



Modélisation numérique des submersions causées par des houles cycloniques en Polynésie française

Ludovie LE COZ¹, François CARNUS¹, Denis BONICEL², Gaëlle CORBEL¹

1. BRL ingénierie, DAS Mer & Littoral, 1105 Av. Pierre Mendès France, 30000 Nîmes, France.

brlingénierie@brl.fr

2. GlobOcéan, 45 Avenue de la 1^{ère} Armée, 83300 Draguignan, France.

contact@globocean.fr

Résumé :

Les îles de Tahiti, Moorea et Bora Bora se trouvent régulièrement touchées par des cyclones qui causent de nombreux dégâts. Ces îles sont en outre ceinturées par un récif corallien plus ou moins continu et comportent de fortes pentes dans leur partie centrale volcanique au relief montagneux, ce qui exerce une forte contrainte sur les possibilités de construction. Dans ce contexte, le service de l'urbanisme du Ministère du logement et de l'aménagement du territoire en Polynésie Française a commandé la mise à jour des cartes d'aléa submersion marine suite à la réalisation d'un MNT Lidar par le SHOM en 2016 sur Moorea, Bora Bora et la façade occidentale de Tahiti.

L'objectif était de réaliser une cartographie la plus précise possible tout en restant sécuritaire et en alignement avec le guide méthodologique PPRL. L'article présente les hypothèses retenues lors de l'étude dans les cas où le guide PPRL comporte des zones d'ombre. En l'occurrence, les cas traités sont la sélection de l'évènement de référence pour des conditions cycloniques, et une réflexion spécifique menée concernant la définition de la bande d'action mécanique des houles.

Mots-clés :

Submersion marine, Modélisation hydrodynamique, Cyclones, Action mécanique des houles, Cartographie PPRL, Polynésie française, Récif corallien

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

1. Introduction

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 méthodologies de cartographie de Plans de Prévention des Risques (PPR) ont été réalisées par le BRGM, notamment à travers le projet ARAI3 (LECACHEUX *et al.*, 2013). Depuis, une campagne Lidar a été effectuée en 2015 sur la zone côtière de Moorea, Bora Bora et la côte occidentale de Tahiti, fournissant des données bathymétriques et topographiques de haute résolution mises à disposition par le SHOM en 2016.

Dans ce contexte, le service d'urbanisme du ministère du logement et de l'aménagement du territoire en Polynésie Française (SAU) demande une mise à jour du zonage de la submersion marine des cartographies des PPR sur les secteurs couverts par la campagne Lidar, ainsi que la révision des bandes forfaitaires définissant l'aléa action mécanique des houles.

Les îles étudiées présentent la particularité d'être des « makatea », c'est-à-dire des atolls surélevés comportant en leur centre, les restes escarpés d'une ancienne île volcanique. Cette configuration limite les possibilités d'extension des zones urbaines, ce qui fait des cartographies PPR un vrai enjeu d'urbanisme. De plus, ces îles sont entourées d'un récif-barrière qui joue un rôle de premier plan pour l'atténuation des fortes houles.

Le présent article décrit la démarche menée pour la réalisation des cartes de submersion marine d'origine cyclonique. Il met en avant les questionnements soulevés lors de l'étude et non tranchés clairement par le guide PPRL en vigueur (DGPR, 2014).

2. Sélection des événements de référence : étude des cyclones historiques

Selon le guide PPRL (DGPR, 2014), l'événement de référence est par défaut l'événement théorique de période de retour 100 ans ou l'événement historique majeur connu et référencé, s'il est supérieur à un événement de période de retour 100 ans.

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. Différents points de calcul ont été définis tout autour des trois îles devant les secteurs côtiers homogènes, devant les passes du récif et devant les principales zones d'intérêt.

2.1 Méthode des cyclones synthétiques

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 à partir des bases IBTRACKS (KNAPP *et al.*, 2010 ; 2018) et JTWC (CHU *et al.*, 2002).

Des 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 (WW3DG, 2019), puis leur propagation est modélisée avec SWAN (SWAN TEAM, 2021) sur 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 (HOLLAND, 1980 ; 2008) 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 statistiques des 77 cyclones historiques répertoriés.

Cette méthode se base sur une analyse bivariée des paramètres vitesse du vent et distance au 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 des valeurs caractéristiques conservatives.

2.2 Méthode des 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 en proposant des outils comme la méthode « Peak over threshold », des déterminations de valeurs modales par des lois d'ajustement, des traitements statistiques et des outils de visualisation. Elle a été utilisée pour calculer les variables caractéristiques des cyclones de période de retour 100 ans : H_{m0} , T_p , Dir_p , W_d et la vitesse maximale du vent généré par le cyclone (W_s). Le résultat de l'extrapolation présente la valeur la plus probable sur la période de retour choisie.

2.3 Comparaison des deux méthodes

La méthode des cyclones historiques a l'avantage de représenter les conditions ayant réellement impactées les sites étudiés. Cependant, cette méthode ne prend pas en

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

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 hauteur significative spectrale H_{m0} , sont en général supérieures avec la méthode des cyclones synthétiques, elles restent toutefois du même ordre de grandeur (écart moyen de +0.8m pour les cyclones synthétiques). Les écarts sont légèrement plus marqués pour la côte Ouest de Tahiti.
- Les périodes pics T_p associées issues de la méthode « synthétique » sont inférieures à celles obtenues avec la méthode « historique » (écart moyen de -1.4s), ce qui traduit le fait que les cyclones historiques sont générés plus loin du site que les synthétiques puisqu'ils sont générés de telle façon qu'ils passent sur le site.
- Les directions de provenance associées, Dir_p pour les vagues et W_d pour le vent, sont sensiblement identiques, bien que les vents des cyclones synthétiques soient souvent légèrement décalés vers l'Ouest (écarts moyens respectivement de $-7^\circ/N$ et $-20^\circ/N$). Ici encore, cet écart peut s'expliquer par la génération des cyclones synthétiques qui optimise le couple vitesse du vent/distance au site.

2.4 Sélection des évènements de référence

La plupart des paramètres caractéristiques (H_{m0} , T_p , Dir_p , W_s , W_d) des cyclones synthétiques obtenus sont plus défavorables que les cyclones obtenus à partir de la méthode des cyclones historiques. Dans les cas où les paramètres obtenus ne permettaient pas de trancher directement, des modélisations de test ont permis de sélectionner le cyclone entraînant les submersions les plus conséquentes.

Afin d'optimiser le nombre de calculs et de simulations, les points présentant des cyclones très similaires ont fait l'objet d'une sélection pour ne retenir que les cyclones représentatifs les plus pénalisants. Finalement, entre quatre et six cyclones ont été retenus pour chaque île.

Ce travail a permis d'affiner la sélection des évènements de référence et donc de représenter plus fidèlement les conditions cycloniques potentielles. Ceci permet également d'améliorer la précision de la cartographie de l'aléa submersion marine par rapport aux modèles précédents (en particulier le PPR 2006 et la cartographie issue d'ARAI 3).

3. Modélisation de la submersion marine d'origine cyclonique

Le mode de submersion largement dominant sur la zone d'étude est la submersion par débordement. Un modèle numérique hydrodynamique couplant les modules Telemac (TELEMAC MASCARET V8P3 (a), 2021) et Tomawac (BENOIT *et al.*, 1996) a été mis en place, dont les principaux résultats extraits sont les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement. Le croisement de ces deux paramètres permet de caractériser l'aléa.

Cet aspect de la modélisation n'est pas développé dans le présent article car il n'a pas soulevé de questionnements particuliers. Ses principales spécificités sont d'une part l'utilisation d'une topo-bathymétrie lidar de résolution 1m et d'autre part la prise en compte des cyclones de références tels que décrits dans la partie précédente. Pour chaque cyclone de référence, une modélisation d'ensemble de chaque île a été conduite et déclinée pour un scénario actuel et un scénario à 100ans (prise en compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique de +60cm). Les hauteurs et vitesses obtenues ont été croisées et l'aléa maximal a été retenu pour les cartographies finales de la submersion marine. Un exemple de cartographie obtenue est présenté à la figure 1.

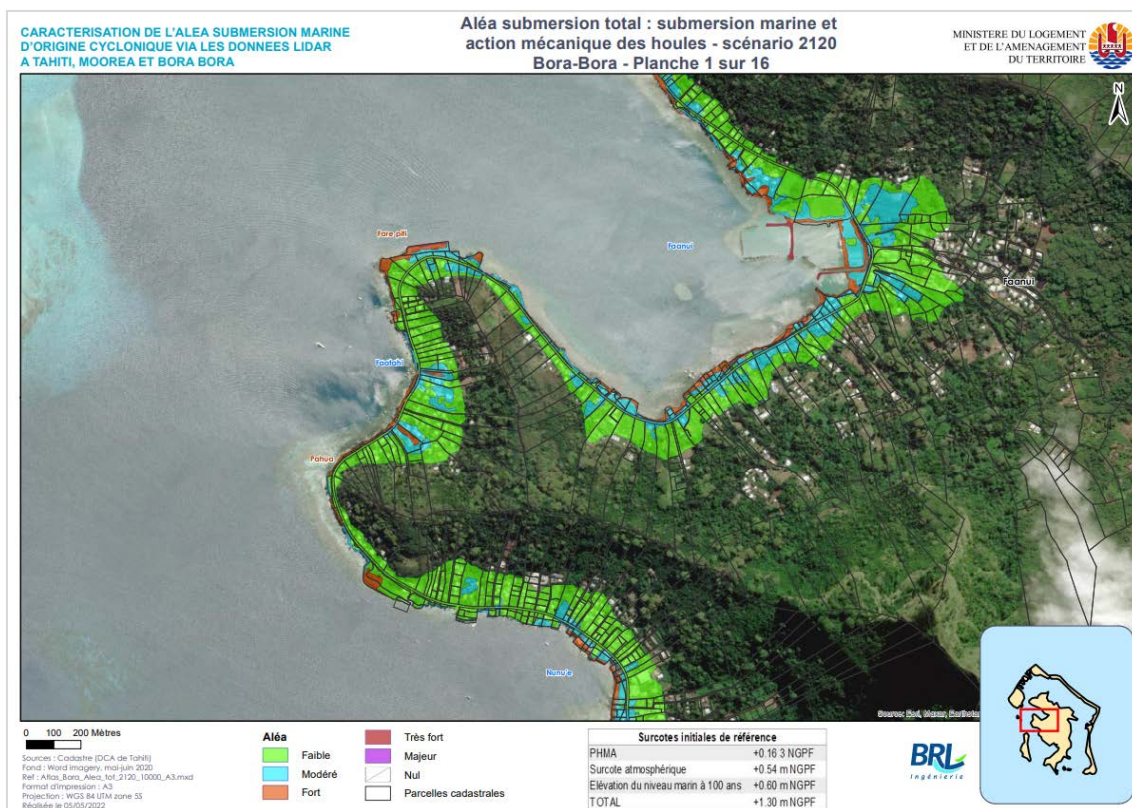


Figure 1. Aléa submersion marine à Bora Bora à l'horizon 100 ans (CARNUS et al., 2021-2022).

4. Modélisation de la bande d'action mécanique des houles

L'aléa action mécanique des houles traduit les brutales décharges d'énergie pouvant se produire lorsque la houle déferle, causant potentiellement d'importants dégâts. Concernant cet aléa, le guide PPRL (DGPR, 2014) préconise en contexte cyclonique l'application d'une bande forfaitaire de 50m de large. L'exemple du PPRN « submersion » de la Guadeloupe réalisé par le BRGM (DGPR, 2014) montre que la largeur de cette bande a été adaptée en fonction de la typologie géologique du rivage, de la présence d'ouvrages ou de barrière récifale selon les retours d'expériences de deux

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

ouragans historiques de l'année 1995 (Luis et Marilyne). Toutefois, ces bandes forfaitaires appliquées dans le cadre des précédentes cartographies PPR de Polynésie française sont perçues comme très contraignantes par le MLAT en termes de gestion de l'urbanisme dans ces zones. A la demande du client, plusieurs pistes ont été explorées pour proposer une caractérisation plus précise de l'aléa action mécanique des houles.

4.1 Principe des approches explorées

La ligne directrice de l'approche pour catégoriser l'aléa action mécanique des houles est d'évaluer les capacités d'une personne à pouvoir se déplacer sans assistance, selon le principe utilisé pour les aléas inondation et submersion (DGPR, 2014).

Evidemment, le principe général est à adapter pour correspondre aux spécificités de l'aléa action mécanique des houles qui est lié à la dissipation énergétique des houles. Après diverses réflexions, l'approche finalement retenue se base sur deux paramètres résultant des simulations Tomawac, la hauteur significative de la houle à la côte H_{m0} et le coefficient de déferlement β .

4.2 Approche retenue : croisement de H_{m0} et β

Le coefficient β représente le quotient entre l'énergie dissipée par le déferlement et l'énergie totale des houles, il est sans unité et est compris entre 0 et -1. Plus la valeur absolue de β est élevée, plus l'énergie libérée par le déferlement est importante. Le calcul de β varie légèrement selon la méthode de calcul employée pour le terme de dissipation par déferlement (mot-clef DEPTH INDUCED BREAKING DISSIPATION dans Tomawac), ici il s'agit du modèle de Battjes et Janssen (BATTJES & JANSSEN, 1978) tel qu'exploité dans Tomawac (TELEMAC MASCARET V8P3 (a) ; (b), 2021) :

$$Q_{br}(f, \theta) = -\frac{\alpha Q_b f_c H_m^2}{4m_0} \cdot F(f, \theta) \quad (1)$$

où : Q_{br} est l'énergie dissipée par déferlement, F est la densité d'énergie, m_0 est le moment spectral d'ordre 0, α est un coefficient par défaut égal à 1, Q_b est la fraction des vagues déferlantes, f_c est la fréquence caractéristique et H_m est la hauteur de houle maximale compatible avec la hauteur d'eau. En observant les résultats obtenus de β et en comparant ces données avec les quelques vidéos disponibles de houle déferlantes lors de l'épisode cyclonique Oli, deux classes de valeur ont été définies : $\beta > -0.1$ et $\beta \leq -0.1$.

Une autre hypothèse prise est que plus la hauteur de la houle au moment du déferlement est importante, plus l'aléa action mécanique des houles est fort. Toujours en fonction des quelques observations permises par les vidéos du cyclone Oli, trois classes de hauteur de houle ont été définies : $H_{m0} < 0.25m$; $0.25m \leq H_{m0} < 0.5m$ et $H_{m0} > 0.5m$. Intégrer la hauteur de houle dans la caractérisation de l'aléa action mécanique des houles permet également d'ajouter une variable de contrôle au coefficient β . Une proposition de

caractérisation de l'aléa action mécanique des houles est obtenue en croisant les classes de H_{m0} et β , tel que présenté au tableau 1.

Tableau 1. Classification de l'aléa action mécanique des houles (CARNUS et al., 2021-2022).

	$\beta > -0.1$	$\beta \leq -0.1$
$H_{m0} < 0.25m$	Aléa négligeable	Aléa faible
$0.25m \leq H_{m0} < 0.5m$	Aléa faible	Aléa modéré
$H_{m0} > 0.5m$	Aléa modéré	Aléa fort

Au final, seule la bande d'aléa fort a été retenue dans les cartographies réalisées, elle est superposée à l'aléa submersion marine obtenu par croisement des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement pour la production d'une carte représentant les deux types d'aléas. La largeur de la bande d'aléa mécanique fort varie de quelques mètres à une dizaine de mètres, au plus 50m sur les motus. Sans surprise, les bandes les plus larges se situent au niveau des motus directement exposés aux houles du larges, aux secteurs au droit des passes et au niveau des zones basses et planes. Un exemple de cartographie obtenue est présenté à la figure 2.

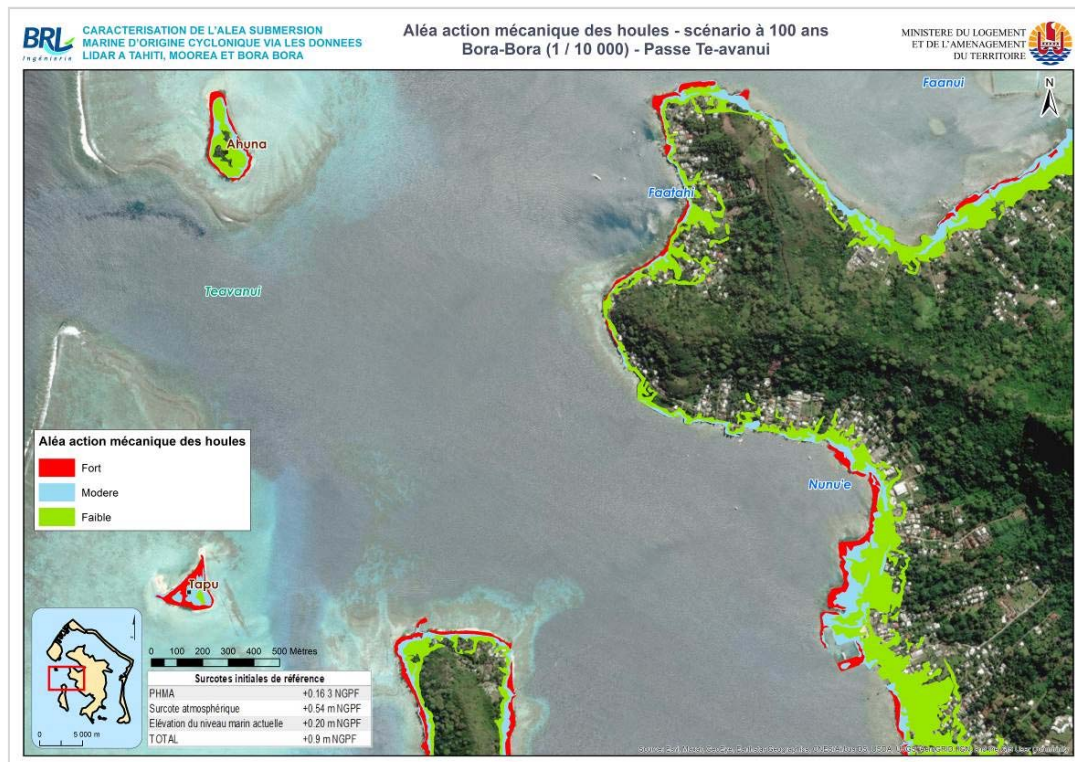


Figure 2. Aléa action mécanique des houles à Bora Bora à l'horizon 100 ans (CARNUS et al., 2021-2022).

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

Les cartographies obtenues sont cohérentes avec les quelques éléments historiques disponibles et permettent une caractérisation affinée des zones impactées par l'aléa action mécanique des houles. Toutefois, il s'agit d'une démarche expérimentale qui nécessite un travail de recherche et de calage plus approfondi pour pouvoir être généralisée.

5. Conclusion

La modélisation de la submersion marine d'origine cyclonique à Moorea, Bora Bora et sur la façade occidentale de Tahiti dans le but de réviser le PPRL de ces zones s'est trouvée confrontée à des cas de figure mal couverts par le guide PPRL actuellement en vigueur (DGPR, 2014). C'est un enjeu d'autant plus important pour ces territoires où l'espace propice au développement urbain est fortement contraint. Un travail spécifique a été réalisé pour définir des événements cycloniques de référence les plus réalistes possibles à partir d'un nombre relativement limité d'évènements historiques documentés. Une réflexion a été menée pour caractériser l'aléa action mécanique des houles basé sur le croisement de la hauteur significative des houles et du taux d'énergie dissipée lors du déferlement. Les bandes ainsi obtenues ont été intégrées aux cartographies finales du risque submersion marine dit « total », dont un aperçu est donné figure 3. Le but de cet article est de présenter la démarche pilote suivie et de permettre une discussion scientifique ouverte sur les méthodes proposées.

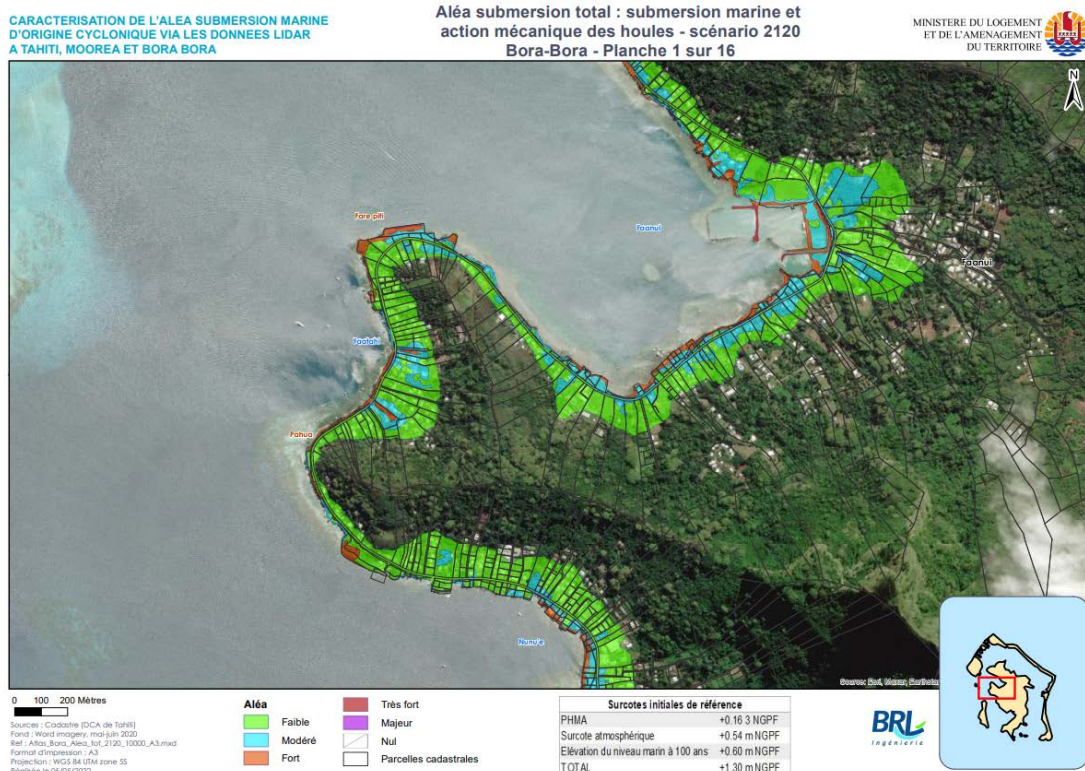


Figure 3. Aléa « submersion total » à Bora Bora à l'horizon 100 ans (CARNUS et al., 2021-2022).

6. Références bibliographiques

- BATTJES J. A., JANSSEN J.P.F.M. (1978). *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Coastal Engineering Proceedings, 1(16), 32. <https://doi.org/10.9753/icce.v16.32>
- BENOIT M., MARCOS F., BECQ F. (1996) *Development of a third generation shallow water wave model with unstructured spatial meshing*. Coastal Engineering Proceedings, 1(25). <https://doi.org/10.9753/icce.v25.%p>
- CARNUS F., LE COZ L., CORBEL G., BONICEL D. (2021-2022). *Caractérisation de l'aléa submersion marine d'origine cyclonique via les données lidar à Tahiti, Moorea et Bora Bora, Rapport de phase 1 - Etat des lieux, Rapport de Phases 2 et 3 – Modélisation et transcription de l'aléa*. BRL ingénierie pour le Service de l'urbanisme du Ministère du logement et de l'aménagement du territoire de Polynésie Française.
- CHU J.H., SAMPSON C.R., LEVINE A. S, FUKADA E. (2002), mise à jour de 2021) *The joint typhoon warning center Tropical cyclone best-tracks, 1945-2000*. Mise à jour en 2021. NRL/MR/7540-02-16.
- DGPR (DIRECTION GENERALE DE LA PREVENTION DES RISQUES), SEVICE DES RISQUES NATURELS ET HYDRAULIQUES DU MINISTERE DE L'ECOLOGIE DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ENERGIE (2014). *Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux*. pp. 25-119.
- HOLLAND G. (1980). *An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes*. Monthly Weather Review, Vol. 108, pp. 1212-1218.
doi:10.1175/1520-0493(1980)108<1212:AAMOTW>2.0.CO;2
- HOLLAND G. (2008). *A revised hurricane pressure-wind model*. Monthly weather review, vol. 136, pp. 3432-3445. doi:10.1175/2008MWR2395.1
- KNAPP K.R., KRUK M.C., LEVINSON D. H., DIAMOND H.J., NEUMANN C.J. (2010) *The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data*. Bulletin of the American Meteorological Society, 91, pp.363-376. doi:10.1175/2009BAMS2755.1.
- KNAPP K.R., DIAMOND H.J., KOSSIN J.P., KRUK M.C., SCHRECK C.J. (2018) *International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4*. NOAA National Centers for Environmental Information. doi:10.25921/82ty-9e16.
- LECACHEUX S., BULTEAU T., PEDREROS R., DELVALLEE E., PARIS F. (2013). *Projet ARAI3 : Evaluation probabiliste des houles et des surcotes cycloniques en Polynésie Française*. BRGM pour le Service de l'urbanisme du Ministère du logement et de l'aménagement du territoire de Polynésie Française.
- SWAN TEAM (2021) *User manual SWAN Cycle III version 41.41*, Delft University of Technology.
- TELEMAC-MASCARET V8P3 (a). (2021). *Telemac user manual*.
- TELEMAC-MASCARET V8P3 (b). (2021). *Tomawac user manual*. pp. 27-30.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

WAVEWATCH III R DEVELOPMENT GROUP (WW3DG) (2019) *User manual and system documentation of WAVEWATCH III R version 6.07*. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 465 p.