

Cartographie des enjeux côtiers et de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

Bruce Enki Oscar Thomas

▶ **To cite this version:**

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

HAL Id: ird-02385683
https://ird.hal.science/ird-02385683

Submitted on 29 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur
de l'École de l'Aménagement Durable des Territoires (ENTPE)

Année 2018 – 2019

VA Environnement et Risques · RISPOL
Université Lumière Lyon 2 - Master 2 GRAINE
En double-diplôme avec ENSG-Géomatique

Soutenu le 06 septembre 2019

Devant le jury composé de :

Président du Jury :	Bernard CLEMENT
Tuteur Master :	Yanni GUNNEL
Maîtres de TFE :	Jean ROGER et Jérôme AUCAN
Experte :	Hélène HEBERT

Bruce Enki Oscar THOMAS

Cartographie des enjeux côtiers et de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale · LEGOS
Institut de Recherche pour le Développement · IRD
· Centre IRD de Nouméa, Nouvelle-Calédonie ·

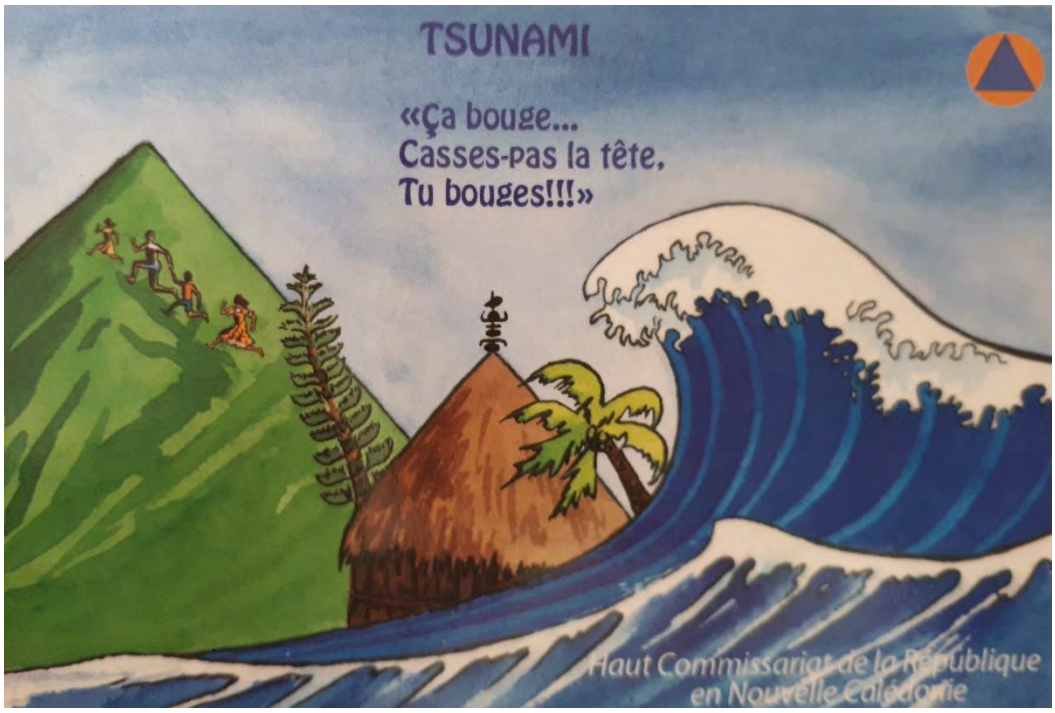


Image 1 : Magnet de prévention du risque tsunami en Nouvelle-Calédonie réalisé par le Haut-Commissariat de la République. « Casse-pas la tête » est une expression locale qui signifie « reste cool ».

Notice Analytique

Auteur	Bruce THOMAS Stagiaire Ingénieur en recherche @ : bruce.eo.thomas@gmail.com ☎ : +33 07 78 10 97 48 / +687 86 22 64
Titre du TFE	**Cartographie des enjeux côtiers et de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie**
Organisme d'accueil	Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale (LEGOS) Institut de Recherche pour le Développement (IRD) Centre IRD de Nouméa, 101 Promenade Roger Laroque, BP A5 - 98848 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie Sous la direction de Dr Jean ROGER et de Dr Jérôme AUCAN @ : jean.roger@ird.fr / jerome.aucan@ird.fr ☎ : +687 26 07 28
Termes géographiques	Nouvelle-Calédonie, Nouméa, Grande-Terre, Iles Loyauté
Collation	81 pages 85 références bibliographiques
Mots clés	IRD, LEGOS, tsunami, cartographie, aléa, enjeux, population, vulnérabilité, risque, SIG
Key words	IRD, LEGOS, tsunami, cartography, hazard, issues, population, vulnerability, risk, GIS
Résumé	La Nouvelle-Calédonie est résolument tournée vers l'océan avec près de 70% de la population vivant à moins d'un kilomètre du bord de mer. Cette littoralisation des activités humaines augmente significativement le risque associé aux tsunamis. Le gouvernement de la Nouvelle-Calédonie en partenariat avec l'IRD dans le projet TSUCAL, souhaite alors, pour protéger la population, réaliser des cartographies de l'aléa qui serviront de base à l'établissement de carte de risque et d'évacuation en cas de risque tsunami. Le travail s'intéresse d'abord à la cartographie des enjeux présents sur le territoire : localisation précise de la population et du bâti stratégique, facteurs de vulnérabilités, impact des sirènes d'alerte et localisation d'écosystèmes protecteurs. Enfin, la cartographie de l'aléa tsunami sur les côtes néo-calédoniennes représente la hauteur maximale possible du tsunami en tout point de la côte.
Abstract	New Caledonia has nearly 70% of its population living less than one kilometer from the seaside. This littoralization of human activities significantly increases the risk associated to tsunamis. The government of New Caledonia, in partnership with the IRD in the TSUCAL project, wishes to realize tsunami hazard mapping. This will help to create risk and evacuation maps. The work focuses first on the mapping of the coastal issues of New Caledonia by defining precise location of the population and the building, by studying factors of vulnerability, by looking at the impact of the evacuation alert sirens and by understanding how some ecosystems can protect the coast and its population from tsunamis. Finally, tsunami hazard mapping on the New Caledonian coast represents the maximum possible height of the tsunami at any point along the coast.

Remerciements

A mes maîtres de stage, Jean et Jérôme, pour m'avoir bien aidé, conseillé et soutenu tout au long du stage. Un merci particulier à Jean pour ses petites blagues !

A Bernard, Catherine, Christophe, Isabelle, Jérôme, Marc, Matthieu, Mina, Véro et Véronique pour leur accueil chaleureux à l'IRD, leur bonne humeur quotidienne et leur aide précieuse !

A Alex et Doriane de la DSCGR toujours à mon écoute !

A tous les stagiaires, thésards et lofters de l'IRD, baroudeurs, amis et souvent colocs, Andreas, Camille, Christophe, Chumil, les 2 Claire, Emma, Franca, Geoff, Julie, Laëtitia, Laure, Léa, Lisa, Lucas, Ludo, Manon, Marie, Martin, Mégane, Nadia, Nono, Quentin, Rémy, Renaud, Rich, Thib, Typh, Valentin, Valentine et Vincent pour les nombreuses soirées et weekends à profiter du Caillou !

A David et Loïc pour m'avoir fait découvert l'Alis – le navire océanographique de l'IRD – !

Un grand merci à Bernard Clément, Claude Durieux et Yanni Gunnel pour mon année de M2 à l'ENTPE et au master GRAINE !

Je remercie également mon jury de soutenance, Bernard Clément, Yanni Gunnel, Hélène Hébert, Jean Roger et Jérôme Aucan pour le regard critique et pertinent porté sur mon travail.

Enfin, un énorme merci à ma famille et tous mes amis de métropole !

Avant-Propos

A - Contexte scolaire du TFE

Le Travail de Fin d'Etudes (TFE) correspond à un travail personnel démontrant l'acquisition des qualités requises pour accéder au titre d'ingénieur : autonomie, capacité à la problématisation, capacité d'adaptation et d'apprentissage continu, capacité de production d'une analyse personnelle et rigoureuse, esprit critique.

Le TFE prend la forme conventionnelle d'un stage ici, provenant d'une commande formulée par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) dans le cadre du projet tsunami en Nouvelle-Calédonie (TSUCAL). L'objectif du TFE sera non seulement d'appliquer des connaissances et des techniques vues pendant ma formation mais également de contribuer à la résolution d'une question originale et à la production de nouvelles connaissances.

Le stage TFE est réalisé conjointement dans le cadre de ma dernière année d'école à l'ENTPE ainsi que pour le stage de Master 2 GRAINE. Il permettra la validation de mon double parcours ENSG / ENTPE et celle du Master 2 GRAINE.

B - Organisme d'accueil – Laboratoire LEGOS à l'IRD

L'Institut de Recherche pour le Développement (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 Etrangères. Son réseau étendu à une cinquantaine de pays méditerranéens et intertropicaux permet de construire une démarche de recherche, d'expertise, de formation et de partage au bénéfice des territoires qui font de la science et de l'innovation un des premiers leviers de leur développement. Les objectifs de l'IRD s'inscrivent dans le pas des Objectifs de développement durable (ODD) adoptés par les Nations unies en 2015 et ont pour ambition d'orienter les politiques de développement ainsi que de répondre aux grands enjeux de notre génération : changements globaux, environnementaux, économiques, sociaux et culturels.

Le centre IRD de Nouméa, créé en 1946, est la plus grande implantation de l'institut dans l'outre-mer tropical français et s'intéresse en particulier aux thématiques liées à l'insularité face aux changements globaux. Depuis 2011, l'IRD s'implique activement dans la réflexion menée autour de la mutualisation des moyens sur des projets d'intérêt commun pour mieux répondre aux besoins de la Nouvelle-Calédonie. L'institut est ainsi membre fondateur, depuis 2014, du Consortium pour la Recherche, l'Enseignement Supérieur et l'Innovation Calédonien (CRESICA) qui réunit tous les organismes de recherche présents sur le territoire.

Parmi les 15 unités de recherche hébergées par le centre de Nouméa, le Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale (LEGOS), également sous la tutelle du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), du Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) et de l'Université Paul Sabatier (UPS), investiguent divers champs d'études sur la physique océanique hauturière et côtière, la géochimie et la biogéochimie marine, l'hydrologie spatiale et la dynamique des calottes polaires.



Image 2 : Vue aérienne du centre IRD de Nouméa dans la baie de l'Anse Vata (photo IRD).

C - Contexte du projet de stage TFE

De par sa position géographique, la Nouvelle-Calédonie est exposée aux tsunamis en provenance de toute la ceinture de feu du Pacifique, du Chili au Japon, en passant par le Vanuatu, les îles Fidji et les îles Salomon. Ces dernières décennies, l'accroissement de la population vivant sur la frange littorale accompagné d'une hausse des activités économiques en bord de mer – industries minières, transport maritime et tourisme – augmente le risque associé à ces tsunamis.

L'antenne nouméenne de l'IRD, avec le soutien du gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, a initié le projet TSUCAL visant à évaluer le plus précisément possible l'aléa tsunami dans l'archipel et à le cartographier afin de servir de base à la réalisation de cartes de risque et d'évacuation par les autorités compétentes.

D - Informations préliminaires relatives aux données et aux cartographies

Ce type d'étude sur un territoire aussi riche et vaste que la Nouvelle-Calédonie ainsi que le travail SIG mené sur les enjeux, les modèles numériques de terrain (MNT) et la modélisation de l'aléa tsunami, nécessite une base de données triée, ordonnée et claire dans ses attributions et dénominations. Les données proviennent de nombreuses sources internes à l'IRD ou externes comme le Gouvernement de Nouvelle-Calédonie ou des instituts publics et privés du territoire. La base de données fournit des explications sur la provenance de ces données, ainsi que leur date d'enregistrement et l'information qu'elles délivrent : pour cela, des readme.txt ont été ajoutés à chaque répertoire. Un temps conséquent a été passé pour créer un espace de travail clair et assurer au mieux une reprise en main intuitive des données et du projet par la suite.

Pour réaliser ce stage, j'ai eu accès à un ordinateur i7 Pentium avec 64 Go de mémoire vive. Les cartographies SIG sont réalisées sur ArcMap 10.5.1, QGIS 3.4.6 ou Global Mapper. La mise en page finale des cartes est réalisée sur le SIG ou sur Illustrator pour faciliter notamment la pose des étiquettes et la gestion des conflits entre symbologies.

Table des matières

NOTICE ANALYTIQUE **3**

REMERCIEMENTS **4**

AVANT-PROPOS **5**

A - CONTEXTE SCOLAIRE DU TFE 5

B - ORGANISME D'ACCUEIL – LABORATOIRE LEGOS A L'IRD 5

C - CONTEXTE DU PROJET DE STAGE TFE 6

D - INFORMATIONS PRELIMINAIRES RELATIVES AUX DONNEES ET AUX CARTOGRAPHIES 6

1 INTRODUCTION GENERALE **9**

1.1 POURQUOI S'INTERESSER AU RISQUE TSUNAMI EN NOUVELLE-CALEDONIE ? 10

Aparté sur les définitions importantes *11*

1.2 UN BREF PANORAMA SUR LES TSUNAMIS 12

1.3 UTILISER LES SIG POUR EVALUER ET ANALYSER LE RISQUE TSUNAMI 15

Détecter, Alerter, Protéger et Prévenir *16*

1.4 PROBLEMATIQUE GENERALE 17

Objectifs clés *17*

Etapes du stage *17*

2 CARTOGRAPHIE DES ENJEUX **18**

2.1 LA ZONE LITTORALE EN NOUVELLE-CALEDONIE 19

2.1.1 Les définitions du littoral *20*

2.1.2 La zone littorale néo-calédonienne : une définition adaptée à l'étude des tsunamis *21*

2.2 ENJEU DE POPULATION : LOCALISER LA POPULATION SUR LA FRANGE LITTORALE 23

2.2.1 Méthodologie *23*

2.2.2 Cartographies de la population recensée par l'ISEE en 2014 ..... *24*

a - Cartographie de la population par commune *24*

b - Cartographie de la densité de population par îlot *24*

c - Prise en compte de la frange littorale *25*

d - Discussion *26*

2.2.3 Cartographie des zones peuplées en frange littorale *27*

a - Etat des lieux et Objectifs *27*

b - Méthodologie de création de la tache urbaine *28*

c - Méthodologie de mise à jour des zones peuplées *29*

d – Méthodologie pour la cartographie finale *32*

e - Discussion *33*

2.3 ENJEUX BATIS : LOCALISER LES INFRASTRUCTURES SUR LA FRANGE LITTORALE 34

BILAN 37

3 CARTOGRAPHIE DE L'ALEA TSUNAMI 38

3.1 LE TRAVAIL EN AMONT DE LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA 38

3.1.1 Pourquoi une mise à jour du MNT marin et terrestre de Nouvelle-Calédonie ? 38

a - Ajouter de nouvelles données bathymétriques 39

b - Réaliser un meilleur lissage des données entre elles 40

3.1.2 Du jeu de données bathymétriques et topographiques au MNT 40

3.1.3 Du MNT à la carte d'aléa tsunami : aparté sur la modélisation numérique des tsunamis 42

Premiers tests de modélisation pour pouvoir cartographier l'aléa 43

Bilan 44

3.2 CARTOGRAPHIE DE L'ALEA TSUNAMI EN NOUVELLE-CALEDONIE 45

3.2.1 Méthodologie 45

3.2.2 Discussion 49

4 DISCUSSION GENERALE 51

4.1 LA RENCONTRE DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE DES ENJEUX 52

4.1.1 Facteur de vulnérabilité n°1 : la configuration spatiale du territoire 52

4.1.2 Facteur de vulnérabilité n°2 : la perte de la culture du risque 53

Bilan 54

4.2 TRANSMETTRE AUX AUTORITES UN ENSEMBLE CARTOGRAPHIQUE RICHE EN INFORMATIONS 54

4.2.1 Rôle des sirènes dans la prévention des populations face au risque tsunami 54

4.2.2 Rôle des écosystèmes dans la protection des populations face au risque tsunami 57

Bilan 59

4.3 VERS UNE CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE ET DYNAMIQUE 59

4.3.1 Cartographier automatiquement l'aléa tsunami en cours 59

4.3.2 Etude de la dynamique des populations 60

BILAN 62

LEXIQUE 64

GLOSSAIRE 66

LISTE DES CARTES 67

LISTE DES FIGURES 70

LISTE DES IMAGES 72

LISTE DES TABLEAUX 73

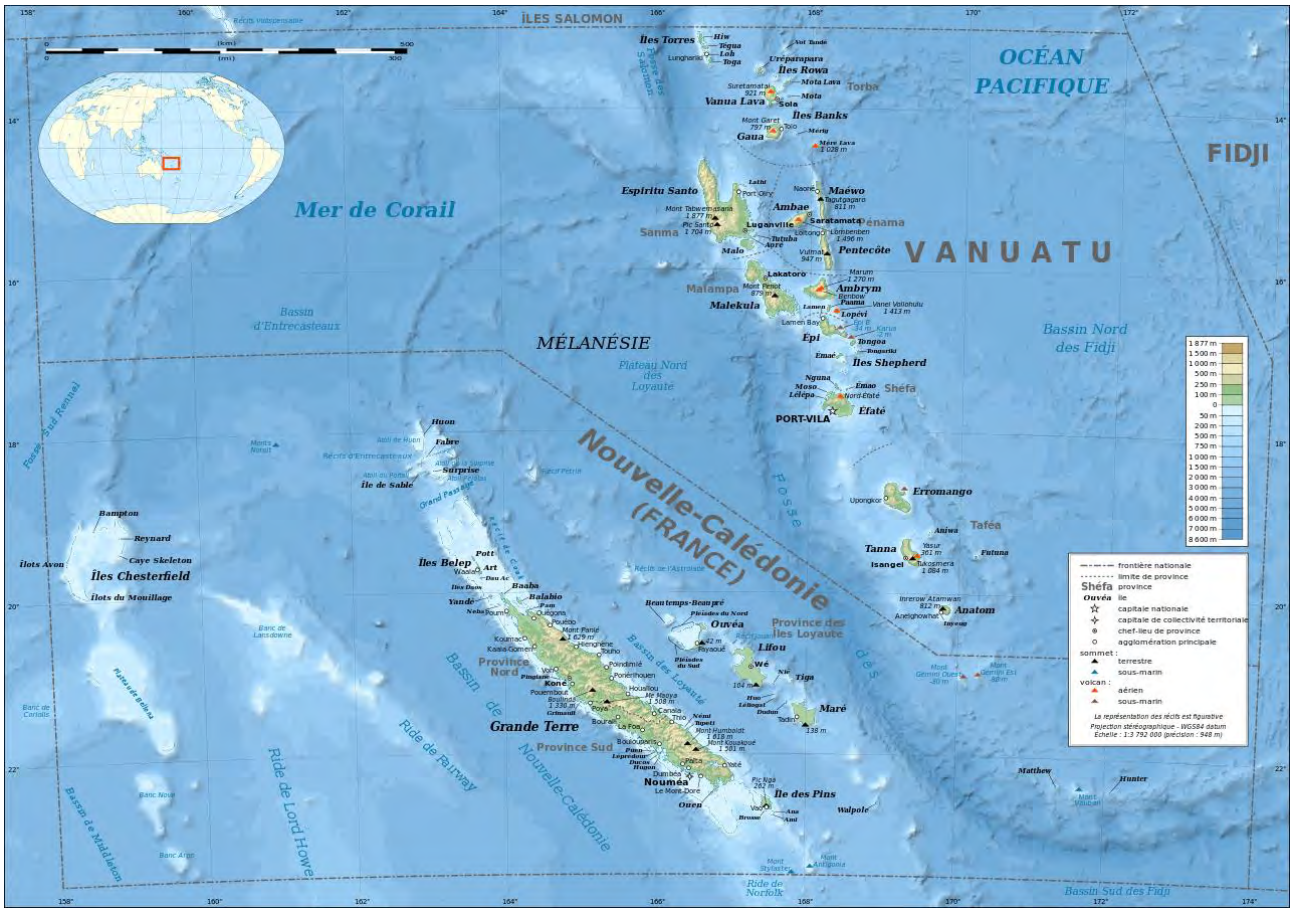
BIBLIOGRAPHIE 74

ANNEXE : LE POSTER REALISE POUR L'IPBES 80

1 Introduction Générale

La Nouvelle-Calédonie est un archipel français situé dans le Pacifique Sud-Ouest, entre l'Australie et l'archipel du Vanuatu, à 130 km au nord du tropique du Capricorne. Elle fait partie de l'ensemble mélanésien qui constitue avec la Polynésie et la Micronésie, le continent Océanie. Le 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) **(Pelletier, 2006)**. De par son emprise au sol et la largeur de ses plateaux dit « continentaux », l'archipel permet de définir la zone économique exclusive de Nouvelle-Calédonie (ZEE) couvrant 1 450 000 km². Les îles principales se situent le long de deux rides parallèles orientées NO-SE : la ride Norfolk/Nouvelle-Calédonie avec les îles Belep, la Grande Terre et l'île des Pins et la ride des Loyauté avec les îles Loyauté (Ouvéa, Lifou, Tiga et Maré).

L'archipel est ainsi porté par la plaque tectonique australienne qui plonge en subduction active sous l'arc du Vanuatu à 200 km à l'est des Loyauté : une localisation au niveau de la ceinture du feu du Pacifique qui expose le territoire néo-calédonien à l'aléa tsunami, qu'il soit d'origine sismique, gravitaire ou volcanique **(Sahal et al., 2010)**.



Carte 1 : Carte topographique de Nouvelle-Calédonie et du Vanuatu (Eric Gaba, commons.wikimedia).

1.1 Pourquoi s'intéresser au risque tsunami en Nouvelle-Calédonie ?

La Nouvelle-Calédonie, résolument tournée vers l'océan, à la fois pour des activités de pêche, pour les loisirs et le tourisme, pour les activités minières (transport des produits miniers) ainsi que pour les études environnementales (récifs coralliens, mangroves, faune et flore sous-marine en général) connait un accroissement continu depuis les années 1980 de la population en bord de mer qui accompagne la hausse des activités sur son littoral **(Dumas, 2013)**.



Image 3 : Kiki Beach, Lifou, Iles Loyauté (Crédits B. Thomas)

En effet, le lagon, véritable patrimoine naturel pour sa richesse environnementale, offre d'abord un terrain idéal pour les usages récréatifs et le tourisme (sports nautiques, navigation de plaisance, observation de la faune sous-marine, etc.) **(Gonson et al., 2018)**. Plus largement, la ZEE de la Nouvelle-Calédonie, considérée comme un « hotspot de la biodiversité » corallienne en eau profonde **(Benzoni, 2018)**, se caractérise par des assemblages uniques d'habitats sous-marins et de coraux. Cet enjeu environnemental de premier ordre se répercute dans des activités de protection et de préservation de la faune et de la flore marines : aires marines protégées, activités de plongée et de découverte de la richesse de la biodiversité marine entre autres.

Plus traditionnellement, la pêche est un élément structural dans les sociétés kanaks : « notre champ, c'est sur les récifs » disent les Calédoniens **(Sabinot et al., 2018)**. Les « coups de pêche » permettent de nourrir la famille, de constituer un revenu par la vente et d'offrir un élément de valeur lors des cérémonies coutumières.

Enfin, sa géologie très particulière **(Maurizot et al., 2009)** fait du territoire néo-calédonien, un gisement de nickel représentant environ 30 % des réserves mondiales et 11 % de la production mondiale[1] : l'industrie minière, puissante économie du territoire, est essentiellement située proche des côtes pour la gestion de la marchandise par voie maritime.

Les enjeux humains et matériels sont ainsi essentiellement répartis sur l'ensemble des côtes : plus de 70 % de la population vit à moins d'un kilomètre du bord de mer **(Dumas et al., 2005)**. On parle alors de littoralisation des activités humaines, ce qui augmente significativement le risque associé aux tsunamis.

Le gouvernement de la Nouvelle-Calédonie et en particulier son service de sécurité civile, la Direction de la Sécurité Civile et de la Gestion des Risques (DSCGR), souhaite alors, pour protéger la population, réaliser des cartographies de l'aléa qui serviront de base à l'établissement de carte de risque et d'évacuation en cas de risque tsunami. Actuellement, la règlementation se calque sur celle de l'île de La Réunion, soit une évacuation obligatoire sans distinction pour une personne située en-dessous de 12 m d'altitude **(DSCGR, 2012)**.

[1] Données obtenues auprès de l'ISEE (http://isee.nc/economie-entreprises/entreprises-secteurs-d-activites/secteur-du-nickel).

Sur le portail géographique de l'information géographique de la Nouvelle-Calédonie (Géorep), il existe déjà une couche de données sur l'analyse de l'aléa tsunami et des inondations engendrées. La logique de la carte est simple : plus on est proche de la côte et à une altitude faible, plus l'intensité de l'aléa est important. Le degré de vulnérabilité de la population est quant à lui déterminé artificiellement en fonction de plusieurs critères quantitatifs (altitude, distance à la côte, présence de chemins d'évacuation, de zones de refuges et de signalétiques) et qualitatifs (localisation en zone inondable, sensibilisation de la population au risque et dispositif d'alerte opérationnel) **(Boyrie, 2011)**. Néanmoins, cette cartographie reste peu précise et peu adaptée aux différentes parties de l'archipel (la couverture du sol ou la localisation du récif corallien ne sont pas pris en comptes)[2].

Se pose alors la question de savoir si la mesure concernant la limite à 12 m d'altitude est suffisante ou démesurée sur le territoire néo-calédonien. Il faut alors regarder minutieusement le long de la côte l'aléa tsunami, pour décider d'une altitude limite d'évacuation plus adaptée au cas par cas. Dans ce cadre, l'IRD réalise le projet TSUCAL avec le gouvernement de la Nouvelle-Calédonie pour évaluer le plus précisément possible l'aléa tsunami dans l'archipel, d'origine sismique exclusivement (dans un premier temps). Les tsunamis d'origine gravitaire (glissement de terrain) représentent aussi un risque qu'il conviendrait d'évaluer mais bien plus compliqué à mettre en œuvre car plus complexe et sans précurseur tel que la secousse sismique, les rendant moins « prévisible » **(Ratzov, 2009)**.

Aparté sur les définitions importantes

Un aléa est un processus physique, un phénomène d'origine naturelle ou anthropique plus ou moins probable sur un espace donné **(Veyret et Reghezza, 2006)**. Il est caractérisé par sa localisation, son intensité et sa fréquence d'apparition.

Les enjeux correspondent aux personnes, aux biens, aux infrastructures et à l'environnement susceptibles d'être affectés par un aléa et de subir des dommages. L'étude des enjeux se concentre sur l'étude de leur vulnérabilité face à l'aléa, i.e. la mesure des conséquences spatiales et temporelles prévisibles de l'aléa sur les enjeux **(Veyret et Reghezza, 2005)**. La vulnérabilité fait ensuite appel à la notion de résilience qui souligne la capacité d'absorber et de se redresser face à l'impact pour caractériser le retour à un état d'équilibre, différent de l'état initial **(Le Duff et al., 2016)**.

Finalement, le risque correspond à la mesure de la probabilité que l'aléa se produise et affecte alors les enjeux : c'est la convolution entre l'aléa et la vulnérabilité des enjeux **(Borden et al., 2007)**. Le schéma ci-dessous résume ces définitions : le risque est la conjonction spatiale et temporelle de l'aléa avec des enjeux vulnérables.

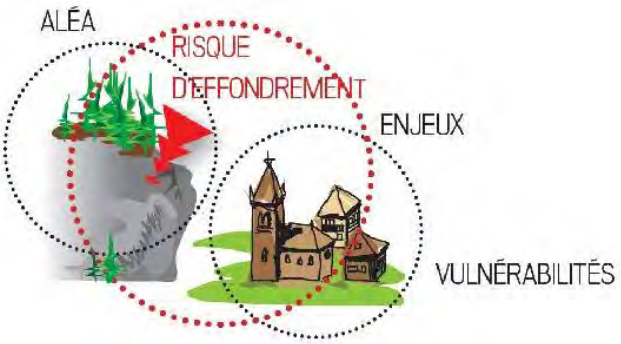


Figure 1 : Schéma d'explication des liens entre aléa, vulnérabilité des enjeux et risque. (http://www.paysgrandbrianconnais.fr/)

[2] http://www.geoportal.gouv.nc/

1.2 Un bref panorama sur les tsunamis

Un tsunami, du japonais 津波 soit littéralement « vague de port »[3], correspond à une onde gravitaire de longueur d'onde de l'ordre d'une centaine à plus d'un millier de kilomètres et ayant une période allant de plusieurs minutes pour les tsunamis générés par des glissements de terrain, à une heure pour ceux générés par des séismes. Un tsunami est le résultat d'une perturbation soudaine d'un réservoir d'eau (océan, mer ou lac). Cette perturbation peut être due à un séisme (par exemple le séisme de magnitude 9,1 au large de l'Indonésie du 26 décembre 2004), un glissement de terrain aérien ou sous-marin (par exemple l'éboulement lors des travaux à l'aéroport de Nice le 16 octobre 1979) ou encore une éruption volcanique (par exemple l'éruption du Krakatoa, volcan situé dans le détroit de la Sonde en Indonésie en 1883) **(NOAA, 2019)**.

Le comportement d'un tsunami évolue en fonction de plusieurs paramètres tels que :

- ✓ le type de source – un tsunami provoqué par un glissement de terrain sera plus localisé mais généralement d'amplitude plus forte qu'un tsunami d'origine sismique **(Ratzov, 2009)** ;
- ✓ la bathymétrie – présence de dorsales océaniques, canyons sous-marins ou de guyots **(Okal, 1988)** ;
- ✓ la géométrie des côtes – l'amplitude et la vitesse d'un tsunami évolue en fonction du passage d'un récif corallien, de la traversée d'une baie, de la présence d'infrastructures portuaires **(UNESCO, 2013)**.

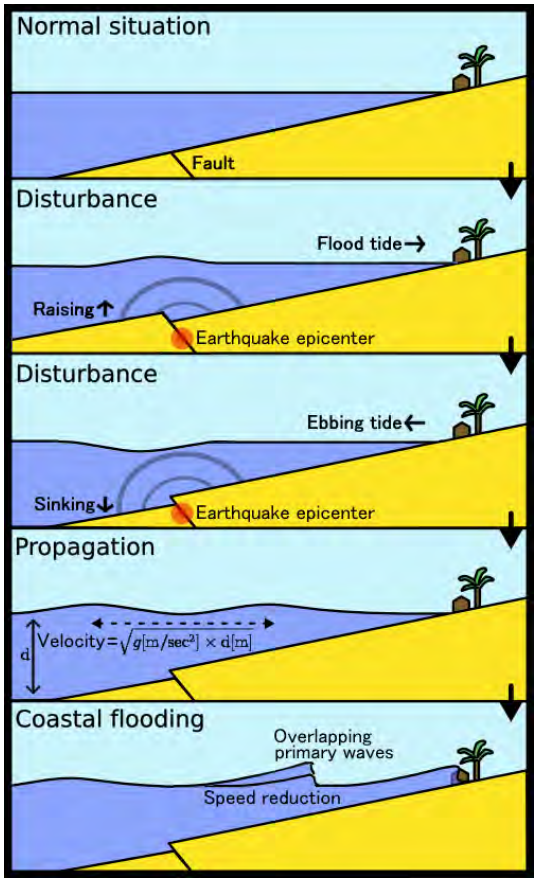


Figure 2 : Schéma illustrant la formation d'un tsunami suite à un séisme (mouvement vertical abrupt du plancher océanique), la propagation des vagues et l'inondation sur le littoral. (https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Tsunami_comic_book_style.png)

[3] http://itic.ioc-unesco.org/

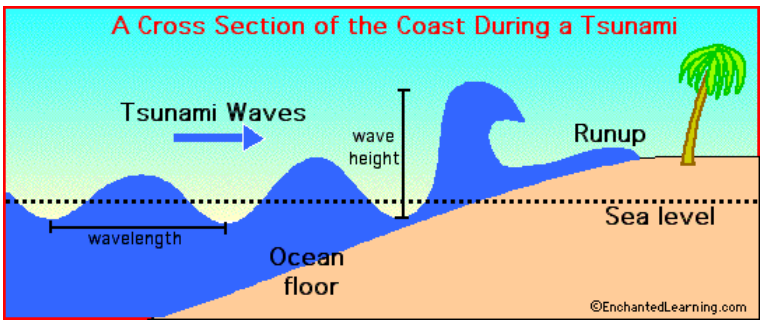


Figure 3 : Schéma des caractéristiques physiques d'un tsunami à l'approche d'un rivage. (https://trestlessurfcrowd.wordpress.com/2010/02/28/tsunami-physics-and-trestles/)

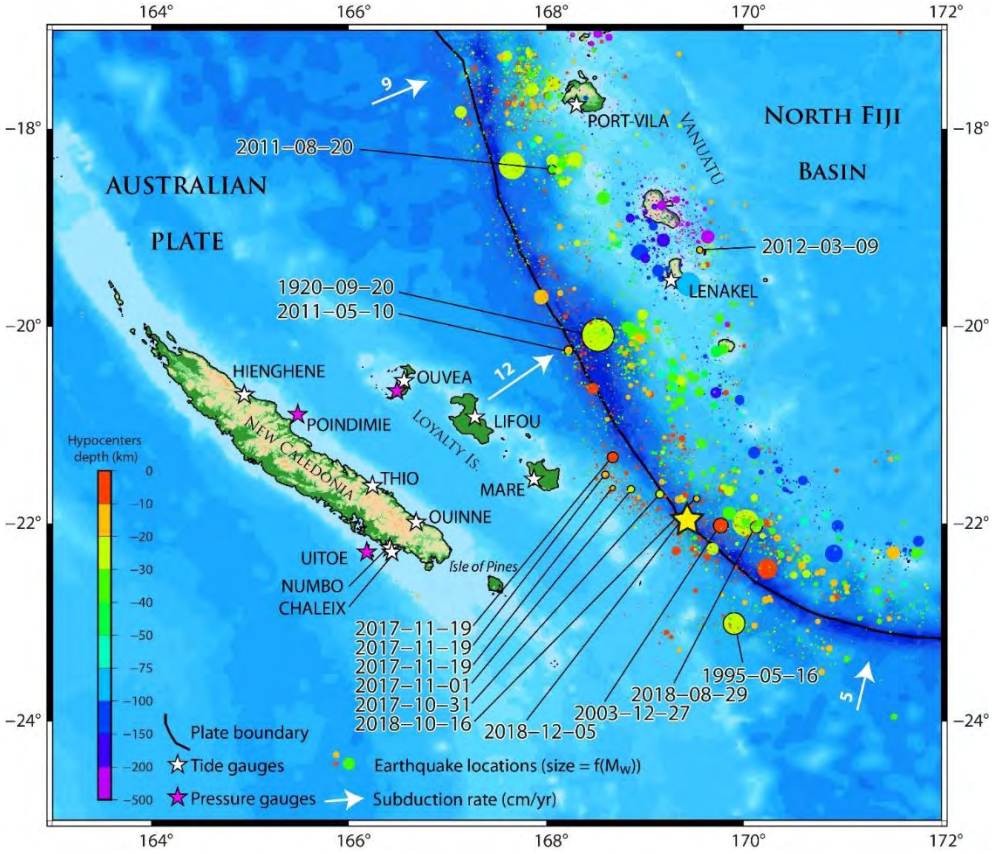
Si on réalise un zoom dans la région du Pacifique sud-ouest, on découvre qu'un quart des séismes mondiaux de magnitude M_W > 5 ont lieu dans cette région (Roger, communication personnelle). La sismicité y est considérée comme modérée à forte : il y a beaucoup de séismes de magnitude supérieure à 5 mais les séismes répertoriés ou enregistrés sur les 150 dernières années ont des magnitudes inférieures à 8.3 **(Ioualalen et Pelletier, 2005)**, alors que la géologie et la géodynamique de la région rendent potentiellement possibles des séismes de très fortes magnitudes supérieures à 8 voire même 9 (Pelletier, communication personnelle).

Suite au tsunami meurtrier de l'océan Indien en décembre 2004, la communauté internationale prend la mesure des capacités destructrices de ce phénomène naturel et la population de la Nouvelle-Calédonie n'est pas épargnée. Depuis, les études de l'aléa se sont multipliées dans l'ensemble des régions touchées par les tsunamis **(Sahal, 2011)** afin de protéger au mieux les populations et les infrastructures côtières : rapports d'étude sur l'aléa et le risque, campagne d'information auprès des populations, installation de sirènes, plan d'évacuation, etc.

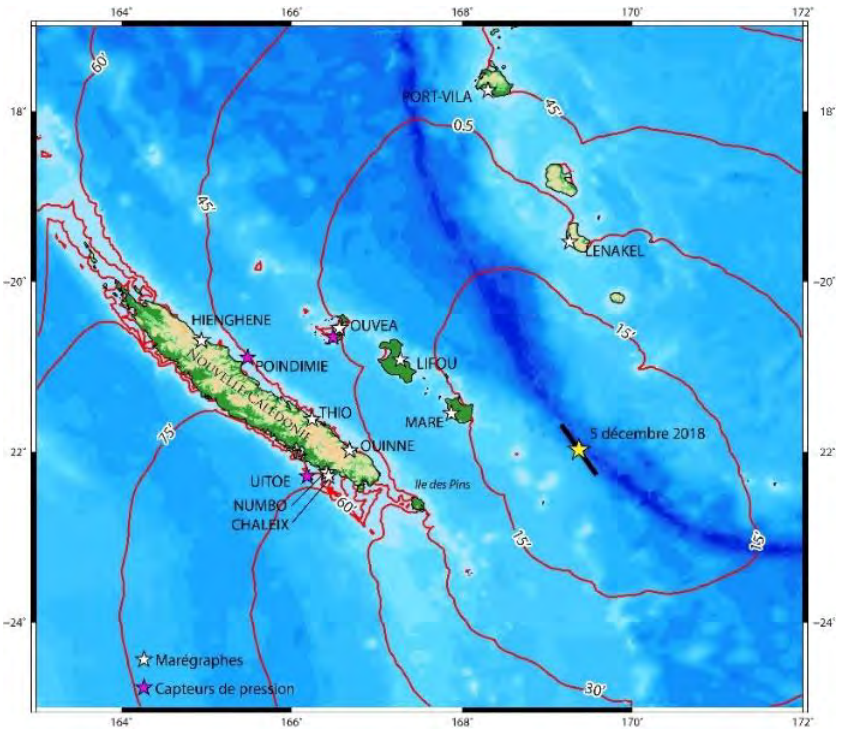
En Nouvelle-Calédonie, le tsunami du 2 avril 2007, qui entraîne la mort de dizaines de personnes aux îles Salomon, marque les esprits et constitue un tournant dans l'étude et la prise en compte du risque tsunami sur l'archipel **(Le Duff, 2016)**. Ainsi, en avril 2008, le secrétariat d'Etat à l'Outre-mer et la commission française auprès de l'UNESCO, mettent sur pieds une mission pour établir un catalogue exhaustif des tsunamis ayant eu un impact sur les côtes néo-calédoniennes. Dans ce premier catalogue réalisé par **Sahal et al. (2010)**, il est souligné entre autre la nécessité de mettre en place des moyens d'alerte et de prévention pour protéger la population du risque de submersion marine.

La mise à jour de ce catalogue en 2019 dans le cadre du projet TSUCAL, **(Roger et al., 2019)**, s'intéresse en particulier aux tsunamis répertoriés en Nouvelle-Calédonie depuis 2009. Les deux catalogues de **Sahal et al. (2010)** et **Roger et al. (2019)** donnent ainsi une vision générale des évènements historiques depuis 1875, c'est un travail particulièrement difficile puisque la tradition orale mélanésienne, avec peu de traces écrites, rend le traçage des tsunamis complexe. Ainsi, en Nouvelle-Calédonie, 37 tsunamis d'origine sismique ont été répertoriés depuis 1875 dont 25 durant les 10 dernières années. Ces chiffres ont été obtenus grâce aux marégraphes positionnés sur la côte Est et dans les îles Loyauté. Ces 37 évènements, localisés sur la cartographie ci-dessous, se distinguent de leur origine locale (15 tsunamis provenant du sud du Vanuatu), régionale (13 tsunamis provenant du nord du Vanuatu, des îles Salomon ou des Tonga) et enfin transocéanique (9 tsunamis d'origine lointaine comme le Japon, le Kamtchatka, l'Alaska, le Mexique et le Chili). Le tsunami le plus récent, celui du 5 décembre 2018, fait partie des cinq tsunamis les plus importants connus ayant touché l'archipel – d'amplitude maximale estimée ou enregistrée supérieure à 2 m – **(Roger et al., *in prep.*)**. Au total, ce sont 17 tsunamis d'amplitude maximale supérieure à 50 cm qui ont été recensés dans la région, accentuant la nécessité de prendre des mesures pour la protection des personnes et des biens face à cet aléa (cf. Carte 2). Ces tsunamis ont pour origine un évènement sismique et peuvent

toucher les côtes néo-calédoniennes rapidement au bout d'une trentaine de minutes (cf. Carte 3).



Carte 2 : Carte de la zone de subduction de Nouvelle-Calédonie et du Vanuatu. Les points colorés correspondent à la sismicité relevée par l'USGS entre le 1er janvier 1900 et le 24 janvier 2019. La taille des points est liée à la magnitude du séisme. Les dates localisent les séismes qui ont provoqués des tsunamis enregistrés en Nouvelle-Calédonie par les marégraphes (étoiles blanches) et les capteurs de pressions (étoiles violettes). L'étoile jaune localise l'épicentre du séisme du 5 décembre 2018. ***(Roger et al., in prep)***



Carte 3 : Carte des temps d'arrivées pour le tsunami du 5 décembre 2018. ***(Roger et al., in prep.)***

1.3 Utiliser les SIG pour évaluer et analyser le risque tsunami

En France, le rapport du sénateur Courteau a permis de réaliser un état des lieux de la situation du risque tsunami sur le territoire français (métropole et outre-mer) et présente des propositions sur les stratégies de réponse à ce risque **(Etienne et Courteau, 2009)**. Ces réflexions amènent à la création, en métropole, du Centre National d'Alerte aux Tsunamis (CENALT) en 2012. Ce centre diffuse un message d'alerte aux autorités dans le quart d'heure après un évènement sismique potentiellement tsunamigène[4]. Puis, il envoie de plus amples précisions dès l'analyse des données marégraphiques. Pour prévenir des risques de tsunami, les Plans de Prévention des Risques de Submersion Marine (PPRSM) et les Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) sont également mis en place dans les régions concernées en métropole et dans les départements d'outre-mer.

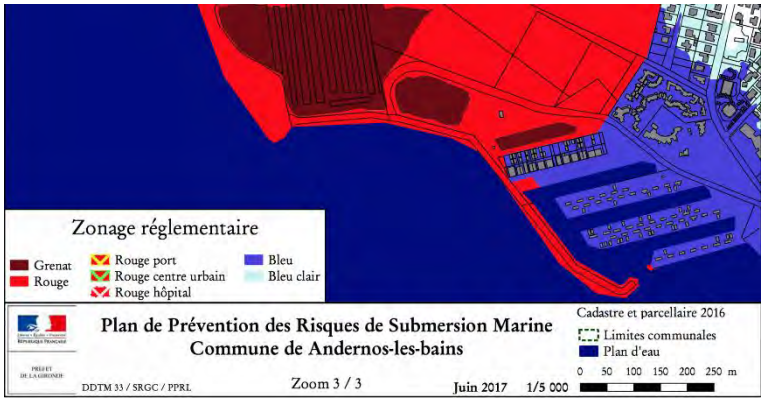


Figure 4 : Exemple de cartographie pour un PPRSM à Andernos-les-Bains, Gironde (http://www.ecocitoyensdubassindarcachon.org/).

[4] www.info-tsunami.fr

En Nouvelle-Calédonie, le projet TSUCAL a pour objectif final d'aider les acteurs de la protection civile à analyser rapidement en cas de séismes fort, le potentiel tsunamigénique et le risque tsunami associé à un scénario correspondant en tout point de la côte. La cartographie remplit ce rôle de « lecture globale et instantanée » de l'information en représentant les éléments d'étude – par la suite, hauteurs de vagues maximales à la côte – avec une symbolique spécifique **(Levy, 2002)**. La carte devient aussi un véritable outil de communication sur le travail réalisé grâce au développement des systèmes d'information géographique (SIG) : ils permettent l'organisation hiérarchique de l'information, affichent de plus en plus d'attributs complexes, croisent et analysent spatialement les données **(Arnaud, 2015)**. La Nouvelle-Calédonie est ainsi dotée d'un portail de l'information géographique innovant qui donne accès à de multiples données géographiques sur le territoire : c'est le portail Géorep (https://georep.nc/). Enfin, l'Atlas de la Nouvelle Calédonie réalisé par **Bonvallot et al. (2012)**, aborde des thématiques variées sur l'histoire, l'environnement et la vie sur l'archipel néo-calédonien et est accompagné de nombreuses cartographies très précises et informatives : la Nouvelle-Calédonie est donc particulièrement bien décrite à l'aide de données géographiques et des SIG. Ainsi, et dans le cadre du projet, l'outil SIG est utilisé afin de travailler correctement avec les différents jeux de données (topographiques, bathymétriques, zones à enjeux, résultats de modélisation, etc.) et pour produire des cartes d'aléa qui seront utiles aux divers acteurs de la protection civile.

Détecter, Alerter, Protéger et Prévenir

Pour détecter les séismes à l'origine des tsunamis, le réseau sismique régional océanien (ORSNET[5]) a permis la mise en commun des stations sismiques du Pacifique sud-ouest pour une détection plus rapide et précise des séismes dans la région (localisation des épicentres et calcul des magnitudes) et l'amélioration du système d'alerte aux tsunamis. Le réseau comprend une soixantaine de stations réparties sur l'ensemble du territoire des différents partenaires du Pacifique sud-ouest auxquelles s'ajoutent des stations en libre accès situées sur le pourtour du Pacifique. Le système de détection ORSNET est hébergé au centre IRD de Nouméa.

Le centre d'alerte des tsunamis dans le Pacifique (PTWC), hébergé à Hawai'i[6], prévient de l'aléa tsunami grâce à la détection d'un séisme d'une magnitude supérieure à 6.3 (seuil critique de génération d'un tsunami) **(Roger et al., 2019)**. Le tsunami est ensuite confirmé (et donc l'alerte maintenue ou interrompue) par l'analyse de deux outils de mesure :

- ✓ les marégraphes mesurent le niveau de la mer à un endroit déterminé ;
- ✓ le système de bouées de Détection des Tsunamis en eaux profondes (DART) analyse les changements de pression de la mer (enregistreur de pression profonde BPR), l'information est alors transmise par les satellites.

Les notifications ORSNET et PTWC permettent alors de déclencher les 61 sirènes actuellement réparties sur le territoire néo-calédonien.

Puis, le dispositif d'organisation de la réponse de la sécurité civile (ORSEC) programme l'organisation des secours en cas d'évènement majeur ou de catastrophe[7]. Sous l'autorité du préfet de région ou du haut-commissaire en Nouvelle-Calédonie, ce dispositif permet une communication facilitée entre les acteurs de secours, les opérateurs de réseaux et les représentants de l'Etat.

Enfin, la protection face aux tsunamis réside principalement en la mise en place de systèmes d'évacuation pour mettre les populations côtières à l'abri. Des programmes de recherches

[5] www.orsnet.org
[6] https://ptwc.weather.gov
[7] www.gouvernement.fr/risques

s'intéressent également de plus en plus au rôle des écosystèmes tels que les récifs coralliens **(Beck et al., 2018 ; Kunkel et al., 2006)** ou les mangroves **(Laso Bayas et al., 2011 ; Kathiresan et Rajendran, 2005)** pour atténuer l'énergie des tsunamis. Néanmoins, le meilleur moyen de protection face à cet aléa reste l'éducation et la prévention auprès des populations pour augmenter la connaissance et intégrer les réflexes à avoir lors de l'occurrence d'un tsunami **(Genevois et Leininger-Frézal, 2010)**.

1.4 Problématique générale

Mon travail de fin d'études s'interroge ainsi sur les méthodologies possibles de cartographie de l'aléa et du risque tsunami sur la base de données scientifiques (mesures bathymétriques et sismologiques, hauteur maximale atteinte en cas de tsunami, répartition des populations, etc.) et d'études sociales (enquêtes sur l'historique du phénomène, sur la connaissance et la mémoire des tsunamis dans les tribus kanak, etc.).

Pour prévenir et protéger la population de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie, comment assurer la transmission aux autorités d'un SIG utile, précis, performant et dynamique ?

Objectifs clés

L'objectif clé du projet TSUCAL est de délivrer, aux autorités compétentes, une banque de scénarii de tsunamis, afin qu'elles établissent les zones potentiellement impactées par un évènement. Sur cette base, des informations instantanées le temps d'arrivée sur la côte et sur l'amplitude des vagues attendues permettront au service de la Sécurité Civile (DSCGR) de déterminer les zones à évacuer. Cela concerne des tsunamis d'origine sismique associés à des séismes de magnitude supérieure à 6.5 détectés par les réseaux sismologiques (USGS, ORSNET).

Dans ce cadre, l'objectif principal du stage est de réaliser différentes cartographies de l'aléa tsunami d'origine sismique, en Nouvelle-Calédonie, par la représentation des hauteurs maximales de niveau d'eau atteintes à la côte. Ces cartographies seront mises à disposition du public sur Géorep et permettront d'alimenter la discussion sur l'évaluation du risque.

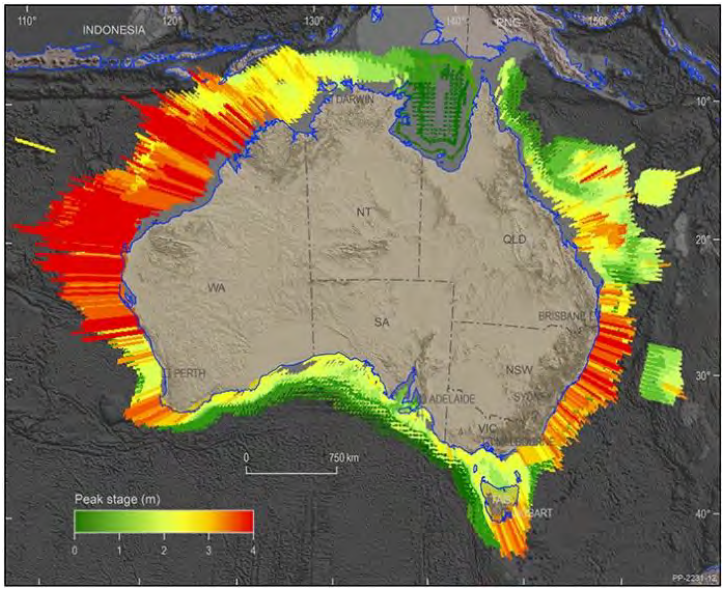
Etapes du stage

Le travail commence par la cartographie des enjeux afin de définir les zones de zoom sur le MNT. Il est donc nécessaire en amont d'étudier sur différents critères – population en zone littorale, centrales électriques, bâti de secours et de santé, industries classées, zones environnementales classées, établissement recevant du public (ERP) – les enjeux présents sur le territoire et ainsi déterminer les zones d'intérêt pour lesquelles il faudra préparer des MNT de meilleure résolution.

Il est alors nécessaire de mettre à jour le MNT de Nouvelle-Calédonie à partir des données bathymétriques et topographiques obtenues sur le territoire. La récupération et le tri de toutes ces données, la vérification des référentiels et des projections (géographiques WGS84), du calage altimétrique (à l'aide des bornes géodésiques) et enfin leur comparaison pour garder la meilleure résolution en tout point sont essentiels pour s'assurer d'obtenir un MNT précis.

La modélisation numérique des tsunamis sur la base, d'abord, d'études de cas pour valider le modèle, puis de centaines de scénarii possibles à l'échelle du territoire permet d'avoir à disposition un atlas des tsunamis possibles dans la région néo-calédonienne. Dernière étape, la cartographie de l'aléa tsunami sur les côtes néo-calédoniennes a pour but de représenter la

hauteur maximale possible de l'onde de tsunami atteinte en tout point de la côte en comparant tous les scénarios (par exemple cf. Carte 4).



Carte 4 : Représentation des hauteurs maximales d'un tsunami en tout point de la côte australienne. La taille de l'histogramme et la couleur sont fonctions de la hauteur maximale. ***(Davies et Griffin, 2018)***

2 Cartographie des enjeux

Le projet TSUCAL inclut toutes les étapes de cartographies d''étude de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie. Pour étudier le risque, il faut d'abord analyser l'aléa séparément des enjeux et de leur vulnérabilité. Dans un premier temps, la cartographie des enjeux va nous amener à nous interroger sur la définition de la zone littorale, de la population qui y réside et qui est soumise au risque de submersion marine. Le schéma ci-dessous présente la méthodologie élaborée au cours du stage pour cartographier la population en zone littorale ainsi que le bâti sur le territoire néo-calédonien.

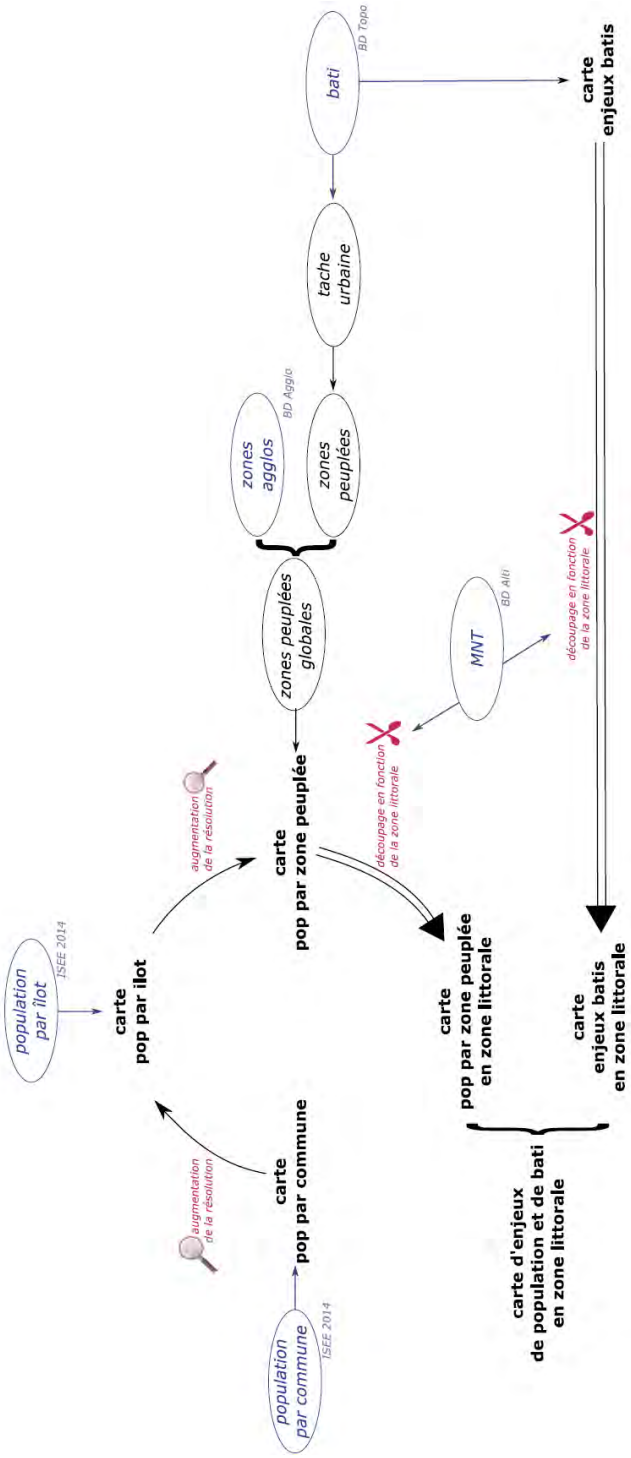


Figure 5 : Méthodologie choisie pour cartographier la population et le bâti en zone littorale. (Crédits B. Thomas)

2.1 La zone littorale en Nouvelle-Calédonie

L'étude des tsunamis en Nouvelle-Calédonie se concentre de manière exclusive sur l'interface terre-mer constamment en évolution, car soumise au risque de submersion marine et d'érosion côtière **(Arnaud, 2015)** dont les impacts sont de plus en plus forts : notamment du fait d'une augmentation du régime des tempêtes et du recul du trait de côte associés au réchauffement climatique global et à la montée du niveau marin qui en découle **(GIEC, 2007)**.

Mais comment définir cette interface terre-mer qu'est le littoral ? Quelle délimitation faut-il donner à cette zone d'étude afin de réduire les quantités de données à traiter ?

Cette partie oriente ainsi notre réflexion sur la définition propre à donner à la zone littorale exposée à l'aléa tsunami et propose des cartographies types de cette zone littorale en Nouvelle-Calédonie.

2.1.1 Les définitions du littoral

Le littoral est défini comme une « étendue de pays le long des côtes, au bord de la mer » d'après le Larousse[8], une zone sinueuse dont la définition est finalement bien vague mais qui se précise dans Le Petit Robert[9] comme « ce qui appartient et qui est relatif à la zone de contact entre la terre et la mer ». Dans son Traité de géographie physique, **De Martonne (1909)** fait du littoral, le domaine qui « comprend tout ce qui, soit au-dessous, soit au-dessus du niveau moyen des eaux, est soumis à l'action des forces responsables du tracé de la côte et de ses changements ». Sommes-nous alors capables de délimiter cette étendue et de la mesurer ?

Par exemple, une étude récente du BRGM définit, au sens large, le littoral comme la « zone de contact entre l'hydrosphère, l'atmosphère et la lithosphère » **(Mallet et Michot, 2012)**. La notion de trait de côte prend ainsi forme dans la gestion du littoral et l'analyse des indicateurs de l'évolution côtière : c'est un indicateur commun pour tous les gestionnaires et définit la limite terrestre basse du littoral. Le trait de côte est défini par le SHOM comme « la laisse des plus hautes mers dans le cas d'une marée astronomique de coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales (pas de vent du large, pas de dépression atmosphérique susceptible d'élever le niveau de la mer) »[10], soit la ligne d'intersection entre la surface topographique et le niveau des plus hautes mers astronomiques.

Dans une réflexion sur l'apport des SIG à la recherche, le travail de **Dumas et al. (2005)** balaye les différentes limites terrestres hautes possibles, d'abord celles imposées juridiquement, puis celles formées par l'anthropisation des terres pour finir sur la limite topographique qui influe sur la végétation, sans doute la plus simple et la plus naturelle.

Tout d'abord, les institutions génèrent des limites juridiques pour encadrer les usages sur le littoral. C'est le cas de la **Loi Littoral (1986)** en France qui tente de concilier préservation et développement du littoral. 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)**. Les institutions décident également d'une limite technique : c'est la définition de la zone côtière dont la largeur varie en fonction du type de donnée traitée et de l'analyse que l'on souhaite en faire. Ainsi, **Dumas et al. (2005)** fixent par exemple, une largeur de 5 km pour créer ce corridor côtier. Sur les îles du Vanuatu, plus proches voisines de l'archipel néo-calédonien, la limite est définie à 2 km **(Cillaurren et al., 2002)** afin de différencier la population littorale de la population située à l'intérieur des terres.

On peut ainsi également envisager la limite du domaine littoral sur un critère démographique en mesurant les distances entre le centre communal et le trait de côte. En Nouvelle-Calédonie, la distance moyenne est de 1,4 km et un quart des centres des chefs-lieux sont situés à moins de 230 m du rivage **(Dumas et al., 2005)**. Là de nouveau, on utilise un critère métrique d'éloignement au trait de côte, en fonction de l'urbanisation, pour définir la délimitation du littoral. Dans une logique semblable, **Jambeck et al. (2015)** s'intéressent aux déchets plastiques qui passent du littoral urbanisé directement à l'océan pour des « populations vivants dans la frange des 50 km à la côte ». Les critères de population et de son impact

[8] Le Larousse (2009)
[9] Le Petit Robert (2004)
[10] https://shom.fr

environnemental à travers l'urbanisation et la pollution de la côte définissent alors le littoral comme une zone œkoumène où les hommes vivent, la façonnent et lui confèrent une valeur écologique et économique **(Bousquet, 1990)**.

Enfin, **Dumas et al. (2005)** explorent la pertinence de la limite topographique en Nouvelle-Calédonie où la Grande Terre présente un système littoral et un système montagnard bien définis par la végétation : de la mangrove les racines dans l'eau, à la forêt sèche parsemée aujourd'hui dans le maquis de basse et moyenne altitude, jusqu'à la forêt plus dense et humide à mesure que l'on s'élève en altitude **(Bonvallot et al., 2012)**. La définition du littoral se base alors sur une rupture topographique de la pente et de la végétation présente (pente et végétation sont corrélées avec le taux de pluie) : **Dumas et al. (2005)** proposent dans ces conditions 100 m d'altitude comme la limite terrestre du littoral.

Finalement, définir le littoral reste dépendant de la manière dont on aborde notre sujet d'étude et ce à quoi on s'intéresse : la délimitation écologique, la population en zone côtière, les strates de végétation, etc. De manière générale cependant, le littoral est régulièrement défini en fonction de l'anthropisation et d'une distance au trait de côte variable selon le sujet et l'échelle d'étude **(Cohen et al., 1997 ; Füssel, 2012)**.

2.1.2 La zone littorale néo-calédonienne : une définition adaptée à l'étude des tsunamis

L'étude des tsunamis s'intéresse en particulier à plusieurs paramètres caractéristiques dont la hauteur de vague à la côte, la vitesse des courants, la profondeur d'inondation et le run-up (cf. Figure 3). Ce dernier correspond à l'altitude maximale atteinte par le tsunami lors de son passage à terre (phase d'inondation) : il peut donc être intéressant de prendre comme seul critère de définition de notre zone littorale l'altitude par rapport au niveau de la mer par temps calme et en grande marée de vives eaux.

En prenant uniquement en compte l'altitude, on englobe également les berges des rivières à l'intérieur des terres qui sont inférieures à l'altitude *a* donnée. Si on retient le critère de profondeur d'inondation, on pourrait supprimer des zones d'étude trop éloignées de la côte. Néanmoins au vu de la faible largeur du territoire (moins de 60 km) et des forts courants observés dans certaines rivières lors de précédents tsunamis **(Sahal et al., 2010)**, il nous a semblé préférable de conserver les zones éloignées du littoral mais inférieure à l'altitude *a* et donc soumise au risque tsunami.

En comparant le facteur altitude du run-up, avec les autres facteurs (cf. § 2.1.1), on se rend compte que les paramètres de végétation, d'occupation des sols et de population sont étroitement liés avec la topographie qui reste donc comme le « facteur le plus significatif dans l'individualisation du système littoral » **(Dumas et al., 2005)**.

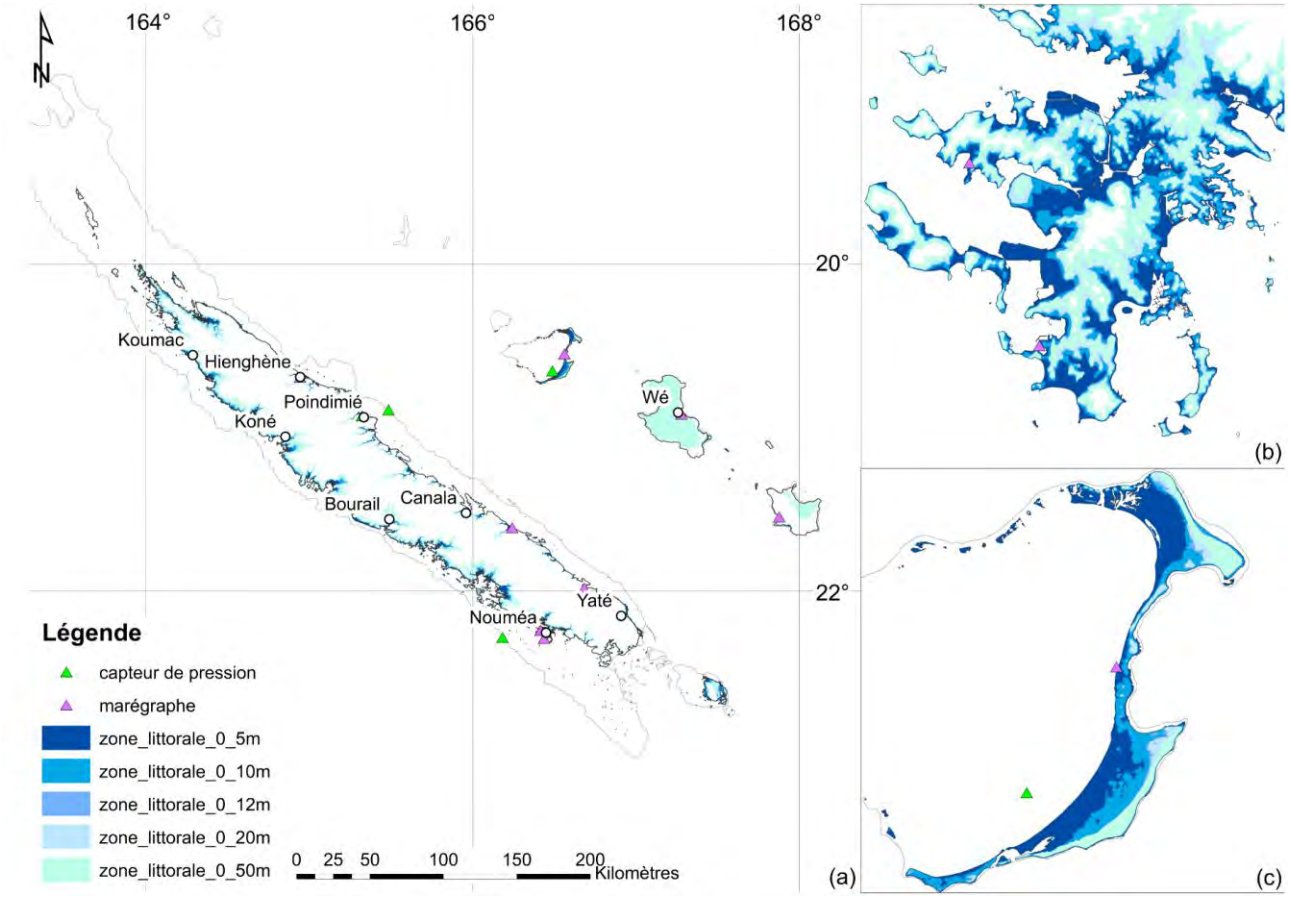
Nous définissons donc, dans le cadre du projet TSUCAL, la zone littorale en Nouvelle-Calédonie soumise au risque de submersion marine, comme la zone terrestre comprise entre le niveau de la mer (altitude 0 – délimitation du trait de côte) et une altitude *a* donnée.

L'altitude *a* varie en fonction des éléments d'étude : dans les cartographies, on ira au moins jusqu'à 50 m, altitude de run-up maximum observé en Indonésie[11] **(NOAA, 2019)** même si de telles amplitudes semblent très peu probables dans le cadre des scénarii envisagés pour le territoire néo-calédonien. En effet, le catalogue des tsunamis **(Roger et al., 2019)** présente une amplitude maximum observée de 5 m à Ouvéa le 21 septembre 1920 (tsunami d'origine locale et de magnitude M_w = 8). Ainsi, le travail sur une altitude inférieure à 10 m permet de se concentrer sur la zone la plus à risque. Les altitudes de 20 m et 50 m permettent d'avoir une

[11] Tsunami du 26 décembre 2004 de magnitude M_w = 9,1 au large de Sumatra avec une hauteur de vague maximum de 50,90 m **(NOAA, 2019)**.

vision un peu plus large et de travailler par la suite sur les chemins d'évacuation et les aires de regroupement des personnes évacuées (zones refuge). On s'intéressera également à l'altitude de 12 m qui correspond actuellement à 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)**.

Pour cartographier cette délimitation de la zone littorale en altitude, nous avons travaillé directement avec le MNT[12] terrestre du territoire en extrayant la zone du raster dont l'altitude était inférieur au *a* donné. Ainsi, on visualise les différentes franges littorales définies pour des altitudes inférieures à 5 m, 10 m, 12 m, 20 m et 50 m (cf. Carte 5). Cette bande littorale donne déjà une bonne idée du relief néo-calédonien : une pente globalement douce à l'ouest de la Grande Terre avec de grandes zones de plaine alors que la côte est plonge rapidement dans l'océan avec des pentes abruptes.



Carte 5 : 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 Nouméa, (c) zoom sur Ouvéa, iles Loyauté (données MNT, 2009). (Crédits B. Thomas)

Avant de s'intéresser aux enjeux sur le territoire, il est intéressant d'étudier les zones dans et hors risque tsunami sur la part des superficies communales. Pour cela, on réalise une découpe des 33 communes de Nouvelle-Calédonie par la zone littorale choisie et on en calcule les superficies (calcul d'aire sur SIG). On obtient que jusqu'à 25 % du territoire néo-calédonien est considéré en zone littorale (pour une altitude de 50 m).

[12] https://georep.nc

2.2 Enjeu de population : localiser la population sur la frange littorale

A partir de ce zonage littoral défini, il est intéressant de creuser l'étude sur les différents éléments qui le compose : la population qui y réside, l'urbanisation, les zones à forts enjeux environnementaux, les centres de secours et de soins. La première étape concerne l'analyse la plus fine possible de la répartition de la population dans la zone d'altitude inférieure à 50 m.

2.2.1 Méthodologie

POURQUOI ? – LES OBJECTIFS

L'enjeu population est primordial dans l'étude de l'aléa et du risque tsunami. Il s'agit d'estimer le plus précisément possible le nombre d'habitants vivant dans la frange littorale potentiellement exposée ainsi que leur localisation spatiale. Ces informations clés serviront à la gestion du risque de submersion marine (les tsunamis mais aussi les tempêtes) pour prévenir et protéger la population **(Chen et McAneney, 2006 ; Nicholls et Small, 2002)**.

QUOI ? – LES DONNEES

Le dernier recensement réalisé par l'Institut de la Statistique et des Etudes Economiques (ISEE) de la Nouvelle-Calédonie date de septembre 2014 et révèle que la population totale sur l'archipel atteignait alors 268 767 personnes **(Broustet et Rivoilan, 2015)**. Cette population est comparable à celle d'autres îles du Pacifique comme la Polynésie française ou le Vanuatu mais présente une des plus faibles densités des états insulaires du Pacifique, avec seulement 14 habitants au km² **(Broustet et Rivoilan, 2015)**. Cette valeur est à nuancer avec le Grand Nouméa qui comprend les quatre communes de Nouméa, Mont-Dore, Dumbéa et Païta concentre deux tiers de la population néo-calédonienne : cela souligne dès lors une très forte concentration dans la Province Sud au niveau de la capitale et une disparité des habitants assez importante sur le reste du territoire.

Dans le cadre du projet TSUCAL, nous utilisons les données de recensement de la population en 2014 obtenues auprès de l'ISEE durant ce stage sous un format de tableurs Excel :

- ✓ les chiffres de population totale par commune (33 communes) ou province (3 provinces) de résidence classés selon divers paramètres tels que le genre, le groupe d'âge, la nationalité, l'emploi, etc. ;
- ✓ les chiffres de population totale par îlot de recensement (2392 îlots de différentes surfaces en Nouvelle-Calédonie).

COMMENT ? – LA PROCEDURE

Il s'agit dans un premier temps de cartographier les chiffres de populations tels qu'ils sont fournis en fonction des communes puis des îlots. Cela permettra d'avoir une première vision générale de la répartition des habitants sur le territoire néo-calédonien (cf. Carte 6 et Carte 7).

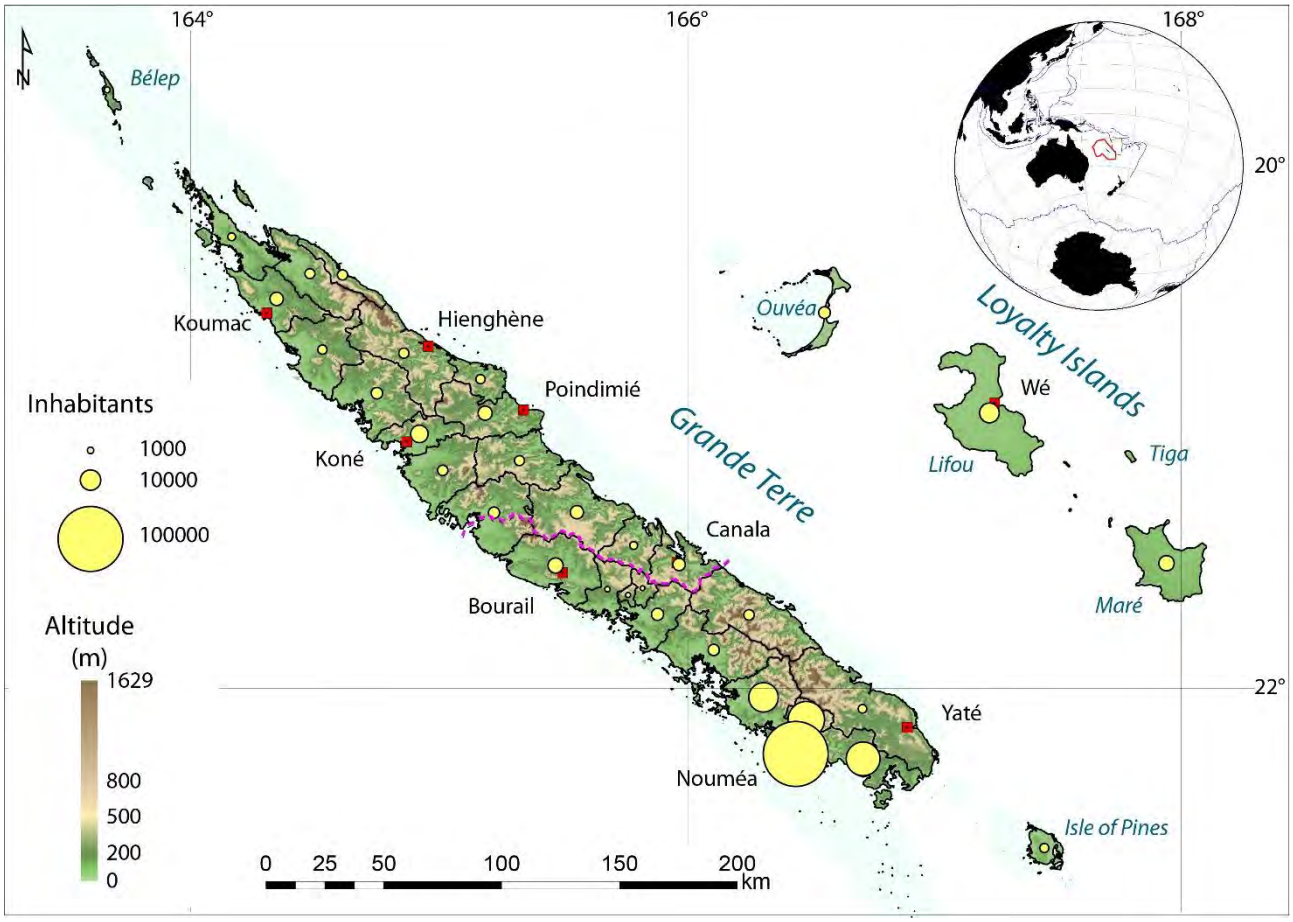
Cependant, les données de population découpées en fonction des communes et des îlots ne fournissent pas d'informations sur la distance à la côte ou sur l'altitude : on s'intéressera donc ensuite à croiser la population avec la frange littorale pour connaître par îlot le nombre d'habitants potentiellement soumis à l'aléa tsunami.

Enfin, la taille des îlots évolue beaucoup en fonction de leur localisation et peuvent atteindre jusqu'à 982 km² pour celui de Pourina Kouakoué à l'ouest de Yaté (cf. Carte 7). Il faudra alors s'intéresser à localiser plus précisément la population dans l'îlot en créant des zones dites « peuplées » : ce sont les zones bâties denses concentrant le maximum de population de l'îlot.

2.2.2 Cartographies de la population recensée par l'ISEE en 2014

a - Cartographie de la population par commune

Dans un premier temps, il est intéressant de représenter le nombre d'habitants par commune afin d'avoir une vision générale de la répartition de la population sur le territoire néo-calédonien (cf. Carte 6). Pour cela, on réalise une jointure sur SIG entre la donnée spatiale des communes et les données tableur de population grâce au code postal (cf. Figure 5). Ainsi, la Carte 6 confirme bien le gap d'urbanisation entre le Grand Nouméa et le reste du territoire néo-calédonien. Il est alors nécessaire d'augmenter la résolution sur la localisation de la population : on va donc subdiviser les communes en quartiers appelés îlots (cf. Figure 5).

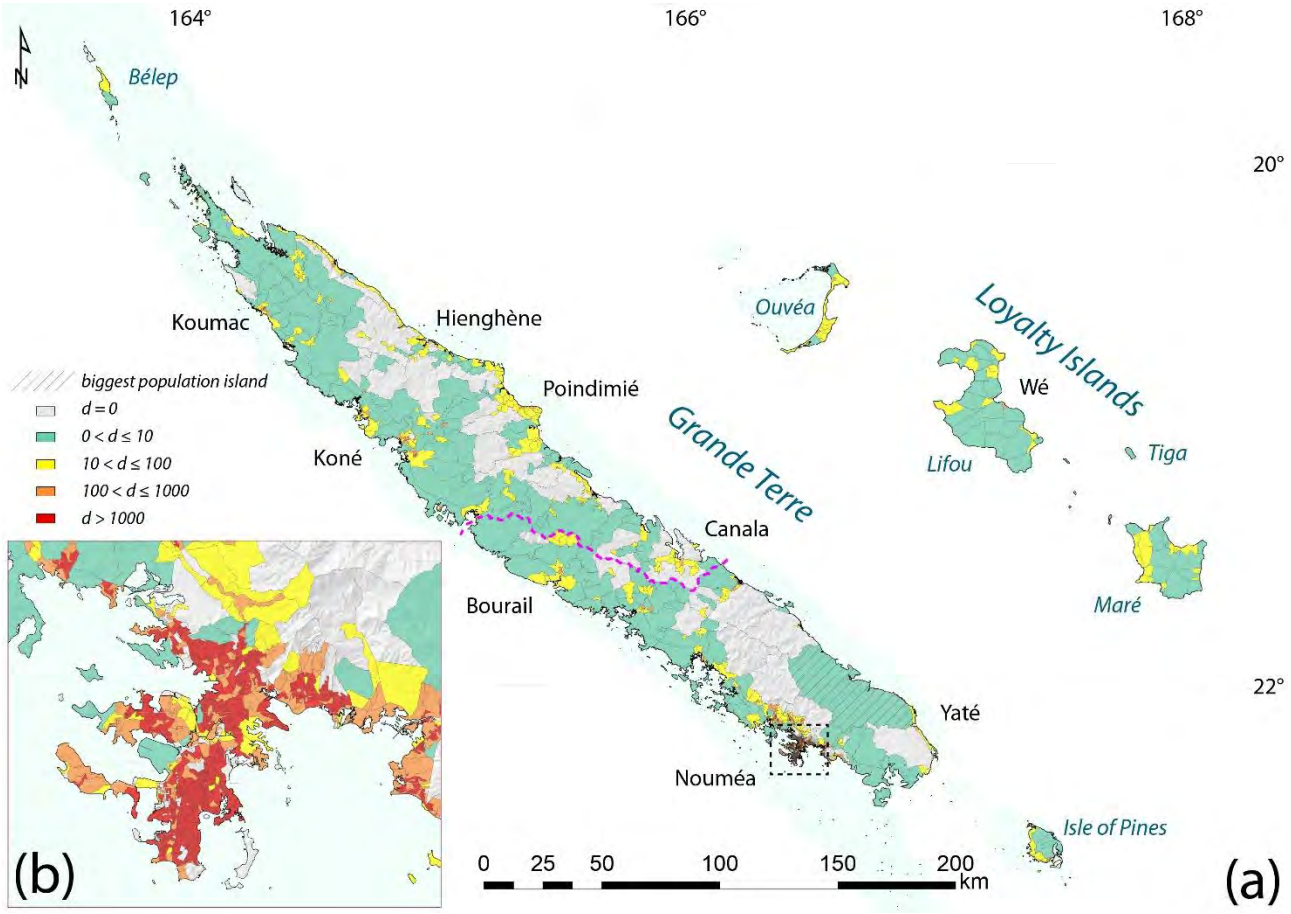


Carte 6 : Population par commune en Nouvelle-Calédonie. Chaque entité entourée d'un liseré noir correspond à une commune (les îles Belep, les îles Loyauté et l'Ile des Pins sont des communes distinctes). Chaque cercle jaune est fonction du nombre d'habitants dans la commune (données ISEE, 2014). Les villes principales sont représentées par des carrés rouges. La ligne pointillée violette délimite la Province Nord de la Province Sud de la Grande Terre. ***(Thomas et al., in prep.)***

b - Cartographie de la densité de population par îlot

Les données de recensement par îlot sont les plus précises que nous avons, il semble donc judicieux de les utiliser pour représenter la densité de population par îlot plutôt que le nombre d'habitants, au vu des dimensions très variées des îlots sur le territoire néo-calédonien (cf. Carte 7). Pour cela, on réalise une jointure entre la donnée spatiale des îlots et les données de

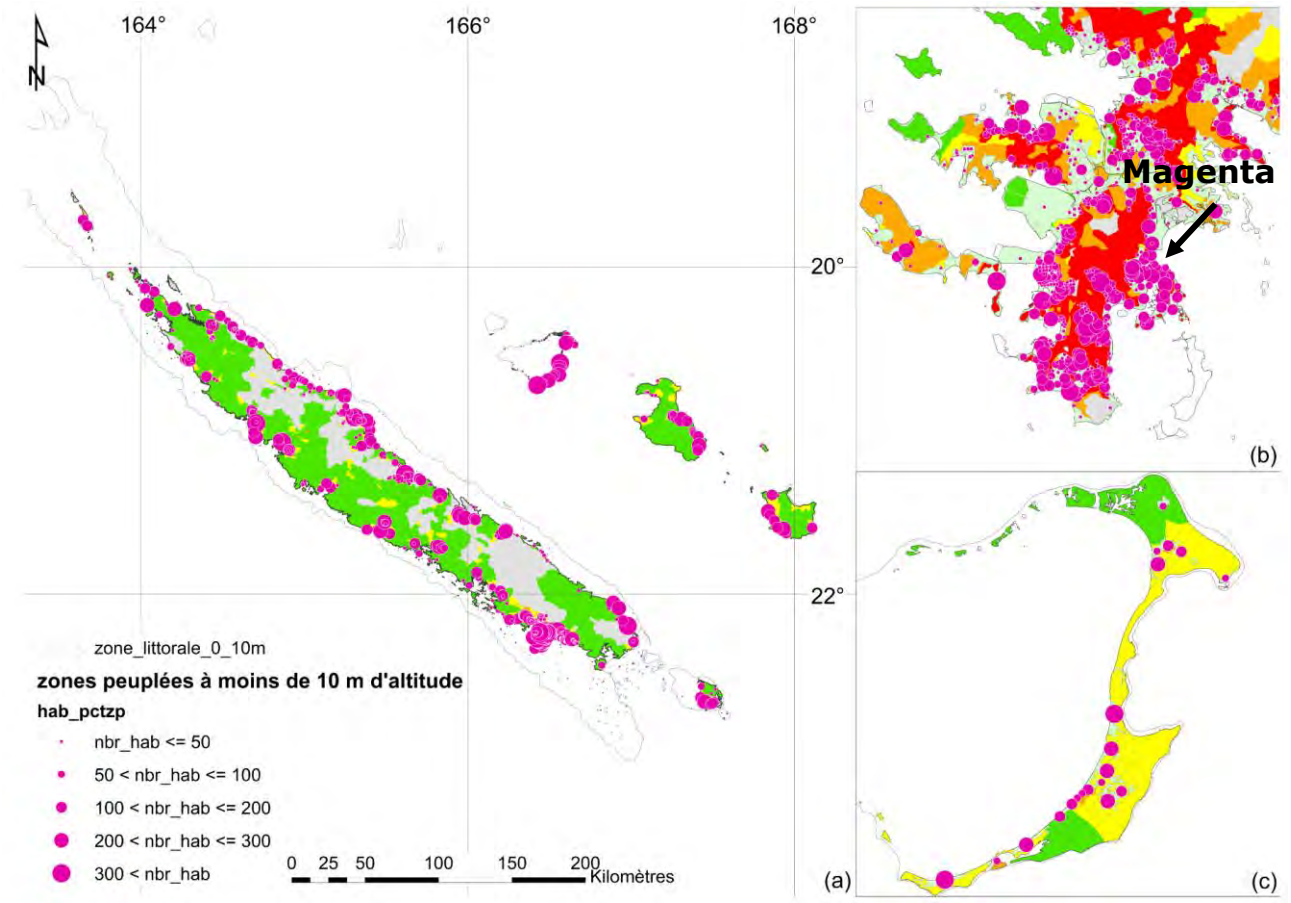
population sur le SIG, grâce au code îlot (cf. Figure 5). Ainsi, la cartographie montre le gradient de densité entre la région nouméenne, les grandes villes de l'ouest et des Loyauté et la côte est (cf. Carte 7).



Carte 7 : Densité de population par îlot de population en Nouvelle-Calédonie : (a) sur tout le territoire ; (b) zoom sur le Grand Nouméa (données ISEE, 2014). Le carré en pointillé noir localise le zoom (b). L'îlot hachuré correspond au plus grand îlot de population appelé Pourina Kouakoué. La ligne pointillée violette délimite la Province Nord de la Province Sud de la Grande Terre. ***(Thomas et al., in prep.)***

c - Prise en compte de la frange littorale

Pour aller plus loin, on s'intéresse à représenter la population par îlot en zone littorale. Pour cela, on découpe la couche SIG des îlots en fonction de la zone littorale. Par exemple, sur la Carte 8, on choisit de représenter au-dessus des îlots de population, le nombre d'habitants par zone peuplée situées à moins de 10 m d'altitude. Ce résultat permet une nouvelle fois de se rendre compte de la population élevée en zone littorale ainsi que de la densité forte le long de la côte.



Carte 8 : Population en zone littorale à moins de 10 m d'altitude en Nouvelle-Calédonie : (a) sur tout e territoire, (b) zoom sur le Grand Nouméa, (c) zoom sur Ouvéa, iles Loyauté (données ISEE, 2014). La densité de population sur tous les îlots est représentée comme sur Carte 7. Les cercles rose représentent le nombre d'habitants suivant l'échelle définie dans la légende, par zones peuplées dans la zone littorale de 0 m à 10 m. Les lignes grisées correspondent à la barrière de corail ***(Andréfouët et al., 2006)****. (Crédits B. Thomas)*

d - Discussion

Ces cartographies sont riches en informations et confirment le ressenti sur une population majoritairement littorale et nouméenne **(Dumas, 2009)**. La cartographie sur la densité par îlot permet de visualiser la présence de nombreux villages et tribus en Province Nord et dans les Iles Loyauté. La représentation par îlot est certes bien plus précise que les données de population par commune, mais elle possède un bémol sur les dimensions très variées des îlots entre eux, ce qui les rend difficilement comparables. En effet, si sur un îlot du Grand Nouméa (un îlot de Magenta par exemple, cf. le zoom sur Nouméa sur Carte 7) on peut facilement imaginer une répartition homogène des habitations sur l'ensemble de l'îlot, quand est-il des îlots de la côte est qui possèdent des grandes surfaces mais avec seulement une dizaine d'habitants (cf. l'îlot Pourina Kouakoué hachuré sur Carte 7) ? Où sont précisément les habitations ? Il devient donc important d'essayer de représenter des zones d'habitation dites « zones peuplées » dans lesquelles on estime que l'ensemble de la population de l'îlot vit.

2.2.3 Cartographie des zones peuplées en frange littorale

a - Etat des lieux et Objectifs

Pour affiner la localisation de la population, la DITTT a créé en 2014 une donnée SIG des zones agglos[13] en Nouvelle-Calédonie qui représentent les zonages dans lesquels on estime que la totalité des habitants du territoire vit. Ce zonage est réalisé à partir de la bufferisation[14] des constructions de la BD TOPO© IGN Nouvelle-Calédonie agrégeant ainsi les bâtiments distants de moins de 100 m. Le compte minimal pour chaque zone polygone est de 10 bâtiments sauf pour les structures de grande taille (hôpital, industrie, etc.). Néanmoins, en réalisant des zooms sur certaines régions, on se rend compte de quelques lacunes : la zone habitée le long de la plage de Poé à l'ouest de Bourail n'est pas indiquée alors qu'elle comprend un aérodrome, des zones d'habitations et de camping et qu'elle fait plus d'un kilomètre carré. Quelques oublis ont donc été identifiés au cours de ce stage, comme dans les îles Belep pour lesquelles une zone agglo est indiquée sur un espace en bord de mer sans aucun bâti. Il semble donc nécessaire de mettre à jour cette couche SIG sur la base des données bâtis plus récentes.

Il s'agit de mettre à jour cette couche de zones agglos en une couche dite de « zones peuplées » (terminologie utilisée par la DSCGR et dans notre étude). Nous allons également nous baser sur l'emplacement du bâti. En effet, on considère que la population est de manière générale proche d'un bâti la plupart du temps. Les données de la BD TOPO© IGN, mises à jour en juin 2019, sont accessibles sur Géorep. Elles fournissent une couche SIG de l'ensemble du bâti sur le territoire en distinguant les fonctions : habitation, industrie, commerce, etc. La mise à jour des zones peuplées consiste donc à comparer la couche existante de zones agglos avec l'ensemble du bâti néo-calédonien.

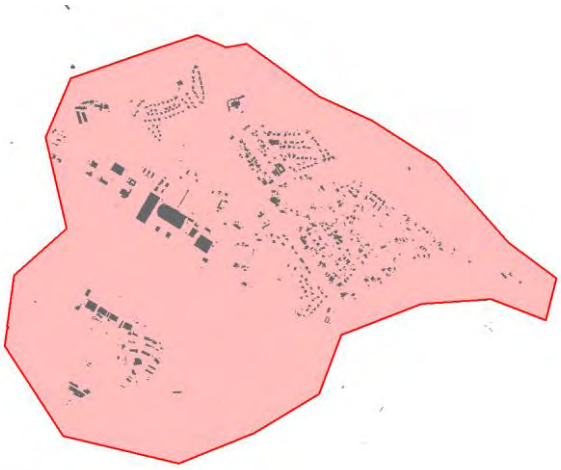


Figure 6 : Superposition d'une zone agglo / peuplée (entité rouge) (données DITTT, 2014) avec le bâti (entités grises) (données BD TOPO© IGN, 2019). Exemple de la commune de La Tontouta : l'aéroport correspond aux plus gros bâtiments, les pistes ne sont pas représentées car elles sont considérées comme des zones de circulation (comme les routes) avec aucune population à proprement parler. (Crédits B. Thomas)

[13] https://georep.nc

[14] La bufferisation correspond à la création d'une zone tampon autour de l'entité *(cf. b - Méthodologie de création de la tache urbaine)*.

b - Méthodologie de création de la tache urbaine

Comme le bâti est très éparpillé sur le territoire, il est difficile de le comparer avec les zones peuplées. Il est alors intéressant de réaliser un zonage simplifié du bâti à l'échelle du territoire. Pour cela, le rapport d'étude édité par le CERTU **(Loriot, 2008)** donne une définition et une méthodologie de création complète de la tache urbaine comme l'ensemble « des zones urbanisées, des emprises industrielles, commerciales, de service, des réseaux de communication, des mines, décharges et chantiers ainsi que des espaces verts artificialisés non agricoles ». Cette description considère à la fois les zones d'habitations et d'activités ainsi que les réseaux de communication. Nous allons nous baser en partie sur cette proposition pour créer la tache urbaine de Nouvelle-Calédonie.

La visualisation des réseaux de communication (voiries) indiqués dans la BD TOPO© IGN montre la localisation de l'ensemble des routes principales, des routes revêtues ou non, des pistes et chemins sans distinction. On observe un réseau très dense à proximité du bâti des centres villes, des villages et des tribus. A l'inverse, certaines routes sont totalement isolées avec un passage très faible. De plus, la distinction entre chaque élément de voirie dans la base de données reste complexe. Comme la création de la tache urbaine est ici directement liée à l'objectif de représenter la localisation statique de la population, il est donc décidé, pour simplifier, de ne pas prendre en compte les réseaux routiers.

Enfin, pour englober le bâti et donner une vision simplifiée de l'urbanisation sur le territoire néo-calédonien, nous reprenons le processus proposé dans **Thomas et al. (*in prep.*)** : une succession de dilatation et d'érosion est appliqué à chaque bâti pour créer une zone tampon autour de la construction et le relier à ses voisins. D'abord, la dilatation correspond à une « ouverture » en permettant d'englober sur un rayon défini la zone urbanisée autour de la construction. Le rayon est défini à 50 m afin que les bâtis situés à moins de 100 m soient inclus dans la même zone tampon. Le choix de 50 m, proposé dans **Loriot (2008)** est cohérent avec l'urbanisation éparse du territoire néo-calédonien. Puis, l'outil de fusion ArcGIS « dissolve » permet de combiner toutes les mini-tâches en une seule grande tâche urbaine. Enfin, l'érosion, dite « fermeture », appliquée sur cette couche tampon, consiste à rétrécir de 30 m (valeur choisie suite à de nombreux tests) ce zonage pour avoir une urbanisation plus réaliste : les bâtis distants de moins de 100 m restent liés. On obtient donc un tampon de [50 − 30 = 20 m].

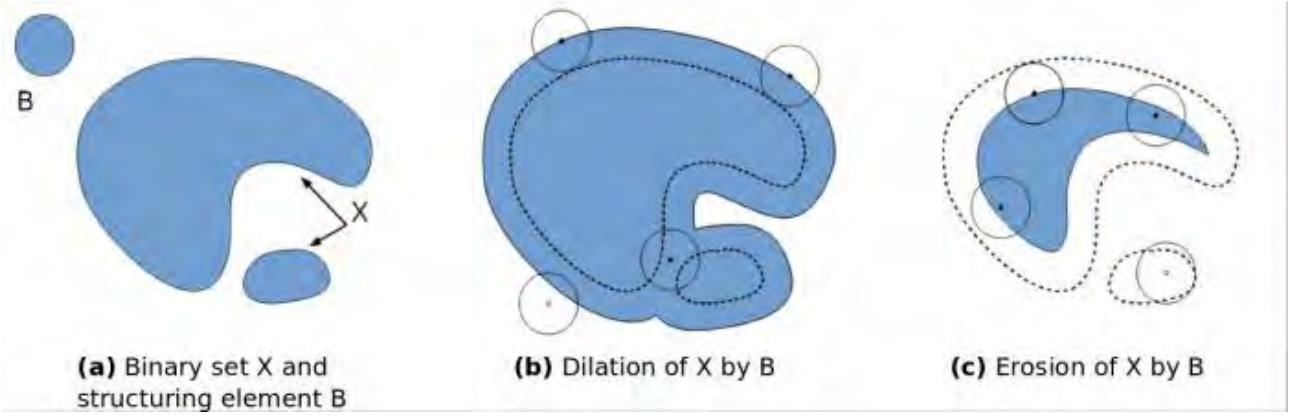


Figure 7 : Principe de dilatation et d'érosion à partir d'un élément géométrique (ici, on travaille sur le bâti) (https://github.com/ijpb/MorphoLibJ/).

Ainsi, dans le cadre du projet TSUCAL, nous définissons la tache urbaine comme l'ensemble du bâti d'habitat, de travail, de service et de loisir, sans les voies de communication, entouré par une zone tampon de rayon 20 m.

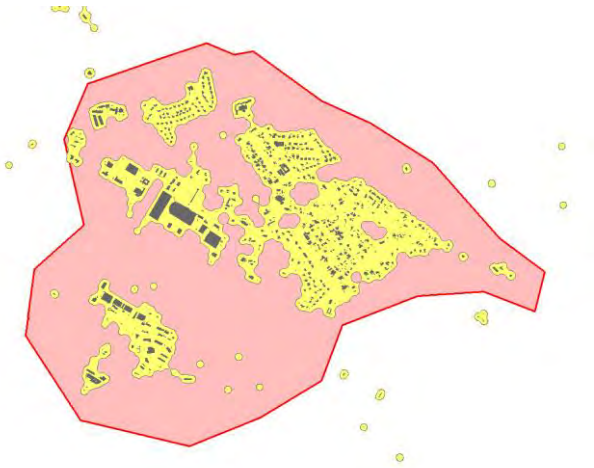


Figure 8 : Superposition d'une zone agglo / peuplée (entité rouge) (données DITTT, 2014) avec la tache urbaine obtenue (entités jaunes) et le bâti (entités grises) (données BD TOPO© IGN, 2019). Exemple de la commune de La Tontouta. (Crédits B. Thomas)

c - Méthodologie de mise à jour des zones peuplées

Il s'agit maintenant de créer notre propre couche SIG de zones peuplées. La démarche consiste à travailler en parallèle avec la couche des zones agglos proposées par la DITTT et la tache urbaine obtenue précédemment. La réflexion se base sur différents tests sur SIG en trouvant le plus représentatif et s'inspire également des propositions de **Bécart (2017)**.

Etape 1 : agrégation des polygones de la tache urbaine à 200 m

D'abord, la tache urbaine subit une agrégation de ces polygones pour combiner les éléments urbains entre eux à la distance spécifiée et ainsi former de nouveaux polygones que l'on nommera taches urbaines. La distance choisie est de 200 m afin de prendre en compte la largeur des routes et l'éparpillement des habitations notamment hors Grand Nouméa.

On utilise la couche existante des zones agglos comme base de notre propre couche de zones peuplées. En effet, à part pour 2 éléments sur 518 zones agglos, les 516 zones agglos croisent au moins une zone de tache urbaine et constituent donc une base sûre et vérifiée pour créer les zones peuplées.

Etape 2 : sélection de la tache urbaine qui croise la zone agglo ou qui possède une superficie plus grande que 1 km²

Pour ajouter en précision sur ces 516 zones agglos, nous allons sélectionner tous les éléments de la tache urbaine qui croisent une zone agglo ou qui possèdent une superficie plus grande que 1 km², ceci afin de pouvoir prendre en compte de nouvelles grandes taches urbaines apparues depuis 2014.

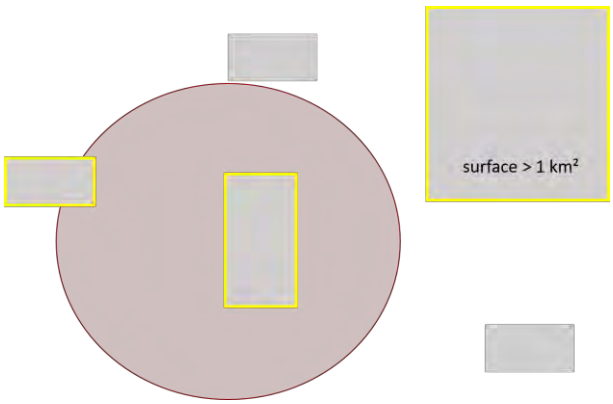


Figure 9 : Schéma de l'étape 2. La zone agglo est en rouge. Les taches urbaines grises sélectionnées en jaune sont celles qui intersectent la zone agglo ou qui ont une superficie supérieure à 1 km². Les taches urbaines non sélectionnées (juste en gris) ne correspondent pas à ces critères. (Crédits B. Thomas)

Etape 3 : sélection de la tache urbaine situé à moins de 200 m d'une zone agglo

Pour aller plus loin, nous allons également sélectionner les taches urbaines situées à moins de 200 m d'une zone agglo, ceci afin de prendre en compte une nouvelle fois l'urbanisation éparse du territoire néo-calédonien.

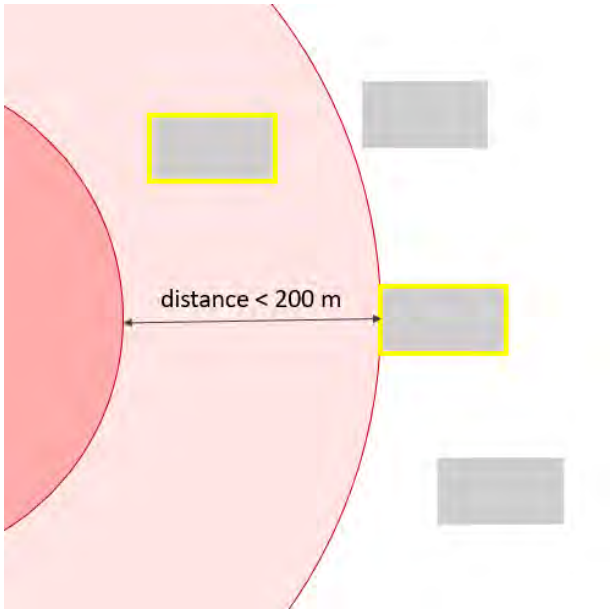


Figure 10 : Schéma de l'étape 3. La zone agglo est en rouge foncé. On ne choisit cette fois que les taches urbaines à moins de 200 m de la zone agglo (rayon d'action en rouge clair) : les taches urbaines grises sont sélectionnées en jaune. (Crédits B. Thomas)

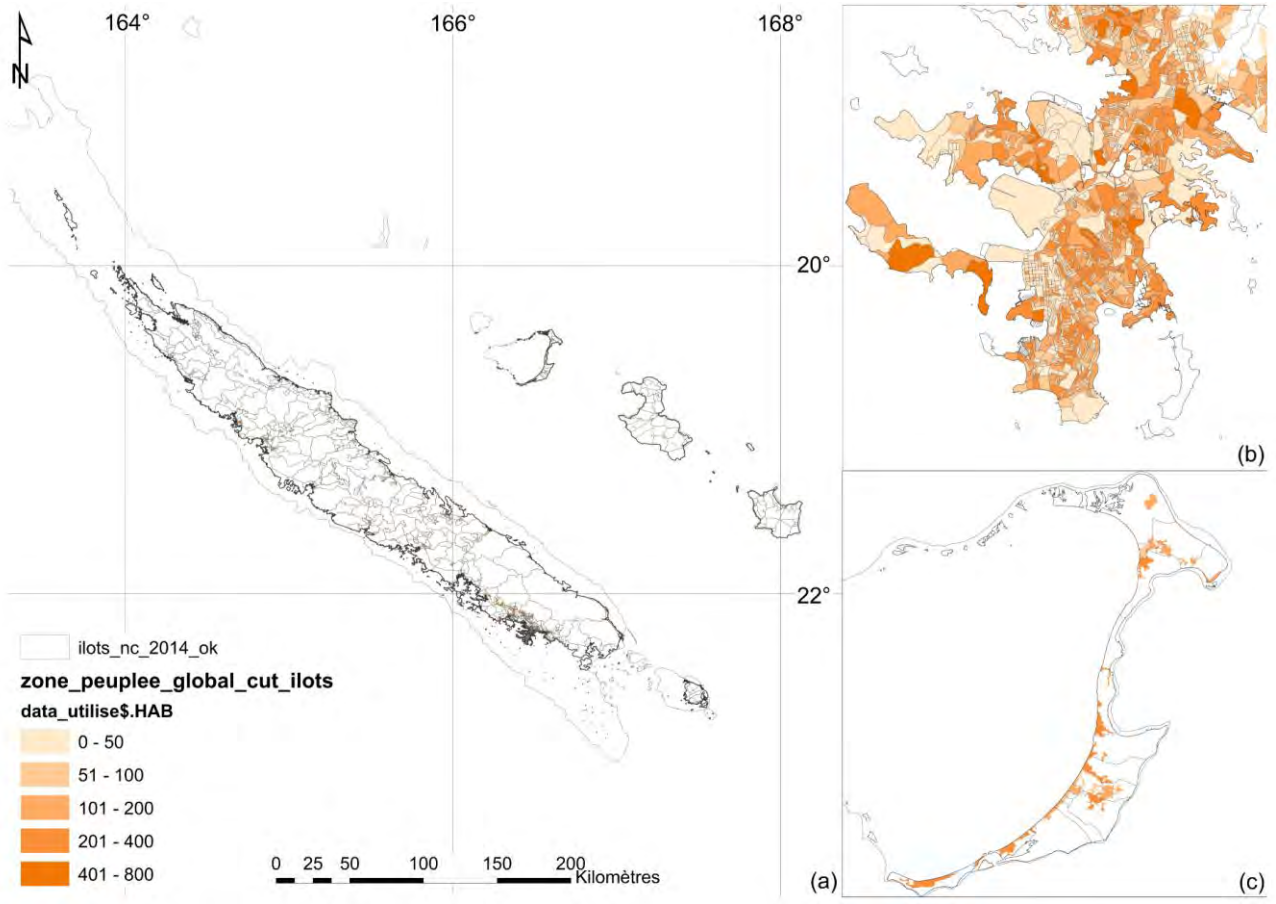
Etape 4 : sélection de la tache urbaine de superficie plus grande que 0,1 km²

La dernière sélection est réalisée en fonction de la superficie : nous prenons également en compte les taches urbaines de plus de 0,1 km², une taille qui en moyenne accueille au moins 1 personne vue la densité de 14 habs/km² **(Broustet et Rivoilan, 2015)**.

Cette méthodologie est particulièrement large sur la prise en compte de la tache urbaine et ajoute plus de 900 entités. Elle prend en compte la densité relativement faible du territoire et en particulier hors Grand Nouméa et l'éparpillement des habitations notamment au niveau des tribus **(Broustet et Rivoilan, 2015)**.

Pour finaliser la couche de zones peuplées, les entités conservées des zones agglos et les éléments sélectionnés dans la tache urbaine subissent la succession d'une dilatation de 50 m, d'une fusion et d'une érosion de 30 m (valeurs choisies suite à de nombreux tests). La couche SIG de zones peuplées comprend ainsi les zones agglos initiales et les éléments de la tache urbaine respectant les critères choisis dans la méthodologie : sa forme finale est simplifiée avec la bufferisation à 20 m (valeur choisie suite à de nombreux tests).

Une fois les zones peuplées sur tout le territoire néo-calédonien obtenues, nous allons pouvoir les analyser avec la couche SIG des îlots de population. Dans un premier temps, la couche SIG des zones peuplées est découpée en fonction des îlots (un îlot peut alors contenir plusieurs « morceaux » de zones peuplées). On attribue ainsi à un îlot, une ou plusieurs zones peuplées et donc une population. Le travail SIG permet de rapidement obtenir la surface et donc le pourcentage de zone peuplée par îlot. Toute la population de l'îlot est alors associée au pourcentage de surface de l'ilot pris par la zone peuplée (cf. Carte 9).

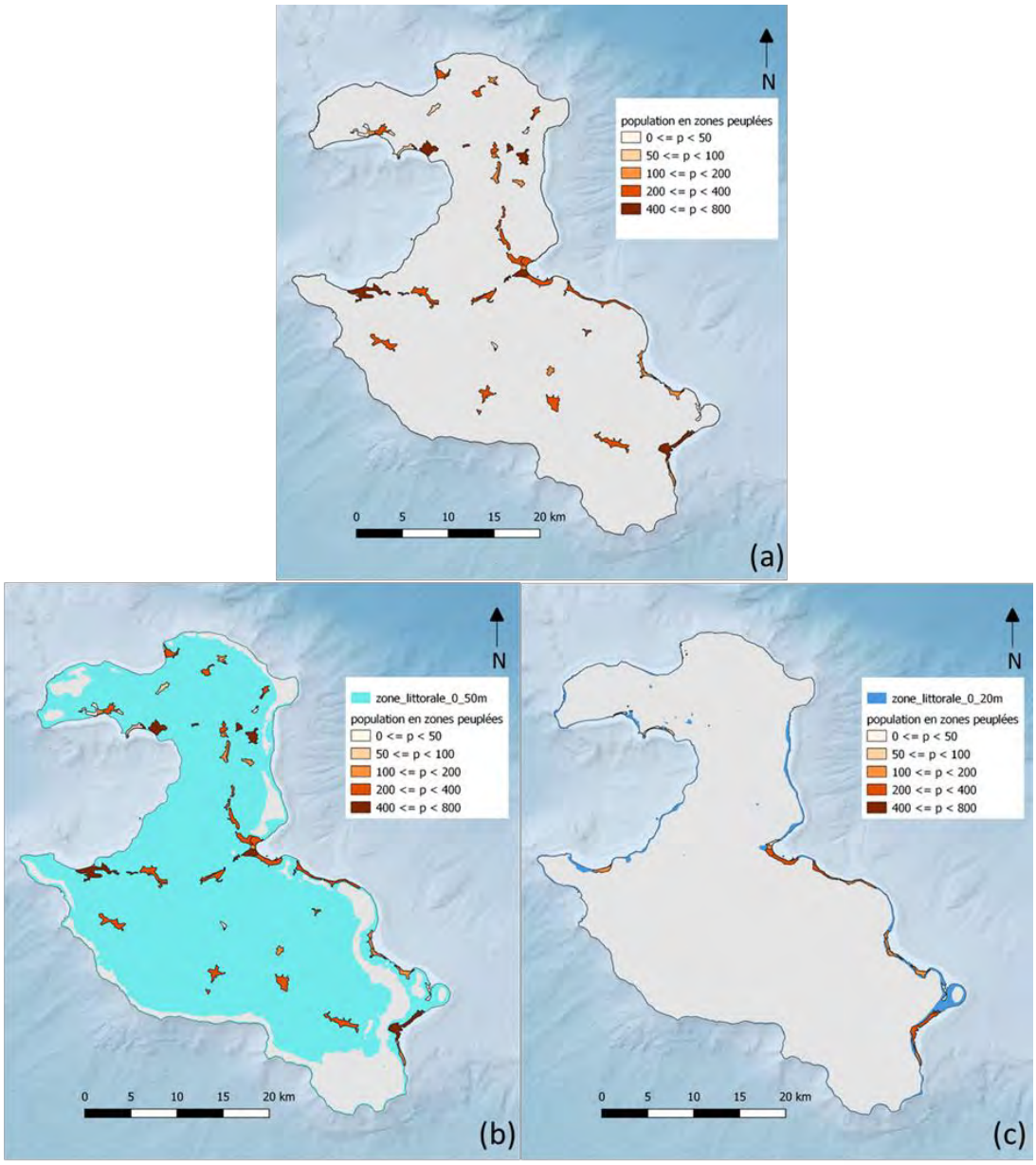


Carte 9 : Localisation des zones peuplées et représentation du nombre d'habitants en Nouvelle-Calédonie : (a) sur tout le territoire, (b) zoom sur le Grand Nouméa, (c) zoom sur Ouvéa, iles Loyauté (données ISEE, 2014). Les îlots de population sont représentés en gris sur le territoire. Les zones peuplées peuvent correspondre à un îlot dans le Grand Nouméa (b) ou bien à une partie de l'îlot sur le reste du territoire comme à Ouvéa par exemple (c). En effet, on remarque que les zones peuplées oranges ne couvrent pas entièrement les îlots (c). Les lignes grisées correspondent à la barrière de corail ***(Andréfouët et al., 2006)****. (Crédits B. Thomas)*

d – Méthodologie pour la cartographie finale

La dernière étape avant la cartographie est de découper les zones peuplées en fonction de la zone littorale. La subtilité de ce découpage est d'allouer à une zone peuplée découpée le pourcentage de population correspondant à la surface de la zone peuplée dans la zone littorale. Ainsi si une zone peuplée de taille 100 est découpée en un morceau de taille 70 compris dans la zone littorale et un morceau de taille 30 en dehors de la frange littorale, et qu'il y a 10 habitants dans la zone peuplée, alors on alloue 70 % de la population à la zone peuplée comprise dans la frange littorale, soit 7 personnes.

L'exemple ci-dessous se focalise sur l'île de Lifou, Iles Loyauté. Dans un premier temps, toutes les zones peuplées de l'île sont représentées en fonction du nombre d'habitants. Puis, la découpe de ces zones peuplées en fonction des zones littorales 50 m et 20 m permet d'estimer précisément le nombre d'habitants et leur localisation en zone littorale. Ainsi, près de 100 % de la population de Lifou vit à moins de 50 m d'altitude (9 266 sur 9 275) alors que seulement 26 % vit à moins de 20 m d'altitude (2 529 sur 9 275) (cf. Carte 10).



Carte 10 : Cartographie des zones peuplées à Lifou en fonction du nombre d'habitants : (a) sur tout le territoire, (b) dans la zone littorale à moins de 50 m d'altitude (bleu cyan) et (c) dans la zone littorale à moins de 20 m d'altitude (bleu foncé). (Crédits B. Thomas)

e - Discussion

Le travail avec les zones peuplées apporte de manière certaine une précision supplémentaire sur la localisation de la population. Ainsi, en zone littorale, on estime que 83 % de la population néo-calédonienne vit à moins de 50 m et on sait où ils vivent : il suffit de regarder les zones peuplées à moins de 50 m d'altitude. A moins de 20 m d'altitude, on obtient 53 % de la population et enfin, 32 % des habitants de Nouvelle-Calédonie vivent à moins de 10 m d'altitude. La Figure 11 ci-dessous montre le pourcentage d'habitant par commune et par zone littorale : avec les données exactes de population, il sert de base pour comprendre où sont les enjeux de population les plus forts. En effet, alors que 97 % des habitants d'Ouvéa vivent à moins de 10 m d'altitude, ce chiffre est réduit à 1 % voire 0 % pour des communes plus élevées comme Sarraméa, Farino et Mont-Dore. Des chiffres qui prêtent à réfléchir sur les conséquences d'une anthropisation trop forte du littoral : si un tiers de la population vit à moins de 10 m d'altitude, quand est-il de leur vulnérabilité face à l'aléa tsunami ?

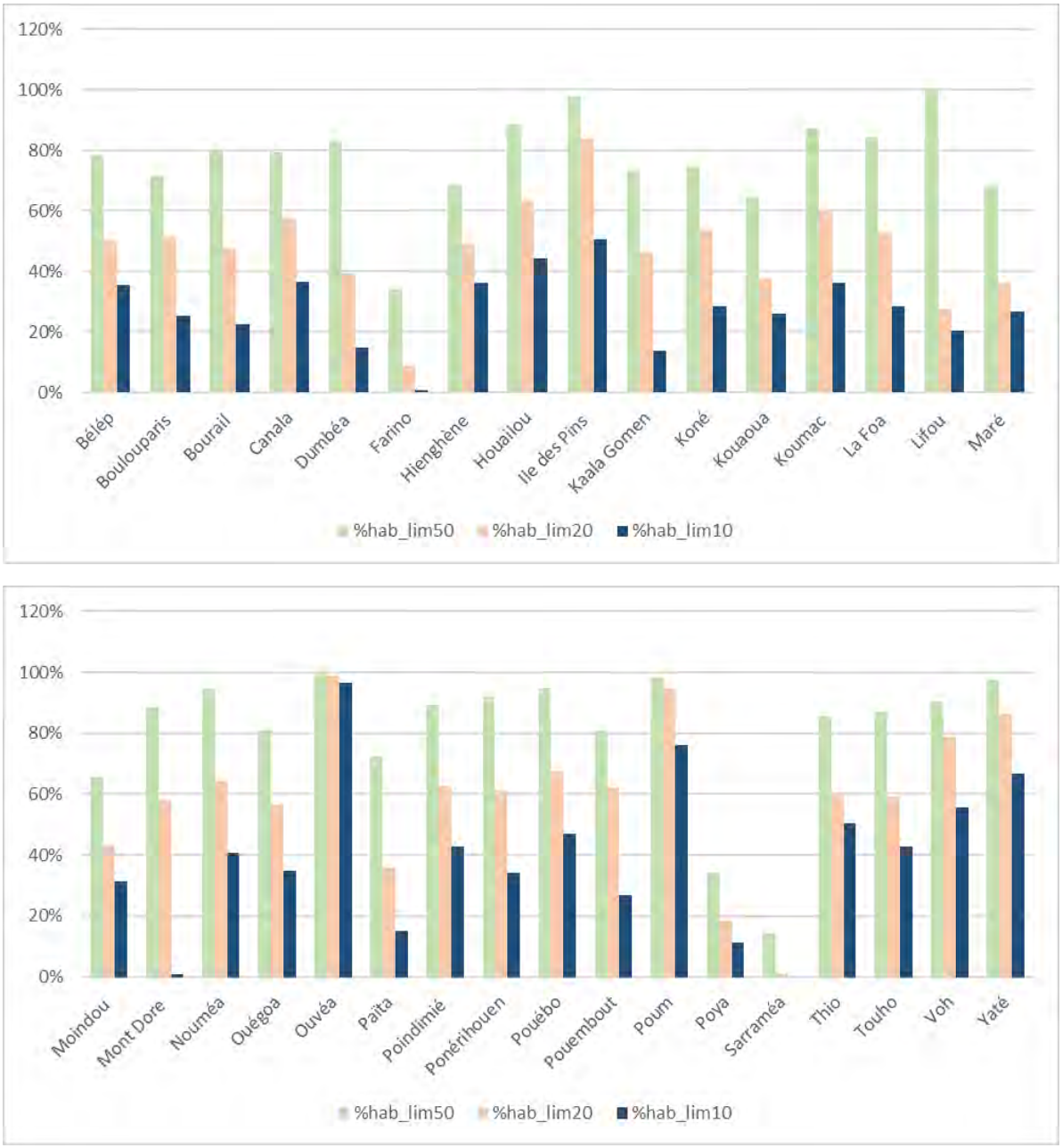


Figure 11 : Graphique des pourcentages d'habitants par commune et par zone littorale (50 m, 20 m et 10 m). (Crédits B. Thomas)

Cette méthodologie présente quelques limites sur le calcul précis de localisation de la population. En effet, aucune distinction n'est réalisée entre la journée (population globalement au travail) et la nuit (population généralement à la maison). Or, on considère l'ensemble du bâti dans la tache urbaine. Ainsi les zones industrielles et commerciales, souvent de grandes tailles, sont comptées comme tache urbaine, alors qu'elles sont « occupées » plutôt de jour. De même, plusieurs secteurs d'habitation à Nouméa peuvent être considérés comme presque vides la journée car les habitants sont au travail (par exemple, le quartier résidentiel de Magenta). Enfin, la pêche – à la fois métier, loisir et occupation journalière – très répandue sur l'île **(Sabinot et Lacombe, 2015)**, représente un enjeu crucial pour la protection de la population en cas de tsunami. Pour aller plus loin, lors d'un prochain recensement, il faudrait réaliser des statistiques précises de localisation des habitants le jour et la nuit.

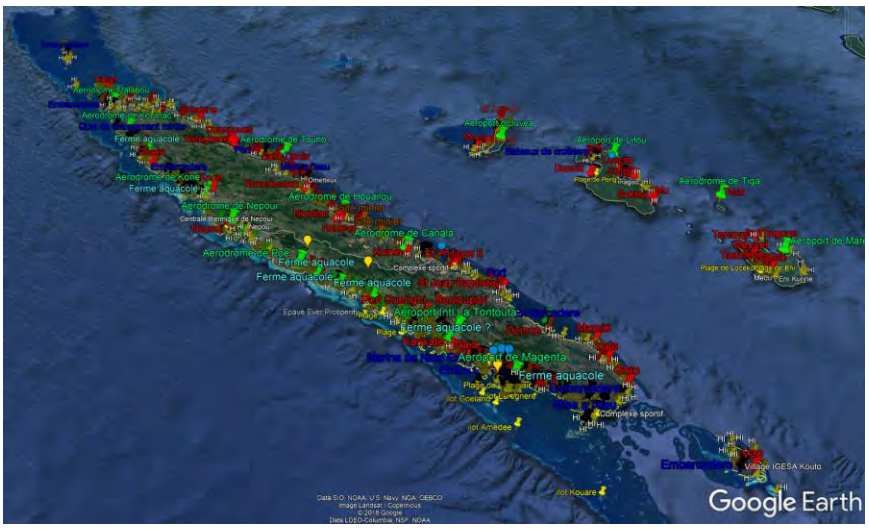
De plus, les routes ne sont pas prises en compte dans la tache urbaine. On considère qu'à part sur le Grand Nouméa et la route RT1 qui longe la côte ouest, les routes sont peu empruntées. Leur prise en compte serait-elle vraiment représentative ? Elle pourrait, avec l'analyse jour / nuit de localisation de la population, aider à bien plus de précision. Finalement, on considère dans cette estimation que les gens sont tout le temps proche d'un bâti peu importe lequel. Enfin, nous avons fait le choix arbitraire de calculer le nombre d'habitants en zone littorale, en fonction du pourcentage de zone peuplée sur la zone littorale. Cela crée une certaine incertitude sur le nombre d'habitants exact dans la zone peuplée comprise en zone littorale. En effet, on pourrait imaginer qu'une zone peuplée de 100 habitants, découpée en deux surfaces égales dont l'une comprise en zone littorale, ne contient que 10 habitants dans l'un des morceaux contre 90 dans l'autre.

Malgré ces limites notables, cette étude souligne comment à partir d'un simple recensement de population, il est possible d'avoir une bonne estimation de la localisation de la population sur le territoire néo-calédonien. Le travail sur les zones peuplées pourrait être affiné en fonction de paramètres économiques et touristiques et en fonction des jours de la semaine si les données relatives au mouvement de la population étaient disponibles.

2.3 Enjeux bâtis : localiser les infrastructures sur la frange littorale

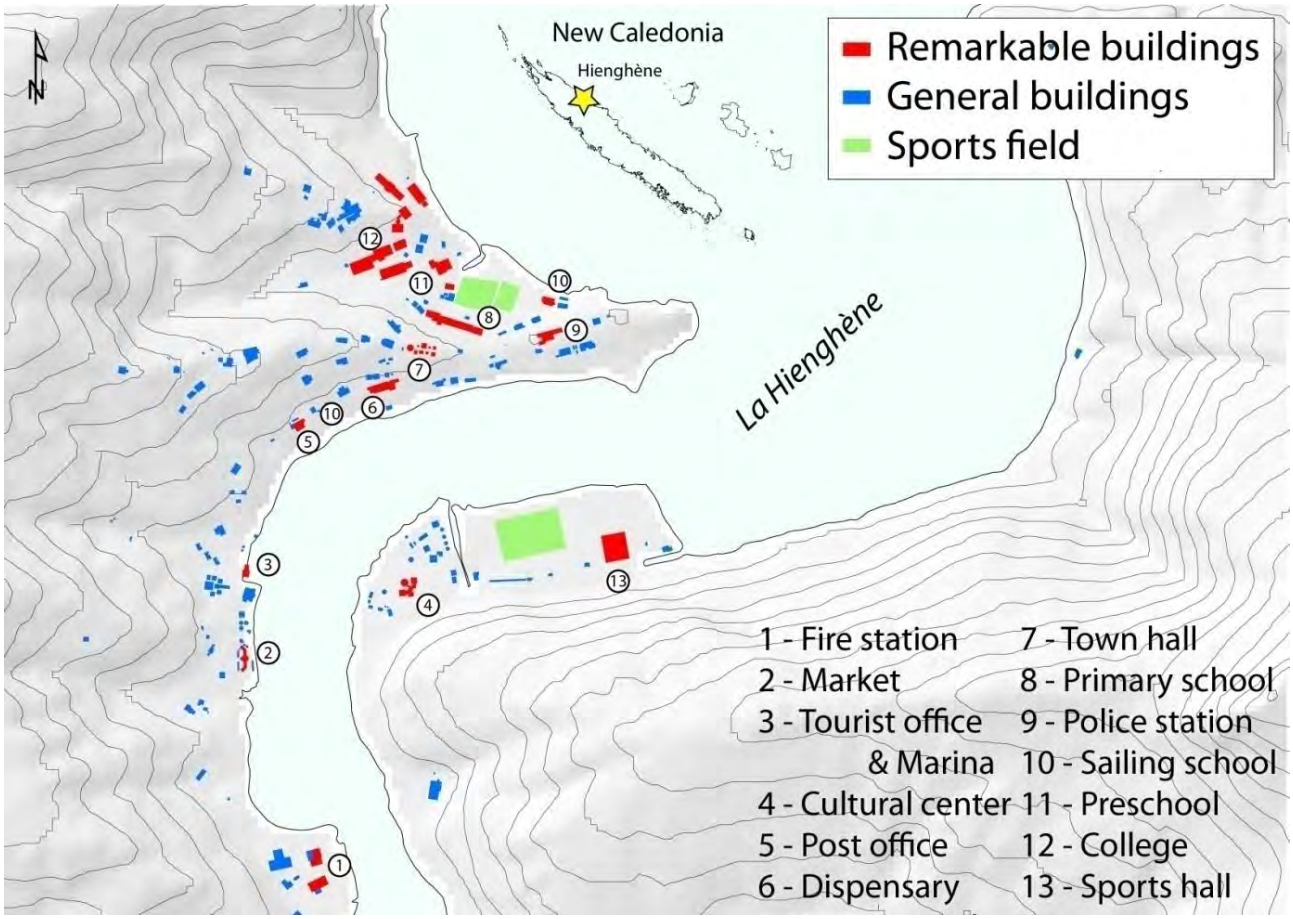
Si la Nouvelle-Calédonie ne possède pas une trop forte densité de population comparée à d'autres territoires outre-mer français (14 hab./km² comparé aux 334 hab./km² de La Réunion ou aux 248 hab./km² en Guadeloupe[15]), elle reste un territoire aux enjeux bâtis nombreux et variés tant la population est répartie sur l'ensemble de l'archipel. Que ce soit les infrastructures gouvernementales, les équipements publics, les industries, les centres de soins et de secours, les ports, aéroports et gares routières et les équipements éducatifs, une multitude d'enjeux isolés se distinguent sur la carte néo-calédonienne. Une capture d'écran des enjeux côtiers pointés sur Google Earth souligne la nombre important d'enjeux présents en zone littorale (cf. Carte 11).

[15] www.insee.fr



Carte 11 : Ensemble des enjeux sur le littoral de Nouvelle-Calédonie. (Crédits J. Roger)

De plus, la DITTT délivre dans la BD TOPO© IGN une donnée sur le bâti remarquable : il s'agit des infrastructures accueillant du public, à but de service ou à caractère industriel ou commercial (cf. Carte 12). Un travail d'assemblage des éléments de la même entité a été réalisé pour simplifier le fichier : le but est de regrouper en une seule entité de la couche SIG, tous les bâtiments d'un même collège par exemple.



Carte 12 : Localisation du bâti à Hienghène, Nouvelle-Calédonie, sur un fond topographique (données Géorep, 2019). Trois types de bâtiments sont identifiés : les rouges sont les établissements publics listés de 1 à 13, les bleus correspondent aux habitations et les verts identifient les infrastructures sportives. Les contours isolignes d'altitude sont indiqués tous les 20 m. L'étoile jaune localise le village de Hienghène en Nouvelle-Calédonie. ***(Thomas et al., in prep.)***

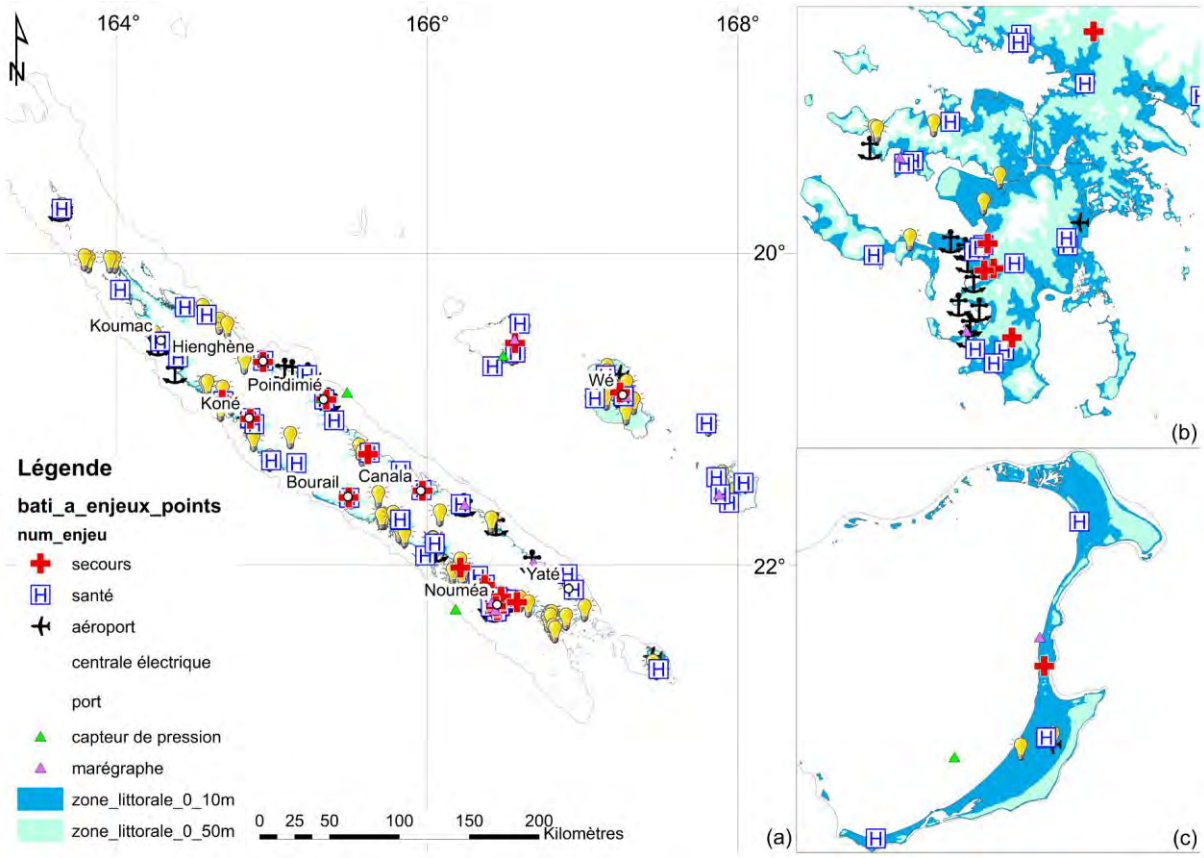
Néanmoins, malgré ces deux bases de données, il reste beaucoup de lacunes comme pour les centres de dialyse (un enjeu important et très présent en Nouvelle-Calédonie) et les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Enfin, les tables attributaires des deux bases n'étant pas identiques, il a fallu re-déterminer des attributs pour définir le nom de l'enjeu, son type et sa localisation. La DSCGR dans ce cadre va s'atteler à répertorier dans un même fichier l'ensemble des enjeux présents sur le territoire avec un code adéquat pour facilement différencier les éléments qui nous intéressent (Doriane Brehe, DSCGR, communication personnelle). En attendant, nous avons créé une liste non exhaustive et personnelle des enjeux. Pour cela, nous sommes restés sur les bases de données existantes. La fusion des données pointées sur Google Earth avec celles de la BD TOPO© IGN, suivie d'un tri sur le type d'enjeu a permis de créer une couche SIG complète. Ces vecteurs points localisent les enjeux phares pour le projet tsunami. De cette liste construite et développée au cours du stage, on obtient l'ensemble des bâtis considérés comme enjeux pour leur rôle d'aide au secours et de soins, comme liaisons terrestre, aérienne et maritime, comme enjeu énergétique, d'importance administrative, éducative et pour les loisirs (cf. Tableau 1).

N°	*Type de données*	*Nombre d'éléments*
0	Enseignement (école, collège, lycée et université)	444
1	**Sécurité civile (secours et pompiers)**	**18**
11	Sécurité civile (gendarmerie et police)	48
2	**Santé (hôpital, dispensaire et centre de dialyse)**	**70**
22	Santé (annexe hôpital et dispensaire)	36
3	**Aéroport**	**13**
4	**Energie (centrale électrique et centre de pétrole)**	**72**
5	**Gare maritime et Port**	**22**
6	Gare routière	1
7	Infrastructure sportive	96
77	Marché communal	20
8	Infrastructure sociale (association et maison de retraite)	42
88	Infrastructure pour la culture	51
9	Administration	322
99	Administration coutumière	246

Tableau 1 : Nomenclature des types d'enjeux présents en Nouvelle-Calédonie. Les enjeux indiqués en gras sont présents sur la cartographie suivante et sont ainsi considérés, dans le cadre de ce rapport de stage, comme les enjeux forts face à un aléa de submersion marine. (Crédits B. Thomas)

La cartographie (cf. Carte 13) de ces éléments clés permet d'identifier la localisation des enjeux forts et leur présence en zone inondable. Un travail plus approfondi doit être mené quand la liste des enjeux sera définitive : il s'agira d'identifier pour chaque enjeu son niveau de vulnérabilité face à l'aléa, son rayon impacté (cas d'un hôpital en zone littorale à moins de 5 m par exemple) ou son rayon d'action (pour les secours notamment).

Enfin, il est intéressant de donner quelques chiffres sur le nombre de ces bâtis en zone littorale. La Figure 12 montre en bleu foncé que la moitié des enjeux bâtis sont situés à moins de 12 m d'altitude et plus d'un quart d'entre eux à moins de 5 m. Le focus sur les centre de secours et les casernes de pompiers (cf. en orange sur Figure 12) souligne que la moitié sont à moins de 10 m d'altitude. Ces données pourraient servir plus tard à étudier si l'emplacement de « l'enjeu bâti » est judicieux compte tenu du risque : une caserne de pompier doit pouvoir être active en cas de tsunami sans être inondé par exemple.



Carte 13 : Identification des enjeux bâtis de secours, de santé, d'énergie des aéroports et ports en Nouvelle-Calédonie : (a) sur tout le territoire, (b) zoom sur le Grand Nouméa, (c) zoom sur Ouvéa, iles Loyauté (données Géorep, 2019). (Crédits B. Thomas)

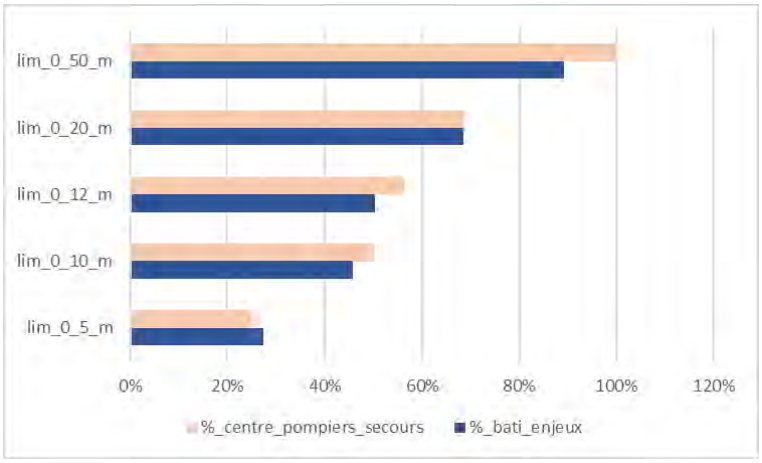


Figure 12 : Graphique des pourcentages de bâti à enjeux en zone littorale (bleu foncé). Zoom sur les casernes de pompiers et les centres de secours en orange. (Crédits B. Thomas)

Bilan

Le panorama réalisé sur la cartographie des enjeux en Nouvelle-Calédonie souligne la possible pression engagée par l'aléa submersion marine sur la zone littorale. La population ainsi que les activités sont majoritairement localisées dans la zone littorale. Nous avons pu déterminer les zones à forts enjeux de population et d'infrastructures sur un territoire résolument tourné vers l'océan. Il s'agira dans un travail futur de corréler ces zones à enjeux avec la cartographie de l'aléa, on saura alors évaluer le risque.

3 Cartographie de l'aléa tsunami

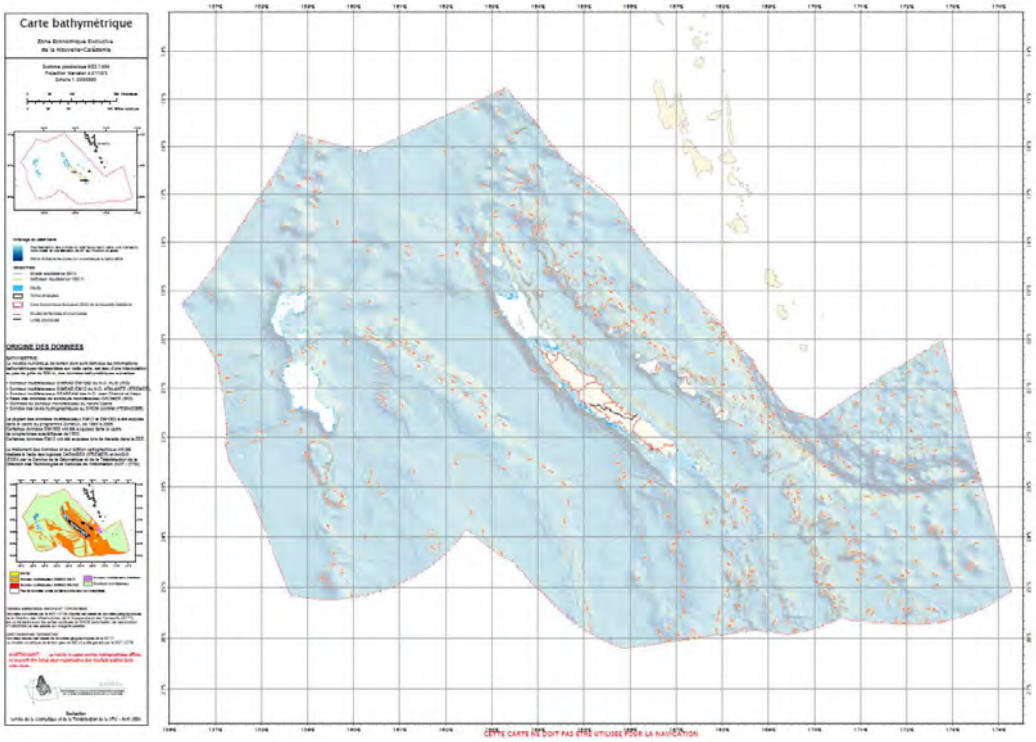
3.1 Le travail en amont de la cartographie de l'aléa

Pour modéliser les tsunamis, la première donnée nécessaire est le relief du fond marin : il faut représenter au mieux la bathymétrie et la topographie du territoire pour se rapprocher au plus près de la réalité topographique. Dans un second temps, il faut obtenir et utiliser les données sur la source du tsunami pour modéliser sa propagation dans l'océan et son arrivée près des côtes. Ce travail ne fait pas initialement partie du sujet mais a demandé une forte implication de ma part pour le tri et l'assemblage des données bathymétriques.

3.1.1 Pourquoi une mise à jour du MNT marin et terrestre de Nouvelle-Calédonie ?

Pour avoir une idée précise de comment un tsunami se propage dans l'océan et le long des côtes et ainsi cartographier l'aléa, il faut pouvoir modeler le relief des fonds marins jusqu'au bord du rivage. C'est le rôle du MNT, le modèle numérique de terrain, qui reproduit de manière simplifiée le relief du territoire néo-calédonien à la fois marin et terrestre. Concrètement, il s'agit par exemple d'un jeu de données raster dans lequel chaque pixel contient une valeur d'altitude mesurée (par sonde multifaisceaux par exemple) ou estimée (par interpolation).

Le dernier MNT (cf. Carte 14) réalisé en Nouvelle-Calédonie date de 2009 et est distribué sous la forme d'un atlas bathymétrique par le Service de la Géomatique et de la Télédétection (SGT) de la Direction des Technologies et des Services de l'Information (DTSI). La résolution de ce MNT est de 500 m et correspond à la combinaison de plusieurs jeux de données d'origines et de résolutions diverses. Sont notamment incluses, les données du programme Zone Economique de Nouvelle-Calédonie (ZoNéCo) d'évaluation des ressources marines de l'archipel **(Grandperrin et al., 1997)**, qui s'intéressait à la topographie des fonds marins et utilisait des sondeurs multifaisceaux couvrant des largeurs équivalentes à « sept fois la profondeur ».



Carte 14 : Bathymétrie de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie (données DTSI, 2009).

a - Ajouter de nouvelles données bathymétriques

L'atlas bathymétrique à 500 m de 2009 présente à la base de nombreux vides entre le passage des bateaux de sondeurs multifaisceaux (cf. zones vertes sur la carte d'origine des données, cf. Carte 14). Ils sont comblés par des jeux de données bathymétriques mondiaux tels que GEBCO[16] ou ETOPO1[17] qui donnent une idée générale des fonds marins à une plus petite échelle mais de moins bonne résolution. Pour améliorer la résolution de ces zones, il serait alors intéressant de trouver de nouvelles données bathymétriques acquises depuis 2009 pour combler les vides.

Les lacunes de données dans le lagon et en bordure de côte sont particulièrement nombreuses (cf. Figure 13) alors que ce sont justement ces zones qui nous intéressent dans le cadre de la modélisation des tsunamis. En effet, lorsque la profondeur d'eau décroît (pente forte des fonds marins en bordure de côte), la vitesse du tsunami décroît également mais par conservation de l'énergie, l'amplitude augmente, d'où le terme initial de « vague du port » dans la littérature japonaise **(Hébert et al., 2005)**. C'est l'effet de « wave shoaling » qui peut mener au déferlement des vagues **(Roger, 2011)**. Or, les données GEBCO constituent certes une référence dans la bathymétrie mondiale mais la résolution est seulement de 900 m, idem dans le lagon. Il faut pouvoir assurer la meilleure résolution en tout point du MNT afin d'obtenir un modèle le plus précis des fonds océaniques.

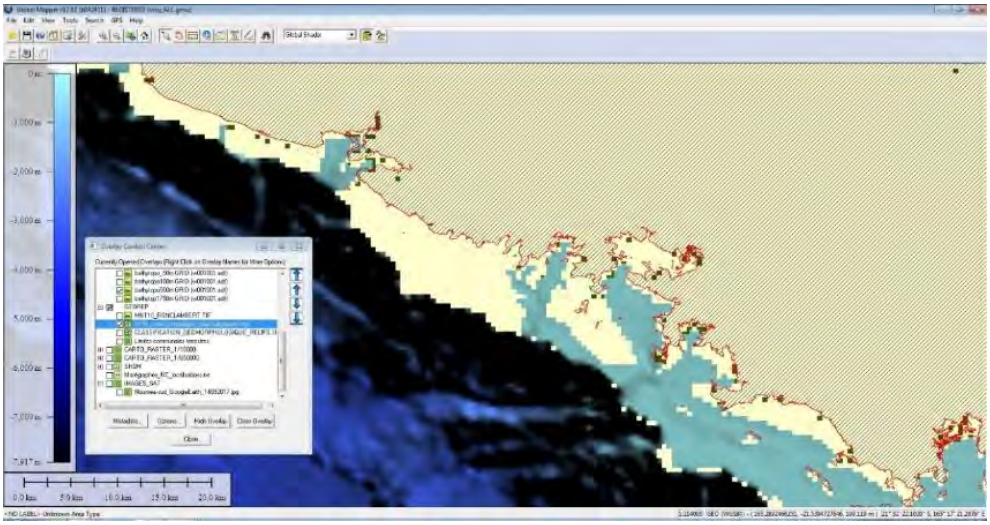


Figure 13 : Zoom sur la région de Bourail montrant le manque de couverture bathymétrique dans le lagon et les estuaires (imprimé d'écran Global Mapper, données du MNT 2009). Les données en bleu sont des données bathymétriques. Les terres émergées correspondent à la zone marron entourée d'un liseré rouge. Ainsi, le manque de données sont visibles dans les parties en jaune pastel. (Crédits J. Roger)

[16] Les données GEBCO (General Bathymetric Chart of the Ocean) sont une référence de la bathymétrie mondiale. Elles sont opérées conjointement par la Commission Intergouvernementale d'Océanographie (IOC de l'UNESCO) et l'Organisation Hydrographique Internationale (IHO). La grille se base essentiellement sur des mesures gravimétriques par satellite et de campagnes de levés bathymétriques (https://gebco.net/).

[17] Les données ETOPO sont des modèles globaux du relief planétaire produites et distribuées par le National Geophysical Data Center (NGDC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). ETOPO1 date de 2008 et est de résolution 2 km.

b - Réaliser un meilleur lissage des données entre elles

Le second point à noter sur le MNT de 2009 concerne le manque de lissage des données dans certaines zones. De nombreuses marches d'escalier sont observées, soulignant un décalage altimétrique entre deux jeux de données. Les profils bathymétriques ci-dessous témoignent également d'une exagération des reliefs sous forme de « sauts » bathymétriques (cf. Figure 14) qui peuvent s'avérer être une source supplémentaire d'incertitude lors de la modélisation des tsunamis.

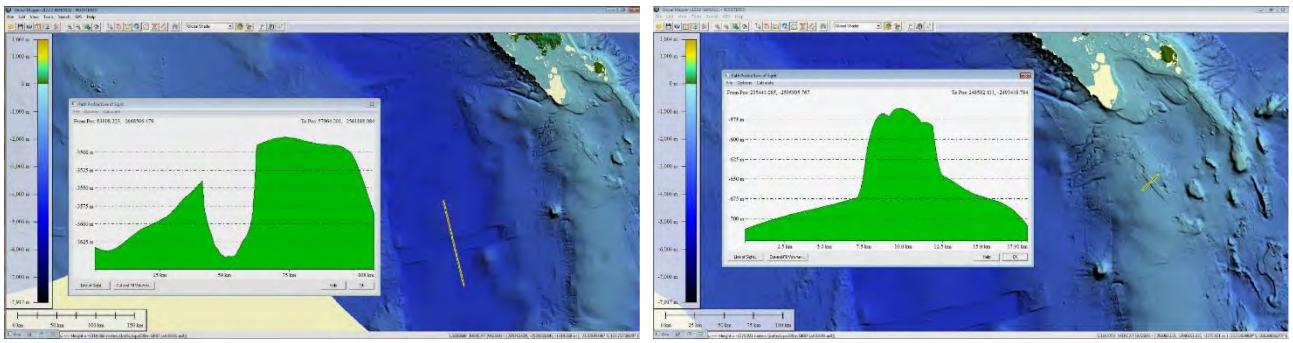


Figure 14 : Localisation de deux profils bathymétriques sur la zone de Bourail (lignes jaunes) à cheval sur différents jeux de données bathymétriques à 500 m, 100 m, 50 m et 25 m (imprimé d'écran Global Mapper). (Crédits J. Roger)

Finalement, l'objectif est de mettre à jour le MNT existant sur la ZEE de Nouvelle-Calédonie avec une résolution croissante à l'approche des côtes : le but principal est d'avoir une couverture totale à 100 m de résolution dans le lagon. De sa qualité dépendra la précision de la modélisation du tsunami.

3.1.2 Du jeu de données bathymétriques et topographiques au MNT

La première étape pour créer ou constituer une mise à jour du MNT est de chercher, trouver, ordonner et classer les données bathymétriques et topographiques du territoire. Avant mon arrivée en stage, la plupart des données avaient été récupérées après concertation avec les différents acteurs en Nouvelle-Calédonie susceptibles d'avoir des données sur la bathymétrie (par exemple, le SHOM, l'IFREMER, etc.). Cette étape a pris néanmoins presque un an complet à aboutir et encore aujourd'hui, de nouvelles données émergent sans jamais avoir été citées auparavant.

En France, le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) gère ces données. L'article de loi L413-1 du Code minier créé par ordonnance n°2011-91 du 20 janvier 2011, souligne que « *les renseignements intéressant la sécurité de la navigation de surface […] et recueillis à l'occasion de travaux exécutés en mer tombent immédiatement dans le domaine public. Ces renseignements doivent être communiqués, dès leur obtention, pour ce qui concerne leurs missions respectives, à la direction de la météorologie nationale et au service hydrographique et océanographique de la marine, lequel peut, en outre, se faire remettre sans délai les renseignements et documents intéressant la sécurité de la navigation sous-marine ainsi que la morphologie et la nature superficielle du sol marin.* »[18]. Ainsi, une convention particulière entre le SHOM et l'IRD Nouvelle-Calédonie a été mise en place pour que nous puissions d'abord

[18] https://legifrance.gouv.fr

récupérer les données existantes qui ont une autorisation de diffusion. Puis, il s'agira de leur rendre un MNT à jour de la ZEE de Nouvelle-Calédonie.

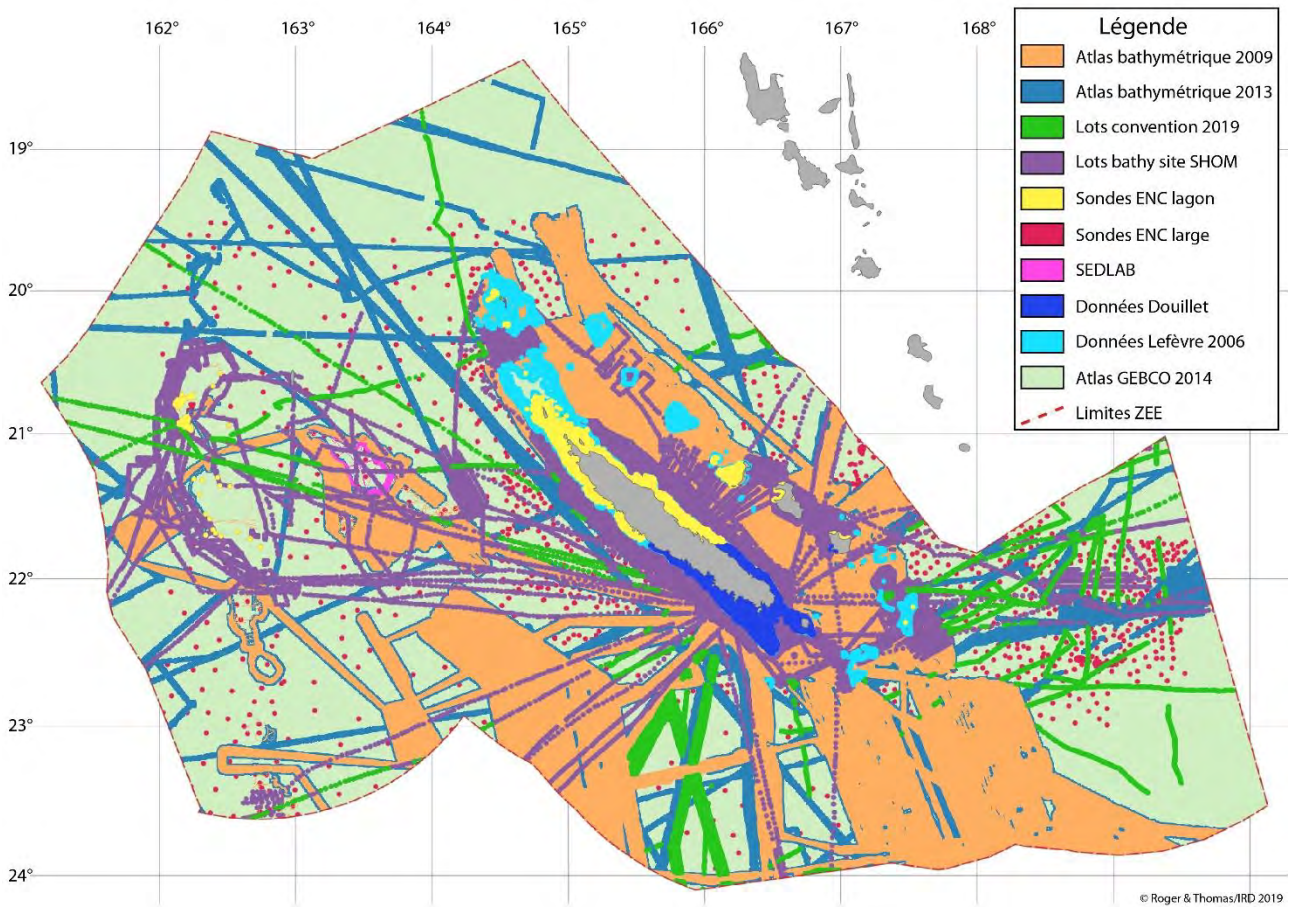
L'ensemble des données sur lesquelles nous travaillons sont décrites dans le tableau ci-dessous (cf.

Tableau 2) associées à leur date d'émission, leur résolution et leur volume. Le travail est réalisé sur deux ordinateurs équipés chacun d'une mémoire vive de 64 Go et d'un processeur 6 cœurs, les logiciels SIG utilisés sont ArcGIS, QGIS et Global Mapper selon leur capacité à ouvrir, visualiser et travailler sur les données. Cette étape est complexe tant le jeu de données est important et les capacités des logiciels limitées (installés en 32 bits sur des ordinateurs à 64 bits).

Données (juillet 2019)	***Date de mise à jour***	***Résolution***	***Volume***
Bathymétrie			
GEBCO	2014	900 m	3,0 Go
ETOPO1	2008	2000 m	0,5 Go
ZoNéCo	2009	50 m	5,0 Go
Lots Bathy convention SHOM	2019	Fine et variable	22,0 Go
Sondes ENC SHOM	2019	Fine et variable	1,0 Go
Lots Bathy SHOM anciens publics		Fine et variable	30,0 Go
ECHOLAG (données IFREMER)		Fine et variable	0,1 Go
GMRT	Depuis 1992	Fine et variable	1,0 Go
Données Pascal Douillet (digitalisation manuelle de cartes marines)		--	1,0 Go
Cartes marines (scans géoréférencés)		--	2,0 Go
Topographie			
SRTM	2014	30 m	50,0 Go
BD ALTI (Géorep)	2017	10 m	10,0 Go
Bornes géodésiques	2016	--	0,1 Go
Autres données			
Atlas bathymétrique 2009	2009		
MNT 2013 (DTSI)	2013		
MNT Jérôme Lefèvre	2006	100 m	3,0 Go
BD ORTHO (DTSI)			--
BD PHOTO (DTSI)			--
Récifs coralliens (Andréfouët et al., 2006)	2018	--	1,0 Go

Tableau 2 : Liste des jeux de données bathymétriques et topographiques utilisés pour la mise à jour du MNT Nouvelle-Calédonie.

L'objectif est de trier ce jeu de données bathymétriques et topographiques. Le volume est une information importante : beaucoup de données se recoupent et fournissent des informations de plus ou moins bonne résolution au même endroit. Ces éléments doivent ainsi être comparés entre eux pour ne garder que la meilleure résolution en tout point : c'est le principe appliqué dans la carte ci-dessous où on ne conserve que la donnée de meilleure résolution en tout point de la carte (cf. Carte 15). Il faut également vérifier le référentiel pour chaque donnée : on travaille en référentiel géodésique WGS84 avec une projection géographique. Enfin, le calage altimétrique à l'aide des bornes géodésiques est une information importante pour assurer une jonction fiable entre les jeux de données.



Carte 15 : Assemblage de tous les jeux de données en fonction de leur résolution. (Crédits B. Thomas et J. Roger)

Il est ensuite nécessaire d'identifier les zones tampons entre deux jeux de données différents pour assurer la jonction fiable (notamment la jonction terre / mer). Puis des méthodes d'interpolation et d'extrapolation[19] sont utilisées pour uniformiser le MNT.

L'assemblage des données en vue de créer le MNT n'est, à ce jour, pas encore terminée, tant ce travail nécessite du temps, des calculs lourds et de la patience pour vérifier la jonction entre les différents jeux de données. Une fois ce MNT réalisé, pour répondre à la fois aux besoins du code de modélisation utilisé et aux besoins de la DSCGR, des grilles de modélisation seront créées. Une fois ce jeu de grilles prêt, la liste des sources sismiques que l'on souhaite tester doit être élaborée : ces sources pouvant engendrer des tsunamis en Nouvelle-Calédonie. Dans le cadre du stage, nous avons utilisé une liste existante fournie par la NOAA.

3.1.3 Du MNT à la carte d'aléa tsunami : aparté sur la modélisation numérique des tsunamis

Le jeu de données bathymétriques et topographiques sert également de support pour réaliser une grille de modélisation de la propagation des tsunamis. Assemblées avec des informations supplémentaires sur le trait de côte, les données sont interpolées et extrapolées pour créer une grille uniforme avec un pas d'espace régulier entre chaque point. Cette grille est entièrement connue et sert alors de base pour lancer les calculs de propagation. Plusieurs méthodes existent pour obtenir cette grille. On peut tout d'abord retenir la plus connue, l'interpolation linéaire qui

[19] Les méthodes d'interpolation et d'extrapolation sont des méthodes mathématiques de construction d'une courbe à partir de points existants pour déterminer la valeur de points inexistants.

utilise la fonction affine pour déterminer les valeurs de points inexistants. Dans le cadre du projet TSUCAL et du jeu de données très irrégulier (mélange de données très denses des lots bathymétriques du SHOM avec des données peu denses GEBCO), la grille a été obtenue par krigeage. Cette méthode locale considère que les objets voisins dans l'espace tendent à posséder des caractéristiques similaires **(Gratton, 2002)**.

La modélisation d'un phénomène physique est sa représentation dans un autre système plus facile à étudier. Il faut poser auparavant les hypothèses de travail et se baser sur des principes fondamentaux mathématiques et physiques.

Modéliser un tsunami revient donc à représenter le comportement de la surface océanique suite à un séisme en profondeur. La modélisation permet ainsi d'anticiper le comportement de la génération du tsunami par un séisme à sa propagation jusqu'à ses conséquences sur la côte. Ainsi, la modélisation se base notamment, entre autres données géologiques, sur le MNT marin et terrestre (pour l'inondation).

Le modèle est validé par des études de cas : il s'agit de représenter, de la manière la plus juste possible, un tsunami qui a eu lieu par le passé et dont on a des données de propagation et de hauteur de vague. Le tsunami du 5 décembre 2018 est un cas d'étude idéal puisque les données sont récentes (enregistrements marégraphiques) et la propagation bien connue **(Roger et al., *in prep.*)**. Enfin, ce n'est qu'une fois ces tests effectués que des modélisations systématiques correspondantes à chacun des scénarii vont être effectuées à leur tour. Puis, l'objectif est de proposer un ensemble de scénarii de tsunamis pour analyser leur impact sur la côte.

Dans le cadre du projet TSUCAL, on s'intéresse ici en particulier à la modélisation numérique qui consiste à résoudre des équations mathématiques décrivant des processus physiques (propagation du tsunami) au cours du temps (calcul par pas de temps). Dans le cadre du projet TSUCAL, le code de modélisation numérique utilisée est le code Method of Splitting Tsunami (MOST)[20] développé par Titov[21] et Synolakis[22]. MOST réalise une modélisation dynamique qui simule d'abord la génération d'un tsunami (séisme), puis sa propagation dans l'océan et enfin son interaction à la côte avec la représentation des run-up et des inondations **(Roger, 2011)**. C'est un code robuste déjà utilisé par le PTWC ainsi que d'autres organismes de recherche.

Premiers tests de modélisation pour pouvoir cartographier l'aléa

Pour modéliser un tsunami, il faut pouvoir avoir un MNT de bonne résolution **(NOAA, 2006)**. Or, comme décrit précédemment, le MNT est toujours en cours de réalisation. Afin de présenter des éléments intéressants sur la cartographie d'aléa à la DSCGR ainsi que pour l'étude présente, nous avons réalisé au cours du stage, une phase test sur la modélisation à partir d'une grille bathymétrique (combinaison du MNT 2009 et de données GEBCO entre autres).

La phase test consiste à engendrer une douzaine de simulations de séismes à l'origine de tsunami. Les paramètres de ces séismes sont proposés par la NOAA : ils sont de magnitude 7.5. La simulation (cf. Figure 15) présente le résultat au bout de deux heures de propagation de l'onde. Chaque pixel contient une information sur la hauteur maximale atteinte, ce qui permet d'étudier la hauteur maximale de l'onde en tout point de la côte néo-calédonienne.

[20] https://nctr.pmel.noaa.gov/model.html
[21] NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL)
[22] University of Southern California

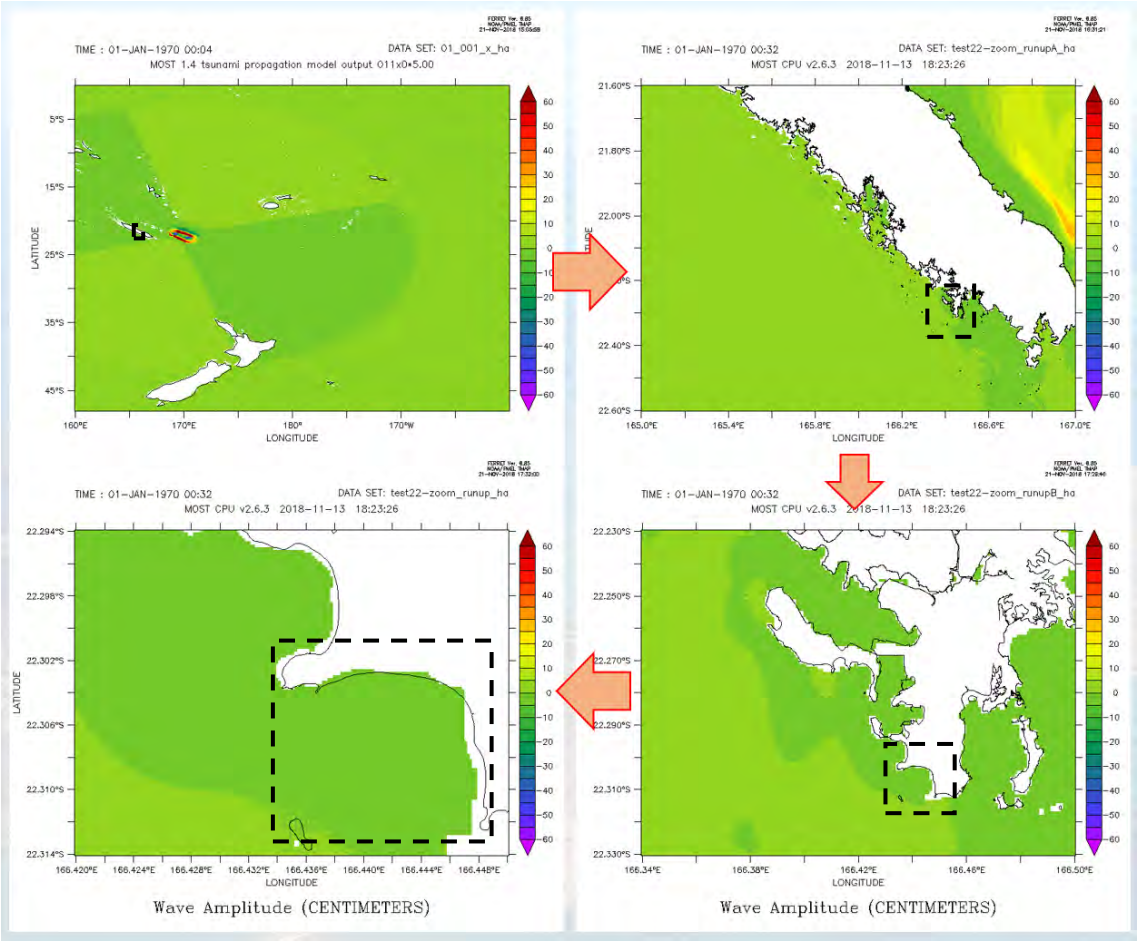


Figure 15 : Simulation de la propagation d'un tsunami de magnitude 7.5 au bout de 2 h de propagation. Le zoom est réalisé sur la Baie des Citrons à Nouméa. (Crédits J. Roger)

La modélisation ci-dessus, réalisée avec MOST, montre comment une source régionale (Vanuatu nord) peut avoir une répercussion sur le littoral ouest de la Nouvelle-Calédonie : le zoom est réalisé sur la Baie des Citrons à Nouméa.

Bilan

Le travail en amont à la cartographie de l'aléa a poursuivi l'objectif de modéliser la propagation de plusieurs scénarii de tsunami en Nouvelle-Calédonie. Pour cela, il faut obtenir un MNT fiable et précis, notamment dans le lagon et le long des côtes où les tsunamis peuvent durement impacter le littoral. Le MNT se base sur un jeu de données bathymétriques et topographiques le plus complet possible, provenant de sources variées et certifiées pour la précision de leur mesure. Ce travail n'est à ce jour pas terminé : le traitement des données et leur assemblage étant particulièrement complexe et long. Néanmoins, afin d'atteindre l'objectif de réalisation d'une carte d'aléa tsunami, nous allons travailler avec les premiers tests de modélisation.

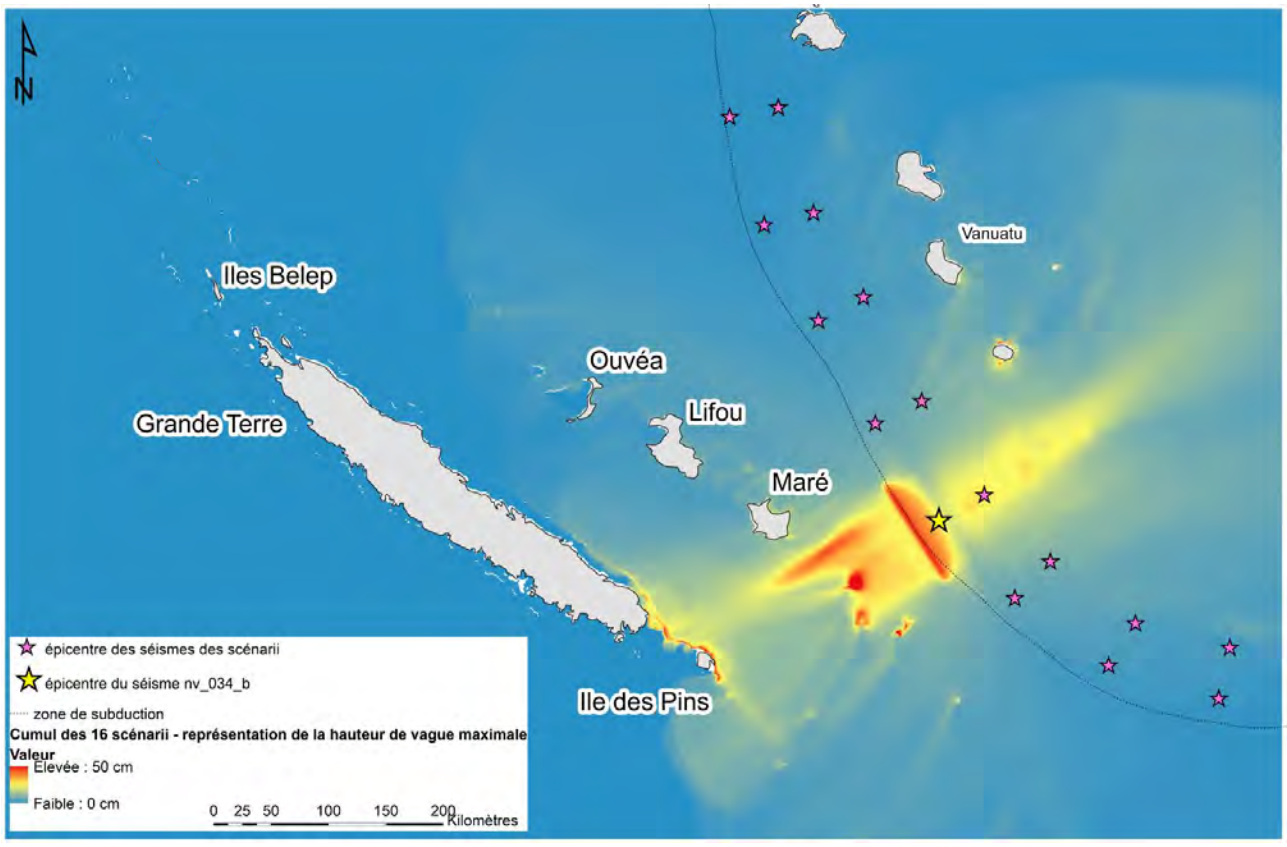
3.2 Cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie

La cartographie de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie est l'objectif phare de ce projet et a pour ambition de représenter, comme l'Australie a pu le faire (cf. Carte 4), la hauteur maximum possible de tsunami en tout point de la côte.

3.2.1 Méthodologie

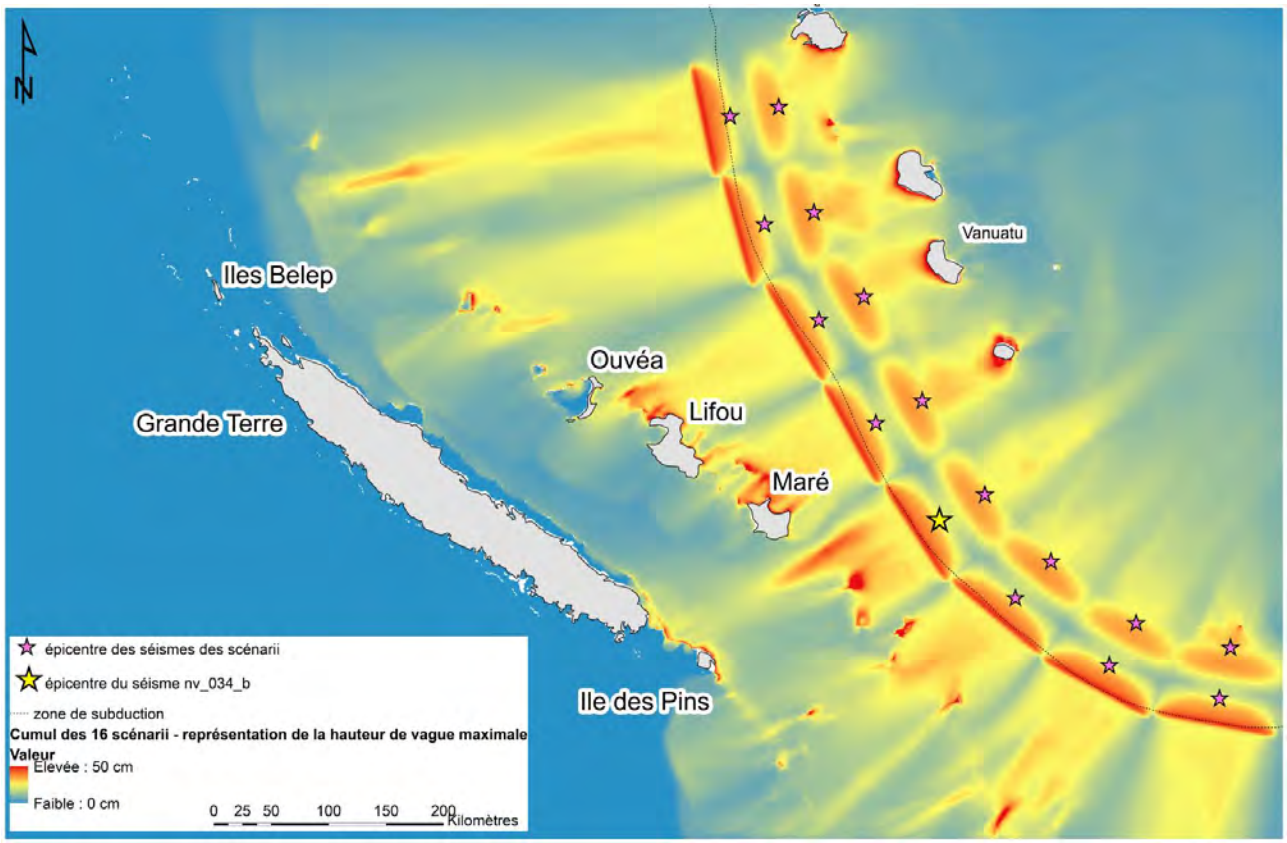
Il s'agit d'une modélisation sur un MNT préliminaire réalisé à partir du MNT 100 m de 2009 auquel on ajoute des données GEBCO et des données SRTM à terre (pas de calcul d'inondation ici). Les scénarii correspondent à des séismes proposés par la NOAA de magnitude 7.5 originaire de l'arc de subduction du Vanuatu dont les épicentres sont visibles sur la Carte 16. Les calculs représentent les résultats après 2 h de propagation cette fois. A l'avenir, il faudra obtenir des résultats après 4 h de propagation afin de visualiser les effets sur la côte ouest.

Dans un premier temps, il s'agit, pour un scénario, de récupérer la valeur en chaque point de la carte de la hauteur de tsunami. Les résultats de la modélisation par MOST sont au format NetCDF directement injectés dans le SIG ArcGIS à l'aide de l'outil « Générer une couche raster NetCDF ». Ces fichiers permettent de stocker des variables qui sont des données scientifiques multidimensionnelles (ici les coordonnées géographiques) et qui s'affichent en fonction d'une dimension (ici, la hauteur maximale de la vague à l'instant t donné) (cf. Carte 16).



Carte 16 : Représentation raster de la hauteur de vague maximale dans le cas d'un scénario de séisme nv_034_b (NOAA) en provenance du Vanuatu et de magnitude 7.5. Le fond gris correspond aux terres émergées de la Nouvelle-Calédonie et du Vanuatu. Deux erreurs liées à la qualité de la grille en ces points produisent des zones rouges au nord-ouest dans les récifs d'Entrecasteaux ainsi que au sud-est de Maré autour de Matthew et Hunter. Ces erreurs n'impactent cependant pas le reste de la modélisation. (Crédits B. Thomas)

Puis, il s'agit de comparer tous les scénarii entre eux et de récupérer en chaque point de la carte, la hauteur maximale observée tous scénarii confondus. Attention, il ne s'agit pas de cumuler chaque hauteur de vague en un point mais seulement de récupérer la valeur la plus élevée. Les rasters générés précédemment sont réalisés pour chaque scénario. On obtient alors une liste de rasters que nous allons pouvoir comparer avec l'outil « Statistiques de cellules – outil Maximum ». Un seul fichier raster est alors délivré, comprenant en chaque point, la valeur maximum de hauteur de tsunami modélisée pour tous les scénarii (cf. Carte 17).



Carte 17 : Représentation raster de la hauteur de vague maximale dans le cas des 16 scénarii en provenance du Vanuatu et de magnitude 7.5. Le fond gris correspond aux terres émergées de la Nouvelle-Calédonie et du Vanuatu. Deux erreurs liées à la qualité de la grille en ces points produisent des zones rouges au nord-ouest dans les récifs d'Entrecasteaux ainsi que au sud-est de Maré autour de Matthew et Hunter. Ces erreurs n'impactent cependant pas le reste de la modélisation. (Crédits B. Thomas)

Maintenant, l'objectif est de représenter cette hauteur en des points spécifiques d'intérêt. Il s'agit ici de représenter les hauteurs le long du littoral néo-calédonien. Pour cela, nous allons extraire les valeurs du dernier raster (cf. Carte 17) en fonction de points définis le long de la côte. L'outil en question « Extraction de valeurs vers des points » est resté au cours du stage quelques mois inutilisable sur ArcGIS 10.5.1 dû à un problème de mise à jour du logiciel SIG, mise à jour réalisée le 9 août 2019. Néanmoins, un bémol apparaît ici puisque la modélisation ne permet pas d'avoir des valeurs en continue jusqu'à l'altitude 0 en bordure directe de la côte (selon la qualité de la grille de modélisation) (cf. Figure 16).

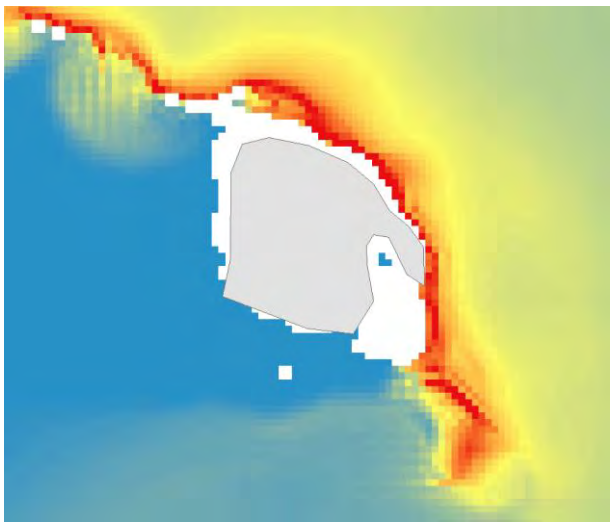


Figure 16 : Zoom de la Carte 17 précédente sur l'Ile des Pins qui souligne l'imprécision de la grille bathymétrique à 100 m qui a des conséquences alors sur la modélisation de l'aléa en bordure de côte. (Crédits B. Thomas)

Le principe est donc de construire une ligne entourant le littoral, à l'intérieur et à l'extérieur du lagon, sur laquelle nous allons placer une série de points espacés régulièrement et de profondeur connue. On choisit dans le cadre de cette représentation d'espacer les points de 1 km. Ainsi sur la totalité de la ligne, on a 3056 points espacés régulièrement de 1 km et chacun de profondeur connue. Ensuite, nous appliquons l'outil « Extraction de valeurs vers des points » pour récupérer les valeurs de hauteur maximum de vagues sur cette série de points. Néanmoins, ces valeurs de hauteur ne peuvent pas être comparées entre elles puisque la profondeur pour chaque point varie. Il est donc nécessaire d'interpoler les résultats à une profondeur connue. La dernière étape consiste alors à appliquer la loi de Green pour chaque point afin de déterminer la hauteur de la vague pour une profondeur s connue (on choisit ici une profondeur de 10 m pour être à proximité de la côte) :

$$H_s . \sqrt[4]{D_s} = H_d . \sqrt[4]{D_d}$$

Avec :

$$D_d = altitude\ en\ eau\ profonde\ (deep\ water \rightarrow\ ici, les\ valeurs\ de\ profondeur\ données\ à\ la\ série\ de\ points)$$

$$D_s = altitude\ en\ eau\ peu\ profonde\ (shallow\ water \rightarrow ici, la\ valeur\ que\ l'on\ souhaite\ à\ proximité\ de\ la\ côte, soit\ -10\ m)$$

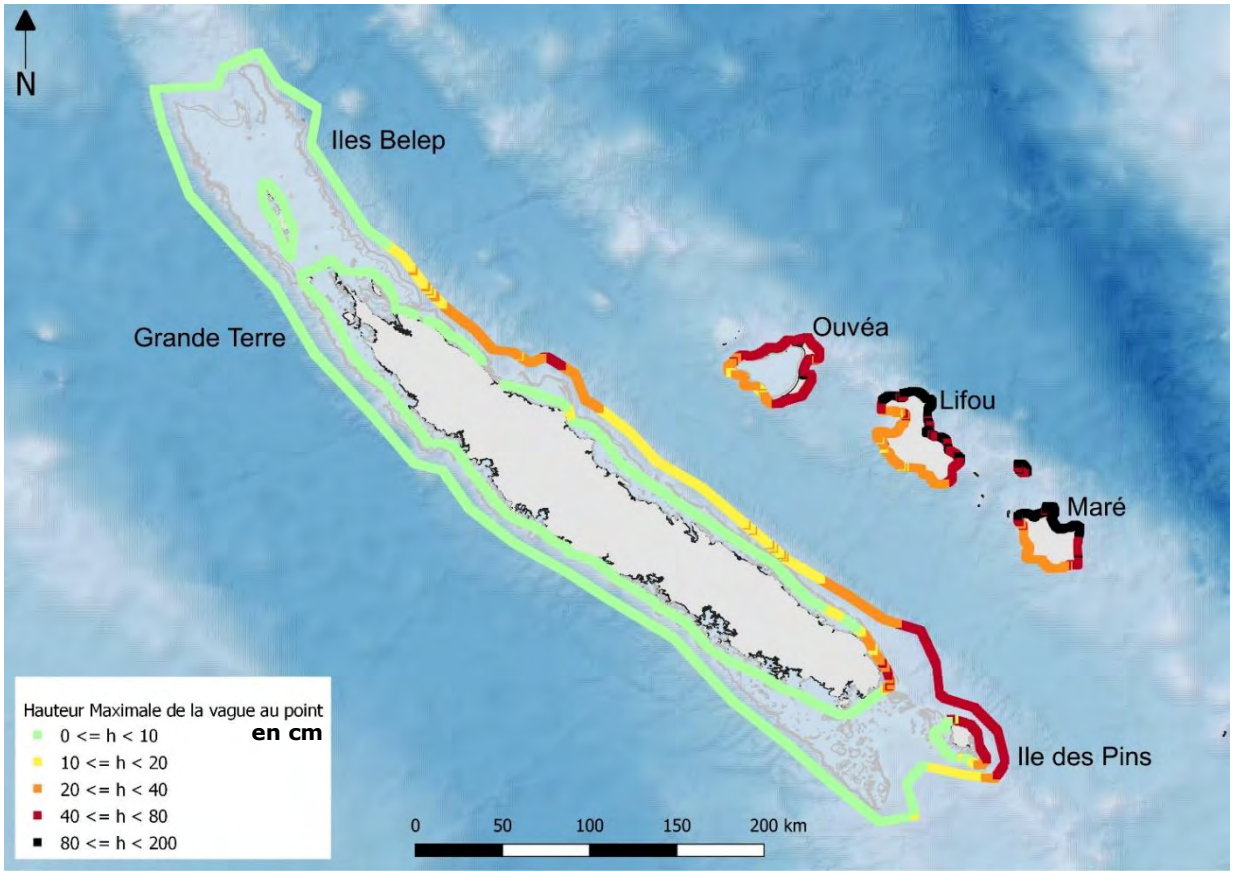
$$H_d = hauteur\ de\ la\ vague\ en\ eau\ profonde\ (ici, les\ résultats\ donnés\ par\ l'outil\ \text{Extraction de valeurs vers des points})$$

$$H_s = hauteur\ de\ la\ vague\ en\ eau\ peu\ profonde\ (ici, ce\ que\ l'on\ cherche\ à\ -10\ m)$$

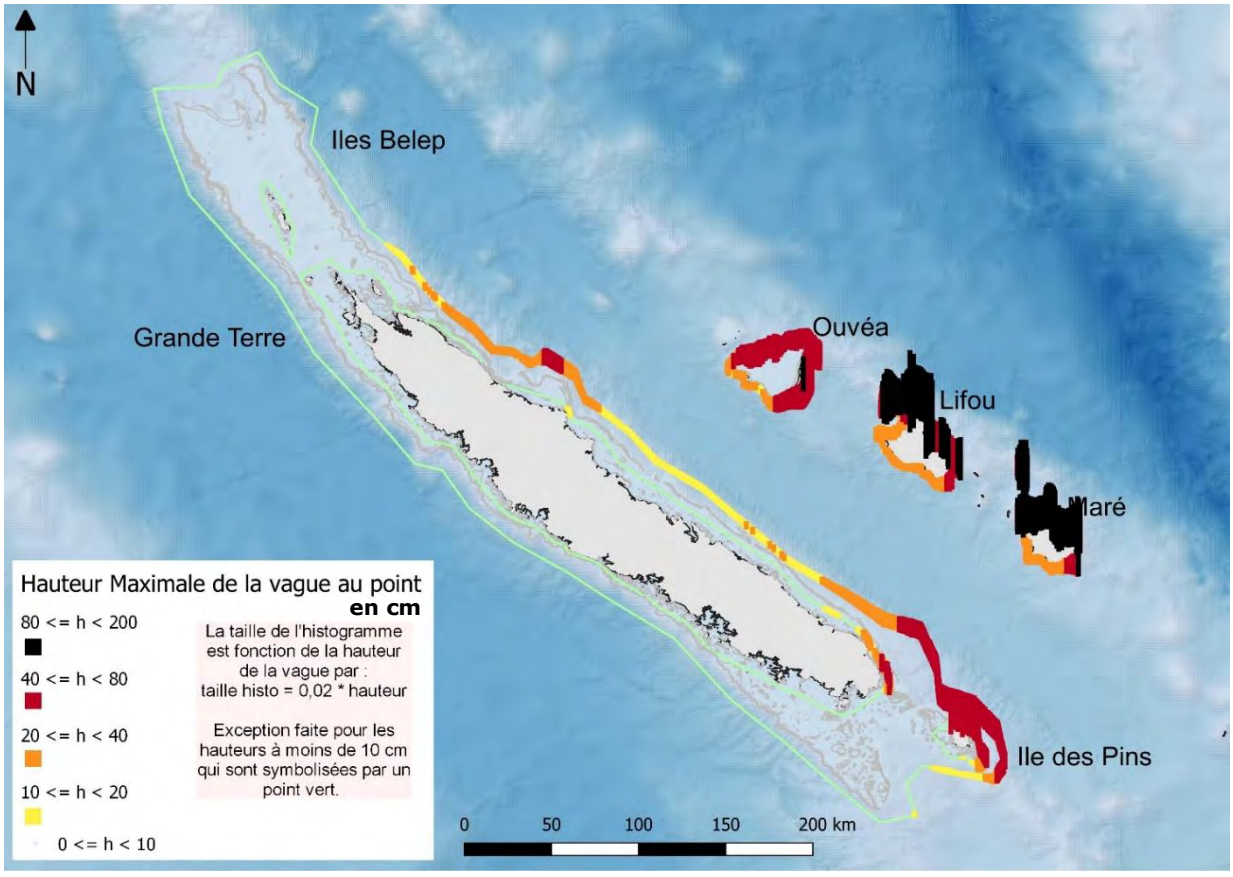
Soit :

$$\boxed{H_s = \left(\frac{D_d}{D_s}\right)^{1/4} . H_d}$$

Finalement, la dernière étape consiste à donner un aplat de couleurs simple sur ces points pour représenter la hauteur de vague (cf. Carte 18), en s'inspirant du travail réalisé auparavant à Wallis et Futuna **(Lamarche et al., 2013)**. Le petit bonus de représentation s'inspire du travail réalisé en Australie **(Davies et Griffin, 2018)** avec une représentation sous forme d'histogramme (cf. Carte 19).



Carte 18 : Représentation de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie par aplat de couleur fonction de la hauteur maximale de tsunami. Les points sont espacés chacun de 1 km. (Crédits B. Thomas)

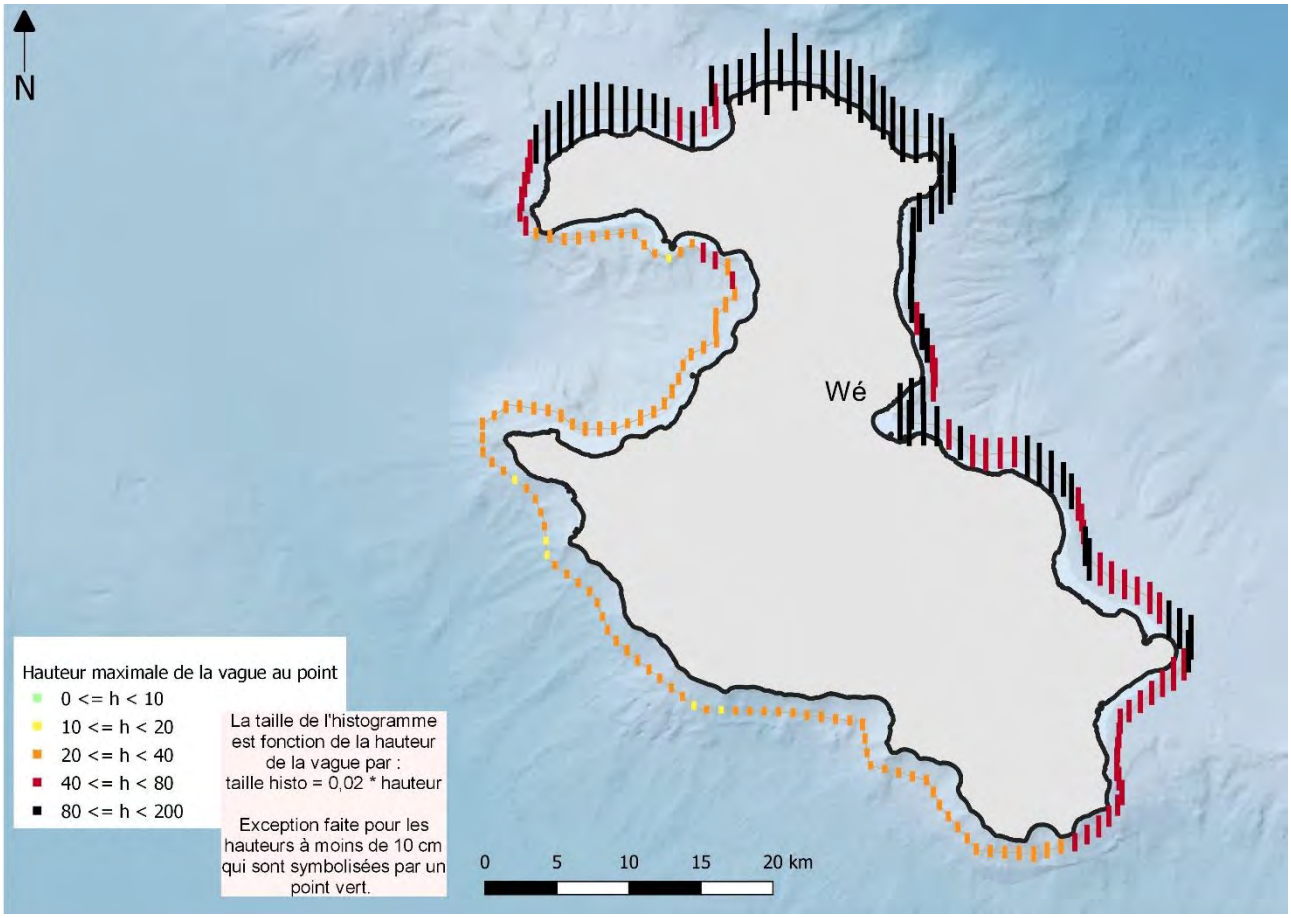


Carte 19 : Représentation de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie par un histogramme dont la taille et la couleur sont fonction de la hauteur maximale de tsunami. (Crédits B. Thomas)

3.2.2 Discussion

Ainsi, dans le cadre de ce stage, ces cartographies de l'aléa tsunami soulignent à quel point la Nouvelle-Calédonie peut être fortement touchée par les tsunamis. Si les exemples ci-dessus montrent une hausse du niveau marin en deçà des 2 m et avec une majorité nette des hauteurs à moins de 40 cm, il faut remettre cet exemple de scénarii dans le contexte : il s'agir de séismes provenant du Vanuatu (source locale) et de magnitude 7.5.

Pour rappel, l'étude de l'aléa s'est basée sur 12 scénarii décrits précédemment. L'analyse de l'aléa est donc réalisée en fonction de ces 12 scénarii mais ne correspond pas à une généralité. Les géologues et les sismologues s'attendent à des séismes de plus forte magnitude (jusqu'à 9) dans l'arc vanuatais **(Ioualalen et Pelletier, 2005)**. Il faudra cartographier l'aléa en fonction d'une plus grande variété de scénarii, provenant à la fois de sources locales jusqu'à transocéaniques et de magnitudes différentes pour conclure véritablement sur l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie.



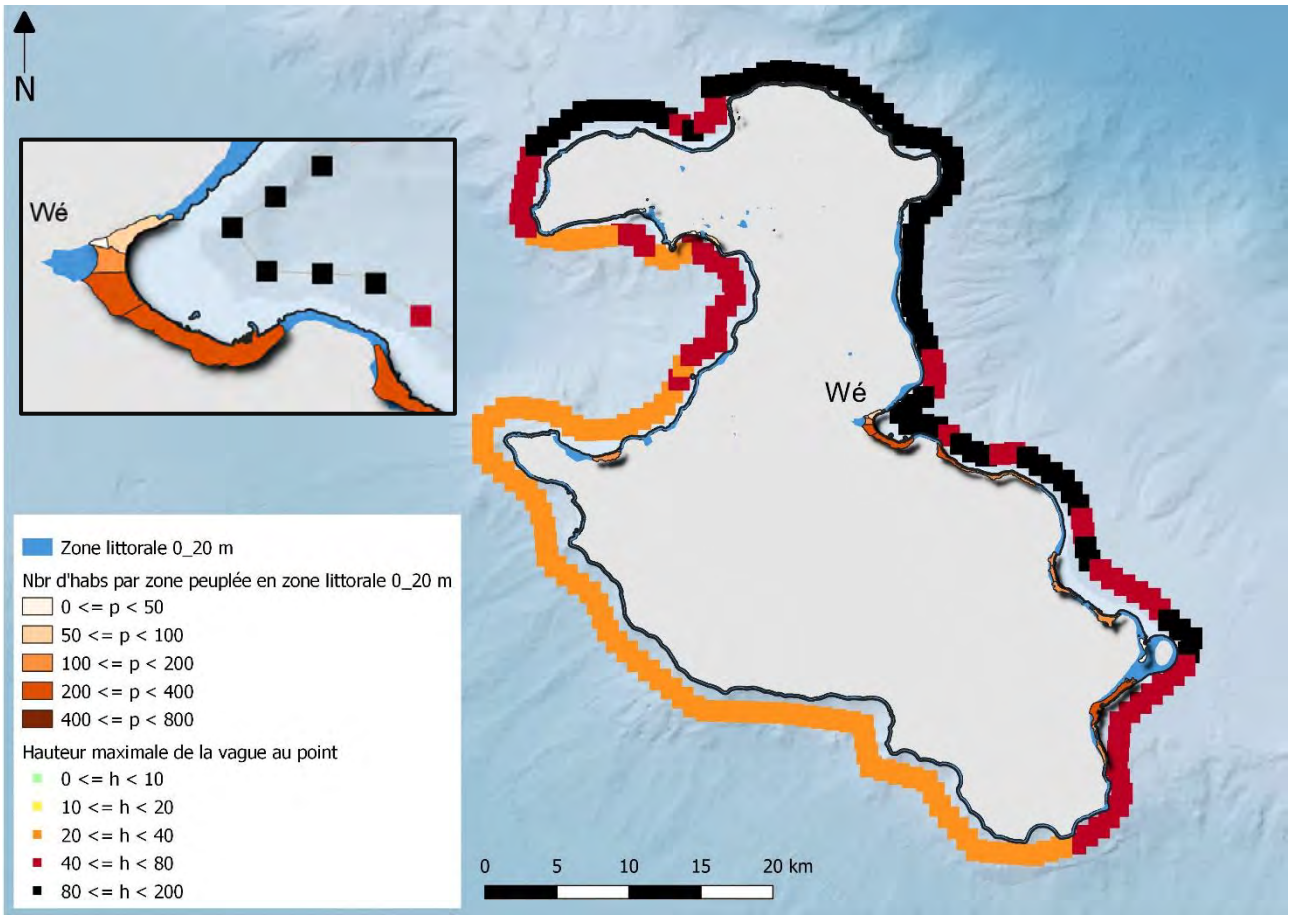
Carte 20 : Représentation de l'aléa tsunami à Lifou, Iles Loyauté en Nouvelle-Calédonie par un histogramme de couleur fonction de la hauteur maximale de la vague en tout point. Les points sont espacés chacun de 1 km. Les valeurs de hauteur sont données en cm. (Crédits B. Thomas)

Le zoom sur Lifou (cf. Carte 20) permet d'avoir une idée plus précise de l'impact de l'aléa sur l'île. Dans le futur, deux éléments seraient intéressants à développer :

- ✓ Analyser le modèle le long de la côte (à une altitude plus proche de 0 que les 10 m actuels) et augmenter la résolution de la série de points d'étude à une centaine voire dizaine de mètres ;

- ✓ Sur les histogrammes, représenter la hauteur de vague uniquement en fonction de la taille de la barre et représenter la probabilité que cette hauteur du niveau marin apparaisse en fonction de la couleur de la barre. Cela aurait l'avantage d'analyser la probabilité de l'aléa : quelle est la probabilité que la hauteur de tsunami atteigne de 2 m sur la côte nord de Lifou par exemple ?

La cartographie de l'aléa est également la première étape pour cartographier le risque tsunami sur l'archipel néo-calédonien. Pour cela, il faudra croiser aléa et enjeux. Si cette étape ne rentre pas dans le cadre du projet (cartographie du risque réalisé par la DSCGR après les études sur l'aléa conduites par l'IRD), il est intéressant de regarder la répartition de la population en fonction de l'aléa sur la côte. Ainsi, la Carte 21 est un zoom sur la commune de Lifou. On s'intéresse ici à la zone littorale de 0 m à 20 m d'altitude. Première constatation, comme les zones peuplées à moins de 20 m d'altitude ne comprennent que 26 % de la population, la majorité de la population est donc non soumise à l'aléa (à condition que le run-up n'excède pas 20 m). L'aléa est globalement fort à Lifou et la ville principale, Wé, pourrait être impactée par des hauteurs de vagues dépassant les 80 cm. La partie nord montre un aléa très fort, néanmoins il n'y a pas de zones peuplées à moins de 20 d'altitude, donc pas d'enjeu population (en ne prenant pas en compte la mobilité des habitants et touristes dans cette zone). Ainsi, c'est le rôle de l'étude du risque de comparer l'aléa tsunami avec l'ensemble des enjeux répertoriés pour cartographier les zones les plus à risque : là, où les enjeux sont forts et l'aléa plus ou moins élevé.



Carte 21 : Représentation de l'aléa tsunami à Lifou accompagné des zones peuplées à moins de 20 m d'altitude. Les points sons espacés chacun de 1 km. Le zoom dans l'encadré noir est réalisé sur la commune principale de Wé. Les valeurs de hauteur sont données en cm. (Crédits B. Thomas)

4 Discussion générale

L'étude de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie amène à se poser des questions quant à la prise de conscience de la population et des autorités face au risque tsunami sur l'archipel. Dans l'imaginaire général, le tsunami reste associé à l'image de terribles vagues détruisant tout sur leur passage, à l'image des tsunamis en Indonésie (2004) et au Japon (2011) (cf. Image 4).



Image 4 : Exemples de coupures de journaux suite aux tsunamis en Indonésie de 2004 et au Japon de 2011 (sources Google Images).

Les tsunamis observés en Nouvelle-Calédonie sont plutôt rares : 37 tsunamis en près de 144 ans, soit un tsunami tous les 4 ans. Ils dépassent exceptionnellement des hauteurs de vagues de 2 m et près de 80 % des tsunamis sont bien inférieurs à 1 m (moyenne à 67 cm) **(Roger et al., 2019)**. Pourtant, la force des courants dus au tsunami reste un facteur de danger important et est souvent négligée : il suffit d'observer la vidéo du tsunami du 5 décembre 2018 à l'Ile des Pins (transmise par M. Breteault, directeur technique du Méridien) dans laquelle l'eau a atteint le pont de l'hôtel du Méridien, a arraché quelques arbres et aurait pu emporter des personnes si elles s'étaient trouvées sur le passage du tsunami.

Entre un aléa qui semble plutôt modéré mais des impacts sur la population et le bâti potentiellement très dangereux, est-ce que la population et les autorités prennent la mesure du risque tsunami sur l'archipel néo-calédonien ?

Face à cette réflexion, il est essentiel d'étudier étroitement l'aléa avec la vulnérabilité des enjeux pour que, « perçu et vécu comme dangereux, l'aléa devienne risque » **(Veyret et Reghezza, 2005)**.

4.1 La rencontre de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux

La stratégie actuelle de la DSCGR face au risque tsunami en Nouvelle-Calédonie consiste en une réponse matérielle à l'aléa : évacuation obligatoire au-dessus des 12 m d'altitude et alerte des populations par le dispositif des 61 sirènes. Cette réponse suit la logique d'une « résistance à l'aléa » **(Daluzeau et al., 2013)** souvent accompagnée par des mesures de contrôle de l'aléa : installation de digues le long du littoral et des fleuves et construction de barrages en amont pour réguler les cours d'eau et donc les inondations **(Dauphiné et Provitolo, 2007)**. Ces approches très matérielles face à l'aléa ont par le passé montrées leurs limites et leurs effets pervers : un faux sentiment de sécurité qui finit par faire oublier le risque à la population et engendre une utilisation intensive des zones directement soumises à l'aléa (zones inondables sur le littoral) **(Scarwell, 2007)**. Par exemple, le tsunami en 2011 sur le Japon déborde sur les digues aménagées (cf. Image 5). Ainsi, une réponse construite uniquement sur la base de l'aléa a tendance à renforcer la vulnérabilité des populations. *En réponse à l'aléa, ne pourrait-on alors pas également s'intéresser aux facteurs de vulnérabilité expliquant les évènements catastrophiques passés ?*



Image 5 : Photographies de digues au Japon : une digue submergée par le tsunami de 2011 à gauche et une nouvelle digue construite en 2018 (sources Google Images).

4.1.1 Facteur de vulnérabilité n°1 : la configuration spatiale du territoire

Pour rappel, la Nouvelle-Calédonie se situe à proximité immédiate de la fosse des Hébrides où la plaque australienne rentre en subduction sous la plaque pacifique. Or, les mouvements qui accompagnent ce processus ne sont pas homogènes tout le long de l'arc, entre 0,12 à 0,25 mm/an en vertical et entre 5 cm/an à 12 cm/an en horizontal **(Pelletier et Pillet, 2004)**. Ces mouvements hétérogènes créent des bombements lithosphériques et une succession de subsidence et de surrection le long de la Grande Terre. Au niveau des Iles Loyauté, la convergence atteint les 12 cm/an, ce qui est considérable, et pourtant un déficit sismique est observable au milieu de l'arc vanuatais. **Pelletier et Pillet (2014)** soulignent alors l'éventualité d'une rupture majeure dans cette zone (entre les Iles Loyauté et l'île de Tanna au Vanuatu) de

magnitude au moins 8 et pouvant générer un tsunami impactant fortement la côte est de la Nouvelle-Calédonie. Cet évènement serait alors comparable à celui de 1875 qui a fait une vingtaine de morts à Lifou **(Sahal et al., 2010)**. La localisation à proximité de l'arc vanuatais dans cette zone au gap sismique[23] est donc un premier facteur de vulnérabilité géographique pour le territoire néo-calédonien.

Un second élément renforce cette vulnérabilité spatiale : il s'agit de la géomorphologie côtière qui, comme le précisent **Le Duff et al. (2016)**, conditionne « l'amplitude et le degré de pénétration (la limite du run-up) du tsunami sur les terres ». En effet, comme nous avons pu le voir dans l'étude de l'aléa, la bathymétrie joue un rôle important dans la propagation du tsunami. De plus, les baies et globalement les systèmes géomorphologiques fermés ont parfois les capacités à faire rentrer en résonance le tsunami qui s'amplifie et possède un degré de run-up alors plus élevé. L'exemple de la baie de Joj à Lifou, Iles Loyauté, très abritée mais ayant subi les plus gros dégâts avec une profondeur d'inondation à 400 m **(Le Duff et al., 2016)**. De même, un récif corallien continu et en bonne santé peut s'avérer être une barrière efficace à la propagation d'un tsunami, à condition de ne pas avoir de gap perturbateur dans le récif **(Kunkel et al., 2006 ; Roger et al., 2014)**. Dans cette logique, **Andrefouët et al. (2006)** mentionnent le cas de plusieurs récifs frangeants discontinus face à des localités déjà touchées par des tsunamis (cas du tsunami de 1875 impactant considérablement le village de Mu à Lifou, Iles Loyauté).

4.1.2 Facteur de vulnérabilité n°2 : la perte de la culture du risque

Tout d'abord, les activités économiques essentiellement tournées vers la pêche, les mines et le tourisme sur le territoire néo-calédonien conduisent à des mouvements majeurs de vers le littoral. Un phénomène perceptible à l'échelle mondiale **(Füssel, 2012)** mais particulièrement présent en Nouvelle-Calédonie. Les cartographies de population l'ont d'ailleurs bien soulignées : 32 % des habitants vivent en-dessous des 10 m d'altitude suivant les chiffres de l'ISEE de 2014. Dans une étude future sur les enjeux de population, il serait intéressant d'analyser le mouvement des populations au cours des années en fonction des chiffres de l'ISEE.

De plus, en Nouvelle-Calédonie et à l'exception du Grand Nouméa et de quelques autres villes, la plupart des terres sont privées et appartiennent à des personnes membres d'une tribu. La terre constituant « le référent culturel premier » **(Herrenschmidt, 2004)**, l'attachement est d'autant plus grand. **Le Duff et al. (2016)** précisent comment des zones détruites par le tsunami de 1875 ont d'abord été délaissées puis récupérées dans une stratégie d'alliance et de rivalité entre tribus. La réoccupation du littoral dans les îles est donc aussi une affaire d'appartenance à la terre.

Ces mouvements de population entrainent un oubli des savoirs relatifs au domaine côtier **(Le Duff et al., 2016)**. La génération ayant connu le risque disparaît et avec elle la mémoire collective **(Decaulne, 2001 ; Labeur, 2013)**. La culture du risque correspond à l'ensemble des observations, des expériences et de la mémoire des aléas passés. Elle conditionne les comportements individuels et collectifs face à l'aléa par sa transmission de génération en génération. L'exode rural du siècle dernier et les mouvements inter-régionaux voire inter-pays des populations ont contribué à une perte de la connaissance précise de son environnement et ainsi de cette culture du risque majeur **(Plattard, 2016)**.

[23] Pour information, le gap sismique pourrait également être dû à un coulissement asismique continu.

Bilan

Ce mémoire de stage s'est d'abord intéressé à la cartographie des enjeux de population et de bâti sur le territoire néo-calédonien avant de s'attarder sur la cartographie de l'aléa tsunami. Pour coordonner ces deux représentations, il faudrait pouvoir cartographier la vulnérabilité des enjeux face à l'aléa tsunami. Les éléments précédents forment une base de cette étude. Ils soulignent le besoin d'aller plus loin dans la représentation cartographique de l'aléa, des enjeux, de leur vulnérabilité et enfin du risque.

Se pose alors la question de comment transmettre cet ensemble cartographique en cours de construction aux autorités, dans l'objectif de prévenir et protéger la population face à l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie.

4.2 Transmettre aux autorités un ensemble cartographique riche en informations

Le stage est directement impliqué dans le projet TSUCAL : il est donc suivi de près par la DSCGR. Les résultats cartographiques sur l'étude de la localisation de la population sur le territoire, les premières modélisations de l'aléa et l'analyse des enjeux bâtis ont été régulièrement présentés à la DSCGR lors de réunions et étroitement suivis par échange de mails et appels téléphoniques. L'objectif est de permettre une appropriation rapide de la méthodologie utilisée et des données cartographiques. Le projet TSUCAL a pour objectif ultime de mettre en ligne les cartes d'aléa sur le portail géographique Géorep afin de permettre l'accès au public désireux de s'informer sur le risque tsunami en Nouvelle-Calédonie. Il faut ainsi pouvoir transmettre une base de données claire, hiérarchisée et explicative pour faciliter la compréhension.

Le travail du stage s'intègre alors dans une base de données générale qui comprend l'historique des tsunamis en Nouvelle-Calédonie, la synthèse des données bathymétriques et topographiques constitutives du MNT, les cartographies sur les enjeux de population et de bâti en territoire néo-calédonien et les cartographies sur l'aléa tsunami spécifiques à l'archipel. Le stage amène en priorité à continuer le travail sur la cartographie de l'aléa à partir des modélisations lancées sur les grilles issues du MNT.

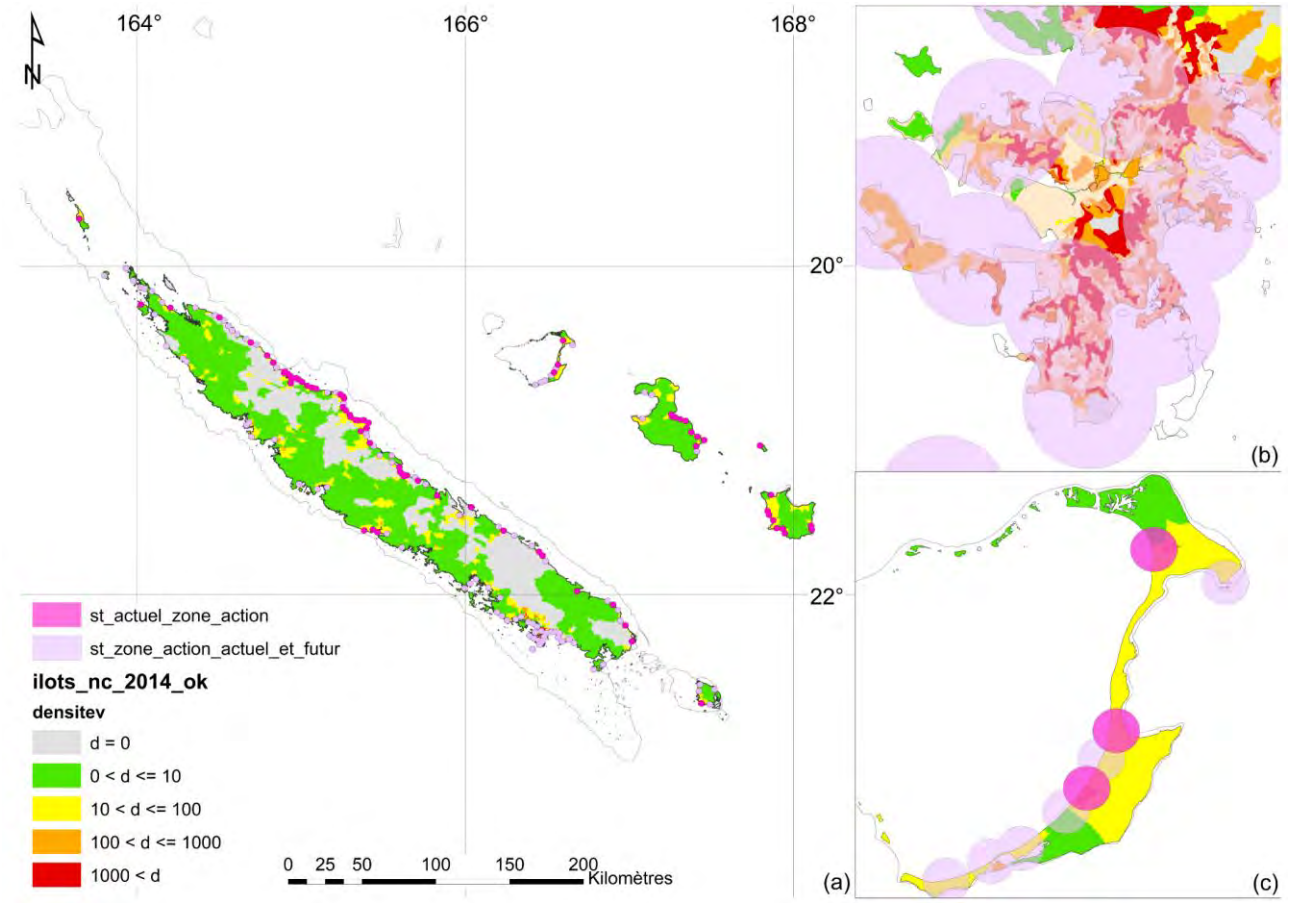
Ce qui intéresse en particulier la DSCGR, constitue l'ensemble cartographique des enjeux et de l'aléa qui sert de base pour décider zone par zone du risque associé aux tsunamis. *De nombreuses interrogations se posent alors quant à la prévention et la protection de la population face à l'aléa tsunami.* Au cours du projet, nous avons donc proposés quelques pistes d'études. L'analyse de l'emplacement des sirènes en fonction de la localisation de la population permettrait d'assurer efficacement la prévention de la population lors de l'occurrence d'un tsunami. Pour protéger la population, deux pistes sont évoquées dans de nombreuses études : la végétation comme frein au tsunami **(Yanagisawa et al., 2008)** et les récifs parfois remparts à la houle et potentiellement pour les tsunamis **(Monismith et al., 2015)**.

4.2.1 Rôle des sirènes dans la prévention des populations face au risque tsunami

Comment la population peut-elle être au courant de l'arrivée imminente d'un tsunami sur les côtes de la Nouvelle-Calédonie ? Si les séismes dont les épicentres sont situés au Vanuatu sont régulièrement ressentis dans l'archipel néo-calédonien, l'origine sismique des tsunamis transocéaniques n'est jamais perceptible sur le territoire **(Roger et al., 2019)**. De plus, tout le monde ne ressent pas le séisme selon sa localisation sur l'archipel ou sa perception des ondes. Les sirènes, et plus généralement les moyens de communication mis en place (sms d'alerte, informations à la radio et sur les réseaux sociaux, applications d'alerte des risques), jouent alors

un rôle essentiel dans l'alerte aux populations du danger imminent de tsunami d'origine sismique.

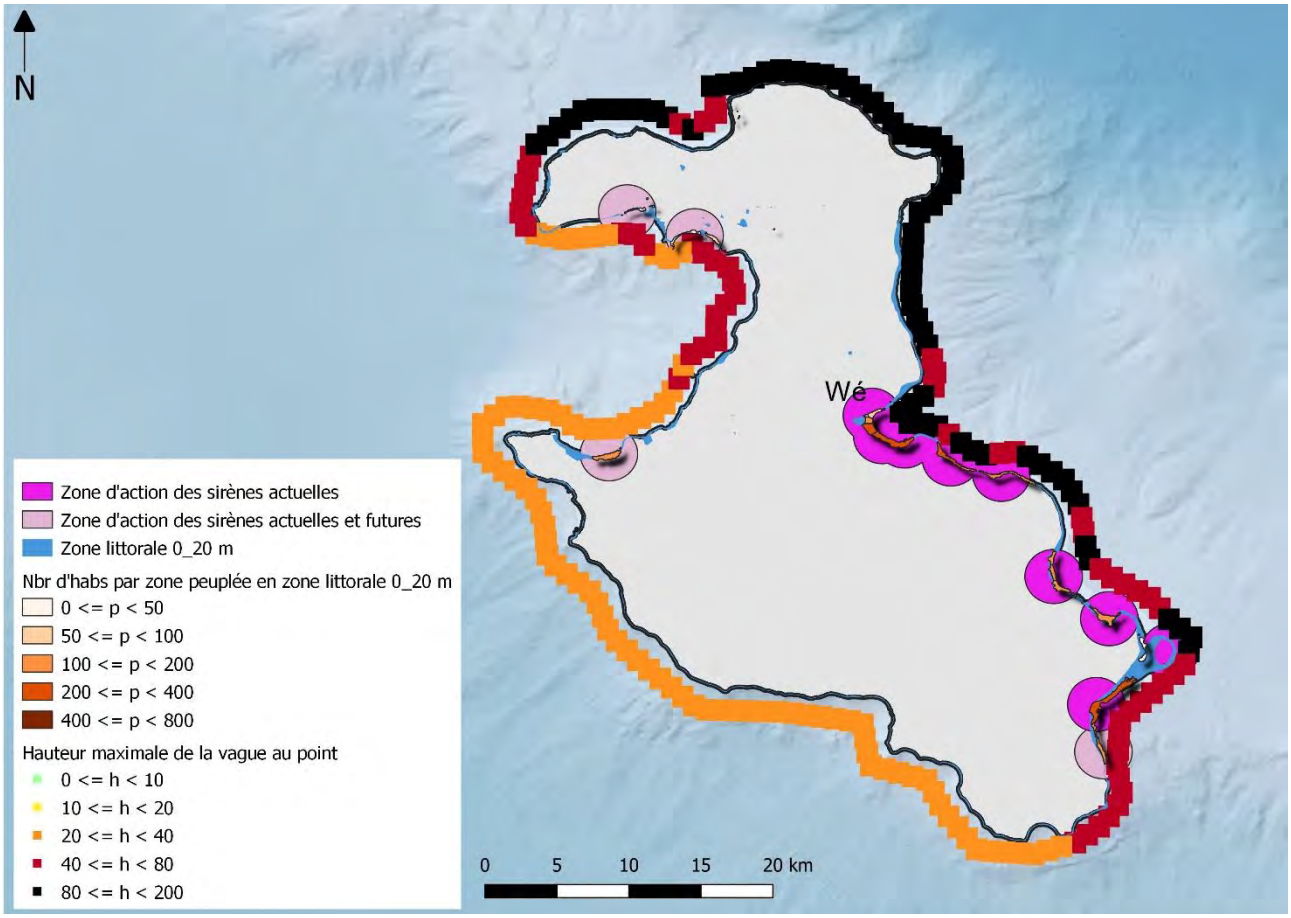
Depuis 2014, la DSCGR gère le réseau des 61 sirènes placées sur la côte est de la Grande Terre et dans les îles (cf. carte). Le rayon d'action d'une sirène est de 2 km. La Sécurité Civile envisage d'en installer 94 nouvelles dans la continuité des existantes (face à la zone de subduction du Vanuatu) et dans des zones stratégiques avec une densité de population élevée (Nouméa).



Carte 22 : Localisation des zones d'action des sirènes de tsunami actuelles et proposées en Nouvelle-Calédonie : (a) sur tout e territoire, (b) zoom sur le Grand Nouméa, (c) zoom sur Ouvéa, iles Loyauté (données DSCGR, 2019). Les lignes grisées correspondent à la barrière de corail. Le fond coloré représente la densité de population par îlot (données ISEE, 2014). (Crédits B. Thomas)

La cartographie de l'emplacement des sirènes actuelles ainsi que de leurs rayons d'action permet d'estimer le nombre d'habitants susceptibles d'entendre l'alerte et de se réfugier en hauteur. Les chiffres de population sont ceux des zones peuplées créées au cours du stage. La couverture des sirènes actuelles permet d'alerter 19 659 habitants soit 7 % de la population totale du territoire. Elles couvrent 68 % des zones peuplées concernées. C'est un chiffre relativement faible mais directement lié au fait qu'il n'y a pas de sirènes sur Nouméa, qui concentre 66 % de la population en Nouvelle-Calédonie. L'ajout des 94 sirènes en proposition, notamment sur le Grand Nouméa, permettrait de prévenir 173 337 habitants soit 62 % de la population néo-calédonienne. Elles couvriraient alors 79 % des zones peuplées concernées. Cette augmentation nette du nombre d'habitants prévenus est dû à la localisation future de plusieurs sirènes sur le Grand Nouméa. Pour aller plus loin, nous travaillons actuellement à estimer le nombre d'habitants qui entendront l'alerte en fonction des différentes zones littorales décrites.

La Carte 23suivante juxtapose la localisation des sirènes actuelles et futures sur la carte d'aléa pour l'île de Lifou, Iles Loyauté. La ville principale Wé semble bien protégée avec une série de 5 sirènes déjà installées, c'est de plus une zone avec un aléa très fort et une forte présence humaine. Les sirènes proposées semblent compléter ce schéma de zones couvertes sur des zones peuplées habitées et face à un aléa modéré à très fort (orange à noir). L'ajout de sirènes dans le nord de l'île pourrait être judicieux puisque l'aléa semble très fort, néanmoins l'absence de zones peuplées et donc d'enjeu population réduit le risque : la cartographie du risque permettra ainsi de répondre à ces problématiques.



Carte 23 : Juxtaposition des zones d'action des sirènes de tsunami actuelles et proposées à Lifou, Iles Loyauté, Nouvelle-Calédonie avec la cartographie de l'aléa tsunami et les zones peuplées situées dans la zone littorale 0_20 m. (Crédits B. Thomas)

Les sirènes constituent un élément majeur dans la prévention des populations mais nécessitent d'être accompagnées par une éducation à la connaissance du risque tsunami sur l'archipel pour que leur usage soit connu et porteur de réflexe **(Le Duff et al., 2016)**. Dans ce cadre, il faut pouvoir informer la population efficacement de la conduite à adopter lors de l'arrivée d'un tsunami. Des brochures de la DSCGR sur le fonctionnement des sirènes existent déjà, elles pourraient être complétées par un guide « que faire en cas d'alerte tsunami ? »[24] (cf. Image 6). Distribuées et expliquées grâce à des mises en situation dans les écoles, lors de réunions de sécurité travail dans les entreprises et les administrations et dans les aéroports, elles permettraient un rayonnement général de l'information.

[24] https://polynesie-francaise.pref.gouv.fr



Image 6 : Brochure de prévention sur l'alerte tsunami en Polynésie française (https://polynesie-francaise.pref.gouv.fr).

4.2.2 Rôle des écosystèmes dans la protection des populations face au risque tsunami

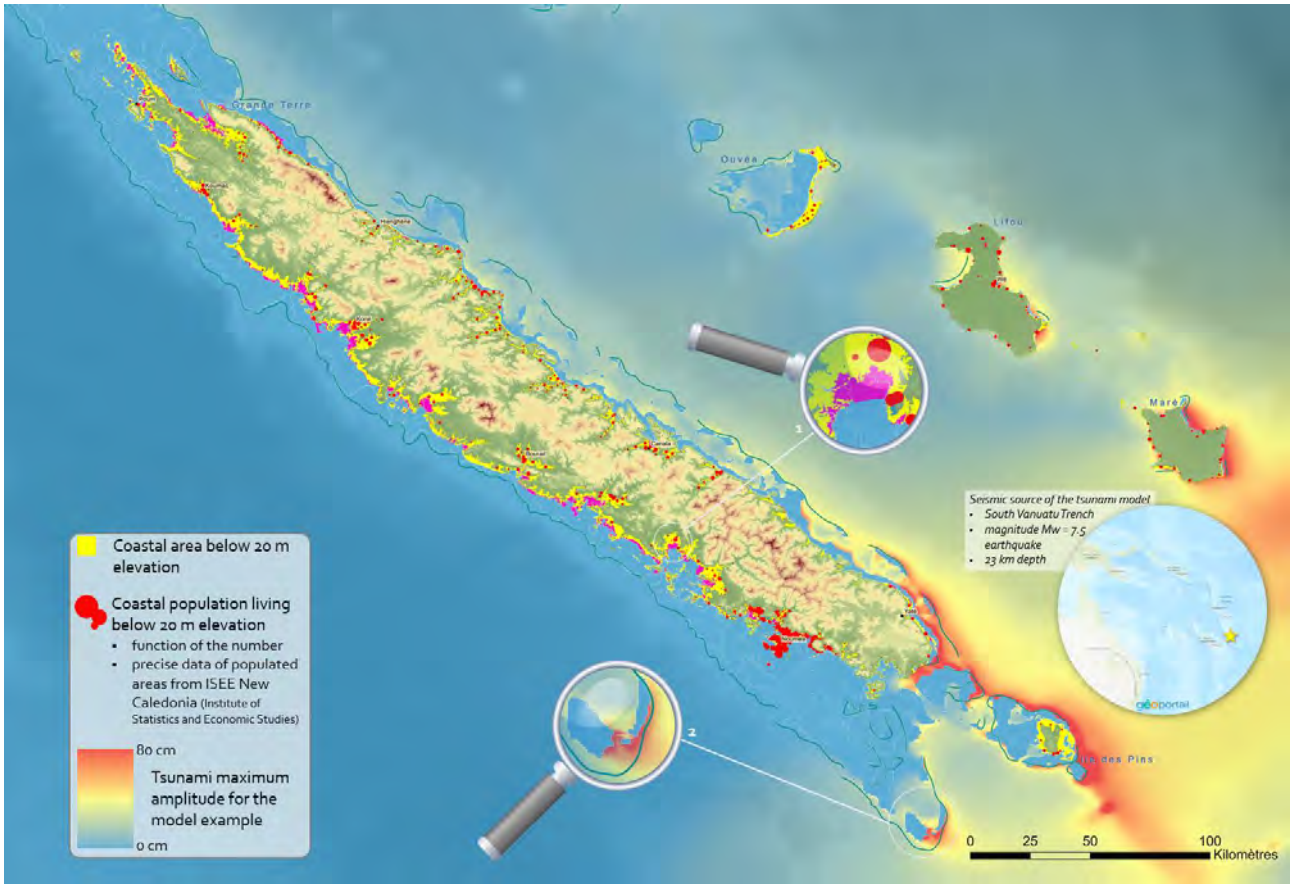
Les récifs coralliens et les mangroves (le long du littoral et dans les estuaires) sont très présents dans la région tropicale. Le potentiel de ces écosystèmes naturels à protéger les côtes contre les submersions marines fait régulièrement l'objet de discussions **(Gracia et al., 2018)**.

La Grande Terre en Nouvelle-Calédonie est entourée d'une barrière de corail de 1600 km de long. Les barrières de récifs coralliens pourraient réduire l'impact des tsunamis sur la côte en réduisant l'énergie des vagues de 80% grâce aux processus de frottement **(Kunkel et al., 2006)**. Cependant, pour une très grande amplitude de vague, les observations post-évènement du tsunami de 2004 dans l'océan Indien montrent que les régions présentant des récifs coralliens ont été touchées autant que les régions sans récifs. De plus, la présence de récifs amplifie parfois les vagues entrantes entre le récif et le littoral (au niveau des passes par exemple) **(Roger et al., 2014)**. Les formes et les caractéristiques des récifs coralliens de Nouvelle-Calédonie lui permettent d'être un tampon contre les tsunamis (cf. zoom 2 de Carte 24). Les ouvertures dans le récif constituent le bémol mais soulignent l'importance de restaurer et de protéger beaucoup plus de récifs, car cela peut être une approche rentable pour améliorer la défense côtière de première ligne **(Brittin, 2014)**.

Les mangroves ont démontré à maintes reprises leur rôle de protection du littoral **(Yanagisawa et al., 2009 ; Laso Bayas et al., 2011)**. Les mangroves atténuent directement les vagues en fournissant une résistance supplémentaire à l'énergie des vagues à travers leurs troncs, ainsi que les racines aériennes qui peuvent atténuer les surtensions en augmentant les frictions **(Laso Bayas et al., 2011)**. La végétation côtière dense existante devant les zones habitées réduit également le nombre de victimes de 5% en moyenne. Malheureusement, **Polidoro et al. (2010)** indiquent qu'entre 20% et 35% des mangroves du monde ont été perdues entre 1980 et 2010. Les causes de cette perte sont variées :

- ✓ la gestion côtière et son aménagement ;
- ✓ l'approvisionnement en bois **(Sajjaduzzaman et al., 2005)** ;
- ✓ l'élévation globale du niveau de la mer **(Gilman et al., 2008 ; Ellison, 2015 ; Carugati et al., 2018)**.

Sur la côte ouest de la Nouvelle-Calédonie, la mangrove est largement présente devant les villages (cf. zoom 1 de Carte 24), une réintroduction dans les trouées aiderait probablement à protéger les tribus. Les mangroves fournissent également des services écosystémiques, notamment en termes de développement des poissons **(Kathiresan, 2012)**. À Nouméa, les mangroves sont peu présentes car détruites pour l'aménagement côtier : il serait intéressant de savoir si elles pourraient jouer un rôle égal ou supérieur aux défenses artificielles (digues et remblais).



Carte 24 : Extrait du poster présenté à l'IPBES. Représentation de la hauteur maximale du tsunami et de son impact sur les côtes néo-calédoniennes. Les récifs coralliens sont représentés par une ligne bleue verte autour du territoire. Les mangroves sont représentées en rose fuchsia. ***(Thomas et al., 2019)***

Cette étude nous amène à réaliser une enquête locale à Nouméa auprès de 400 personnes. L'enquête étant toujours en cours, 211 personnes ont été interrogées pour le moment. Elle se concentre sur la population locale et les quelques touristes présents. Dans un premier temps, nous leur demandons s'ils voient des éléments dans leur environnement proche ou lointain qui seraient protecteur face aux tsunamis. Puis, s'ils ne mentionnent ni les récifs, ni les mangroves, nous leur demandons s'ils pensent que ces éléments sont protecteurs. A ce jour, 37 % des personnes interrogées considèrent que le récif corallien est protecteur et 66 % considèrent que les mangroves protègent les côtes des tsunamis. Cette enquête en cours de réalisation donnera des indications sur la nécessité ou non de renforcer l'aspect éducatif de l'étude des risques sur le territoire : c'est un pas de plus pour réduire la vulnérabilité de la population en lui donnant les moyens de comprendre et de réagir au risque tsunami.

Bilan

Portée par le projet TSUCAL, la cartographie de l'aléa tsunami à la côte néo-calédonienne puis des enjeux et de leur vulnérabilité, l'analyse des sirènes présentes sur le territoire pour prévenir les habitants et l'étude du rôle des écosystèmes dans la protection face aux submersions marines, mènent à des représentations cartographiques statiques et très informatives. Or, la mise en service des 61 actuelles sirènes en cas de tsunami se fait de manière automatique après la réception des notifications ORSNET et PTWC.

Comment envisager alors une automatisation de la cartographie en fonction des observations sismologiques ? Comment pourrait-on dynamiser le SIG transmis aux autorités en le mettant régulièrement à jour en fonction des alertes reçues ?

4.3 Vers une cartographie automatique et dynamique

Les cartographies statiques développées pendant le projet présentent de précieuses informations utiles pour l'étude du risque. Néanmoins, la vision statique fait abstraction d'une mise à jour automatique de la carte lors d'une observation sismologique ou lors de l'ajout de nouveaux scénarii. Or, la question de l'automatisation de la cartographie est un élément clé pour rendre efficace la réponse des autorités face à l'arrivée imminente d'un tsunami sur les côtes néo-calédoniennes. De plus, comme évoqué dans la partie sur les enjeux, la population est localisée de manière homogène à tout moment de la journée et de l'année (vacances, fêtes, etc.) sur nos cartes, ce qui, compte tenu des mouvements de population pour le travail et les loisirs, reste approximatif. L'objectif de cette partie est donc de donner des clés pour automatiser le SIG et pour corréler les mouvements de population avec les moments de la journée.

4.3.1 Cartographier automatiquement l'aléa tsunami en cours

Les cartographies statiques actuelles nécessitent un temps d'appropriation pour comprendre leur fonctionnement. En effet, que se passe-t-il lors d'une alerte sismologique potentiellement tsunamigénique ? Il faut, pour le moment, la comparer manuellement à un scénario établi et sortir la carte d'aléa à la côte correspondante. Puis, relever les enjeux et leur vulnérabilité à proximité des zones d'aléa fort pour en déduire l'échelle du risque sur le territoire.

L'objectif du projet TSUCAL est de disposer d'une base de scénarii de tsunamis complète afin de couvrir le maximum d'évènements possibles. Lors d'une notification sismologique, les caractéristiques du séisme sont comparées à celles des séismes modélisés dans la base de scénarii : on travaille notamment avec la localisation de l'épicentre, la profondeur du séisme et sa magnitude. Le scénario le plus proche sera alors automatiquement délivré et les cartes d'aléa et de risque visualisées directement.

L'exemple du travail de **Davies et Griffin, (2018)** en Australie est une source d'inspiration pour créer des cartes d'aléa sur un jeu d'une centaine de scénarii. Le code PTHA18 (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for Australia) accessible sur la plateforme GitHub[25] permet d'estimer tout le long de la côte australienne et pour n'importe quel type de séisme générateur de tsunami, la probabilité que le tsunami impacte le littoral. Dans le projet TSUCAL, nous souhaitons idéalement à la fois représenter la probabilité d'impact mais également la hauteur maximale de la vague en tout point de la côte et sa probabilité d'apparition.

[25] https://github.com/GeoscienceAustralia/ptha

Cette automatisation de la cartographie de l'aléa est donc un élément essentiel à mettre en œuvre pour le projet TSUCAL. Il faudra s'inspirer du code PTHA18 pour créer une version personnalisée et adaptée à la Nouvelle-Calédonie d'un plugin SIG de cartographie de l'aléa tsunami à partir des données NetCDF de modélisation.

4.3.2 Etude de la dynamique des populations

Le travail réalisé sur les enjeux a montré les limites sur l'analyse de la population :

- ✓ il faudrait pouvoir distinguer la localisation des habitants le jour de la nuit ;
- ✓ il faudrait également obtenir des chiffres précis de la fréquentation touristique des îlots soumis directement à l'aléa (très faible altitude de moins de 5 m en général).

L'analyse de la dynamique de la population est essentielle pour augmenter la précision dans la gestion du risque tsunami. Une solution serait de pouvoir localiser la population à l'aide des données mobiles délivrées par les téléphones par exemple **(Deville et al., 2014)**. Cette technologie permettrait de représenter géographiquement la localisation de la population selon les différents moments de la journée.

Pour aller plus loin, il serait intéressant d'étudier la simulation multi-agents : un outil dans la prévention des risques sur les territoires littoraux. Il a pour objectif de montrer l'impact d'un aléa sur le territoire et la population y habitant. C'est donc un outil de prise de conscience des phénomènes en jeux et d'aide à la décision pour les autorités locales (cf. Figure 17). C'est également une clé pour la communication sur la culture du risque à l'ensemble de la population **(Plattard, 2016)**. L'objectif est de briser la barrière qui sépare les géosciences des sciences sociales avec une approche multi-agent pour la modélisation de l'évacuation de la population en cas de tsunami **(Mas et al., 2015 ; Sahal et al., 2013)**.

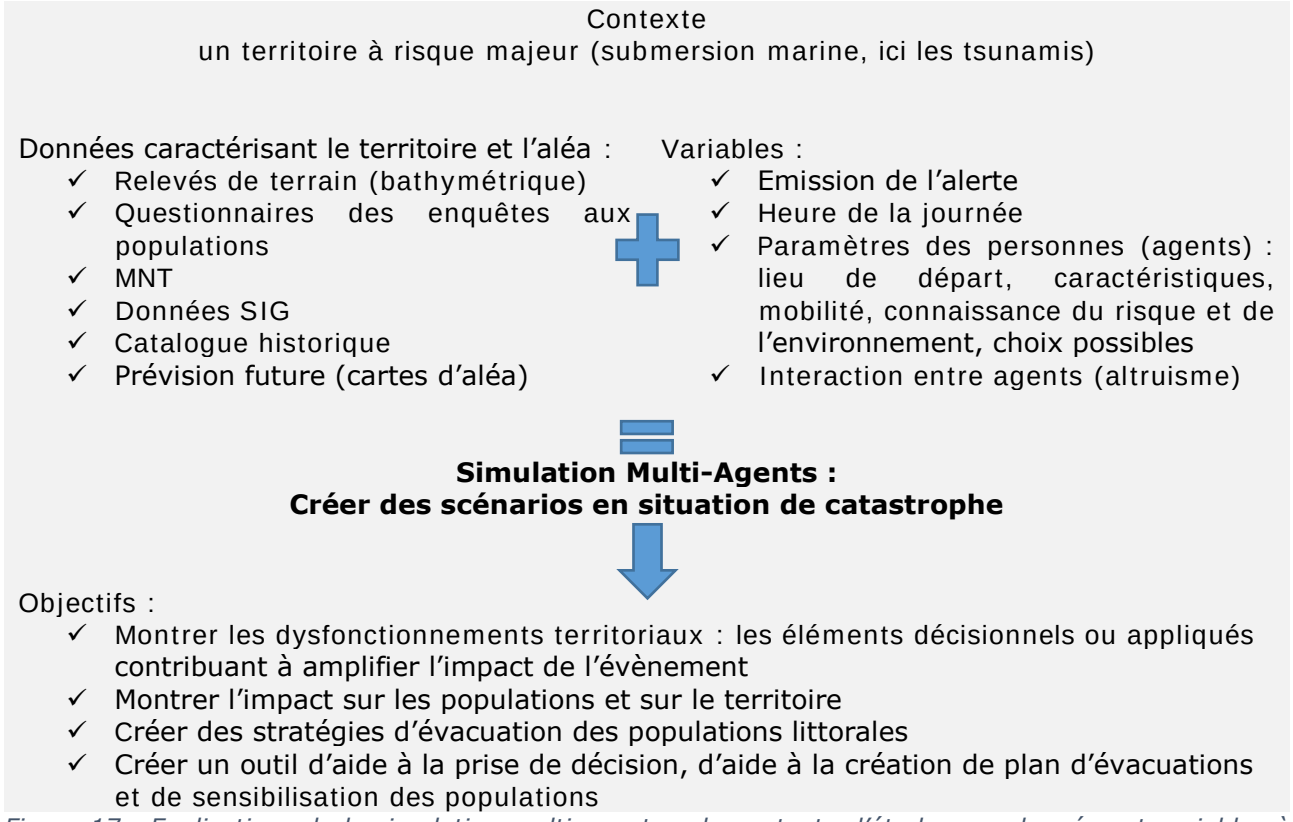


Figure 17 : Explications de la simulation multi-agents : du contexte d'étude, aux données et variables à prendre en compte pour créer des scénarios en situation de risque submersion marine.

SENSIBILISATION A L'ALEA TSUNAMI

L'évacuation reste la meilleure option pour sauver des vies lors d'un tsunami. Il faut alors prendre des mesures préventives pour faciliter géographiquement l'évacuation, communiquer sur la manière d'agir en cas de tsunami et former les populations à la culture du risque. L'objectif est de « créer » des populations résilientes dans des milieux urbains avec des plans d'évacuation efficaces, simples et connus **(Mas et al., 2015)**. **Sahal et al. (2013)** a étudié les méthodes d'évacuation à pied des plages de la Côte d'Azur française. Sur la Côte d'Azur, l'aléa tsunami est faible mais la vulnérabilité est très forte vu l'urbanisation très dense, la fréquentation et le manque de préparation et de culture du risque de la population présente. Pour construire les plans d'évacuation, il faut :

- ✓ déterminer l'exposition à l'aléa ;
- ✓ quantifier la population exposée ;
- ✓ identifier les zones d'évacuation et de refuge ;
- ✓ sélectionner ces zones en fonction de leur accessibilité.

Comment sélectionner justement les zones de refuge et les routes d'évacuation et améliorer l'aménagement urbain pour faciliter les évacuations ? Une approche à grande échelle (théorie de graphes) peut déterminer automatiquement les zones de refuge et les cartographier pour les mesurer et évaluer leur accès : le logiciel RouteFinder[26] trouve le chemin le plus court (en temps ou en distance) dans le graph en utilisant l'algorithme de Dijkstra **(Sahal et al., 2013)**. Pour cela, il faut également une cartographie précise du système routier. Une approche petit échelle sous forme de micro-simulations (le concept du multi-agent) simule la perte de vitesse engendrée par les interactions entre piétons et montre les problèmes de congestion lors de l'évacuation et permet de déterminer les améliorations à réaliser sur l'aménagement urbain (cas du logiciel SimWalk[27]).

En appliquant les simulations multi-agents sur des cartographies SIG avec l'aléa tsunami, il est également possible d'analyser la mobilité de la population localement et d'aider à la prévention des populations au risque tsunami par la communication des voies et zones d'évacuation **(Puckett, 2009)**.

[26] http://www.routeware.dk/
[27] http://simwalk.com/index.html

Bilan

Pour prévenir et protéger la population de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie, le projet TSUCAL tissé en partenariat entre l'IRD et le Gouvernement de Nouvelle-Calédonie, s'oriente vers une cartographie de l'aléa et des enjeux présents sur le territoire. La modélisation numérique des tsunamis sur la base d'un nouveau MNT permet de cartographier représenter l'aléa tsunami en fonction des hauteurs modélisées du niveau marin en chaque point de la côte. L'étude des enjeux se focalise sur la localisation précise et la plus pertinente de la population : une cartographie qui permet d'analyser à la fois l'impact des sirènes d'alerte pour la prévention ainsi que les écosystèmes protecteurs. Les perspectives du projet TSUCAL sont nombreuses : comme par exemple, obtenir une cartographie automatisée de l'aléa grâce à une base de données de scénarii exhaustive et représenter la localisation et les mouvements de la population au sein du tissu urbain, rural et littoral de la Nouvelle-Calédonie ainsi qu'étudier les paléo-tsunamis sur le territoire pour enrichir les données historiques sur les tsunamis en Nouvelle-Calédonie.

Le SIG cartographique qui sera fourni aux autorités se veut être précis dans sa méthodologie, performant dans son analyse de l'aléa et dynamique dans la représentation des enjeux. Il est force de proposition pour aller plus loin dans l'analyse et la cartographie de la vulnérabilité de la population. C'est un SIG directement utile et informatif.

Finalement, cartographier les enjeux et leur vulnérabilité réside à la fois dans une analyse scientifique et technique mais appelle également à la participation des personnes concernées pour évaluer leur vision du phénomène naturel, leur avis sur le risque et leurs possibles inquiétudes et questions sur la prévention et la protection face aux tsunamis. **Hirt et Roche, (2013)** indiquent que la cartographie participative vise à favoriser l'implication des communautés locales dans l'élaboration de cartes de vulnérabilité (ici, face à l'aléa tsunami) ou d'aménagements préventifs (ici, les sirènes) ou protecteurs (ici, les sentiers d'évacuation et les écosystèmes protecteurs) (cf. Image 7). En rendant la population active et actrice dans l'étude du risque tsunami, la cartographie participative, au même titre que l'enquête menée pendant le projet, fait réfléchir les habitants dans leur vision du risque et révèle une mémoire collective riche en informations **(Burini, 2008 ; David et al., 2018)**. Enfin, comme souligné par **Palsky, (2013)**, la cartographie participative devient donc la « cartographie de l'habitant » qui en fait usage et la personnalise selon ses savoirs propres : la carte collaborative est ainsi un lieu d'échange et de communication propice à une réduction de la vulnérabilité et à une meilleure résilience.

L'étude et la gestion des risques est une problématique forte pour nos générations tant les facteurs de vulnérabilité se sont démultipliés. Dans le cas des tsunamis, la littoralisation à l'échelle planétaire des activités humaines va généralement de pair avec une perte de la culture du risque. Le travail réalisé dans le cadre de ce stage en Nouvelle-Calédonie a soulevé de nombreuses questions sur la localisation des enjeux en zone littorale, sur l'emplacement des sirènes d'alerte pour prévenir la population et sur le rôle de la mangrove comme véritable frein contre les submersions marines. Idéalement, il serait très intéressant de poursuivre l'étude par une approche multi-agent bien plus précise géographiquement (étude de l'urbanisation côtière, des chemins les plus rapides d'évacuation, etc.) mais également socialement (étude du comportement des populations entre eux en cas de catastrophe par exemple). C'est une approche moderne et ambitieuse, intéressante à développer dans des zones au risque élevé (probablement sur les Iles Loyauté, l'Ile des Pins et les villes de la côte est de la Grande Terre). Enfin, on ne cessera de le répéter, l'éducation des populations dès le plus jeune âge sur les réflexes et les comportements à adopter associé à une communication régulière sur les risques naturels (au niveau communal ou par quartier) sont les éléments clés pour rendre la population moins vulnérable et plus prête à rebondir après une catastrophe.



Image 7 : Cartographie participative en modélisation 3D d'Ouvéa, Iles Loyauté, Nouvelle-Calédonie (photo Victor David, Ouvéa, 25 avril 2015). ***(David et al., 2018)***

Lexique

Acronyme	Signification
BDD	Base de données
BPR	Bottom Pressure Recorder
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CENALT	Centre National d'Alerte aux Tsunamis
CERTU	Centre d'Etude sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS	Centre National de Recherche Scientifique
CPS	Communauté du Pacifique
CRESICA	Consortium pour la Recherche, l'Enseignement Supérieur et l'Innovation Calédonien
CSI	Code de la Sécurité Intérieure
DART	Deep ocean Assessment and Reporting of Tsunami
DITTT	Direction des Infrastructures, de la Topographie et des Transports Terrestres – Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie
DSCGR	Direction de la Sécurité Civile et de la Gestion des Risques – Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie
DTSI	Direction des Technologies et Services de l'Information
ENS Lyon	Ecole Normale Supérieure de Lyon
ENSG-Géomatique	Ecole Nationale des Sciences Géographiques
ENTPE	Ecole de l'Aménagement Durable des Territoires (anciennement Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat)
ERP	Etablissement Recevant du Public
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans
Géorep	Portail de l'Information Géographique de la Nouvelle-Calédonie
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
IFREMER	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
IHO	International Hydrographic Organization
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques en France
IOC	Intergovernmental Oceanographic Commission
IPBES	Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
ISEE	Institut de la Statistique et des Etudes Economiques en Nouvelle-Calédonie – équivalent de l'INSEE en France
LEGOS	Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales
Master GRAINE	Master Gestion intégrée des Ressources nAturelles et des dynamIques eNvironnementales et paysagèrEs – Université Lumière Lyon 2 et ENS-Lyon
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MOST	Method of Splitting Tsunami
NC	Nouvelle-Calédonie
NetCDF	Network Common Data Form
NGDC	National Geophysical Data Center
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ODD	Objectifs de développement durable
ONU	Organisation des Nations unies
ORSEC	Organisation de la Réponse de la Sécurité civile
ORSNET	Oceania Regional Seismic NETwork
PMEL	Pacific Marine Environmental Laboratory
PPRL	Plan de Prévention des Risques Littoraux
PPRSM	Plan de Prévention des Risques de Submersion Marine
PTHA	Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for Australia

PTWC	Pacific Tsunami Warning Center
SGT	Service de la Géomatique et de la Télédétection
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
SIG	Système d'Information Géographique
TFE	Travail de Fin d'Etudes
TSUCAL	Projet Tsunami en Nouvelle-Calédonie
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UPS	Université Paul Sabatier
USGS	United States Geological Survey
ZEE	Zone Economique Exclusive
ZoNéCo	Zone Economique de Nouvelle-Calédonie

Glossaire

Mot	Signification
Bathymétrie	Science de la mesure des profondeurs et du relief de l'océan.
Guyot	Mont sous-marin.
Ilot	L'îlot, remplacé par le quartier IRIS en 2006, est « l'unité géographique de base pour la statistique et la diffusion des recensements de la population » employé par l'INSEE (www.insee.fr). Il est défini par l'INSEE en concertation avec les communes. Il représente soit un pâté d'habitations / de constructions en zone bâtie dense, soit un ensemble délimité par des voies en zone périphérique, d'où des surfaces souvent très variées.
Laisse	Dépôts d'algues et de matériaux organiques divers abandonnés par la mer à marée haute ou après une tempête **(Mallet et Michot, 2012)**.
Modélisation numérique dynamique	La modélisation numérique dynamique consiste à reproduire un phénomène naturel sur une durée donnée (aléa tsunami pendant une simulation d'une heure), ceci « afin de suivre son évolution temporelle et spatiale » **(Roger, 2011)**.
Œkoumène	Partie habitable de la surface terrestre.
Profondeur d'inondation	Distance maximale atteinte par le déferlement de la vague tsunami dans les terres.
Raster	Un raster est une matrice de cellules ou pixels organisées en lignes et colonnes. Chaque cellule représente une unité de surface contient et possède une valeur numérique mesurée ou estimée sur cet emplacement : dans le cas d'un MNT, il s'agit d'une information sur l'altitude, pour une carte de chaleur, l'information sera la température (https://learn.arcgis.com).
Run-up	Hauteur maximale de déferlement de la vague tsunami

Liste des Cartes

Carte 1 : Carte topographique de Nouvelle-Calédonie et du Vanuatu (Eric Gaba, commons.wikimedia). 9

Carte 2 : Carte de la zone de subduction de Nouvelle-Calédonie et du Vanuatu. Les points colorés correspondent à la sismicité relevée par l'USGS entre le 1er janvier 1900 et le 24 janvier 2019. La taille des points est liée à la magnitude du séisme. Les dates localisent les séismes qui ont provoqués des tsunamis enregistrés en Nouvelle-Calédonie par les marégraphes (étoiles blanches) et les capteurs de pressions (étoiles violettes). L'étoile jaune localise l'épicentre du séisme du 5 décembre 2018. **(Roger et al., in prep)** 14

Carte 3 : Carte des temps d'arrivées pour le tsunami du 5 décembre 2018. **(Roger et al., in prep.)** 15

Carte 4 : Représentation des hauteurs maximales d'un tsunami en tout point de la côte australienne. La taille de l'histogramme et la couleur sont fonctions de la hauteur maximale. **(Davies et Griffin, 2018)**..... 18

Carte 5 : 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 Nouméa, (c) zoom sur Ouvéa, iles Loyauté (données MNT, 2009). (Crédits B. Thomas)..... 22

Carte 6 : Population par commune en Nouvelle-Calédonie. Chaque entité entourée d'un liseré noir correspond à une commune (les îles Belep, les îles Loyauté et l'Ile des Pins sont des communes distinctes). Chaque cercle jaune est fonction du nombre d'habitants dans la commune (données ISEE, 2014). Les villes principales sont représentées par des carrés rouges. La ligne pointillée violette délimite la Province Nord de la Province Sud de la Grande Terre. **(Thomas et al., in prep.)**..... 24

Carte 7 : Densité de population par îlot de population en Nouvelle-Calédonie : (a) sur tout le territoire ; (b) zoom sur le Grand Nouméa (données ISEE, 2014). Le carré en pointillé noir localise le zoom (b). L'îlot hachuré correspond au plus grand îlot de population appelé Pourina Kouakoué. La ligne pointillée violette délimite la Province Nord de la Province Sud de la Grande Terre. **(Thomas et al., in prep.)** 25

Carte 8 : Population en zone littorale à moins de 10 m d'altitude en Nouvelle-Calédonie : (a) sur tout e territoire, (b) zoom sur le Grand Nouméa, (c) zoom sur Ouvéa, iles Loyauté (données ISEE, 2014). La densité de population sur tous les îlots est représentée comme sur Carte 7. Les cercles rose représentent le nombre d'habitants suivant l'échelle définie dans la légende, par zones peuplées dans la zone littorale de 0 m à 10 m. Les lignes grisées correspondent à la barrière de corail **(Andréfouët et al., 2006)**. (Crédits B. Thomas)..... 26

Carte 9 : Localisation des zones peuplées et représentation du nombre d'habitants en Nouvelle-Calédonie : (a) sur tout le territoire, (b) zoom sur le Grand Nouméa, (c) zoom sur Ouvéa, iles Loyauté (données ISEE, 2014). Les îlots de population sont représentés en gris sur le territoire. Les zones peuplées peuvent correspondre à un îlot dans le Grand Nouméa (b) ou bien à une partie de l'îlot sur le reste du territoire comme à Ouvéa par exemple (c). En effet, on remarque que les zones peuplées oranges ne couvrent pas entièrement les îlots (c). Les lignes grisées correspondent à la barrière de corail **(Andréfouët et al., 2006)**. (Crédits B. Thomas)..... 31

Carte 10 : Cartographie des zones peuplées à Lifou en fonction du nombre d'habitants : (a) sur tout le territoire, (b) dans la zone littorale à moins de 50 m d'altitude (bleu cyan) et (c) dans la zone littorale à moins de 20 m d'altitude (bleu foncé). (Crédits B. Thomas) 32

Carte 11 : Ensemble des enjeux sur le littoral de Nouvelle-Calédonie. (Crédits J. Roger) 35

Carte 12 : Localisation du bâti à Hienghène, Nouvelle-Calédonie, sur un fond topographique (données Géorep, 2019). Trois types de bâtiments sont identifiés : les rouges sont les établissements publics listés de 1 à 13, les bleus correspondent aux habitations et les verts identifient les infrastructures sportives. Les contours isolignes d'altitude sont indiqués tous les 20 m. L'étoile jaune localise le village de Hienghène en Nouvelle-Calédonie. **(Thomas et al., in prep.)** 35

Carte 13 : Identification des enjeux bâtis de secours, de santé, d'énergie des aéroports et ports en Nouvelle-Calédonie : (a) sur tout le territoire, (b) zoom sur le Grand Nouméa, (c) zoom sur Ouvéa, iles Loyauté (données Géorep, 2019). (Crédits B. Thomas) 37

Carte 14 : Bathymétrie de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie (données DTSI, 2009). 38

Carte 15 : Assemblage de tous les jeux de données en fonction de leur résolution. (Crédits B. Thomas et J. Roger) 42

Carte 16 : Représentation raster de la hauteur de vague maximale dans le cas d'un scénario de séisme nv_034_b (NOAA) en provenance du Vanuatu et de magnitude 7.5. Le fond gris correspond aux terres émergées de la Nouvelle-Calédonie et du Vanuatu. Deux erreurs liées à la qualité de la grille en ces points produisent des zones rouges au nord-ouest dans les récifs d'Entrecasteaux ainsi que au sud-est de Maré autour de Matthew et Hunter. Ces erreurs n'impactent cependant pas le reste de la modélisation. (Crédits B. Thomas) 45

Carte 17 : Représentation raster de la hauteur de vague maximale dans le cas des 16 scénarii en provenance du Vanuatu et de magnitude 7.5. Le fond gris correspond aux terres émergées de la Nouvelle-Calédonie et du Vanuatu. Deux erreurs liées à la qualité de la grille en ces points produisent des zones rouges au nord-ouest dans les récifs d'Entrecasteaux ainsi que au sud-est de Maré autour de Matthew et Hunter. Ces erreurs n'impactent cependant pas le reste de la modélisation. (Crédits B. Thomas) 46

Carte 18 : Représentation de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie par aplat de couleur fonction de la hauteur maximale de tsunami. Les points sont espacés chacun de 1 km. (Crédits B. Thomas)..... 48

Carte 19 : Représentation de l'aléa tsunami en Nouvelle-Calédonie par un histogramme dont la taille et la couleur sont fonction de la hauteur maximale de tsunami. (Crédits B. Thomas) 48

Carte 20 : Représentation de l'aléa tsunami à Lifou, Iles Loyauté en Nouvelle-Calédonie par un histogramme de couleur fonction de la hauteur maximale de la vague en tout point. Les points sont espacés chacun de 1 km. Les valeurs de hauteur sont données en cm. (Crédits B. Thomas) 49

Carte 21 : Représentation de l'aléa tsunami à Lifou accompagné des zones peuplées à moins de 20 m d'altitude. Les points sons espacés chacun de 1 km. Le zoom dans l'encadré noir est réalisé sur la commune principale de Wé. Les valeurs de hauteur sont données en cm. (Crédits B. Thomas)..... 50

Carte 22 : Localisation des zones d'action des sirènes de tsunami actuelles et proposées en Nouvelle-Calédonie : (a) sur tout e territoire, (b) zoom sur le Grand Nouméa, (c) zoom sur Ouvéa, iles Loyauté (données DSCGR, 2019). Les lignes grisées correspondent à la barrière de corail. Le fond coloré représente la densité de population par îlot (données ISEE, 2014). (Crédits B. Thomas)..... 55

Carte 23 : Juxtaposition des zones d'action des sirènes de tsunami actuelles et proposées à Lifou, Iles Loyauté, Nouvelle-Calédonie avec la cartographie de l'aléa tsunami et les zones peuplées situées dans la zone littorale 0_20 m. (Crédits B. Thomas)..... 56

Carte 24 : Extrait du poster présenté à l'IPBES. Représentation de la hauteur maximale du tsunami et de son impact sur les côtes néo-calédoniennes. Les récifs coralliens sont représentés par une ligne bleue verte autour du territoire. Les mangroves sont représentées en rose fuchsia. **(Thomas et al., 2019)**..... 58

Liste des Figures

Figure 1 : Schéma d'explication des liens entre aléa, vulnérabilité des enjeux et risque. (http://www.paysgrandbrianconnais.fr/) 11

Figure 2 : Schéma illustrant la formation d'un tsunami suite à un séisme (mouvement vertical abrupt du plancher océanique), la propagation des vagues et l'inondation sur le littoral. (https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Tsunami_comic_book_style.png) 12

Figure 3 : Schéma des caractéristiques physiques d'un tsunami à l'approche d'un rivage. (https://trestlessurfcrowd.wordpress.com/2010/02/28/tsunami-physics-and-trestles/) 13

Figure 4 : Exemple de cartographie pour un PPRSM à Andernos-les-Bains, Gironde (http://www.ecocitoyensdubassindarcachon.org/). 15

Figure 5 : Méthodologie choisie pour cartographier la population et le bâti en zone littorale. (Crédits B. Thomas)..... 19

Figure 6 : Superposition d'une zone agglo / peuplée (entité rouge) (données DITTT, 2014) avec le bâti (entités grises) (données BD TOPO© IGN, 2019). Exemple de la commune de La Tontouta : l'aéroport correspond aux plus gros bâtiments, les pistes ne sont pas représentées car elles sont considérées comme des zones de circulation (comme les routes) avec aucune population à proprement parler. (Crédits B. Thomas) 27

Figure 7 : Principe de dilatation et d'érosion à partir d'un élément géométrique (ici, on travaille sur le bâti) (https://github.com/ijpb/MorphoLibJ/)..... 28

Figure 8 : Superposition d'une zone agglo / peuplée (entité rouge) (données DITTT, 2014) avec la tache urbaine obtenue (entités jaunes) et le bâti (entités grises) (données BD TOPO© IGN, 2019). Exemple de la commune de La Tontouta. (Crédits B. Thomas) 29

Figure 9 : Schéma de l'étape 2. La zone agglo est en rouge. Les taches urbaines grises sélectionnées en jaune sont celles qui intersectent la zone agglo ou qui ont une superficie supérieure à 1 km². Les taches urbaines non sélectionnées (juste en gris) ne correspondent pas à ces critères. (Crédits B. Thomas) 30

Figure 10 : Schéma de l'étape 3. La zone agglo est en rouge foncé. On ne choisit cette fois que les taches urbaines à moins de 200 m de la zone agglo (rayon d'action en rouge clair) : les taches urbaines grises sont sélectionnées en jaune. (Crédits B. Thomas)..... 30

Figure 11 : Graphique des pourcentages d'habitants par commune et par zone littorale (50 m, 20 m et 10 m). (Crédits B. Thomas) 33

Figure 12 : Graphique des pourcentages de bâti à enjeux en zone littorale (bleu foncé). Zoom sur les casernes de pompiers et les centres de secours en orange. (Crédits B. Thomas) 37

Figure 13 : Zoom sur la région de Bourail montrant le manque de couverture bathymétrique dans le lagon et les estuaires (imprimé d'écran Global Mapper, données du MNT 2009). Les données en bleu sont des données bathymétriques. Les terres émergées correspondent à la zone marron entourée d'un liseré rouge. Ainsi, le manque de données sont visibles dans les parties en jaune pastel. (Crédits J. Roger)..... 39

Figure 14 : Localisation de deux profils bathymétriques sur la zone de Bourail (lignes jaunes) à cheval sur différents jeux de données bathymétriques à 500 m, 100 m, 50 m et 25 m (imprimé d'écran Global Mapper). **(Crédits J. Roger)**..... 40

Figure 15 : Simulation de la propagation d'un tsunami de magnitude 7.5 au bout de 2 h de propagation. Le zoom est réalisé sur la Baie des Citrons à Nouméa. (Crédits J. Roger) 44

Figure 16 : Zoom de la Carte 17 précédente sur l'Ile des Pins qui souligne l'imprécision de la grille bathymétrique à 100 m qui a des conséquences alors sur la modélisation de l'aléa en bordure de côte. (Crédits B. Thomas) 47

Figure 17 : Explications de la simulation multi-agents : du contexte d'étude, aux données et variables à prendre en compte pour créer des scénarios en situation de risque submersion marine. 60

Liste des Images

Image 1 : Magnet de prévention du risque tsunami en Nouvelle-Calédonie réalisé par le Haut-Commissariat de la République. « Casse-pas la tête » est une expression locale qui signifie « reste cool »..... 2

Image 2 : Vue aérienne du centre IRD de Nouméa dans la baie de l'Anse Vata (photo IRD).... 6

Image 3 : Kiki Beach, Lifou, Iles Loyauté (Crédits B. Thomas) 10

Image 4 : Exemples de coupures de journaux suite aux tsunamis en Indonésie de 2004 et au Japon de 2011 (sources Google Images). 51

Image 5 : Photographies de digues au Japon : une digue submergée par le tsunami de 2011 à gauche et une nouvelle digue construite en 2018 (sources Google Images). 52

Image 6 : Brochure de prévention sur l'alerte tsunami en Polynésie française (https://polynesie-francaise.pref.gouv.fr). 57

Image 7 : Cartographie participative en modélisation 3D d'Ouvéa, Iles Loyauté, Nouvelle-Calédonie (photo Victor David, Ouvéa, 25 avril 2015). **(David et al., 2018)**..... 63

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Nomenclature des types d'enjeux présents en Nouvelle-Calédonie. Les enjeux indiqués en gras sont présents sur la cartographie suivante et sont ainsi considérés, dans le cadre de ce rapport de stage, comme les enjeux forts face à un aléa de submersion marine. (Crédits B. Thomas)..... 36

Tableau 2 : Liste des jeux de données bathymétriques et topographiques utilisés pour la mise à jour du MNT Nouvelle-Calédonie..... 41

Bibliographie

[1] **Andréfouët S., Muller-Karger F. E., Robinson J. A., Kranenburg C. J., Torres-Pulliza D., Spraggins S. A., Murch B. (2006).** Global assessment of modern coral reef extent and diversity for regional science and management applications: a view from space. Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium, 1732-1745.

[2] **Arnaud A. (2015).** Les limites de la cartographie des risques littoraux : des perspectives pour la compréhension de tous. VertigO – la revue électronique en sciences de l'environnement, Hors-série 21, https://doi.org/10.4000/vertigo.15743.

[3] **Bécart H. (2017).** Cartographie de la population à l'échelle des zones urbaines. CARTUGA, http://cartuga.fr/?p=541.

[4] **Beck M. W., Losada I. J., Menendez P., Reguero B. G., Diaz-Simal P., Fernandez F. (2018).** The Global Flood Protection Savings Provided by Coral Reefs. Nature Communications 9 2186, https://doi.org/10.1038/s41467-018-04568-z.

[5] **Benzoni F. (2018).** Les coraux de récifs de Nouvelle-Calédonie, un patrimoine diversifié et précieux. Dans **Payri C. E. (ed.) (2018).** Nouvelle-Calédonie, archipel de corail. IRD Editions/Solaris, 49-60.

[6] **Bonvallot J., Gay J.-Ch., Habert E. (2012).** Atlas de la Nouvelle-Calédonie. IRD – Congrès de la Nouvelle-Calédonie, planche 16, 272 pages, ISBN 978-2-7099-1740-7.

[7] **Borden K. A., Schmidtlein M. C., Emrich C. T., Piegorsch W. W., Cutter S. L. (2007).** Vulnerability of U.S. Cities to Environmental Hazards. Journal of Homeland Security and Emergency Management, 4 (2) (5), https://doi.org/10.2202/1547-7355.1279.

[8] **Bousquet B. (1990).** Définition et identification du littoral contemporain. Revue Juridique de l'Environnement, 4, L'aménagement et la protection du littoral, 451-468, https://doi.org/10.3406/rjenv.1990.2637.

[9] **Boyrie N. (2011).** Cartographie de l'aléa tsunami. Géorep, http://sig-public.gouv.nc/methodologie_tsunami.pdf.

[10] **Brittin Rachel. (2014).** Coral Reefs Reduce Risks from Natural Hazards. A scientific summary from The Pew Charitable Trusts.

[11] **Broustet D., Rivoilan P. (2015).** Recensement de la population en Nouvelle-Calédonie en 2014. Une démographie toujours dynamique. Insee Première, 1572, https://www.insee.fr/fr/statistiques/1560282.

[12] **Burini F. (2008).** La cartographie participative et la pratique du terrain dans la coopération environnementale : la restitution des savoirs traditionnels des villages de l'Afrique subsaharienne. A travers l'espace de la méthode : les dimensions du terrain en géographie, juin 2008, https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00389595.

[13] **Carugati L., Gatto B., Rastelli E., Lo Martire M., Coral C., Greco S., Danovaro R. (2018).** Impact of mangrove forests degradation on biodiversity and ecosystem functioning. Scientific Reports, 8 (13298), https://doi.org/10.1038/s41598-018-31683-0.

[14] **Chen K., McAneney J. (2006).** High-resolution estimates of Australia's coastal population. Geophysical Research Letters, 33 (L16601), https://doi.org/10.1029/2006GL026981.

[15] **Cillaurren E., David G., Grandperrin R. (2002).** Atlas des pêcheries côtières de Vanuatu. Un bilan décennal pour le développement. IRD, ISBN 2-7099-1483-2.

[16] **Cohen J. E., Small C., Mellinger A., Gallup J., Sachs J. (1997).** Estimates of coastal populations. Science, https://doi.org/10.1126/science.278-5341-1209c.

[17] **Daluzeau J., Gralepois M., Oger C. (2013).** La résilience face à la normativité et la solidarité des territoires. EchoGéo, 24, https://doi.org/10.4000/echogeo.13445.

[18] **Dauphiné A., Provitolo D. (2007).** La résilience : un concept pour la gestion des risques. Annales de géographie, 654, 115-125, https://doi.org/10.3917/ag.654.0115.

[19] **David V., Despinoy M., Mitran S. (2018).** Rapport final du Projet FRAGILES. IRD Nouvelle-Calédonie, 44 pages.

[20] **Davies G., Griffin J. (2018).** The 2018 Australian probabilistic tsunami hazard assessment: hazard from earthquake generated tsunamis. Geoscience Australia, 2018/41, https://doi.org/10.11636/Record.2018.041.

[21] **Decaulne A. (2001).** Mémoire collective et perception du risque lié aux avalanches et aux coulées de débris dans un fjord islandais : l'exemple du site d'Isafjördur (Islande nord-occidentale). Revue de Géographie Alpine, 89 (3), 63-80, https://doi.org:10.3406/rga.2001.3049.

[22] **Deville P., Linard C., Martin S., Gilbert M., Stevens F. R., Gaughan A. E., Blondel V. D., Tatem A. J. (2014).** Dynamic population mapping using mobile phone data. PNAS, 111 (45), 15888-15893, https://doi.org/10.1073/pnas.1408439111.

[23] **Direction de la Sécurité Civile et de la Gestion des Risques (DSCGR). (2012).** Plan ORSEC Tsunami. Haut-Commissariat de la République en Nouvelle-Calédonie.

[24] **Le Duff M., Dumas P., Allenbach M. (2014).** Quelle gouvernance des risques littoraux aux îles Loyauté (Nouvelle-Calédonie) dans le cadre du réchauffement climatique ? Papier de conférence, https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25631.15526.

[25] **Le Duff M., 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 - la revue électronique en sciences de l'environnement, 16 (3), https://doi.org/10.4000/vertigo.17951.

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

[27] **Dumas P. (2013).** Anthropization of New Caledonia's southwestern coastland: a satellite remote-sensing analysis of coastland environment changes. Université de Nouvelle-Calédonie.

[28] **Dumas P., Fotsing J.-M., David G. (2005).** Essai de délimitation de la partie terrestre du littoral à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) : application à la Grand Terre – Nouvelle-Calédonie. Apports des SIG au monde de la recherche, actes du colloque international Géomatique et applications, Presse Universitaire d'Orléans, 77-91, ISBN 2-913454-25-9.

[29] **Ellison J.C. (2015).** Vulnerability assessment of mangroves to climate change and sea-level rise impacts. Wetlands Ecology and Management, 23 (2), 115-137, https://doi.org/10.1007/s11273-014-9397-8.

[30] **Etienne J.-C., Courteau R. (2009).** Rapport sur les dispositifs d'alerte aux tsunamis en France et dans le monde. Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 1808 Assemblé Nationale, 546 Sénat.

[31] **Füssel H.-M. (2012).** Vulnerability of coastal populations. European Environment Agency, https://doi.org/10.1007/978-94-007-4540-7_5.

[32] **Genevois S., Leininger-Frézal C. (2010).** Les « serious games » : un outil d'éducation au développement durable ? Colloque International « Education au développement durable et à la biodiversité : concepts, questions vives, outils et pratiques », halshs-00957901.

[33] **GIEC. (2007).** Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [Publié sous la direction de Pachauri R. K., Reisinger A.] GIEC, 103 pages, https://ipcc.ch.

[34] **Gilman E.L., Ellison J., Duke N.C., Field C. (2008).** Threats to mangroves from climate change and adaptation options: a review. Aquatic Botany, 89 (2), 237-250, https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.009.

[35] **Gonson C., Ferraris J., Pelletier D., Jollit I. (2018).** Le lagon, un patrimoine naturel et un espace de loisirs. Dans **Payri C. E. (ed). (2018).** Nouvelle-Calédonie, archipel de corail. IRD Editions/Solaris, 211-215.

[36] **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, http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.07.009.

[37] **Grandperrin J., De Forges B. R., Auzende J. M. (1997).** Ressources marines de Nouvelle-Calédonie. Le Programme ZoNéCo.

[38] **Gratton Y. (2002).** Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique, 4 pages.

[39] **Hébert H., Schindele F., Sladen A. (2005).** Comprendre et prévenir les tsunamis : les apports de la simulation numérique. CEA, Département Analyse surveillance environnement, Annales des Mines.

[40] **Herrenschmidt J.-B. (2004).** Territoire coutumiers et projet de développement en Mélanésie du Sud (Iles Loyauté, Vanuatu, Fidji). Thèse de doctorat en géographie, Université Paris IV Sorbonne, 656 pages.

[41] **Hirt I., Roche S. (2013).** Cartographie participative. [Avec la collaboration de : Casillo I., Barbier R., Blondiaux L., Chateauraynaud F., Fourniau J.-M., Lefebvre R., Neveu C., Salles D.] Dictionnaire critique et interdisciplinaire de la participation, GIS Démocratie et Participation, ISSN : 2268-5863, http://dicopart.fr/fr/dico/cartographie-participative.

[42] **Ioualalen M., Pelletier B. (2005).** Rapport de fin d'études sur l'estimation des risques de tsunamis pour les Iles Loyauté. IRD Nouvelle-Calédonie, 14 pages.

[43] **Jambeck J. R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T. R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K. V. (2015).** Plastic waste inputs from land into the ocean. Sciencemag Marine Pollution, 347 (6223), https://doi.org/10.1126/science.1260879.

[44] **Kathiresan K. (2012).** Importance of Mangrove Ecosystem. International Journal of Marine Science, https://doi.org/10.5376/ijms.2012.02.0010.

[45] **Kathiresan K., Rajendran N. (2005).** Coastal mangrove forests mitigated tsunami. Estuarine, Coastal and Shelf Science 65, https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.06.022.

[46] **Kunkel C. M., Hallberg R. W., Oppenheimer M. (2006).** Coral Reefs Reduce Tsunami Impact in Model Simulations. Geophysical Research Letters 33, 23, https://doi.org/10.1029/2006GL027892.

[47] **Labeur C. (2013).** Raconter l'inondation : quand les récits de catastrophes se font mémoire du risque. Géocarrefour, 88 (1), https://doi.org/10.4000/geocarrefour.8937.

[48] **Lamarche G., Mountjoy J., Popinet S., Pelletier B., Goff J., Bind J., Woelz S. (2013).** Tsunami hazard in Wallis and Futuna: scenario-based numerical modelling and paleo-tsunami record. National Institute of Water & Atmospheric Research.

[49] **Laso Bayas J. C., Marohn C., Dercon G., Dewi S., Piepho H. P., Joshi L., Van Noordwijk M., Cadisch G. (2011).** Influence of Coastal Vegetation on the 2004 Tsunami Wave Impact in West Aceh. Proceedings of the National Academy of Sciences 108, 46, https://doi.org/10.1073/pnas.1013516108.

[50] **Levy J. (2002).** Un tournant cartographique ? Ces territoires qui se dessinent. [Direction d'ouvrage : Debarbieux B., Vanier M.] Édition de l'Aube Datar, Bibliothèque des territoires, 129-144.

[51] **Loi Littoral. (1986).** Loi relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral. Parlement français, loi n°86-2, https://legifrance.gouv.fr.

[52] **Loriot P. (2008).** Détermination d'un MOS et calcul d'une tache urbaine à partir de la BD TOPO© de l'IGN. Centre d'Etude sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU), http://www.certu.fr.

[53] **Mallet C., Michot A. (2012).** Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte. [Avec la collaboration de : De La Torre Y., Laffon V., Robin M., Prevoteaux B.] Rapport BRGM / RP-60616-FR, 162 pages.

[54] **De Martonne E. (1909).** Traité de géographie physique.

[55] **Mas E., Koshimura S., Imamura F., Suppasri A., Muhari A., Adriano B. (2015).** Recent advances in agent-based tsunami evacuation simulations: case studies in Indonesia, Thailand, Japan and Peru. Pure Appl. Geophysics, 172, 3409-3424, https://doi.org/10.1007/s00024-015-1105-y.

[56] **Maurizot P., Vende-Leclerc M., Collot J. (2009).** New Caledonia geological map and explanatory notes, scale 1/500 000. Directe de l'Industrie, des Mines et de l'Energie, Service de la Géologie de Nouvelle-Calédonie, Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

[57] **Monismith S. G., Rogers J. S., Koweek D., Dunbar R. B. (2015).** Frictional wave dissipation on a remarkably rough reef. Geophysical Research Letter, 42, https://doi.org/10.1002/2015GL063804.

[58] **Nicholls R. J., Small C. (2002).** Improved estimates of coastal population and exposure to hazards released. Eos, Transactions American Geophysical Union, 83 (28), 301-305, https://doi.org/10.1029/2002EO000216.

[59] **NOAA. (2006).** Method of Splitting Tsunami (MOST) Software Manual. NOAA PMEL, Tsunami Research Program.

[60] **NOAA. (2019).** National Geophysical Data Center / World Data Service: NCEI/WDS Global Historical Tsunami Database. NOAA National Centers for Environmental Information, https://doi.org/10.7289/V5PN93H7.

[61] **Okal E. A. (1988).** Seismic parameters controlling far-field tsunami amplitudes: a review. Natural Hazards 1, 67-96.

[62] **Palsky G. (2013).** Cartographie participative, cartographie indisciplinée. L'Information géographique, 2013/4, 77, 10-25, https://doi.org/10.3917/lig.774.0010.

[63] **Pelletier B. (2006).** Geology of the New Caledonia region and its implications for the study of the New Caledonian biodiversity. Documents Scientifiques et Techniques, II 7.

[64] **Pelletier B., Pillet R. (2004).** Tectonique active, tsunamis et sismicité en Nouvelle-Calédonie. Notes techniques sciences de la terre, géologie, géophysique, 28.

[65] **Plattard O. (2016).** La modélisation multi-agents, un outil de prévention des risques. CIST2016 3ième colloque international du CIST : en quête de territoire(s)? halshs-01300835.

[66] **Polidoro B.A., Carpenter K.E., Collins L., Duke N.C., Ellison A.M., Ellison J.C., Farnsworth E.J., Fernando E.S., Kathiresan K., Keodam N.E., Livingstone S.R., Miyagi T., Moore G.E., Ngoc Nam V., Eong Ong J., Primavera J.H., Salmo S.G., Sanciangco J.C., Sukardjo S., Wang Y., Wan Hong Gong J. (2010).** The loss of species: Mangrove extinction risk and geographic areas of global concern. PLoS ONE, 5 (4) e10095, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010095.

[67] **Puckett R. R. (2009).** Multi-agent crowd behavior simulation for tsunami evacuation. Department of information and computer sciences of the University of Hawai'i in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Computer Science.

[68] **Ratzov G. (2009).** Processus gravitaires sous-marins le long de la zone de subduction Nord Equateur – Sud Colombie : apports à la connaissance de l'érosion tectonique et de la déformation d'une marge active, et implications sur l'aléa tsunami. Géophysique physics.geo-ph, Université de Nice Sophia Antipolis, tel-02129566.

[69] **Roger J. (2011).** Tsunamis générés par des séismes au niveau de la zone de collision entre les plaques africaine et eurasienne : études de cas pour l'évaluation du risque tsunami en Méditerranée occidentale et Atlantique nord. Géophysique physics.geo-ph, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, tel-00588880.

[70] **Roger J., Aucan J., Pelletier B., Lebellegard P., Lefèvre J. (*in prep*).** The December 5, 2018 Mw 7.5 earthquake on the south Vanuatu subduction zone: numerical modeling and development of a scenario database for New Caledonia tsunami hazard assessment.

[71] **Roger J., Dubon B., Krien Y., Zahibo N. (2014).** Discussion about tsunami interaction with fringing coral reef. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7269-4_8.

[72] **Roger J., Pelletier B., Aucan J. (2019).** Update of the tsunami catalogue of New Caledonia using a decision table based on seismic data and maregraphic records. Natural Hazards and Earth System Sciences, 19 (7), 1471-1483, https://doi.org/10.5194/nhess-19-1471-2019.

[73] **Sabinot C, David G., Juncker M., Bouard S., Fosier C., Mallet J., Kombouare F. (2018).** Pêches identitaires, nourricières et commerciales dans les écosystèmes récifaux. Dans **Payri C. E. (ed.) (2018).** Nouvelle-Calédonie, archipel de corail. IRD Editions/Solaris, 191-198.

[74] **Sabinot C., Lacombe S. (2015).** La pêche en tribu face à l'industrie minière dans le sud-est de la Nouvelle-Calédonie. Revue de la Société de biométrie humaine, 18 pages.

[75] **Sahal A. (2011).** Le risque tsunami en France : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque. Géographie, Université Panthéon-Sorbonne-ParisI, tel-00651617v2.

[76] **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. Natural Hazards Earth System Science, 13, 1735-1743, https://doi.org/10.5194/nhess-13-1735-2013.

[77] **Sahal A., Pelletier B., Chatelier J., Lavigne F., Schindele F. (2010).** A catalog of tsunamis in New Caledonia from 28 March 1875 to September 2009. Comptes Rendus Geoscience Elsevier, 342, 434-447, https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.01.013.

[78] **Sajjaduzzaman M.D., Muhammed N., Koike M. (2005).** Mangrove plantation destruction in Noakhali coastal forests of Bangladesh: A case study on causes, consequences

and model prescription to halt deforestation. International Journal of Agriculture & Biology, 7 (5), 732-734.

[79] **Scarwell H.-J. (2007).** Déconstruire les logiques de gestion du risque d'inondation. De la résistance à la résilience : quelle adaptation de la prévention des risques naturels au réchauffement climatique ? Air Pur, 72, 24-31.

[80] **Thomas B., Roger J., Aucan J. (2019).** Ecosystems services provided by coral reefs and mangroves against tsunamis: keys for New Caledonia. Poster pour l'atelier régional IPBES à Nouméa du 24 et 25 juin 2019, thématique sur la biodiversité en Océanie.

[81] **Thomas B., Roger J., Gunnell Y., Aucan J. (*in prep.*).** Representing coastal population for submersion hazard assessment: case study of New Caledonia. Progress in Disaster Science, Elsevier.

[82] **Commission océanographique intergouvernementale, UNESCO. (2013).** Préparation aux tsunamis : Protection civile – Guide des bonnes pratiques. COI Manuels et guides, 65.

[83] **Veyret Y., Reghezza M. (2005).** Aléas et risques dans l'analyse géographique. Annales des Mines, Responsabilité & Environnement.

[84] **Veyret Y., Reghezza M. (2006).** Vulnérabilités et risques. L'approche récente de la vulnérabilité. Vulnérabilité et Risques, Responsabilité & Environnement, 43.

[85] **Yanagisawa H., Koshimura S., Goto K., Miyagi T., Imamura F., Ruangrassamee A., Tanavud C. (2009).** The reduction effects of mangrove forest on a tsunami based on field surveys at Pakarang Cape, Thailand and numerical analysis. Estuarine, Coastal and Shelf Science 81, 27-37, Elsevier, https://doi.org:10.1016/j.ecss.2008.10.001.

Annexe : le poster réalisé pour l'IPBES

La Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES) est un groupe international d'experts sur la biodiversité. Sous l'égide de l'Organisation des Nations unies (ONU), l'IPBES a pour objectifs d'assister les gouvernements et de renforcer les moyens des pays émergents sur les questions de biodiversité.

La 7ième conférence s'est déroulée à Paris du 29 avril au 4 mai 2019. L'objectif était d'établir une première évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques. Dans la suite de cette session, plusieurs acteurs de la région Océanie se sont associés pour organiser à Nouméa, les 24 et 25 juin 2019, l'atelier régional *Biodiversité en Océanie* qui se focalise sur la biodiversité et les services écosystémiques spécifiques au Pacifique insulaire.

Dans ce cadre, j'ai réalisé un poster sur le rôle des récifs corallien et des mangroves sur la protection des populations et des infrastructures contre les submersions marines.

Biodiversité en Océanie

Atelier régional #IPBES — Nouméa, 24 & 25 juin 2019

Ecosystems services provided by coral reefs and mangroves against tsunamis: keys for New Caledonia

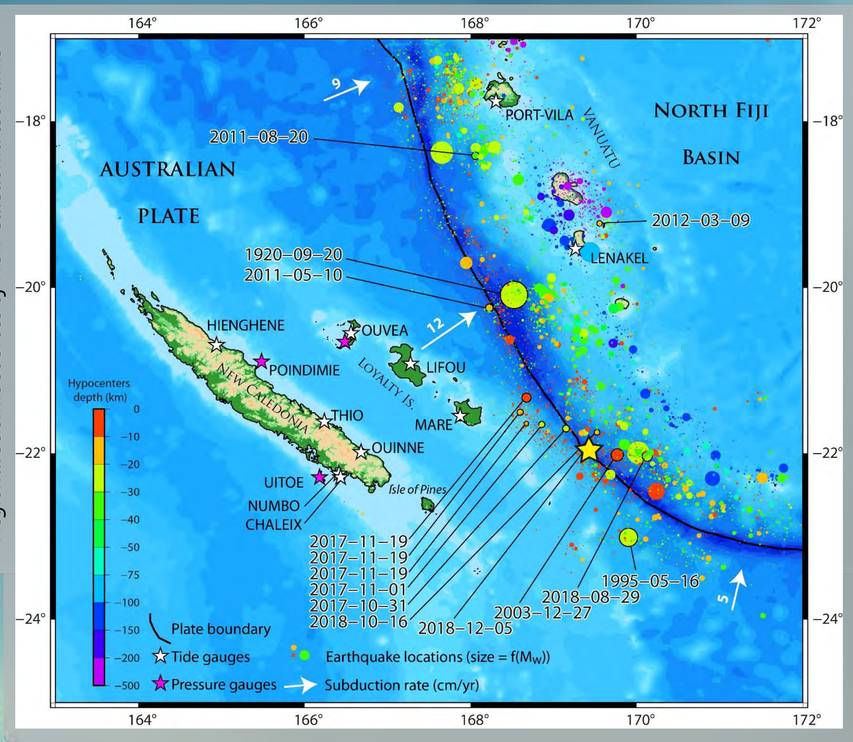
This study concentrates on the role played by coral reefs and mangroves to protect population from tsunamis within the context of sea level rise and coastal anthropization.

1 – Generalities

Over the last 150 years, at least 37 tsunamis have reached the shores of New Caledonia (Roger et al., 2019). From local to regional and far-field seismic sources, waves showing a maximum of up to 2 m have been reported, sometimes causing destructions and even once, killing people in Lifou, Loyalty Islands, in 1875.

New Caledonia is a sparsely populated island of circa 280000 inhabitants surrounded by a great coral reef barrier and mangroves. Within the framework of the TSUCAL project, it has been estimated that 85% of the island population is living within the coastal fringe, below 20 m high: what about this population's vulnerability towards tsunami future potential submersions?

The aim of the present study is to provide keys which could help risk managers in terms of coastal development in New Caledonia by trying to answer the question: where should we look at the waves more accurately?



2 - Mapping Method

- Coastal area below 20 m elevation
- Coastal population living below 20 m elevation
  - function of the number
  - precise data of populated areas from ISEE New Caledonia (Institute of Statistics and Economic Studies)

80 cm — Tsunami maximum amplitude for the model example — 0 cm

East coast uplift: mangroves only near estuaries

West coast subsidence: wall of mangroves with some gaps

Seismic source of the tsunami model
- *South Vanuatu Trench*
- *magnitude Mw = 7.5 earthquake*
- *23 km depth*

0 25 50 100 Kilomètres

Mapping Mangroves

✓ *Slowing down tsunamis – filtering role of the mangrove*

Mangrove attenuate directly waves by providing additional drag against wave energy through their trunks, as well as the aerial roots that can attenuate surge energy by adding friction (Laso Bayas and al., 2011). Existing dense coastal vegetation in front of settlements also reduces casualties by an average of 5%.

✓ *Preserving mangrove ecosystem in New Caledonia*

On the west coast of New Caledonia, mangrove is widely present in front of villages (i.e. zoom 1), reintroduction in the gaps would help protecting tribes. Mangroves also provide ecosystemic services, especially in terms of fish development (Kathiresan, 2012).

Mapping Coral Reef

✓ *Slowing down tsunamis – filtering role of the reef*

Coral reef barriers could reduce tsunami impact on the coast by decreasing the wave energy by 80% thanks to frictional processes (Kunkel and al., 2006). However, for a very large wave amplitude, empirical evidence in the 2004 Indian Ocean tsunami highlights that the regions with coral reefs were impacted as much as regions with no reefs.

✓ *Preserving coral reef in New Caledonia*

The shape and features of coral reefs in New Caledonia help it to be a buffer against tsunamis (i.e. zoom 2). Openings are the damper in this study but underline the importance of restoring and protecting much more reefs, as it can be a cost-effective approach to enhance first line coastal defense (Brittin, 2014).

3 – Modeling and Mapping Perspectives

- ✓ with or without the coral reef barrier
- ✓ with or without the natural gaps in the coral reef barrier
- ✓ with or without mangroves by placing them strategically in front of gaps in the coral reef barrier (reintroduction of mangroves ecosystems)
- ✓ with variable friction parameters on the coral reef barrier
- ✓ for multiple ranges of tsunamis (origin, depth, magnitude, amplitude)
- ✓ highlight the ideal set of coral reef barrier and mangroves to protect from tsunamis
- ✓ work on the mapping of population facing coral reef barrier / mangroves responses to tsunamis: http://maps.oceanwealth.org/# (Beck and al., 2018)

Bruce THOMAS | IRD – Nouvelle-Calédonie
bruce.eo.thomas@gmail.com
Jean ROGER | IRD – Nouvelle-Calédonie
jean.roger@ird.fr
Jérôme AUCAN | IRD – Nouvelle-Calédonie
jerome.aucan@ird.fr

References

- Beck, Michael W., Iñigo J. Losada, Pelayo Menéndez, Borja G. Reguero, Pedro Díaz-Simal, et Felipe Fernández. « The Global Flood Protection Savings Provided by Coral Reefs ». Nature Communications 9, no 1 (décembre 2018): 2186. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04568-z.
- Brittin, Rachel. « Coral Reefs Reduce Risks From Natural Hazards », A scientific summary from The Pew Charitable Trusts, mai 2014.
- Kathiresan, K. « Importance of Mangrove Ecosystem ». International Journal of Marine Science, 2012. https://doi.org/10.5376/ijms.2012.02.0010.
- Kunkel, Catherine M., Robert W. Hallberg, et Michael Oppenheimer. « Coral Reefs Reduce Tsunami Impact in Model Simulations ». Geophysical Research Letters 33, no 23 (14 décembre 2006): L23612. https://doi.org/10.1029/2006GL027892.
- Laso Bayas, J. C., C. Marohn, G. Dercon, S. Dewi, H. P. Piepho, L. Joshi, M. van Noordwijk, et G. Cadisch. « Influence of Coastal Vegetation on the 2004 Tsunami Wave Impact in West Aceh ». Proceedings of the National Academy of Sciences 108, no 46 (15 novembre 2011): 18612-17. https://doi.org/10.1073/pnas.1013516108.
- Roger, Jean, Bernard Pelletier, et Jérôme Aucan. « Update of the Tsunami Catalogue of New Caledonia Using Adecision Table Based on Seismic Data and Maregraphic Records ». Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 26 février 2019, 1-22. https://doi.org/10.5194/nhess-2019-36.