée du pas de temps (*timestep*), le nombre de pas de temps (*amount of timestep*) et le nombre de sortie pour chaque pas de temps (*snapshots*). Une profondeur minimale pour faire les calculs doit également être implémentée (*minimum depth for offshore*). Les autres paramètres dans le fichier *most_db.in* concernent la/les source(s) du tsunami et seront traitées ultérieurement. Les conditions du CFL dépendent ainsi des paramètres utilisés en fonction de la résolution de la grille bathymétrique. Les premiers résultats de modélisation avec des grilles bathymétriques extraites du fichier GEBCO_1D_2014 se sont révélés peu convaincants. Effectivement, à partir d'un certain pas de temps, les grilles avaient tendance à se vider. C'est ce qu'on appelle une vidange de grille (**Figure 19**).

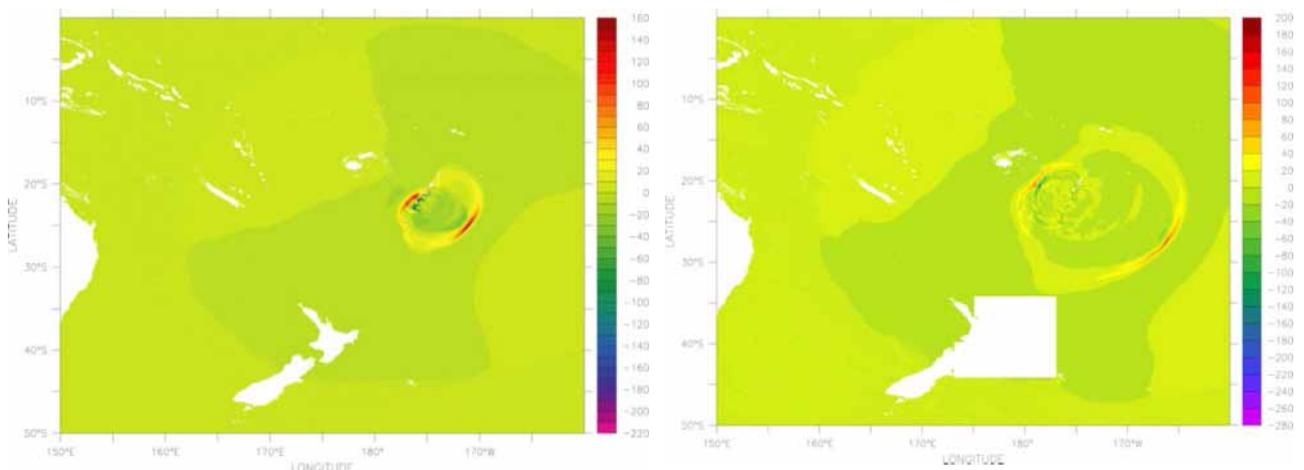


Figure 19 : Modélisation d'un scénario de tsunami sur la zone de failles Tonga-Kermadec dans le Pacifique Sud-Ouest après 15 min de propagation sous MOST sans vidange de grille (à gauche) et après 45 min de propagation sous MOST avec une vidange de grille sur la Nouvelle-Zélande (à droite)

La deuxième série de test du code concerne la phase d'inondation liée au tsunami. La phase d'inondation est en fait une imbrication de plusieurs grilles de résolution différentes et qui dépend d'un autre exécutable (*most3_fact_cpu*) nécessitant lui aussi un fichier de paramètre (*most3_fact.in*). Les résultats de propagation (ha, ua et va) de/des grille(s) 0 à travers la mise en place de liens symboliques vers ces fichiers de sortie ainsi que trois sous-grilles (A, B et C) à résolution plus fine doivent être introduites. Le fichier de paramètre correspond au CFL de la grille C et comprend des caractéristiques similaires au fichier *most_db.in*. Effectivement, pour effectuer les calculs, il est important de renseigner : l'amplitude minimale des vagues (*minimum amplitude of input offshore wave*), l'élévation maximale des terres émergées (*input dry land depth*) et le coefficient de friction pour les calculs d'inondation ainsi que le seuil maximum de hauteur de vague à ne pas dépasser (*blowup limit*).

Après plusieurs tests sur une série de grilles extraites du GEBCO, les sous-grilles ne doivent pas forcément être issues du même jeu de données et peuvent être imbriquées à partir de données bathymétriques variées. Chaque grille dispose d'un nombre défini de nx et ny, les tests ont montré qu'il n'existe pas nécessairement une loi de décroissance du nombre de nx et ny de la grille A vers la grille C. Celui-ci aura uniquement une influence sur les temps de calculs et les volumes de stockage. Afin de résoudre les problèmes de vidange des grilles dans les phases de propagation mais aussi d'imbrication, la NOAA a mis à disposition de l'équipe (**C. Moore, communication pers.**) un filtre « *ssfilter* » permettant de nettoyer les points de bathymétrie aberrants (**Figure 20**). Ce filtre permet de lisser la bathymétrie en supprimant les signaux haute fréquence.

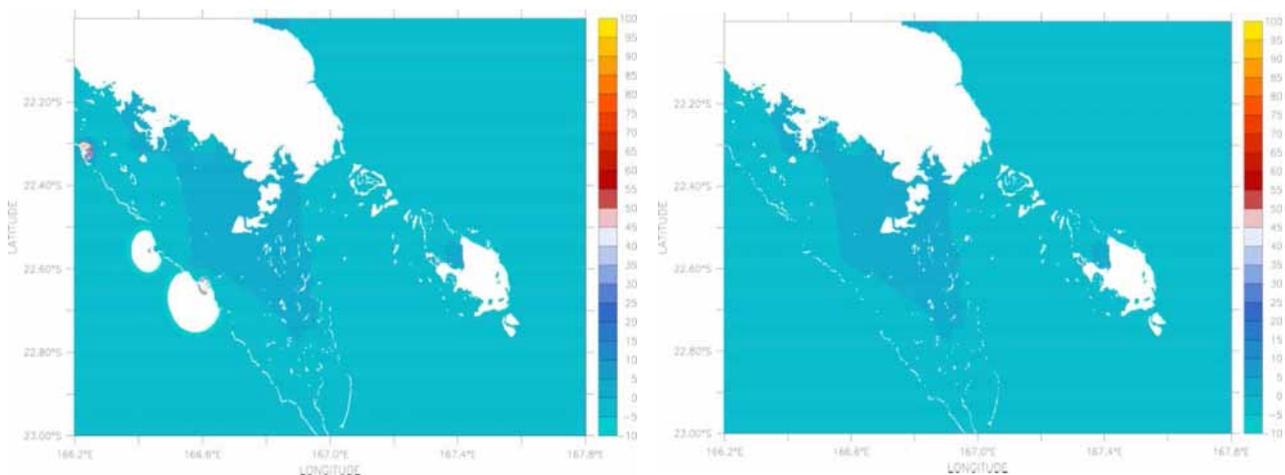


Figure 20 : Amplitudes de vagues (cm) dans le lagon sud de Grande Terre issues d'un scénario de tsunami sur l'arc du Vanuatu. Des points de bathymétrie à faible profondeur entraînent une explosion du modèle sur le récif barrière (à gauche). Ces points sont supprimés après l'application du filtre de la NOAA pour les grilles bathymétriques et l'explosion n'a plus lieu (à droite)

La phase d'imbrication des grilles permet d'observer le comportement d'un tsunami dans des sous-grilles à échelle fine, en particulier des baies ou des ports. De plus, l'imbrication a été sollicitée dans le cadre d'une étape de validation du code avec l'évènement récent du 5 décembre 2018.

3.3 Ajustement des sources des scénarios de tsunami

3.3.1 Utilisation des sources ComMIT

Il a été choisi d'utiliser les sources de la base des scénarios ComMIT pour disposer d'une couverture générale sur l'ensemble du Pacifique. Les sources ComMIT sont issues de l'Interface Communautaire de Modélisation de Tsunami développée initialement pour les pays de l'Océan Indien suite au tsunami de 2004 en Indonésie. La Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) s'efforce donc de coordonner le renforcement des capacités, en matière de prévision du risque tsunami, pour créer des communautés côtières résilientes aux tsunamis dans le monde (Titov *et al.*, 2011). Au-delà de l'information sismique rapportée et souvent insuffisante, l'objectif est de proposer une base de données de scénarios de tsunamis à l'échelle globale réutilisable pour construire les systèmes d'alerte à l'échelle régionale/locale. Cette base de données regroupe 4418 sources dispersées à l'échelle mondiale dont la moitié sont situées dans le Pacifique (Figure 21).

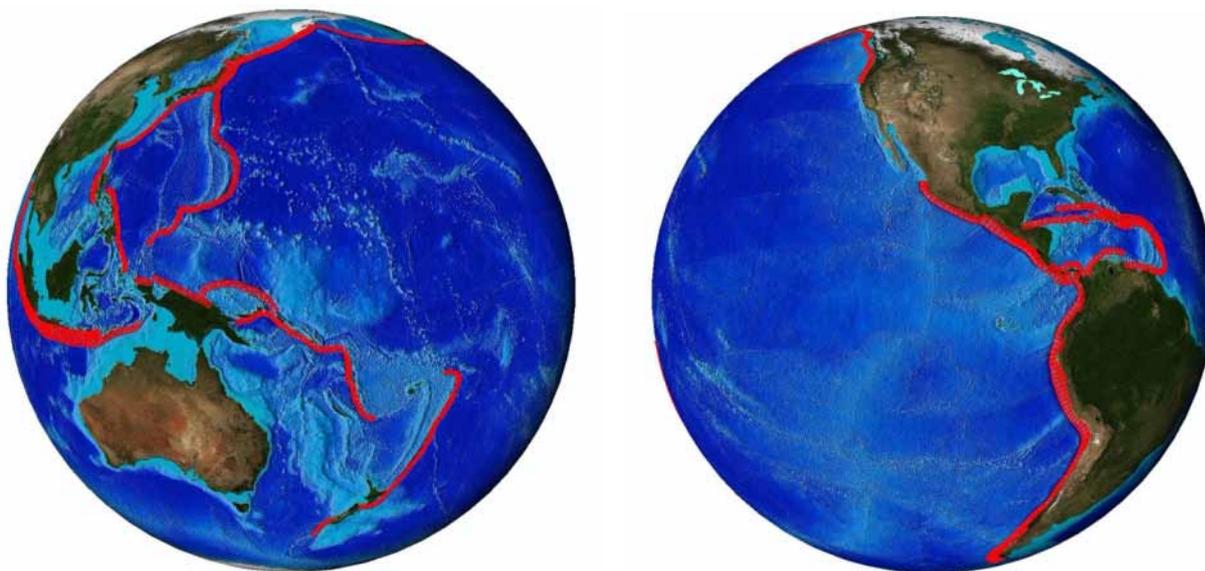


Figure 21 : Répartition des scénarios ComMIT autour du bassin pacifique Ouest (à gauche) Est (à droite) (Source : ComMIT)

Chaque source se caractérise par un code d'identification qui reprend la localisation (New Britain – Salomon – Vanuatu = NV), un code de latitude (32) et un code de profondeur (a). Dans la base de données ComMIT, chaque source est également associée à un plan de faille à dimension fixe (100 km de longueur et 50 km de largeur pour un glissement d'un mètre) qui est localisé par les coordonnées géographiques relevées au centre du bord inférieur du rectangle de déformation. Chaque source se définit par des paramètres géologiques préalablement renseignés par la NOAA (*Depth, Dip, Rake, Slip, Strike*). Les scénarios unitaires dans ComMIT sont enregistrés avec une magnitude 7.5 ($1.0 * nv32a$), mais pour obtenir des scénarios de magnitude supérieure, comme par exemple une magnitude 8.0, un coefficient n s'applique à un ou plusieurs scénarios pour créer des multi patchs regroupant plusieurs sources ($2.805 * nv31a + 2.805 * nv32a$).

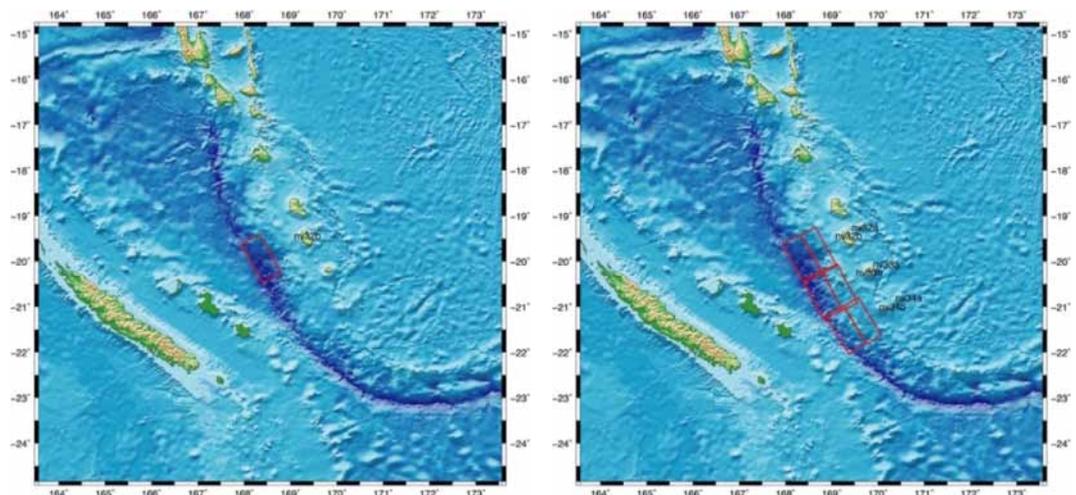
Ici, uniquement les sources du Pacifique ont été sauvegardées soit environ 3000 sources unitaires ComMIT. Les scénarios sont classés en fonction de leur position par rapport à la Nouvelle-Calédonie. Ainsi au-delà des 2500 km, les scénarios sont considérés en champ lointain tandis qu'à moins de 2500 km, ils sont considérés en champ local ou régional. En champ lointain, les paramètres géologiques établis par la NOAA sont amplement satisfaisants, mais qu'en est-il des scénarios à une échelle plus fine ? L'enjeu est donc de comprendre sur quels critères géologiques a été construit la base ComMIT. Une notice technique sur les sources utilisée dans le cadre du projet (**Roger & Pelletier, 2020**) fait une synthèse des relations existantes entre paramètres de faille et magnitude basée sur les travaux de **Wells & Coppersmith (1994)** puis ceux de **Strasser & Blaser (2010)** afin de définir des conditions sismiques en accord avec la géodynamique interne locale.

Tableau 3 : Géométrie des plans de failles pour un séisme 7.5 avec un patch unitaire ComMIT (en rouge) et avec un patch unitaire ComMIT modifié (en noir) (Source : Bernard Pelletier et Jean Roger – 2020)

Paramètres de faille envisagés				
Scénarios	Magnitude	Longueur (km)	Largeur (km)	Glissement (m)
ComMIT	7.5	100	50	1
IRD	7.5	80	40	2

En ce qui concerne le champ proche, le redimensionnement de patches, plus petits, correspondraient davantage aux caractéristiques de la zone de subduction Salomon – Vanuatu (**Tableau 3**). Même si les changements géométriques des patches semblent plus adaptés à la géologie locale, l'objectif du projet étant de fournir des scénarios de tsunami maximisant en tous points, les scénarios ComMIT sont largement suffisants. La base de données ComMIT comporte cependant quelques limites dans son utilisation. Effectivement, celle-ci comporte des patches unitaires de magnitude 7.5 et des scénarios multi-patches de magnitude 8.0, 8.4, 8.8 et 9.2. Un croisement des données ComMIT avec des données RIFT (UNESCO) permet de récupérer des scénarios intermédiaires (i.e. 8.2) et ainsi compléter la base avec l'ajout de plusieurs centaines de scénarios. Les scénarios de la base ComMIT/RIFT sont donc construits en mono-patch mais également en multi-patches, c'est-à-dire, grâce à la combinaison de plusieurs scénarios 7.5 pour augmenter l'énergie totale libérée par un séisme de plus forte magnitude (**Figure 22**).

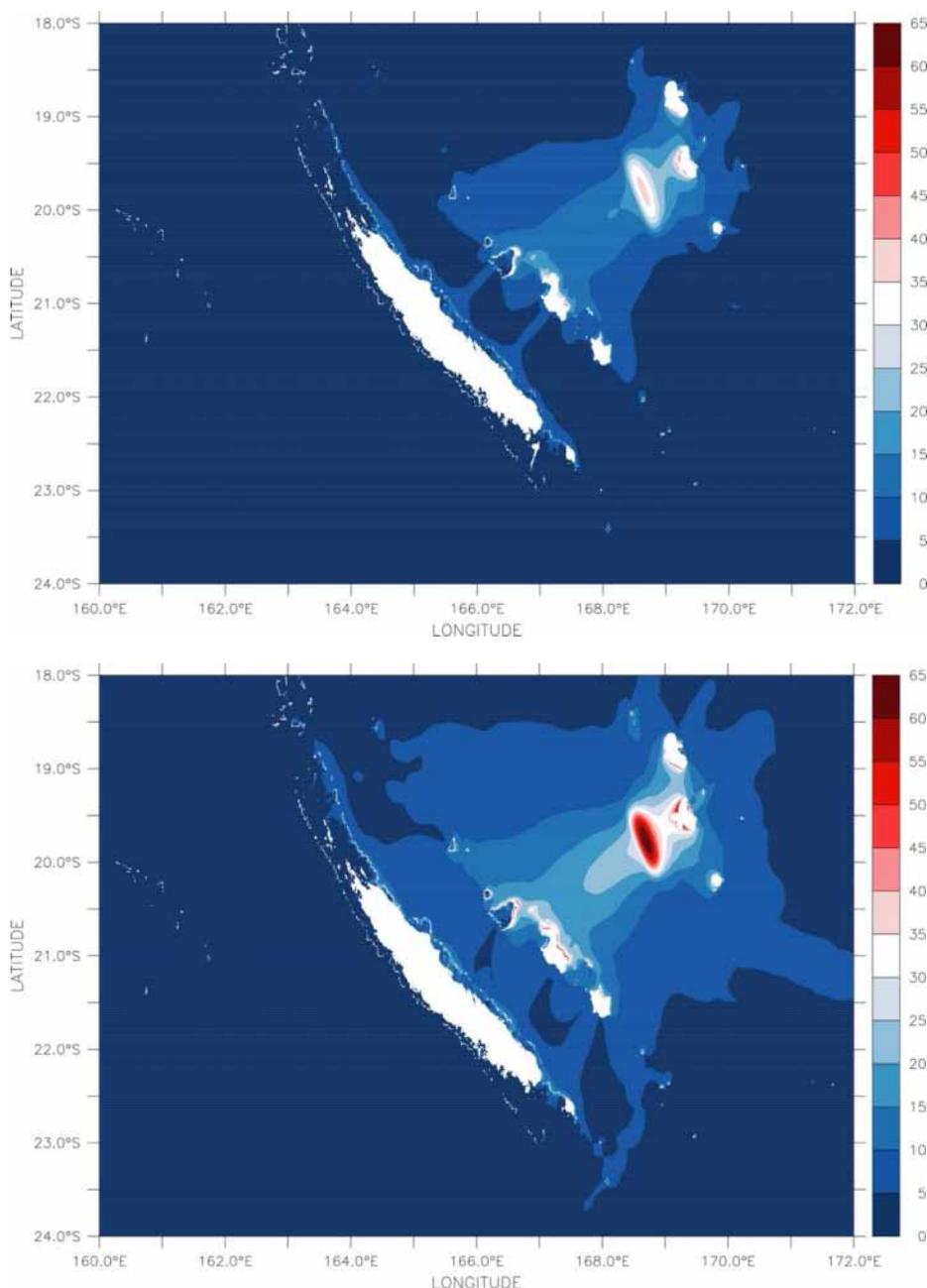
Figure 22 : Localisation d'un scénario ComMIT en patch unitaire (à gauche) et d'un scénario ComMIT en multi-patches (à droite) sur l'arc du Vanuatu (Source : Jean Roger - 2020)



3.3.2 Tester la sensibilité du modèle avec les paramètres de source

L'utilisation du code MOST nécessite des paramètres de sources pour effectuer les modélisations de tsunamis. Ces paramètres sont renseignés dans le fichier *most_db.in* et comprennent plusieurs variables citées précédemment. Afin de tester la sensibilité du code aux variations de paramètres de source, plusieurs calculs ont été réalisés notamment en faisant varier l'intensité du séisme par le biais de la géométrie du plan de faille et de la profondeur. Il existe une différence non négligeable entre des paramètres ComMIT originaux (100x50x1) et ceux modifiés (80x40x2) pour un séisme de magnitude similaire 7.5 (**Figure 23**). Les hauteurs de vagues maximum peuvent être doublées en particulier sur les îles Loyauté et dans les baies. La variation des dimensions du plan de faille joue un rôle prépondérant dans les impacts attendus d'un tsunami. Le code MOST est donc très sensible à l'ajustement de ces paramètres géologiques.

Figure 23 : Hauteurs de vagues maximums attendues (cm) pour un scénario 7.5 sur l'arc du Vanuatu avec un plan de faille ComMIT (au-dessus) et un plan de faille ComMIT modifié (en dessous). Les échelles de couleurs sont identiques (Source : MNT NC - 2020)



D'autres paramètres sont également modifiables, c'est le cas de l'azimut (*strike*), de la profondeur (*depth*), du glissement (*slip*), de l'angle de glissement (*rake*) et du pendage (*dip*). Une première série de tests visait à faire varier la valeur de l'azimut sur les scénarios en champ régional et supra régional avec des magnitudes différentes comprises entre 7.5 et 8.5 (**Figure 24**). Une modification de 10° en sens horaire et antihoraire par rapport à l'azimut de base entraîne des différences notoires quant aux zones impactées par le tsunami.

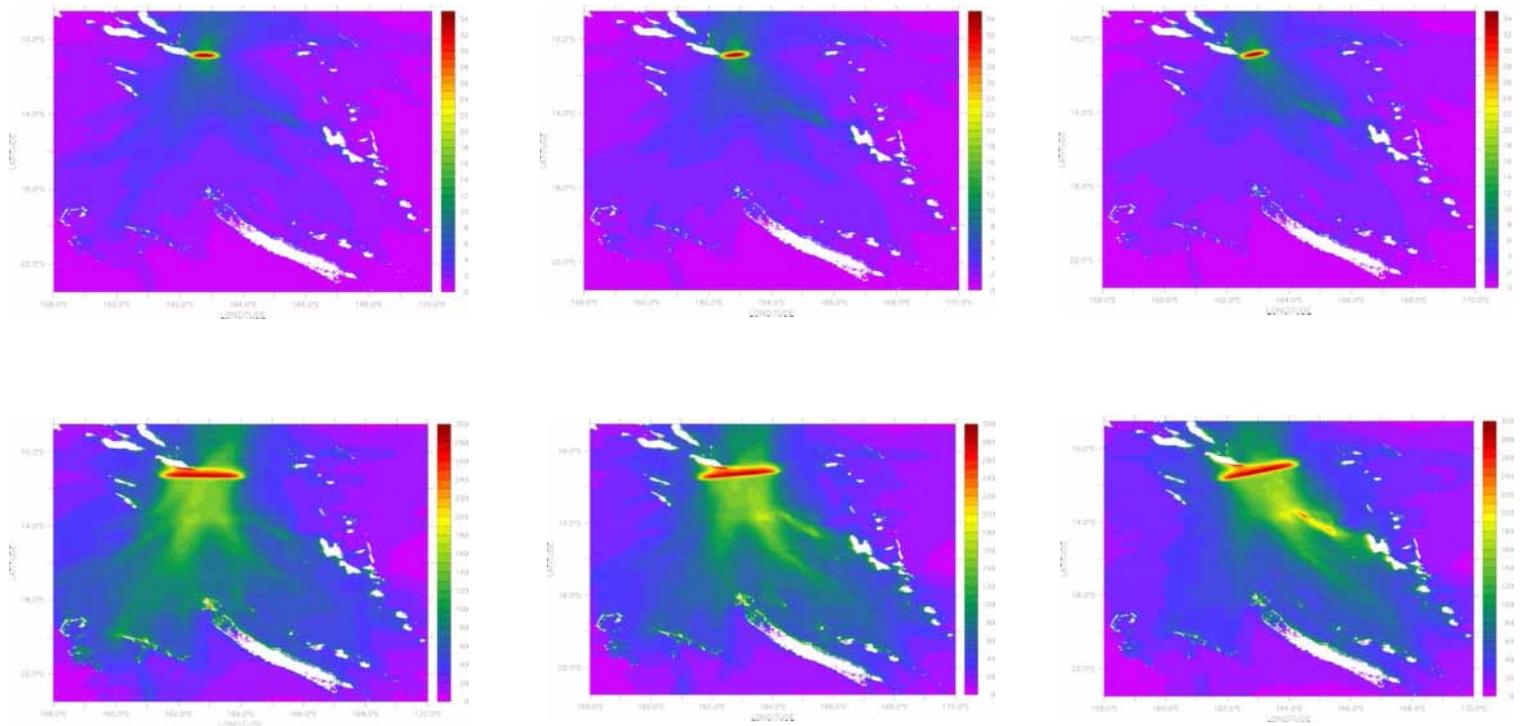


Figure 24 : Hauteurs de vagues maximums attendues (cm) pour un scénario 7.5 (au-dessus) et 8.5 (en dessous) aux îles Salomon. Au centre, les sources ont été paramétrées avec l'azimut issu de COMMIT. L'azimut a été modifié de 10° en plus (à gauche) et 10° en moins (à droite) (Source : GEBCO - 2014)

Une seconde série de tests a permis d'observer précisément l'influence des paramètres géologiques en faisant varier la profondeur, le glissement, l'angle de glissement et le pendage de la source. Même avec des variations de paramètre peu marquées, la profondeur d'un séisme modifie, de manière importante, les résultats de modélisation. Globalement ces tests ont été réalisés pour des scénarios locaux et proches qui permettent de noter des écarts de résultats en fonction du paramètre utilisé. En ce qui concerne le glissement, l'équipe a choisi de déterminer une oscillation de 0.2m pour des scénarios à magnitude 8.5, ce qui a permis de mesurer la sensibilité des modélisations pour le paramètre de glissement. En effet, une petite fluctuation dans les configurations de profondeur et de glissement entraîne des écarts de résultats importants. Des tests ont également été effectués sur l'angle de glissement, avec des variations comprises entre 10 et 20°, et sur le pendage de la faille, avec des variations établies entre 5 et 10°. A l'issue des tests, il convient de déterminer à la fois des paramètres d'orientation, une zone non touchée pourrait être affectée, mais aussi des paramètres d'intensité, une zone déjà exposée pourrait être encore plus impactée. Les paramètres de source d'un tsunami et notamment la profondeur et le glissement sont des éléments fondamentaux afin de prédire correctement le comportement d'un tsunami.

Dans l'objectif d'approfondir les tests de sensibilité du code par les sources, l'équipe s'est intéressée à l'état du niveau marin lors de la déformation initiale. Quelle est la part de chaque paramètre dans la variation du niveau marin à la source ? Après avoir récupéré les résultats des tests précédents sur un scénario en champ proche, des profils bathymétriques ont été dressés sous Matlab. La longueur de glissement impacte la déformation du niveau marin à l'aplomb de la source, passant ainsi de 2,75 m de déformation initiale avec un glissement à 5.6 m à 3.15 m avec un glissement à 6.4 m. Dans cet exemple, 20 cm de glissement correspond à une déformation de 10 cm à la source (**Figure 25**).

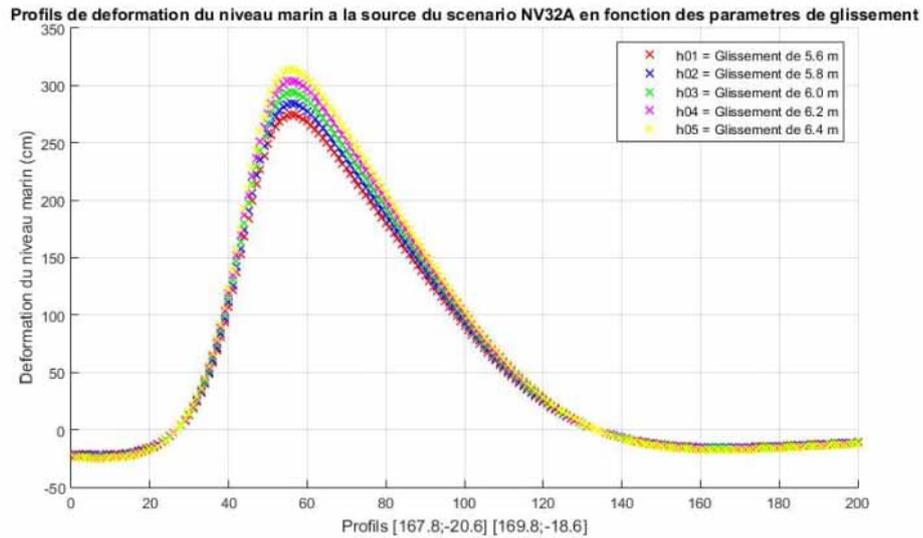


Figure 25 : Profils de déformation du niveau marin à la source à partir d'un scénario ComMIT et en fonction des paramètres de glissement (Source : ComMIT)

Les graphiques suivants s'appliquent à un même scénario avec une variation de magnitude (7.5 et 8.5). Les déformations du niveau marin à la source liées à la profondeur, concordent avec les différences inter-résultats obtenues précédemment. Effectivement, une variation de 5 km en positif ou en négatif, induit une élévation ou une baisse du niveau marin pouvant aller jusqu'à 10 cm en fonction de la profondeur. De fait, plus un séisme est profond, moins la déformation est visible à la surface de l'océan (**Figure 26**).

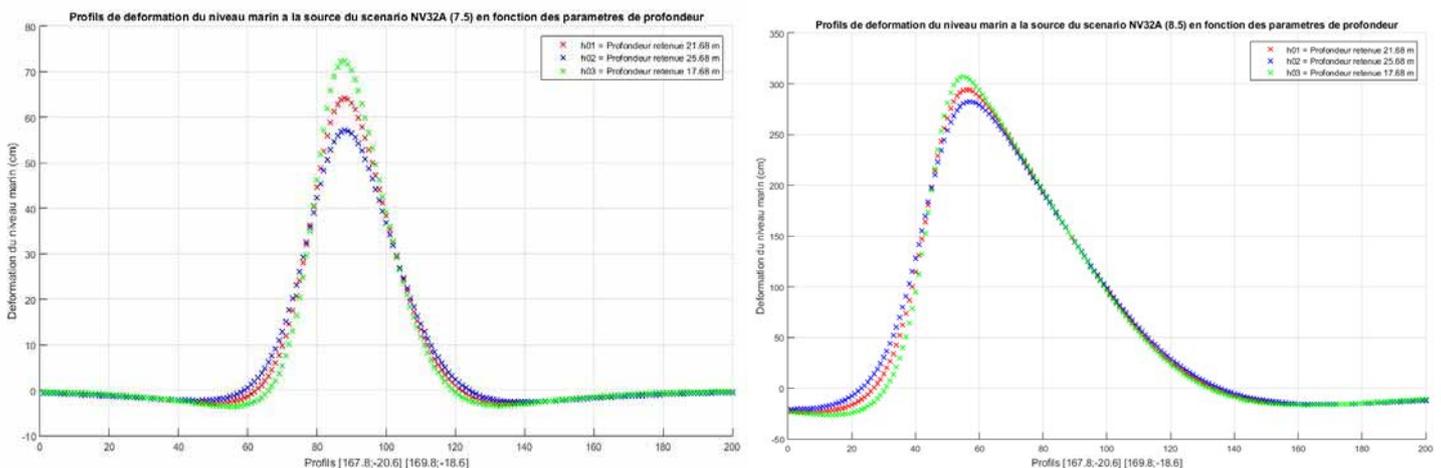


Figure 26 : Profils de déformation du niveau marin à la source à partir d'un scénario ComMIT 7.5 (à gauche) et 8.5 (à droite) et en fonction des paramètres de profondeur (Source : ComMIT)

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

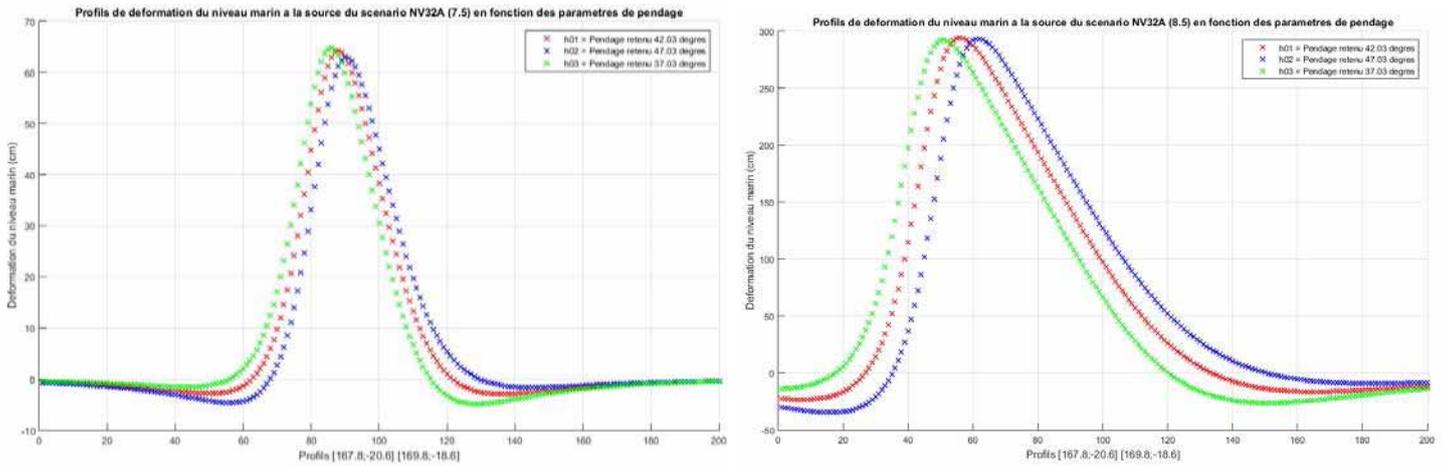


Figure 27 : Profils de déformation du niveau marin à la source à partir d'un scénario ComMIT 7.5 (à gauche) et 8.5 (à droite) et en fonction des paramètres de pendage (Source : ComMIT)

En ce qui concerne le pendage, ce n'est pas un paramètre qui modifie beaucoup la surface océanique mais davantage la localisation de la déformation de surface. Ce constat est d'autant plus visible sur un scénario de magnitude 8.5, mais il est similaire avec une plus petite magnitude (**Figure 27**). Sur une magnitude 8.5, un pendage retenu à 37° obtient un pic de déformation à 168.3° en longitude tandis qu'un pendage fixé à 42° obtient un pic de déformation autour de 168.5° en longitude. L'inclinaison du plan de faille reste cependant essentielle à prendre compte car les valeurs de déformation affichées sur l'axe des ordonnées, tout comme les autres paramètres, sont étonnamment différentes. Les pics de déformation culminent à 65 cm pour le scénario à 7.5 et stagnent à presque 3 m pour le scénario à 8.5 en moyenne. Le creux de déformation à proximité de la source est relativement bien marqué peu importe le scénario, ce qui témoigne d'une influence importante quant aux mouvements d'eau lors d'un ajustement de paramètres associé au pendage.

Le dernier test effectué correspond au paramètre d'angle de glissement du séisme. Au-delà des écarts dans les hauteurs de déformation, la variabilité inter-scénario est peu marquée. Effectivement avec des variations d'angle de glissement compris entre -10° et +10° on observe peu de différences en termes d'intensité et de localisation de la déformation du niveau marin (**Figure 28**).

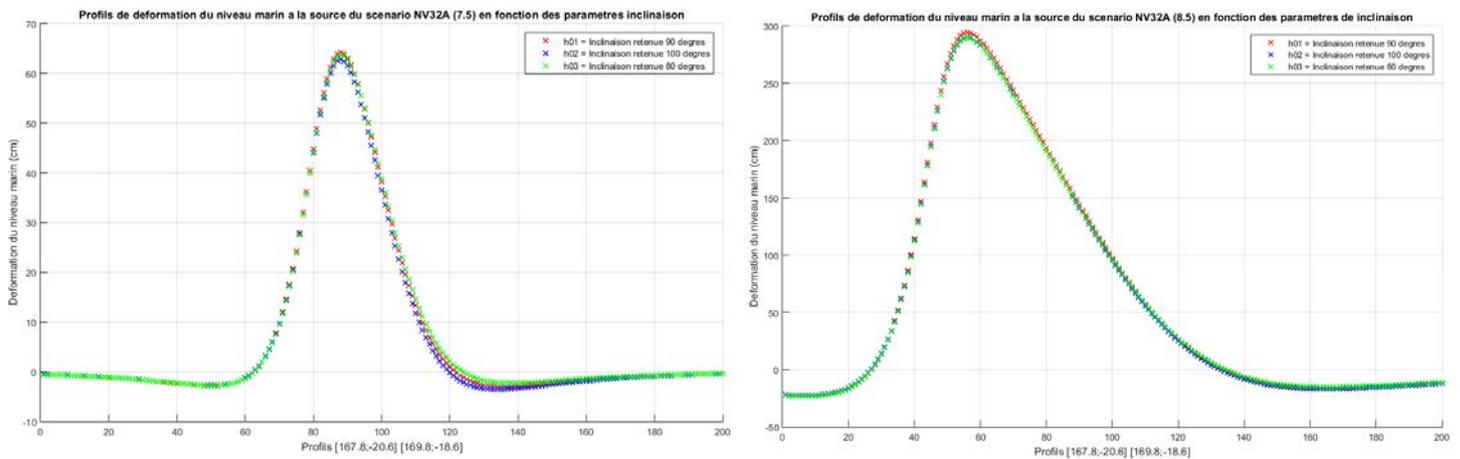


Figure 28 : Profils de déformation du niveau marin à la source à partir d'un scénario ComMIT 7.5 (à gauche) et 8.5 (à droite) et en fonction des paramètres d'angle de glissement (Source : ComMIT)

3.4 Validation du code MOST avec le tsunami du 5 décembre 2018

L'objectif de cette dernière étape, avant le lancement des calculs pour la livraison des produits finaux, est de comparer les résultats de modélisation avec les données réelles enregistrées sur les marégraphes et les observations/témoignages sur un évènement connu, en l'occurrence il s'agit du tsunami du 5 décembre 2018.

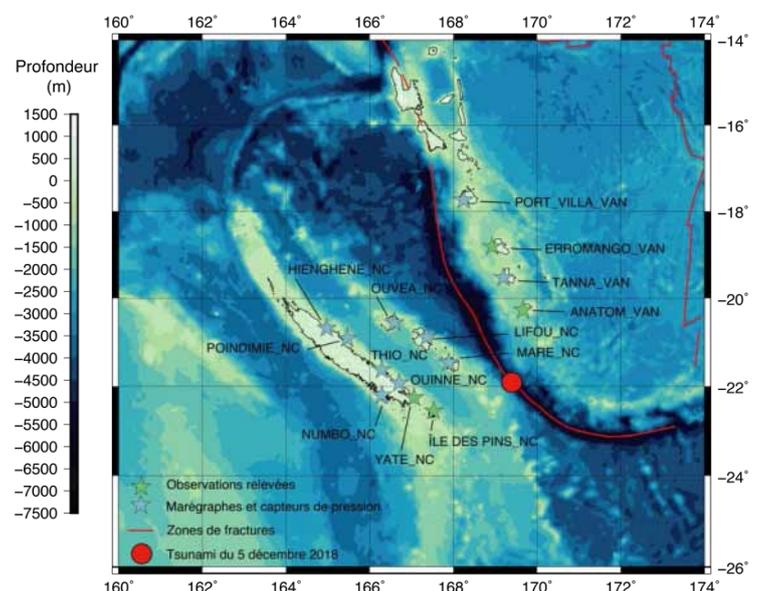
Des premiers travaux ont été effectués par J. Roger et B. Pelletier pour trouver des paramètres de source les plus corrects géologiquement parlant. La localisation de l'épicentre du séisme à 169.3124° de longitude et - 21.8853° de latitude, associée à un plan de faille de 80 km de longueur, 30 km de largeur et un glissement de 3.5 m présente donc les paramètres suivants indiqués en rouge. Les autres paramètres sont extraits des phases de tests (**Tableau 4**).

Tableau 4 : Les différentes configurations géologiques pour modéliser la source du tsunami du 5 décembre 2018 au Vanuatu (Source : Bernard Pelletier et Jean Roger, 2020)

Paramètres de source envisagés pour le tsunami du 5 décembre 2018			
Profondeur source (km)	Pendage (°)	Azimut (°)	Angle de glissement (°)
6.5	50.0	312.0	- 90
6.5	50.0	298.0	- 90
0.5	50.0	298.0	- 90
0.5	50.0	298.0	- 110

Une fois que la source du tsunami a été correctement paramétrée, il était temps de modéliser la déformation initiale du séisme et la propagation sur une grille régionale. Une grille à 300 m de résolution comprenant la Nouvelle-Calédonie et le Vanuatu a été construite à partir du MNT. Afin de comparer les résultats de modélisation aux données réelles, une série de schémas d'imbrication (sous-grilles A, B et C) ciblés sur chaque site des marégraphes et/ou des observations a été élaborée (**Figure 29**).

Figure 29 : Localisation des différents marégraphes et des données d'observation en Nouvelle-Calédonie et au Vanuatu qui seront utilisés pour la comparaison des résultats de modélisation avec les données historiques du 05/12/18 (Source : IRD - 2020)



Au total, ce sont donc 13 schémas d'imbrication de grilles/sous-grilles bathymétriques qui vont servir à valider le modèle avec l'évènement du 5 décembre 2018. Tandis que la sous-grille A est une découpe à 180 m du MNT de Nouvelle-Calédonie/Vanuatu, les sous-grilles B et C vont être construites à partir de plusieurs MNT haute résolution (25 m et 10 m) réalisés selon la méthode suivante (**Figure 30**). L'objectif est de positionner un marégraphe virtuel dans la sous-grille C afin d'extraire les données de ce marégraphe pour les comparer avec les marégrammes historiques réels.

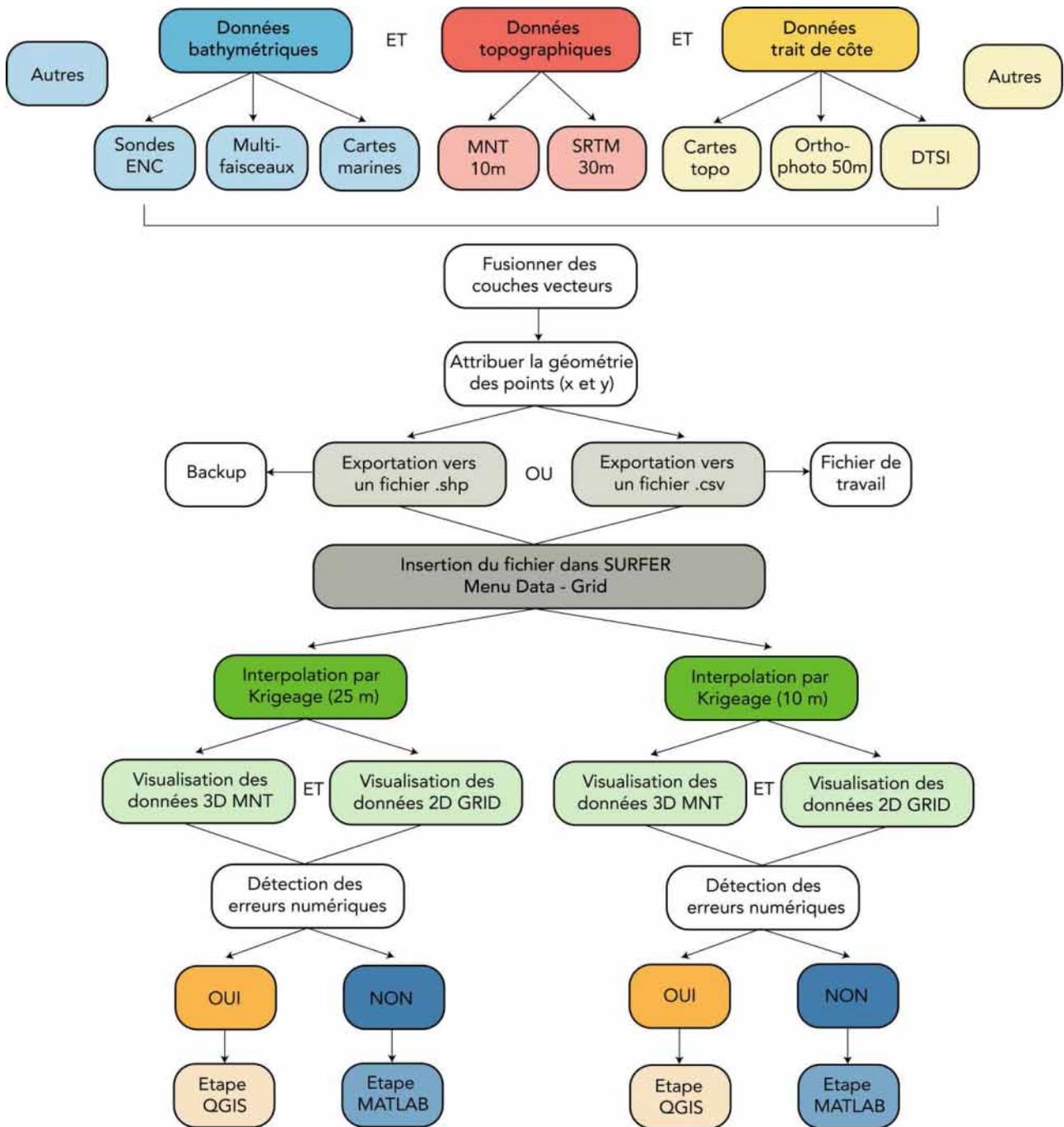


Figure 30 : Chaîne de traitement dans la construction d'un Modèle Numérique de Terrain haute résolution. La création d'un MNT littoral nécessite des données topographiques (en rouge), des données bathymétriques (en bleu) et des données de trait de côte (en jaune). Ces données doivent être fusionnées puis géoréférencées pour être importées dans le logiciel de maillage. La méthode d'interpolation peut être adaptée selon les besoins mais c'est le krigeage qui sera utilisé ici (en vert). Si le MNT généré comporte des erreurs de bathy/topo, il est corrigé sous Matlab (en bleu foncé). Autrement, il peut être inséré dans un logiciel SIG (en orange)

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

Ces différents schémas d'imbrication sont enregistrés dans un tableur Excel qui contient l'ensemble des données concernant les 46 grilles haute résolution sur la Nouvelle-Calédonie et le Vanuatu. Pour les introduire dans MOST, il est important de bien renseigner la localisation exacte du marégraphe virtuel dans la sous-grille C dans le fichier de configuration. Les coordonnées géographiques des marégraphes sont disponibles sur le site de la COI < <http://ioc-sealevelmonitoring.org/index.php>> En revanche, MOST nécessite aussi d'indiquer la profondeur virtuelle et les valeurs I et J dans la grille bathymétrique. Un script Matlab développé par J. Aucan permet d'introduire une sous-grille en fichier d'entrée et extraire la profondeur et les valeurs I et J associées.

Les données des marégraphes relatives au tsunami de 2018 sont accessibles gratuitement sur le site de la COI dans la liste des stations. Sur chaque station il est possible de choisir une période temporelle, ici le 5 décembre 2018, permettant de visualiser puis enregistrer les données sur 24h en format HTML. Ces données vont ensuite être ouvertes avec Excel afin de pouvoir les exporter en format XLS (1997-2004) et elles seront lisibles au format Matlab grâce à un script développé par J. Aucan.

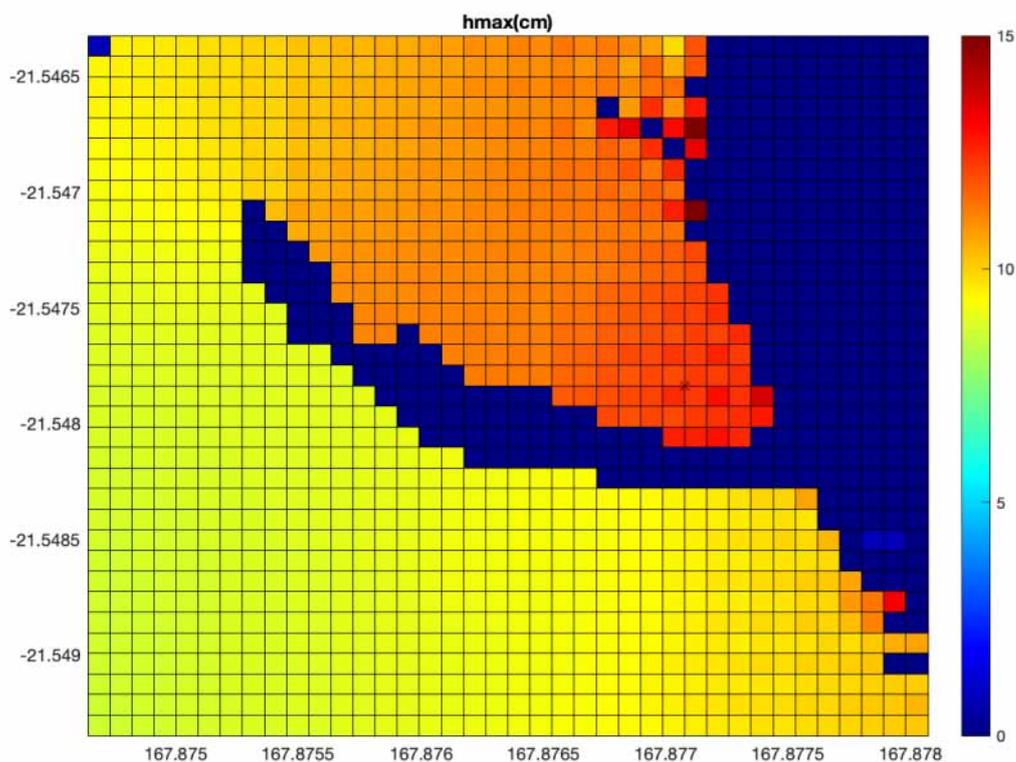


Figure 31 : Hauteurs de vagues maximums (cm) dans le port de Tadine à Mare (Îles Loyautés - Nouvelle-Calédonie) pour l'un des scénarios de l'évènement du 5 décembre 2018

Une fois que les calculs de MOST, contenant le marégraphe virtuel (**Figure 31**) dans la sous-grille C, sont terminés et que les données réelles du niveau marin pendant le tsunami sont récupérées, un script Matlab élaboré par J. Aucan va comparer les résultats pour ensuite les valider et lancer les modélisations finales pour la DSCGR. Le tsunami de 2018 va donc permettre de valider le code en termes de résultats obtenus et de temps de calculs/volumes de stockage.

4. Résultats

A l'issue des modélisations, uniquement deux informations ont été sauvegardées : les hauteurs maximales de vagues et les temps de trajet de tsunami. Les hauteurs maximales sont contenues soit dans le fichier NetCDF Ha (variable *max_height*) de la grille parent (déformation/propagation) soit dans le fichier NetCDF SIFT (variable *max_amp*) des grilles enfants (imbrication). Les temps de trajet ont été exportés au format NetCDF.

4.1 La création de la base de données de scénarios de tsunami pour la Nouvelle-Calédonie

4.1.1 Mise en contexte technique

Tout d'abord un script Bash développé par J. Roger a permis de créer automatiquement tous les fichiers de paramètre MOST ainsi que les répertoires pour chacun des 3000 scénarios. Ensuite les calculs de déformation initiale et propagation sur les grilles 0 ont été initiés sur le cluster de l'IRD avec 32 processeurs par J. Lefèvre et finalisés en 60 jours pour un volume de données représentant environ 11 To. Pour les calculs d'imbrication, il est nécessaire d'avoir un schéma d'imbrication validé pour MOST et raisonnable en termes technique (temps et stockage). L'imbrication des sous-grilles de meilleure résolution nécessite les résultats de calcul de la déformation initiale.

4.1.2 La livraison des produits de la base de données

Pour l'intégration des résultats dans la base, nous fournirons à la DTSI uniquement les fichiers SIFT de l'imbrication au format NetCDF (environ 200 Mo). En parallèle, chaque scénario disposera d'un fichier TTT également au format NetCDF (environ 100 Mo). Pour conclure, un transfert du fichier SIFT contenant les hauteurs de vagues maximums sur les sous-grilles et du fichier TTT contenant les temps d'arrivée du tsunami pour chaque scénario sera effectué par le biais d'un disque dur externe (900 Go) vers les serveurs de la DTSI. Une copie de l'ensemble des fichiers de paramètres et des résultats de calcul sera sauvegardée à l'IRD.

4.1.3 La structure de la base de données : détection automatique et requêtes spatiales

En ce qui concerne plus précisément l'architecture de la base de données de scénarios, la chaîne de traitement (**Figure 32**) qui intègre les données de modélisation fournis par l'IRD, s'insère dans un dispositif de mise en alerte au tsunami. Effectivement l'automatisation du processus de détection d'un évènement sismique s'effectue par le flux ATOM du PTWC. Il devra être nettoyé afin de récupérer uniquement la donnée utile (localisation et magnitude). Sachant que les alertes du PTWC pour un même évènement peuvent s'additionner dans le temps, chaque alerte devra comporter un champ ID afin de connaître précisément le nombre de mises à jour qu'a connu l'alerte. Chaque nouvelle alerte écrasera la précédente.

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

L'extension GeoEvent de ARCGIS permet d'attribuer une géométrie (x/y) pour l'évènement. Les sources de tsunami prédéfinies seront associées au centre du plan de faille correspondant au scénario (mono et multi-patches) et chacun de ces points seront découpés selon la méthode des polygones de Thiessen en fonction des contours du littoral sur le Pacifique. Chaque polygone correspondra à un scénario. La localisation/magnitude du séisme va définir quel scénario est le plus proche de l'évènement. En prenant en compte la localisation parfois inexacte du séisme, les polygones adjacents au scénario sélectionné seront aussi retenus.

Pour produire la carte d'aléa correspondante, un script python va récupérer les répertoires contenant les fichiers NetCDF du/des scénario(s) et générer une carte Raster pour la publier dans ArcGIS Online et appuyer le déclenchement de l'alerte tsunami par le Centre Opérationnel DSCGR.

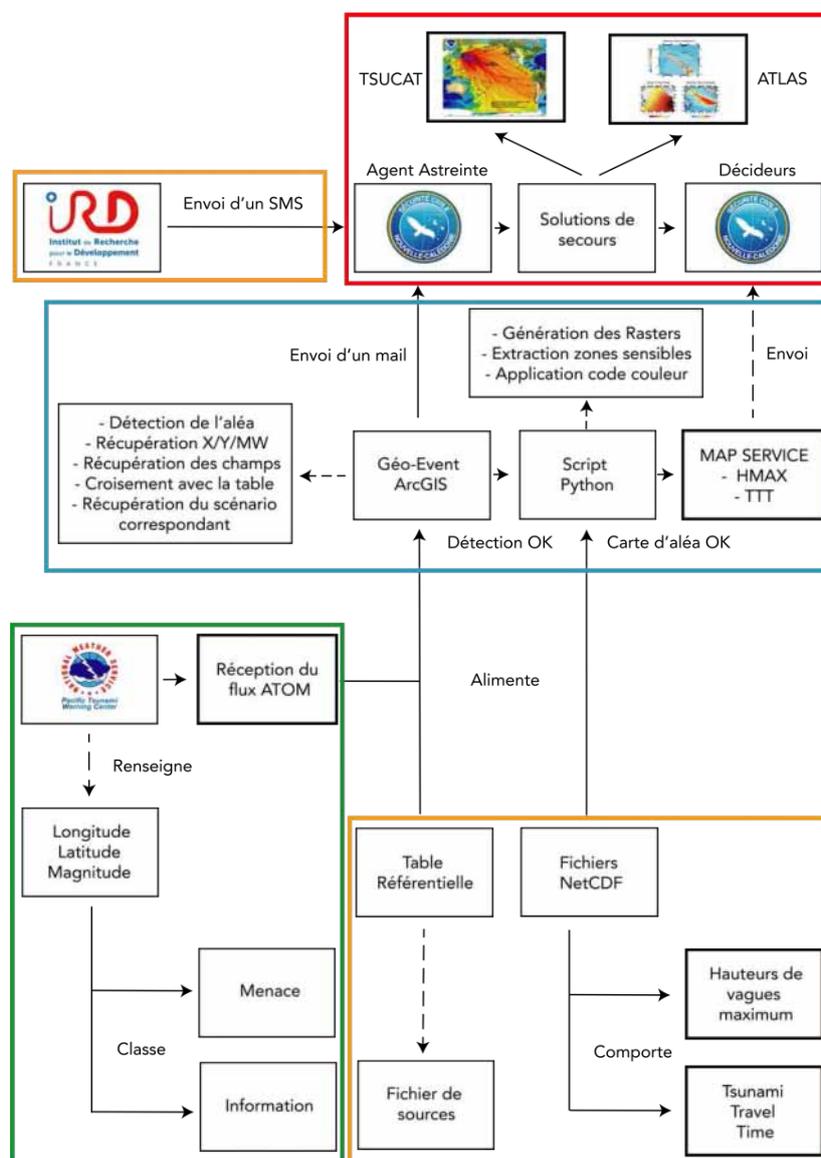


Figure 32 : Chaîne de traitement de l'intégration des résultats de modélisation de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie dans les serveurs de la DTSI/DSCGR. Les données externes de PTWC sont représentées en vert. Les résultats de modélisation produits par l'IRD sont illustrés en jaune. Les traitements de la base par le service géomatique de la DTSI sont en bleu. Les actions de la DSCGR sont représentées en rouge. Les informations principales sont encadrées en gras dans le schéma.

4.2 Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

4.2.1 Les scénarios mono et multi patches en champ proche

Les outils de modélisation permettent d'analyser des phénomènes ou des processus d'un point de vue quantitatif. Pour l'aléa tsunami, anticiper des scénarios extrêmes (M_w 8.8) mais aussi des scénarios plus modérés (M_w 7.5) va permettre d'avoir une idée des impacts potentiels sur le littoral. Pour illustrer cette variabilité des impacts, il est intéressant de porter attention à la source du tsunami et à la magnitude du séisme. Les dimensions du/des plan(s) de rupture de faille vont conditionner les paramètres du tsunami en mer (vitesse de propagation) et à terre (hauteurs de vagues à la côte et run-up). Les deux cartes suivantes permettent de comparer les hauteurs de vagues maximums (cm) à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie entre un scénario 7.5 avec une source unitaire ComMIT (**Figure 33**) et un scénario 8.8 avec une combinaison de douze sources unitaires ComMIT (**Figure 34**). A noter que les échelles de couleurs différentes entre les deux cartes.

Les hauteurs de vagues maximums entre ces deux scénarios sont multipliées par un facteur 4. Les hauteurs maximales atteintes se trouvent directement à la source (déformation du niveau marin) ou à l'approche du littoral (amplification). Il est intéressant d'observer le rôle des îles Loyautés, qui font écran aux trains d'ondes, filtrant ainsi les vagues. Avec une position de proximité avec la zone de subduction du Vanuatu, les îles Loyautés sont sensibles même avec de petits événements. Effectivement, pour ce scénario unitaire, les hauteurs de vagues maximums dans l'océan sont comprises entre 30 et 50 cm. A l'inverse, le scénario 8.8 va avoir une plus grande emprise spatiale et donc affecter plus de sites, mais également avec une plus grande intensité avec des hauteurs de vagues, comprises entre 2 et 2.5 m.

La proportion de chaque île Loyautés affectée par un tsunami dépend en partie de la variation de l'azimut à la source. L'île des Pins ne dispose pas de barrière physique, ce qui la rend relativement plus exposée aux sources en champ proche sans différenciation d'intensité.

Cette comparaison illustre une dichotomie entre la façade Est, exposée et affectée par des ondes même avec un scénario 7.5, et la façade Ouest qui n'est globalement pas impactée par les trains d'ondes de tsunamis, même avec un scénario 8.8. Cependant, les simulations ont été réalisées à basse résolution sur 6 h de calcul, les phénomènes de piégeage, d'amplification et de résonance peuvent localement avoir des impacts sur la côte Ouest et ne sont pas capturés ici. En revanche, il est clair que le positionnement de la source ainsi que le nombre de sources unitaires considéré vont jouer un rôle majeur dans l'exposition d'un territoire à l'aléa tsunami.

En ce qui concerne la répartition des enjeux identifiés et caractérisés par **Thomas et al. (2019)**, ils sont principalement concentrés à Nouméa et donc a priori peu ou moins exposés. Néanmoins, sur certains territoires exposés, des enjeux sensibles sont distribués de manière hétérogène et localement isolé, comme l'hôtel du Méridien sur l'île des Pins.

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

Au-delà des enjeux, il est intéressant de directement observer la répartition des populations sur le littoral néocalédonien. Plusieurs villages, comme Yaté sur la Grande Terre ou Wé sur Lifou constituent des zones d'habitation côtière exposées et potentiellement vulnérables.

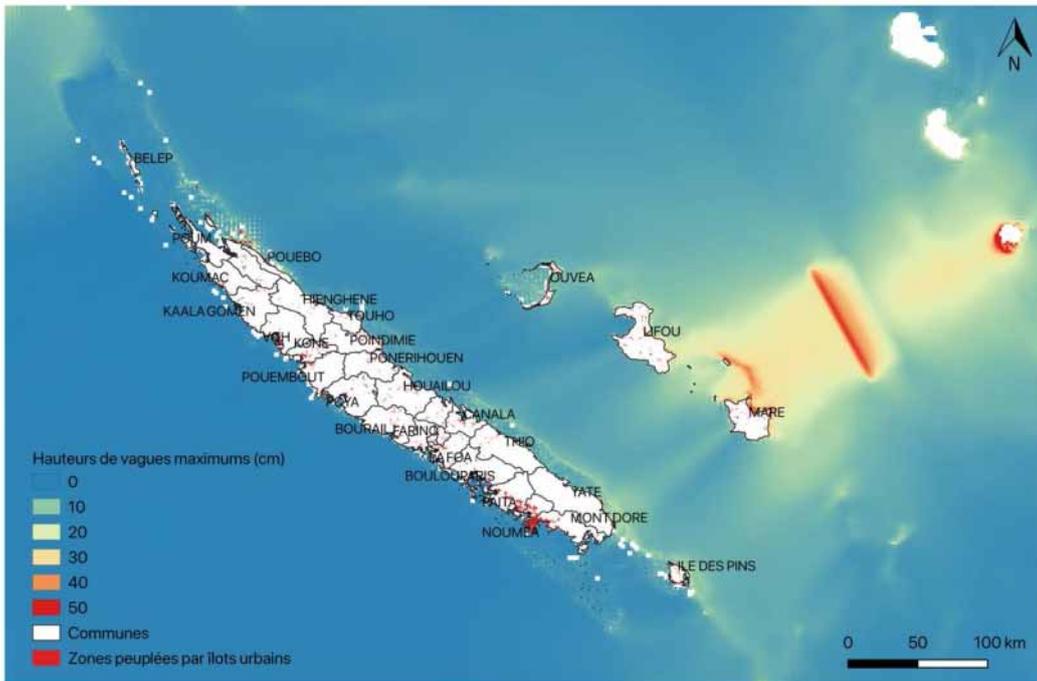


Figure 33 : Hauteurs de vagues maximums estimées (cm) avec un scénario ComMIT mono source sur l'ensemble Nouvelle-Calédonie/Vanuatu Sud. Les données bathymétriques sont extraites du fichier GEBCO 2014. Les données de populations sont issues du recensement de 2014 de l'INSEE. Les îlots urbains ont été créés à partir d'une méthodologie SIG développée par Bruce Thomas - 2019

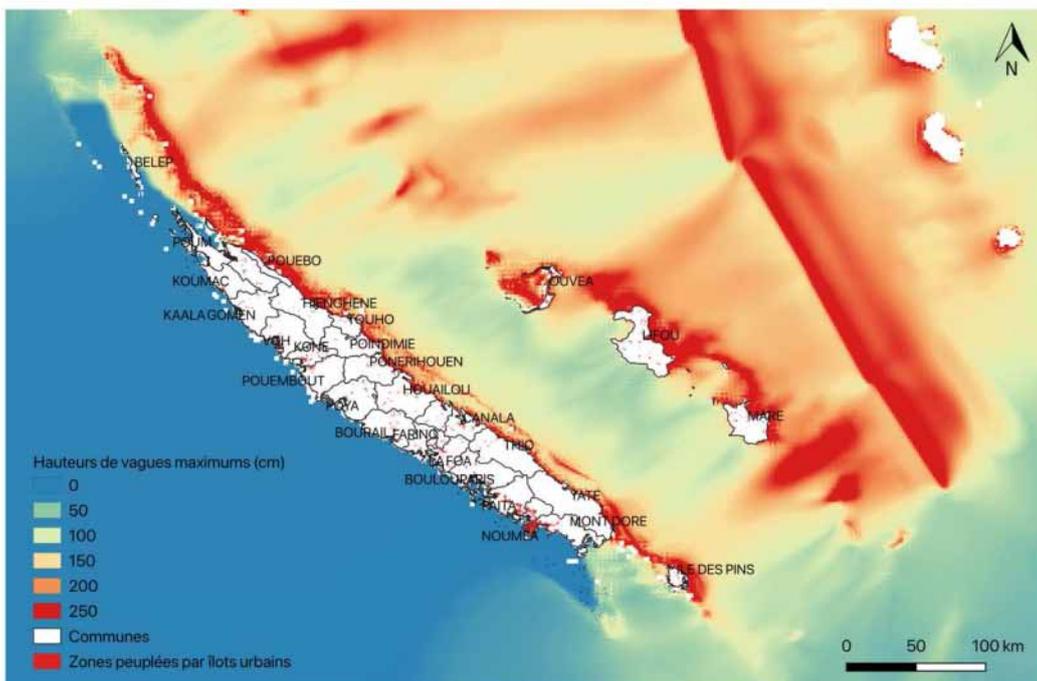


Figure 34 : Hauteurs de vagues maximums estimées (cm) avec un scénario ComMIT multi sources sur l'ensemble Nouvelle-Calédonie/Vanuatu Sud. Les données bathymétriques sont extraites du fichier GEBCO 2014. Les données de populations sont issues du recensement de 2014 de l'INSEE. Les îlots urbains ont été créés à partir d'une méthodologie SIG développée par Bruce Thomas - 2019

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

4.2.2 Les hauteurs de vagues maximums en champ proche et en champ lointain

La variabilité des impacts sur le littoral selon le scénario, peut également être représentée par des cartes d'aléas contenant les hauteurs de vagues maximums à l'extérieur et à l'intérieur du lagon. C'est tout l'intérêt de proposer une cartographie sous forme de ligne de points qui contient la valeur des hauteurs de vagues maximum à chaque point. Il est intéressant de regarder les différences observées entre une ligne de points à l'extérieur du lagon et une ligne à l'intérieur du lagon. Les deux cartes suivantes proposent un aperçu général des hauteurs de vagues attendues dans le cas du télé tsunami historique de 1960 au Chili avec une magnitude 9.5 (**Figure 35**) et dans le cas de l'évènement récent de 2018 au Vanuatu avec une magnitude 7.5 (**Figure 36**).

La reconstitution d'évènements historiques permet d'avoir une idée sur les conséquences d'un tsunami qui s'est déjà produit sur le territoire. Lorsqu'il a été mesuré, il peut être comparé avec des données de marégraphes réelles et lorsqu'il a été observé, il peut être mis en relation avec des témoignages. D'un point de vue général, l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie semble plus impacté par le tsunami du Chili que celui du Vanuatu Sud. Dans les deux scénarios, le territoire n'est pas touché de manière homogène.

Pour le tsunami de 1960 au Chili, le grand lagon Sud et notamment l'île des Pins et le Sud de la Grande Terre ont pu être affectés par des vagues comprises entre 20 et 60 cm. Les secteurs les plus exposés se trouvent sur le récif de la Corne Sud (Mont Dore), sur le récif de Goro (Yaté) et à l'ouest de l'île des Pins, où les hauteurs de vagues ont pu atteindre localement plus de 80 cm.

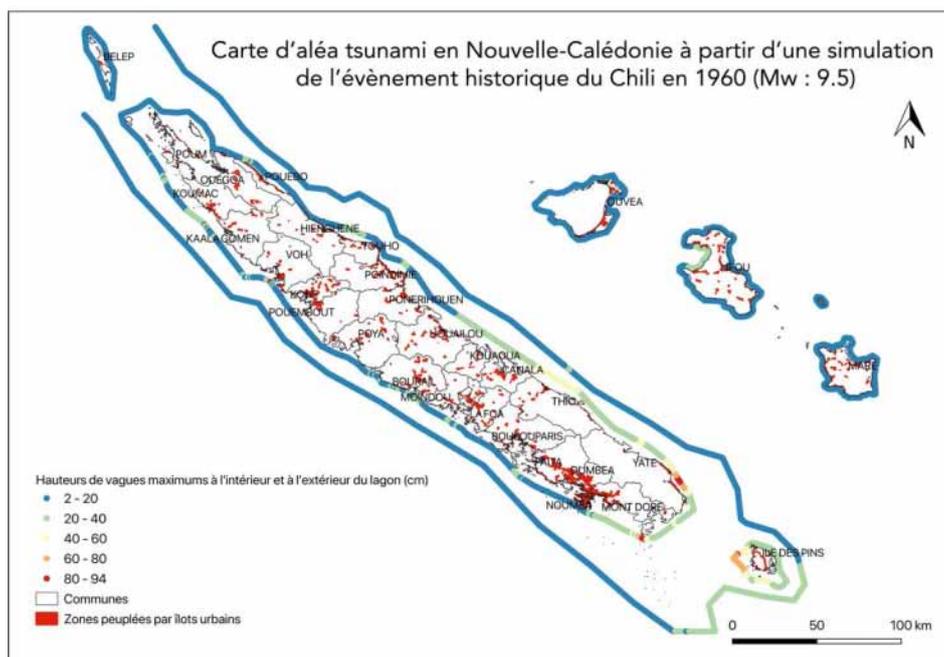


Figure 35 : Hauteurs de vagues maximums estimées (cm) à l'intérieur et à l'extérieur du lagon après reconstruction du tsunami du Chili en 1960 (Mw 9.5) sur l'ensemble Nouvelle-Calédonie. Les îlots de population sont représentés en rouge (Thomas et al, in prep). La représentation des Hmax par des points d'aléas a été inspirée des travaux sur les évaluations probabilistes de l'aléa tsunami et appliquée à la Nouvelle-Calédonie (Thomas, 2019)

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

Les îles Loyautés ne sont pas ou peu impactées par les ondes du tsunami sauf pour la baie de Santal à Lifou où les hauteurs de vagues maximum sont comprises entre 20 et 40 cm. Même s'il n'y a pas de mesures qui ont été faites lors de l'évènement de 1960 hormis sur le marégraphe de Nouméa CHALEIX, il semble logique au vue de la direction des ondes depuis la source vers la Nouvelle-Calédonie, que le sud de la Grande Terre soit le plus touché.

Pour le tsunami de 2018 du Vanuatu, les sites touchés sont globalement les mêmes que ceux du tsunami de 1960 du Chili, même si les hauteurs de vagues sont légèrement différentes. Dans le cas de 2018, seulement 20 à 40 cm sur Yaté mais une intensification autour de l'île de Pins et notamment sur la façade est, avec des vagues atteignant 60 à 90 cm. Les îles Loyautés sont davantage impactées par le tsunami. A Lifou, les baies de Wé à l'Est et de Wadra au Sud-Est connaissent des hauteurs allant de 20 à 40 cm tandis qu'à Maré, la plage de Patho au Sud-Est connaît des hauteurs comprises entre 40 et 60 cm. S'agissant des sites touchés, les résultats de modélisation semblent être cohérents avec les résultats marégraphiques et les données historiques d'observation.

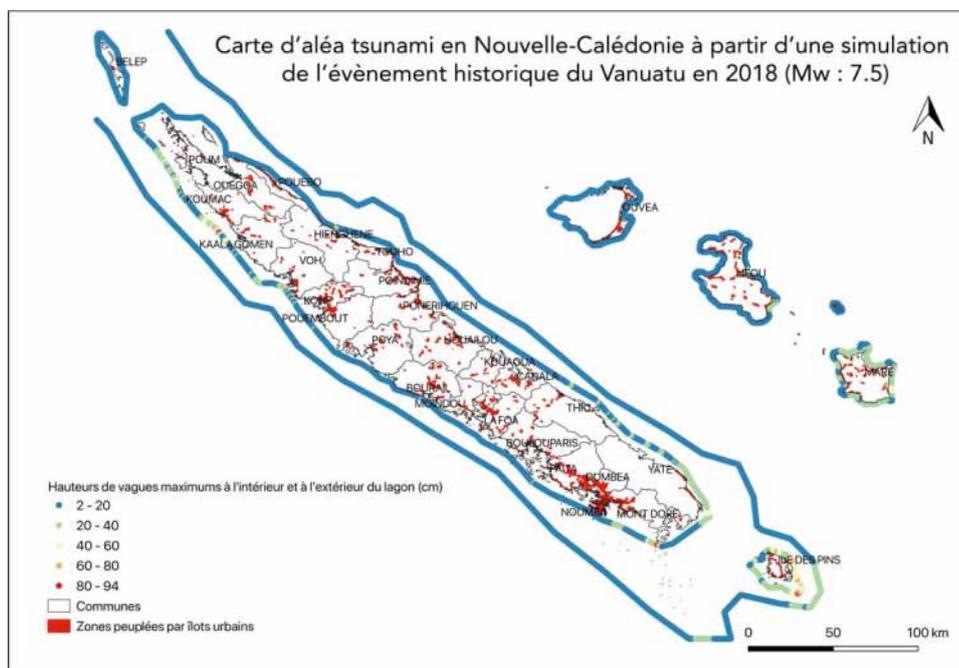


Figure 36 : Hauteurs de vagues maximums estimées (cm) à l'intérieur et à l'extérieur du lagon après reconstruction du tsunami du Vanuatu en 2018 (Mw 7.5) sur l'ensemble Nouvelle-Calédonie. Les îlots de population sont représentés en rouge (Thomas et al, in prep). La représentation des Hmax par des points d'aléas a été inspirée des travaux sur les évaluations probabilistes de l'aléa tsunami et appliquée à la Nouvelle-Calédonie (Thomas, 2019)

Ces résultats préliminaires montrent que la Grande Terre reste peu exposée à l'aléa tsunami surtout la côte ouest. Les anomalies de hauteurs de vagues au nord de la côte ne sont pas liées à l'évènement mais directement à des erreurs de lissage de la bathymétrie sur le récif barrière. L'une des questions majeures pourrait être de savoir comment les tsunamis sont susceptibles de franchir le récif barrière et comment les ondes se comportent dans les baies et les ports.

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

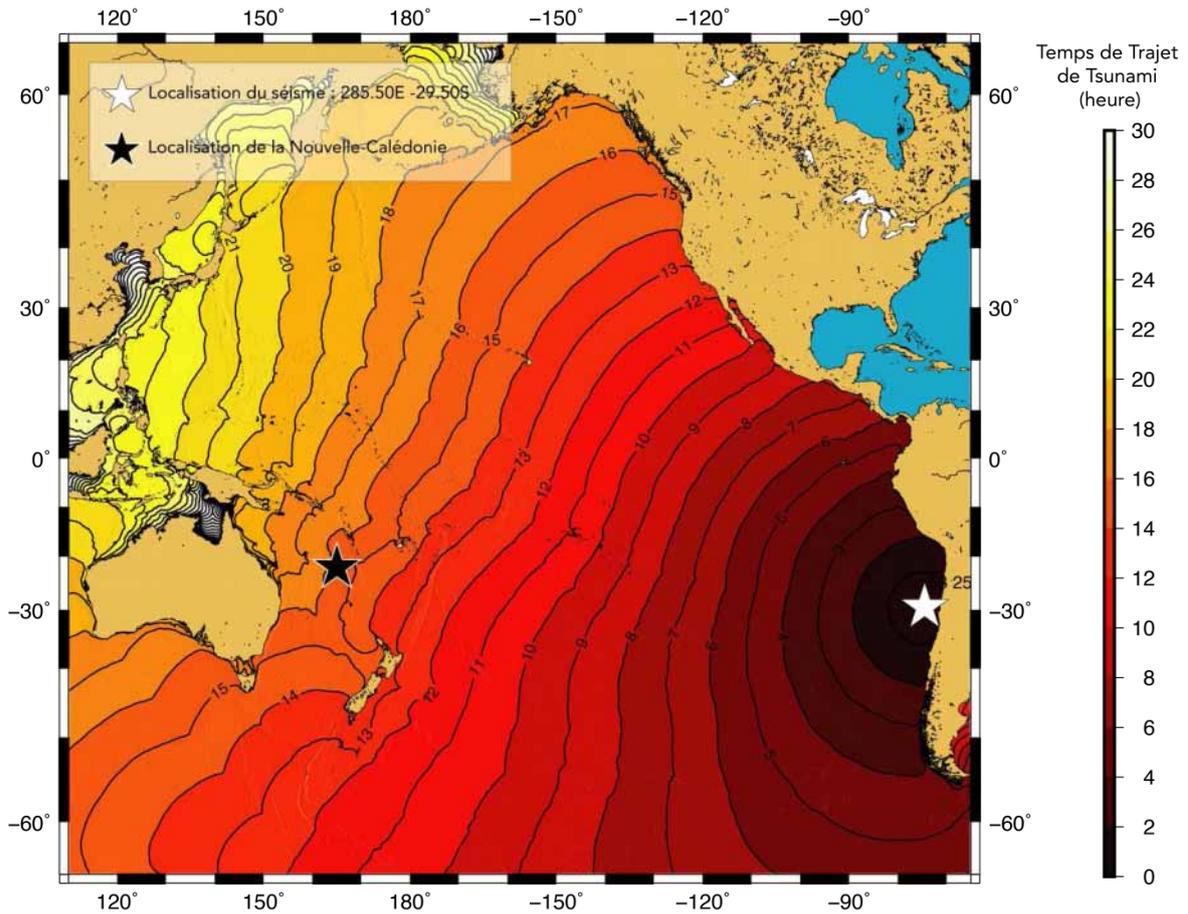


Figure 37 : Temps de trajet de tsunami (heure) jusqu'en Nouvelle-Calédonie après la reconstitution de l'évènement du Chili en 1960 (Mw 9.5) – La source est symbolisée par l'étoile blanche et la Nouvelle-Calédonie est représentée par l'étoile noire (Source : TTT - 2020)

Tableau 5 : Temps d'arrivée estimés (ETA) pour plusieurs stations marégraphiques dans le Pacifique (Source : TTT - 2020)

STATION (pays)	LONGITUDE (°)	LATITUDE (°)	ARRIVEE (Tps)
Boat Cove R Is NZ	182.1000	-29.3000	12h 44m 25s
Fishing Rock R Is NZ	182.1000	-29.2333	12h 48m 13s
Pago Pago AS	189.3000	-14.3000	13h 26m 29s
Great Barrier Is NZ	175.4900	-36.1900	13h 41m 20s
Apia Upolu WS	188.2667	-13.8333	13h 41m 39s
Nukualofa TO	184.8200	-21.1400	13h 48m 02s
North Cape NZ	173.0500	-34.4200	13h 55m 38s
Kawaihae Hawaï US	204.1700	20.0400	14h 11m 20s
Futuna Is FR	181.8400	-14.3000	14h 22m 15s
Honolulu Oahu US	202.1000	21.3000	14h 31m 01s
Suva Viti Levu FJ	178.4000	-18.1333	14h 41m 16s
Fongafale TV	179.2000	-8.5000	15h 00m 37s
Lautoka FJ	177.4400	-17.6100	15h 36m 56s
Port Kembla AU	150.9333	-34.4667	16h 00m 49s
Luganville VU	167.1900	-15.5200	16h 20m 30s

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

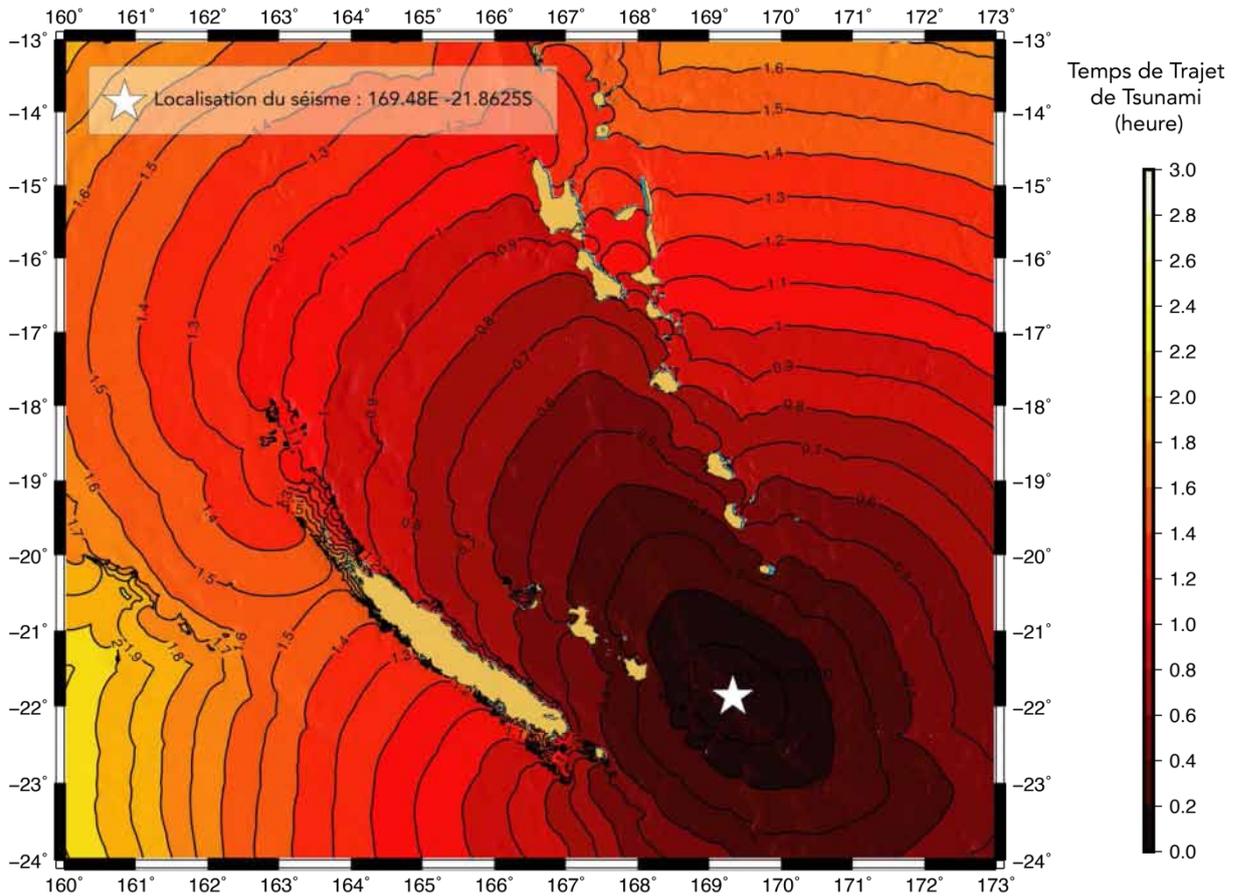


Figure 38 : Temps de trajet de tsunami (heure) jusqu'en Nouvelle-Calédonie après la reconstitution de l'évènement du Vanuatu en 2018 (Mw 7.5) – La source est symbolisée par l'étoile blanche (Source : TTT – 2020)

Tableau 6 : Temps d'arrivée estimés (ETA) pour les stations marégraphiques en Nouvelle-Calédonie et au Vanuatu (Source : TTT – 2020)

STATION (pays)	LONGITUDE (°)	LATITUDE (°)	ARRIVEE (Tps)
Mare La Roche NC	168.0208	-21.4542	0h 21m 29s
Anatom VAN	169.7600	-20.2700	0h 24m 38s
Ile des Pins NC	167.5208	-22.5542	0h 28m 39s
Lifou NC	167.2792	-20.9125	0h 28m 59s
Mare Tadine NC	167.8708	-21.5542	0h 29m 30s
Lenakel Tanna VAN	169.2625	-19.5375	0h 31m 57s
Erromango VAN	169.0042	-18.8208	0h 40m 10s
Yate NC	166.9600	-22.1500	0h 41m 44s
Port Vila Efate VAN	168.3042	-17.7792	0h 44m 18s
Poindimie Reef NC	165.4800	-20.8900	0h 46m 57s
Thio NC	166.2375	-21.6042	0h 54m 28s
Hienghene NC	164.9542	-20.6792	0h 58m 00s
Ouvea NC	166.5542	-20.5542	0h 58m 40s
Poindimie Beach NC	165.3208	-20.9208	1h 05m 01s
Quinne NC	166.7042	-21.9708	1h 05m 29s

4.2.3 Les temps de trajet de tsunami en champ proche et en champ lointain

La quantification des impacts potentiels sur le littoral en Nouvelle-Calédonie doit également s'accompagner d'une estimation d'arrivée des premières ondes du tsunami. La connaissance des temps de trajet favorise une anticipation rapide des mesures à prendre suite à la détection d'un séisme. La recomposition des événements historiques mentionnés précédemment (Chili 1960, **Figure 37** et Vanuatu 2018, **Figure 38**) ont permis de générer les temps de trajet de tsunami avec le logiciel *Tsunami Travel Times* développé par **Paul Wessel, (2011)**.

Le séisme du Chili de 1960 a généré un tsunami transocéanique qui a traversé l'océan Pacifique. En moins de 13h, le tsunami arrive sur les îles australes néo-zélandaises de River et Great Barrier. Ce sont les premiers territoires du Pacifique Ouest touchés en raison de leur position axiale avec l'épicentre au Chili. Le comportement du tsunami est légèrement modifié lors de son passage à travers la Polynésie française. Il atteint l'archipel d'Hawaï et Wallis et Futuna à 10 minutes d'intervalle après plus de 14h de traversée. Les premières ondes arrivent au Vanuatu après 15h et en Nouvelle-Calédonie entre 15h et 16h. Le tsunami est arrivé sur le littoral japonais après 20h de voyage.

Le séisme au sud de l'arc du Vanuatu de 2018 constitue le dernier événement notable ces dernières années dans la région du Pacifique Sud-Ouest. Les temps de trajet du tsunami sont relativement courts car le littoral de Maré est touché seulement 20 min après le séisme. Ainsi, en moins de 30 min, cinq îles sont affectées par les premiers trains d'ondes : Maré, Lifou et l'île des Pins pour la Nouvelle-Calédonie et Anatom et Lenakel pour le Vanuatu. Il faut attendre 40 min pour que le tsunami arrive sur le sud de la Grande Terre à Yaté et environ 1 h pour le nord sur les sites de Poindimié et Hienghène.

Dans le cas d'un tsunami transocéanique, les temps de trajet sont moins cruciaux que dans le cas d'un tsunami régional/local. Pour un événement local, les temps de réaction pour les gestionnaires doivent être réduits pour déclencher une alerte à la population le plus rapidement.

4.3 Les premiers modèles de l'atlas des scénarios de tsunami en Nouvelle-Calédonie

La production des cartes d'aléa tsunami (**Figure 39**) nécessite une automatisation du processus de génération pour tous les scénarios. L'information principale se trouve dans la première carte en haut et correspond à la hauteur de vague maximum sur l'ensemble du littoral de Nouvelle-Calédonie avec une résolution à 180m. La localisation des marégraphes est renseignée ainsi qu'une échelle de couleur corrélée avec celle utilisée par le PTWC. Les deux cartes suivantes sont automatiquement générées en fonction de la source du tsunami pour analyser les temps de trajet et les amplitudes de vagues maximums de la source jusqu'à la Nouvelle-Calédonie. La dernière carte est une mise à jour du maillage des zones tsunamigènes régionales qui permet de localiser rapidement un séisme régional et les événements historiques adjacents. Enfin, une dernière information permet d'avoir une localisation du séisme avec la profondeur estimée et un identifiant d'évènement.

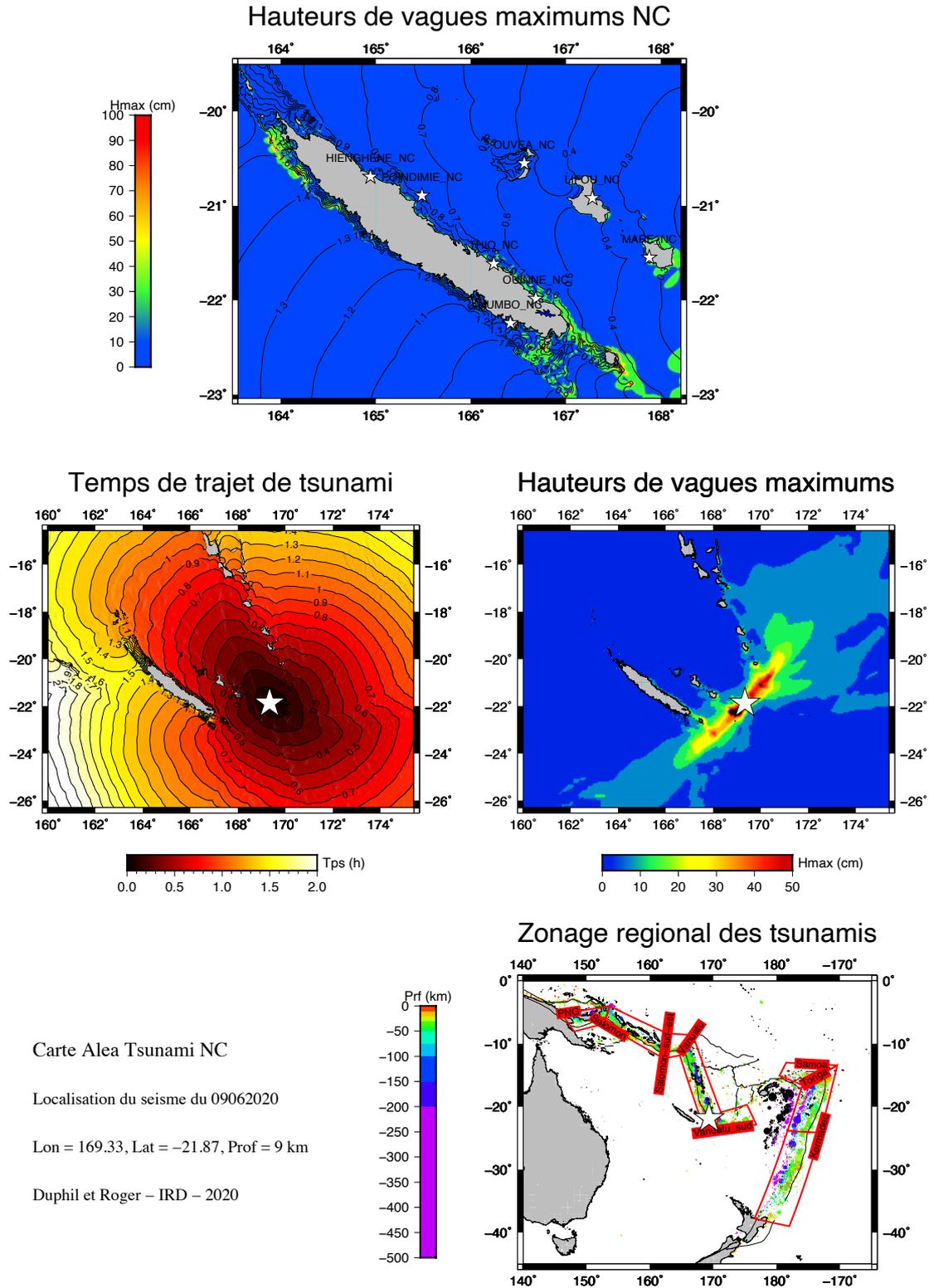


Figure 39 : Maquette de cartes d'aléa pour un scénario de tsunami (Chili 1960) dans l'atlas. Une première carte (au-dessus) représente les hauteurs de vagues maximums (cm) sur la Nouvelle-Calédonie. Les capteurs de pression et les marégraphes sont illustrés par des étoiles blanches. Une deuxième carte (au centre à gauche) représente les temps de trajet de tsunamis (heure). L'épicentre du séisme est illustré par une étoile blanche. Une troisième carte (au centre à droite) représente les hauteurs de vagues maximums à l'échelle du bassin pacifique. L'épicentre du séisme est illustré par une étoile blanche. Une dernière carte (en dessous) représente le zonage sismique mis à jour par Jean Roger – 2020 en fonction de la distribution des séismes historiques. Chaque évènement est illustré par un cercle dont le diamètre correspond à la magnitude et la couleur correspond à la profondeur (Source : IRD - 2020)

5. Discussion

Les résultats obtenus permettent de dresser un panorama général concernant l'exposition de la Nouvelle-Calédonie à l'aléa tsunami. La cartographie de plus de 3000 scénarios prédéfinis sur l'ensemble du bassin Pacifique devient un outil de gestion opérationnel pour la DSCGR. Nous reviendrons tout d'abord sur les incertitudes de nos résultats en lien avec la qualité des données à disposition, l'optimisation du code MOST ainsi que les capacités techniques de calcul du cluster informatique à l'IRD. Dans un second temps, nous appréhenderons les enjeux d'une cartographie d'évaluation de l'aléa tsunami à travers les choix de représentation et le positionnement des cartes d'aléa dans une stratégie de gestion des risques naturels côtiers. Enfin, nous discuterons les pistes d'amélioration souhaitables et les perspectives de travail.

5.1 Les limites des résultats de modélisation sous MOST

5.1.1 Limites d'utilisation des données bathymétriques et topographiques : disponibilité et résolution

Dans une démarche de simulation numérique, la qualité des résultats provient partiellement de la quantité et la qualité des données utilisées. Pour la création de la base de données de scénarios, nous avons utilisé un schéma d'imbrication avec des grilles bathymétriques à 4 minutes (grille 0) – 1 minute (grille A) – 30 secondes (grille B) et 180 m (grille C). Pour les grilles à basse résolution, les données bathymétrique GEBCO 2014 à 30 secondes ont été privilégiées tandis que pour les grilles haute résolution, les données du MNT 2020 à 100 m ont été implémentées. Celui-ci correspond à une compilation de données hétérogènes. Certaines zones océaniques et côtières autour de la Nouvelle-Calédonie comme le récif de l'Astrolabe ou le récif Durand sont difficiles à intégrer car les données bathymétriques disponibles sont discontinues. Pour combler ce manque de données, des points de bathymétrie ont été interpolés par la méthode du krigeage. Toutefois, certaines zones restent encore mal connues et il n'existe pas de données très haute résolution à la côte. Par ailleurs, les données topographiques sont extraites du MNT terrestre de la Direction des Technologies et des Services Numériques (DTSI) à 10 m de résolution produit en 2012. Le trait de côte est repris à partir des données de la DTSI. Compte tenu de la résolution finale sur la sous-grille C à 180 m, la qualité des données topo/bathy reste largement suffisante.

Dans le cadre de la validation du code MOST, nous avons utilisé un schéma d'imbrication avec des grilles bathymétriques à 300 m (grille 0) – 180 m (grille A) – 25 m (grille B) – 10 m (grille C). L'objectif était de pouvoir placer des marégraphes virtuels dans les sous-grilles C à haute résolution. Pour les grilles à basse résolution, les données bathymétrique les données du MNT 2020 à 100 m ont été privilégiées tandis que pour les grilles très haute résolution, les données bathymétriques ont été travaillées et améliorées à partir d'ortho photos aériennes et de cartes marines digitalisées. Néanmoins, des erreurs de géoréférencement peuvent introduire des biais dans la valeur des points de bathymétrie. En ce qui concerne les données topographiques, elles n'ont pas été modifiées dans les sous-grilles et sont extraites du MNT terrestre de la DTSI. En revanche, le trait de côte a été

retravaillé pour modifier les sections approximatives, et ainsi bien reproduire les aménagements portuaires récents, comme la jetée de Tadine à Maré et la digue du port de Wé à Lifou.

5.1.2 Limites d'utilisation des données de sources : plan de failles

L'étude de l'aléa tsunami nécessite de discuter l'utilisation des sources tsunamigènes. Dans le cadre du projet, nous utilisons les sources ComMIT fournies par la NOAA et les sources RIFT de l'USGS. Les zones de rupture autour du bassin Pacifique sont divisées en un ou plusieurs segments de failles qui comportent un ou plusieurs patchs unitaires d'une dimension égale à 100x50 km. Néanmoins, la géométrie de ces plans de faille ne couvre pas l'intégralité des zones de rupture pouvant ainsi apporter des incertitudes si un séisme se produit dans une zone inter segments.

A l'échelle de la Nouvelle-Calédonie, pour les scénarios en champ proche, une localisation du séisme en dehors des patchs prédéfinis pourrait poser problème lors du déclenchement de l'alerte. D'ailleurs, plusieurs travaux récents utilisent des patchs plus petits, en concordance avec la géologie locale, notamment ceux de **Horspool et al. (2014)** (40x25 km) ou ceux de **Davies et Griffin (2018)** (50x50 km). C'est pour cette raison qu'il a été envisagé de redessiner les géométries des plans de faille en champs proche pour mieux représenter les scénarios dans la zone de subduction du Vanuatu avec des patch unitaire de 80x40 km. Néanmoins, les scénarios ComMIT ont déjà été utilisés à large échelle et ont fait leurs preuves comme dans l'étude de **Davies et al. (2017)** (100x50 km).

La reconstitution d'évènements historiques majeurs passe inévitablement par un travail sur les sources. Par exemple les travaux de **Mueller et al. (2015)** portent sur l'évaluation de l'aléa tsunami en Nouvelle-Zélande par reconstitution d'un tsunami historique avec un plan de faille de 240x106 km. La géométrie du plan de faille conditionne l'énergie libérée par le séisme et les amplitudes de vagues générées à la surface. Dans le cadre du projet, l'évènement récent de décembre 2018 a servi de témoin pour valider le code MOST et les résultats seront détaillés dans **Roger et al. (in prep.)**.

5.1.3 Limites dans la validation du modèle MOST : marégraphes et stabilité

La phase de validation du modèle permet de s'assurer de la robustesse des résultats au vu des données d'observation et des mesures enregistrées par les marégraphes. La Nouvelle-Calédonie dispose de 8 marégraphes répartis sur la Grande Terre et les Loyautés. L'utilisation des données marégraphiques implique tout d'abord le bon fonctionnement du capteur lors de l'évènement. Une fois que le signal est enregistré, les données doivent être extraites puis lissées en supprimant les basses fréquences (marée) et les hautes fréquences (houle) grâce un filtre.

La comparaison des données réelles avec le modèle passe par l'implémentation de marégraphes virtuels qui nécessitent une position X/Y et une profondeur. Pour certaines stations en Nouvelle-Calédonie, les localisations sont approximatives (Thio) et les profondeurs d'eau sous le

capteur incertaines. Il peut donc y avoir des décalages entre le jeu de données réel et les résultats numériques. En accord avec les recommandations du CEA, nous autorisons un facteur 2 sur les amplitudes d'ondes mesurées. Les temps d'arrivée estimés (ETA) aux stations sont calculés par une formule physique de propagation des ondes dans un domaine.

La stabilité d'un code n'est jamais optimale, et chaque code peut comporter une ou plusieurs contraintes. Le modèle MOST développé par la NOAA contient des restrictions à la fois dans la taille (grille 0 : 6000x6000 et grille A, B et C : 3000x3000) et dans le nombre imposé (3) de grilles bathymétriques. Au-delà des résolutions recommandées, il est nécessaire de porter une attention particulière au saut de résolution entre les sous-grilles pour éviter une diffusion du signal aux frontières, une perte de l'énergie des ondes et donc une sous-estimation des valeurs réelles de hauteurs de vagues.

5.1.4 Limites techniques dans le lancement des calculs finaux

Enfin, il convient de mentionner les limites imposées par les temps de calcul et le stockage des données. L'intégralité des tests ont été réalisés sur une machine locale avec un ordinateur DELL Précision 3630 i7 Pentium avec 64 Go de mémoire vive. Les calculs pour la base de données s'effectuent sur le cluster informatique.

Avec MOST, chaque scénario pour la phase de déformation initiale et propagation dans la grille 0 nécessite un calcul de 6 h (x 3000 scénarios) et donc 18 000 h de calcul. Cette phase est aujourd'hui finalisée et tous les résultats sont stockés dans des répertoires sur des disques RAID. Les derniers tests d'imbrication évoquent 13 h de calcul (x 3000 scénarios) et donc 39 000 h de calcul. Le processus d'imbrication demande une contribution importante du CPU ce qui participe à geler le système de bande passante du cluster.

5.2 Les enjeux de la cartographie de l'aléa tsunami

5.2.1 Pourquoi cartographier l'aléa tsunami en Nouvelle Calédonie ?

L'objectif principal d'une cartographie de l'aléa tsunami consiste à améliorer la connaissance de l'aléa tsunami par des outils d'évaluation et l'identification d'impacts potentiels sur un territoire (**Post et al., 2009**). En effet, la représentation de l'aléa tsunami donne à la fois une information à large échelle pour le déclenchement de l'alerte et à la fois une information à plus fine échelle pour tenter de réduire les impacts attendus et ainsi développer une stratégie locale d'atténuation de l'aléa. En Nouvelle-Calédonie, l'alerte est donnée sous forme binaire : évacuation ou non. La zone des 12 m d'altitude correspondant à la zone d'évacuation des populations. Cette délimitation est héritée des études sur l'aléa tsunami faites à la Réunion puis appliquée à la Nouvelle-Calédonie. L'unique critique topographique ne correspond donc pas aux réalités des impacts d'un tsunami.

C'est tout l'origine de la cartographie existante sur l'aléa disponible sur <https://georep.nc> qui découpe le territoire par zone classée en niveau d'alerte. La prise en compte de la distance au trait de côte, de la distribution des populations sur le littoral, des données et connaissances disponibles ainsi que des moyens techniques développés, justifient une mise à jour cartographique de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie.

L'objectif *in situ* du projet TSUCAL vise à fournir plusieurs outils pour quantifier l'aléa afin de cibler les efforts matériels et humains en cas d'alerte au tsunami. Dans ce contexte, une approche multi-scénario va permettre d'estimer les hauteurs de vagues attendues à la côte en cas de tsunami à l'échelle du territoire. Le manque de données dans le lagon et les marges d'incertitude liées aux simulations numériques rendent complexe la définition d'un zonage détaillé de l'aléa à très fine échelle comme celle des quartiers par exemple.

5.2.2 Le choix d'une représentation de l'aléa par des résultats maximisant

Travailler sur l'aléa tsunami, c'est choisir une approche de représentation de l'aléa (**Davies et al., 2017**) soit par scénario (TSUCAL) soit par évaluation probabiliste (PTHA). Il existe plusieurs types de représentation de l'aléa et notamment les courbes d'aléa qui croisent les périodes de retour et les hauteurs de vagues. La carte d'aléa doit permettre la représentation d'une variable liée au tsunami pour analyser le phénomène : Quelles hauteurs de vagues à la côte ? Quelles amplitudes de vagues dans l'océan ? Quels Run-Up estimés ? Quelles vitesses de courant ? Quelles profondeurs d'inondation ? Quels temps d'arrivée sur le littoral ? Toutes ces questions permettent d'apporter des connaissances supplémentaires à l'analyse de l'aléa.

Construire une carte de probabilité, c'est incrémenter les séries temporelles des hauteurs de vagues d'un tsunami enregistrées sur des points d'aléa (hazard point) situés à intervalle régulier à une profondeur donnée puis extrapoler avec une loi de Green sur une profondeur ciblée (**Horspool et al., 2014**). L'objectif du PTHA est d'estimer la probabilité, généralement en termes de dépassement annuel ou de période de retour, de paramètres de tsunami dépassant un certain seuil qui définit l'intensité de l'aléa, pour le site d'étude et sur une période donnée (**Mueller et al., 2015**). Ces prévisions probabilistes favorisent notamment des initiatives d'aménagement du territoire spécifiques et une quantification du risque financier.

Étudier l'aléa tsunami, c'est aussi estimer la contribution de chaque scénario sur un territoire. En effet, la carte désagrégée permet de mettre en valeur par source et par magnitude la prépondérance d'un scénario sur une zone donnée. Les catalogues historiques peuvent permettre de trouver un modèle de récurrence adapté et ainsi déterminer la fréquence spatio-temporelle d'un évènement selon la magnitude (**Burbidge et al., 2008**). Néanmoins dans plusieurs approches, le scénario le plus défavorable ou le scénario le plus crédible est sélectionné à partir d'un ensemble de scénarios et l'évaluation de l'aléa est ensuite basée sur l'analyse détaillée de ce scénario unique (**Borrero et al., 2006 ; Sieh et al., 2009**).

Cartographier l'aléa c'est faire des choix plus ou moins imposés. Le travail sur les sources est complexe en raison des particularismes géologiques des zones de rupture. La variation de l'angle et la distance de glissement du plan de faille peut amener à des sous-estimations non négligeables de l'intensité du tsunami avec des variations de 0.3/0.4 facteur de M_w (**Mueller et al., 2015**). Les connaissances sur les sources doivent encore être approfondies.

Des questions émergent également sur la relation établie entre la magnitude et la distance/emprise d'inondation. La distance d'inondation est souvent dépendante du contexte géomorphologique local. De fait, le changement de position du trait de côte, dû à des facteurs naturels et/ou anthropiques, est clairement un autre paramètre important régissant les inondations de tsunami et les estimations ultérieures des inondations (**Gonzalez et al., 2009**). La cartographie de l'aléa ne permet forcément de mettre en évidence les effets locaux de réfraction, de réflexion et de diffusion des trains d'ondes sur de longues distances. L'évaluation de ces processus physiques nécessite des connaissances solides sur la bathymétrie et l'hydrodynamique locale.

Enfin, construire une carte de l'aléa c'est aussi proposer des résultats maximisant pour ne pas prendre de risque quant à une sous-estimation des hauteurs de vagues attendues et/ou une évacuation partielle des populations. Dans les modélisations sous MOST, les récifs coralliens sont positionnés au zéro hydrographique et la propagation des ondes pour l'imbrication est paramétrée avec un coefficient de friction déterminé par la NOAA. Dans le cas des eaux peu profondes notamment en Nouvelle-Calédonie, il faut que les résultats soit considérés à la marée haute avec un coefficient de friction des vagues presque nul. Les résultats des hauteurs de vagues seront eux aussi multipliés par un facteur deux, permettant de combler la marge d'erreur des modèles.

5.2.3 Les cartes d'aléa tsunami : vers une stratégie de gestion du risque tsunami

L'estimation des impacts à la côte de l'aléa tsunami s'insère dans une stratégie plus globale de gestion du risque à l'échelle des territoires. D'ailleurs, l'un des éléments clés de la gestion communautaire des catastrophes est la planification de l'évacuation (**Papathoma, 2003 ; UNESCO, IOC, 2009 ; Post et al., 2009 ; Toubenböck et al., 2009 ; Dall'Osso & Dominey-Howes, 2010 ; Spahn et al., 2010**). De plus en plus, la gestion communautaire se base aussi sur la prise en compte des traditions orales comme sources d'information sur les tsunamis passés (**King, 2015**) et la capacité de réponse des populations locales. Cette capacité de réponse est partiellement dépendante du temps de détection puis du temps de transmission de l'information (phase d'alerte environ 8-10 min) ainsi que du temps de réaction puis du temps d'action (phase d'évacuation environ 3-5 min) des populations locales.

Cette mise en place de l'alerte grâce aux connaissances de l'aléa tsunami doit également être associée avec un diagnostic de vulnérabilité territoriale à travers la production de cartes de vulnérabilité. Ainsi la distribution des populations, la localisation des infrastructures critiques et les usages du sol doivent entraîner une classification des zones sensibles. En Nouvelle-Calédonie, les

travaux de **Thomas et al. (in prep.)** vont ainsi permettre d'éclairer ces questions et ainsi mieux comprendre les facteurs de prédispositions qui conditionnent l'évacuation des populations. La gestion du risque tsunami s'appuie donc fortement sur le concept de l'alerte et de l'évacuation. La planification de l'évacuation doit déterminer des zones prioritaires, identifier des points cibles (zones refuges) et spécifier les routes d'évacuation. Afin de sélectionner correctement les zones refuges et les voies d'évacuation, il existe une approche globale qui vise à évaluer l'accessibilité des zones refuges en trouvant le chemin le plus court en temps ou en distance (*RouteFinder*). Parallèlement, les simulations micro-échelle (multi-agent) permettent d'estimer les pertes de vitesse engendrées par les interactions entre les piétons (*SimWalk*) lors de l'évacuation (**Thomas, 2019**).

Cependant, même si une évaluation des risques a été bien présentée à la population, il n'y a aucune garantie que la société donne une réponse appropriée au danger lorsqu'il se présente. La réaction de la communauté dépend aussi de sa perception du risque, des avantages perçus de la gestion des risques et des méthodes locales utilisées (**Mayaguezz, 2015**). Globalement la cartographie de l'aléa tsunami n'est qu'une partie de la stratégie de gestion du risque. Elle se construit d'abord sur une phase de pré-catastrophe basée sur la préparation et la prévention, ensuite sur une phase post-catastrophe établie sur l'intervention d'urgence et la résilience des socio-éco-systèmes.

5.3 Les pistes d'amélioration et perspectives sur le travail

5.3.1 L'acquisition de données Haute Résolution : LIDAR

Le travail réalisé pour l'évaluation de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie constitue une mise à jour majeure des connaissances relatives à l'aléa tsunami à l'échelle du territoire. Une perspective envisageable pourrait être l'intégration de données topographiques haute résolution comme du LIDAR par exemple. Effectivement, la Nouvelle-Calédonie est le seul territoire ultra-marin français qui ne dispose pas de relevés LIDAR via un programme Litto3D.

Le produit Litto3D est une base de données altimétrique unique et continue terre-mer donnant une représentation tridimensionnelle de la forme et de la position du sol sur la frange littorale du territoire français (métropole, départements et collectivités d'Outre-Mer). Les éléments de sursol ne sont pas décrits dans ce produit : bâtiments, objets mobiles ou temporaires, végétation, etc (**Shom & IGN, 2012**). La Polynésie française a bénéficié d'une campagne LIDAR en 2015 et plusieurs sites comme Tahiti Nord, Bora Bora, Taharuu et Moorea ont été cartographiés.

Le produit "Lidar Polynésie française" est disponible gratuitement sous deux formes : un semis de points tridimensionnels et un modèle numérique de terrain maillé et qualifié, structuré en dalles de 1 km² avec une résolution à 1 m et à 5 m (**Shom SAU, 2015**). L'acquisition de données bathymétrique et topographique avec une résolution très fine, permettrait de faire de la modélisation d'inondation de tsunami.

5.3.2 Hausse du niveau marin et changement climatique : quelles conséquences sur le comportement des tsunamis en Nouvelle-Calédonie ?

La région des îles tropicales dans le Pacifique Ouest (20S-15N-120E-135W) est généralement considérée comme l'une des régions du monde les plus vulnérables face à l'élévation future du niveau marin (**Nicholls & Cazenave, 2010**). Effectivement, sur la période 1993-2009 dans le Pacifique, le niveau marin aurait connu des variations comprises entre 0.7 et 4.9 mm/an (**Becker et al., 2011**) avec un contraste net entre le Pacifique Ouest et le Pacifique Est. La variation relative du niveau marin est principalement soumise à deux facteurs principaux : la montée du niveau océanique et les mouvements terrestres locaux de subsidence/surrection (**Becker et al., 2011**). Cette montée du niveau de la mer est globale, mais peut présenter des variations régionales. En Nouvelle-Calédonie, le niveau de la mer a augmenté de 1 mm/an en moyenne sur les 60 dernières années, avec de fortes variations interannuelles (**Aucan et al., 2017**). Même si les incertitudes pèsent encore quant à la part exacte du changement climatique dans les mutations environnementales globales, des impacts sont tout de même identifiables sur les territoires ultramarins. L'élévation du niveau marin, l'érosion côtière, les submersions et inondations marines, la salinisation des sols, la réduction de la résilience des écosystèmes ou encore l'intensification des phénomènes naturels extrêmes (**Leatherman, 1997 ; Mimura, 1999 ; Khan et al., 2002 ; Yamano et al., 2007**) devraient largement participer à modifier les relations entre les sociétés et l'environnement.

De plus, en ce qui concerne les atolls et les petites îles, les niveaux d'eau et l'énergie des vagues sur la côte devraient significativement augmenter, ce qui aggravera les inondations et les dommages associés (**Duvat & Magnan, 2019**). L'activité des vagues en plus de l'augmentation du niveau marin pourrait accroître la fréquence et l'étendue des inondations marines dans les zones côtières à faible altitude. Le constat pour les vagues de tsunamis est légèrement différent puisque ces ondes sont plus longues et n'ont pas le même comportement sur le littoral. Néanmoins, dans les systèmes insulaires tropicaux, l'élévation du niveau marin peut jouer un rôle clé dans le franchissement des petits tsunamis à travers la barrière récifale.

5.3.3 La prise en compte des zones naturelles tampons pour atténuer les tsunamis

Face à ce constat, les écosystèmes côtiers peuvent devenir un atout dans des stratégies de réduction des risques littoraux. Lorsque les conditions environnementales sont réunies, ils peuvent suivre l'élévation des niveaux d'eau et ainsi disposer d'un avantage sur les défenses littorales artificielles, telles que les murs de protection, les brises lames, les gabions... (**Spalding et al., 2013**). Cependant, ces services écosystémiques rendus par la nature restent conditionnés à la vitesse d'élévation du niveau marin ainsi qu'à la structure physique de l'écosystème qui pourrait tant accélérer que focaliser l'énergie des vagues (**Cochard et al., 2008 ; Fernando et al., 2008**). Il semble donc essentiel de considérer l'interdépendance des écosystèmes littoraux et leurs interactions dans l'analyse et la gestion des risques côtiers (**Spalding et al., 2013**).

Les zones humides, les récifs coralliens, les herbiers marins et la végétation dunaire participent à la réfraction des houles et à la dynamique sédimentaire du système. De fait, la barrière de corail n'est pas seulement un habitat pour la faune et la flore et une source de sédiments, mais elle joue également un rôle de protection en absorbant l'énergie des vagues (**Forbes et al., 2013**), *in fine* des ondes de tsunami, cependant la part d'absorption est encore discutée (**Roger et al., 2012**). Par ailleurs, il semble tout autant nécessaire de comprendre le rôle des mangroves dans l'absorption de l'énergie des vagues et dans la réduction des impacts de l'élévation du niveau marin sur les littoraux (**Di Nitto, 2014 ; Krauss et al., 2014 ; Nunn, 2000**). Ces zones peuvent réduire les inondations liées aux ondes de tempêtes et tsunamis, même si leurs capacités de protection dépendent à la fois des caractéristiques de l'évènement et de la géomorphologie locale (**Gracia et al., 2017**).

Dans l'étude des risques côtiers, une approche écosystémique basée sur la création et/ou la restauration des écosystèmes littoraux, tels que les zones humides, les structures de récifs, les herbiers marins et la végétation dunaire, peuvent offrir des alternatives naturelles optimales et ainsi constituer une protection physique, augmenter les co-bénéfices dans la mitigation, stimuler et renforcer la résilience des systèmes et intégrer les population locales (**Gracia et al., 2017**). Comment inclure les écosystèmes côtiers comme un levier dans l'atténuation des risques et dans la gestion des littoraux ?

Afin de construire un système d'alerte efficace, les progrès technologiques doivent s'accompagner d'un renforcement des capacités de gestion de l'alerte au niveau local et national. Une gouvernance efficace des risques côtiers doit donc associer la sphère scientifique, la sphère opérationnelle et la sphère publique. Cet objectif a largement été mise en valeur dans le projet TSUCAL grâce à des échanges continus entre la DSCGR et l'IRD. L'idée est de proposer des outils d'évaluation de l'aléa qui correspondent totalement aux besoins techniques des acteurs opérationnels.

Conclusion

Réponse à la problématique

Comment appréhender les techniques d'évaluation de l'aléa tsunami afin d'orienter une gestion coordonnée dans la mise en sécurité des populations côtières de Nouvelle Calédonie ?

Dans le projet TSUCAL, l'évaluation de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie passe une approche quantitative multi scénarios. La livraison de la base de données de scénarios et de l'atlas doit permettre une amélioration de l'alerte tsunami à plusieurs échelles. L'objectif doit aboutir à optimiser les efforts matériels et immatériels déployés par la DSCGR. Tout l'enjeu est de réussir à lier les connaissances scientifiques de l'aléa et l'efficacité opérationnelle des outils d'évaluation.

Globalement, la Nouvelle-Calédonie a connu peu de tsunamis destructeur au cours des 150 dernières années. La majorité des tsunamis qui atteignent les côtes sont plutôt des petits évènements, comme celui du 5 décembre 2018 par exemple. Dans tous les cas, la détection d'un séisme puis l'alerte tsunami doit se faire dans des temps les plus courts possibles afin de mettre en sécurité les populations et usagers du littoral au plus vite dans le cadre d'évènements locaux (temps < 15 min entre le séisme et la 1^{ère} arrivée du tsunami sur les côtes). Le centre opérationnel de la DSCGR dispose déjà d'une alerte SMS lors de la détection d'un séisme mais l'idée est de pouvoir combiner cette alerte avec un processus automatique de recherche d'un ou plusieurs scénario(s) de tsunami équivalent(s) à l'évènement.

A court terme, il serait possible d'améliorer le temps de détection et la précision de localisation d'un séisme. A plus long terme, il serait possible d'imaginer une solution de suivi d'un tsunami en temps réel par un dispositif de bouées DART davantage déployé avec des capteurs disposés entre la fosse du Vanuatu et les côtes de Nouvelle-Calédonie, ou par un câble de télécommunication instrumenté (**Howe et al., 2016**). En parallèle des outils numériques développés, un atlas au format papier sera livré à la DSCGR pour être en mesure de réagir en cas de coupure d'électricité ou de panne du réseau internet. L'atlas est aussi un outil pratique pour simuler une alerte tsunami fictive au centre opérationnel de la DSCGR dans le cadre d'un exercice.

La cartographie de l'aléa tsunami n'est qu'une partie de l'analyse du risque tsunami dans le but de mettre en place une gestion coordonnée entre les parties prenantes : acteurs de la recherche, sphère politique et décisionnelle, acteur de la Sécurité Civile et populations locales. L'identification des secteurs côtiers exposés, la caractérisation des zones vulnérables et la création d'itinéraires d'évacuation s'intègrent dans un processus plus large de réduction du risque.

Depuis les années 2000, le sort des petits états insulaires confrontés au spectre de l'élévation du niveau marin a suscité l'inquiétude mondiale et incité un labyrinthe de programme internationaux pour réfléchir à la manière dont les nations du Pacifique peuvent et doivent s'adapter aux menaces

du changement climatique. L'adoption de ces nouvelles lois d'adaptation pose des défis considérables à l'échelle nationale pour la planification, les objectifs de développement et les régimes fonciers (**Kench et al., 2018**).

De fait, il existe plusieurs barrières à la mise en place d'une voie d'adaptation homogène pour le Pacifique notamment une confusion chronique entre changement et variabilité climatique, un manque de sensibilisation des populations, des politiques de gestion à court terme et le rôle de la sphère décisionnelle traditionnelle et religieuse (**Lata & Nunn, 2011**). Élaborer une stratégie d'adaptation face aux risques littoraux dans les états du Pacifique c'est surtout penser à sa mise en œuvre et à son application (**Nunn et al., 2013**).

Retour d'expérience

Tout d'abord, sur l'ensemble de la période de stage, j'ai eu la chance d'être accompagné par tous mes encadrants. Travailler dans un laboratoire de recherche pluridisciplinaire favorise les interactions avec d'autres disciplines. A la base l'UMR Entropie n'est pas une unité de Géographie, j'ai notamment pu échanger avec plusieurs spécialistes en Océanographie physique et en Géologie dans le cadre du projet.

Au-delà du contenu du stage, j'ai pu acquérir des compétences techniques en modélisation de tsunami mais également des compétence d'expression orale à travers l'organisation de plusieurs séminaires, notamment lors de mon arrivée et juste avant la fin de mon stage. En effet, tous les jeudis à 11h, une personne du centre pouvait s'inscrire préalablement pour présenter ses travaux, ses articles, etc. L'objectif étant de maintenir une cohésion d'équipe permanente au sein des membres du laboratoire.

Ce stage de fin d'étude amène l'étudiant à gagner en autonomie dans le travail et dans l'organisation. Pour ma part, j'ai notamment été en contact régulier avec les partenaires du projet (DSCGR/DTSI). La planification de réunion avec les différents acteurs du projet a constitué une réelle plus-value à ce stage.

Enfin, je souhaite évoquer le contexte particulier dans lequel ce stage s'est effectué notamment en raison de la pandémie mondiale du Covid-19. Au début du mois d'avril, le Gouvernement de Nouvelle-Calédonie prend la décision de fermer les frontières internationales. Les liaisons maritimes et aérienne sont coupées jusqu'à nouvel ordre. Dans la foulée, je bascule donc en télétravail et ce pendant un mois complet, pour ensuite retourner sur le centre IRD. Je tiens à préciser que le télétravail n'a pas eu de conséquences majeures sur le fond et la forme de mon stage.

En ce qui concerne la suite de mon parcours, je souhaite toujours poursuivre dans la recherche scientifique et plus particulièrement sur une thèse dans les services écosystémiques de protection du littoral délivrés par écosystème côtiers tropicaux (récifs coralliens, herbiers et mangroves).

Table des matières

AVANT-PROPOS	2
RESUME	3
ABSTRACT	3
REMERCIEMENTS	4
SOMMAIRE	5
INTRODUCTION GENERALE	6
CONTEXTE DU STAGE DE MASTER 2	6
PRESENTATION DE L'ORGANISME : IRD.....	6
OBJECTIFS DU STAGE (PARTICIPATION AU PROJET TSUCAL).....	7
1. ETAT DE L'ART AUTOUR D'UN ALEA COTIER : LE TSUNAMI	8
1.1 APPREHENDER LES RISQUES COTIERS PAR LA DIMENSION INSULAIRE	8
1.1.1 <i>Le littoral : un objet d'étude géographique</i>	8
1.1.2 <i>Définition de l'aléa</i>	8
1.1.3 <i>Définition de la vulnérabilité</i>	8
1.1.4 <i>Des milieux insulaires côtiers plus à risque ?</i>	9
1.2 L'ALEA TSUNAMI : PROCESSUS DE FORMATION ET DYNAMIQUES OCEANIQUES	11
1.2.1 <i>Qu'est-ce qu'un tsunami ?</i>	11
1.2.2 <i>Comment se comporte un tsunami en mer et à la côte ?</i>	12
1.2.3 <i>Un bref panorama sur les tsunamis historiques</i>	14
1.3 MODELISER POUR MIEUX PREVOIR L'ALEA TSUNAMI : APPORTS DE LA CARTOGRAPHIE	15
1.3.1 <i>Surveillance, détection et système d'alerte au tsunami</i>	15
1.3.2 <i>Les outils de prévision de l'aléa tsunami</i>	16
1.3.3 <i>Vers la gestion du risque tsunami</i>	17
2. MISE EN CONTEXTE DE L'ETUDE	20
2.1 LA NOUVELLE-CALÉDONIE : UN TERRITOIRE ULTRAMARIN FRANÇAIS DANS LA CEINTURE DE FEU DU PACIFIQUE	20
2.1.1 <i>Les caractéristiques géographiques de la Nouvelle-Calédonie</i>	20
2.1.2 <i>La gestion du littoral en Nouvelle-Calédonie</i>	21
2.1.3 <i>Géodynamique locale et historique des séismes</i>	22
2.2 ÉTAT DES LIEUX DE LA CONNAISSANCE DE L'ALEA TSUNAMI EN NOUVELLE-CALÉDONIE	24
2.2.1 <i>Les catalogues historiques de tsunamis en Nouvelle-Calédonie</i>	24
2.2.2 <i>Comment coordonner la gestion du risque tsunami sur le territoire ?</i>	26
2.2.3 <i>Vers une amélioration du système d'alerte tsunami en Nouvelle-Calédonie</i>	27
3. MATERIEL ET METHODES	28
3.1 LE CODE MOST ET LES DONNEES UTILISEES.....	28
3.1.1 <i>Fonctionnement et paramétrisation du code</i>	28
3.1.2 <i>Récupération des données bathymétriques et topographiques</i>	29
3.2 METHODOLOGIE DE CONCEPTION DES GRILLES BATHYMETRIQUES	30
3.2.1 <i>Des données bathymétriques brutes vers un maillage</i>	30
3.2.2 <i>Tester la sensibilité du modèle avec les grilles</i>	31
3.3 AJUSTEMENT DES SOURCES DES SCENARIOS DE TSUNAMI	33
3.3.1 <i>Utilisation des sources ComMIT</i>	34
3.3.2 <i>Tester la sensibilité du modèle avec les paramètres de source</i>	36
3.4 VALIDATION DU CODE MOST AVEC LE TSUNAMI DU 5 DECEMBRE 2018	40
4. RESULTATS	43
4.1 LA CREATION DE LA BASE DE DONNEES DE SCENARIOS DE TSUNAMI POUR LA NOUVELLE-CALÉDONIE	43
4.1.1 <i>Mise en contexte technique</i>	43

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

4.1.2	<i>La livraison des produits de la base de données</i>	43
4.1.3	<i>La structure de la base de données : détection automatique et requêtes spatiales</i>	43
4.2	CARTOGRAPHIE DE L'ALEA TSUNAMI EN NOUVELLE-CALEDONIE	45
4.2.1	<i>Les scénarios mono et multi patchs en champ proche</i>	45
4.2.2	<i>Les hauteurs de vagues maximums en champ proche et en champ lointain</i>	47
4.2.3	<i>Les temps de trajet de tsunami en champ proche et en champ lointain</i>	51
4.3	LES PREMIERS MODELES DE L'ATLAS DES SCENARIOS DE TSUNAMI EN NOUVELLE-CALEDONIE	51
5.	DISCUSSION	53
5.1	LES LIMITES DES RESULTATS DE MODELISATION SOUS MOST	53
5.1.1	<i>Limites d'utilisation des données bathymétriques et topographiques : disponibilité et résolution</i>	53
5.1.2	<i>Limites d'utilisation des données de sources : plan de failles</i>	54
5.1.3	<i>Limites dans la validation du modèle MOST : marégraphes et stabilité</i>	54
5.1.4	<i>Limites techniques dans le lancement des calculs finaux</i>	55
5.2	LES ENJEUX DE LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA TSUNAMI	55
5.2.1	<i>Pourquoi cartographier l'aléa tsunami en Nouvelle Calédonie ?</i>	55
5.2.2	<i>Le choix d'une représentation de l'aléa par des résultats maximisant</i>	56
5.2.3	<i>Les cartes d'aléa tsunami : vers une stratégie de gestion du risque tsunami</i>	57
5.3	LES PISTES D'AMELIORATION ET PERSPECTIVES SUR LE TRAVAIL	58
5.3.1	<i>L'acquisition de données Haute Résolution : LIDAR</i>	58
5.3.2	<i>Hausse du niveau marin et changement climatique : quelles conséquences sur le comportement des tsunamis en Nouvelle-Calédonie ?</i>	59
5.3.3	<i>La prise en compte des zones naturelles tampons pour atténuer les tsunamis</i>	59
	CONCLUSION	61
	REPONSE A LA PROBLEMATIQUE	61
	RETOUR D'EXPERIENCE	63
	TABLE DES MATIERES	64
	TABLE DES FIGURES	66
	TABLE DES TABLEAUX	69
	BIBLIOGRAPHIE :	70

Table des figures

FIGURE 1 : VUE AERIENNE DU CENTRE INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT (IRD) SITUE SUR L'ANSE VATA A NOUMEA EN NOUVELLE-CALÉDONIE (SOURCE : IRD) 6

FIGURE 2 : SCHEMA CONCEPTUEL DES FACTEURS DE CONTROLE A PRENDRE EN COMPTE DANS L'ANALYSE DU RISQUE TSUNAMI. L'ALEA TSUNAMI SE CARACTERISE PAR UNE SOURCE, PAR UN COMPORTEMENT DANS L'ESPACE ET DANS LE TEMPS ET PAR DES IMPACTS ATTENDUS SUR LE LITTORAL. LE DEGRE D'EXPOSITION D'UN TERRITOIRE PEUT DEPENDRE D'UNE RELATION SIMPLE BASEE SUR LA TOPOGRAPHIE ET LA DISTANCE AU TRAIT DE COTE, MAIS IL PEUT EGALEMENT ETRE ANALYSE EN INTEGRANT LA PRESENCE DE ZONES NATURELLES TAMPONS (MANGROVES ET RECIFS) AINSI QUE LES NIVEAUX D'EAUX (MAREE HAUTE OU BASSE). LA VULNERABILITE COTIERE EST UNE COMPOSANTE DU RISQUE TSUNAMI QUI INTEGRE LA REPARTITION DES POPULATIONS SUR LE LITTORAL AINSI QUE LA DISTRIBUTION DES INFRASTRUCTURES CRITIQUES. ANALYSER LA VULNERABILITE C'EST AUSSI QUALIFIER LES SYSTEMES D'ALERTE, NOTAMMENT LES SIRENES, MAIS AUSSI IDENTIFIER LES VOIES D'EVACUATION VERS DES ZONES REFUGES (SOURCE : INSPIRE DE L'IPCC - 2020)..... 10

FIGURE 3 : DISTRIBUTION GEOGRAPHIQUE DES SOURCES DE TSUNAMI A L'ECHELLE MONDIALE RECENSEES ENTRE 1610 ET 2017. LES TSUNAMIS D'ORIGINE VOLCANIQUE SONT REPRESENTES PAR DES TRIANGLES, LES TSUNAMIS ISSUS DE GLISSEMENTS DE TERRAIN SONT ILLUSTRÉS AVEC DES CARRÉS ET LES TSUNAMIS D'ORIGINE SISMIQUE SONT REPRESENTES PAR DES RONDS. LES CAUSES DE GENESE INCONNUES SONT MARQUEES PAR UN POINT D'INTERROGATION. LA COULEUR DU ROUGE VERS LE BLANC CORRESPOND A LA LETALITE DES EVENEMENTS EXPRIMEE EN NOMBRE DE DECES (SOURCE : UNESCO - COI - ITIC - NOAA - 2018) 11

FIGURE 4 : LES DIFFERENTS PARAMETRES GEOLOGIQUES D'UN PLAN DE FAILLE A PRENDRE EN COMPTE DANS LA DEFORMATION INITIALE D'UN TSUNAMI. UN PLAN DE FAILLE POSSEDE UNE GEOMETRIE (LONGUEUR (L) X LARGEUR (W)) QUI DISPOSE D'UNE LOCALISATION EN LONGITUDE/LATITUDE ET UNE PROFONDEUR ASSOCIEE. LE DEPLACEMENT DU PLAN DE FAILLE EST CARACTERISE PAR UN GLISSEMENT (u), UN ANGLE DE GLISSEMENT (γ), UN PENDAGE (Δ) ET UN AZIMUT (Φ) (SOURCE : MOST - 2006) 12

FIGURE 5 : LES DIFFERENTS STADES DE FORMATION ET D'EVOLUTION D'UN TSUNAMI D'ORIGINE SISMIQUE. A GAUCHE, LA DEFORMATION INITIALE PEUT AVOIR DEUX CONFIGURATIONS DIFFERENTES EN FONCTION DU MECANISME AU FOYER (ELEVATION OU SUBSIDENCE). A DROITE, LA PROPAGATION DES ONDES DANS L'OCEAN EST VERIFIEE PAR UNE EQUATION QUI DETERMINE LA VITESSE DU TSUNAMI. LA PHASE D'INONDATION SE CARACTERISE PAR UN CHANGEMENT DE COMPORTEMENT DU/DES TRAIN(S) D'ONDE (SHOALING EFFECT) ET SE MESURE AVEC LA DISTANCE/HAUTEUR DU RUN-UP A LA COTE (SOURCE : INSPIRE DE LA COI - 2020) 13

FIGURE 6 : FONCTIONNEMENT DU SYSTEME DE BOUEES DEEP-OCEAN ASSESSMENT AND REPORTING OF TSUNAMIS (DART) DANS LA DETECTION DES TSUNAMIS. LE SYSTEME ENREGISTRE LES VARIATIONS DE PRESSION DU NIVEAU MARIN JUSQU'A 0,5CM GRACE A UN CAPTEUR DE PRESSION SITUE AU FOND DE L'OCEAN. LA SONDE ENVOIE DES INFORMATIONS PAR TELEMETRIE ACOUSTIQUE JUSQU'A LA BOUEE DE SURFACE. CELLE-CI TRANSMET ENSUITE L'INFORMATION EN UTILISANT DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES VERS UN SATELLITE. LA STATION DE LA NOAA REÇOIT MAIS PEUT AUSSI EMETTRE DES SIGNAUX VERS LA BOUEE DART (RELAIS DE L'INFORMATION BIDIRECTIONNELLE) (SOURCE : NOAA) 15

FIGURE 7 : VISUALISATION DE LA BATHYMETRIE DANS LE PACIFIQUE (EN METRES). LES ZONES ROUGES CORRESPONDENT AUX GRANDES PROFONDEURS SUPERIEURES A 8000 M ET LES ZONES BLEUES A DES ZONES DE RELIEF SUPERIEURES A 2000 M (SOURCE : NOAA) 16

FIGURE 8 : RESULTATS DE MODELISATION AVEC MOST DES HAUTEURS DE VAGUES MAXIMUMS DE DEUX EVENEMENTS HISTORIQUES. A GAUCHE LE TSUNAMI DU CHILI EN 1960 (Mw 9.5) QUI A TOUCHE UNE GRANDE PARTIE DES ARCHIPELS DU PACIFIQUE JUSQU'AUX COTES JAPONAISES. A DROITE, LE TSUNAMI DU JAPON EN 2011 (Mw 9.0) QUI A GENERE DES VAGUES DE PLUS DE 8 M SUR LES COTES HAWAÏENNES (UTILISATION DE PARAMETRES DE SOURCE COMMIT) 17

FIGURE 9 : CARTE DES POINTS D'ALEA SUR LE LITTORAL AUSTRALIEN UTILISES POUR LES MODELES DE PREVISION DES HAUTEURS DE VAGUES MAXIMUMS EN CAS DE TSUNAMI (SOURCE : DAVIES & GRIFFIN, 2018) 19

FIGURE 10 : CARTE DE LOCALISATION DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE (SOURCE : ÉRIC GABA, COMMONS WIKIMEDIA) 20

FIGURE 11 : ZONAGE DES FRANGES LITTORALES AUX ALTITUDES DE 5 M, 10 M, 12 M, 20 M ET 50 M EN NOUVELLE-CALÉDONIE : (A) SUR TOUT LE TERRITOIRE, (B) ZOOM SUR LE GRAND NOUMEA, (C) ZOOM SUR OUEVA, ILES LOYAUTE (DONNEES MNT, 2009) (SOURCE : THOMAS, 2019)..... 21

FIGURE 12 : CONTEXTE TECTONIQUE DANS LE BASSIN PACIFIQUE SUD-OUEST QUI REPRESENTE LES SEISMES DE MAGNITUDE SUPERIEURE A 7.0 (Mw) SUR LA PERIODE 2000 – 2020. LE FOND BATHYMETRIQUE PROVIENT DU JEU DE DONNEES GEMCO 2014. CHAQUE SEISME EST IDENTIFIE PAR UN CERCLE DONT LA COULEUR INDIQUE LA PROFONDEUR DE L'EVENEMENT EN KM (SOURCE : USGS). LES ZONES DE RUPTURE DE FAILLE SONT DESSINEES EN ROUGE (SOURCE : USGS) ET LES PRINCIPAUX TERRITOIRES INSULAIRES SONT MENTIONNEES EN BLANC. 22

FIGURE 13 : LOCALISATION DES SEISMES HISTORIQUES AVEC UNE MAGNITUDE SUPERIEURE A 7.0 (Mw) DANS L'ARC DU VANUATU SUR LA PERIODE 1973 - 2020. LE FOND BATHYMETRIQUE PROVIENT DU JEU DE DONNEES GEMCO 2014. CHAQUE EVENEMENT EST REPRESENTÉ PAR UN CERCLE DONT LE DIAMETRE CORRESPOND A LA MAGNITUDE ET LA COULEUR A LA PROFONDEUR EN KM (SOURCE : USGS). LES MOUVEMENTS HORIZONTAUX SONT REPRESENTES PAR LES FLECHES NOIRES ASSOCIEES A UNE VITESSE DE DEPLACEMENT MOYENNE EN CM PAR AN (SOURCE : PILLET & PELLETIER – 2004). LES GRANDES UNITES GEOLOGIQUES (BASSIN ET RIDE) SONT MENTIONNEES EN GRAS

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

(SOURCE : PILLET & PELLETIER – 2004). LES ETOILES VERTES CORRESPONDENT A LA POSITION DES MAREGRAPHES EN NOUVELLE-CALEDONIE ET AU VANUATU (SOURCE : COI).....	23
FIGURE 14 : REGIONS DE LA NOUVELLE CALEDONIE AYANT SUBIS LES IMPACTS DES TSUNAMIS ENTRE 1875 ET 2009. CHAQUE TSUNAMI EST CARACTERISE PAR SA SOURCE (TRANSOCEANIQUE, REGIONALE OU LOCALE) ET PAR DES COMPLEMENTS D'INFORMATIONS SUR L'IDENTIFICATION DE DEGATS (ETOILE), L'ESTIMATION DES RUN-UP (TRIANGLE) ET LE NOMBRE DE DECES (CROIX). LE RECIF BARRIERE EST REPRESENTE EN ORANGE SUR LA CARTE (SOURCE : SAHAL ET AL., 2010).....	24
FIGURE 15 : LOCALISATION DES SEISMES QUI ONT DECLENCHÉ DES TSUNAMIS ENREGISTRES EN NOUVELLE-CALEDONIE A) ÉCHELLE DU PACIFIQUE B) ÉCHELLE REGIONALE. LA PROFONDEUR DES SEISMES EST INDIQUEE PAR UNE ECHELLE DE COULEUR (-100 KM / 0 KM). LA MAGNITUDE EST ASSOCIEE AU DIAMETRE DES CERCLES (SOURCE : ROGER ET AL., 2019)	25
FIGURE 16 : CARTOGRAPHIE EXISTANTE DU RISQUE TSUNAMI SUR NOUMEA EN NOUVELLE CALEDONIE. L'ECHELLE DE COULEUR REPRESENTE UN GRADIENT D'INTENSITE DU RISQUE TSUNAMI COMPRIS ENTRE 0 (BLEU) ET 8 (ROUGE) SELON UN CRITERE TOPOGRAPHIQUE. LA COMMUNE DE HIENGHENE DISPOSE D'UN PLAN D'EVACUATION ELABORE PAR LA PIROPS QUI N'EST PAS VISIBLE SUR LA CARTE. LA ZONE BLANCHE SUR L'ÎLOT BRUN CORRESPOND A UNE ZONE MILITAIRE (SOURCE : HTTPS://GEOREP.NC).....	27
FIGURE 17 : EMPRISE SPATIALE ET IMBRICATION DES DIFFERENTES GRILLES BATHYMETRIQUES (EN ROUGE). LE FOND BATHYMETRIQUE PROVIENT DU JEU DE DONNEES GEBCO 2014. LA GRILLE 0 CORRESPOND AU DOMAINE DANS LEQUEL MOST CALCULE LA DEFORMATION INITIALE ET LA PROPAGATION. LES SOUS-GRILLES 1, 2 ET 3 CORRESPONDENT AUX DOMAINES AVEC UNE RESOLUTION PLUS FINE ET DANS LESQUELS MOST EFFECTUE LES CALCUL D'IMBRICATION.	30
FIGURE 18 : GRILLE BATHYMETRIQUE LISIBLE AU FORMAT MOST (A GAUCHE) ET GRADIENTS DE BATHYMETRIE PERMETTANT D'IDENTIFIER UNE VALEUR DE BATHYMETRIE EXTREME (A DROITE) (SOURCE : NOAA)	31
FIGURE 19 : MODELISATION D'UN SCENARIO DE TSUNAMI SUR LA ZONE DE FAILLES TONGA-KERMADEC DANS LE PACIFIQUE SUD-OUEST APRES 15 MIN DE PROPAGATION SOUS MOST SANS VIDANGE DE GRILLE (A GAUCHE) ET APRES 45 MIN DE PROPAGATION SOUS MOST AVEC UNE VIDANGE DE GRILLE SUR LA NOUVELLE-ZELANDE (A DROITE).....	32
FIGURE 20 : AMPLITUDES DE VAGUES (CM) DANS LE LAGON SUD DE GRANDE TERRE ISSUES D'UN SCENARIO DE TSUNAMI SUR L'ARC DU VANUATU. DES POINTS DE BATHYMETRIE A FAIBLE PROFONDEUR ENTRAINENT UNE EXPLOSION DU MODELE SUR LE RECIF BARRIERE (A GAUCHE). CES POINTS SONT SUPPRIMES APRES L'APPLICATION DU FILTRE DE LA NOAA POUR LES GRILLES BATHYMETRIQUES ET L'EXPLOSION N'A PLUS LIEU (A DROITE)	33
FIGURE 21 : REPARTITION DES SCENARIOS COMMIT AUTOUR DU BASSIN PACIFIQUE OUEST (A GAUCHE) EST (A DROITE) (SOURCE : COMMIT).....	34
FIGURE 22 : LOCALISATION D'UN SCENARIO COMMIT EN PATCH UNITAIRE (A GAUCHE) ET D'UN SCENARIO COMMIT EN MULTI-PATCHS (A DROITE) SUR L'ARC DU VANUATU (SOURCE : JEAN ROGER - 2020).....	35
FIGURE 23 : HAUTEURS DE VAGUES MAXIMUMS ATTENDUES (CM) POUR UN SCENARIO 7.5 SUR L'ARC DU VANUATU AVEC UN PLAN DE FAILLE COMMIT (AU-DESSUS) ET UN PLAN DE FAILLE COMMIT MODIFIE (EN DESSOUS). LES ECHELLES DE COULEURS SONT IDENTIQUES (SOURCE : MNT NC - 2020).....	36
FIGURE 24 : HAUTEURS DE VAGUES MAXIMUMS ATTENDUES (CM) POUR UN SCENARIO 7.5 (AU-DESSUS) ET 8.5 (EN DESSOUS) AUX ILES SALOMON. AU CENTRE, LES SOURCES ONT ETE PARAMETREES AVEC L'AZIMUT ISSU DE COMMIT. L'AZIMUT A ETE MODIFIE DE 10° EN PLUS (A GAUCHE) ET 10° EN MOINS (A DROITE) (SOURCE : GEBCO - 2014).....	37
FIGURE 25 : PROFILS DE DEFORMATION DU NIVEAU MARIN A LA SOURCE A PARTIR D'UN SCENARIO COMMIT ET EN FONCTION DES PARAMETRES DE GLISSEMENT (SOURCE : COMMIT)	38
FIGURE 26 : PROFILS DE DEFORMATION DU NIVEAU MARIN A LA SOURCE A PARTIR D'UN SCENARIO COMMIT 7.5 (A GAUCHE) ET 8.5 (A DROITE) ET EN FONCTION DES PARAMETRES DE PROFONDEUR (SOURCE : COMMIT)	38
FIGURE 27 : PROFILS DE DEFORMATION DU NIVEAU MARIN A LA SOURCE A PARTIR D'UN SCENARIO COMMIT 7.5 (A GAUCHE) ET 8.5 (A DROITE) ET EN FONCTION DES PARAMETRES DE PENDAGE (SOURCE : COMMIT).....	39
FIGURE 28 : PROFILS DE DEFORMATION DU NIVEAU MARIN A LA SOURCE A PARTIR D'UN SCENARIO COMMIT 7.5 (A GAUCHE) ET 8.5 (A DROITE) ET EN FONCTION DES PARAMETRES D'ANGLE DE GLISSEMENT (SOURCE : COMMIT)	39
FIGURE 29 : LOCALISATION DES DIFFERENTS MAREGRAPHES ET DES DONNEES D'OBSERVATION EN NOUVELLE-CALEDONIE ET AU VANUATU QUI SERONT UTILISES POUR LA COMPARAISON DES RESULTATS DE MODELISATION AVEC LES DONNEES HISTORIQUES DU 05/12/18 (SOURCE : IRD - 2020)	40
FIGURE 30 : CHAINE DE TRAITEMENT DANS LA CONSTRUCTION D'UN MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN HAUTE RESOLUTION. LA CREATION D'UN MNT LITTORAL NECESSITE DES DONNEES TOPOGRAPHIQUES (EN ROUGE), DES DONNEES BATHYMETRIQUES (EN BLEU) ET DES DONNEES DE TRAIT DE COTE (EN JAUNE). CES DONNEES DOIVENT ETRE FUSIONNEES PUIS GEOREFERENCEES POUR ETRE IMPORTEES DANS LE LOGICIEL DE MAILLAGE. LA METHODE D'INTERPOLATION PEUT ETRE ADAPTEE SELON LES BESOINS MAIS C'EST LE KRIGEAGE QUI SERA UTILISE ICI (EN VERT). SI LE MNT GENERE COMPORTE DES ERREURS DE BATHY/TOPO, IL EST CORRIGE SOUS MATLAB (EN BLEU FONCE). AUTREMENT, IL PEUT ETRE INSERE DANS UN LOGICIEL SIG (EN ORANGE)	41
FIGURE 31 : HAUTEURS DE VAGUES MAXIMUMS (CM) DANS LE PORT DE TADINE A MARE (ÎLES LOYAUTES - NOUVELLE CALEDONIE) POUR L'UN DES SCENARIOS DE L'ÉVENEMENT DU 5 DECEMBRE 2018.....	42
FIGURE 32 : CHAINE DE TRAITEMENT DE L'INTEGRATION DES RESULTATS DE MODELISATION DE L'ALEA TSUNAMI EN NOUVELLE-CALEDONIE DANS LES SERVEURS DE LA DTSI/DSCGR. LES DONNEES EXTERNES DE PTWC SONT REPRESENTEES EN VERT. LES RESULTATS DE MODELISATION PRODUITS PAR L'IRD SONT ILLUSTRÉS EN JAUNE. LES TRAITEMENTS DE LA BASE PAR LE SERVICE GEOMATIQUE DE LA DTSI SONT EN BLEU.	

Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

LES ACTIONS DE LA DSCGR SONT REPRESENTÉES EN ROUGE. LES INFORMATIONS PRINCIPALES SONT ENCADRÉES EN GRAS DANS LE SCHEMA.....	44
FIGURE 33 : HAUTEURS DE VAGUES MAXIMUMS ESTIMÉES (CM) AVEC UN SCENARIO COMMIT MONO SOURCE SUR L'ENSEMBLE NOUVELLE-CALEDONIE/VANUATU SUD. LES DONNÉES BATHYMETRIQUES SONT EXTRAITES DU FICHER GEBCO 2014. LES DONNÉES DE POPULATIONS SONT ISSUES DU RECENSEMENT DE 2014 DE L'INSEE. LES ILOTS URBAINS ONT ÉTÉ CRÉÉS A PARTIR D'UNE METHODOLOGIE SIG DEVELOPPÉE PAR BRUCE THOMAS - 2019.....	46
FIGURE 34 : HAUTEURS DE VAGUES MAXIMUMS ESTIMÉES (CM) AVEC UN SCENARIO COMMIT MULTI SOURCES SUR L'ENSEMBLE NOUVELLE-CALEDONIE/VANUATU SUD. LES DONNÉES BATHYMETRIQUES SONT EXTRAITES DU FICHER GEBCO 2014. LES DONNÉES DE POPULATIONS SONT ISSUES DU RECENSEMENT DE 2014 DE L'INSEE. LES ILOTS URBAINS ONT ÉTÉ CRÉÉS A PARTIR D'UNE METHODOLOGIE SIG DEVELOPPÉE PAR BRUCE THOMAS - 2019.....	46
FIGURE 35 : HAUTEURS DE VAGUES MAXIMUMS ESTIMÉES (CM) A L'INTERIEUR ET A L'EXTERIEUR DU LAGON APRES RECONSTRUCTION DU TSUNAMI DU CHILI EN 1960 (Mw 9.5) SUR L'ENSEMBLE NOUVELLE-CALEDONIE. LES ILOTS DE POPULATION SONT REPRESENTES EN ROUGE (THOMAS ET AL, IN PREP). LA REPRESENTATION DES HMAX PAR DES POINTS D'ALEAS A ÉTÉ INSPIRÉE DES TRAVAUX SUR LES EVALUATIONS PROBABILISTES DE L'ALEA TSUNAMI ET APPLIQUÉE A LA NOUVELLE-CALEDONIE (THOMAS, 2019)	47
FIGURE 36 : HAUTEURS DE VAGUES MAXIMUMS ESTIMÉES (CM) A L'INTERIEUR ET A L'EXTERIEUR DU LAGON APRES RECONSTRUCTION DU TSUNAMI DU VANUATU EN 2018 (Mw 7.5) SUR L'ENSEMBLE NOUVELLE-CALEDONIE. LES ILOTS DE POPULATION SONT REPRESENTES EN ROUGE (THOMAS ET AL, IN PREP). LA REPRESENTATION DES HMAX PAR DES POINTS D'ALEAS A ÉTÉ INSPIRÉE DES TRAVAUX SUR LES EVALUATIONS PROBABILISTES DE L'ALEA TSUNAMI ET APPLIQUÉE A LA NOUVELLE-CALEDONIE (THOMAS, 2019)	48
FIGURE 37 : TEMPS DE TRAJET DE TSUNAMI (HEURE) JUSQU'EN NOUVELLE-CALEDONIE APRES LA RECONSTITUTION DE L'EVENEMENT DU CHILI EN 1960 (Mw 9.5) – LA SOURCE EST SYMBOLISÉE PAR L'ETOILE BLANCHE ET LA NOUVELLE-CALEDONIE EST REPRESENTÉE PAR L'ETOILE NOIRE (SOURCE : TTT - 2020).....	49
FIGURE 38 : TEMPS DE TRAJET DE TSUNAMI (HEURE) JUSQU'EN NOUVELLE-CALEDONIE APRES LA RECONSTITUTION DE L'EVENEMENT DU VANUATU EN 2018 (Mw 7.5) – LA SOURCE EST SYMBOLISÉE PAR L'ETOILE BLANCHE (SOURCE : TTT – 2020)	50
FIGURE 39 : MAQUETTE DE CARTES D'ALEA POUR UN SCENARIO DE TSUNAMI (CHILI 1960) DANS L'ATLAS. UNE PREMIERE CARTE (AU-DESSUS) REPRESENTE LES HAUTEURS DE VAGUES MAXIMUMS (CM) SUR LA NOUVELLE-CALEDONIE. LES CAPTEURS DE PRESSION ET LES MAREGRAPHES SONT ILLUSTRÉS PAR DES ETOILES BLANCHES. UNE DEUXIEME CARTE (AU CENTRE A GAUCHE) REPRESENTE LES TEMPS DE TRAJET DE TSUNAMIS (HEURE). L'ÉPICENTRE DU SEISME EST ILLUSTRÉ PAR UNE ETOILE BLANCHE. UNE TROISIEME CARTE (AU CENTRE A DROITE) REPRESENTE LES HAUTEURS DE VAGUES MAXIMUMS A L'ÉCHELLE DU BASSIN PACIFIQUE. L'ÉPICENTRE DU SEISME EST ILLUSTRÉ PAR UNE ETOILE BLANCHE. UNE DERNIERE CARTE (EN DESSOUS) REPRESENTE LE ZONAGE SISMIQUE MIS A JOUR PAR JEAN ROGER – 2020 EN FONCTION DE LA DISTRIBUTION DES SEISMES HISTORIQUES. CHAQUE EVENEMENT EST ILLUSTRÉ PAR UN CERCLE DONT LE DIAMETRE CORRESPOND A LA MAGNITUDE ET LA COULEUR CORRESPOND A LA PROFONDEUR (SOURCE : IRD - 2020)	52

Table des tableaux

TABLEAU 1 : LES RESOLUTIONS MINIMALES REQUISES (COLONNE 3) ET RECOMMANDEES (COLONNE 2) PAR MOST POUR LA GRILLE O (DEFORMATION ET PROPAGATION) ET LES SOUS-GRILLES 1, 2 ET 3 (INONDATION) (SOURCE : MOST, 2006)	29
TABLEAU 2 : PARAMETRES DES GRILLES DU SCHEMA D'IMBRICATION MOST POUR LE PROJET. CHAQUE GRILLE EST ASSOCIEE A UN DOMAINE GEOGRAPHIQUE (COLONNE 2), UNE RESOLUTION SPATIALE (COLONNE 3) ET LA SOURCE DES DONNEES (COLONNE 4) (SOURCE : IRD - 2020).....	32
TABLEAU 3 : GEOMETRIE DES PLANS DE FAILLES POUR UN SEISME 7.5 AVEC UN PATCH UNITAIRE COMMIT (EN ROUGE) ET AVEC UN PATCH UNITAIRE COMMIT MODIFIE (EN NOIR) (SOURCE : BERNARD PELLETIER ET JEAN ROGER – 2020).....	35
TABLEAU 4 : LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS GEOLOGIQUES POUR MODELISER LA SOURCE DU TSUNAMI DU 5 DECEMBRE 2018 AU VANUATU (SOURCE : BERNARD PELLETIER ET JEAN ROGER, 2020)	40
TABLEAU 5 : TEMPS D'ARRIVEE ESTIMES (ETA) POUR PLUSIEURS STATIONS MAREGRAPHIQUES DANS LE PACIFIQUE (SOURCE : TTT - 2020) ...	49
TABLEAU 6 : TEMPS D'ARRIVEE ESTIMES (ETA) POUR LES STATIONS MAREGRAPHIQUES EN NOUVELLE-CALÉDONIE ET AU VANUATU (SOURCE : TTT - 2020)	50

Bibliographie :

Angove, M., Arcas, D., Bailey, R., Carrasco, P., Coetzee, D., Fry, B., Gledhill, K., Harada, S., von Hillebrandt-Andrade, C., Kong, L., McCreery, C., McCurrach, S.-J., Miao, Y., Sakya, A.E., Schindelé, F., 2019. Ocean Observations Required to Minimize Uncertainty in Global Tsunami Forecasts, Warnings, and Emergency Response. *Front. Mar. Sci.* 6, 350. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00350>

Arnaud, A., 2015. Les limites de la cartographie des risques littoraux : des perspectives pour la compréhension de tous. *Vertigo*. URL: <https://doi.org/10.4000/vertigo.15743>

Aucan, J., Merrifield, M. A., Pouvreau, N., 2017. Historical Sea Level in the South Pacific from Rescued Archives, Geodetic Measurements, and Satellite Altimetry, *Pure and Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1648-1>

Becker, M., Meyssignac, B., Letetrel, C., Llovel, W., Cazenave, A., Delcroix, T., 2012. Sea level variations at tropical Pacific islands since 1950. *Global and Planetary Change* 80–81, 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.09.004>

Blaser, L., Kruger, F., Ohrnberger, M., Scherbaum, F., 2010. Scaling Relations of Earthquake Source Parameter Estimates with Special Focus on Subduction Environment. *Bulletin of the Seismological Society of America* 100, 2914–2926. <https://doi.org/10.1785/0120100111>

Bousquet, B., 1990. Définition et identification du littoral contemporain. *Rjenv* 15, 451–468. <https://doi.org/10.3406/rjenv.1990.2637>

Broustet, D., Rivoilan P., 2015. Recensement de la population en Nouvelle-Calédonie en 2014 : Une démographie toujours dynamique. Institut de la statistique et des études économiques de Nouvelle-Calédonie (INSEE). Insee Première. n°1572.

Burbidge, D., Cummins, P.R., Mleccko, R., Thio, H.K., 2008. A Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for Western Australia. *Pure appl. geophys.* 165, 2059–2088. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0421-x>

Collot, J., Lafoy, Y., Géli, L., 2011. Explanatory notes of structural provinces of the Southwest Pacific Map, Geological Survey of New Caledonia. DIMENC, IFREMER.

Collot, J., Vendé-Leclerc, M., Rouillard, P., Lafoy, Y., Géli, L., 2012. Map helps unravel complexities of the southwestern Pacific Ocean. *Eos Trans. AGU* 93, 1–2. <https://doi.org/10.1029/2012EO010001>

Commission océanographique intergouvernementale, UNESCO, 2013. Préparation aux tsunamis : Protection civile – Guide des bonnes pratiques. (COI Manuels et guides, n° 65. 64. (original anglais). (IOC/2013/MG/65).

Courteau, R., 2007. L'évaluation et la prévention du risque de tsunami sur les côtes françaises en métropole et outre-mer. Résumé du rapport de M. Roland Courteau, Sénateur. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

Davies, G., Griffin, J. 2018. The 2018 Australian probabilistic tsunami hazard assessment: hazard from earthquake generated tsunamis. Record 2018/41. Geoscience Australia, Canberra. <http://dx.doi.org/10.11636/Record.2018.041>

Davies, G., Griffin, J., Løvholt, F., Glimsdal, S., Harbitz, C., Thio, H.K., Lorito, S., Basili, R., Selva, J., Geist, E., Baptista, M.A., 2018. A global probabilistic tsunami hazard assessment from earthquake sources. Geological Society, London, Special Publications 456, 219–244. <https://doi.org/10.1144/SP456.5>

Duff, M.L., Dumas, P., Sabinot, C., Allenbach, M., 2016. Le risque tsunami en Nouvelle-Calédonie : Évolutions des facteurs de vulnérabilités et de résiliences à Lifou en territoire coutumier kanak. Vertigo. <https://doi.org/10.4000/vertigo.17951>

Duff, M.L., Dumas, P., Allenbach, M., 2014. Quelle gouvernance des risques littoraux aux îles Loyauté (Nouvelle-Calédonie) dans le cadre du réchauffement climatique ? <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25631.15526>

Dumas, P., 2009. La gestion du littoral en Nouvelle-Calédonie. De la Nouvelle-Calédonie au Pacifique, Éléments de recherche en Lettres, Langues et Sciences Humaines, L'Harmattan, Collection Portes Océanes, 53-78.

Dumas, P., n.d. Anthropization of New Caledonia's Southwestern Coastland: A Satellite Remote-Sensing Analysis of Coastland Environment Changes, 19.

Duvat, V.K.E., Stahl, L., Costa, S., Maquaire, O., Magnan, A.K., 2018. Taking control of human-induced destabilisation of atoll islands: lessons learnt from the Tuamotu Archipelago, French Polynesia. Sustain Sci 15, 569–586. <https://doi.org/10.1007/s11625-019-00722-8>

Duvat, V.K.E., 2019. A global assessment of atoll island planform changes over the past decades. WIREs Clim Change 10, e557. <https://doi.org/10.1002/wcc.557>

Duvat, V.K.E., Magnan, A.K., 2019. Rapid human-driven undermining of atoll island capacity to adjust to ocean climate-related pressures. Sci Rep 9, 15129. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51468-3>

Forbes, D.L., James, T.S., Sutherland, M., Nichols, S.E., 2013. Physical basis of coastal adaptation on tropical small islands. *Sustain Sci* 8, 327–344. <https://doi.org/10.1007/s11625-013-0218-4>

Garcin M., Vendé-Leclerc M. (2014) - Observatoire du littoral de Nouvelle-Calédonie – Rapport préliminaire : observation, état des lieux et constats. Rapport BRGM/RP-63235-FR, 125.

Garcin M., Vendé-Leclerc M. (2015) – Observatoire du littoral de Nouvelle-Calédonie – Bilan des activités 2014. BRGM/RP-64824-FR, 145.

Garcin, M., Vendé-Leclerc, M., Maurizot, P., Le Cozannet, G., Robineau, B., Nicolae-Lerma, A., 2016. Lagoon islets as indicators of recent environmental changes in the South Pacific – The New Caledonian example. *Continental Shelf Research* 122, 120–140. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.03.025>

Gica, E., Teng, M.H., Liu, P.L.-F., Titov, V., Zhou, H., 2007. Sensitivity Analysis of Source Parameters for Earthquake-Generated Distant Tsunamis. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 133, 429–441. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2007\)133:6\(429\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2007)133:6(429))

Gonson, C., 2017. Intégration des usages récréatifs et de la biodiversité marine pour la gestion et l'évaluation des espaces côtiers : Application aux Aires Marines Protégées de Nouvelle-Calédonie à partir de suivis de la fréquentation et la biodiversité et d'un modèle d'aide à la gestion. École doctorale des sciences de l'environnement (ED 129). Université Pierre Marie Curie.

González, F.I., Geist, E.L., Jaffe, B., Kânoğlu, U., Mofjeld, H., Synolakis, C.E., Titov, V.V., Arcas, D., Bellomo, D., Carlton, D., Horning, T., Johnson, J., Newman, J., Parsons, T., Peters, R., Peterson, C., Priest, G., Venturato, A., Weber, J., Wong, F., Yalciner, A., 2009. Probabilistic tsunami hazard assessment at Seaside, Oregon, for near- and far-field seismic sources. *J. Geophys. Res.* 114, C11023. <https://doi.org/10.1029/2008JC005132>

Gracia, A., Rangel-Buitrago, N., Oakley, J.A., Williams, A.T., 2018. Use of ecosystems in coastal erosion management. *Ocean & Coastal Management* 156, 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.07.009>

Gusman, A.R., Tanioka, Y., 2015. Effectiveness of Real-Time Near-Field Tsunami Inundation Forecasts for Tsunami Evacuation in Kushiro City, Hokkaido, Japan, in: Santiago-Fandiño, V., Kontar, Y.A., Kaneda, Y. (Eds.), *Post-Tsunami Hazard, Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Springer International Publishing, Cham, pp. 157–177. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10202-3_11

Gutton, R., Péroche, M., Léone, F., 2012. Contribution méthodologique pour l'aide à la planification des évacuations de population en cas de tsunami : Modélisation spatiale et temporel de l'accessibilité des zones refuges. Projet CARIBSAT – Programme INTERREG Caraïbe IV.

Hanks, T.C., Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. *J. Geophys. Res.* 84, 2348. <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>

Hebert, H., Schindelé, F., Sladen, A., 2005. Comprendre et prévenir les tsunamis : les apports de la simulation numérique. *Annales des Mines – Responsabilité & Environnement*.

Horspool, N., Pranantyo, I., Griffin, J., Latief, H., Natawidjaja, D.H., Kongko, W., Cipta, A., Bustaman, B., Anugrah, S.D., Thio, H.K., 2014. A probabilistic tsunami hazard assessment for Indonesia. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14, 3105–3122. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3105-2014>

Howe, B. M., Aucan, J., Tilmann, F., 2016. Submarine cable systems for future societal needs, *Eos*, 97, <https://doi.org/10.1029/2016EO056781>.

IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].

IPCC, 2019: Chapter 1: Framing and Context of the Report. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [Nerilie Abram (Australia), Jean-Pierre Gattuso (France), Anjal Prakash (Nepal/India) (eds.)]. In Press.

IPCC, 2019: Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [Michael Oppenheimer (USA), Bruce Glavovic (New Zealand) (eds.)]. In Press.

Ioualalen, M., Pelletier, B., Watts, P., Regnier, M., 2006. Numerical modeling of the 26 November 1999 Vanuatu tsunami. *J. Geophys. Res.* 111, C06030. <https://doi.org/10.1029/2005JC003249>

Kajitani, Y., Chang, S.E., Tatano, H., 2013. Economic Impacts of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake and Tsunami. *Earthquake Spectra* 29, 457–478. <https://doi.org/10.1193/1.4000108>

Kench, P.S., Ford, M.R., Owen, S.D., 2018. Patterns of island change and persistence offer alternate adaptation pathways for atoll nations. *Nat Commun* 9, 605. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02954-1>

King, D.N., 2015. Tsunami hazard, assessment and risk in Aotearoa–New Zealand: A systematic review AD 1868–2012. *Earth-Science Reviews* 145, 25–42. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.02.004>

Lambert, J., Terrier, M., Pedreros, R., 2013. L'évaluation du risque de tsunamis sur le littoral français. *Géosciences – La revue du BRGM pour une Terre durable*. N°17. BRGM. 11.

Lambert, J., 2008 – BD Tsunamis. Inventaire historique des tsunamis en France, année 2007. Rapport final. BRGM/RP-55993-FR, 41.

Lata, S., Nunn, P., 2012. Misperceptions of climate-change risk as barriers to climate-change adaptation: a case study from the Rewa Delta, Fiji. *Climatic Change* 110, 169–186. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0062-4>

Leone, F., Péroche, M., Gutton, R., 2014. Le risque tsunami en Martinique : planifier une évacuation préventive en optimisant l'accessibilité de sites refuges. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 14 Numéro 2. Mise en ligne le 16 septembre 2014, consulté le 16 avril 2019. *Vertigo*. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/15046>

Leone, F., 2007. Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes " naturelles " : contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones). *Géographie*. Université Paul Valéry - Montpellier III. Tel-00276636.

Metzger, A., Reghezza-Zitt, M., 2019. Introduction au numéro spécial de *Physio-Géo* Géohistoire des risques "naturels." *physio-geo* 1–13. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.8730>

Minoura, K., Nakata, T., 1994. Discovery of an ancient tsunami deposit in coastal sequences of southwest Japan: Verification of a large historic tsunami. *Isl Arc* 3, 66–72. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1994.tb00006.x>

Mueller, C., Power, W., Fraser, S., Wang, X., 2015. Effects of rupture complexity on local tsunami inundation: Implications for probabilistic tsunami hazard assessment by example: RUPTURE COMPLEXITY & TSUNAMI INUNDATION. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, 488–502. <https://doi.org/10.1002/2014JB011301>

Neumann, B., Vafeidis, A.T., Zimmermann, J., Nicholls, R.J., 2015. Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. *PLoS ONE* 10, e0118571. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>

Nunn, P.D., Aalbersberg, W., Lata, S., Gwilliam, M., 2014. Beyond the core: community governance for climate-change adaptation in peripheral parts of Pacific Island Countries. *Reg Environ Change* 14, 221–235. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0486-7>

Nunn, P.D., Kohler, A., Kumar, R., 2017a. Identifying and assessing evidence for recent shoreline change attributable to uncommonly rapid sea-level rise in Pohnpei, Federated States of Micronesia, Northwest Pacific Ocean. *J Coast Conserv* 21, 719–730. <https://doi.org/10.1007/s11852-017-0531-7>

Nunn, P.D., Runman, J., Falanruw, M., Kumar, R., 2017b. Culturally grounded responses to coastal change on islands in the Federated States of Micronesia, northwest Pacific Ocean. *Reg Environ Change* 17, 959–971. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0950-2>

Pauthonnier, A., Pastol, Y., Lamarre, V., 2012. Litto3D® – v 1.0. Spécifications techniques. Version du document 1.5: Changement de format semi de points. Shom et IGN. URL : https://diffusion.shom.fr/media/wysiwyg/pdf/Specifications-techniques-Litto3D_v1_0-Doc_v1_5.pdf

Plan ORSEC Tsunami, 2012. Dispositions prises en application du Code de la Sécurité Intérieure (CSI), de l'arrêté n° 52 du 25 juillet 2011 relatif au dispositif ORSEC (Organisation de la Réponse de Sécurité Civile). Haut-Commissariat de la République en Nouvelle-Calédonie. Direction de la Sécurité Civile.

Pillet, R., Pelletier, B., 2004. Tectonique active, tsunamis et sismicité en Nouvelle-Calédonie. Notes techniques – Sciences de la Terre - Géologie & Géophysique. N°28. IRD. 18.

Prasetya, G., Borrero, J., de Lange, W., Black, K., Healy, T., 2011. Modeling of inundation dynamics on Banda Aceh, Indonesia during the great Sumatra tsunamis December 26, 2004. *Nat Hazards* 58, 1029–1055. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9710-7>

Ratzov, G., 2009. Processus gravitaires sous-marins le long de la zone de subduction Nord Équateur - Sud Colombie : Apports à la connaissance de l'érosion tectonique et de la déformation d'une marge active, et implications sur l'aléa tsunamis. Géophysique. Université de Nice Sophia Antipolis. Français. Tel-02129566.

Renou, C., Lesne, O., Mangin, A., Rouffi, F., Atillah, A., El Hadani, D., Moudni, H., 2011. Tsunami hazard assessment in the coastal area of Rabat and Salé, Morocco. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 2181–2191. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2181-2011>

Roger, J. (2020). Données bathymétriques et topographiques de Nouvelle-Calédonie. Réalisation d'un MNT terre-mer pour l'étude de l'aléa tsunami (projet TSUCAL). 39 pp., 37 figs.

Roger, J., Pelletier, B. (2020). Sources tsunamigéniques pour l'évaluation de l'aléa en Nouvelle-Calédonie : répartition et paramètres. 20 pp., 13 figs.

Roger, J., Pelletier, B., Aucan, J., 2019. Update of the tsunami catalogue of New Caledonia using a decision table based on seismic data and marigraphic records. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 19, 1471–1483. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1471-2019>

Roger, J., Aucan, J., Pelletier, B., Lebellegard, P., Lefèvre, J., 2019. The December 5, 2018 tsunami from the south Vanuatu subduction zone Mw 7.5 earthquake: a case for New Caledonia tsunami hazard assessment 1. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 21, EGU2019-3210.

Roger, J., Dudon, B., Sédilot, B., Zahibo, N., Pelinovsky, E., 2012. Tsunami hazard mitigation by coral reef protection for the French Caribbean Islands 9. 15 WCEE.

Roger, J., 2011. Tsunamis générés par des séismes au niveau de la zone de collision entre les plaques africaine et eurasiennne : Études de cas pour l'évaluation du risque tsunami en Méditerranée occidentale et Atlantique nord. *Géophysique*. Université Pierre et Marie Curie – Paris VI. Français. Tel-00588880.

Ruff, L., Kanamori, H., 1983. Seismic coupling and uncoupling at subduction zones. *Tectonophysics*. 99, 99- 117. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90097-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90097-5)

Sahal, A., Leone, F., Péroche, M., 2013. Complementary methods to plan pedestrian evacuation of the French Riviera's beaches in case of tsunami threat: graph- and multi-agent-based modelling. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 1735–1743. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1735-2013>

Sahal, A., 2011. Le risque tsunami en France : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque. *Géographie*, Université Panthéon-Sorbonne-Paris I. Tel-00651617v2.

Sahal, A., Pelletier, B., Chatelier, J., Lavigne, F., Schindelé, F., 2010. A catalog of tsunamis in New Caledonia from 28 March 1875 to 30 September 2009. *Comptes Rendus Geoscience* 342, 434–447. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.01.013>

Smart, G.M., Crowley, K.H.M., Lane, E.M., 2016. Estimating tsunami run-up. *Nat Hazards* 80, 1933–1947. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2052-8>

Spalding, M.D., Ruffo, S., Lacambra, C., Meliane, I., Hale, L.Z., Shepard, C.C., Beck, M.W., 2014. The role of ecosystems in coastal protection: Adapting to climate change and coastal hazards. *Ocean & Coastal Management* 90, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.09.007>

Strasser, F.O., Arango, M.C., Bommer, J.J., 2010. Scaling of the Source Dimensions of Interface and Intraslab Subduction-zone Earthquakes with Moment Magnitude. *Seismological Research Letters* 81, 941–950. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.6.941>

Strunz, G., Post, J., Zosseder, K., Wegscheider, S., Mück, M., Riedlinger, T., Mehl, H., Dech, S., Birkmann, J., Gebert, N., Harjono, H., Anwar, H.Z., Sumaryono, Khomarudin, R.M., Muhari, A., 2011. Tsunami risk assessment in Indonesia. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 67–82. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-67-2011>

Terrier, M., Monfort, D., Sedan, O., Marçot, N., 2011. Méthode d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis en Méditerranée occidentale. *RATCOM*. 129.

The GEBCO_2014 Grid, version 20141103. <http://www.gebco.net>

Thomas, B. Roger, J., Sabinot, C., Gunnell, Y., Aucan, J. (in prep.). Representing coastal population for tsunami hazard assessment: case study of New Caledonia. To be submitted in *Journal of Disaster Risk Reduction*.

Bruce Enki Oscar Thomas. Cartographie des enjeux côtiers et de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie. [Rapport de recherche] IRD, Nouméa. 2019, 81 p. multigr. ird-02385683.

Titov, V., Kânoğlu, U., Synolakis, C., 2016. Development of MOST for Real-Time Tsunami Forecasting. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 142, 03116004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000357](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000357)

Titov, V.V., Moore, C.W., Greenslade, D.J.M., Pattiaratchi, C., Badal, R., Synolakis, C.E., Kânoğlu, U., 2011. A New Tool for Inundation Modeling: Community Modeling Interface for Tsunamis (ComMIT). *Pure Appl. Geophys.* 168, 2121–2131. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0292-4>

Wang, X., Liu, P.L.-F., 2006. An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami. *Journal of Hydraulic Research* 44, 147–154. <https://doi.org/10.1080/00221686.2006.9521671>

Webb, A.P., Kench, P.S., 2010. The dynamic response of reef islands to sea-level rise: Evidence from multi-decadal analysis of island change in the Central Pacific. *Global and Planetary Change* 72, 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.05.003>

Wegscheider, S., Post, J., Zosseder, K., Mück, M., Strunz, G., Riedlinger, T., Muhari, A., Anwar, H.Z., 2011. Generating tsunami risk knowledge at community level as a base for planning and implementation of risk reduction strategies. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 249–258. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-249-2011>

Wei, Y., Chamberlin, C., Titov, V.V., Tang, L., Bernard, E.N., 2013. Modeling of the 2011 Japan Tsunami: Lessons for Near-Field Forecast. *Pure Appl. Geophys.* 170, 1309–1331. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0519-z>

Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4, 974-1002.

Wessel, P., 2009. Analysis of Observed and Predicted Tsunami Travel Times for the Pacific and Indian Oceans. *Pure appl. geophys.* 166, 301–324. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0437-2>

Woodroffe, C.D., 2008. Reef-island topography and the vulnerability of atolls to sea-level rise. *Global and Planetary Change* 62, 77–96. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.11.001>

Yamano, H., Kayanne, H., Yamaguchi, T., Kuwahara, Y., Yokoki, H., Shimazaki, H., Chikamori, M., 2007. Atoll island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstruction: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu. *Global and Planetary Change* 57, 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.02.007>

Zosseder, K., Post, J., Steinmetz, T., Wegscheider, S., Strunz, G., n.d. Using Multi-Scenario Tsunami Modelling Results combined with Probabilistic Analyses to provide Hazard Information for the South-WestCoast of Indonesia 3.