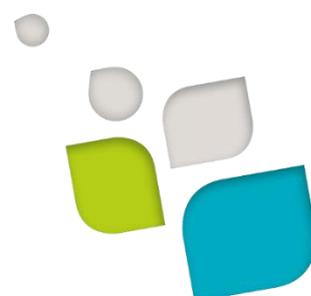


CARACTERISATION DE L'ALEA SUBMERSION MARINE D'ORIGINE CYCLONIQUE VIA LES DONNEES LIDAR A TAHITI, MOOREA ET BORA BORA

Phases 2 et 3 — Modélisation et transcription de l'aléa



© Ben Thouard, dec. 2017



V2 – Mai 2022

	<p>BRL ingénierie</p> <p>1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5</p>
<p>Sous-traitant 1</p> 	<p>GlobOcéan</p> <p>45 Avenue de la 1ère Armée 83300 Draguignan France</p>
<p>Sous-traitant 2</p> 	<p>Sarl Pae Tai Pae Uta</p> <p>BP 1 746, 98 713 Papeete Tahiti - Polynésie</p>

Date du document	25/05/2022
Contact	<p>François CARNUS : francois.carnus@brl.fr / +33 4 66 87 52 87</p> <p>Ludovie LE COZ : ludovie.lecoz@brl.fr / +33 4 66 87 81 87</p>

Titre du document	<p>CARACTERISATION DE L'ALEA SUBMERSION MARINE D'ORIGINE CYCLONIQUE VIA LES DONNEES LIDAR A TAHITI, MOOREA ET BORA BORA Phases 2 et 3 – Modélisation et transcription de l'aléa</p>
Référence du document :	<p>P:\BRL\Carnus\A00851_Alea_Submersion_Marine_Pacifique\7_Production\2_Phase2\0_Rapport\rapport_phases2_3_tahitiV2.docx</p>
Indice :	V2

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
20/05/22	V1	DRAFT	LLC, GCO	x
25/05/22	V2		LLC, GCO	FCA

CARACTERISATION DE L'ALEA SUBMERSION MARINE D'ORIGINE CYCLONIQUE VIA LES DONNEES LIDAR A TAHITI, MOOREA ET BORA BORA

Phases 2 et 3 – Modélisation et transcription de l'aléa

PRÉAMBULE	11
1 APPROCHE GÉNÉRALE	13
1.1 DEFINITION DE LA SUBMERSION MARINE (GUIDE PPRL 2014).....	13
1.2 ZONE D'ETUDE	13
1.3 PRINCIPE DE LA DEMARCHE	14
2 EVÈNEMENTS CYCLONIQUES DE RÉFÉRENCE	17
2.1 RAPPELS SUR L'ANALYSE DES CONDITIONS CYCLONIQUES	17
2.1.1 Points représentatifs	17
2.1.2 Paramètres étudiés et conventions utilisées	18
2.1.3 Détermination des conditions extrêmes cycloniques	18
2.2 SÉLECTION DES EVÈNEMENTS DE RÉFÉRENCE	22
2.2.1 Principe	22
2.2.2 Evènements de référence sélectionnés.....	22
2.2.2.1 Cas de B01 et B02	26
3 MODÉLISATION DE L'IMPACT CYCLONIQUE EN TERME DE SUBMERSION MARINE	27
3.1 CONSTRUCTION DU MODELE	27
3.1.1 Stratégie de modélisation	27
3.1.2 Maillage	28
3.1.3 Logiciel	30
3.1.4 Données topo-bathymétriques.....	31
3.1.5 Coefficients de frottement	32
3.2 CALAGE ET TESTS DE SENSIBILITE	33
3.2.1 Données de forçage	33
3.2.2 Calage du modèle	36
3.2.2.1 Projet ARAI 3	36
3.2.2.2 Modélisation XBeach	38
3.2.3 Tests de sensibilité	39
3.2.4 Conclusions sur le calage et les tests de sensibilité	40
3.3 SCENARIOS MODELISES	40
4 CARACTÉRISATION DE L'ALÉA SUBMERSION MARINE D'ORIGINE CYCLONIQUE	41

4.1	ALEA SUBMERSION MARINE	41
4.1.1	Echelle de qualification	41
4.1.2	Mode de qualification.....	41
4.1.2.1	Hauteur d'eau produite par la submersion	41
	Dynamique de submersion liée à la rapidité du phénomène	41
4.1.2.2	Définition de l'aléa submersion	42
4.1.3	Traitement des résultats de modélisation	42
4.2	ALEA ACTION MECANIQUE DES HOULES	46
4.2.1	Principe de qualification.....	46
4.2.2	Mode de qualification.....	46
4.2.2.1	Hauteur significative de la houle	47
4.2.2.2	Paramètre de déferlement	47
4.2.2.3	Définition de l'aléa action mécanique des houles par croisement des paramètres Hs et Beta	47
4.2.3	Traitement des résultats de modélisation	48
4.3	ALEA SUBMERSION MARINE TOTAL : SUBMERSION ET ACTION MECANIQUE DES HOULES	51
5	MODÉLISATION X-BEACH	53
5.1	DESCRIPTION DU MODELE	53
5.2	MODELISATIONS REALISEES	54
5.3	RESULTATS	55
5.3.1	Résultats au niveau de l'aéroport — évènement de référence B01	55
5.3.1.1	Scénario actuel.....	55
5.3.1.2	Scénario 2120	56
5.3.2	Résultats au niveau de l'aéroport — évènement de référence B06.....	57
5.3.2.1	Scénario actuel.....	57
5.3.2.2	Scénario 2120 — élévation du niveau de la mer	59
5.3.2.3	Comparaison avec les résultats Telemac	60
5.3.2.3.1	Evènement de référence B01	60
5.3.2.3.2	Evènement de référence B06	60
5.4	COMMENTAIRES/ANALYSE	60
6	ANALYSE DES RÉSULTATS	61
6.1	SCENARIO ACTUEL	61
6.1.1	Tahiti.....	61
6.1.1.1	Aléa submersion marine.....	61
6.1.1.2	Aléa action mécanique des vagues	62
6.1.1.3	Aléa total	62
6.1.2	Moorea.....	62
6.1.2.1	Aléa submersion marin.....	62
6.1.2.2	Aléa action mécanique des vagues	63
6.1.2.3	Aléa total	63
6.1.3	Bora-Bora.....	63
6.1.3.1	Aléa submersion marine.....	63
6.1.3.2	Aléa action mécanique des vagues	63
6.1.3.3	Aléa total	64

6.2	SCENARIO A 100 ANS	64
6.2.1	Tahiti.....	64
6.2.1.1	Aléa submersion marine.....	64
6.2.1.2	Aléa action mécanique des vagues	64
6.2.1.3	Aléa total.....	64
6.2.2	Moorea.....	64
6.2.2.1	Aléa submersion marine.....	64
6.2.2.2	Aléa action mécanique des vagues	65
6.2.2.3	Aléa total.....	65
6.2.3	Bora-Bora.....	65
6.2.3.1	Aléa submersion marine.....	65
6.2.3.2	Aléa action mécanique des vagues	65
6.2.3.3	Aléa total.....	65
6.3	INTEGRATION DANS LA CARTOGRAPHIE REGLEMENTAIRE	66
6.3.1	Comparaison au projet ARAI3	66
6.3.1.1	Maharepa (Moorea).....	67
6.3.1.2	Matavai (Tahiti).....	69
6.3.2	Discussion sur les recommandations du guide PPRL et précautions sur la lecture des résultats	71
BIBLIOGRAPHIE.....		73
	Principaux ouvrages/sites web consultés	73
ANNEXES.....		74
	Annexe 1. Etude du cas B01	75
	Annexe 2. Cartographies de la donnée lidar du SHOM	78
	Annexe 3. Dossier des fichiers résultats traités.....	82

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Emprise des données Lidar 2015.....	14
Figure 2 : Emplacement des points de référence	17
Figure 3 : Evènements de références retenus pour Tahiti.....	24
Figure 4 : Evènements de références retenus pour Moorea	24
Figure 5 : Evènements de références retenus pour Bora Bora	25
Figure 6 : Décomposition du niveau d'eau	27
Figure 7 : Détails du maillage à Moorea	29
Figure 8 : Donnée Lidar à Bora Bora, Moorea et Tahiti	31
Figure 9 : Digitalisation de la carte SHOM à Moorea.....	31
Figure 10 : Répartition des coefficients de Strickler à Tahiti.....	33
Figure 11 : Marégraphes de l'archipel de la Société.....	34
Figure 12 : Comparaison des résultats de simulation avec ARAI 3 pour les hauteurs d'eau.....	37
Figure 13 : Comparaison des résultats de simulation avec ARAI 3 pour les vitesses	38
Figure 14 : Spectre de houle de type Jonswap"	39
Figure 15 : Résultats des modélisations avec la hauteur d'eau (H, à gauche) et la vitesse d'écoulement (V, à droite) – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel	43
Figure 16 : Classification effectuée sur la hauteur d'eau (H à gauche) et la vitesse d'écoulement (V à droite) – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel.....	44
Figure 17 : Aléa submersion marine – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel	45
Figure 18 : Résultats des modélisations pour la hauteur significative de houle (à gauche) et le paramètre de déferlement (à droite) – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel	48
Figure 19 : Classification effectuée sur la hauteur significative de la houle (à gauche) et le paramètre de déferlement (à droite) – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel	49
Figure 20 : Aléa choc mécanique des vagues – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel.....	50
Figure 21 : Procédure de croisement pour déterminer l'aléa submersion marine total.....	51
Figure 22 : Aléa total correspondant à l'aléa le plus défavorable entre l'aléa submersion marine et la bande forte de l'aléa action mécanique des houles – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel.....	52
Figure 23 : Ondes présentes en zone de déferlement.....	53
Figure 24 : Localisation des profils X-Beach	54
Figure 25 : Profils des différents paramètres en mètre, pour l'évènement de référence B01 scénario actuel Au début de la simulation (à gauche) : niveau d'eau (zs_début), Hauteur de houle (Hs) et profil bathymétrique (zb), A la fin de la simulation (à droite) : niveau d'eau maximal atteint (zsmax), Hauteur moyenne de houle sur toute la simulation (Hmean) et profil bathymétrique (zb).....	56
Figure 26 : Profils des différents paramètres en mètre, pour l'évènement de référence B01 scénario à 100 ans Au début de la simulation (à gauche) : niveau d'eau (zs_début), Hauteur de houle (Hs) et profil bathymétrique (zb), A la fin de la simulation (à droite) : niveau d'eau maximal atteint (zsmax), Hauteur moyenne de houle sur toute la simulation (Hmean) et profil bathymétrique (zb).....	57
Figure 27 : Profils des différents paramètres d'entrée en mètre, pour l'évènement de référence B06, scénario actuel Au début de la simulation (à gauche) : niveau d'eau (zs_début), Hauteur de houle (Hs) et profil bathymétrique (zb), A la fin de la simulation (à droite) : niveau d'eau maximal atteint (zsmax), Hauteur moyenne de houle (Hmean) et profil bathymétrique (zb).	58
Figure 28 : Zoom sur la zone à la côte pour l'évènement de référence B06 en scénario actuel. Sont tracés le niveau d'eau maximal (en bleu), le ligne d'eau initiale (en noir) et le profil bathymétrique (orange/rouge) en mètre le long du profil.	58
Figure 29 : Profils des différents paramètres en mètre, le long du profil pour l'évènement de référence B06, scénario à 100 ans Au début de la simulation (à gauche) : niveau d'eau (zs_début), Hauteur de houle (Hs) et profil bathymétrique (zb), A la fin de la simulation (à droite) : niveau d'eau maximal atteint (zsmax), Hauteur moyenne de houle (Hmean) et profil bathymétrique (zb).	59

Figure 30 : Méthode de définition des zones d'aléa par croisement hauteur d'eau-vitesse d'écoulement utilisée pour le projet ARAI 3.....	67
Figure 31 : Comparaison de l'aléa submersion pour le scénario actuel à Maharepa (en haut) présente étude (en bas) projet ARAI3.....	68
Figure 32 : Comparaison de l'aléa submersion pour le scénario à 100 ans à Maharepa (en haut) présente étude (en bas) projet ARAI3.....	68
Figure 33 : Comparaison de l'aléa submersion pour le scénario actuel à Matavai (en haut) présente étude (en bas) projet ARAI3.....	69
Figure 34 : Comparaison de l'aléa submersion pour le scénario à 100 ans à Matavai (en haut) présente étude (en bas) projet ARAI3.....	70
Figure 35 : Comparaison des hauteurs d'eau obtenues en B01 pour les cyclones synthétique et historique - scénario actuel.....	76
Figure 36 : Comparaison des hauteurs d'eau obtenues en B01 pour les cyclones synthétique et historique - scénario à 100 ans.....	77
Figure 37 : Topo-bathymétrie lidar sur la façade orientale de Tahiti.....	79
Figure 38 : Topo-bathymétrie lidar sur Moorea.....	80
Figure 39 : Topo-bathymétrie lidar sur Bora Bora.....	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Notations relatives aux états de mer.....	18
Tableau 2 : Notations relatives au vent.....	18
Tableau 3 : Comparaison des conditions cycloniques extrêmes obtenues à partir de la méthode des cyclones synthétiques et des cyclones historiques.....	21
Tableau 4 : Evènements de référence sélectionnés pour les modélisations.....	23
Tableau 5 : Nombre de nœuds et d'éléments des maillages.....	29
Tableau 6 : Coefficients de Strickler.....	32
Tableau 7 : Niveaux caractéristiques retenus.....	34
Tableau 8 : Niveaux d'eau utilisés pour le forçage des modélisations de submersion à Bora Bora, Tahiti et Moorea.....	35
Tableau 9 : Principaux paramètres de la simulation de calage avec ARAI 3.....	36
Tableau 10 : Qualification des hauteurs d'eau.....	41
Tableau 11 : Qualification des vitesses d'écoulement.....	42
Tableau 12 : Qualification de l'aléa submersion marine par croisement des hauteurs et des vitesses.....	42
Tableau 13 : Evènements de référence sélectionnés pour l'aléa action mécanique des houles.....	46
Tableau 14 : Qualification des hauteurs de houle.....	47
Tableau 15 : Qualification du paramètre de déferlement.....	47
Tableau 16 : Classes d'aléa pour l'action mécanique des houles.....	48
Tableau 17 : Conditions initiales pour l'évènement de référence B06.....	55
Tableau 18 : Conditions initiales pour l'évènement B01.....	55
Tableau 19 : Synthèse des scénarios choisis pour la modélisation de la submersion pour le projet ARAI3.....	66
Tableau 20 : Synthèse des scénarios choisis pour la modélisation de la submersion dans la présente étude.....	66
Tableau 21 : Méthode de classification utilisée dans la présente étude.....	67

PREAMBULE

Le territoire Polynésien est régulièrement touché par des phénomènes de submersions marines dus à des événements marins extrêmes comme les cyclones et les tempêtes tropicales pouvant occasionner de nombreux dégâts. Afin de mieux gérer les aléas naturels et en particulier la submersion marine, des Plans de Prévention des Risques (PPR) ont été réalisés avec l'aide du BRGM et finalisés en 2006. Ces plans couvrent tout le territoire sauf la commune de Rapa et comprennent une cartographie des aléas avec un zonage de la submersion marine. Depuis cette date, une carte des aléas pour la commune de Rapa a également été établie par le DCA.

Une campagne Lidar, financée par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) et le Service d'Urbanisme (SAU), a été effectuée en 2015 sur la zone côtière, fournissant des données bathymétriques et topographique de haute résolution dans le but de réaliser une étude de la surcote marine par modélisation.

Dans ce contexte, le ministère du logement et de l'aménagement du territoire demande une mise à jour du zonage de la submersion marine des cartographies des PPR sur les secteurs couverts par la campagne Lidar. Cette mise à jour devra intégrer les données Lidar mais également les dernières données disponibles sur les cyclones et tempêtes et sur les effets du changement climatique.

L'étude de caractérisation de l'aléa submersion marine d'origine cyclonique via les données Lidar s'organise en trois phases :

- Phase 1 : Etat des lieux sur les cyclones et tempêtes historiques
- **Phase 2 : Modélisation de l'impact des cyclones en termes de submersion marine**
- **Phase 3 : Cartographie de l'aléa submersion marine**

Le présent rapport correspond aux phases 2 et 3. Il présente la méthodologie utilisée pour modéliser l'aléa submersion marine lié aux cyclones et la démarche suivie pour obtenir les cartographies de cet aléa.



1 APPROCHE GÉNÉRALE

1.1 DEFINITION DE LA SUBMERSION MARINE (GUIDE PPRL 2014)

Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables : basses pressions atmosphériques et fort vent d'afflux agissant, lors d'une pleine mer. Elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours.

Trois modes de submersion marine sont distingués :

- La **submersion par débordement** : le niveau marin est supérieur à la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel,
- La **submersion par franchissements** de paquets de mer liés aux vagues : après déferlement de la houle, les paquets de mer dépassent la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel,
- La **submersion par rupture du système de protection** : les terrains situés en arrière sont en dessous du niveau marin et se trouvent exposés suite à la défaillance d'un ouvrage de protection ou suite à la formation de brèche dans un cordon naturel. Cette rupture peut être due à l'attaque de la houle, au mauvais entretien d'un ouvrage, à une érosion chronique intensive, au phénomène de surverse, à un déséquilibre sédimentaire du cordon naturel, etc.

D'autres aléas accompagnent la submersion marine. Il s'agit principalement des effets de dissipation d'énergie des phénomènes marins induisant des chocs mécaniques pouvant être extrêmement violents.

- Le **choc des vagues** peut ainsi être considéré comme un aléa à part entière. Son impact est distinct d'une inondation et est lié à la pression exercée par l'impact des vagues sur les structures.
- L'**arrivée brutale des eaux** à terre peut elle aussi être génératrice de choc violent. Elle peut être engendrée par une surverse ou une rupture d'ouvrage. Ce phénomène est particulièrement rencontré en arrière immédiat des ouvrages de protection contre les submersions.

Dans le cadre de cette étude, les phénomènes modélisés sont la submersion par débordement et le choc des vagues. Une réflexion sur les autres phénomènes a été menée au cas par cas.

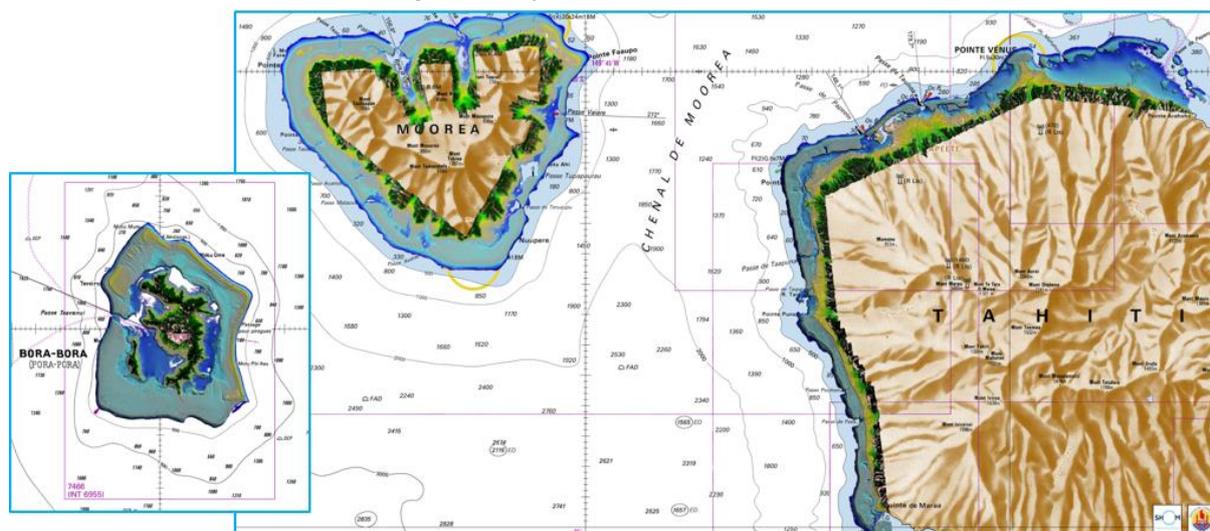
1.2 ZONE D'ETUDE

Les trois îles étudiées sont Tahiti, Moorea et Bora Bora. Elles font partie de l'archipel de la Société dont Papeete est le chef-lieu. Bora Bora appartient aux îles Sous le Vent tandis que Moorea et Tahiti font partie des îles du Vent.

La zone d'étude est définie par l'emprise des données Lidar de 2015. Elle englobe entièrement les côtes des îles de Bora Bora et de Moorea et la côte Est de Tahiti entre Maraa et Papenoo, elle est présentée Figure 1. L'emprise terrestre est une bande d'au moins 600 m qui englobe toutes les zones basses potentiellement submersibles.



Figure 1 : Emprise des données Lidar 2015



Source : SHOM

1.3 PRINCIPE DE LA DEMARCHE

ALEAS ETUDES

Deux types d'aléa sont étudiés :

- L'**aléa submersion marine** par débordement, phénomène appelé submersion marine dans la suite du rapport. Cet aléa est caractérisé par les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement engendrées par les cyclones de référence.
- L'**aléa action mécanique des houles** : afin d'éviter l'application d'une bande forfaitaire représentant cet aléa, une méthodologie spécifique a été développée. Deux phénomènes ont été pris en compte : la hauteur significative des houles arrivant à la côte et l'énergie dissipée lors de leur déferlement.

Ces aléas sont ensuite combinés pour obtenir l'aléa « total ».

SCENARIOS

Deux scénarios sont étudiés : le **scénario actuel** et le **scénario à 100 ans**.

Le scénario à 100 ans permet d'inclure l'impact du changement climatique sur les niveaux d'eau attendus.

MODELISATION ILE PAR ILE

Un modèle a été monté pour chaque île : Bora Bora, Tahiti, Moorea. L'emprise terrestre du modèle correspond à l'étendue de la donnée Lidar. L'emprise au large est prise à environ 3km des côtes, de sorte à laisser une distance de propagation suffisante des houles cycloniques.

EVENEMENTS DE REFERENCE

Pour chaque île, entre 4 et 6 évènements de référence ont été retenus suite à l'analyse des conditions cycloniques réalisées en phase 1. **Ces évènements de référence sont des cyclones de période de retour 100 ans** estimés en différents points au large des îles.



Sélectionner plusieurs événements de référence par île permet de prendre en compte l'impact de différentes catégories de cyclones probables selon leurs intensités et leur sens de propagation plutôt que d'appliquer un événement sur dimensionné pour toute l'île. Ainsi, les différences d'exposition des façades sont retranscrites de manière plus fine.

MODELISATION ET RESULTATS ETUDIES

Pour chacun des événements de référence de chaque île et pour chaque scénario, une simulation a été réalisée avec un logiciel de courantologie (Telemac2d) couplé avec un module pour prendre en compte la houle (Tomawac). Les paramètres extraits des résultats de ces simulations sont H, V, Hm0 et Beta.

- **H** : hauteur d'eau en mètres
- **V** : vitesse d'écoulement en mètres par seconde
- **Hm0** : hauteur en mètres définie comme quatre fois l'écart type de l'élévation de la surface, interprétée de manière conventionnelle comme la hauteur significative des houles (Hs). Hs est la moyenne des hauteurs (mesurées entre crête et creux) du tiers des plus fortes vagues, en mètres.
- **Beta** : coefficient de déferlement des houles sans unité, relatif à l'énergie dissipée lorsque les vagues se brisent.

CARACTERISATION DE L'ALEA SUBMERSION MARINE

Pour l'aléa submersion marine, les paramètres H et V obtenus pour chaque simulation sont classés puis croisés. Pour une île, il y a donc un résultat d'aléa submersion marine pour chaque événement de référence et chaque scénario.

Pour un scénario donné, les aléas submersion de chaque événement sont superposés de sorte à sélectionner l'aléa le plus fort. Un résultat d'aléa submersion est ainsi obtenu pour chaque scénario (soit deux résultats par île).

CARACTERISATION DE L'ALEA ACTION MECANIQUE DES HOULES

Pour l'aléa action mécanique des houles, le nombre d'aléa de référence a été réduit pour limiter les calculs. Il varie entre 1 et 3 par île.

Cet aléa est caractérisé à partir des paramètres Hm0 et Beta obtenus pour chaque simulation, qui sont classés puis croisés. De même que précédemment, il y a donc pour chaque île un résultat d'aléa action mécanique des houles pour chaque événement de référence et chaque scénario.

Pour chaque scénario, les aléas action mécanique de chaque événement sont superposés de sorte à sélectionner l'aléa le plus fort. Pour chaque scénario, est obtenu un résultat d'aléa action mécanique des houles (deux par île).

OBTENTION DE L'ALEA « TOTAL »

Les zones les plus fortement touchées par l'aléa action mécaniques des houles sont extraites des résultats de chaque île, pour chaque scénario. Ce résultat est appelé « bande d'action mécanique des houles ».

Pour obtenir l'aléa « total », les résultats de l'aléa submersion marine et la bande d'action mécanique des houles sont superposés de sorte à retenir la valeur d'aléa la plus élevée. Cette opération est réalisée pour chaque scénario.

Au final, pour chaque île, il y a un résultat d'aléa « total » pour chaque scénario.



MISE EN FORME DES RESULTATS

Les résultats finaux d'aléa submersion marine, d'action mécanique des houles et du « total » sont mis en forme pour un rendu cartographique. **Après des traitements de lissage et de simplification du rendu, ils sont présentés sous forme d'atlas au 10 000^{ème}.** Il y a au total un atlas par type d'aléa et par scénario pour chacune des trois îles, soit 18 atlas.



2 EVENEMENTS CYCLONIQUES DE REFERENCE

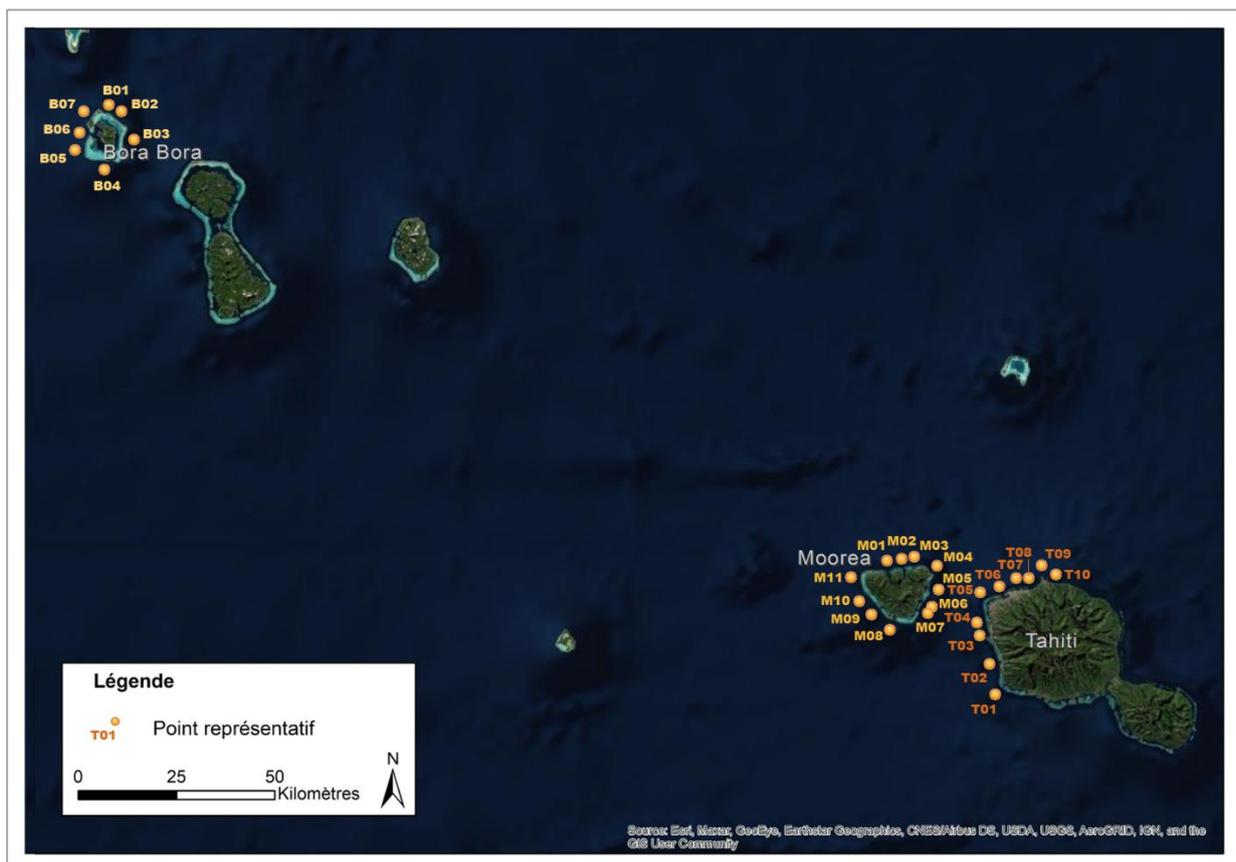
2.1 RAPPELS SUR L'ANALYSE DES CONDITIONS CYCLONIQUES

Lors de la phase 1, les cyclones historiques présents dans la région ont été compilés et analysés. Ils ont ensuite été modélisés un à un afin de définir leur structure météorologique sur la zone d'étude. Pour plus de détails sur l'analyse des conditions cycloniques, se référer au rapport de phase 1.

2.1.1 Points représentatifs

Afin de limiter le volume de données générées à traiter, 28 points représentatifs ont été définis en mer profonde, à environ 2,5 km des côtes. Ils ont été placés de sorte à couvrir toutes les façades des îles, avec une attention particulière portée aux enjeux (villes, aéroports...) et aux particularités morphologiques (baies, pointes, passes). Ils sont reportés Figure 2, et détaillés de manière spécifique à chaque île au chapitre 2.2.2.

Figure 2 : Emplacement des points de référence



Source : BRLi 2022



2.1.2 Paramètres étudiés et conventions utilisées

Les Tableau 1 et Tableau 2 suivants définissent les paramètres étudiés pour l'analyse des conditions cycloniques extrêmes.

Tableau 1 : Notations relatives aux états de mer

Notation	Unité	Définition
Hm0	m	Hauteur significative spectrale des vagues $= 4 \sqrt{m_0}$, où m_0 est le moment d'ordre zéro du spectre $m_0 = \int f^n \cdot E(f) \cdot df$ avec $n = 0$
Tp	s	Période Pic lissée Obtenue par ajustement parabolique sur le spectre discret autour du pic de plus forte énergie (après sommation sur les directions), et des deux fréquences situées de part et d'autre.
Dirp	° / Nord	Direction Pic Définie comme la direction la plus énergétique de la bande de fréquence correspondant au Tp

Source : GlobOcéan 2021

Tableau 2 : Notations relatives au vent

Notation	Unité	Définition
Ws	m/s	Vitesse moyenne du vent sur 10 minutes À une altitude de 10 m
Wd	° / Nord	Direction du vent Associée à Ws

Source : GlobOcéan 2021

Par convention, les directions données sont :

- Celles **d'où viennent** les vagues,
- Celles **d'où vient** le vent

2.1.3 Détermination des conditions extrêmes cycloniques

Afin de déterminer les valeurs extrêmes cycloniques sur une période de retour 100 ans des états de mer et de vent aux points de référence, deux méthodes distinctes ont été mises en œuvre.

METHODE BASEE SUR DES CYCLONES SYNTHETIQUES

Les vitesses de vents cycloniques extrêmes pour la période de retour de 100 ans ont été obtenues par l'analyse des intensités de vents de chacun des cyclones historiques répertoriés dans le bassin océanique considéré, conditionnées à la distance au site étudié.

Les caractéristiques empiriques des descripteurs cycloniques complémentaires (rayon cyclonique, vitesse de déplacement, trajectoire, variation de l'intensité du vent durant l'évolution du cyclone) ont été déterminées de façon statistique en étudiant les cyclones historiques détectés dans la zone d'étude depuis 1976.



Pour chacune de ces caractéristiques la valeur statistique la plus probable (en corrélation avec l'intensité du vent cyclonique) a été retenue pour caractériser un cyclone empirique représentatif de la zone d'étude.

Les grilles de calcul ont été utilisées pour la reconstitution des états de mer cycloniques extrêmes. La génération des états de mer au large a été réalisée à l'aide du modèle WaveWatchIII, puis leur propagation est modélisée avec SWAN sur les deux grilles locales.

Le forçage atmosphérique est directement issu des différents cyclones synthétiques extrêmes déterminés. Le modèle paramétrique cyclonique basé sur les travaux de Holland et précédemment validé a été utilisé pour construire ces champs de vents extrêmes synthétiques. Les caractéristiques de ces champs de vents sont issues de l'analyse statistique des 77 cyclones historiques répertoriés.

Cette méthode se base sur une analyse bivariée des paramètres vitesse du vent et distance du site. L'objectif est de déterminer pour la période de retour 100 ans le couple de valeur assurant une distance minimale entre le site et la position du vent maximal dans le cyclone extrême. La vitesse de déplacement du cyclone ainsi que la variation normalisée de l'intensité du vent le long de la trajectoire sont déduites d'une étude statistique de la distribution de ces vitesses et variations pour chaque cyclone historique sélectionné. Enfin, les rayons cycloniques sont calculés directement dans le modèle de Holland.

Dans le cadre de cette étude il a été volontairement choisi de modéliser, pour la période de retour de 100 ans, les cyclones synthétiques les plus contraignants pour chacun des points de référence, afin d'obtenir les valeurs les plus conservatives.

METHODE BASEE SUR LES CYCLONES HISTORIQUES

Par cette méthode, les conditions extrêmes d'états de mer et de vents cycloniques en chaque point sont directement obtenues par analyse extrême directe des valeurs issues de la modélisation des cyclones historiques sélectionnés.

Les extrapolations sont effectuées à l'aide de la bibliothèque Python 'pyextremes' développée par Dr. Georgi Boshnakov, destinée à effectuer des analyses extrêmes (Extreme Value Analysis) univariées. Les valeurs extrêmes ont été déterminées pour la période de retour 100 ans. Le résultat de l'extrapolation présente la valeur la plus probable sur la période de retour choisie.

COMPARAISON ENTRE LES DEUX METHODES

Les conditions extrêmes cycloniques ont donc été élaborées selon deux méthodes :

- La **méthode des cyclones synthétiques** : basée sur la constitution de cyclones synthétiques, c'est-à-dire des cyclones totalement modélisés, avec des caractéristiques (rayon, intensité, déplacement) déterminées par une analyse statistique des cyclones historiques de la zone.
- La **méthode des cyclones historiques** : basée sur l'extrapolation directe des valeurs obtenues aux points de référence par modélisation des cyclones historiques.

La seconde méthode a l'avantage de représenter les conditions ayant réellement impactées les sites étudiés. Cependant, cette méthode ne prend pas en considération le caractère aléatoire des passages cycloniques dans une région déterminée, c'est pourquoi la méthode des cyclones synthétiques a également été mise en œuvre.

La comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes montre :

- Que les valeurs extrêmes de H_{m0} et W_s issues de la méthode « synthétique » bien que supérieures à celles obtenues par la méthode « historiques », restent du même ordre de grandeur.



- Que les périodes pics associées issues de la méthode « historique » sont supérieures à celles obtenues avec la méthode « synthétique », ce qui traduit le fait que les cyclones historiques sont générés plus loin du site que les synthétiques (que nous avons fabriqués de telle façon qu'ils passent sur le site).
- Que les directions associées (celles des vagues et celles du vent) sont sensiblement semblables.

Le Tableau 3 suivant compare les résultats obtenus pour les conditions cycloniques extrêmes calculées selon les méthodes des cyclones synthétiques et des cyclones historiques.

Tableau 3 : Comparaison des conditions cycloniques extrêmes obtenues à partir de la méthode des cyclones synthétiques et des cyclones historiques

POINTS	CONDITIONS EXTREMES CYCLONIQUES - Période de retour 100 ans Méthode des <u>cyclones synthétiques</u>					CONDITIONS EXTREMES CYCLONIQUES - Période de retour 100 ans Méthode d'extrapolation directe des <u>cyclones historiques</u>				
	Paramètres d'états de mer aux points de référence (Correspondant à la valeur max du Hm0)			Vents associés (Correspondant au max du Hm0)		Paramètres d'états de mer aux points de référence (Correspondant à la valeur max du Hm0)			Vents associés (Correspondant au max du Hm0)	
	Hm0 (m)	Tp (s)	Dirp (°/N)	Ws (m/s)	Wd (°/N)	Hm0 (m)	Tp (s)	Dirp (°/N)	Ws (m/s)	Wd (°/N)
BORA BORA										
B01	8.7	11.1	305	39.0	310	8.8	11.7	305	28.0	350
B02	8.5	10.7	5	39.0	10	8.7	11.6	305	28.0	350
B03	8.2	10.9	5	39.0	80	7.7	11.1	45	29.0	110
B04	6.3	9.5	265	39.0	275	5.9	11.3	265	31.0	320
B05	9.0	11.2	315	39.0	310	9.0	11.6	315	29.0	330
B06	9.1	11.2	315	39.0	310	9.0	11.6	315	28.0	330
B07	9.1	11.2	315	39.0	310	9.0	11.6	315	29.0	330
MOOREA										
M01	9.1	11.2	315	39.0	310	8.4	12.2	325	23.0	320
M02	9.2	11.2	315	39.0	310	8.4	12.2	325	24.0	320
M03	9.2	11.2	315	39.0	310	8.3	12.2	325	23.0	320
M04	8.9	11.2	305	39.0	310	8.2	12.5	325	25.0	325
M05	7.9	11.0	5	39.0	80	6.7	12.4	55	22.0	155
M06	7.2	10.7	15	39.0	80	6.1	12.6	55	24.0	120
M07	6.7	10.3	35	39.0	80	5.7	12.5	55	23.0	120
M08	7.5	11.1	295	39.0	310	7.1	13.0	275	29.0	345
M09	8.3	11.1	305	39.0	310	7.5	13.1	315	26.0	345
M10	9.0	11.2	315	39.0	310	8.1	13.2	325	24.0	345
M11	9.0	11.2	315	39.0	310	8.5	12.2	325	23.0	350
TAHITI										
T01	8.1	10.8	295	39.0	310	7.1	13.0	285	26.0	325
T02	7.2	10.2	285	39.0	310	6.4	12.5	265	24.0	325
T03	7.5	11.2	335	39.0	340	6.1	12.0	335	23.0	325
T04	7.8	11.2	335	39.0	340	6.1	12.0	335	23.0	345
T05	8.7	11.2	335	39.0	340	7.4	13.0	325	24.0	325
T06	8.9	11.3	305	39.0	310	7.8	13.0	325	24.0	325
T07	9.2	11.3	305	39.0	310	8.0	13.0	325	25.0	325
T08	9.2	11.3	305	39.0	310	8.0	13.0	315	27.0	325
T09	9.3	11.2	305	39.0	310	8.3	13.0	315	29.0	325
T10	8.9	11.2	305	39.0	310	7.9	13.0	315	29.0	325

Source : GlobOcéan 2021



2.2 SELECTION DES EVENEMENTS DE REFERENCE

2.2.1 Principe

La méthodologie du choix de l'évènement de référence à prendre en compte pour l'aléa submersion marine dans le cadre d'un PPRL est très cadrée. Elle est décrite de la manière suivante dans le guide PPRL 2014 :

«L'évènement naturel de référence est l'évènement historique majeur s'il est supérieur à un évènement de période de retour 100 ans. Par défaut, c'est l'évènement théorique de période de retour 100 ans. Il est caractérisé par deux paramètres au minimum, le niveau d'eau et la hauteur significative des vagues. Ces paramètres sont définis au large mais leur caractérisation à la côte est nécessaire, notamment pour le niveau marin. L'évènement retenu est l'évènement le plus pénalisant en termes de submersion, ce qui revient à dire le plus pénalisant en termes de volumes entrants. »

Il faut donc déterminer et retenir comme « évènement de référence » l'évènement le plus fort entre :

- Un évènement calculé d'occurrence centennale
- L'évènement historique connu le plus fort

Dans le cas des conditions cycloniques telles qu'analysées lors de la phase 1, les cyclones synthétiques centennaux sont plus pénalisants par rapport aux cyclones historiques, ceci pour la totalité des points de référence, à l'exception des points B01 et B02. Pour ces points, la hauteur de houle est légèrement supérieure pour les évènements historiques que pour les synthétiques (+10 cm et +20 cm pour B01 et B02 respectivement). En revanche, les vitesses de vent sont nettement plus élevées pour les cyclones synthétiques (+11m/s aux deux points). Ces résultats sont compilés Tableau 3.

Il est donc proposé de retenir les conditions extrêmes calculées via des « cyclones synthétiques » de période de retour 100 ans comme évènements de référence. Les cas de B01 et B02 sont justifiés paragraphe 2.2.2.1.

2.2.2 Evènements de référence sélectionnés

Afin de refléter le plus fidèlement possible les conditions cycloniques extrêmes, les conditions obtenues par la méthode des cyclones synthétiques à chaque point de référence ont été analysées île par île. Des évènements représentatifs par façade ont été sélectionnés.

Cela permet de mieux représenter les cyclones extrêmes associés à chaque façade et d'éviter de considérer un seul évènement de référence surdimensionné placé en face des façades et qui ne prendrait pas en compte de directions préférentielles. Par exemple, des cyclones provenant de l'Est sont statistiquement quasi impossibles, les évènements retenus pour les façades orientales de Bora Bora et Tahiti sont donc globalement en provenance du Nord.

Un compromis entre temps de calcul et représentativité des cyclones a été établi en **sélectionnant entre des cyclones similaires celui ayant les paramètres les plus désavantageux.**

Ainsi, cinq évènements de référence sont retenus pour les modélisations à Tahiti, six à Moorea et quatre à Bora Bora. Leur localisation est présentée

Figure 3, Figure 4 et Figure 5 et leurs caractéristiques sont reportées dans le Tableau 4.

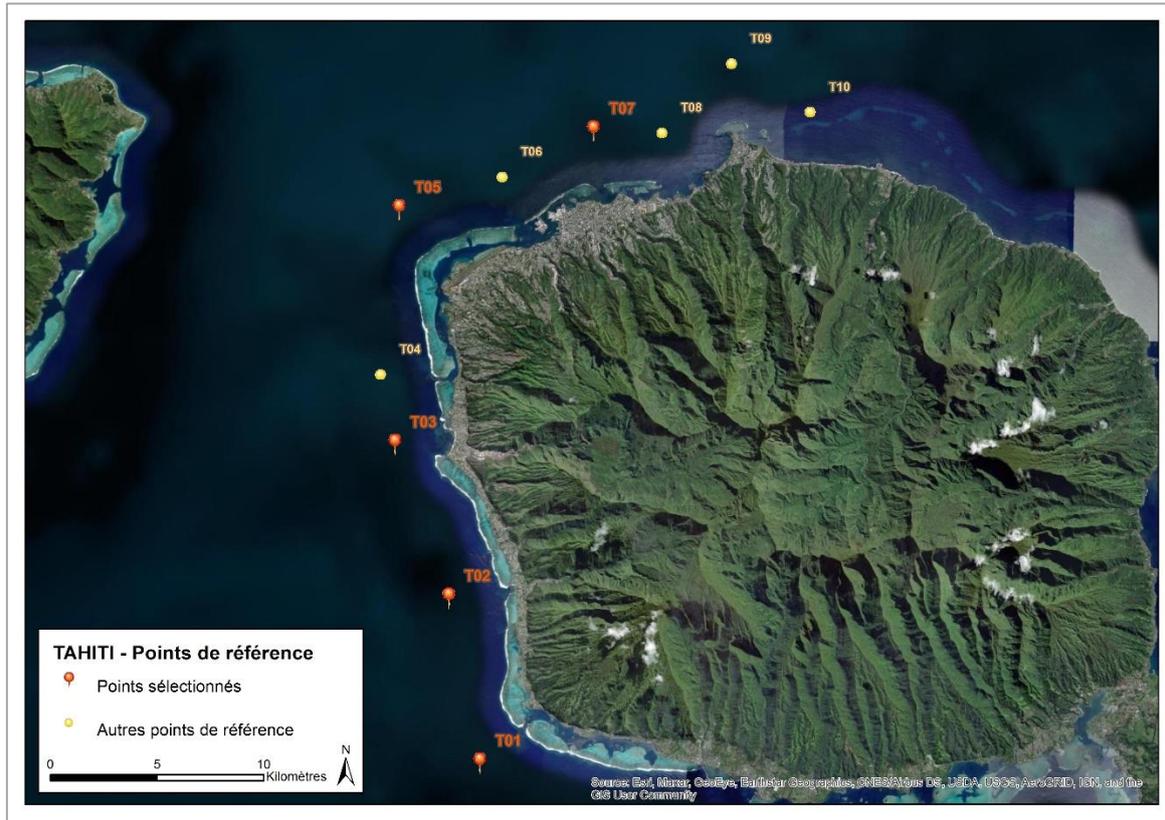


Tableau 4 : Evènements de référence sélectionnés pour les modélisations

Tahiti					
<i>5 évènements de référence</i>					
<i>Point</i>	<i>Hm0 (m)</i>	<i>Tp (s)</i>	<i>Dir (°/N)</i>	<i>Ws (m/s)</i>	<i>Wd (°/N)</i>
T01	8.1	10.8	295	39.0	310
T02	7.2	10.2	285	39.0	310
T03	7.5	11.2	335	39.0	340
T05	8.7	11.2	335	39.0	340
T07	9.2	11.3	305	39.0	310
Moorea					
<i>6 évènements de référence</i>					
<i>Point</i>	<i>Hm0 (m)</i>	<i>Tp (s)</i>	<i>Dir (°/N)</i>	<i>Ws (m/s)</i>	<i>Wd (°/N)</i>
M02	9.2	11.2	315	39.0	310
M04	8.9	11.2	305	39.0	310
M05	7.9	11.0	5	39.0	80
M06	7.2	10.7	15	39.0	80
M07	6.7	10.3	35	39.0	80
M08	7.5	11.1	295	39.0	310
Bora Bora					
<i>4 évènements de référence</i>					
<i>Point</i>	<i>Hm0 (m)</i>	<i>Tp (s)</i>	<i>Dir (°/N)</i>	<i>Ws (m/s)</i>	<i>Wd (°/N)</i>
B01	8.7	11.1	305	39.0	310
B03	8.2	10.9	5	39.0	80
B04	6.3	9.5	265	39.0	275
B06	9.1	11.2	315	39.0	310

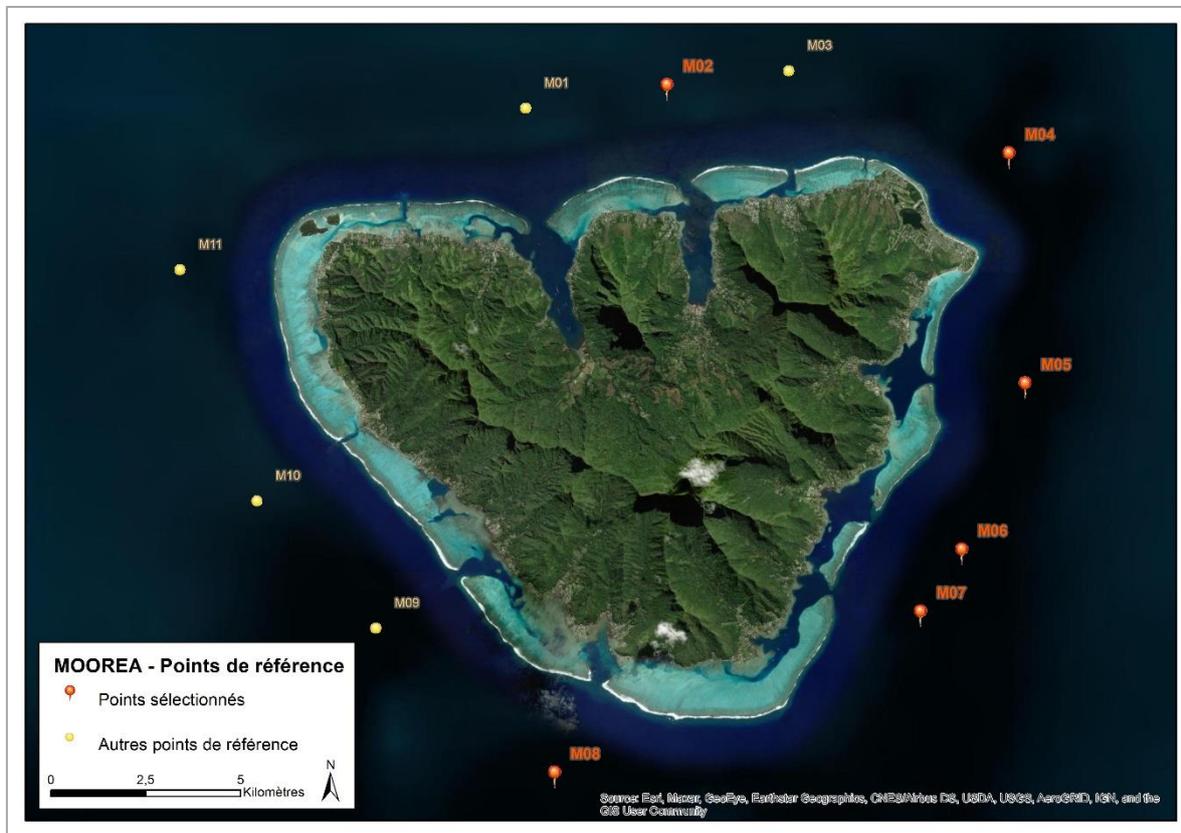


Figure 3 : Evènements de références retenus pour Tahiti



Source : BRLi 2022

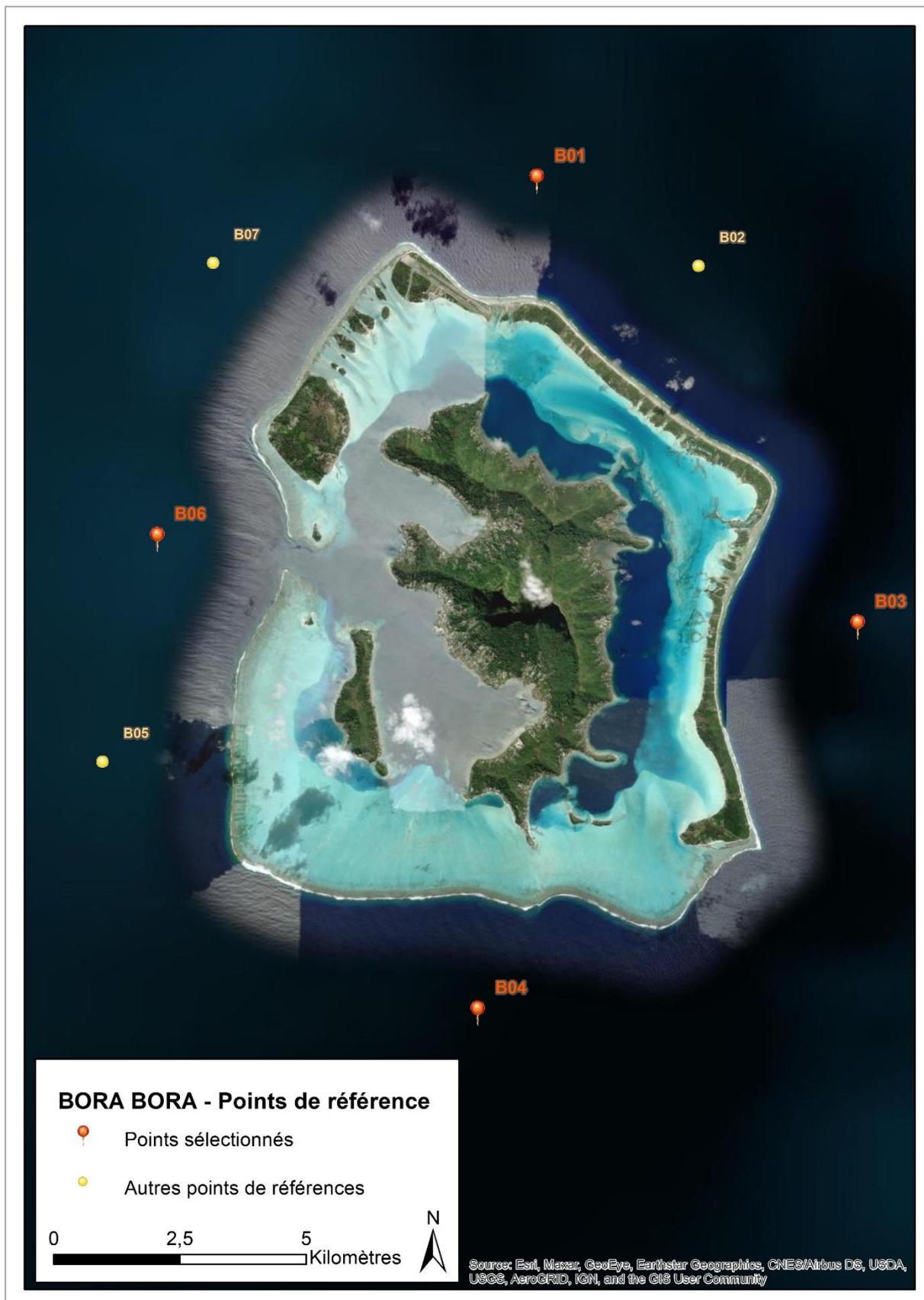
Figure 4 : Evènements de références retenus pour Moorea



Source : BRLi 2022



Figure 5 : Evènements de références retenus pour Bora Bora



Source : BRLi 2022



2.2.2.1 Cas de B01 et B02

Comme mentionné précédemment, les évènements aux points B01 et B02 présentent des houles plus fortes avec la méthode des cyclones historiques, bien que les conditions de vent restent moins fortes qu'avec la méthode des cyclones synthétiques.

Entre les évènements B01 et B02, seuls ceux de B01 ont été retenus car ils présentent des paramètres plus défavorables. De plus, les évènements caractéristiques de la façade occidentale sont représentés par le point B03. Finalement, B02 n'a donc pas été retenu pour les modélisations de submersion.

Pour le point B01, il est difficile de statuer sur la condition la plus extrême entre le cyclone synthétique centennal et le cyclone historique extrapolé à partir des simples paramètres calculés. Les deux conditions ont été modélisées pour les scénarios actuels et à 100 ans (voir paragraphe 3 pour plus de détails sur les modélisations). Les hauteurs d'eau ont été comparées et bien que les résultats soient proches, le plus défavorable a été obtenu pour le cyclone synthétique, c'est celui-ci qui a donc été retenu comme évènement de référence.

Les résultats de hauteur d'eau de ces simulations sont présentés en Annexe 1.



3 MODELISATION DE L'IMPACT CYCLONIQUE EN TERME DE SUBMERSION MARINE

3.1 CONSTRUCTION DU MODELE

3.1.1 Stratégie de modélisation

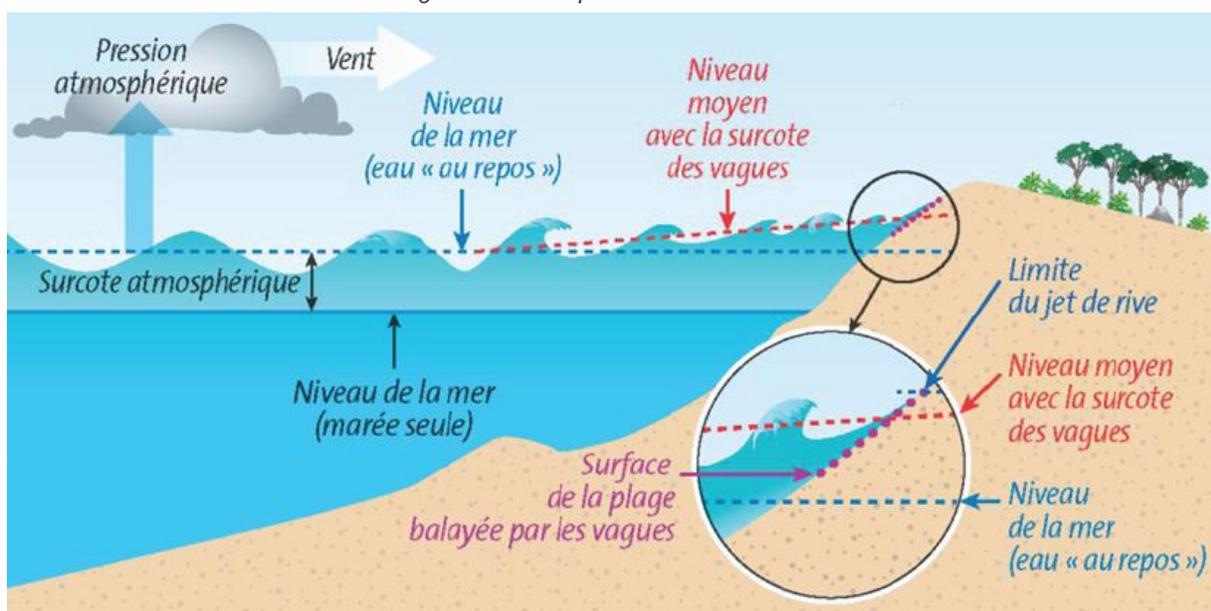
L'objectif de la modélisation est de qualifier les submersions marines sur le territoire d'étude en modélisant les phénomènes physiques correspondant et en prenant en compte tous les détails topographiques de la zone d'étude.

Les submersions marines sont liées aux cyclones qui peuvent causer une houle et un niveau d'eau élevés. Les cyclones sont la conséquence de phénomènes météo, eux-mêmes caractérisés par un vent et une pression atmosphérique. Le principal moteur de la houle est le vent. Le niveau d'eau marin est lui régi par quatre composantes :

- La marée astronomique : il s'agit de l'évolution prévisible du niveau d'eau.
- Le vent : le vent peut avoir une incidence sur le niveau marin en « inclinant » un plan d'eau. Ainsi un vent de terre va avoir tendance à abaisser le niveau marin tandis qu'un vent de mer va avoir tendance à l'augmenter.
- La houle : une forte houle va avoir tendance à augmenter les niveaux marins du fait du shoaling et du déferlement bathymétrique à la côte. En effet, le shoaling correspond au phénomène observé lorsque les fonds remontent, entraînant une évolution des caractéristiques de la houle (hauteur, période, longueur d'onde, etc.) avec notamment une augmentation de l'amplitude et une diminution de la longueur d'onde.
- La pression atmosphérique : les dépressions peuvent générer une surcote barométrique, de l'ordre de un centimètre par hectopascal.

Tous ces phénomènes se combinent et sont à l'origine des tempêtes, tel qu'illustré sur la Figure 6.

Figure 6 : Décomposition du niveau d'eau



Source : BRGM



L'idée est de modéliser les conséquences des tempêtes sur le littoral et notamment dans les zones de faible altimétrie, ainsi le modèle s'étend depuis le littoral vers les zones basses et s'arrête quand l'altimétrie devient plus importante, hors de tout risque de submersion (valeur retenue : 4 m NGPF). Le modèle sera « forcé » sur sa frontière littorale par un signal de niveau d'eau comprenant toutes les composantes de la tempête.

Pour la modélisation, **deux modules de la suite de logiciels Telemac ont été utilisés : un module de courantologie (Telemac2d) couplé à un module de propagation de houle (Tomawac).**

Le modèle est « forcé » sur sa frontière littorale par un signal de niveau d'eau comprenant toutes les composantes du cyclone participant à la submersion (voir 1.4.1 et 1.4.3). L'objectif étant de cartographier les cyclones à leur pic d'intensité, le modèle adopte le **mode stationnaire** qui simule uniquement le moment le plus fort des cyclones.

Deux scénarios temporels sont proposés, un avec la prise en compte d'une élévation du niveau de la mer de +60cm liée au changement climatique (scénario à 100 ans), l'autre sans (scénario actuel).

3.1.2 Maillage

Le maillage est une étape importante dans la construction d'un modèle. Il s'agit de bien représenter la topographie locale tout en limitant le nombre de nœuds au total pour avoir un temps de calcul raisonnable.

Des mailles plutôt fines sont utilisées pour le modèle de submersion, toujours en cohérence avec les géométries à représenter :

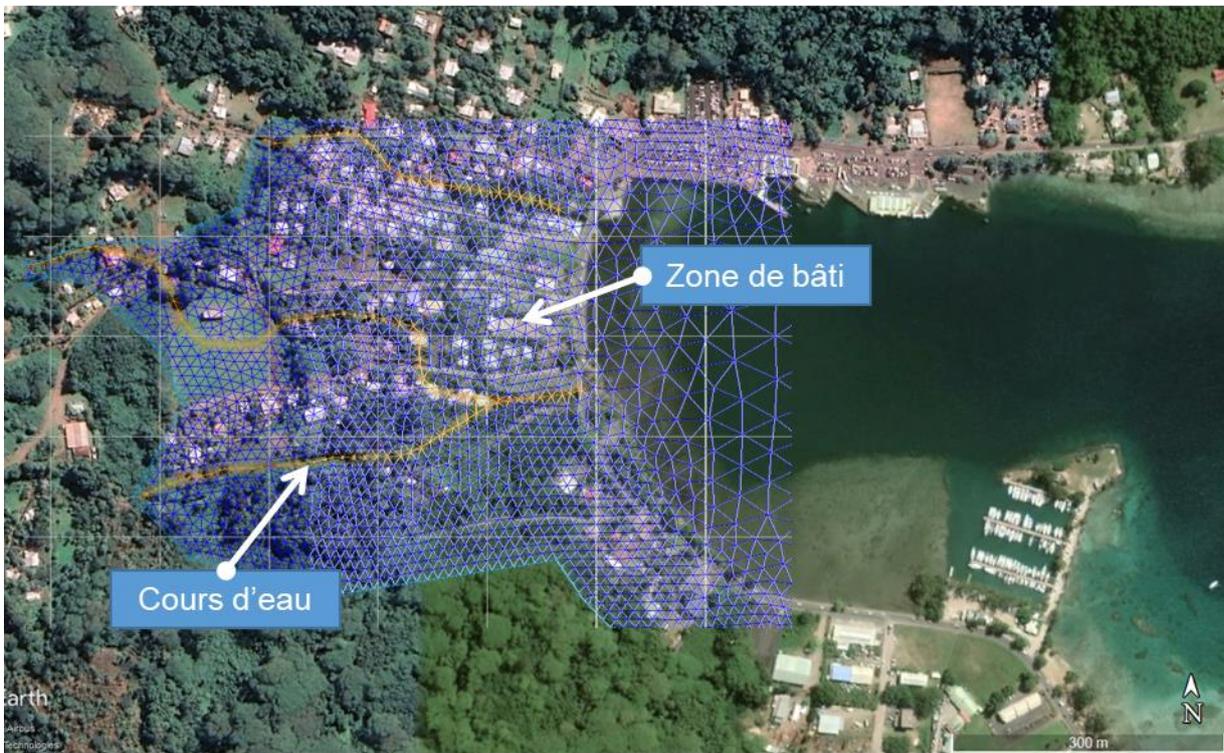
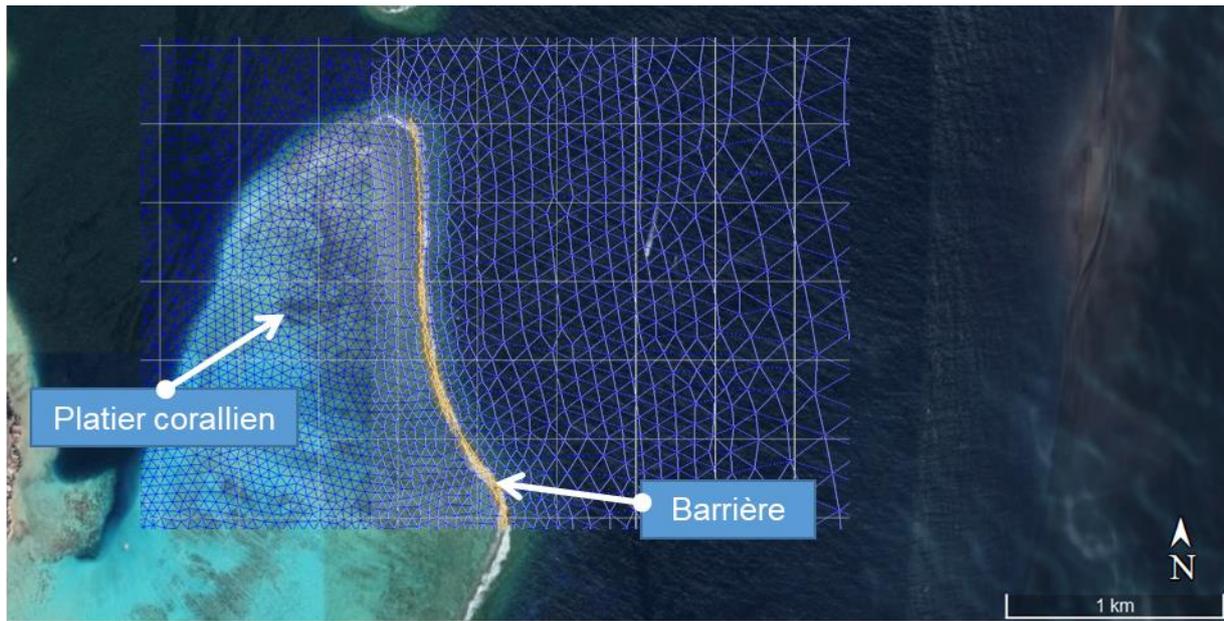
- *De manière générale, 5-10m pour la plupart des structures à représenter*
- 10m sur les zones urbaines
- 10m sur les cours d'eau
- Entre 3 et 5m pour la crête de la barrière de corail
- 25m pour le platier corallien
- 50 m dans la baie
- 100m au large

Une attention spécifique a été portée à mailler finement la barrière de corail pour s'assurer de sa prise en compte par le modèle en termes de déferlement des houles, des courants et donc de son influence sur les hauteurs d'eau à terre. Une ligne de structure a été construite le long de la barrière afin d'y appuyer les mailles fines.

La Figure 7 montre des détails extraits du maillage sur différents types de zones.



Figure 7 : Détails du maillage à Moorea



Source : BRLi

Le Tableau 5 suivant récapitule les éléments chiffrés concernant les maillages des modèles.

Tableau 5 : Nombre de nœuds et d'éléments des maillages

Modèle	Nœuds	Éléments	Surface (km ²)
Tahiti	438 316	870 321	216,2
Moorea	362 832	720 173	361,2
Bora Bora	346 897	688 850	250,8

Source : BRLi



3.1.3 Logiciel

Le logiciel TELEMAC-2D appartient au système de modélisation en éléments finis TELEMAC, développé initialement par le Laboratoire National d'Hydraulique d'EDF et actuellement par un consortium qui comprend les entités suivantes : EDF, CEREMA, BAW, laboratoire de Daresbury, HR Wallingford et Artélia.

TELEMAC regroupe un ensemble de logiciels dédiés aux problèmes de mécanique des fluides de l'environnement : courantologie bi et tridimensionnelle, houle, sédimentologie, qualité d'eau.

Les principaux avantages que présente le système TELEMAC en regard de la présente étude sont les suivants :

- Le terrain est représenté par un assemblage d'éléments triangulaires de tailles et de formes variables formant le maillage de calcul. Cette technique « éléments finis » procure trois avantages essentiels :
- Le maillage épouse avec fidélité les géométries complexes que l'on rencontre dans la nature : les côtes rocheuses, les îles éventuelles et les chenaux creusés dans les vasières sont ainsi représentés avec précision. Telemac autorise de densifier le maillage, et donc d'affiner les résultats fournis par le modèle dans les zones d'intérêt.
L'outil de génération de maillage intégré au système TELEMAC adapte la densité du maillage à différents critères comme la profondeur ou la pente des fonds. Il réalise un compromis entre les besoins en précision dans les régions où l'hydraulique est complexe (estrans, berges d'un chenal, etc.) et le nombre total de points. Cette caractéristique est essentielle pour maintenir au modèle son caractère opérationnel en termes de précision et de temps de réponse.
- Tous les modules du système sont fondés sur la méthode des éléments finis. Ils partagent la même architecture, les mêmes structures de données et la même chaîne de traitement. Ils présentent donc une grande compatibilité et le transfert de données d'un code à l'autre est facile.

Utilisé par de nombreux centres de recherche et bureaux d'étude dans le monde, TELEMAC figure actuellement parmi les outils les plus performants du marché.

Le logiciel TELEMAC-2D résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions d'espace horizontal. Ses résultats principaux sont, en chaque point du maillage de résolution, la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sur la verticale.

TELEMAC-2D trouve ses applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale et est capable de prendre en compte les phénomènes physiques suivants :

- Propagation des ondes longues avec prise en compte des effets non linéaires,
- Frottement sur le fond,
- Influence de la force de Coriolis,
- Influence de phénomènes météorologiques : pression atmosphérique et vent,
- Turbulence,
- Ecoulements torrentiels et fluviaux,
- Influence de gradients horizontaux de température ou de salinité sur la densité,
- Coordonnées cartésiennes ou sphériques pour les grands domaines,
- Zones sèches dans le domaine de calcul : bancs découvrant et plaines inondables,
- Entraînement par le courant et diffusion d'un traceur, avec des termes de création ou de disparition,
- Suivi de flotteurs et dérives lagrangiennes,
- Traitement de singularités : seuils, digues, buses,
- Prise en compte des forces de traînée des structures verticales,



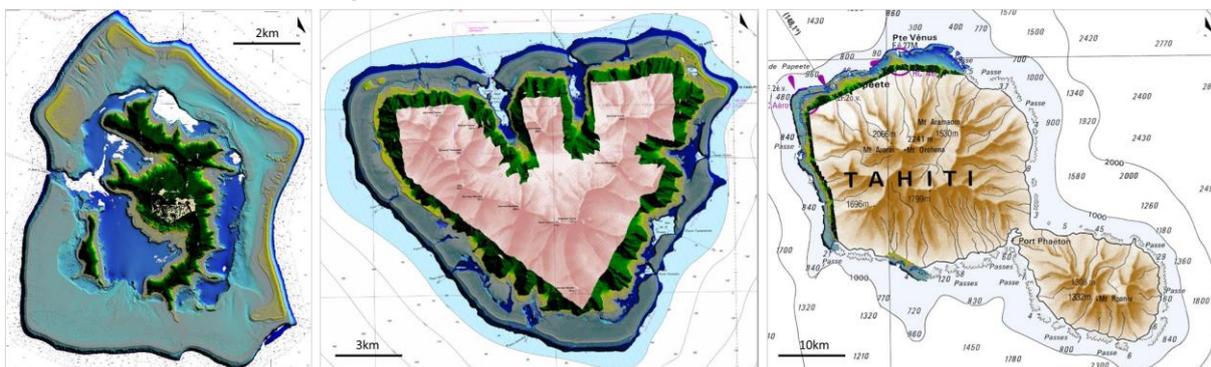
- Prise en compte des phénomènes de porosité,
- Prise en compte des courants de houle par couplage avec les modules ARTEMIS et TOMAWAC.

3.1.4 Données topo-bathymétriques

Pour la construction des modèles, un assemblage topographique et bathymétrique a été utilisé.

Les données lidar 2015 du SHOM ont été utilisées pour les parties terrestres et les petits fonds (cf. Figure 8). Ces données bénéficient d'une résolution horizontale d'1m et une résolution verticale d'1 cm. Des cartographies plus grand format des données lidar sont disponibles en Annexe 2.

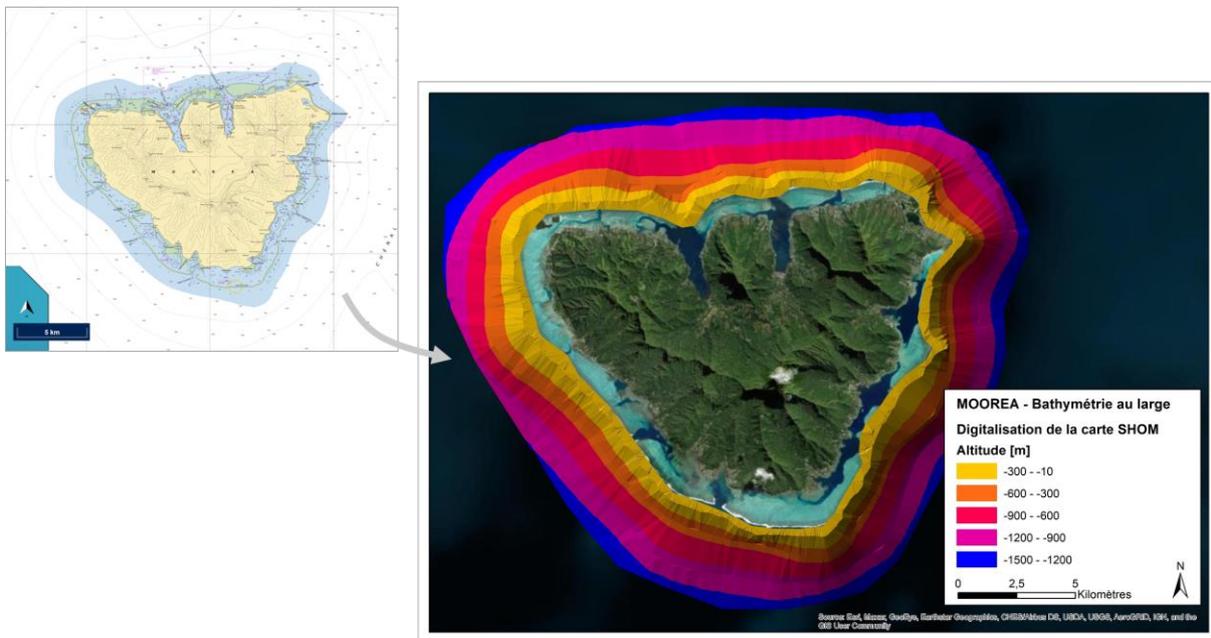
Figure 8 : Donnée Lidar à Bora Bora, Moorea et Tahiti



Source : SHOM 2015 (notice Lidar)

Pour la bathymétrie au large, les cartes marines au 50 000^{ème} du SHOM ont été digitalisées (cf. Figure 9). Cette méthode est beaucoup moins précise, toutefois les variations d'altimétries aux grandes profondeurs ont une influence quasi nulle sur les résultats des modélisations.

Figure 9 : Digitalisation de la carte SHOM à Moorea



Source : data.shom.fr et BRLi



3.1.5 Coefficients de frottement

Les coefficients de frottements, aussi appelé **coefficient de Strickler** (abrégé en Strickler), rendent compte de la facilité de l'eau à s'écouler sur un type de surface donné. Plus la surface est lisse, plus l'eau s'écoule facilement et plus la valeur du coefficient sera élevée. Le coefficient de Strickler, est déterminé empiriquement, il dépend de nombreux facteurs parmi lesquels la rugosité de la surface et la sinuosité.

Les coefficients de frottements utilisés pour les modèles sont des valeurs « classiques » issus des différentes expériences de modélisation sur d'autres secteurs pour ce même genre d'étude.

A noter que pour les zones urbaines, c'est un Strickler équivalent qui est utilisé. Dans la réalité, l'eau circule facilement (coefficient de Strickler élevé) sur des petites sections entre les bâtiments. Dans le modèle, l'eau circule difficilement (coefficient de Strickler faible) sur toute la zone urbaine, les bâtiments ne sont pas modélisés un à un. Cette technique permet de diminuer drastiquement le nombre de maille, un maillage rue par rue avec les bâtiments hors maillage serait trop coûteux en nombre de maille à l'échelle de la zone d'étude. L'utilisation de Strickler équivalents a pour conséquence de sous-estimer les vitesses d'écoulement en revanche : la même quantité d'eau passe sur une surface plus grande.

Pour cette étude, trois types de surface ont été identifiées. Les Strickler correspondants sont reportés Tableau 6. Les différentes zones ont été identifiées grâce aux photographies aériennes. Le même Strickler est utilisé pour le platier corallien et les zones non urbaines telles que les champs ou les espaces arborés, considérées comme relativement rugueuses mais où l'écoulement est plus facilité qu'en zone urbaine. Une illustration des coefficients de Strickler utilisés pour les modélisations sur Tahiti est présenté Figure 10.

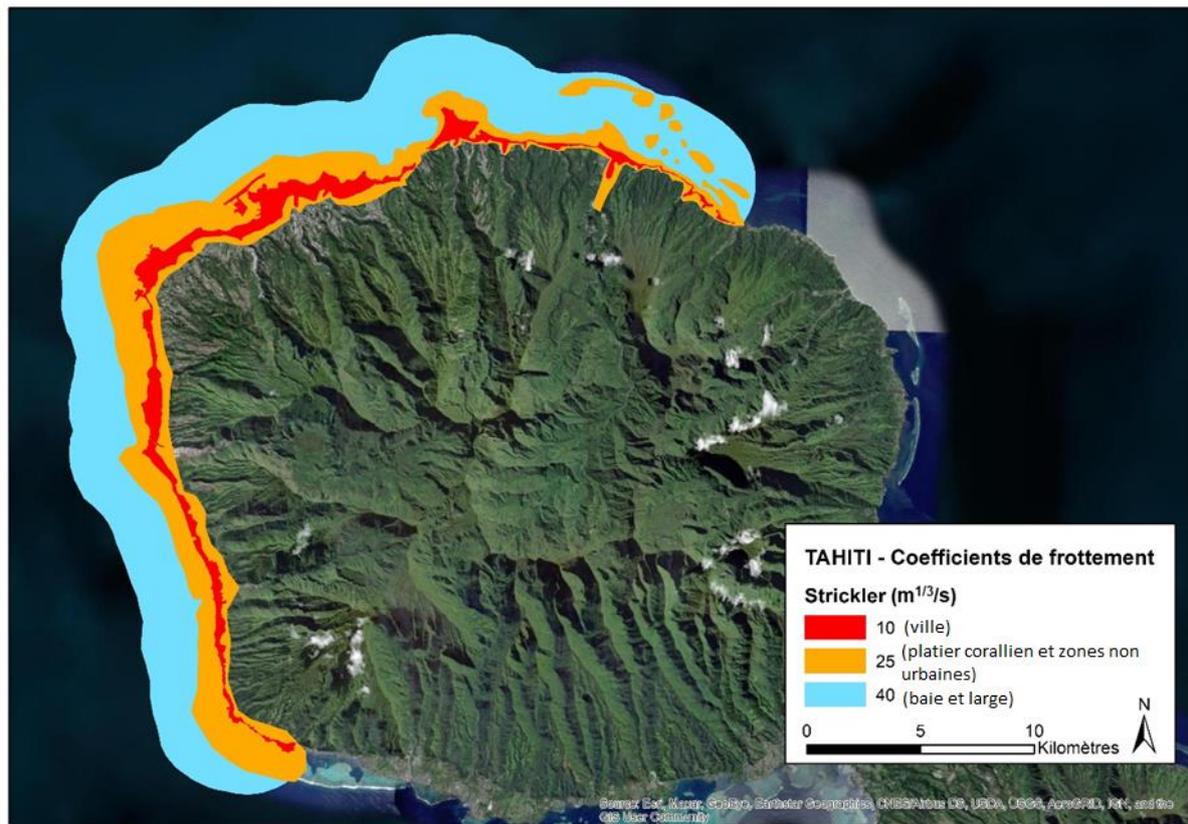
Tableau 6 : Coefficients de Strickler

Type de zone	Coefficient ($m^{1/3}/s$)
Zone urbaine	10
Zone de platier corallien et zones non urbaines	25
Pleine mer	40

Source : BRLi 2021



Figure 10 : Répartition des coefficients de Strickler à Tahiti



Source : BRLi

3.2 CALAGE ET TESTS DE SENSIBILITE

3.2.1 Données de forçage

Comme expliqué au paragraphe 3.1.1 et Figure 6, différents phénomènes contribuent à l'élévation du niveau marin lors d'une tempête : la marée, le vent, la houle et la pression atmosphérique, auxquels il faut ajouter une éventuelle élévation du niveau marin lié au changement climatique. Les contributions de chacun de ces phénomènes au niveau d'eau est une donnée d'entrée du modèle. La contribution de la houle n'est pas directement renseignée sous forme de hauteur d'eau, elle est calculée par le modèle à partir des paramètres de houles (H_{m0} , T_p , Dir).

AUGMENTATION DU NIVEAU MARIN LIEE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La prise en compte de l'élévation du niveau marin, associée au changement climatique, découle de l'application de la circulaire du 27 juillet 2011 qui indique que : « L'hypothèse retenue est celle d'une augmentation du niveau marin égale à 60 cm à l'horizon 2100, dont 20 cm seront intégrés directement à l'aléa de référence. »

- Pour le scénario actuel, la contribution du changement climatique est fixée à +20cm.
- Pour le scénario à l'horizon 100 ans, la contribution du changement climatique est fixée à +60cm.



MAREE

Les niveaux de marée caractéristiques des marégraphes sur chaque île sont compilés dans le tableau suivant (Tableau 7, renseigné en Cote Marine), tels qu'indiqués dans la version 2020 des Références altimétriques maritimes du SHOM. Les marégraphes sont localisés sur la Figure 11.

Le niveau caractéristique retenu est celui des plus hautes marées astronomiques (PHMA) qui correspondent aux plus forts coefficients (120). Les marégraphes sélectionnés sont ceux les plus proches des zones à modéliser.

Les données des marégraphes retenus pour évaluer la contribution des marées sont présentés Tableau 7, leur emplacement est précisé Figure 11.

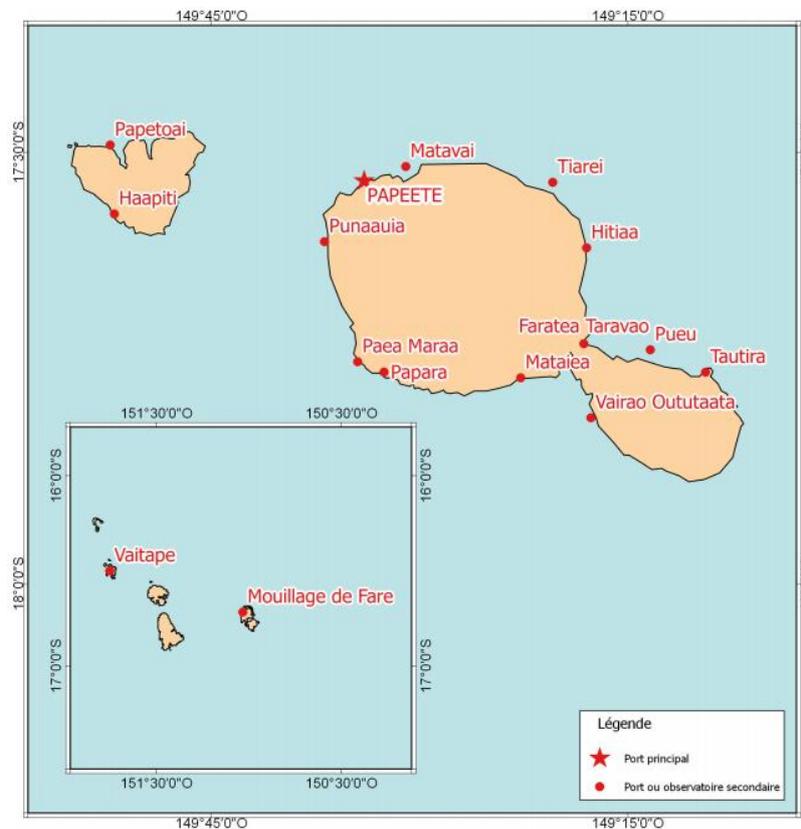
Tableau 7 : Niveaux caractéristiques retenus

Marégraphe	PHMA (CM)	ZH/Ref	PHMA (syst. alti. légal)
TAHITI			
Papeete	0.73	-0.428 NGPF	0.302 m IGN66
MOOREA			
Papetoai	0.66	-0.328 NGPF	0.332 m NGPF
BORA BORA			
Vaitape	0.36	-0.200 NGPF	0.16 m NGPF

PHMA (CM) : Plus Haute Mer Astronomique en côte marine, ZH/Ref : altitude du zéro hydrographique (de la côte marine) dans le système altimétrique légal (IGN66 ou NGPF), PHMA (syst. alti. légal) : Plus Haute Mer Astronomique dans le système altimétrique légal (IGN66 ou NGPF)

Source : SHOM – RAM 2020

Figure 11 : Marégraphes de l'archipel de la Société



Source : SHOM, RAM 2020



Au final, un niveau caractéristique de PHMA a été utilisé par île :

- A Bora Bora : +0.16 m NGPF
- A Moorea : + 0.33 m NGPF
- A Tahiti : +0.30 m NGPF
Pour le cas de Tahiti, il a été fait l'hypothèse qu'au marégraphe de Papeete, le système IGN66 était équivalent au système NGPF.

SURCOTE LIEE A LA DEPRESSION

La pression minimale des cyclones de références calculée avec la méthode des cyclones synthétique est de 959 hPa. Il est estimé que le niveau d'eau augmente linéairement d'un centimètre pour une diminution de pression de 1 hPa. La pression atmosphérique de référence au niveau de la mer étant de 1013 hPa, **la contribution de la dépression atmosphérique au niveau d'eau est estimée à +54 cm.**

SYNTHESE DES NIVEAUX

Le tableau suivant fait la synthèse des niveaux d'eau utilisés pour les modélisations de chaque île.

Tableau 8 : Niveaux d'eau utilisés pour le forçage des modélisations de submersion à Bora Bora, Tahiti et Moorea

Niveaux - Bora Bora	
Marée PHMA (NGPF)	0.16 m
Surcote Patm (NGPF)	0.54 m
Surcote CC ACT (NGPF)	0.20 m
Surcote CC SLR (NGPF)	0.60 m
TOTAL ACT (NGPF)	0.90 m
TOTAL SLR (NGPF)	1.30 m
Niveaux - Tahiti	
Marée PHMA (NGPF)	0.30 m
Surcote Patm (NGPF)	0.54 m
Surcote CC ACT (NGPF)	0.20 m
Surcote CC SLR (NGPF)	0.60 m
TOTAL ACT (NGPF)	1.04 m
TOTAL SLR (NGPF)	1.44 m
Niveaux - Moorea	
Marée PHMA (NGPF)	0.33 m
Surcote Patm (NGPF)	0.54 m
Surcote CC ACT (NGPF)	0.20 m
Surcote CC SLR (NGPF)	0.60 m
TOTAL ACT (NGPF)	1.07 m
TOTAL SLR (NGPF)	1.47 m

Source : RAM SHOM 2020 et BRLi 2022

VENT ET HOULES

Le forçage pour le vent et la houle est intégré via les paramètres W_s , W_d , H_{m0} , T_p et Dir tel qu'explicité dans le chapitre 2.

Pour un évènement de référence donné, les conditions générées par cet évènement de référence aux autres points sont intégrées dans le modèle via des conditions limites imposant une houle variable dans l'espace.



3.2.2 Calage du modèle

Le calage du modèle a été réalisé avec les données du programme ARAI 3 du BRGM *Evaluation probabiliste des houles et des surcotes cycloniques en Polynésie Française* (2013). Pour compléter ce calage, une comparaison avec les résultats obtenus avec des modélisations XBeach a également été effectuée. En revanche, il n'a pas été possible de caler le modèle à partir d'événements historiques par manque de données précises et quantitatives.

3.2.2.1 Projet ARAI 3

Afin de caler le modèle, une simulation reprenant les paramètres tels qu'indiqués dans le rapport ARAI 3 du BRGM a été réalisée. Deux facteurs majeurs varient entre la simulation du BRGM et celle effectuée pour cette étude :

- La topo-bathymétrie : en 2013, le BRGM ne disposait pas du modèle numérique de terrain (MNT) Lidar précis à 1m. Le MNT marin, les cartes bathymétriques du SHOM avaient été numérisées (résolution probable entre 5 et 10m) et le MNT terrestre fourni par le service d'urbanisme était précis à 5m.
- Le modèle utilisé par le BRGM est SWASH, c'est un logiciel vague à vague qui résout les équations de St Venant. Le logiciel utilisé par BRLi lors de cette étude est Telemac2d (en couplage avec Tomawac), qui résout les mêmes équations mais ne prend pas en compte les interactions vague-vague.

Les paramètres utilisés sont récapitulés Tableau 9. La comparaison des résultats pour les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement se trouve Figure 12 et Figure 13.

Tableau 9 : Principaux paramètres de la simulation de calage avec ARAI 3

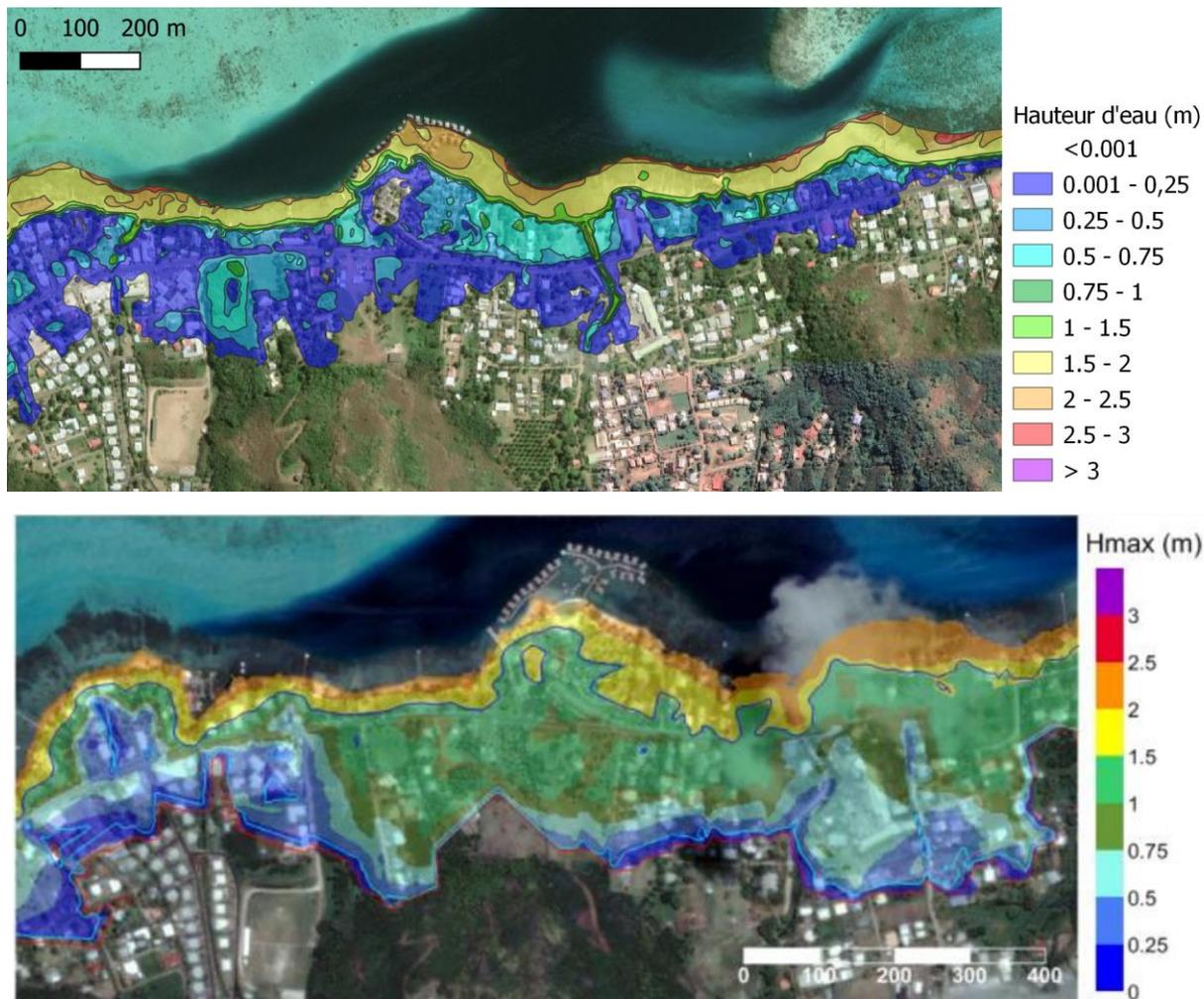
Topo-bathymétrie	
Lidar SHOM 2015	
Niveaux d'eau	
Marée (PHMA)	+ 0.1 m
Surcote atmosphérique	+ 0.5 m
Élévation du niveau de la mer	Horizon temporel actuel (pas d'élévation du niveau de la mer)
Houle	
Hm0	12 m
Tp	12 s
Dir	
Vent	
Aucun	
Mode de simulation	
Stationnaire	

BRLi 2021

Pour simplifier la rédaction, le modèle du BRGM est appelé « modèle ARAI3 » et celui effectué pour cette étude est appelé « modèle Lidar ».



Figure 12 : Comparaison des résultats de simulation avec ARAI 3 pour les hauteurs d'eau

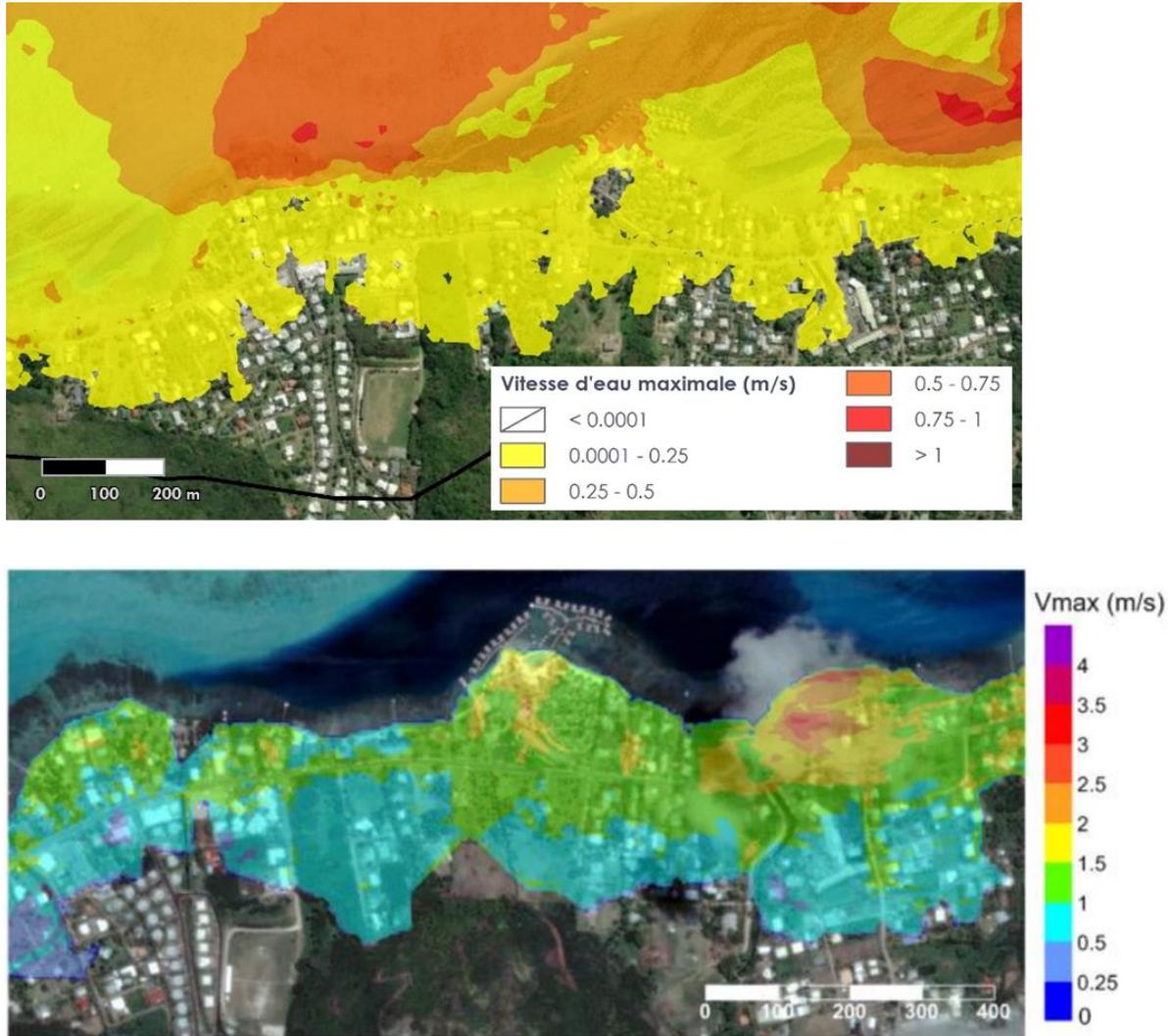


Source : BRLi 2021 (en haut) - Projet ARAI 3, BRGM 2013 (en bas)

Concernant les hauteurs d'eau (Figure 12), l'étendue dans les terres est similaire entre les deux modèles, bien que les surfaces inondées soient un peu plus étalées pour le modèle ARAI3. Les hauteurs d'eau sont de manière générale moins élevées dans le modèle Lidar. En particulier, les plages de valeur les plus représentées dans le modèle Lidar se trouvent entre 0.75cm et 0 cm tandis que pour le modèle ARAI3 elles se trouvent plutôt dans la tranche entre 1m et 50cm.



Figure 13 : Comparaison des résultats de simulation avec ARAI 3 pour les vitesses



Source : BRLi 2021 (en haut) - Projet ARAI 3, BRGM 2013 (en bas)

Pour les vitesses d'écoulement (Figure 13), les étendues se recoupent également, en revanche les vitesses obtenues à terre sont quasi exclusivement dans la tranche inférieure ou égale à 25 m/s pour le modèle Lidar, alors qu'elles sont majoritairement entre 2m/s et 0.5 m/s pour le modèle ARAI3. Ces vitesses moins élevées peuvent possiblement s'expliquer par la différence du Strickler choisi pour la zone urbaine, par les écarts entre les topo-bathymétries ou encore par le fait que le modèle du BRGM soit un modèle vague à vague.

L'exercice de comparaison entre ces simulations est relativement limité, du fait de la grande différence entre les données topo-bathymétriques utilisées et des logiciels. Il permet toutefois de vérifier que les ordres de grandeur et les étendues des surfaces inondées sont cohérents.

3.2.2.2 Modélisation XBeach

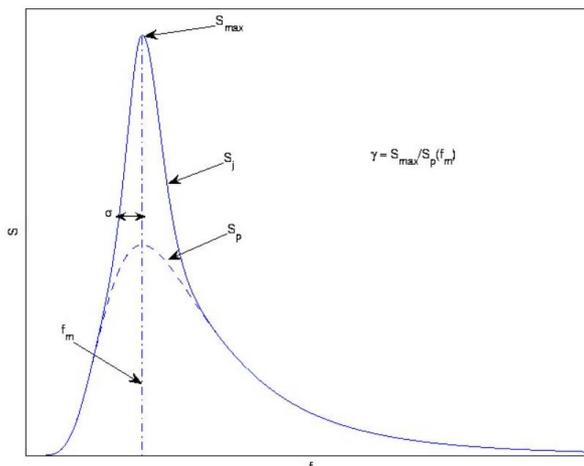
Le calage avec la modélisation XBeach est détaillé chapitre 5.

3.2.3 Tests de sensibilité

Les tests de sensibilité visent à identifier les facteurs ayant la plus grande influence sur les résultats du modèle. Cette analyse permet donc de comprendre quelles sont les données limitantes et à quel point le modèle est fiable.

- Le pas de temps utilisé pour les modélisations est de 1s, ce qui permet un suivi fin, notamment pour les houles à haute fréquence.
- La durée totale des simulations a été contrôlée pour s'assurer que le modèle avait eu le temps de simuler la propagation des houles jusqu'aux parties terrestres et que les courants aient bien eu le temps de se mettre en place.
- Sans surprise, le niveau d'eau (côte initiale / imposée) est le paramètre dont l'impact est le plus flagrant.
- De même, les différentes simulations réalisées ont bien montré la grande influence des paramètres de houle initiale (hauteur significative initiale, période pic initiale, direction initiale), de la configuration du spectre de houle (nombre de fréquences, fréquence minimale, raison fréquentielle) et des conditions limites de houle (position des frontières, hauteurs significatives aux frontières, périodes pic aux frontières, directions aux frontières).
- Les paramètres « gamma » et « s » (pour « sigma ») des spectres de houle ont été ajustés selon les valeurs obtenues par la modélisation des cyclones synthétiques de la phase. Ces paramètres représentent respectivement l'étalement du spectre et l'intensité de son pic (cf Figure 14). Toutefois, l'ajustement spectral ne semble pas avoir de grande influence sur les résultats obtenus par rapport aux valeurs par défaut (gamma 3.3 sigma 1)

Figure 14 : Spectre de houle de type Jonswap"



Source : Ocean-Wave Spectra in wikiwaves

- Un test avec et sans vent a montré que l'influence du vent sur les niveaux d'eau et les vitesses semble minime, ce qui avait également été constaté pour les simulations ARAI 3 du BRGM.
- Des tests avec uniquement le module de houle sans le module de courantologie et vice versa ont permis de contrôler le couplage des modules et de vérifier l'influence bien présente des houles et courants.
- L'influence des valeurs des coefficients de Strickler n'a pas été testé sur ces modèles en particulier, mais d'autres simulations ont montré qu'une variation de +/-20% du coefficient pouvait entraîner des différences de hauteurs d'eau de l'ordre de 5cm.



3.2.4 Conclusions sur le calage et les tests de sensibilité

Trop peu de données historiques sont disponibles pour pouvoir caler les modèles de submersion marine à terre. Toutefois, la comparaison avec les résultats du programme ARAI 3 du BRGM et l'observation des cartes d'aléa submersion marine précédentes ont permis de vérifier la cohérence générale des résultats et de valider la méthodologie. Les tests de sensibilité ont été réalisés pour s'assurer de la fiabilité du modèle qui semble valide.

A noter que dans tous les cas, un modèle reste un « outil » et qu'il faut prendre du recul pour en analyser les résultats. Le modèle possède une marge d'erreur, lié d'une part aux données utilisées mais également intrinsèque (code numérique). Ici, la marge d'erreur est estimée à environ +/-30cm sur les hauteurs d'eau, basé sur les résultats des tests de sensibilité et la comparaison avec les modélisations XBeach.

3.3 SCENARIOS MODELISES

Suites aux simulations visant à tester et calibrer la modèle, les scénarios finaux ont été modélisés.

Des simulations ont été réalisées pour les conditions de houle et de vent pour chaque point de référence et les niveaux d'eau correspondant à chaque horizon temporel actuel et à 100 ans. Ces simulations sont listées ci-après :

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ■ Scénario actuel <ul style="list-style-type: none"> ● Tahiti <ul style="list-style-type: none"> - T01 - T02 - T03 - T05 - T07 ● Moorea <ul style="list-style-type: none"> - M02 - M04 - M05 - M06 - M07 - M08 ● Bora Bora <ul style="list-style-type: none"> - B01 - B03 - B04 - B06 | <ul style="list-style-type: none"> ■ Scénario à 100 ans <ul style="list-style-type: none"> ● Tahiti <ul style="list-style-type: none"> - T01 - T02 - T03 - T05 - T07 ● Moorea <ul style="list-style-type: none"> - M02 - M04 - M05 - M06 - M07 - M08 ● Bora Bora <ul style="list-style-type: none"> - B01 - B03 - B04 - B06 |
|--|---|



4 CARACTÉRISATION DE L'ALÉA SUBMERSION MARINE D'ORIGINE CYCLONIQUE

4.1 ALÉA SUBMERSION MARINE

4.1.1 Echelle de qualification

Dans le cadre de la submersion marine, comme pour tout aléa inondation, il existe une gradation dans la manifestation des phénomènes. Cette gradation se traduit par un mode de qualification adéquat qui permet de traduire les risques et avoir connaissances des enjeux dans chaque zone. Afin de classifier les aléas, les recommandations du « Guide méthodologique - Plan de Prévention des Risques Littoraux » édité en mai 2014 par le Ministère de l'Ecologie ont été appliquées. Cinq catégories d'aléa ont été créées : faible, modéré, fort, très fort et majeur. Selon le PPRL, la limite entre l'aléa modéré et l'aléa fort dépend de la capacité à se mouvoir, d'un adulte en bonne santé, lui permettant ainsi d'échapper sans assistance au phénomène en cours.

4.1.2 Mode de qualification

La qualification de l'aléa, c'est-à-dire la détermination du niveau d'aléa dépend de deux paramètres : la hauteur d'eau produite par la submersion et la dynamique de submersion liée à la rapidité du phénomène que l'on évalue grâce à la vitesse d'écoulement de l'eau.

4.1.2.1 Hauteur d'eau produite par la submersion

Les hauteurs d'eau sont qualifiées systématiquement pour l'aléa de référence. Les seuils de hauteur d'eau sont définis par un pas de 50cm selon le tableau ci-dessous (Tableau 10).

Tableau 10 . Qualification des hauteurs d'eau

Classification des hauteurs d'eau		
Hauteurs d'eau au-delà de 0m NGPF	Classe	Valeur
Hauteur < 0,5 m	Faible	1
0,5 m < Hauteur < 1 m	Modérée	2
1 m < Hauteur < 1,5 m	Forte	3
Hauteur > 1,5 m	Très forte	4

Source : BRLi 2021

Dynamique de submersion liée à la rapidité du phénomène

La dynamique de submersion est également qualifiée à partir de la vitesse d'écoulement des eaux. Les seuils suivants ont été utilisés pour la vitesse d'écoulement :

- $V > 0,75$ m/s vitesse d'écoulement très rapide,
- $0,5 < V < 0,75$ m/s vitesse d'écoulement rapide,
- $V < 0,5$ m/s vitesse d'écoulement lente.



Tableau 11 . Qualification des vitesses d'écoulement

Classification des vitesses d'écoulement		
Vitesse d'écoulement au-delà de 0m NGPF	Classe	Valeur
Vitesse < 0,5 m/s	Lent	1
0,5m/s < Vitesse < 0,75 m/s	Rapide	2
Vitesse > 0,75 m/s	Très rapide	3

Source : BRLi 2021

4.1.2.2 Définition de l'aléa submersion

L'aléa submersion marine peut ainsi être caractérisé en croisant les classes de hauteurs d'eau et de vitesse d'écoulement selon le tableau suivant :

Tableau 12 . Qualification de l'aléa submersion marine par croisement des hauteurs et des vitesses

Qualification de l'aléa submersion marine (méthode adaptée du guide PPRL 2014)			
	Vitesse < 0,5 m/s	0,5m/s < Vitesse < 0,75 m/s	Vitesse > 0,75 m/s
Hauteur < 0,5 m	Aléa faible	Aléa fort	Aléa fort
0,5 m < Hauteur < 1 m	Aléa modéré	Aléa fort	Aléa très fort
1 m < Hauteur < 1,5 m	Aléa fort	Aléa très fort	Aléa majeur
Hauteur > 1,5 m	Aléa très fort	Aléa majeur	Aléa majeur

Source : BRLi 2021

Les aléas très forts et majeurs correspondent à des phénomènes susceptibles de produire des dégâts majeurs et immédiats sur les enjeux rencontrés.

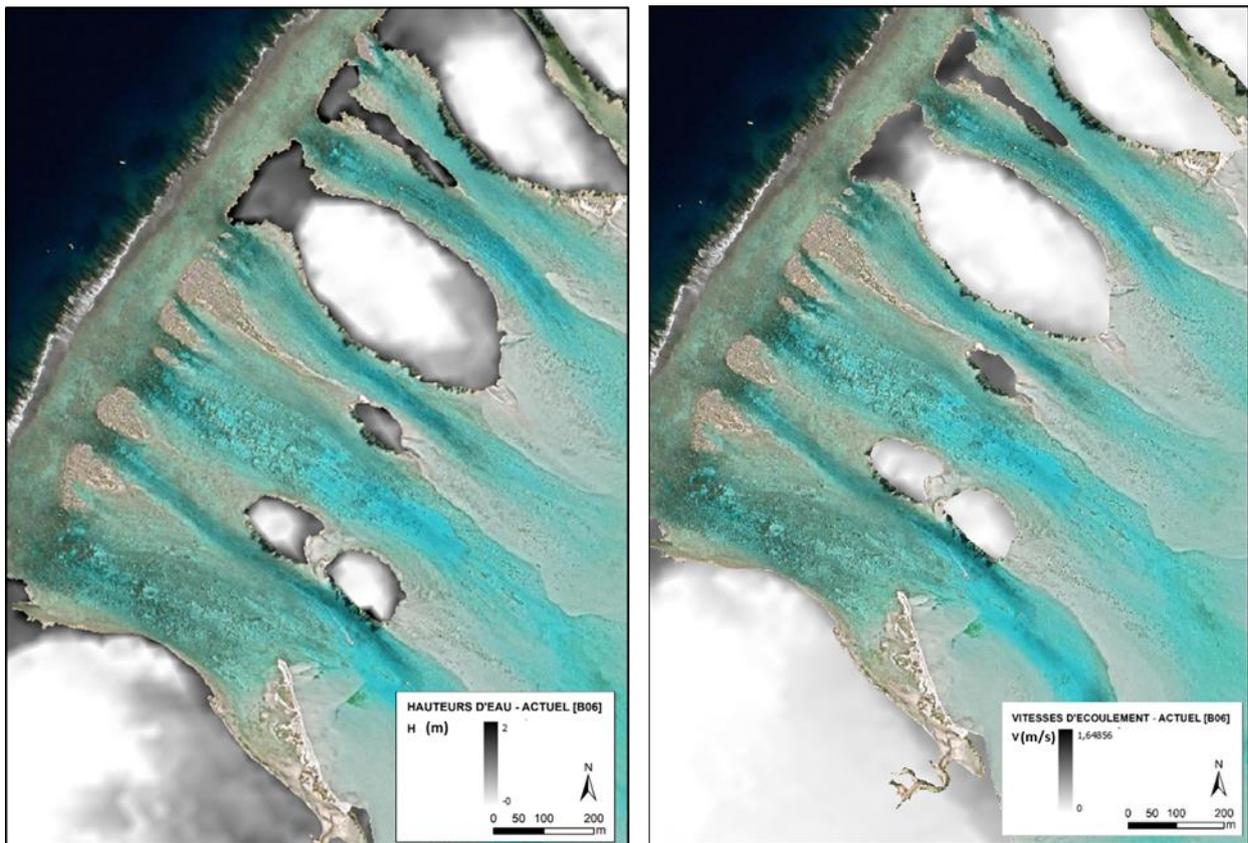
4.1.3 Traitement des résultats de modélisation

Pour chaque aléa de référence, les modélisations donnent comme résultats les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement en chaque point du maillage. Pour chaque aléa de référence, les modélisations sont traitées de manière à garder uniquement la zone située au-dessus de l'altitude 0m NGPF puisque l'aléa submersion marine est caractérisé uniquement dans les zones non immergées avant l'évènement/scénario étudié.

La Figure 15 illustre des résultats des modélisations sur des motus légèrement au Sud-Ouest de l'aéroport de Bora-Bora avec les hauteurs d'eau (à gauche) pour la zone située au-dessus de l'isoline d'altitude 0m NGPF et les vitesses d'écoulement (à droite) également pour la zone située au-dessus de l'isoline d'altitude 0m NGPF.



Figure 15 : Résultats des modélisations avec la hauteur d'eau (H, à gauche) et la vitesse d'écoulement (V, à droite) – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel

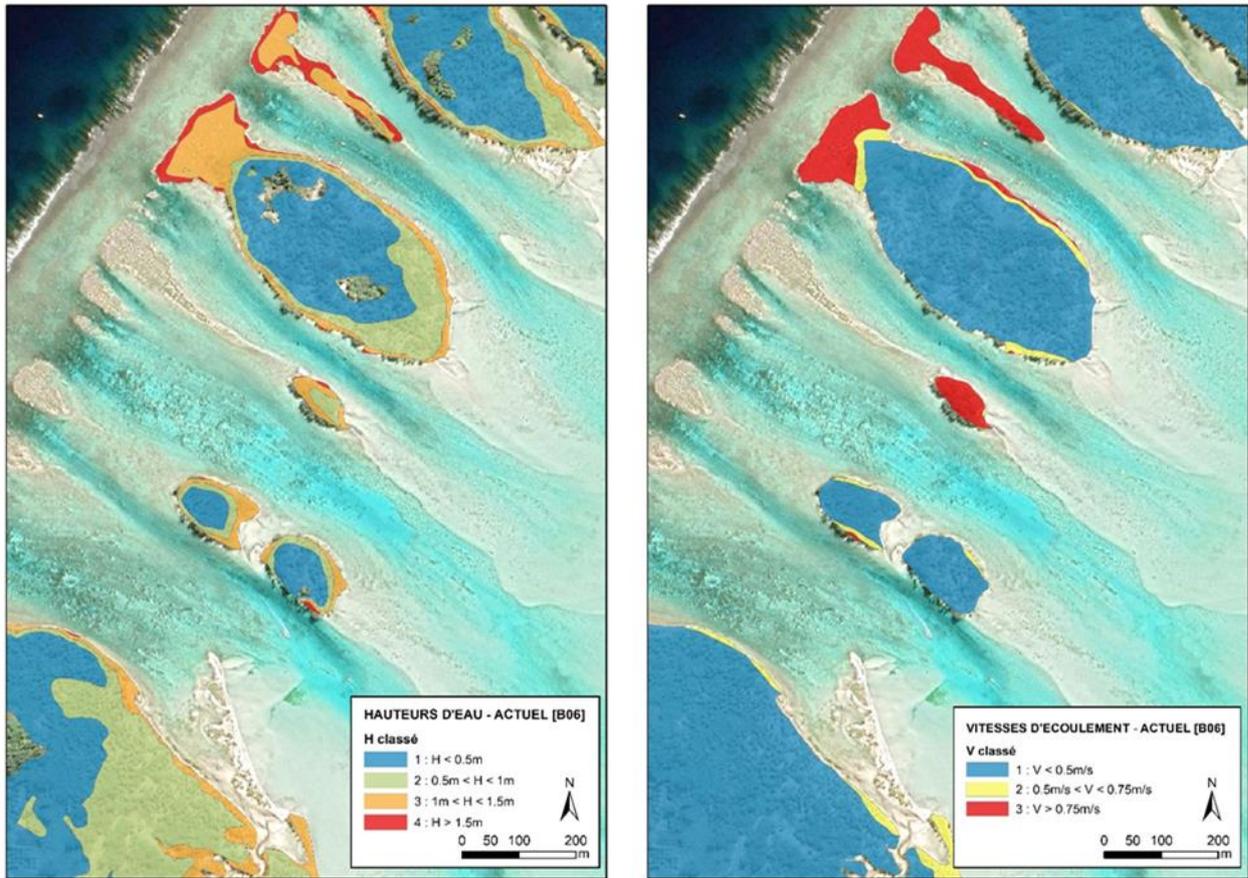


Source : BRLi 2021

Ensuite, les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement sont classées en fonction des tableaux de qualification présentés plus haut (Tableau 10 et Tableau 11). Cette étape est représentée Figure 16.



Figure 16 : Classification effectuée sur la hauteur d'eau (H à gauche) et la vitesse d'écoulement (V à droite) – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel



Source : BRLi 2021

Enfin, le croisement des classes de H et V permet d'obtenir l'aléa submersion marine selon les critères énoncés dans le tableau 3 pour chaque évènement de référence.

L'aléa submersion marine pour la zone exemple est ainsi obtenu à partir de la classification de H et de la classification de V. Il est présenté Figure 17.



Figure 17 : Aléa submersion marine – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel



Source : BRLi 2021



4.2 ALÉA ACTION MÉCANIQUE DES HOULES

4.2.1 Principe de qualification

D'autres aléas accompagnent la submersion marine. Il s'agit principalement des effets de dissipation d'énergie des vagues induisant des chocs mécaniques pouvant être extrêmement violents.

Le PPRL recommande de fixer la largeur de la zone soumise au déferlement par une bande forfaitaire de largeur égale à 50m pour une zone caractérisée par des franchissements modérés dans un contexte cyclonique. Cependant, cette bande forfaitaire peut être pénalisante car elle peut surestimer la zone soumise à l'aléa choc mécanique des vagues à certains endroits.

Le choc des vagues a donc été considéré comme un aléa à part entière. Son impact est distinct d'une inondation et est lié à la pression exercée par l'impact des vagues sur les structures.

Afin de cartographier l'aléa action mécanique des houles, des grandeurs physiques traduisant la force du déferlement et la hauteur des vagues ont été extraites des modélisations. Trois classes d'aléa ont été créées : faible, modéré et fort. L'état d'esprit général concordant au guide PPRL est de fixer comme limite entre aléa modéré et l'aléa fort un critère tel qu'un adulte en bonne santé puisse échapper au phénomène en cours sans assistance.

Pour déterminer la bande d'action mécanique des houles, les simulations des événements de référence les plus contraignants ont été utilisés. Les autres résultats n'apportent pas de contribution supplémentaire à cette bande. Le Tableau 13 présente les événements de référence dont les résultats de simulations ont été retenus pour caractériser l'aléa action mécanique des houles.

Tableau 13 . Evènements de référence sélectionnés pour l'aléa action mécanique des houles

Tahiti
1 évènement de référence
T07
Moorea
3 évènements de référence
M05, M07, M08
Bora Bora
2 évènements de référence
B03, B06

4.2.2 Mode de qualification

En l'absence de procédure réglementaire arrêtée dans ce domaine, des grandeurs issues des modélisations permettant de caractériser la gravité du choc de l'action mécanique des houles ont été extraites des résultats Telemac. Les deux paramètres utilisés sont :

- la hauteur significative de la houle (H_s), assimilée à H_{m0} (cf chapitre 1.3)
- le paramètre Beta (β , « breaking wave coefficient »), qui traduit la dissipation d'énergie induite lors du déferlement.



4.2.2.1 Hauteur significative de la houle

Pour chaque aléa de référence, les hauteurs significatives de houle sont systématiquement quantifiées. Les seuils de hauteur significative de houle sont définis par pas de 25cm comme indiqué au Tableau 14. Il est fait l'hypothèse qu'une houle ayant une hauteur significative supérieure à 50cm en train de déferler peut empêcher un adulte d'échapper au phénomène.

Tableau 14 . Qualification des hauteurs de houle

Classification des hauteurs de houle		
Hauteur de houle	Classe	Valeur
Hs < 0,25 m	Faible	1
0,25 m < Hs < 0,5 m	Modérée	2
Hs > 0,5 m	Forte	3

Source : BRLi 2022

4.2.2.2 Paramètre de déferlement

Le paramètre (β , « breaking wave coefficient ») traduit la dissipation d'énergie qui a lieu lors du déferlement. Ce paramètre est compris entre -1 et 0, plus β est proche de -1 plus la perte d'énergie est importante et donc plus le déferlement est violent et dangereux. Dans les modélisations réalisées, le paramètre β varie de -0.30 à 0. Il est considéré qu'il n'y a pas de déferlement quand le paramètre vaut 0. En étudiant les sorties des différents aléas de référence, deux classes pour le paramètre β ont été créées : un déferlement peu énergétique ($\beta > -0,1$) et un déferlement considéré comme énergétique ($\beta < -0,1$), comme présenté Tableau 15.

Tableau 15 : Qualification du paramètre de déferlement

Classification du paramètre β		
Valeur (sans unité)	Classe	Valeur
Beta > -0,1	Modérée	1
Beta < -0,1	Forte	2

Source : BRLi 2022

4.2.2.3 Définition de l'aléa action mécanique des houles par croisement des paramètres Hs et Beta

L'aléa choc mécanique des houles peut ainsi être caractérisé en croisant les classes de hauteurs significatives de houles avec les classes du paramètre de déferlement selon le Tableau 16. Ainsi, seule une vague ayant une hauteur significative supérieure à 0,5m et déferlant énergétiquement entrainera la classification en aléa fort. Les autres cas sont classés en tant qu'aléa négligeable, faible ou modéré.



Tableau 16 : Classes d'aléa pour l'action mécanique des houles

Qualification de l'aléa action mécanique des houles		
	Beta > -0,1	Beta < -0,1
Hs < 0,25 m	Aléa négligeable	Aléa faible
0,25 m < Hs < 0,5 m	Aléa faible	Aléa modéré
Hs > 0,5 m	Aléa modéré	Aléa fort

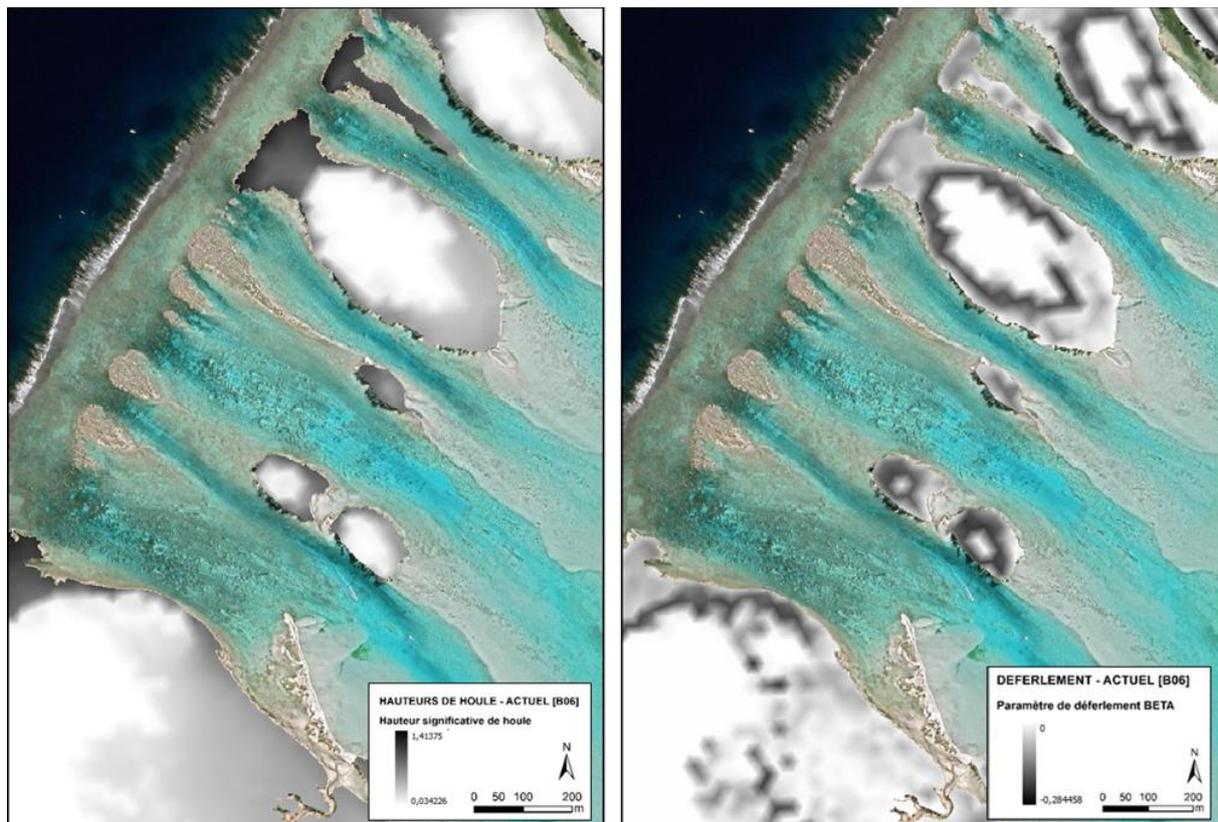
Source : BRLi 2022

4.2.3 Traitement des résultats de modélisation

Pour chaque aléa de référence, les modélisations donnent Hs et β en chaque point du maillage. Pour chaque aléa de référence, les modélisations sont traitées de manière à garder uniquement la zone située au-dessus de l'altitude 0 puisque l'aléa est caractérisé uniquement dans les zones non immergées avant l'évènement/scénario étudié.

La Figure 18 illustre des résultats des modélisations sur des motus au Sud-Ouest de l'aéroport de Bora-Bora avec les hauteurs significatives de houle (à gauche) et le paramètre de déferlement (à droite).

Figure 18 : Résultats des modélisations pour la hauteur significative de houle (à gauche) et le paramètre de déferlement (à droite) – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel

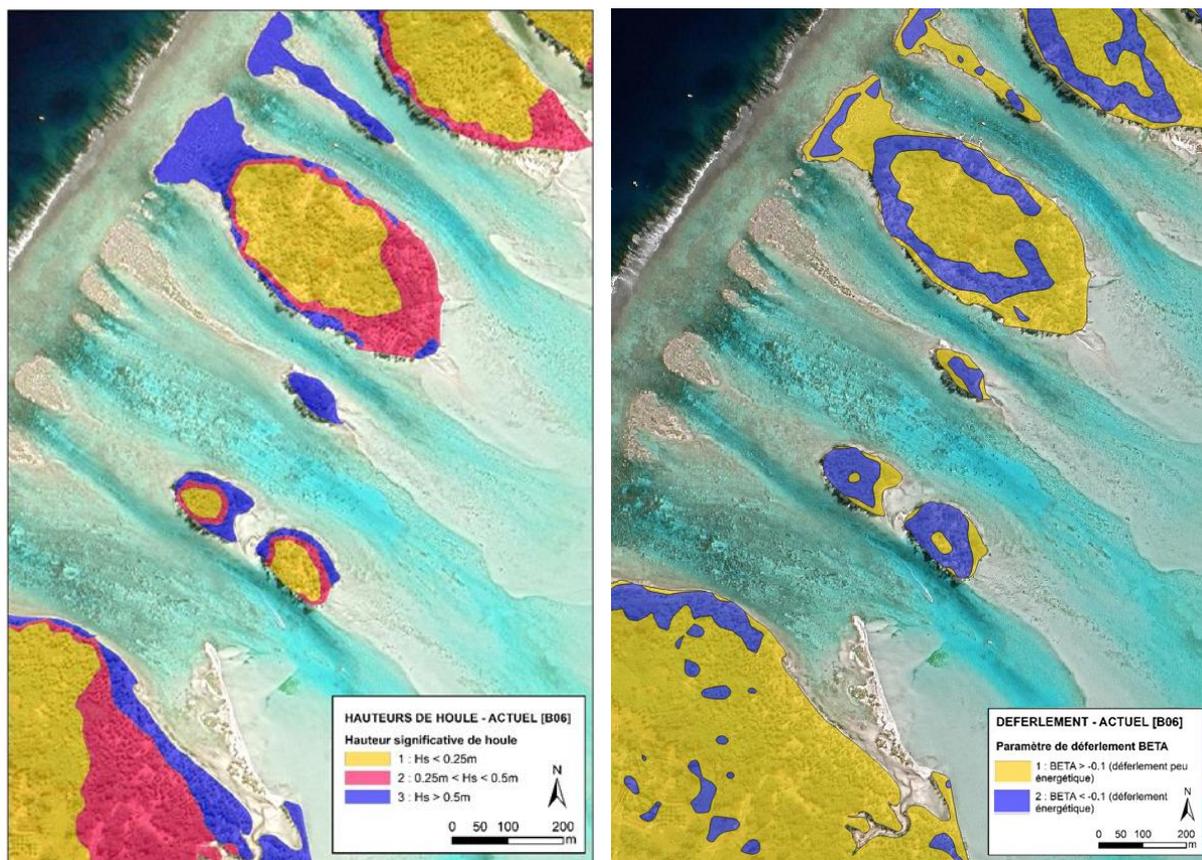


Source : BRLi 2022

Ensuite, les hauteurs significatives de houle et les paramètres de déferlement sont classés en fonction des tableaux de qualification explicités plus haut (Tableau 15 et Tableau 16). Cette étape est représentée Figure 19.



Figure 19 : Classification effectuée sur la hauteur significative de la houle (à gauche) et le paramètre de déferlement (à droite) – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel



Source : BRLi 2022

Enfin, le croisement des classes de H_s et β permet d'obtenir l'aléa submersion marine selon les critères énoncés dans le Tableau 16 pour chaque évènement de référence.

L'aléa submersion marine pour la zone exemple est ainsi obtenu à partir de la classification de H et de la classification de V . Il est présenté Figure 20.



Figure 20 : Aléa choc mécanique des vagues – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel



Source : BRLi 2022



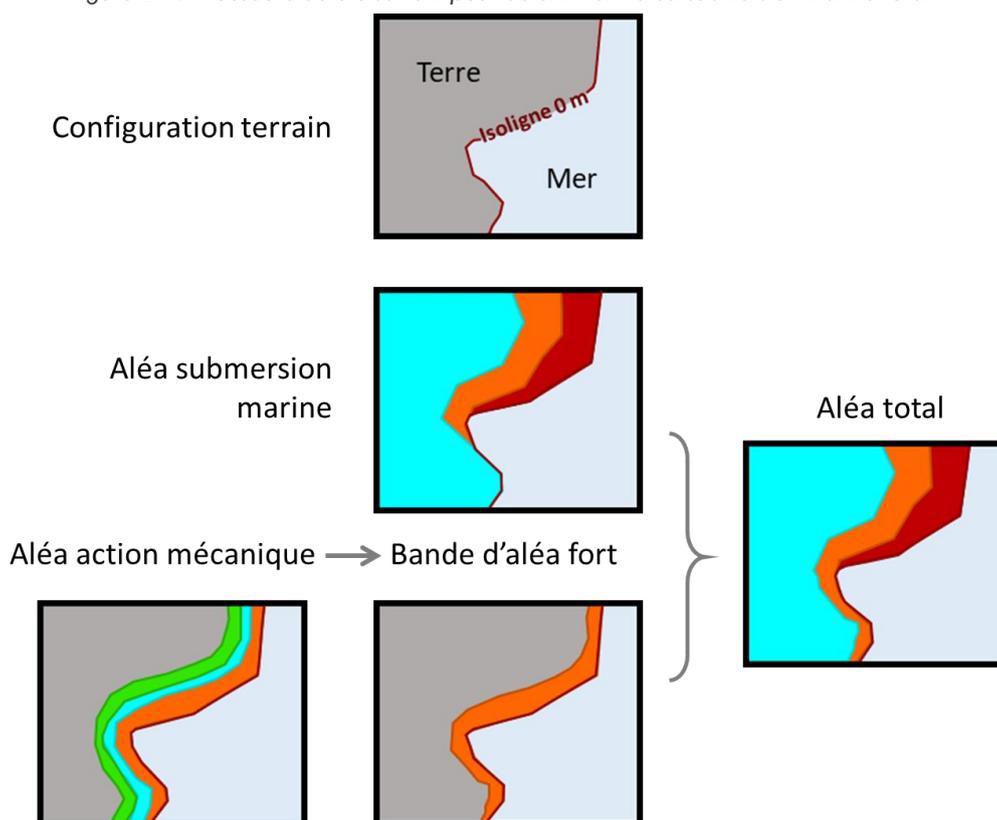
4.3 ALÉA SUBMERSION MARINE TOTAL : SUBMERSION ET ACTION MÉCANIQUE DES HOULES

Une fois les cartes d'aléa submersion marine et choc mécanique des houles réalisées pour chaque évènement de référence, une carte de la somme de tous les aléas de submersion marine et une carte de la somme de tous les aléas chocs mécaniques des houles sont d'abord réalisées séparément pour chaque île pour le scénario actuel et pour le scénario à 100 ans. Quatre cartes sont donc obtenues.

Pour réaliser ces cartes totales, l'aléa le plus défavorable évalué pour les évènements de référence est retenu en chaque point. Par exemple, si un point situé sur un motu à Bora-Bora a un aléa submersion marine classé en aléa modéré pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel, mais que pour l'évènement de référence B03 pour le scénario actuel, l'aléa submersion marine est majeur, alors dans la carte synthèse ce point présentera un aléa majeur.

Ensuite, pour regrouper ces deux aléas et faire une carte synthèse, l'aléa classé « fort » issu de l'aléa choc mécanique des vagues est extrait et additionné à la carte totale issue de l'aléa submersion marine en retenant à chaque fois l'aléa le plus défavorable entre la submersion et l'action mécanique des houles. Cette procédure est illustrée Figure 21.

Figure 21 : Procédure de croisement pour déterminer l'aléa submersion marine total

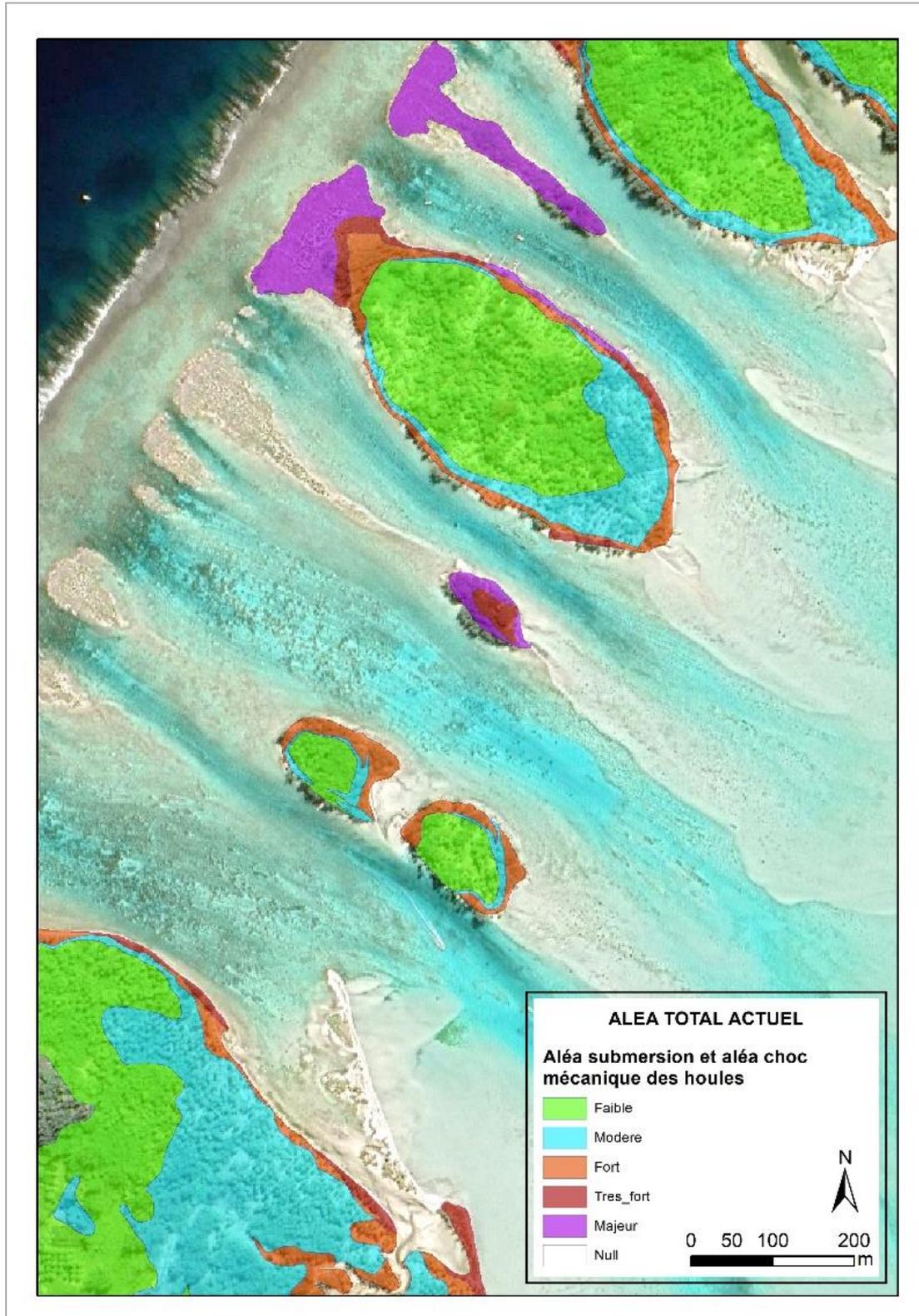


Source : BRLi 2022

Ainsi, le croisement de l'aléa fort action mécanique des houles et de l'aléa submersion marine permet d'obtenir l'aléa total. L'exemple du résultat obtenu sur les motus au Sud-Ouest de l'aéroport de Bora Bora est présenté Figure 22. La bande forte issue de l'aléa action mécanique des houles vient se superposer à celle issue de la submersion marine et dans certains cas en augmenter la largeur. Cela est dû au fait que dans le cas des évènements modélisés pour un cyclone le niveau d'eau est plus haut qu'habituellement, les vagues vont donc naturellement déferler un peu plus vers l'intérieur des terres que cela aurait été le cas hors évènement cyclonique.



Figure 22 : Aléa total correspondant à l'aléa le plus défavorable entre l'aléa submersion marine et la bande forte de l'aléa action mécanique des houles – Exemple des motus de Bora-Bora pour l'évènement de référence B06 pour le scénario actuel



Source : BRLi 2022

5 MODELISATION X-BEACH

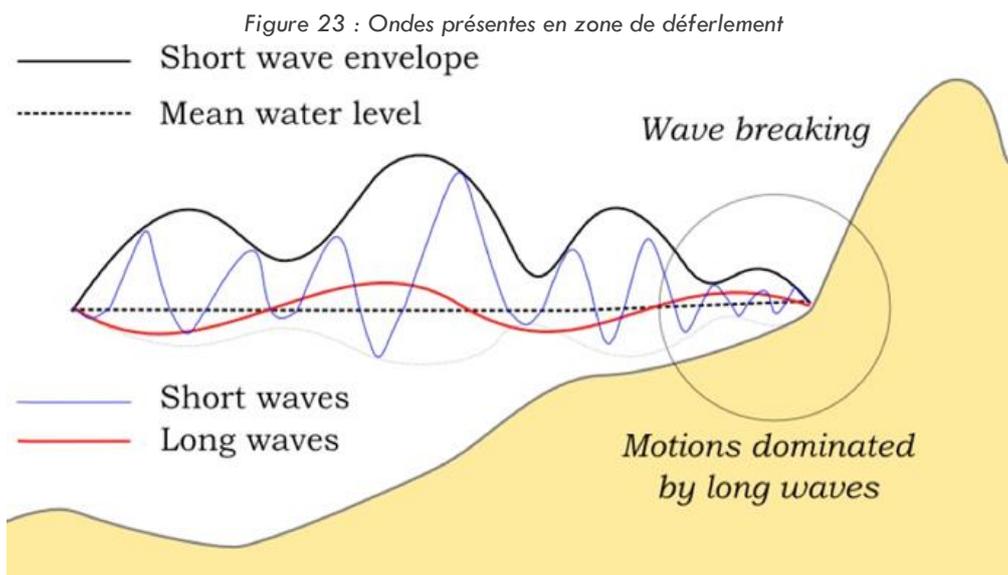
5.1 DESCRIPTION DU MODELE

X-Beach est un modèle numérique développé à l'origine pour simuler les processus et les impacts hydrodynamiques et morphodynamiques sur les côtes sablonneuses d'une taille de domaine de plusieurs kilomètres et à l'échelle temporelle des tempêtes. Depuis lors, le modèle a été appliqué à d'autres types de côtes et à d'autres objectifs. Le modèle prend en considération la dynamique côtière liée aux ondes courtes (réfraction, shoaling et déferlement), aux ondes longues (ondes infragravitaires) et à leur transformation (génération, propagation, dissipation), le wave-setup (montée du niveau moyen de l'eau du aux vagues déferlantes lors des tempêtes). Souvent les vagues sont irrégulières et apparaissent sous forme de groupes. Il existe des oscillations à l'échelle de ces groupes, ce sont des ondes longues ou infragravitaires. La vitesse de ces ondes est la même des autres vagues, alors que leur période est plus longue : ce sont des ondes liées qui peuvent avoir un impact très violent sur le littoral. L'analyse morphodynamique du modèle inclut le transport sédimentaire.

Pour modéliser l'impact des vagues sur une plage, il existe deux méthodes :

- Résoudre les équations de Saint-Venant (Shallow Water Equations) qui permet de résoudre et analyser chaque vague qui passe en faisant une intégration sur la profondeur et une résolution temporelle. Cette technique est coûteuse et longue.
- Résoudre l'équation de conservation de l'action (rappelé ci-dessous) qui réalise une analyse spectrale plutôt qu'une analyse temporelle. C'est-à-dire que l'on analyse plus chaque vague mais les propriétés du champ moyen. Celle méthode est moins coûteuse en temps, c'est celle que l'on utilise sur X-Beach. En utilisant l'équation de conservation de l'action on va forcer l'apparition d'ondes longues (ondes infra-gravitaires liées aux groupes de vagues) et du courant moyen que l'on pourra ensuite analyser grâce aux équations de Saint-Venant.

Arrivées à la côte, les ondes infra-gravitaires peuvent avoir une plus grande importance relative que la hauteur moyenne des ondes courtes (voir schéma ci-dessous Figure 23). C'est pour cela qu'il est important d'étudier leur influence.



Source : XBeach user manual (2014)



Ainsi X-Beach est un modèle qui résout les variations des ondes courtes à l'échelle du groupe de vagues (enveloppe des ondes courtes) et les ondes longues qui leur sont associées.

X-Beach se différencie ainsi de Telemac car ce logiciel permet de mesurer l'influence des ondes infra-gravitaires sur la submersion marine.

5.2 MODELISATIONS REALISEES

Afin de comparer et estimer l'influence des ondes infra gravitaires sur l'aléa submersion marine, des modélisations ont été réalisées à Bora-Bora sur deux profils pour évaluer l'altitude maximale atteinte par l'eau, assimilée au run-up pour ensuite les comparer aux résultats issus. Les profils de la passe de Bora-Bora ainsi que la zone de l'aéroport ont été choisies pour comparer les résultats issus du modèle X-Beach de ceux issus du modèle Telemac puisque ces deux zones sont des zones à enjeux.

Figure 24 : Localisation des profils X-Beach



Source : BRLi 2022

Les conditions aux limites des vagues ne peuvent être appliquées qu'à la limite au large sur le logiciel X-Beach. Afin de regarder la hauteur d'eau maximale atteinte par l'eau sur l'île centrale pour les deux profils, deux méthodes différentes ont été utilisées pour déterminer les conditions aux limites sur les deux types de profil.

Pour le profil de la passe de Bora-Bora (en jaune sur la Figure 24), les conditions aux limites appliquées correspondent au spectre de houle de l'évènement le plus défavorable pour ce profil, c'est-à-dire l'évènement de référence B06.



Tableau 17 : Conditions initiales pour l'évènement de référence B06

Profil Passe – B06	Scénario actuel	Scénario à 100 ans
Niveau d'eau	0.9m	1.3m
Conditions limites de houle	Spectre Jonswap	Spectre Jonswap
Paramètres caractéristiques du spectre	Hm0 = 9.1m // Fréquence propre = 0.08929 s-1 // Direction principale = 315 °	Hm0 = 9.1m // Fréquence propre = 0.08929 s-1 // Direction principale = 315 °
Paramètre de vent	Direction : 310° // Vitesse : 39 m/s	Direction : 310° // Vitesse : 39 m/s

Source : BRLi 2022

Pour le profil en rouge situé au niveau de l'aéroport, la méthode est différente. Les conditions prises en entrée correspondent aux sorties du modèle Telemac-Tomawac en prenant la hauteur significative de houle, la fréquence propre du spectre et la direction principale de celui-ci au point désigné sur la figure, sachant que ces résultats sont issues d'une modélisation Telemac-Tomawac de l'évènement le plus défavorable pour cette zone, c'est-à-dire l'évènement B01.

Tableau 18 : Conditions initiales pour l'évènement B01

Profil Aéroport – B01	Scénario actuel	Scénario à 100 ans
Niveau d'eau	0.9m	1.3m
Conditions limites de houle	Spectre Jonswap	Spectre Jonswap
Paramètres caractéristiques du spectre	Hm0 = 0.5m // Fréquence propre = 0.08547 s-1 // Direction principale = 305 °	Hm0 = 0.5m // Fréquence propre = 0.08547 s-1 // Direction principale = 305 °
Paramètre de vent	Direction : 350° // Vitesse : 28 m/s	Direction : 350° // Vitesse : 28 m/s

Source : BRLi 2022

5.3 RESULTATS

Les paramètres de sortie du fichier X-Beach sont :

- - la hauteur significative moyenne des vagues H (Hmean) ;
- - position du fond Zb ;
- - la surface libre Zs (ou Zs max pour l'altitude maximale atteinte par l'eau en chaque point).

Pour chaque simulation, l'analyse de l'altitude maximum atteinte par l'eau (Zs max) donne une indication sur le run-up. La comparaison des résultats issus du modèle X-Beach avec ceux issus des modélisations Télémac permet d'évaluer l'influence des ondes-infragravitaires.

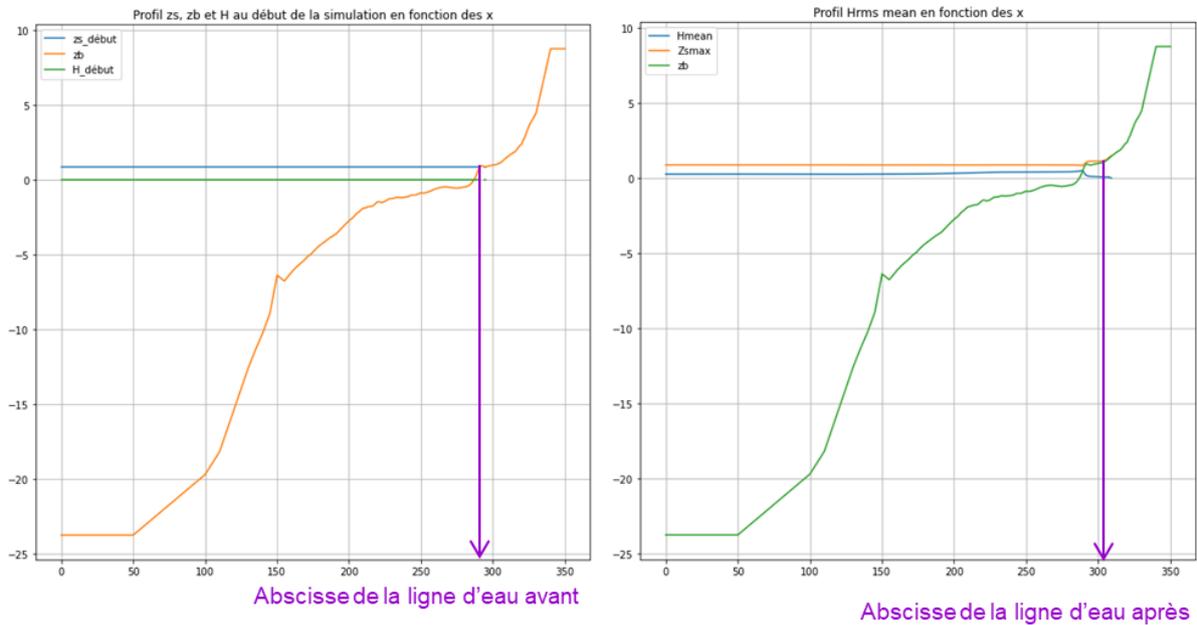
5.3.1 Résultats au niveau de l'aéroport – évènement de référence B01

5.3.1.1 Scénario actuel

En prenant en compte les ondes infra-gravitaires avec le mode « surfbeat » d'X-Beach, l'altitude maximale mesurée pour la ligne d'eau est de 1.55 m, le run-up de 65 cm dans le cas d'un scénario de type actuel c'est-à-dire avec une surcote initiale de 0.9 m. En comparant les abscisses de la ligne d'eau avant et après sur la Figure 25, le phénomène de submersion marine est bien visible.



Figure 25 : Profils des différents paramètres en mètre, pour l'évènement de référence B01 scénario actuel
 Au début de la simulation (à gauche) : niveau d'eau (z_s _début), Hauteur de houle (H_s) et profil bathymétrique (z_b),
 A la fin de la simulation (à droite) : niveau d'eau maximal atteint (z_{smax}), Hauteur moyenne de houle sur toute la
 simulation (H_{mean}) et profil bathymétrique (z_b)



Source : BRLi 2022

5.3.1.2 Scénario 2120

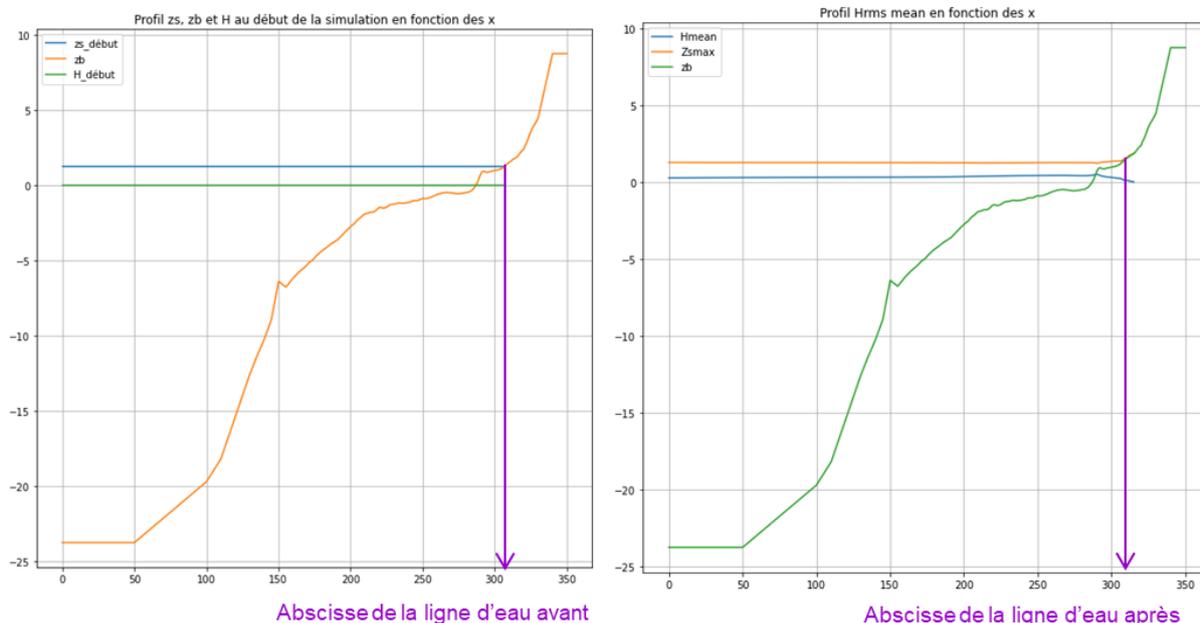
56

Pour le scénario à 2120, les mêmes conditions sont données excepté le niveau initial de l'eau qui passe de 0.9m à 1.3m. L'altitude maximale mesurée pour la ligne d'eau est de 1.97 m, donc un run-up de 67cm dans le cas d'un scénario avec élévation du niveau marin (cf. Figure 26).

Le run-up entre le scénario actuel et le scénario avec élévation sont du même ordre de grandeur, seulement dans le scénario à 100 ans les dégâts causés seront plus importants car l'altitude finale atteinte par l'eau est plus importante du fait des conditions initiales différentes.



Figure 26 : Profils des différents paramètres en mètre, pour l'évènement de référence B01 scénario à 100 ans
Au début de la simulation (à gauche) : niveau d'eau (z_s _début), Hauteur de houle (H_s) et profil bathymétrique (z_b),
A la fin de la simulation (à droite) : niveau d'eau maximal atteint (z_{smax}), Hauteur moyenne de houle sur toute la simulation (H_{mean}) et profil bathymétrique (z_b)



Source : BRLi 2022

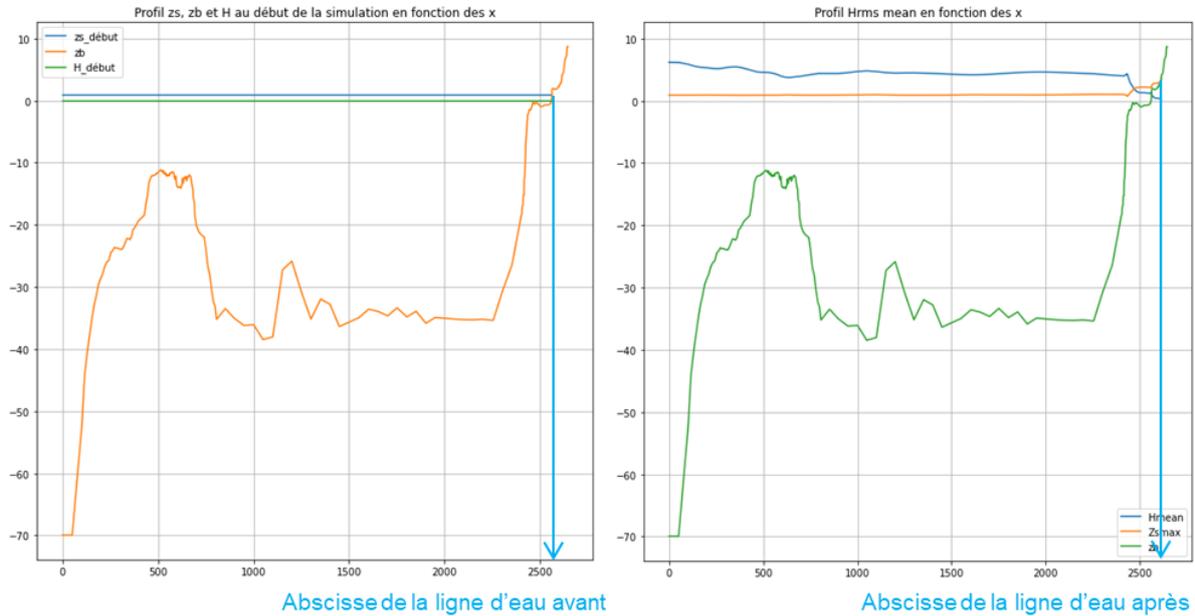
5.3.2 Résultats au niveau de l'aéroport — évènement de référence B06

5.3.2.1 Scénario actuel

La même méthode est utilisée au niveau de la passe de Bora-Bora, où il n'y a pas de protection et d'atténuation de la houle induite par les motus. Les modélisations ont montré que l'altitude maximale atteinte par l'eau pouvait être beaucoup plus importante que sur les faces protégées par les motus. Une altitude maximale de 3.7m a été mesurée au niveau de la ligne d'eau (cf. Figure 27).

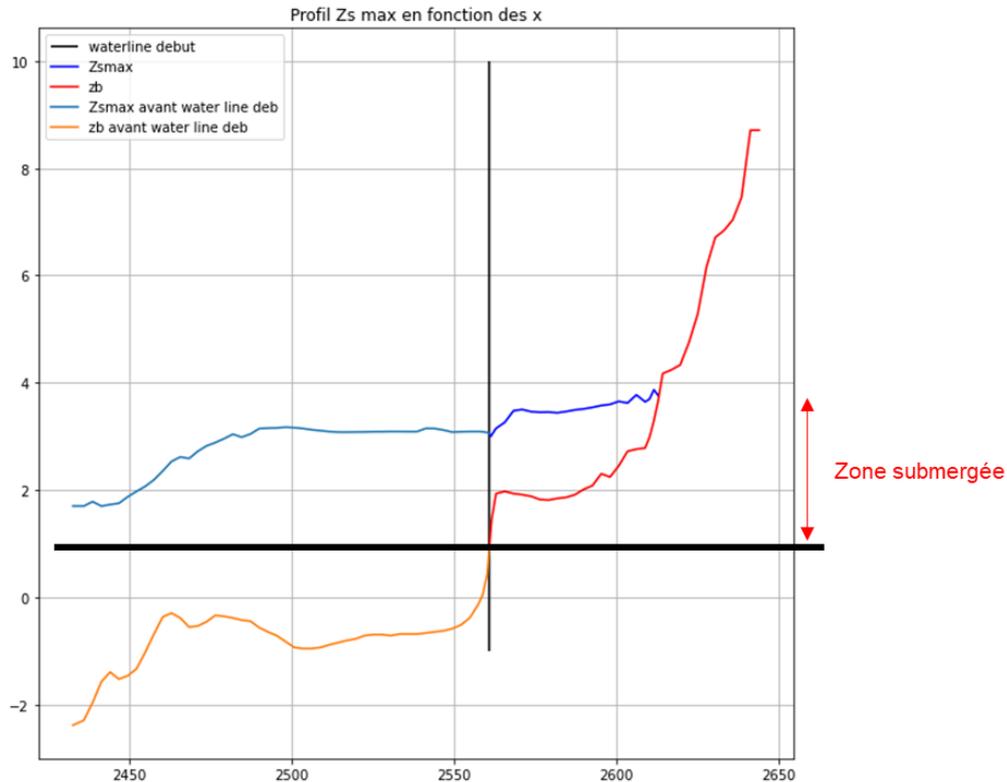


Figure 27 : Profils des différents paramètres d'entrée en mètre, pour l'évènement de référence B06, scénario actuel
 Au début de la simulation (à gauche) : niveau d'eau (z_s _début), Hauteur de houle (H_s) et profil bathymétrique (z_b),
 A la fin de la simulation (à droite) : niveau d'eau maximal atteint (z_{smax}), Hauteur moyenne de houle (H_{mean}) et
 profil bathymétrique (z_b).



Source : BRLi 2022

Figure 28 : Zoom sur la zone à la côte pour l'évènement de référence B06 en scénario actuel. Sont tracés le niveau d'eau maximal (en bleu), le ligne d'eau initiale (en noir) et le profil bathymétrique (orange/rouge) en mètre le long du profil.



Source : BRLi 2022



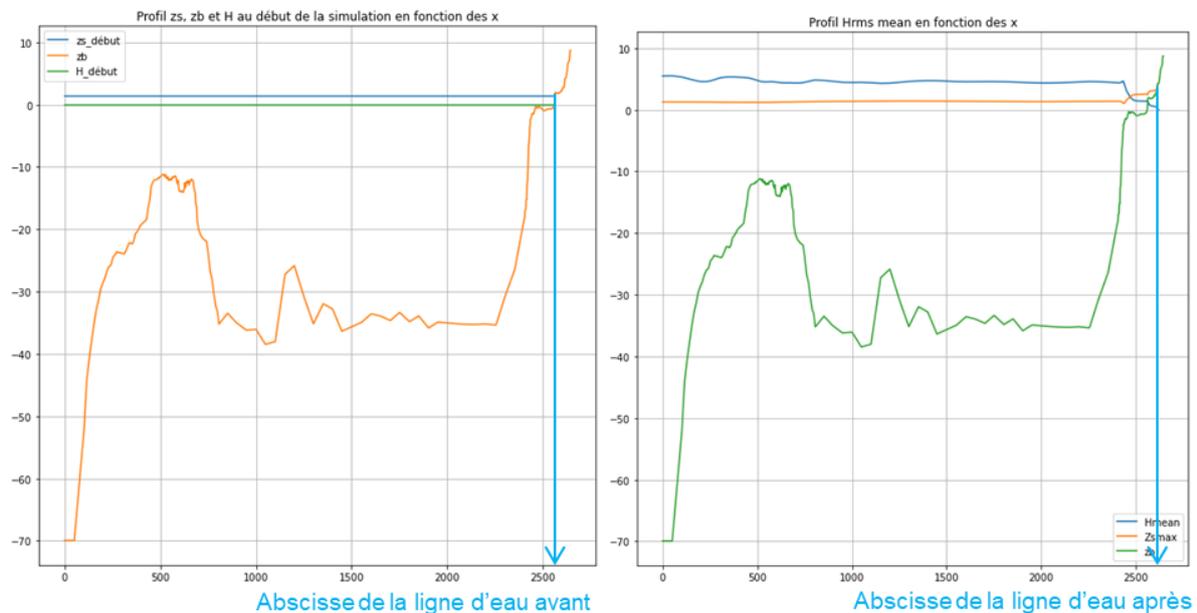
Le graphe Figure 28 fait un zoom sur la côte pour bien voir le phénomène de submersion. La ligne noire verticale représente l'abscisse de la ligne d'eau au début de la simulation et la ligne bleue est la ligne d'eau au début. Il est important de noter que la simulation X-Beach donne l'altitude maximale atteinte par l'eau et il se peut que ce soit une quantité très faible d'eau à faible vitesse qui peut potentiellement ne représenter aucun aléa. C'est pour cela que la modélisation Telemac est plus pertinente pour caractériser l'aléa submersion marine.

5.3.2.2 Scénario 2120 – élévation du niveau de la mer

Ce scénario est celui enregistrant le plus grand risque de submersion puisqu'il modélise la propagation de la houle en face d'une passe, c'est-à-dire sans protection naturelle, avec une élévation du niveau de la mer.

Figure 29 : Profils des différents paramètres en mètre, le long du profil pour l'évènement de référence B06, scénario à 100 ans

Au début de la simulation (à gauche) : niveau d'eau ($z_{s_début}$), Hauteur de houle (H_s) et profil bathymétrique (z_b),
A la fin de la simulation (à droite) : niveau d'eau maximal atteint (z_{smax}), Hauteur moyenne de houle (H_{mean}) et profil bathymétrique (z_b).



Source : BRLi 2022

Les résultats montrent que l'altitude maximale atteinte par l'eau est de 4.17 m, ce qui correspond à une hauteur de run-up de 2.9 m (cf. Figure 29).



5.3.2.3 Comparaison avec les résultats Telemac

5.3.2.3.1 Evènement de référence B01

Les modélisations Telemac permettent également d'évaluer l'altitude maximale atteinte par l'eau. Pour le scénario actuel, elle est estimée à 1.88m tandis que pour le scénario à 100 ans elle est évaluée à 2.34m. Dans les deux cas, les altitudes maximales mesurées avec Telemac sont environ 30cm plus importantes qu'avec X-Beach. Les conditions aux limites ne sont pas paramétrées de la même manière. De même que la propagation de la houle qui se propage en 3D dans Telemac alors qu'elle est en 2D dans X-Beach, les équations résolues diffèrent. Ainsi, ces différences peuvent expliquer la variation entre Telemac et X-Beach mais il est rassurant de noter que Telemac ne sous-estime pas les hauteurs d'eau et donc l'aléa submersion marine reste sécuritaire et prend en compte les ondes-infragravitaires qui sont importantes pour les dynamiques de submersion sur les atolls et îles entourées d'une barrière récifale.

5.3.2.3.2 Evènement de référence B06

Dans le cas de l'évènement de référence B06, les modélisations Telemac indiquent que l'altitude maximale atteinte par l'eau pourrait être de 3.42m pour le scénario actuel tandis qu'elle serait de 3.57m pour le scénario avec élévation du niveau marin. Ces hauteurs d'eau sont plus faibles que pour les modélisations X-Beach mais restent néanmoins assez proches. Il est important de noter la différence d'environ 30 cm pour le scénario actuel et une différence de 60cm pour le scénario d'élévation du niveau marin.

5.4 COMMENTAIRES/ANALYSE

60

Dans le cas du scénario B01, Telemac surestime légèrement les résultats indiqués par X-Beach et donc ces modélisations restent sécuritaires, contrairement au scénario B06 où Telemac semble sous-estimer légèrement les résultats indiqués par X-Beach. Ces modélisations peuvent traduire le fait que les ondes infragravitaires ont moins d'influence en présence des motus. Dans tous les cas, la comparaison des résultats X-Beach et Telemac montre que les deux logiciels donnent des résultats dans les mêmes ordres de grandeur. Les différences observées correspondent à l'ordre de grandeur de la précision du modèle et confirme donc la cohérence de nos résultats issus du logiciel Telemac. Il est important de noter que l'altitude maximale atteinte par l'eau n'indique pas la zone soumise à un aléa puisque la vitesse d'écoulement n'est pas connue mais cette donnée offre un point de comparaison entre les deux modèles.

Ainsi, il semble que l'utilisation de modèle prenant en compte les ondes infragravitaires pour les sites comprenant un récif barrière ou des motus n'est pas systématiquement nécessaire pour calculer la submersion à terre mais cela pourrait être intéressant pour les sites sans récif barrière qui sont plus exposés aux vagues et aux franchissements par paquets de mer.



6 ANALYSE DES RESULTATS

6.1 SCENARIO ACTUEL

6.1.1 Tahiti

6.1.1.1 Aléa submersion marine

COTE EST

Entre le trou du souffleur et la commune de Papenoo, l'aléa submersion marine se concentre en général entre l'océan et la route. La route peut parfois être contenue dans l'aléa faible mais la largeur de la bande d'action mécanique des houles n'excède pas 80m en prenant en compte tous les classes d'aléa. Des bandes d'aléas forts voire très forts se trouvent en bordure littorale et ne dépassent pas 10 m de largeur.

La commune de Papenoo présente des aléas plus entendus, du fait de la présence d'une embouchure, qui augmente le risque de submersion sur les berges de la rivière. Ainsi, au niveau de l'embouchure, la bande d'aléa faible peut atteindre 270m de largeur. En bordure, se retrouve un aléa modéré voire fort sur une bande entre 5 et 10m.

De Papenoo à Mahina, se trouvent des bandes fortes et modérées en bordure littorale qui font une dizaine de mètres. L'aléa faible peut aller jusqu'à 200m et donc impacter la route et certaines habitations.

Le secteur allant de la Pointe-Venus à Papeete est particulièrement exposé du fait de son orientation et de l'absence de barrière récifale. La bande d'aléa fort peut ainsi mesurer plus de 40m avec par endroit des zones en aléa très fort et une bande de 10m en aléa majeur.

PAPEETE

Le secteur de Papeete présente des bandes d'aléa faibles très large, pouvant faire plusieurs centaines de mètres. Pour les zones situées à l'abri derrière le quai du Port de Papeete ou la barrière récifale, des zones en aléa modéré pouvant aller jusqu'à 1 hectare sont présentes mais globalement il n'y a pas de zones en aléa fort. Les zones en face des passes et au niveau de la digue présentent des aléas forts et très forts allant de 10m à 70m.

ZONE DE L'AEROPORT

La zone de l'aéroport est entièrement menacée par la submersion marine. La piste ainsi que quelques zones plus à l'intérieur ou surélevée sont en aléa faible mais le reste de la zone est soumis à un aléa modéré. La bordure littorale est soumise à un aléa fort pouvant aller de 5 à 50m.

COTE OUEST

La côte Ouest est soumise à des aléas assez homogènes dans les zones protégées par la barrière récifale, avec par endroit une bande d'aléa fort ou très fort pouvant aller de 0 à 40m, suivi d'une bande d'aléa modéré de quelques mètres également puis d'une zone en aléa faible pouvant aller jusqu'à 250m. Les zones en face des passes, notamment à la Pointe des Pêcheurs et la passe de Paea sont soumises à des aléas forts à des très forts plus importants et donc des bandes plus larges sont présentes.



6.1.1.2 Aléa action mécanique des vagues

En général, l'aléa action mécanique des vagues se concentre sur une bande littorale pouvant aller de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Les zones où une bande forte plus large est présente sont la côte Est qui n'est pas protégée par une barrière récifale, les zones en face des passes, la digue de Papeete ainsi que le long de la côte de la commune de Paea, au sud de la passe de cette même commune mais elle présente jamais une largeur supérieure à 50m, ce qui justifie l'utilisation de cette méthode pour remplacer la bande forfaitaire de 50m recommandé par le PPRL. La bande d'aléa faible peut mesurer jusqu'à 100m par endroit et elle occupe presque toute la zone de l'aéroport.

6.1.1.3 Aléa total

L'aléa total est construit en prenant l'aléa le plus défavorable entre l'aléa submersion marine et l'aléa fort de l'action mécanique des houles. Ainsi cette carte totale correspond à la carte de la submersion marine avec pour certaines zones une bande forte plus large ou la présence d'une bande forte où il n'y en avait pas avant.

6.1.2 Moorea

6.1.2.1 Aléa submersion marin

LA COTE EST

Excepté le quai au niveau de la passe de Vaiare soumis à un aléa très fort et des zones de quelques centaines de mètres carrés en bordure littorale soumises à un aléa fort, la côte Ouest est relativement épargnée car les cyclones en général arrivent par la direction opposée. Elle est soumise à un aléa faible pouvant aller jusqu'à 350 mètres par endroit et il s'y trouve une bande d'aléa modéré de quelques mètres le long de la frontière terre-océan. Les secteurs en face des passes de Tupapauru et Teruaupu ne sont pas plus touchés que les secteurs protégés par une barrière récifale.

ZONE DE L'AEROPORT

De même qu'à Tahiti, la zone de l'aéroport de Moorea est particulièrement menacée, d'une part car c'est une zone basse, un lac y est présent et le récif est frangeant. Tous ces facteurs font que presque toute la zone est en aléa faible, ou modéré, avec une bordure et dans les zones marécageuses des aléas forts, très forts voire majeurs sur quelques mètres de largeurs.

LA ZONE NORD-EST ET LES DEUX BAIES

Une bande d'aléa faible pouvant mesurer jusqu'à 300m de largeur est présente sur toute la zone. En bordure, l'aléa modéré mesure au maximum une centaine de mètre, et par endroit il peut y avoir des « flaques » d'aléa modéré au milieu d'aléa faible qui peuvent correspondre à des cuvettes où l'eau s'accumule. Certaines zones situées dans la zone des 10m sont classées en aléa fort voire très fort.

LA ZONE NORD-OUEST AVEC LES DEUX MOTUS.

Cette zone est la plus exposée de l'île de Moorea du fait de son orientation et des bandes plus larges d'aléa fort, très fort et majeur sont présentes ici. Par endroit, la largeur de la bande d'aléa fort peut atteindre 60m. Les deux motus sont très exposés et sont soumis à un aléa majeur sur une largeur allant de quelques mètres à quelques dizaines de mètre pour la face exposée.



LA COTE OUEST-HAAPITI ET LE SUD

Même si la bande d'aléa semble avoir la même largeur à l'Ouest qu'à l'Est, il est important de noter la présence d'une bande d'aléa très fort suivi d'une bande d'aléa fort pouvant aller jusqu'à 20m de largeur pour ce secteur.

6.1.2.2 Aléa action mécanique des vagues

L'aléa action mécanique des vagues est présent sur tout le contour de l'île sur une largeur pouvant aller de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. La bande d'aléa fort a une largeur d'environ 15-20m pour les côtes Nord et Ouest et cela peut aller jusqu'à 50m sur les motus.

6.1.2.3 Aléa total

Cette carte d'aléa totale montre les zones soumises à l'aléa submersion marine additionnées d'une bande d'aléa fort pour l'action mécanique des vagues qui peut varier de quelques mètres à une cinquantaine de mètre pour les motus de Moorea.

6.1.3 Bora-Bora

6.1.3.1 Aléa submersion marine

L'ILE CENTRALE

L'aléa submersion marine a une emprise plus grande et des classes de gravité plus importante du côté Ouest de l'île du fait de la présence d'une passe et l'absence de motus presque continu comme cela est le cas du côté Est de l'île, qui offrent une protection à la côté Est. Egalement, la direction de provenance des cyclones et majoritairement Nord-Ouest.

Sur la côte Ouest la bande d'aléa faible peut aller de quelques mètres de largeur à 400m par endroit, surtout au niveau de la zone du village de Vaitape. Une bande d'aléa modéré de quelques mètres à quelques dizaines de mètres peut également être présente en bordure. Des petites zones d'aléa fort à très fort sont présentes au quai de Vaitape et dans la baie de Faanui.

LES MOTUS

Bien que tous les motus soient exposés à la submersion marine, les motus situés au Nord-Ouest, notamment le Motu Teveiroa et le motu Mute où se trouve l'aéroport, et ceux qui se trouvent entre les deux, sont les plus exposés. La bande d'aléa est plus large pour certains motus vers l'intérieur du lagon notamment sur le motu Piti Aau et les motus à l'Est qui sont exposés à la houle provenant de l'Ouest et donc du lagon. Pour les motus du Nord et de l'Ouest qui mesurent en général 300-400 mètres de largeur, la bande d'aléa, toutes classes confondues, peut mesurer jusqu'à 150 mètres.

6.1.3.2 Aléa action mécanique des vagues

Toutes les façades sont exposées au choc mécanique des vagues, néanmoins les façades exposées vers l'Ouest et le Nord sont plus exposées que les façades Sud et Est. Pour les façades exposées, la bande d'aléa fort mesure entre 10 à 20m et pour les façades non-exposées elle est la plupart du temps absente, il s'y trouve un bande d'aléa modéré par endroit ou un aléa faible. L'île centrale est moins soumise au choc mécanique des vagues que les motus même si quelques zones peu larges, entre 5 et 10m, orientées Nord-Ouest, sont menacées.



6.1.3.3 Aléa total

Construit à partir de l'aléa le plus défavorable entre la submersion marine et l'aléa fort de l'action mécanique des houles, cette carte totale synthétise les deux risques. Les façades exposées au choc mécanique des vagues ont des bandes fortes élargies par la prise en compte du choc mécanique des houles par rapport à la carte représentant l'aléa submersion marine seul.

6.2 SCENARIO A 100 ANS

6.2.1 Tahiti

6.2.1.1 Aléa submersion marine

La comparaison entre les cartes d'aléa submersion marine pour le scénario à 100 ans et celles du scénario actuel montre que les zones exposées et décrites pour le scénario actuel seront soumises à des aléas plus défavorables et plus étendus pour le scénario à 100 ans. Les zones particulièrement exposées sont la Pointe Vénus où une bande d'aléa majeur d'une dizaine de mètre apparaît, et la bande d'aléa fort peut aller jusqu'à 150m. Des zones situées dans la ville de Papeete sont également soumises à un aléa fort. Dans la zone de l'aéroport, mise à part la piste d'atterrissage et de décollage ainsi que quelques zones surélevées, tout le secteur est en aléa fort avec quelques zones en aléa très fort.

6.2.1.2 Aléa action mécanique des vagues

Les bandes d'aléa mécanique du scénario à 100 ans montrent en général un aléa faible et un aléa modéré plus étendu. La bande forte également devient plus large en certains endroits tout en se décalant vers l'intérieur des terres du fait de l'élévation du niveau de la mer. La bande d'aléa fort constitue une bande pouvant aller de 5 à 20 m presque continue tout le long du littoral de Tahiti, à l'exception du port abrité du Papeete derrière la digue et de quelques zones de la côte Ouest.

6.2.1.3 Aléa total

La carte d'aléa totale montre donc un littoral beaucoup plus menacé pour le scénario à 100 ans que pour le scénario actuel à la fois par la submersion marine car l'eau, plus haute, pénétrera plus à l'intérieur des terres et à des niveaux d'aléas plus dangereux, mais également par l'action mécanique des vagues qui sera plus violente et plus étendue.

6.2.2 Moorea

6.2.2.1 Aléa submersion marine

Comme sur l'île de Tahiti et Bora-Bora, la comparaison entre les cartes d'aléa submersion marine pour le scénario actuel et pour le scénario à 100 ans montre un élargissement de toutes les bandes d'aléa notamment les bandes fortes, très fortes et majeures. Les secteurs les plus touchés restent les mêmes, c'est-à-dire l'Ouest et le Nord, en augmentant la gravité des aléas.



6.2.2.2 Aléa action mécanique des vagues

Les bandes d'aléa mécanique du scénario à 100 ans montrent en général un aléa faible et un aléa modéré plus étendu. La bande forte également devient plus large en certains endroits tout en se décalant vers l'intérieur des terres. Elle peut donc atteindre 40-50 mètres sur le littoral Nord. Une bande d'aléa modéré peut se situer entre l'océan ou le lagon et la bande d'aléa fort. Cela est dû à l'élévation du niveau marin qui peut entraîner un déferlement plus à l'intérieur des terres, par exemple sur les deux motus. En revanche, la bande d'aléa fort de la côte Ouest disparaît pour ce scénario.

6.2.2.3 Aléa total

La carte d'aléa totale montre logiquement un littoral beaucoup plus menacé pour le scénario à 100 ans que pour le scénario actuel puisque les bandes d'aléa majeur, très fort et fort sont plus larges et peuvent atteindre 180 sur toute la côté orienté Nord.

6.2.3 Bora-Bora

6.2.3.1 Aléa submersion marine

La comparaison entre les cartes d'aléa submersion marine pour le scénario actuel et pour le scénario à 100 ans montre un élargissement de toutes les bandes d'aléa notamment les bandes fortes, très fortes et majeures. Exceptée la piste de l'aéroport, presque tous les motus du Nord et de l'Ouest sont soumis à l'aléa submersion marine, bien que le centre des motus reste souvent en aléa faible. Le Motu Teveiroa est particulièrement soumis à l'aléa submersion marine, notamment vers l'intérieur du lagon où la bande forte peut mesurer jusqu'à 300m et la bande modéré 400m à la suite. Le Motu Mute, où se trouve l'aéroport a également une bande forte très large du côté du lagon qui peut atteindre 160m. Pour ces deux motus et ceux situés entre eux deux, l'aléa majeur, auquel sont soumises les façades océaniques, peut atteindre 120 m de largeur.

6.2.3.2 Aléa action mécanique des vagues

Les zones soumises à l'aléa action mécanique des vagues sont globalement les mêmes que celles décrites pour le scénario actuel mais elles sont plus étendues et plus larges. Les zones en aléa fort sont plus larges, entre deux à trois fois plus larges, et plus nombreuses. Dans certaines zones, il peut y avoir une bande d'aléa modéré entre la partie océanique et la partie terrestre, cela peut être dû au fait que le niveau de l'eau est plus haut initialement, pour prendre en compte l'élévation du niveau de la mer, et donc les vagues déferlent plus à l'intérieur des terres.

6.2.3.3 Aléa total

La carte d'aléa totale montre donc un littoral beaucoup plus menacé pour le scénario à 100 ans que pour le scénario actuel. Les motus sont presque en intégralité soumis à un aléa, excepté la piste d'aéroport qui est épargnée. Pour l'île centrale, la zone de Vaitape concentrant un grand nombre d'habitations. Excepté sur certaines motus où la bande forte peut être très large, elle reste localisée sur la bordure littorale et n'excède pas 30 mètres à l'exception de la baie de Pofai.



6.3 INTEGRATION DANS LA CARTOGRAPHIE REGLEMENTAIRE

6.3.1 Comparaison au projet ARAI3

Dans le cadre du contrat de développement Etat-Polynésie 2000-2006, le BRGM s'est vu confier la réalisation d'un bilan général des connaissances sur les risques naturels et l'élaboration d'un projet de Plans de Prévention des Risques (PPR) sur les 48 communes de la Polynésie française. Le projet ARAI3 a notamment donné lieu à une cartographie de l'aléa submersion marine lié aux houles cycloniques.

La comparaison de ces cartes n'est pas aisée car elles ont été réalisées :

- Avec des scénarios de référence différents (pour les vagues, la surcote, les conditions de tempête, la valeur d'élévation du niveau de la mer). Les forçages sont présentés dans les tableaux ci-dessous pour le projet ARAI3 (Tableau 19) et la présente étude (Tableau 20).

Tableau 19 : Synthèse des scénarios choisis pour la modélisation de la submersion pour le projet ARAI3

	Maharepa	Matavai	Teva I Uta	Tubuai Nord
Marée	0.1 m	0.1 m	0.1 m	0.6 m
Surcote atmosphérique	0.5 m	0.5 m	0.5 m	0.5 m
ENM (~2100)	0.5 m	0.5 m	0.5 m	0.5 m
Vagues (Hs / Tp)	12 m / 12s	10m / 12s	6m / 9s	11m / 15s

Source : BRGM 2013

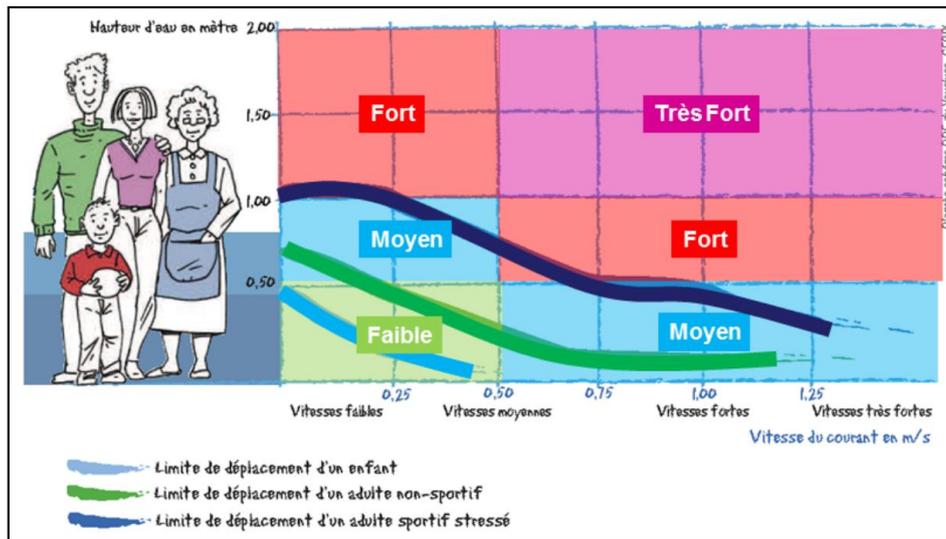
Tableau 20 : Synthèse des scénarios choisis pour la modélisation de la submersion dans la présente étude.

	Maharepa	Matavai
Niveau de marée	+0.16m	+0.16m
Surcôte atmosphérique	+0.54m	+0.54m
ENM (~2100)	+0.6m	+0.6m
Vagues	8.4m / 12.2s	8.3m / 13s

Source BRLi 2022

- Avec un modèle différent, le projet ARAI3 a mis-en-œuvre des modélisations vague-à-vague, tandis que l'étude réalisée ici a utilisé un couplage Telemac et Tomawac qui prend en compte les effets de grande échelle en associant un module de courantologie couplé à un module de propagation de houle spectrale.
- Une méthode de classification semblable mais un nombre de catégories et des seuils différents pour les classes.

Figure 30 : Méthode de définition des zones d'aléa par croisement hauteur d'eau-vitesse d'écoulement utilisée pour le projet ARAI 3



Source : BRGM 2013

Tableau 21 . Méthode de classification utilisée dans la présente étude

Qualification de l'aléa submersion marine (méthode adaptée du guide PPRL 2014)			
	Vitesse < 0,5 m/s	0,5m/s < Vitesse < 0,75 m/s	Vitesse > 0,75 m/s
Hauteur < 0,5 m	Aléa faible	Aléa fort	Aléa fort
0,5 m < Hauteur < 1 m	Aléa modéré	Aléa fort	Aléa très fort
1 m < Hauteur < 1,5 m	Aléa fort	Aléa très fort	Aléa majeur
Hauteur > 1,5 m	Aléa très fort	Aléa majeur	Aléa majeur

Source : BRLi 2021

6.3.1.1 Maharepa (Moorea)

La comparaison des résultats issus des modélisations du projet ARAI3 avec les résultats de la présente étude pour le scénario actuel (Figure 31) montre que l'emprise totale des deux aléas submersion marine est semblable mais dans le cas de la modélisation issue du projet ARAI3 les aléas sont plus défavorables. La bande d'aléa très forte couvre la majorité de la zone menacée par la submersion marine et peut aller jusqu'à 200m de largeur. Elle est suivie d'une bande d'aléa fort et modéré non négligeable d'environ 50m chacune. La bande d'aléa faible est très fine. Les modélisations de la présente étude montrent au contraire une zone soumise à un aléa fort de faible largeur allant de 10 à 25m, suivi d'un zone modérée pouvant aller jusqu'à 80m puis une zone en aléa faible d'une voire deux cent mètres.

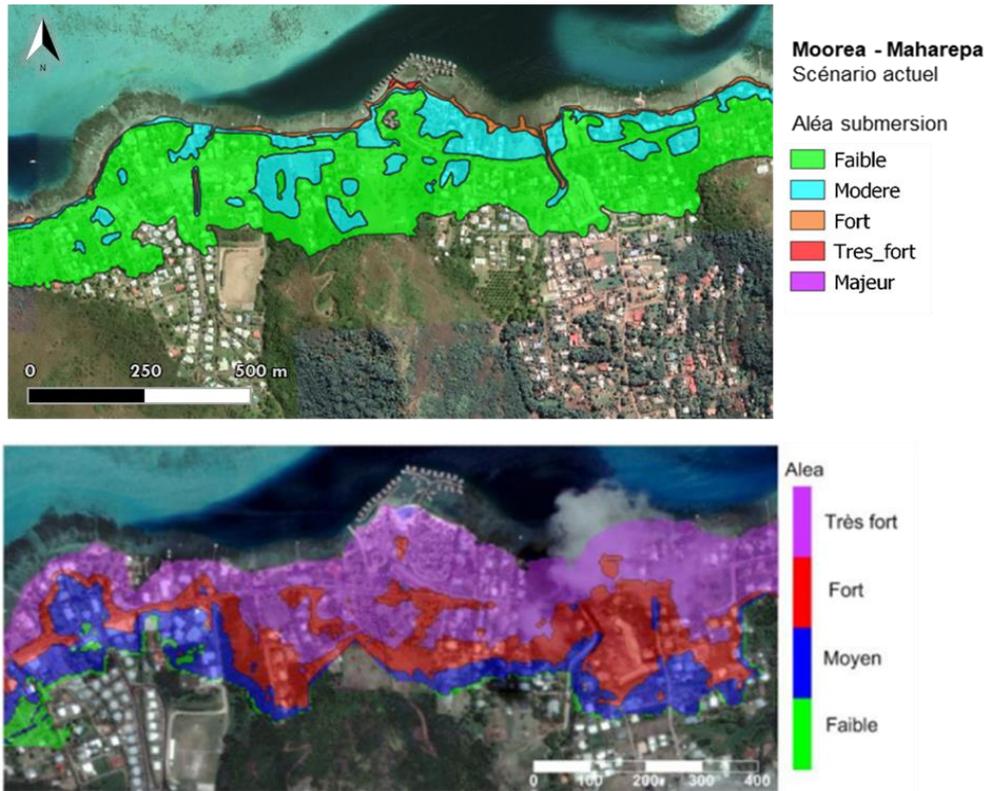
Le même constat est fait pour le scénario à 100 ans (Figure 32), les aléas issus des modélisations montrent des bandes d'aléas plus défavorables pour le projet ARAI3 mais globalement l'étendue des aléas est la même.

Comme précisé au chapitre 3.2.2.1 pour les hauteurs et les vitesses, ces différences peuvent s'expliquer par une donnée topo-bathymétrique et des logiciels différents. Dans le cas de la comparaison effectuée ici (contrairement à la démarche du chapitre 3.2.2.1), les forçages de houles et niveaux d'eau sont également différents.

Les simulations réalisées pour la présente étude sont obtenus pour des hypothèses plus précises que celles du projet ARAI 3 qui ne disposait pas des mêmes données, en particulier la topo-bathymétrie Lidar bien plus fine et des événements de référence moins défavorables, tout en restant fidèles aux recommandations du guide PPRL. Cela explique l'écart entre les aléas obtenus.

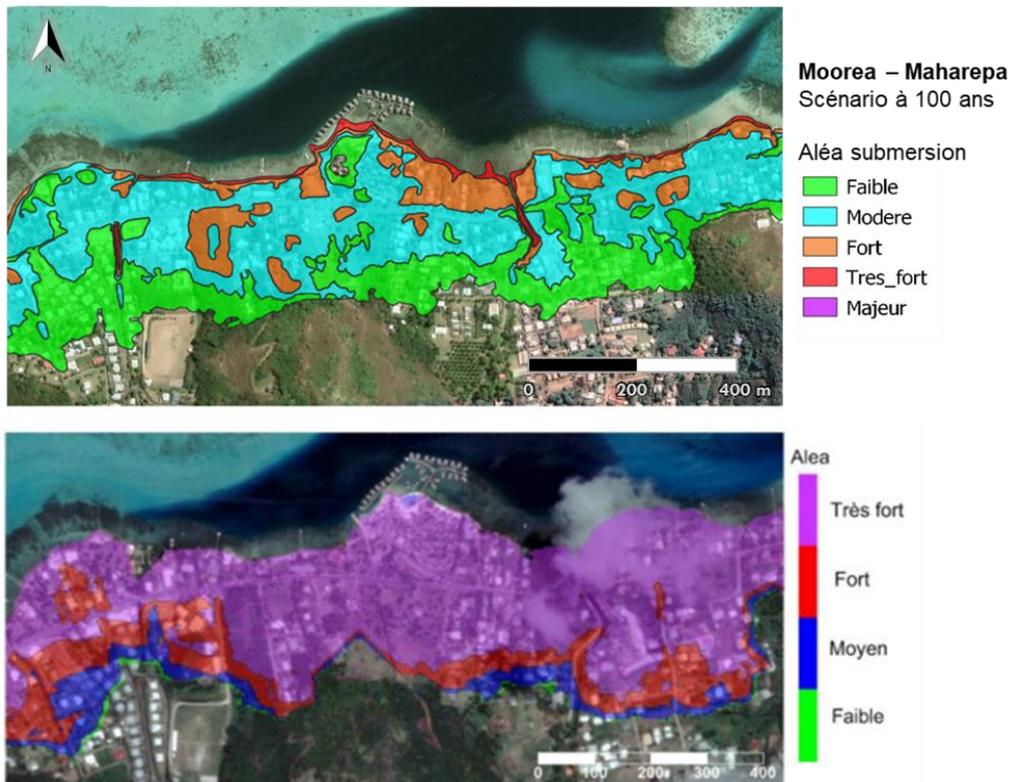


Figure 31 : Comparaison de l'aléa submersion pour le scénario actuel à Maharepa (en haut) présente étude (en bas) projet ARAI3



Source : BRLi 2022 et BRGM 2013

Figure 32 : Comparaison de l'aléa submersion pour le scénario à 100 ans à Maharepa (en haut) présente étude (en bas) projet ARAI3

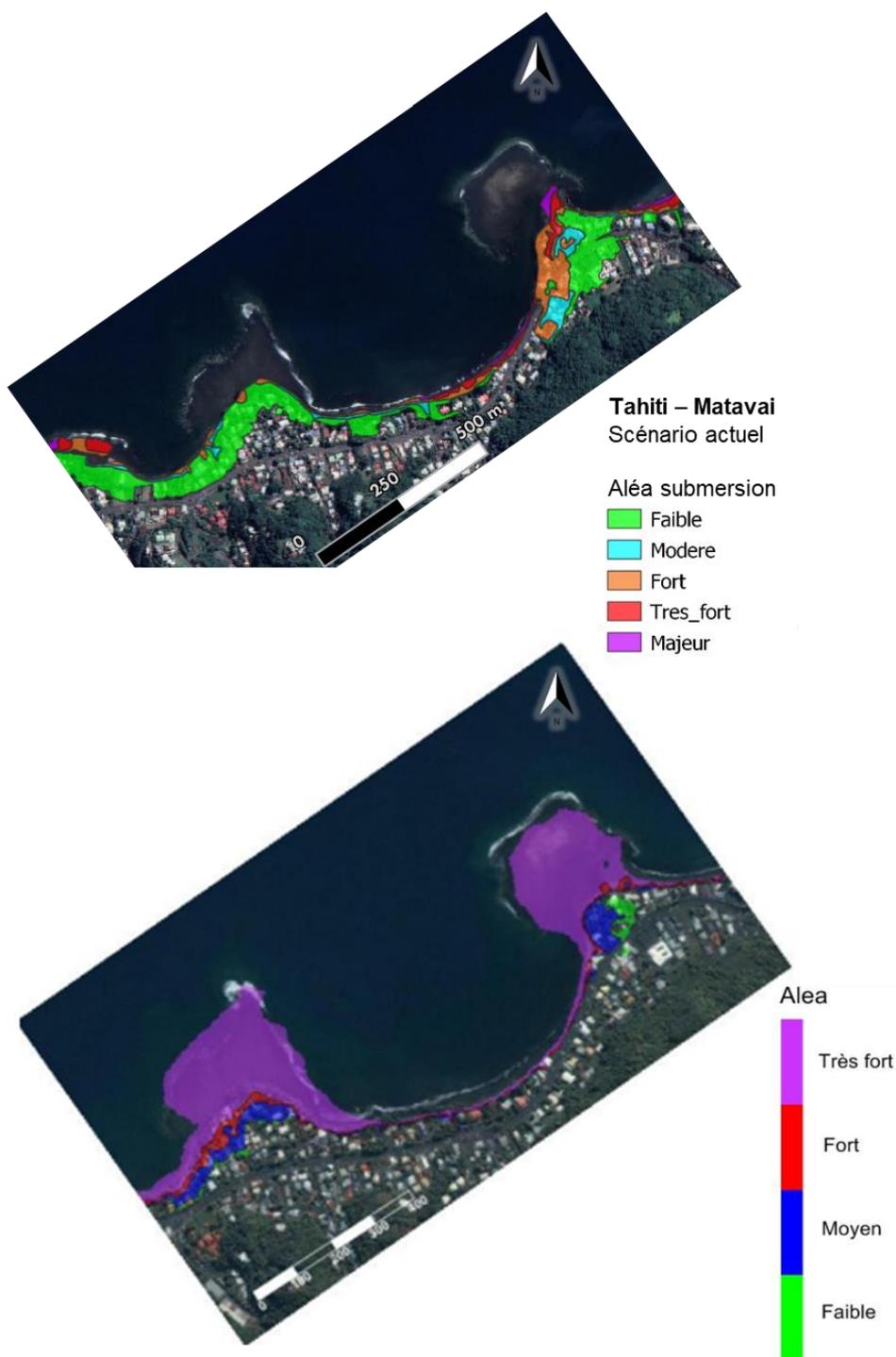


Source : BRLi 2022 et BRGM 2013

6.3.1.2 Matavai (Tahiti)

En comparant uniquement les parties réellement terrestres, c'est-à-dire sans prendre en compte la partie le récif frangeant en aléa très fort dans le projet ARAI3, les cartes de l'aléa actuel sont très similaires pour la pointe à l'Est et sont moins défavorables pour pointe Ouest pour la présente étude (Figure 33). L'aléa submersion marine couvre des emprises très similaires. Le même constat est valable pour le scénario à 100 ans (Figure 34).

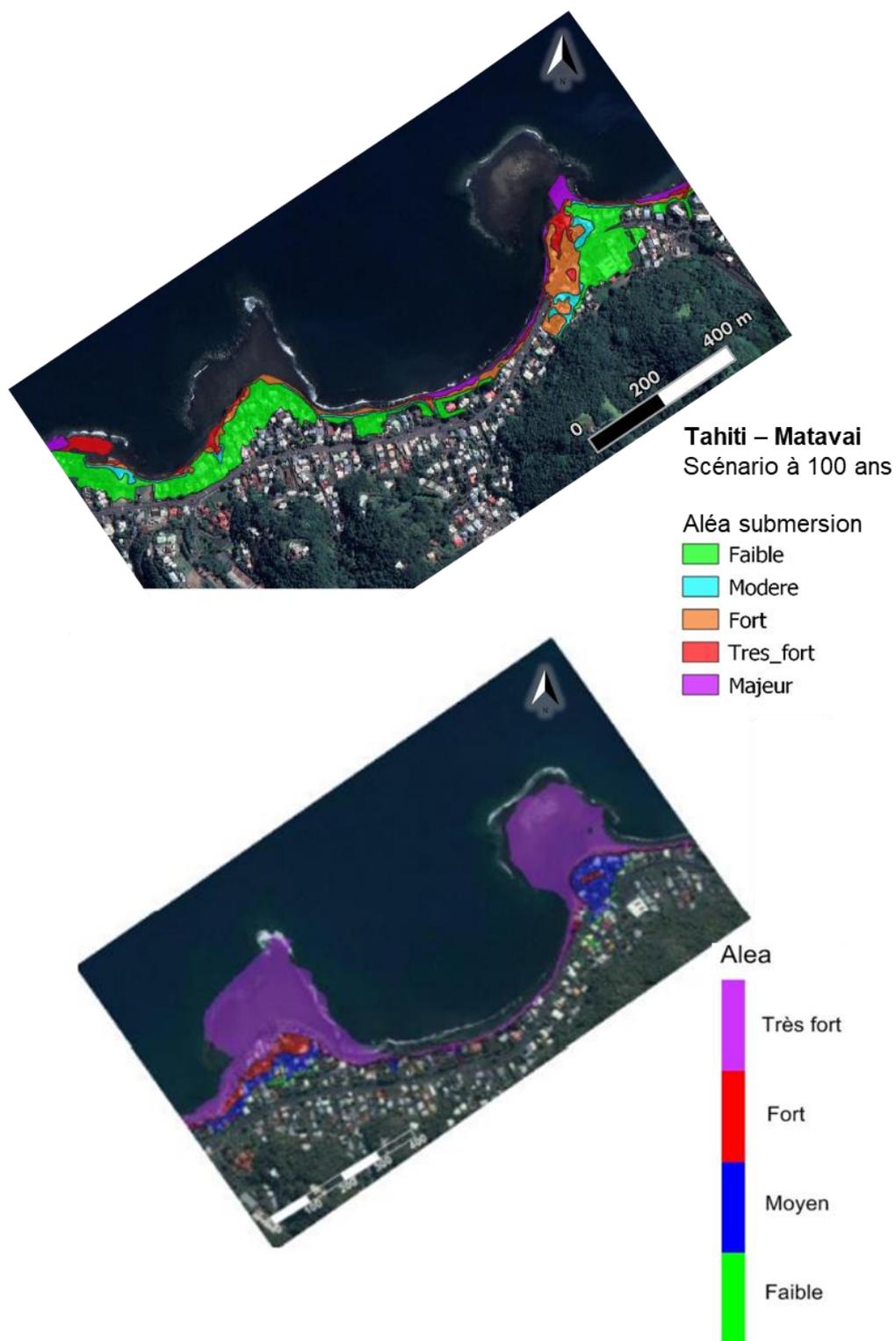
Figure 33 : Comparaison de l'aléa submersion pour le scénario actuel à Matavai (en haut) présente étude (en bas) projet ARAI3



Source : BRLi 2022 et BRGM 2013



Figure 34 : Comparaison de l'aléa submersion pour le scénario à 100 ans à Matavai (en haut) présente étude (en bas) projet ARAI3



Source : BRLi 2022 et BRGM 2013



6.3.2 Discussion sur les recommandations du guide PPRL et précautions sur la lecture des résultats

De manière générale, il est important de garder un regard critique sur des résultats de modélisation. Ceux-ci sont le fruit de modèles physiques traduits par des équations qui ne peuvent pas intégrer toute la complexité de la réalité. De plus, il n'est pas toujours possible d'assurer une parfaite qualité des données utilisées pour résoudre ces équations.

Les résultats des modélisations donnent un aperçu de l'aléa submersion causé par certains types de cyclones mais n'excluent pas la venue de cyclones plus importants.

SELECTION DES EVENEMENTS CYCLONIQUES DE REFERENCE

Les événements cycloniques de référence ont été sélectionnés par comparaison entre les cyclones historiques et les cyclones de période de retour 100 ans évalués par extrapolation directe des cyclones historiques et par construction de cyclones dits synthétiques (cf. le rapport de phase 1 et le chapitre 2).

Des cyclones représentatifs de chaque façade ont été utilisés afin de ne pas appliquer un événement surdimensionné arrivant de plein fouet sur les côtes. Cette approche permet ainsi de modéliser plus finement l'aléa submersion marine par type de cyclone et de voir les façades les plus touchées.

Toutefois, bien que les probabilités soient faibles, il n'est pas exclu que des cyclones plus forts et ayant des directions plus défavorables se produisent. En effet, les cyclones ayant de forts impacts sont relativement peu fréquents sur la zone (environ 1 cyclone tous les 5 à 10 ans¹, cf. Rapport de phase 1) ce qui implique que le nombre de données disponibles sur la zone est limité et donc que les études statistiques soient moins fiables que pour des données abondantes.

CATEGORISATION DE L'ALEA SUBMERSION MARINE

Le guide PPRL 2014 recommande de créer trois catégories d'aléa : faible, modéré et fort. Selon le PPRL, la limite entre l'aléa modéré et l'aléa fort dépend de la capacité à se mouvoir d'un adulte en bonne santé, lui permettant ainsi d'échapper sans assistance au phénomène en cours. Cette étude a distingué cinq catégories mais il est possible de rassembler les aléas fort, très fort et majeur afin de gagner en clarté et lisibilité.

En outre, le logiciel Telemac, bien qu'il soit une référence pour modéliser la submersion marine, n'est aujourd'hui pas en mesure de traduire tous les phénomènes se produisant sur la zone côtière. Deux phénomènes en particulier pourraient contribuer à l'aggravation de l'aléa :

- **Les ondes infragravitaires** (grande période de retour - 30 s à 5 min²) ne sont pas incluses dans le modèle. La modélisation avec Xbeach a montré que ces ondes pouvaient potentiellement avoir une influence sur les zones inondées car elles peuvent produire un run-up important.
- **Le phénomène de résonance** n'est pas non plus inclus dans les modèles. Ce phénomène est lié également aux ondes de grande période (faible fréquence). Ces ondes exercent des oscillations forcées, qui peuvent mener à un phénomène de résonance si la fréquence correspond à une fréquence propre de la zone. L'onde pénètre dans l'espace semi-fermé et se retrouve alors piégée. Il y a alors formation d'une onde stationnaire, générée par la superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie par la paroi. La morphologie des îles étudiées, notamment à Bora Bora, est propice à ce phénomène du fait de l'espace mi-clos défini par les motus.

¹ Les îles de Polynésie française face à l'aléa cyclonique, Sébastien Larrue et Thomas Chiron, 2015

² A titre de comparaison, les houles liées aux vents cycloniques ont des périodes de l'ordre de 10s



ALÉA ACTION MÉCANIQUE DES HOULES

Le guide PPRL recommande également de fixer la largeur de la zone soumise au déferlement par une bande forfaitaire de largeur égale à 50m pour une zone caractérisée par des franchissements modérés dans un contexte cyclonique. Les résultats ont montré que choisir une bande forfaitaire d'égale largeur partout peut être pénalisante dans la majorité des cas puisque la largeur de la bande d'aléa fort atteint rarement les 50m avec la méthodologie proposée. En revanche, la bande d'aléa faible obtenue avec cette méthode peut atteindre les 100m.

Il est important de noter que la démarche proposée dans cette étude pour caractériser l'aléa choc mécanique des houles n'est pas une méthode validée par une instance officielle. C'est une proposition qui va dans le sens de la volonté du service d'urbanisme d'affiner au mieux les résultats afin de rendre la cartographie réglementaire moins contraignante, tout en cherchant à représenter fidèlement l'aléa sans le sous-estimer.

La méthode de détermination de cet aléa proposée, via un croisement des données de hauteur significative de houle et du caractère énergétique du déferlement (évalué grâce au paramètre β), offre ainsi une alternative à la méthode de « bande forfaitaire ». Les résultats induits par cette méthode semblent cohérents.

BIBLIOGRAPHIE

Principaux ouvrages/sites web consultés

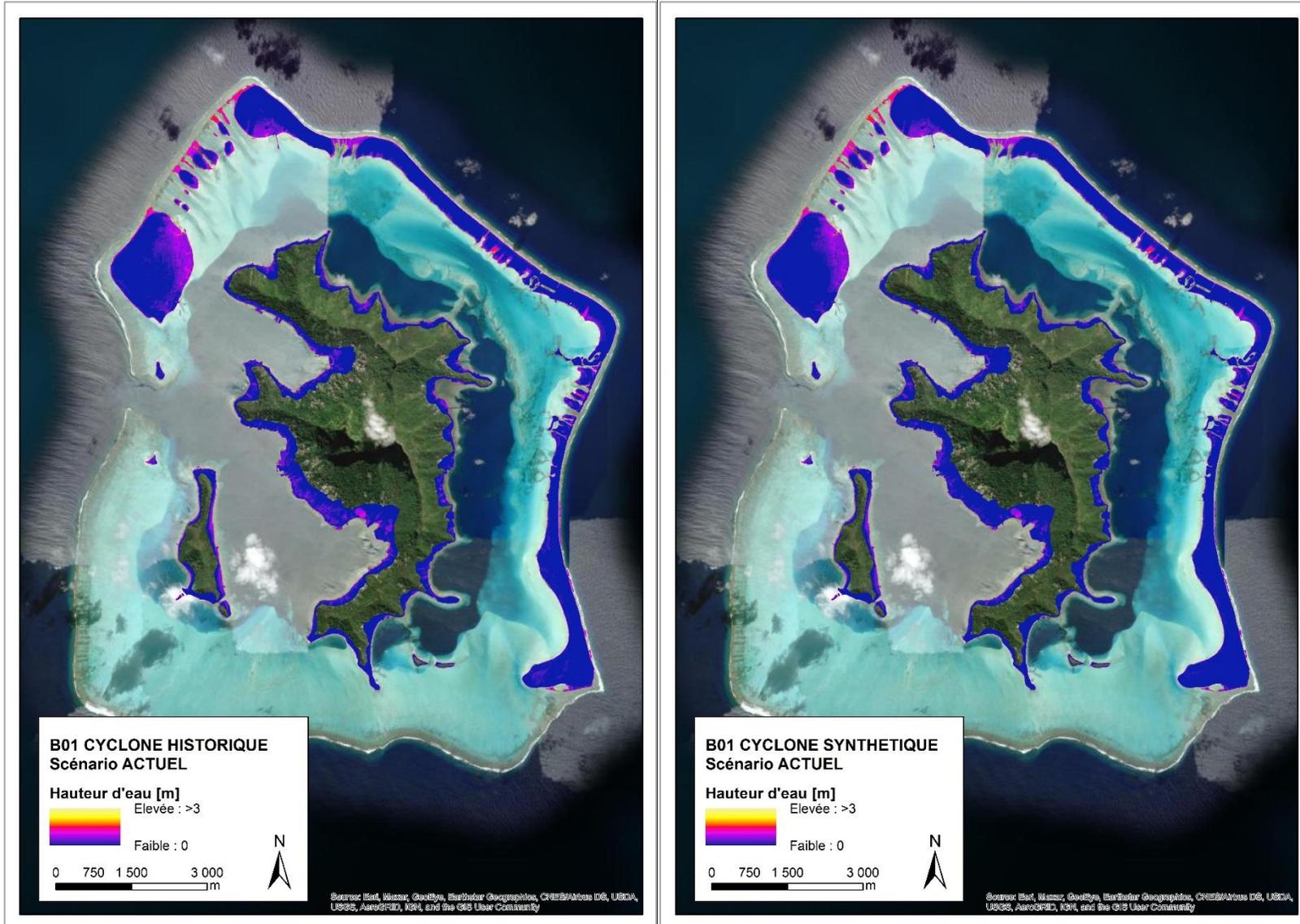
- Guide méthodologique Plans de Prévention des Risques Littoraux, Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE), Mai 2014
- Projet ARAI 3 du BRGM
 - Bilan des connaissances sur les surcotes marines en Polynésie, Février 2005
 - Evaluation probabiliste des houles et des surcotes cycloniques en Polynésie Française, Mars 2013
 - Aménagements et ouvrages côtiers polynésiens – incidence sur l'aléa submersion et impacts environnementaux, Février 2013
- PPR 2006, Service de l'urbanisme du ministère du développement durable de Polynésie Française, BRGM, 2006
- Aléa surcote 2006, BRGM 2006 (ensemble de fichiers SIG)
- Aléa surcote 2021, BRGM 2021 (ensemble de fichiers SIG)
- Caractérisation de l'aléa submersion marine d'origine cyclonique via les données lidar à Tahiti, Moorea et Bora Bora ; Phase 1 – Etat des lieux, Ministère de l'aménagement et du territoire de Polynésie Française, BRLi, GlobOcéan, PTPU, Juin 2021
- Références altimétriques maritimes (RAM), Ports de France métropolitaine et d'outre-mer, SHOM, 2020
- Doctrine régionale Occitanie, Plan de Prévention des Risques Naturels « Inondation » Définition de l'Aléa Inondation par débordement de cours d'eau et submersion marine, Ministère de la Transition écologique et solidaire, DREAL Occitanie, Février 2021
- Page internet du Refmar du SHOM sur les seiches et le phénomène de résonance : http://refmar.shom.fr/fr/applications_maregraphiques/etudes-meteo-oceaniques/seiche#:~:text=Le%20ph%C3%A9nom%C3%A8ne%20de%20raisonance&text=Les%20plans%20d'eau%20en,fr%C3%A9quence%20propre%20de%20la%20zone, Novembre 2015 (consulté en mai 2022)



ANNEXES

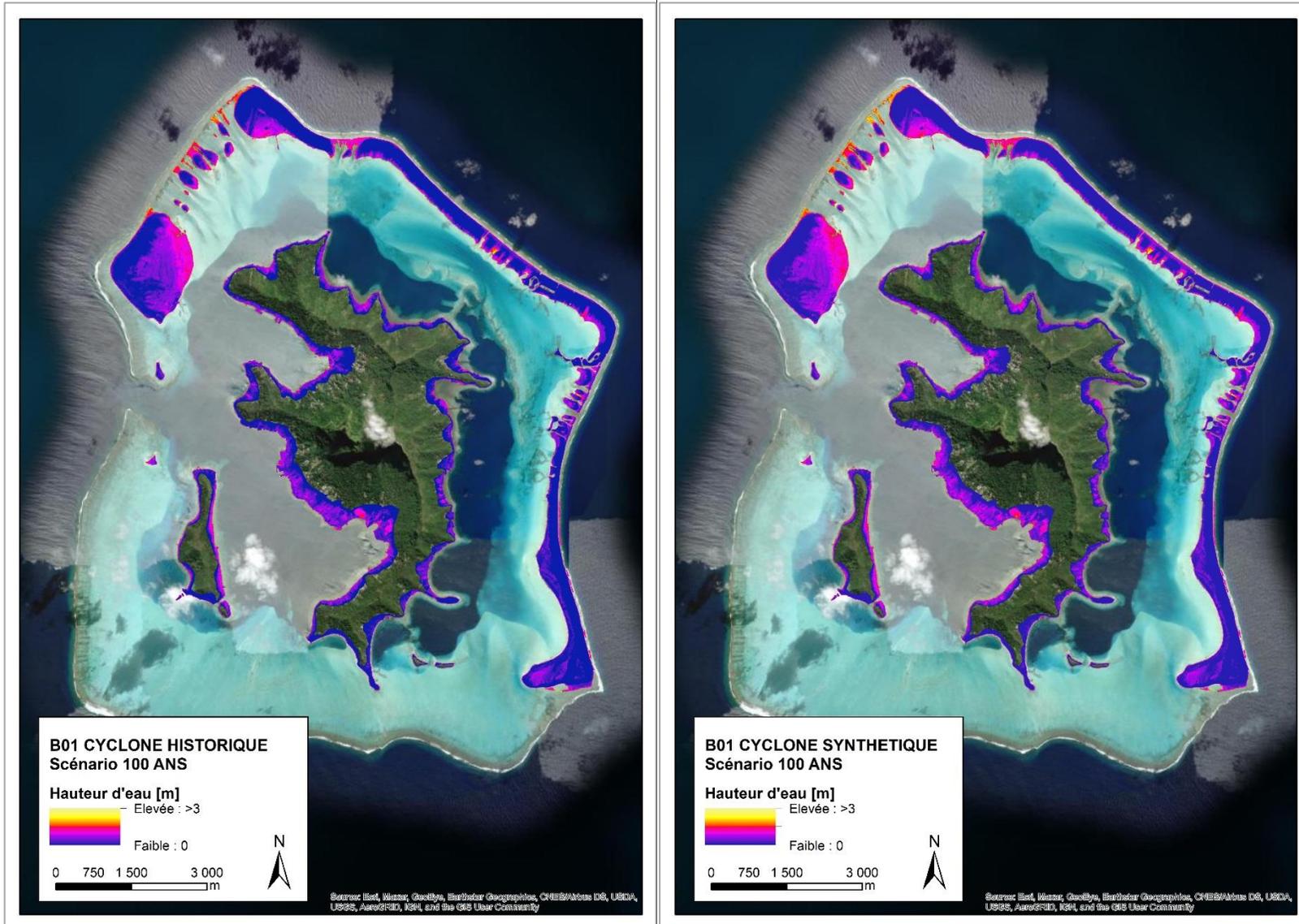
Annexe 1. Etude du cas B01

Figure 35 : Comparaison des hauteurs d'eau obtenues en B01 pour les cyclones synthétique et historique - scénario actuel



Source : BRLi

Figure 36 : Comparaison des hauteurs d'eau obtenues en B01 pour les cyclones synthétique et historique - scénario à 100 ans

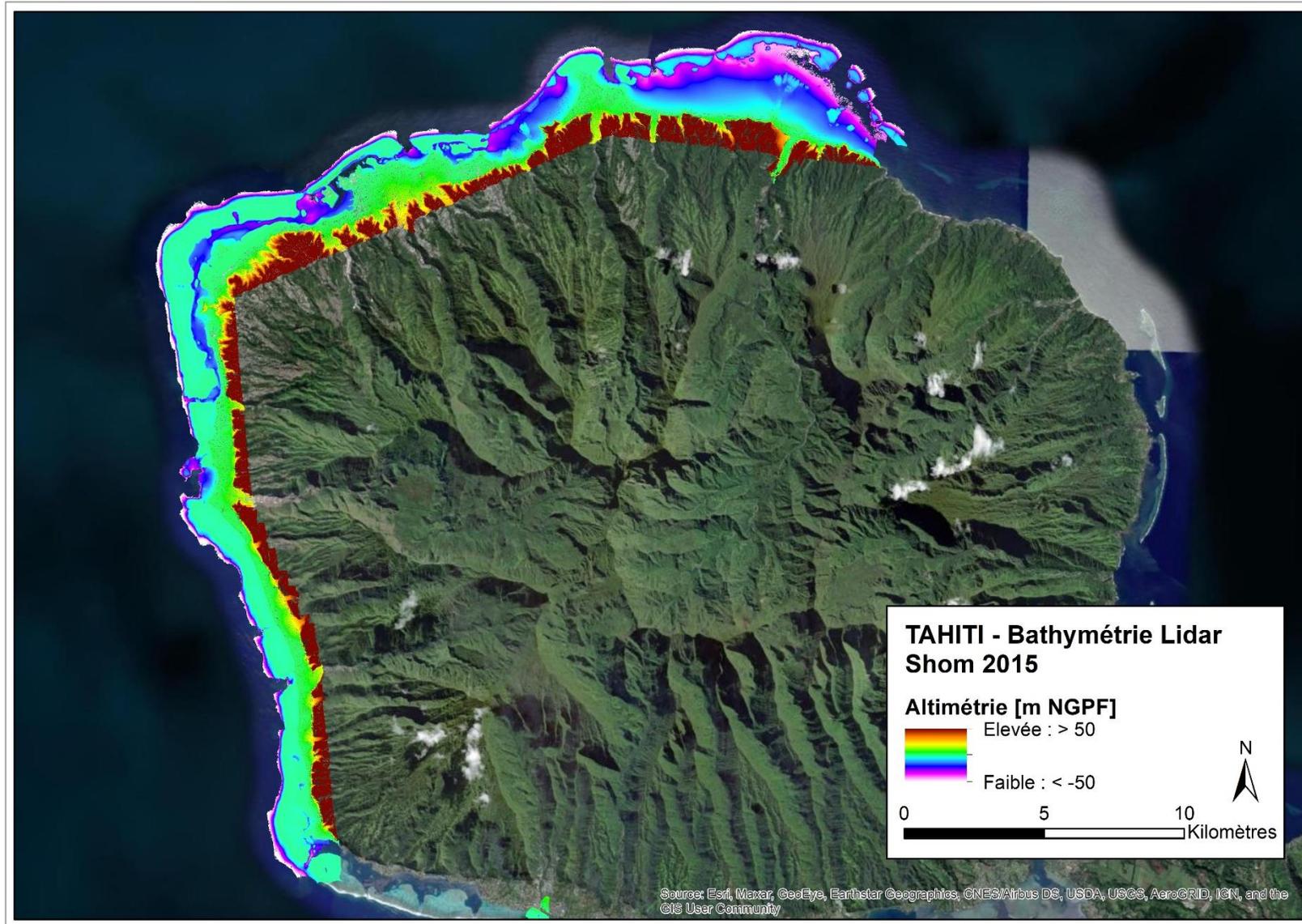


Source : BRLi



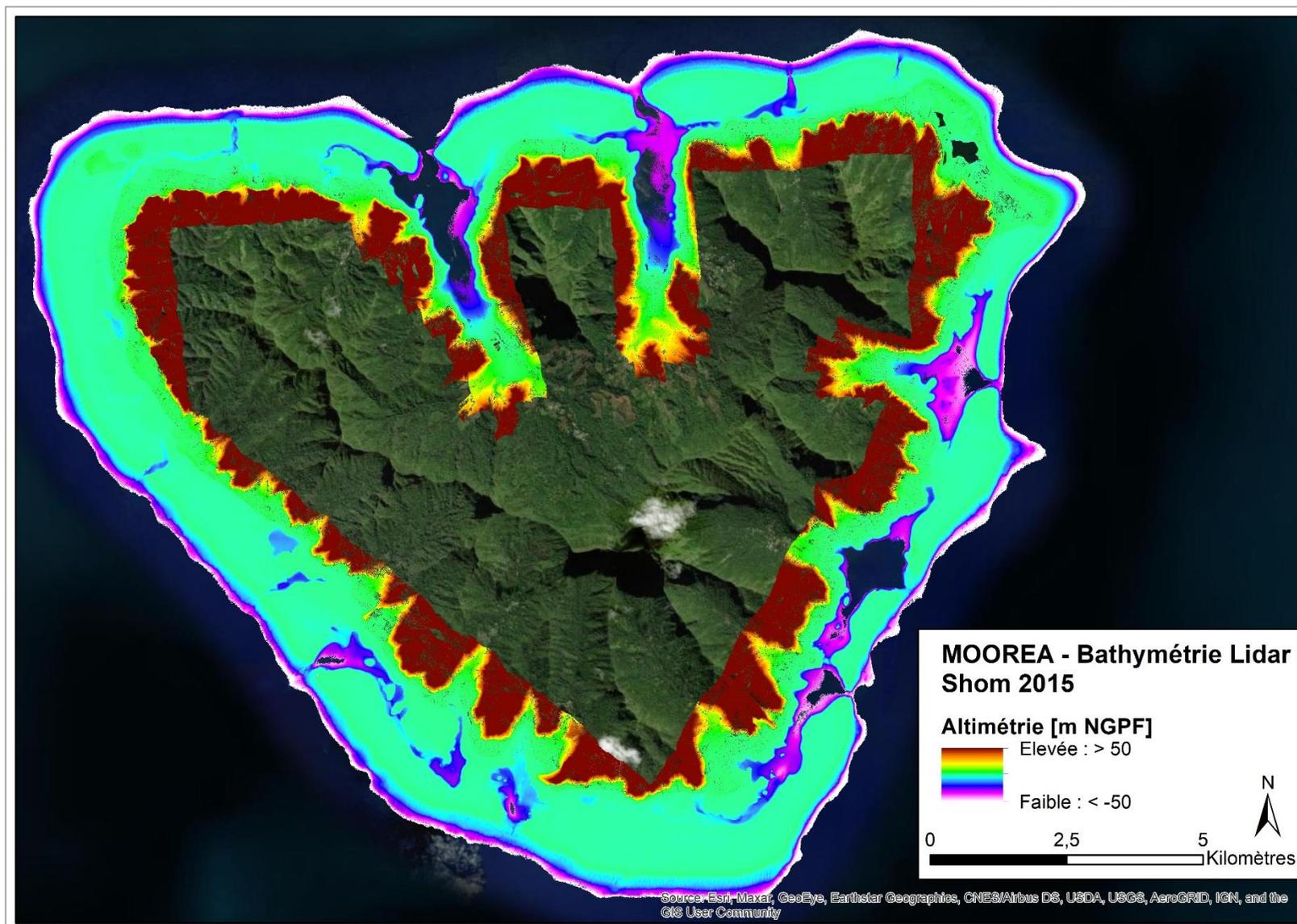
Annexe 2. Cartographies de la donnée lidar du SHOM

Figure 37 : Topo-bathymétrie lidar sur la façade orientale de Tahiti



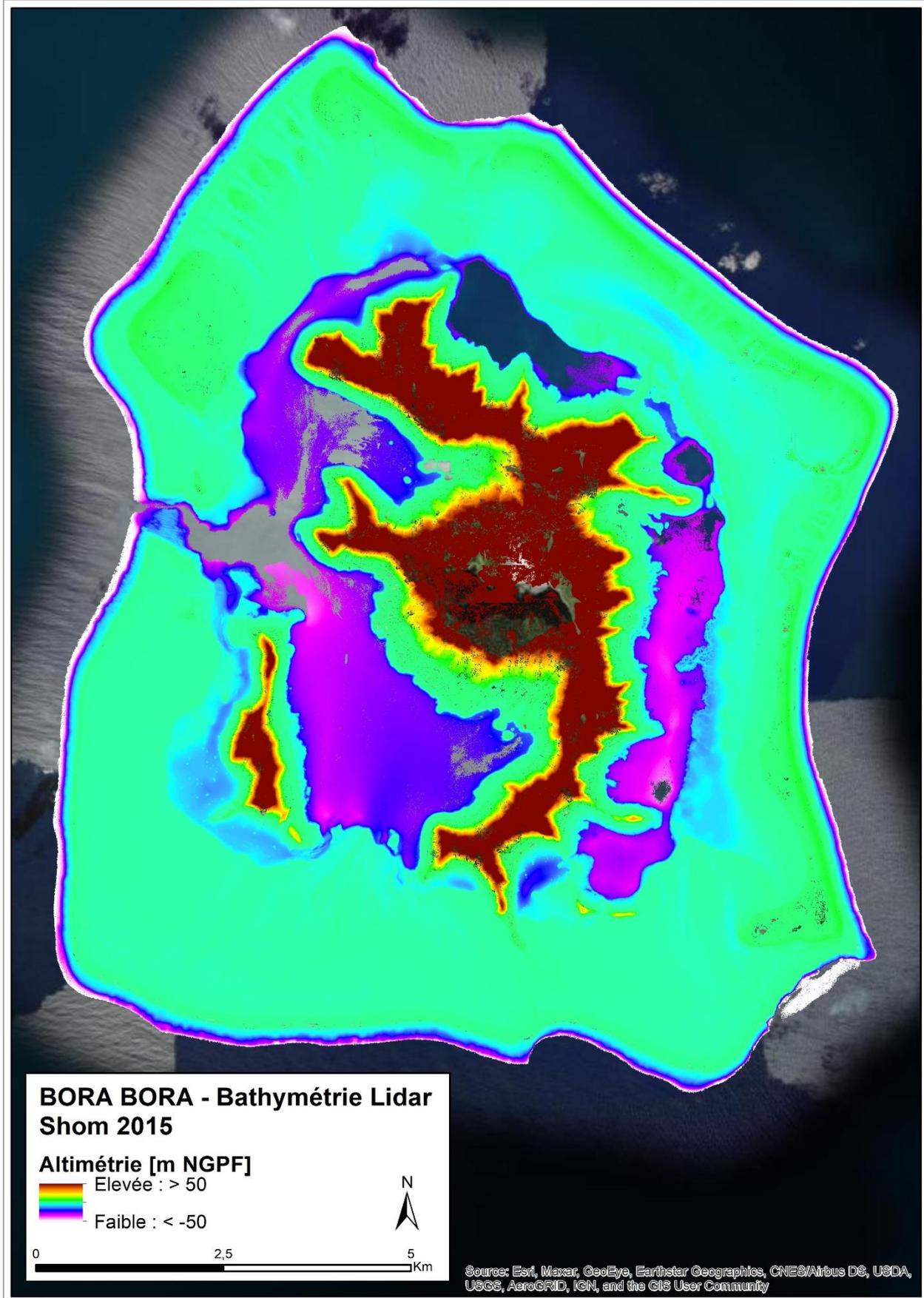
Source : SHOM 2015 (traitement / mise en forme BRLi)

Figure 38 : Topo-bathymétrie lidar sur Moorea



Source : SHOM 2015 (traitement / mise en forme BRLi)

Figure 39 : Topo-bathymétrie lidar sur Bora Bora



Source : SHOM 2015 (traitement / mise en forme BRLi)



Annexe 3. Dossier des fichiers résultats traités



BRL
Ingénierie



www.brl.fr/brli

Société anonyme au capital de 3 183 349 euros
SIRET : 391 484 862 000 19 - RCS : NÎMES B 391 484 862
N° de TVA intracom : FR 35 391 484 862 000 19

1105, avenue Pierre Mendès-France
BP 94001 - 30 001 Nîmes Cedex 5
FRANCE
Tél. : +33 (0) 4 66 84 81 11
Fax : +33 (0) 4 66 87 51 09
e-mail : brli@brl.fr