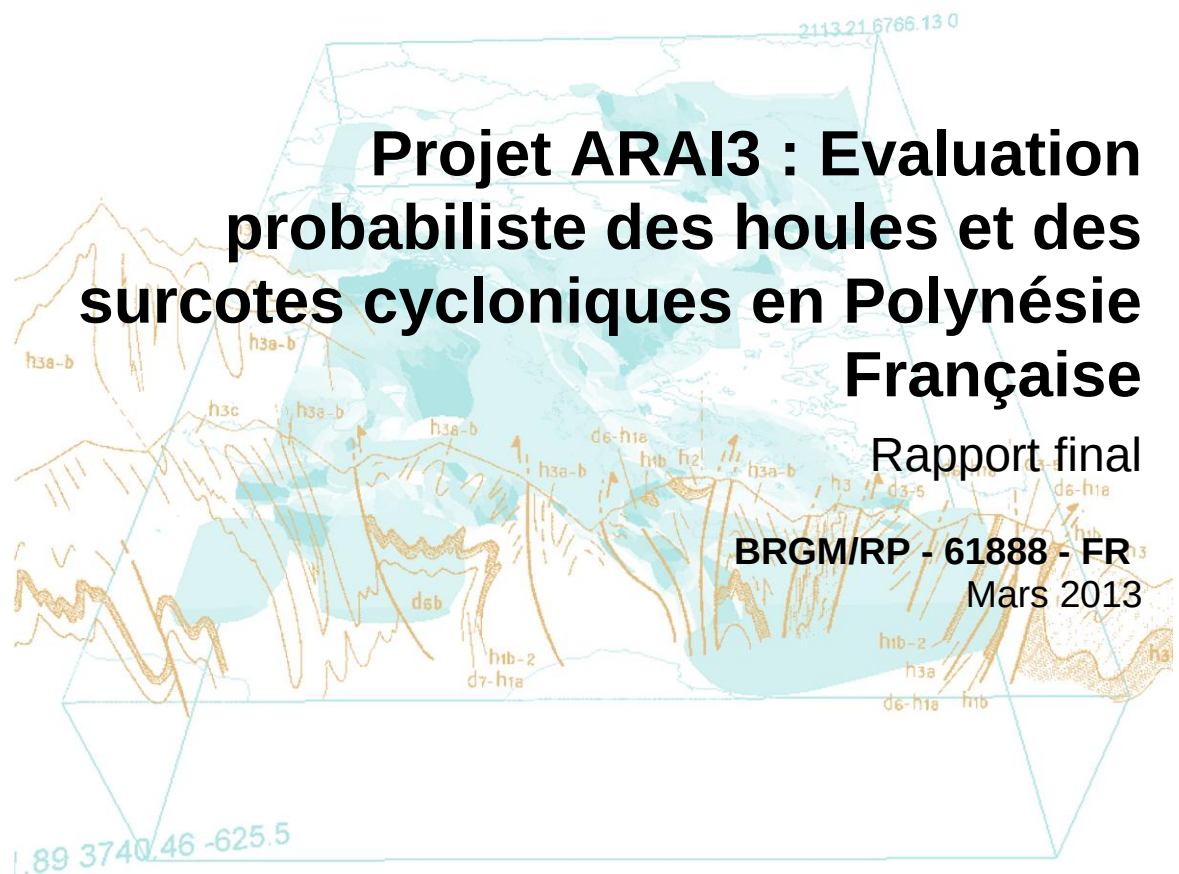




Projet ARAI3 : Evaluation probabiliste des houles et des surcotes cycloniques en Polynésie Française

Rapport final

BRGM/RP – 61888 - FR
Mars 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2010 10RISH23

S. Lecacheux, T. Bulteau, R. Pedreros, E. Delvallée, F. Paris

Vérificateur :

Nom : Olivier Sedan

Date : 20/3/2013

Signature :



Approbateur :

Nom : Jean-Luc Foucher

Date :

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Littoral, Polynésie Française, aléa, submersion marine, cyclone, houle cycloniques, houles saisonnières, surcote, ouvrages de protection.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Lecacheux S., Bulteau T., Pedreros R., Delvallée E., Paris F. (2013). Projet ARAI 3 : Evaluation probabiliste des houles et des surcotes cycloniques en Polynésie Française. Rapport BRGM/RP-61888-FR, 122 p., 116 fig., 2 ann.

Synthèse

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 premier programme ARAI a notamment donné lieu à une cartographie de l'aléa submersion marine lié aux houles cycloniques. Depuis, le BRGM a poursuivi ces travaux en collaboration avec le service de l'urbanisme dans le cadre du projet ARAI 2 dont l'un des objectifs était de préciser les cartes d'aléa sur les atolls.

Le projet de zonage actuel des PPR littoraux est perçu comme une forte contrainte, en particulier dans les communes fortement exposées à plusieurs types d'aléa. Afin d'appuyer les réflexions engagées par le SAU sur la problématique littorale, le BRGM a réalisé une série d'actions dans le cadre du projet ARAI3 visant à disposer de nouveaux moyens pour optimiser la gestion du risque de submersion marine :

- ✓ Une réévaluation des scénarios de référence en adoptant une approche de type probabiliste et en prenant en compte à la fois les événements cycloniques et les houles saisonnières afin de proposer une estimation du niveau d'aléa plus argumentée. Ce premier volet a été mené pour les îles de Tahiti et Moorea (archipel de la Société) ainsi que sur Tubuai (archipel des Australes).
- ✓ Des tests sur de nouveaux outils permettant de modéliser la submersion marine de manière fine avec des modèles vague-à-vague (prise en compte des processus de déferlement, et de jet de rive).
- ✓ Une réflexion sur les aménagements et les mesures de protection des parcelles en bordure de littoral. Dans un premier temps, une synthèse et une analyse de l'efficacité et des impacts des aménagements existant en Polynésie et dans d'autres pays a été effectuée. Cette partie fait l'objet d'un rapport indépendant (Garcin, 2012). Puis, des tests sur l'efficacité de certains aménagements contre la submersion marine ont été réalisés avec des modélisations sur deux profils types (avec et sans récif barrière) pour trois scénarios de référence correspondant au scénario centennal calculé pour différentes façade des îles de Tahiti et Moorea.

A l'issue de cette étude, le Pays dispose de nouveaux éléments pour faire évoluer sa politique de prévention des risques en zone littorale. La réévaluation des scénarios de référence centennaux ainsi que les modélisations de la submersion effectuées sur les sites tests constituent une base de réflexion pour une révision plus globale des plans de zonage des PPR littoraux sur les îles de Tahiti, Moorea et Tubuai. La synthèse et les tests réalisés sur les ouvrages de protection apportent également un éclairage sur les mesures envisageables pour réduire la vulnérabilité des habitations à proximité du littoral.

Sommaire

1. Introduction	15
1.1. CYCLONES ET HOULES EN POLYNESIE FRANÇAISE	15
1.1.1. Houles saisonnières	15
1.1.2. Cyclones et dépressions tropicales	16
1.2. CARACTERISATION DE LA SUBMERSION MARINE LIEE AUX HOULES ET AUX SURCOTES	17
1.2.1. Les composantes de la submersion	17
1.2.1. Prise en compte actuelle dans le projet de PPRL actuel	18
1.3. OBJECTIFS DE LA PRESENTE ETUDE	19
2. Méthode, données et outils employés	21
2.1. DEMARCHE GENERALE	21
2.2. DONNEES	22
2.2.1. Données cycloniques	22
2.2.1. Données pour les houles saisonnières	25
2.2.2. Données topo-bathymétriques et construction des MNT	25
2.2.3. Données de validation	28
2.3. MODELE DE VENT CYCLONIQUE PARAMETRIQUE	29
2.4. MODELES NUMERIQUES.....	30
2.4.1. Les modèles de vagues WW3 (hauturier) et SWAN (côtier)	30
2.4.2. Le modèle hydrodynamique MARS-2DH	31
2.4.3. Le modèle SWASH	32
2.4.4. Le modèle Surf-WB	32
3. Mise en place et validation de la modélisation des houles et des niveaux d'eau pour les cyclones historiques	33
3.1. IMPLANTATION DES MODELES	33
3.1.1. Vagues.....	33
3.1.2. Niveaux d'eau	34
3.2. VALIDATION.....	35
3.2.1. Vagues.....	35
3.2.2. Niveaux d'eau	37

3.2.3. Décomposition de la surcote dans le lagon pour le cyclone Oli	37
3.2.4. Conclusions et leçons tirées de la validation	39
3.3. RESULTATS DES SIMULATIONS DES CYCLONES HISTORIQUES	40
4. Etude statistique et proposition de nouvelles valeurs de référence	43
4.1. EVENEMENTS SAISONNIERS.....	43
4.1.1. Site 1 : Maharepa	45
4.1.2. Site 2 : Matavai.....	46
4.1.3. Site 3 : Teva I Uta.....	47
4.1.4. Site 4 : Tubuai nord	48
4.1.5. Synthèse régionale.....	50
4.2. EVENEMENTS CYCLONIQUES	54
4.2.1. Tahiti et Moorea	55
4.2.2. Tubuai	64
4.3. SYNTHESE SUR LES HOULES CYCLONIQUES ET SAISONNIERES	66
4.4. CHOIX DES SCENARIOS POUR LES 4 SITES PILOTES	68
5. Modélisation de la submersion sur les sites pilotes.....	69
5.1. MAHAREPA	71
5.2. TEVA I UTA.....	75
5.3. MATAVAI.....	80
5.4. SYNTHESE	85
5.5. COMPARAISON AVEC LES CARTES D’ALEA ACTUELLES SUR LES SITES PILOTES	85
6. Tests sur l’efficacité des ouvrages de protection contre la submersion marine	89
6.1. PROFILS TYPES RETENUS.....	89
6.2. SCENARIOS DE REFERENCE.....	91
6.3. TYPE ET GEOMETRIE DES OUVRAGES TESTES	91
6.4. METHODOLOGIE MISE EN OEUVRE	93
6.4.1. Définition des critères d’endommagement et limites de l’approche.....	94
6.4.2. Modélisation numérique	94

6.4.3. Résultats des simulations	96
6.5. SYNTHESE ET CONCLUSIONS.....	104
7. Conclusion générale	107
8. Bibliographie	109
9. ANNEXE 1 : Synthèse des données utilisées pour chaque cyclone	111
10. ANNEXE 2 : Résultats des modélisations pour les cyclones les plus impactants pour les archipels de la Société	113
10.1. MARTIN (OCTOBRE-NOVEMBRE 1997)	114
10.2. REVA (MARS 1983).....	115
10.3. VEENA (AVRIL 1983)	116
10.4. WASA (DECEMBRE 1991)	117
10.5. OLI (JANVIER 2010).....	118
10.6. TAHMAR (MARS 1981)	119
10.7. OSEA (NOVEMBRE 1997).....	120

Liste des illustrations

Figure 1. Origine des houles qui affectent la Polynésie (extrait de Météo-Fenua, http://chez.mana.pf/~pascalrene/houlpoly.html)	15
Figure 2. Carte des trajectoires des cyclones enregistrés entre 1985 et 2005 (NASA 2006)	16
Figure 3. Schéma illustrant les principaux paramètres entrant en compte dans l'évaluation des niveaux marins extrêmes	17
Figure 4. Principe de la cartographie des zones d'aléa submersion marine.	18
Figure 5. Localisation des sites d'étude	22
Figure 6. Trajectoires des 72 cyclones historiques pris en compte pour l'étude.	23
Figure 7. Trajectoires des 41 cyclones historiques et des 123 cyclones synthétiques constituant le catalogue final utilisé pour l'étude statistique.	24
Figure 8. Bathymétrie côtière pour Tahiti et Moorea	26
Figure 9. Bathymétrie côtière pour Tubuai.....	26

Figure 10. Topobathymétrie pour Maharepa exprimée en mètres par rapport au niveau moyen.	27
Figure 11. Topobathymétrie pour Matavai exprimée en mètres par rapport au niveau moyen.	27
Figure 12. Topobathymétrie pour Teva I Uta exprimée en mètres par rapport au niveau moyen.	27
Figure 13. Les différents altimètres de 1991 à 2010 : ESA (vert), NASA-CNES (rouge), NASA-NAVY (bleu). Image extraite de Queffleulou et Croizé-Fillon (2009).	28
Figure 14. Position des marégraphes de Papeete et Tubuai.	28
Figure 15 : Principe de la technique d'emboîtement de modèle pour MARS	31
Figure 16. Emprises des rangs pour le modèle WW3 (0 et 1) et SWAN (2).	33
Figure 17 : Emboitements des grilles de calculs de MARS-2DH de l'emprise Rang0 et Rang1.	34
Figure 18. Comparaison de la hauteur des vagues modélisées avec les fauchées satellites du CERSAT pour le cyclone MARTIN le 04/11/1997 à 20h30 (haut) et à 8h45 (bas).	36
Figure 19. Comparaison de la hauteur des vagues modélisées avec les fauchées satellites du CERSAT pour le cyclone OLI le 04/02/2010 à 21h (bas) et le 05/02/2010 à 21h (haut)	36
Figure 20. Niveaux d'eau calculés par les capteurs de pression (orange) et le radar (noir) au marégraphe de Tubuai (image extraite du site REFMAR).	38
Figure 21. Gauche : Comparaison des résultats de simulation avec les enregistrements du capteur radar. Droite : comparaison de la surcote atmosphérique (vert) et de la surcote totale comprenant la surcote atmosphérique et le setup (rouge).	38
Figure 22. Scénarios de référence pour la houle cyclonique (hauteur significative et période) retenue dans les projets de PPRL réalisés en 2006. Valeurs extraites du rapport Des Garets (2005).	40
Figure 23. Carte des hauteurs significatives maximales exprimées en mètre calculées au rang 0 (Polynésie Française) pour les cyclones historiques.	41
Figure 24. Carte des surcotes atmosphériques maximales (correspondant au baromètre inverse) exprimées en mètre calculées au rang 0 pour les cyclones historiques.	41
Figure 25. Localisation des points utilisés pour l'analyse statistique des houles saisonnières dans le secteur de Tubuai (S4). Triangle blanc : site de Tubuai nord. Triangle vert : point d'analyse supplémentaire pour l'analyse régionale (Tubuai sud).	43
Figure 26. Localisation des points utilisés pour l'analyse statistique des houles saisonnières sur le secteur de Tahiti et Moorea. Triangles blancs : sites de Maharepa (S1), Matavai (S2), et Teva I Uta (S3). Triangle vert : point d'analyse supplémentaire pour l'analyse régionale (Tahiti sud).	44
Figure 27. Loi GPD pour les houles longues du nord pour le site de Maharepa	46
Figure 28. Loi GPD pour les houles d'alizés du nord et du nord-est pour le site de Maharepa.	46

Figure 29. Loi GPD pour les houles longues de l'hémisphère nord pour le site de Matavai.....	47
Figure 30. Loi GPD pour les houles de secteur sud pour le site de Teva I Uta.....	48
Figure 31. Loi GPD ajustée pour les houles du nord sur le site de Tubuai Nord	49
Figure 32. Loi GPD ajustée pour les houles d'alizés de l'est et du nord-est sur le site de Tubuai Nord	50
Figure 33. Loi GPD pour les houles australes pour le site de Tahiti sud.....	51
Figure 34. Loi GPD pour les houles d'alizés pour le site de Tahiti sud	51
Figure 35. Loi GPD pour les houles australes pour le site de Tubuai sud	52
Figure 36. Loi GPD pour les houles d'alizés pour le site de Tubuai sud	53
Figure 37. Résultats de l'analyse statistique au niveau de l'isobathe 200m à Moorea. Le découpage des différents secteurs ainsi que les pointes sont indiqués par des segments noirs.....	55
Figure 38. Résultats à Tahiti (même symbologie que la Figure 37).	56
Figure 39. Répartition du nombre d'évènements cycloniques ayant généré des valeurs de plus de 2m le long du littoral de Tahiti et Moorea.	58
Figure 40. Fréquence de passage des cyclones et des tempêtes tropicales en Polynésie Française entre 1970 et 2009 (image extraite de Larrue et al., 2010).....	58
Figure 41. Exemples de distributions théoriques de Hs (m) pour 4 points de Tahiti et Moorea et trajectoires associées aux évènements qui ont engendré des hauteurs comprises entre le seuil (2m) et la valeur décennale en chaque point.....	59
Figure 42. Hauteur significative de houle maximale calculée pour le cyclone Martin (1997) autour de Tahiti et Moorea. L'échelle de couleur est exprimée en mètres.	60
Figure 43. Exemples de distributions théoriques de Hs pour 4 points de Tahiti et Moorea et trajectoires associées aux évènements situés au dessus de la valeur décennale en chaque point.	61
Figure 44. Hauteur de houle maximale calculée pour le cyclone Veena (1983) autour de Tahiti et Moorea	62
Figure 45. Synthèse des valeurs de référence de Hs pour un ordre de grandeur décennal. Les périodes pic associées ne sont pas indiquées car elles sont très variables.	63
Figure 46. Synthèse des valeurs de référence de Hs pour un ordre de grandeur centennal et valeurs de période pic associées.	63
Figure 47. Résultats de l'analyse statistique au niveau de l'isobathe 200m à Tubuai.	65
Figure 48. Synthèse des valeurs de référence de Hs pour un ordre de grandeur centennal et décennal et valeurs de période pic associées.	66
Figure 49. Méthode de définition des zones d'aléa par croisement hauteur d'eau – vitesse d'écoulement pour le scénario de référence.	69
Figure 50. Emprise des modèles SWAN et SWASH. Le trait rouge indique l'isobathe 0m et les traits blancs les isobathes-200m, -1m et -10m. Les zones principales de déferlement calculées par SWAN ($0.5 < Q_b < 1$) sont indiquées en blanc.	71

Figure 51. Résultats du modèle SWAN (actuel) : Hs (m). L'échelle est indiquée en mètres.....	72
Figure 52. Résultats du modèle SWAN (actuel) : setup (m). L'échelle est indiquée en mètres.....	72
Figure 53. Résultats du modèle SWASH (actuel) : Hauteur d'eau maximale : Les traits représentent les isocontours topographiques par rapport au 0 IGN : bleu foncé: 0.6m / bleu clair : 1.8m / rouge : 2m. L'échelle est indiquée en mètres	73
Figure 54. Résultats du modèle SWASH (actuel) : Vitesse maximale (m/s). L'échelle est indiquée en mètres	73
Figure 55. Carte d'aléa (actuel). L'échelle est indiquée en mètres	73
Figure 56. Résultats du modèle SWASH (2100) : Hauteur d'eau maximale : Les traits représentent les isocontours topographiques par rapport au 0 IGN : violet : 0.6m / bleu foncé: 1.1m / bleu clair : 2.3m / rouge : 2.5m. L'échelle est indiquée en mètres	74
Figure 57. Résultats du modèle SWASH (2100) : Vitesse maximale (m/s). L'échelle est indiquée en mètres	74
Figure 58. Carte d'aléa (2100). L'échelle est indiquée en mètres.....	74
Figure 59. Emprise des modèles SWAN et SWASH. Le trait rouge indique l'isobathe 0m et les traits blancs les isobathes -20m, -10m et -2m. Les zones principales de déferlement calculées par SWAN ($0.5 < Q_b < 1$) sont indiquées en blanc.	75
Figure 60. Résultats du modèle SWAN (actuel) : Hs (m). L'échelle est indiquée en mètres.....	76
Figure 61. Résultats du modèle SWAN (actuel) : setup (m). L'échelle est indiquée en mètres.....	76
Figure 62. Résultats du modèle SWASH (actuel) : Hauteur d'eau maximale : Les traits représentent les isocontours topographiques par rapport au 0 IGN : bleu foncé: 0.6m / bleu clair : 0.95m. L'échelle est indiquée en mètres.	77
Figure 63. Résultats du modèle SWASH (actuel) : Vitesse maximale (m/s). L'échelle est indiquée en mètres.	77
Figure 64. Carte d'aléa (actuel). L'échelle est indiquée en mètres.	78
Figure 65. Résultats du modèle SWASH (2100) : Hauteur d'eau maximale : Les traits représentent les isocontours topographiques par rapport au 0 IGN : violet : 0.6m / bleu foncé: 1.1m / bleu clair : 1.45m. L'échelle est indiquée en mètres.....	78
Figure 66. Résultats du modèle SWASH (2100) : vitesse maximale (m/s). L'échelle est indiquée en mètres.	79
Figure 67. Carte d'aléa (2100). L'échelle est indiquée en mètres.....	79
Figure 68. Emprise des modèles SWAN et SWASH. Le trait rouge indique l'isobathe 0m et les traits blancs les isobathes -20m, -10m et -5m. Les zones principales de déferlement calculées par SWAN ($0.5 < Q_b < 1$) sont indiquées en blanc.	80
Figure 69. Résultats du modèle SWAN (actuel) : Hs (m). L'échelle est indiquée en mètres.....	81
Figure 70. Résultat du modèle SWAN (actuel) : setup (m). L'échelle est indiquée en mètres.....	81

Figure 71. Résultats du modèle SWASH (actuel) : Hauteur d'eau maximale : Les traits représentent les isocontours topographiques par rapport au 0 IGN : bleu foncé: 0.6m / bleu clair : 0.85m / rouge : 3m. L'échelle est indiquée en mètres	82
Figure 72. Résultats du modèle SWASH (actuel) : Vitesses max (m/s). L'échelle est indiquée en mètres.....	82
Figure 73. Carte d'aléa (actuel). L'échelle est indiquée en mètres	83
Figure 74. Résultats du modèle SWASH (2100) : Hauteur d'eau maximale : Les traits représentent les isocontours topographiques par rapport au 0 IGN : violet : 0.6m / bleu foncé: 1.1m / bleu clair : 1.35m / rouge : 3.5m. L'échelle est indiquée en mètres.....	83
Figure 75. Résultats du modèle SWASH (2100) : Vitesse maximale (m/s). L'échelle est indiquée en mètres.....	84
Figure 76. Carte d'aléa (2100). L'échelle est indiquée en mètres	84
Figure 77. Extrait de la carte d'aléa submersion ARAI3 (2100) pour le site de Teva I Uta. Les contours rouge et bleu représentent les limites des zones d'aléa fort (submersion + impact des vagues) et moyen dans la cartographie d'ARAI1.	86
Figure 78. Extrait de la carte d'aléa submersion ARAI3 (2100) pour le site de Matavai. Les contours rouge représentent les limites de la zone d'aléa fort (submersion + impact des vagues) dans la cartographie d'ARAI1.....	87
Figure 79. Extrait de la carte d'aléa submersion ARAI3 (2100) pour le site de Maharepa. Les contours rouge représentent les limites de la zone d'aléa fort (submersion + impact des vagues) dans la cartographie d'ARAI1.....	87
Figure 80. Schémas des différentstypes de côte rencontrés en Polynésie Française. Figure extraite de Garcin (2012).	90
Figure 81. Coupe transversale du site de Matavai correspondant à un profil de type P2 dans la classification de Garcin (2012).	90
Figure 82. Coupe transversale du site de Maharepa correspondant à un profil de type P4 dans la classification de Garcin (2012).....	91
Figure 83. Mur en enrochement de haut de plage avec remblai et enjeux en arrière (Commune d'Arue Plage Lafayette, photo C. Chene). Figure extraite de Garcin (2012).	92
Figure 84. Localisation des aménagements situés en haut de plage. Figure extraite de Garcin (2012).	92
Figure 85. Prise en compte de l'aménagement sur le profil type P2-Matavai.	93
Figure 86. Prise en compte de l'aménagement sur le profil type P4-Maharepa. Le trait en pointillé indique la position du profil sans aménagement.	93
Figure 87. Méthode mise en œuvre pour calculer les hauteurs d'eau, vitesses et débits au niveau de l'ouvrage. Exemple pour le profil P2-Matavai, scénario « façade très exposée ».....	95
Figure 88. Comparaison entre des tests de franchissements effectués sur un canal à houle (figure extraite de EurOtop, 2007) avec une modélisation réalisée avec SURF-WB.....	96
Figure 89. Résultat et analyse des simulations au niveau de l'ouvrage pour le site P2-Matavai, scénario « façade très exposée ».	97

Figure 90. Résultat et analyse des simulations au niveau de l'ouvrage pour le site P2-Matavai, scénario « façade exposée ».	99
Figure 91. Résultat et analyse des simulations au niveau de l'ouvrage pour le site P2-Matavai, scénario « façade peu exposée ».	100
Figure 92. Résultat et analyse des simulations au niveau de l'ouvrage pour le site P4-Maharepa, scénario « façade très exposée ».	101
Figure 93. Résultat et analyse des simulations au niveau de l'ouvrage pour le site P4-Maharepa, scénario « façade exposée ».	103
Figure 94. Résultat et analyse des simulations au niveau de l'ouvrage pour le site P4-Maharepa, scénario « façade peu exposée ».	104
Figure 95. Synthèse des paramètres disponibles pour chaque cyclone et source de donnée utilisée	111
Figure 96. Trajectoire du cyclone Martin	114
Figure 97. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Martin	114
Figure 98. Exemple de champ de vagues du cyclone Martin	114
Figure 99. Trajectoire du cyclone Reva	115
Figure 100. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Reva	115
Figure 101. Exemple de champ de vagues du cyclone Reva	115
Figure 102. Trajectoire du cyclone Veena	116
Figure 103. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Veena	116
Figure 104. Exemple de champ de vagues du cyclone Veena	116
Figure 105. Trajectoire du cyclone Wasa	117
Figure 106. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Wasa	117
Figure 107. Exemple de champ de vagues du cyclone Wasa	117
Figure 108. Trajectoire du cyclone Oli	118
Figure 109. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Oli	118
Figure 110. Exemple de champ de vagues du cyclone Oli	118
Figure 111. Trajectoire du cyclone Tahmar	119
Figure 112. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Tahmar	119
Figure 113. Exemple de champ de vagues du cyclone Tahmar	119
Figure 114. Trajectoire du cyclone Osea	120
Figure 115. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Osea	120

Figure 116. Exemple de champ de vagues du cyclone Osea	120
--	-----

1. Introduction

1.1. CYCLONES ET HOULES EN POLYNESIE FRANÇAISE

1.1.1. Houles saisonnières

L'exposition des côtes Polynésiennes aux houles saisonnières est très variable spatialement. A l'échelle de la Polynésie, les cinq archipels ne sont pas affectés de la même manière par les différents types de houle qui sont modifiés au cours de leur propagation dans le Pacifique sud. A l'intérieur même d'un archipel, certaines îles sont protégées par d'autres qui font office d'écran face à la houle (Andréfouët et al., 2012). Enfin, l'exposition d'un site donné dépend de l'orientation de la façade sur laquelle il se trouve et de la configuration locale.

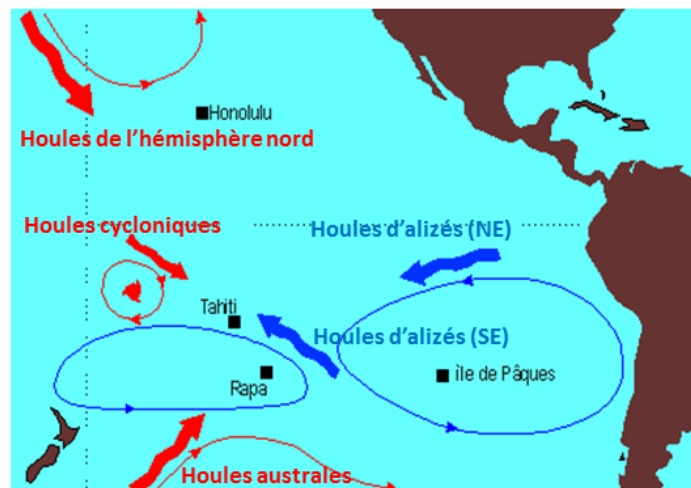


Figure 1. Origine des houles qui affectent la Polynésie (extrait de Météo-Fenua, <http://chez.mana.pf/~pascalrene/houlpoly.html>)

On observe 3 systèmes principaux dans le Pacifique sud et en Polynésie française (<http://chez.mana.pf/~pascalrene/houlpoly.html>):

- **Les houles d'alizés** affectent l'ensemble du territoire toute l'année : on distingue les houles de nord-est à est, générées au nord-ouest des hautes pressions des îles de Pâques, et les houles de sud-est qui sont engendrées sur la face nord-est des hautes pressions au sud du territoire. Il s'agit de houles relativement courtes dont la période est comprise entre 6s et 9s avec des hauteurs excédant rarement les 2m mais pouvant atteindre plus de 4m pendant les événements exceptionnels.
- **Les houles en provenance de l'hémisphère nord** s'observent principalement entre novembre et mars-avril et sont générées par les dépressions hivernales qui se développent au nord-ouest du pacifique. Ces houles, dont la hauteur est

de l'ordre de 1m à 2m, sont généralement plus longues et peuvent atteindre des périodes de 20s.

- **Les houles australes** s'observent toute l'année mais leur fréquence et leur intensité sont plus marquées de juin à septembre. Elles sont générées par les dépressions de l'hémisphère sud. Ce sont également des houles longues dont la période se situe généralement entre 12s et 16s. Pendant les événements les plus marquants, on a pu observer des hauteurs de 5m avec des périodes d'environ 15s.

1.1.2. Cyclones et dépressions tropicales

Les dépressions tropicales fortes et les cyclones sont relativement peu fréquents en Polynésie française qui se situe à l'extrême est de la zone cyclonique du Pacifique sud (cf. Figure 2). Un inventaire récent des événements cycloniques ayant touché la Polynésie française est proposé par Larrue et al. (2010). Seulement 45 cyclones majeurs ont été ainsi répertoriés sur tout le territoire depuis une quarantaine d'années. Larrue et al. (2010) distinguent deux périodes cycloniques dans l'année : pendant la première, de novembre à janvier, la majorité des cyclones se maintiennent à l'ouest de l'archipel de la Société et des Australes, alors que la seconde, de février à avril, se caractérise par un éclatement de la cyclogenèse et des trajectoires d'ouest en est et peut menacer les Tuamotu. En période El Nino, l'activité cyclonique s'étend davantage vers le centre et l'est du Pacifique, augmentant ainsi le nombre de cyclones susceptibles de toucher la Polynésie, comme pendant les saisons cycloniques de 1982-1983 et 1997-1998 (Laurent et al., 2004). En plus des fortes houles, les cyclones peuvent engendrer des surcotes dues à l'action du vent et de la dépression atmosphérique. S'il reste relativement peu fréquent, le risque cyclonique ne doit donc pas être négligé.

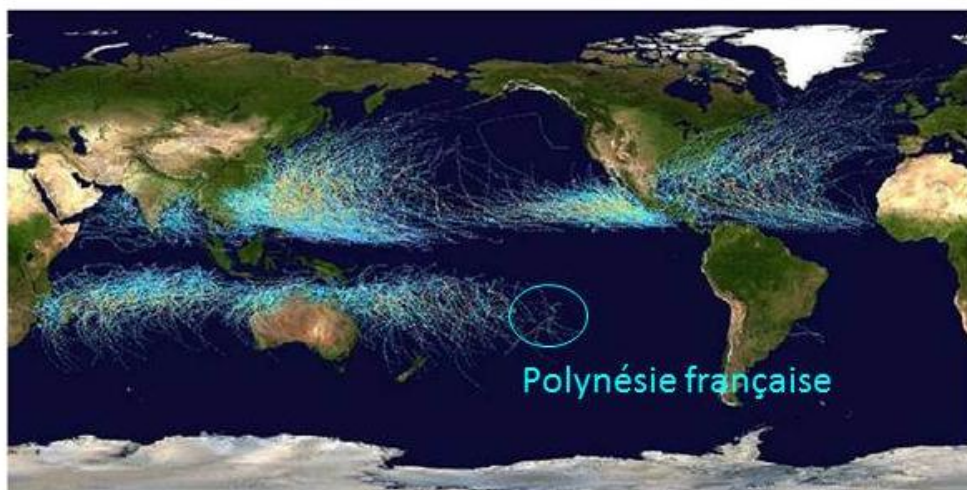


Figure 2. Carte des trajectoires des cyclones enregistrés entre 1985 et 2005 (NASA 2006)

1.2. CARACTERISATION DE LA SUBMERSION MARINE LIEE AUX HOULES ET AUX SURCOTES

1.2.1. Les composantes de la submersion

Les perturbations associées aux cyclones et aux fortes houles entraînent des surélévations temporaires du niveau de la mer. On distingue en particulier :

- le « wave setup » (ou « setup »), c'est-à-dire la surcote générée par le déferlement des vagues à l'approche de la côte.
- la « surcote atmosphérique » (en cas de cyclone uniquement), c'est-à-dire l'élévation du niveau d'eau générée à la fois par (1) la chute de pression atmosphérique (phénomène de baromètre inverse) et (2) les courants induits par les vents qui poussent vers la côte les masses d'eau qui s'accumulent dans les zones de hauts fonds et dans les baies. Le phénomène de baromètre inverse reste très localisé au niveau de la dépression et correspond empiriquement à +1cm d'élévation pour 1hPa de dépression. En revanche, la composante de la surcote due au vent dépend fortement de la configuration locale du littoral. Plus la pente du plateau continental est douce, plus l'accumulation est importante au niveau de la côte et l'élévation du plan d'eau importante.

Le niveau moyen atteint par l'eau est donc la somme de ces contributions auxquelles il faut ajouter la marée astronomique. Pour obtenir le niveau instantané de la mer sur le rivage, il faut en outre tenir compte du jet de rive, c'est-à-dire le flux et le reflux des vagues à la côte. La Figure 3 illustre de manière schématique l'ensemble des processus qui contribuent à l'élévation du niveau de la mer.

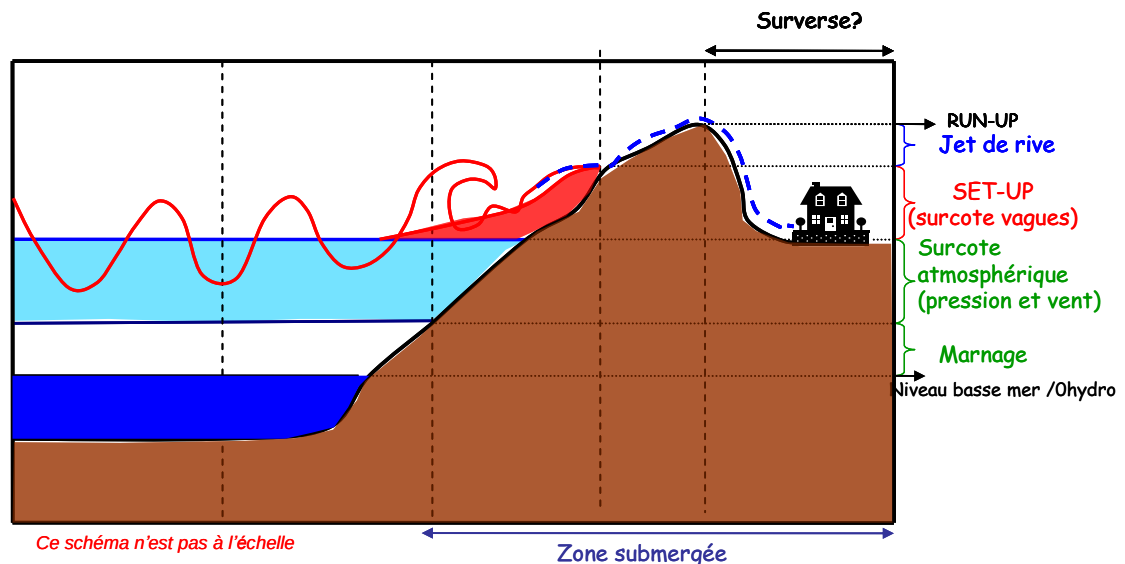


Figure 3. Schéma illustrant les principaux paramètres entrant en compte dans l'évaluation des niveaux marins extrêmes

1.2.1. Prise en compte actuelle dans le projet de PPRL actuel

La cartographie de l'aléa submersion marine établie dans le cadre du programme ARAI (Aléas, Risques naturels, Aménagement et Information) est basée sur une évaluation déterministe de l'aléa, à partir d'un scénario cyclonique de référence pour chaque archipel. Ceux-ci ont été établis à partir d'une étude bibliographique qui a recensé, pour chaque archipel, les cyclones historiques majeurs ainsi que les effets induits (Des Garets, 2005). Les valeurs paroxysmales (observées sur près d'un siècle) de vagues et de niveaux d'eau ont été retenues pour construire les scénarios:

- Pour les houles, les hauteurs de références retenues sont de 7m pour l'archipel des Marquises, 11m pour les Gambiers et les Australes, et 12m pour les Tuamotu et les îles de la Société. En l'absence de données précises, la période associée a été fixée à 13s. La direction de provenance étant très variable selon la trajectoire prise par les cyclones, celle-ci a été considérée comme frontale pour tous les sites. A partir de ces valeurs, des simulations numériques ont été effectuées avec le modèle SWAN (Booij et al., 2004) sur plusieurs configurations types de côte (avec ou sans récif barrière, au droit d'une passe, etc). Des valeurs de setup ont ainsi été définies par archipel et par typologie de côte.
- La surcote atmosphérique de référence est de 1m partout.

Le zonage de l'aléa repose, au niveau du rivage, sur la prise en compte d'une zone d'impact direct de la houle et, en arrière, sur la définition d'une cote de référence (cf. Figure 4). Pour un site donné, le calcul de la cote de référence prend en compte (1) le niveau de la pleine mer de vive eau (2) la surcote atmosphérique (3) le setup et (4) une valeur de l'élévation du niveau marin de 30cm (GIEC 2007 à échéance 2050). La zone de déferlement des vagues, déterminant la zone rouge, s'étend de 10 à 50 m d'extension selon les cas (10m au droit des lagons, 20m au droit d'une passe ou en l'absence de lagon, 50 m côté océan des motus (atolls et motus des îles hautes). Les niveaux d'aléa suivants (moyen et faible) sont définis en fonction des hauteurs de submersion uniquement, calculées en croisant la cote de référence d'une part, et l'altitude du sol d'autre part (par analogie avec ce qui est habituellement admis en matière de zonage de l'aléa inondation).

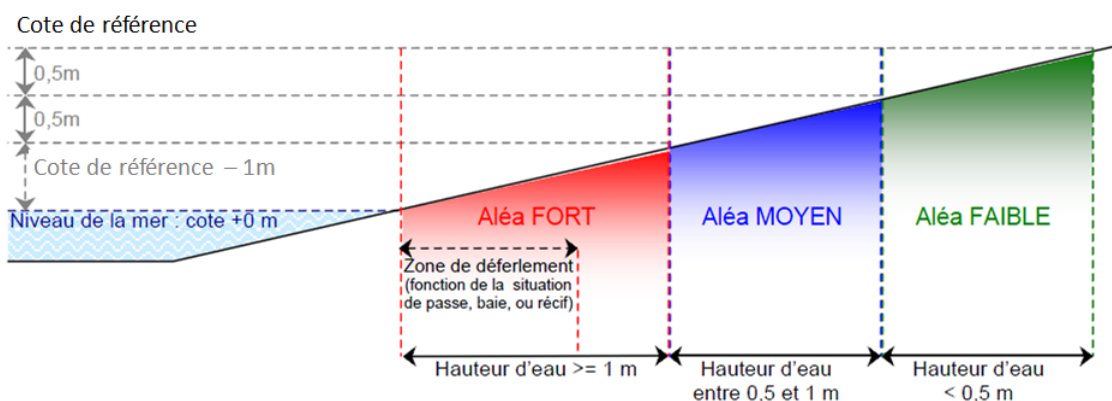


Figure 4. Principe de la cartographie des zones d'aléa submersion marine.

1.3. OBJECTIFS DE LA PRESENTE ETUDE

Le zonage actuel des projets de PPR littoraux est perçu comme une forte contrainte, en particulier dans les communes fortement exposées à plusieurs types d'aléa. Afin d'appuyer les réflexions engagées par le SAU sur la problématique littorale, le BRGM a proposé une série d'actions visant à disposer de nouveaux moyens pour optimiser l'évaluation et la gestion du risque de submersion marine :

- Le premier objectif du projet ARAI 3 est de réévaluer les scénarios de référence présentés ci-dessus en adoptant une approche de type probabiliste et en prenant en compte à la fois les événements cycloniques et les houles saisonnières afin de proposer une estimation du niveau d'aléa plus argumentée. Ce premier volet est mené pour les îles de Tahiti et Moorea (archipel de la Société) ainsi que sur Tubuai (archipel des Australes).
- Suite à cela, de nouveaux outils sont éprouvés sur des sites tests pour modéliser la submersion marine de manière fine avec des modèles vague-à-vague (permettant de prendre en compte les processus de déferlement, de jet de rive et de submersion).
- Enfin, une réflexion sur les aménagements et les mesures de protection des parcelles en bordure de littoral est proposée. Dans un premier temps, une synthèse et une analyse de l'efficacité et des impacts des aménagements existant en Polynésie et dans d'autres pays est effectuée. Cette partie fait l'objet d'un rapport indépendant (Garcin, 2012). Puis, des tests sur l'efficacité de certains aménagements contre la submersion marine sont réalisés avec des modélisations sur des profils types pour des scénarios de référence.

Dans ce rapport, le paragraphe 2 décrit la méthode générale ainsi que les données utilisées. Le paragraphe 2.4.4 présente la mise en place et la validation des modèles numériques de vagues et de niveaux d'eau. L'analyse statistique et la proposition de nouveaux scénarios de référence sont détaillées dans le paragraphe 1. La modélisation de la submersion marine sur les sites tests est présentée dans le paragraphe 5. Enfin, les tests sur l'efficacité des ouvrages de protection sont décrits dans le paragraphe 1.

2. Méthode, données et outils employés

2.1. DEMARCHE GENERALE

L'obstacle principal à une caractérisation fine de l'aléa submersion marine en Polynésie Française est le manque de données historiques et de réseau de mesure pérenne. Si le réseau marégraphique couvre aujourd'hui l'ensemble des archipels, aucun houlographe n'est à ce jour en fonctionnement. De plus, l'étendue océanique importante séparant les différents archipels et la faible densité de population sur certaines îles complexifient le recensement et l'étude des événements historiques. Or, la définition d'un aléa probabiliste nécessite l'utilisation de séries temporelles de paramètres hydrodynamiques long-terme (sur les vagues et les niveaux d'eau). Ces données peuvent être reproduites à l'aide de modèles numériques mais ceux-ci nécessitent également l'utilisation de mesures in-situ pour être calibrés.

Les houles saisonnières sont relativement bien représentées par les modèles numériques globaux. Ainsi, pour les événements saisonniers, ces données peuvent être directement utilisées pour faire une analyse statistique sur les vagues.

En ce qui concerne les événements cycloniques, aucune série temporelle longue sur les paramètres de vagues et de surcote n'est disponible. En effet, les modèles globaux n'ont pas une résolution (spatiale et temporelle) suffisante pour reproduire correctement les phénomènes cycloniques. La première étape est donc de reconstituer un catalogue de données hydrodynamiques (de vagues et de niveaux d'eau) exploitables en zone côtière. La procédure comprend :

- La constitution d'un catalogue de cyclones représentatifs du secteur étudié à partir de cyclones historiques,
- La construction des champs de vent et de pression pour chaque cyclone avec des modèles paramétriques comme celui de Holland (1980),
- La modélisation des vagues et des niveaux d'eau (marée et surcote atmosphérique) jusqu'en zone côtière à l'aide de modèles hydrodynamiques,
- L'extraction et l'analyse statistique des résultats en zone côtière (avant le récif) autour des îles de Tahiti, Moorea et Tubuai.

Le nombre limité de données disponibles pour effectuer l'analyse statistique engendre des incertitudes importantes et des intervalles de confiance larges. Les périodes de retour estimées doivent être considérées comme des ordres de grandeur et non des valeurs précises.

Quatre sites tests ont été sélectionnés en concertation avec le Service de l'Urbanisme pour effectuer une modélisation vague-à-vague de la submersion marine. Il s'agit de Maharepa (sur l'île de Moorea), Matavai et Teva I Uta (sur Tahiti) ainsi que la côte nord de Tubuai (cf. Figure 5). Des modélisations de la submersion sont effectuées pour un scénario de type centennal en prenant en compte les projections actualisées d'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2100. Pour le site de Tubuai, les simulations

de la submersion n'ont finalement pas été réalisées en raison d'erreurs découvertes dans le modèle numérique de terrain fourni.

Enfin, les tests sur l'efficacité des ouvrages de protection contre la submersion marine sont réalisés sur 2 profils types (avec et sans récif) avec 3 scénarios différents correspondants aux scénarios centennaux calculés pour différentes expositions autour des îles de Tahiti et Moorea.

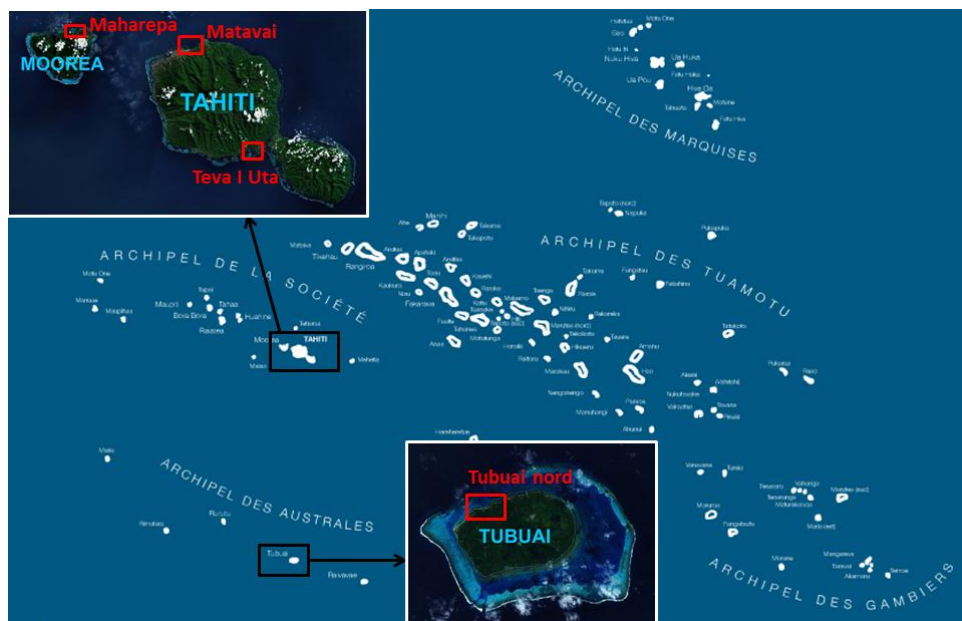


Figure 5. Localisation des sites d'étude

2.2. DONNEES

2.2.1. Données cycloniques

Les bases de données

Trois sources de données ont été utilisées pour la partie cyclonique : les « best tracks » du **JTWC** (Joint Typhoon Warning Center) et d'**IBTRACKS** (International Best Track Database for Climate Stewardship), ainsi que la liste des cyclones majeurs qui ont touché la Polynésie Française depuis 1970 (fournie par **Météo-France** Polynésie). En effet, avant les années 70, les données historiques sur les trajectoires et l'intensité des cyclones sont peu fiables et non exhaustives.

JTWC est un centre de prévision des cyclones tropicaux géré conjointement par la US Navy et la US Air Force et est basé à Hawaï. Les best tracks fournies par le JTWC sont disponibles de 1945 à aujourd'hui dans les bassins « Pacific Nord Ouest » (WP), « Océan Indien Nord » (IO) et « Hémisphère sud » (SH) dont fait partie la Polynésie française. Pour chaque cyclone, plusieurs paramètres sont renseignés toutes les 6

heures dont : la position de l'œil, l'intensité du vent maximum (vent soutenu pendant une minute à 10 mètres d'élévation), la pression de surface minimale au centre du cyclone et le rayon de vent maximum. Pour les cyclones les plus anciens, la vitesse du vent n'est pas systématiquement renseignée dans la base. Aussi, celle-ci n'est exploitable qu'à partir de la saison 1977-1978.

IBTRACKS (Knapp, 2009) est un produit fourni par la NOAA qui a réalisé une compilation des best-tracks issus de différentes agences (JTWC, TCWC Wellington, TCWC Brisbane, RSMC Nadi, etc.). Il s'agit de la base de données historiques la plus complète qui contient, pour chaque cyclone, les paramètres de toutes les agences ayant effectué des observations.

Constitution du catalogue de cyclones

Un catalogue de cyclones entre les saisons 1977-1978 et 2009-2010 a été constitué. Il comprend les cyclones majeurs sur cette période ainsi que d'autres cyclones plus lointains. En effet, les houles cycloniques peuvent se propager sur de très grandes distances et affecter des îles loin de leur trajectoire.

Afin d'assurer une certaine homogénéité entre les cyclones, la base de données JTWC a été choisie comme référence pour constituer le catalogue. 64 cyclones ont été sélectionnés entre 1977 et 2010, principalement sur des critères géographiques (passage d'au moins 24 heures dans la zone 165°W-130°W / 30°S-5°S). Cependant, 7 cyclones majeurs listés par Météo-France ne sont pas présents dans la base JTWC : DIOLA (1980), TAHMAR (1981), FRAN (1981), NANO (1983), SABA (1983), URSULA (1998) et WES (1998). Pour ces cyclones, les données du centre de Wellington ont été récupérées dans la base d'IBTRACKS. Au total, le catalogue comprend 72 cyclones entre 1977 et 2010 (cf. Figure 6).

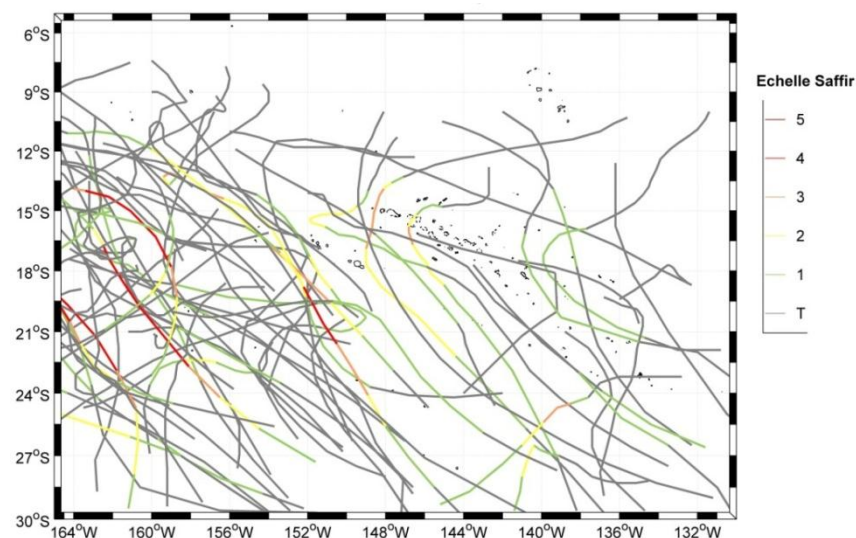


Figure 6. Trajectoires des 72 cyclones historiques pris en compte pour l'étude.

L'échantillon historique ainsi constitué est très limité et ne couvre que 33 ans de données. De plus les 72 cyclones historiques sont très éclatés sur le territoire et n'ont pas affecté les mêmes secteurs. Cet échantillon n'étant pas suffisant pour faire une analyse statistique sur les vagues et les surcotes en un point donné, des cyclones synthétiques ont été créés avec la méthode de ré-échantillonnage du bootstrap (Efron and Tibshirani 1993). Cette technique consiste à générer un jeu de données artificiel à partir d'un échantillon de données existant en effectuant des tirages aléatoires avec remise afin de générer des années fictives de données. Elle a été employée par exemple par Météo-France aux Antilles Françaises pour évaluer le risque lié aux surcotes cycloniques (Rapport Météo-France, 2002).

Afin d'optimiser les temps de calcul, les vagues et les niveaux d'eau des 72 cyclones historiques ont tout d'abord été modélisés. Puis, les cyclones ayant généré au moins 1 mètre de vague au niveau de Tahiti ou de Tubuai ont été sélectionnés (au total 41 cyclones). La technique du Bootstrap a été appliquée sur cet échantillon réduit afin de créer 3 périodes fictives de 33 ans. Pour chaque période, 41 cyclones ont été tirés aléatoirement avec remise parmi l'échantillon réduit. Afin de varier les trajectoires, et de prendre en compte l'incertitude liée à leur position exacte, des translations aléatoires (sur une gamme de +/- 0 à 1° sur les axes Nord-Sud et Est-Ouest) ont été effectuées à chaque tirage. Cette gamme de variation permet à la fois de conserver une répartition spatiale en cohérence avec les données historiques et d'envisager qu'un cyclone passant très proche à l'est d'une île aurait tout à fait pu passer à l'ouest. Le catalogue final exploité pour l'analyse statistique est donc constitué de 164 cyclones représentatifs d'une période de 132 ans (4x33ans).

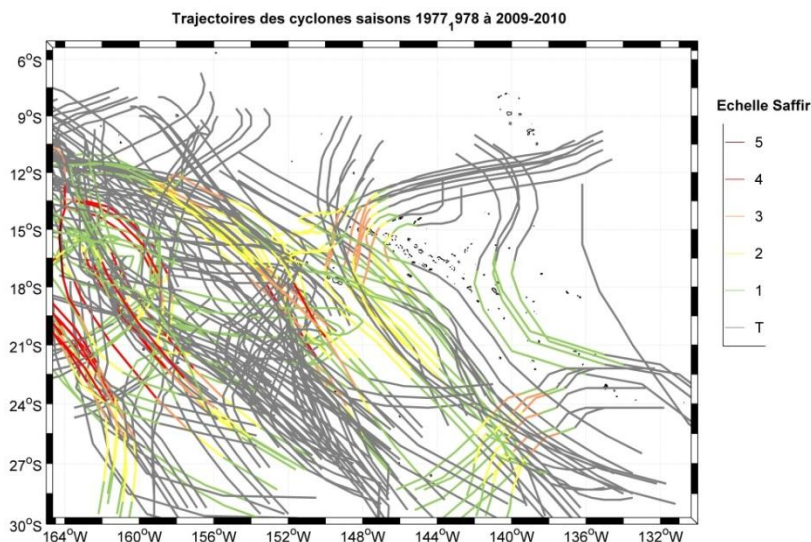


Figure 7. Trajectoires des 41 cyclones historiques et des 123 cyclones synthétiques constituant le catalogue final utilisé pour l'étude statistique.

L'avantage de cette technique est de pouvoir produire un échantillon synthétique rapidement sans passer par un modèle statistique complexe sur les différents paramètres des cyclones (comme proposé dans Hardy et al., 2004). Cependant,

l'échantillon produit contient beaucoup de limitations. L'hypothèse sous-jacente principale de cette technique est que la population des cyclones potentiels est bien représentée par le jeu de données historiques. Or, les 33 ans de données utilisés sont trop restreints pour que ce soit le cas. En outre, si aucun cyclone historique connu n'est passé à proximité des îles Polynésiennes avec une intensité de niveau supérieur ou égal à 4 (sur l'échelle de Saffir), cette hypothèse est tout à fait envisageable physiquement mais n'est pas représentée par l'échantillon historique. De plus, le fait de translater aléatoirement les trajectoires sans modifier leur forme et les caractéristiques du cyclone engendre un certain nombre d'évènements très similaires.

2.2.1. Données pour les houles saisonnières

Le choix des données utilisées pour réaliser une analyse d'extrêmes doit prendre en compte à la fois la durée de la période couverte et la capacité du modèle à représenter correctement des événements extrêmes. Si les ré-analyses globales comme ERA-40 (ECMWF) fournissent des données de vagues sur une quarantaine d'années, leurs résolutions spatiale et temporelle sont souvent insuffisantes pour reproduire correctement les extrêmes qui s'en trouvent sous-estimés. De plus, en Polynésie, la prise en compte des nombreuses îles qui jalonnent le parcours des houles est essentielle pour caractériser correctement les états de mer à un endroit donné. Or, les ré-analyses comme ERA-40 ne les prennent pas en compte.

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser les données de la simulation rétrospective IOWAGA (Magne et al., 2010). Ce modèle est basé sur une approche multi-échelles, combinant plusieurs modèles hauturiers relativement grossiers et une série de d'emprises côtières. En Polynésie française, 2 modèles emboîtés sont disponibles, la grille globale à une résolution de 0.5° et une grille de résolution 0.05° couvrant une partie des îles de la Société et des Tuamotu. Une description détaillée du modèle en Polynésie française est proposée par Andréfouët et al., (2012). Si les données disponibles ne couvrent que 10 années (ce qui est un peu juste pour une analyse d'extrêmes), ce modèle est aujourd'hui le mieux adapté pour reproduire les houles en Polynésie française et a été validé sur ce secteur à l'aide de données satellitales. Il conviendra cependant d'être prudent quant à l'interprétation des valeurs extrêmes de grandes périodes de retour, notamment centennale.

2.2.2. Données topo-bathymétriques et construction des MNT

Bathymétries

Pour la modélisation des vagues et des niveaux d'eau, plusieurs grilles bathymétriques ont été construites :

- ✓ Les **grilles océaniques** sur la Polynésie et sur l'archipel de la Société sont directement issues de la base ETOPO 1 (de résolution 1 minute d'arc) décrite dans Amante et al., (2009).

- ✓ Les **grilles côtières sur Tahiti et Moorea** (cf. Figure 8) et Tubuai (cf. Figure 9) ont été construites à partir des données bathymétriques SRTM_30_plus, de résolution 30 secondes, (Becker et al., 2009) pour les profondeurs supérieures à 1000m, ainsi que les données de sondes et les cartes bathymétriques du SHOM (géo-référencées et digitalisées) pour les profondeurs inférieures à 1000m.

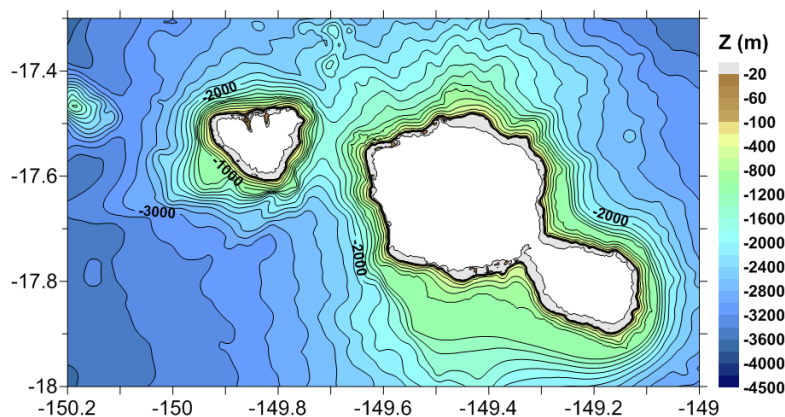


Figure 8. Bathymétrie côtière pour Tahiti et Moorea

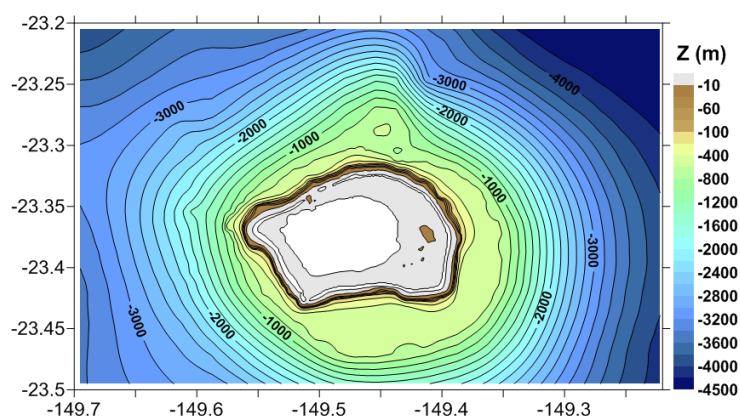


Figure 9. Bathymétrie côtière pour Tubuai

Modèles numériques de terrain (MNT)

Pour la modélisation de la submersion à terre, des MNT ont été élaborés pour chaque site test à une maille de 5m (cf. Figure 10 pour Maharepa, Figure 11 pour Matavai et Figure 12 pour Teva I Uta):

- ✓ Pour la partie marine, les cartes bathymétriques du SHOM ont été digitalisées et complétées avec des photographies satellites au niveau des récifs.
- ✓ Pour la partie terrestre, les MNT fournis par le service de l'urbanisme ont été directement utilisés. La résolution des MNT disponibles est de 5m pour les sites de Maharepa et Teva I Uta et de 2m pour le site de Matavai.

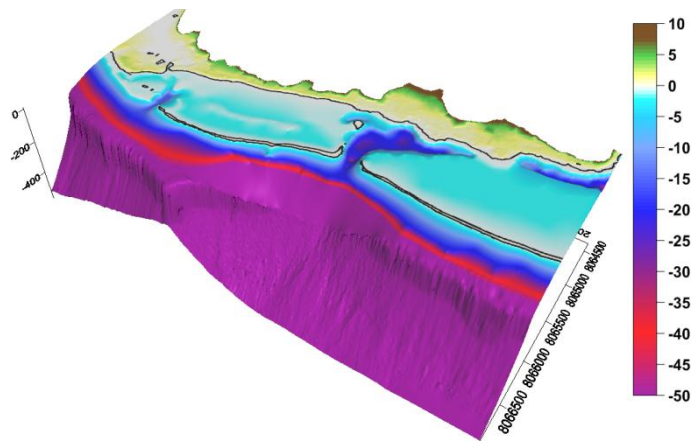


Figure 10. Topobathymétrie pour Maharepa exprimée en mètres par rapport au niveau moyen.

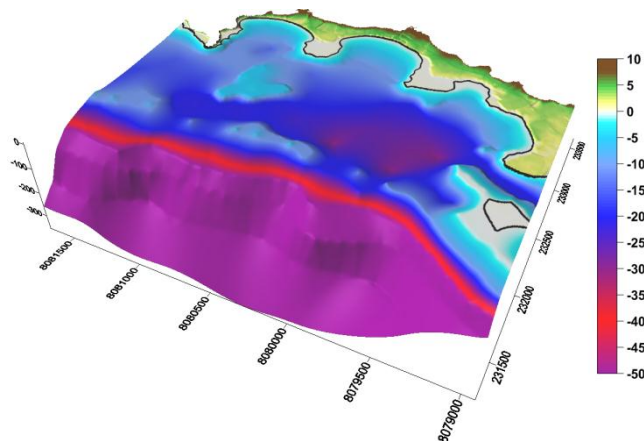


Figure 11. Topobathymétrie pour Matavai exprimée en mètres par rapport au niveau moyen.

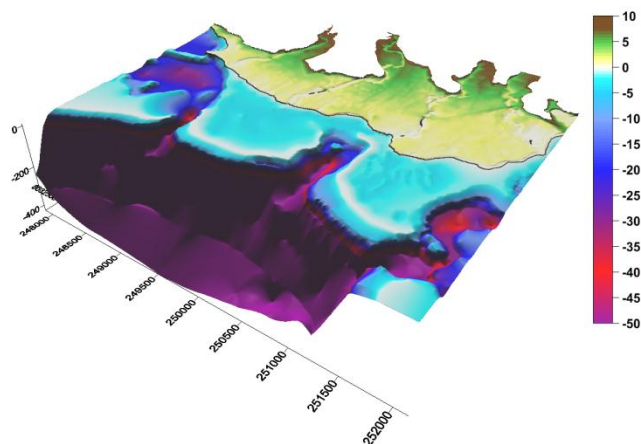


Figure 12. Topobathymétrie pour Teva I Uta exprimée en mètres par rapport au niveau moyen.

2.2.3. Données de validation

Les données altimétriques du CERSAT (vent et vagues)

La Polynésie Française ne dispose pas d'un réseau de mesure de vagues pérenne. Ainsi, les seules données de validation utilisables sont les fauchées satellites. Le CERSAT met à disposition sur un site ftp 19 années de données altimétriques de 1991 à 2010 ([//ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/swath/altimeters/waves](http://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/swath/altimeters/waves)). Les paramètres renseignés sont la hauteur significative des vagues (SWH) ainsi que l'intensité du vent à 10 mètres de hauteur. Ces données sont issues de la mise en commun, de la validation et de la correction des données de nombreux altimètres depuis le lancement de ERS1 en juillet 1991, puis des satellites TOPEX, ERS2, GEOSAT FollowOn, ENVISAT, Jason1 et Jason2 (Queffleulou et Croizé-Fillon, 2009).

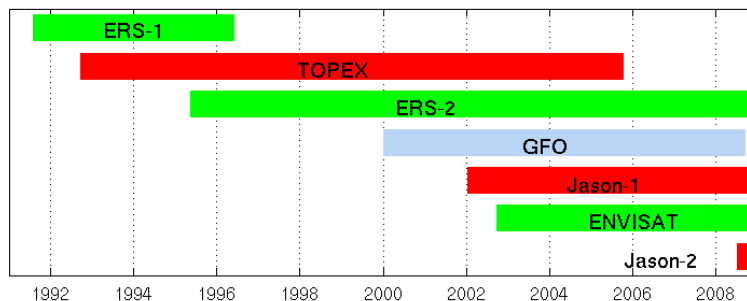


Figure 13. Les différents altimètres de 1991 à 2010 : ESA (vert), NASA-CNES (rouge), NASA-NAVY (bleu). Image extraite de Queffleulou et Croizé-Fillon (2009).

Les données marégraphiques (niveaux d'eau)

Pour la validation des niveaux d'eau, les mesures du marégraphe de Tubuai pendant le cyclone OLI ont été exploitées. Celui-ci, géré par l'UPF et le SHOM, est installé depuis 2008 dans la partie nord du lagon (-149.475°E / -23.341°N). Il est équipé d'un capteur radar et d'un capteur de pression. Les données du capteur radar ont été récupérées sur le site REFMAR mais les données du capteur de pression étaient indisponibles au moment de l'étude.



Figure 14. Position des marégraphes de Papeete et Tubuai.

2.3. MODELE DE VENT CYCLONIQUE PARAMETRIQUE

Plusieurs modèles de vent paramétriques sont couramment utilisés en ingénierie côtière. Dans cette étude, on utilise le modèle de Holland (1980) pour générer les champs de vent et de pression à partir des paramètres cycloniques (décrits au paragraphe 2.2.1).

Pour chaque cyclone, les paramètres sont interpolés toutes les demi-heures, puis les champs de vent sont calculés à chaque pas de temps sur une grille de 0,1° de résolution. La formule de Holland (1980) permet de calculer le profil de la vitesse radiale du vent de surface (V_r) ainsi que la pression de surface (P_r) selon la distance r à l'œil avec les équations (1) et (2). Le paramètre B représente la forme générale du profil. Il est calculé avec la relation entre V_m et P_c .

$$V_r = \sqrt{B \frac{(P_n - P_c)}{\rho_a} \times \left(\frac{R_m}{r}\right)^B \times \exp\left(-\left(\frac{R_m}{r}\right)^B\right) + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{rf}{2}} \Rightarrow B \approx \frac{V_m^2 \rho_a e}{(P_n - P_c)} \quad (1)$$

$$P(r) = (P_n - P_c) \times \exp\left(-\left(\frac{R_m}{r}\right)^B\right) + P_c \quad (2)$$

Où f est la force de Coriolis, ρ_a la densité de l'air ($\sim 1.15 \text{ kg.m}^{-3}$), V_m la vitesse maximale, R_m le rayon de vent maximum, P_c la pression au centre du cyclone et P_n la pression environnementale ($\sim 1010 \text{ hPa}$). La formule originale de Holland s'applique au vent de gradient, mais ici, on ajuste directement le profil sur les vents de surface moyennés sur 1 min. La base de données JTWC fournit les valeurs de V_m pour tous les cyclones et des valeurs de R_m et P_c pour les cyclones les plus récents. Quand les données ne sont pas disponibles dans la base, R_m est fixé à 30 km, B est fixé à 1,26 (Holland, 2008) et P_c est recalculé à partir de V_m et B . Pour ces cyclones, la représentation des champs de vent et de pression est donc beaucoup plus schématique et moins représentative de la réalité.

La direction du vent est estimée grâce aux formules de Bretschneider (1972) :

$$\beta = 10^\circ \times \left(1 + \frac{r}{R_m}\right) \quad \text{si} \quad r < R_m \quad (3)$$

$$\beta = 20^\circ + 25^\circ \times \left(\frac{r}{R_m} - 1\right) \quad \text{si} \quad R_m \leq r < 1,2 \times R_m \quad (4)$$

$$\beta = 25^\circ \quad \text{si} \quad 1,2 \times R_m \leq r \quad (5)$$

Une fois le profil ajusté, les vents sont moyennés sur 10 minutes et la vitesse de translation du cyclone est ajoutée vectoriellement au vent cyclonique.

Cette méthode permet de créer des champs de vent et de pression schématiques dont la pertinence dépend de l'exactitude et du nombre de paramètres renseignés dans la base. Pour les cyclones les plus anciens notamment, pour lesquels le rayon de vent maximum et la pression au centre ne sont pas disponibles, l'erreur sur la taille et la forme du cyclone est plus importante. Cependant, l'objectif ici n'est pas de reproduire le plus fidèlement possible chaque cyclone mais de créer une base représentative de l'activité cyclonique en Polynésie. La réalisation des champs de vent et de pression avec des modèles paramétriques est donc suffisante pour l'objectif poursuivi.

2.4. MODELES NUMERIQUES

2.4.1. Les modèles de vagues WW3 (hauturier) et SWAN (côtier)

Wavewatch 3

Wavewatch 3 est un modèle spectral de génération-propagation des vagues (Tolman, 2009) qui résout l'équation de conservation de la densité de l'action. Il a été développé par la NOAA et fait l'objet d'améliorations continues par le NCEP et récemment par le SHOM. La version utilisée dans cette étude est la 3.14 (Ardhuin et al., 2010) avec la paramétrisation par défaut. Les principaux avantages dans le cadre de cette étude sont :

- Une modélisation sur des domaines emboîtés facilitée par la méthode du two-way nesting qui permet aux grilles mère et fille de communiquer mutuellement.
- La possibilité de prendre en compte les petites îles dont la taille est inférieure à la résolution du modèle grâce à une grille d'obstacles générée automatiquement (Chawla and Tolman, 2007, 2008).

SWAN

Le modèle SWAN (Simulating WAVes Nearshore), développé à l'Université de Technologie de Delft (Pays-Bas), permet de calculer les paramètres décrivant la houle au niveau des zones côtières, des lacs et des estuaires. Une description détaillée du modèle est faite dans Booij et al. (2004). SWAN est basé sur l'équation spectrale de conservation de l'action de la houle qui est résolue suivant un schéma implicite en différences finies.

SWAN modélise les processus de **propagation** suivants :

- Propagation à travers un espace géographique ;
- Gonflement de la houle ;
- Réfraction due à des variations spatiales du fond ou des courants ;
- Diffraction ;
- Blocage ou réflexion par des courants de retour ;
- Transmission à travers des obstacles, blocage ou réflexion à cause de ces obstacles.

SWAN modélise également les processus de **génération et de dissipation** dus à la houle :

- ✓ Génération par le vent ;
- ✓ Interactions houle – houle (quadruplets et triplets) ;
- ✓ Dissipation par moutonnement ;
- ✓ Dissipation par déferlement dû aux variations de profondeur ou aux courants ;
- ✓ Dissipation par frottement au fond.

2.4.2. Le modèle hydrodynamique MARS-2DH

Le modèle numérique MARS-2DH (développé à IFREMER, Lazure et Dumas, 2007) a été utilisé pour évaluer l'hydrodynamique au niveau régional à partir des composantes harmoniques de marée (base de données FES2004 -LEGOS, Lyard, 2006) et de données météorologiques. Les processus représentés par le modèle sont uniquement liés aux ondes longues (marée et surcote atmosphérique), les ondes courtes (houle et clapot) ne sont pas représentées.

Le modèle est utilisé dans sa version 2DH. Il résout les équations de Saint-Venant qui régissent les écoulements à surface libre en deux dimensions sur le plan horizontal, après une intégration verticale des équations de Navier Stokes. MARS-2DH calcule donc l'intensité et la direction de courants moyennés sur la verticale, ainsi que les hauteurs d'eau. Ces grandeurs sont calculées en fonction des conditions aux limites imposées au bord du domaine de calcul (frontières) et des conditions de forçages météorologiques (vent et pression) appliquées sur l'ensemble du domaine de calcul.

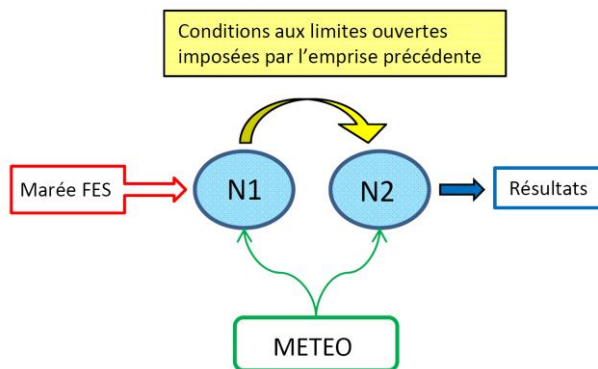


Figure 15 : Principe de la technique d'emboîtement de modèle pour MARS

Le modèle MARS-2DH a été utilisé dans cette étude comme un modèle de surcote/décote. Etant donné que les surcotes s'établissent sur des échelles spatiales de plusieurs centaines de kilomètres, elles ne peuvent être correctement représentées que par des modèles de grandes emprises qui tiennent compte des effets météorologiques et des circulations induites depuis le large jusqu'à la côte. Pour ce faire, le modèle est construit pour permettre un emboîtement de modèles gigognes, le modèle de plus grande emprise fournissant les conditions aux limites du modèle d'emprise immédiatement inférieure et ainsi de suite jusqu'au modèle de détail (Figure

15). La technique d'emboîtement permet au modèle de tenir compte des processus à l'échelle d'un bassin océanique comme à l'échelle locale.

La surcote (ou décote, s'il est négatif), est calculée comme l'écart entre le niveau total modélisé et le signal de marée du modèle.

2.4.3. Le modèle SWASH

SWASH (Simulating WAVes till SHore) est un code vague-à-vague libre d'accès développé par l'Université Technologique de Delft aux Pays-Bas (Zijlema et al. 2011). Il résout les équations de Saint Venant non linéaires (*nonlinear shallow water*) en incluant les termes non-hydrostatiques de la pression. Ce code permet de simuler la propagation des vagues en domaine côtier ainsi que la submersion marine à terre car il tient compte des phénomènes de : réfraction, diffraction, frottement au fond, gonflement, déferlement, réflexion, interaction (vague-vague, vague-courant), génération des courants induits par les vagues, le traitement de l'interface sèche-mouillée (en zone de swash) et la propagation des écoulements en présence d'ouvrages et du bâti. Ce code ne contient pas de module morphodynamique si bien qu'il ne peut pas modéliser l'érosion des plages ou des cordons littoraux observés lors des cyclones.

2.4.4. Le modèle Surf-WB

Le code SURF-WB est développé par Fabien Marche et Philippe Bonneton, des universités Montpellier II et Bordeaux I respectivement. C'est un modèle « vague à vague » permettant de simuler les écoulements littoraux dans le cas de fortes variations topographiques. Il est issu de la dérivation d'un modèle de Saint-Venant visqueux bidimensionnel à partir des équations de Navier-Stokes homogènes et incompressibles. Il inclut des termes de diffusion, de friction, de Coriolis ou encore de tension de surface de manière rigoureuse d'un point de vue mathématique, contrairement à la plupart des modèles numériques existants. Il converge par ailleurs vers l'état stationnaire au repos après le passage d'une onde et gère de manière satisfaisante les découverts/recouvrements. Une description plus détaillée de SURFWB peut être trouvée dans Marche et al. (2007).

SURFWB ne modélise pas encore le déferlement. Il est donc nécessaire de coupler SURFWB à un code qui tienne compte du déferlement (SWAN dans cette étude).

3. Mise en place et validation de la modélisation des houles et des niveaux d'eau pour les cyclones historiques

3.1. IMPLANTATION DES MODELES

3.1.1. Vagues

Afin de couvrir les zones de génération des vagues et de prendre en compte les cyclones lointains tout en obtenant des résultats à une résolution fine le long des côtes, un emboîtement sur 3 niveaux est mis en place, allant d'une emprise océanique à une emprise côtière (cf. Figure 16).

- ✓ Les deux premiers rangs « hauturiers » sont réalisés avec le code spectral de génération-propagation des vagues WAVEWATCH III (décrit au 2.4.1). Le premier rang R0 couvre une grande partie du Pacifique sud ($dx=dy=0.2^\circ$). Le rang R1 est recentré sur la Polynésie ($dx=dy=0.05^\circ$). Les deux grilles sont forcées avec les champs de vent moyenné sur 10 minutes uniquement. Afin de prendre en compte au mieux les îles dans les rangs de plus faible résolution, une grille d'obstacle est utilisée.
- ✓ Les deux rangs « côtiers » centrés sur Tahiti et Moorea d'une part ($dx=dy=100m$) et Tubuai d'autre part ($dx=dy=200m$) sont réalisés avec le code SWAN décrit au 2.4.1) forcé aux bords par les spectres directionnels issus du rang 1 de WW3 et par le vent cyclonique paramétrique.

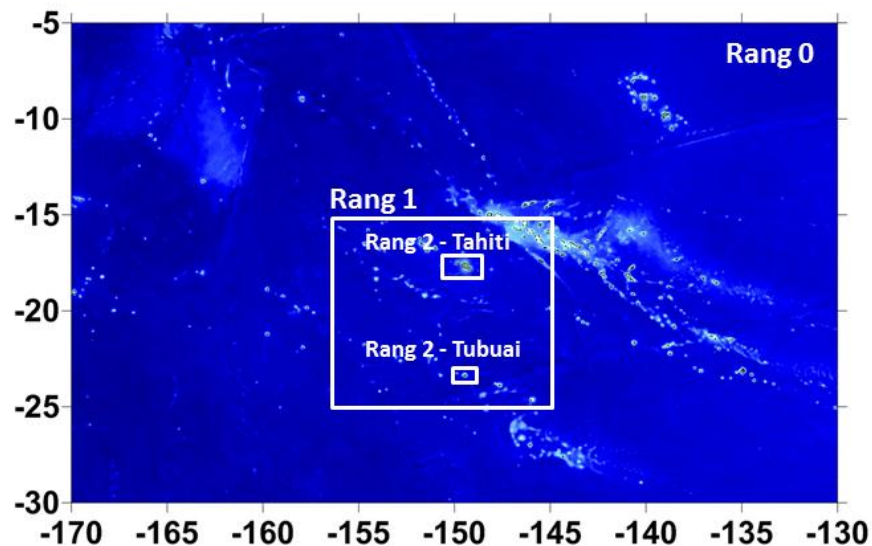


Figure 16. Emprises des rangs pour le modèle WW3 (0 et 1) et SWAN (2).

La résolution des deux grilles côtières ne permettant pas de reproduire correctement tous les phénomènes côtiers (dont le déferlement et le wave setup), le domaine de validité des modèles est situé avant le récif barrière. Les séries temporelles des paramètres de vagues (H_s , T_p , D_p) sont extraites pour tous les cyclones à un pas de temps horaire sur une série de points le long de l'isobathe à 200m avant le récif barrière. En effet, les fortes pentes présentes sur le tombant externe limitent la zone de validité du modèle à l'approche du récif.

3.1.2. Niveaux d'eau

Les simulations des niveaux d'eau et des courants ont été réalisées grâce à des grilles de calcul emboîtées, la grille de plus grande emprise géographique fournissant les conditions aux limites du modèle d'emprise immédiatement inférieure. Cette technique d'emboîtement permet de tenir compte des processus hydrodynamiques à l'échelle d'un bassin océanique comme à l'échelle locale. Deux grilles emboîtées ont été mises en place dans le cadre de cette étude. Les tailles des mailles des grilles sont respectivement de 2 km et 500 m pour les grilles N0 (la plus grossière) et N1 (la plus fine).

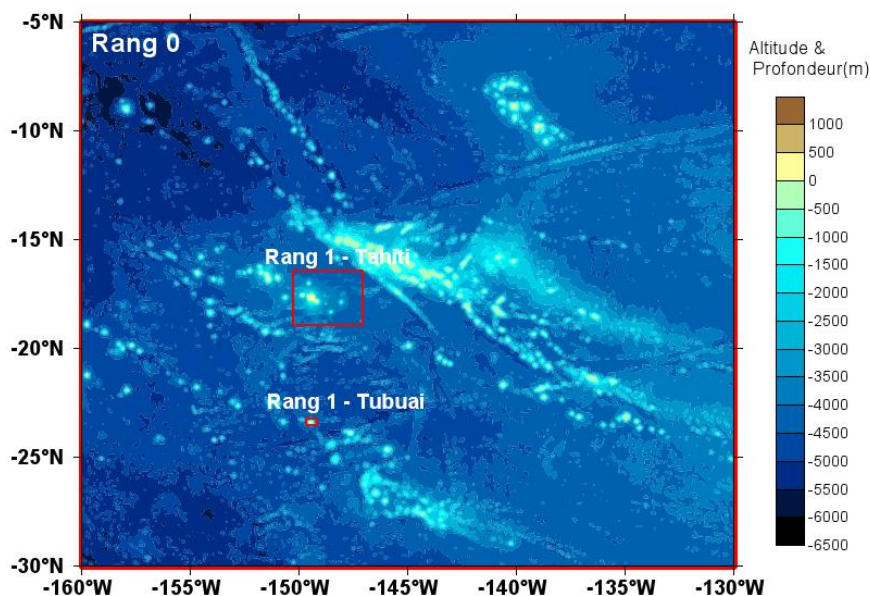


Figure 17 : Emboitements des grilles de calculs de MARS-2DH de l'emprise Rang0 et Rang1.

Le principal paramètre de calibration de MARS-2DH est le paramètre de frottement avec le fond de l'océan représenté par le coefficient de Strikler (K_s). Dans cette étude, il est égal à $35 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ uniforme sur tout le domaine (valeur généralement utilisée pour les modélisations en milieu marin). MARS-2DH utilise les composantes harmoniques de la base de données FES2004 (LEGOS, Lyard, 2006) pour générer et imposer les conditions de marée sur les limites de N0. La propagation des niveaux s'effectue dans le Rang0, puis dans les Rang1 de Tubuai et de Tahiti par le biais des calculs imbriqués. Les effets météorologiques induits par le vent et la pression sont pris en

compte en utilisant les champs de vent cyclonique paramétrique et de pression. La paramétrisation de la tension du vent de surface utilisée est celle de Moon et *al.* (2007). Les séries temporelles des niveaux d'eau sont extraites pour tous les cyclones à un pas de temps horaire sur une série de points le long de l'isobathe à 200m avant le récif barrière.

3.2. VALIDATION

La faible fréquence des cyclones tropicaux en Polynésie et la rareté des mesures de vagues et de niveaux d'eau (2.2.3) limitent le nombre de cas utilisables pour la validation. Les cyclones OLI (2010) et MARTIN (1997) ont été sélectionnés pour valider à la fois le modèle paramétrique des champs de vent et de pression cycloniques et la modélisation des vagues et des niveaux d'eau. Ces deux événements sont complémentaires car pour le cyclone MARTIN, on ne dispose que de la position et de la vitesse de vent maximum (V_m) alors que pour le cyclone OLI, on dispose également du rayon de vent maximum (R_m) et de la pression au centre (P_c) qui permet de calculer le paramètre de forme (B). Ainsi, pour le cyclone OLI, la taille et la forme du champ de vent paramétrique obtenu sont plus représentatifs de la réalité.

3.2.1. Vagues

La comparaison entre les hauteurs de vagues modélisées à un instant donné et les données issues des fauchées satellites sont exposées sur la Figure 18 (pour le cyclone Martin) et la Figure 19 (pour le cyclone Oli).

De manière générale, la comparaison entre les mesures et les simulations donne des résultats satisfaisants quand la fauchée satellite traverse le cœur du train de houle généré par le cyclone (cf. Figure 18, haut, et Figure 19, bas). La hauteur du pic de train de houle est globalement bien reproduite. Plus on s'éloigne de l'œil du cyclone, plus les hauteurs de vagues sont sous-estimées car celles-ci sont en partie générées par les vents synoptiques (de grande échelle) qui ne sont pas pris en compte dans le modèle paramétrique. Cependant, l'objectif ici est de représenter uniquement la partie cyclonique du train de houle.

Les coupes des champs de vague plus éloignées de l'œil du cyclone montrent tantôt une surestimation (Figure 19, haut) tantôt une sous-estimation (cf. Figure 18, bas). Ces différences sont liées (1) à la vision très schématique du cyclone qui est reconstitué avec un modèle symétrique alors qu'en réalité le profil de vent n'est pas réparti uniformément autour de l'œil et (2) à la détermination de certains paramètres avec des valeurs moyennes issues de l'analyse bibliographique faute de données dans les bases. Par exemple, le rayon de vent maximum est fixé à 30 km alors que celui-ci est très variable d'un cyclone à un autre et évolue au cours de la vie d'un cyclone. Ces simplifications/approximations peuvent avoir un effet important sur les caractéristiques des vagues simulées.

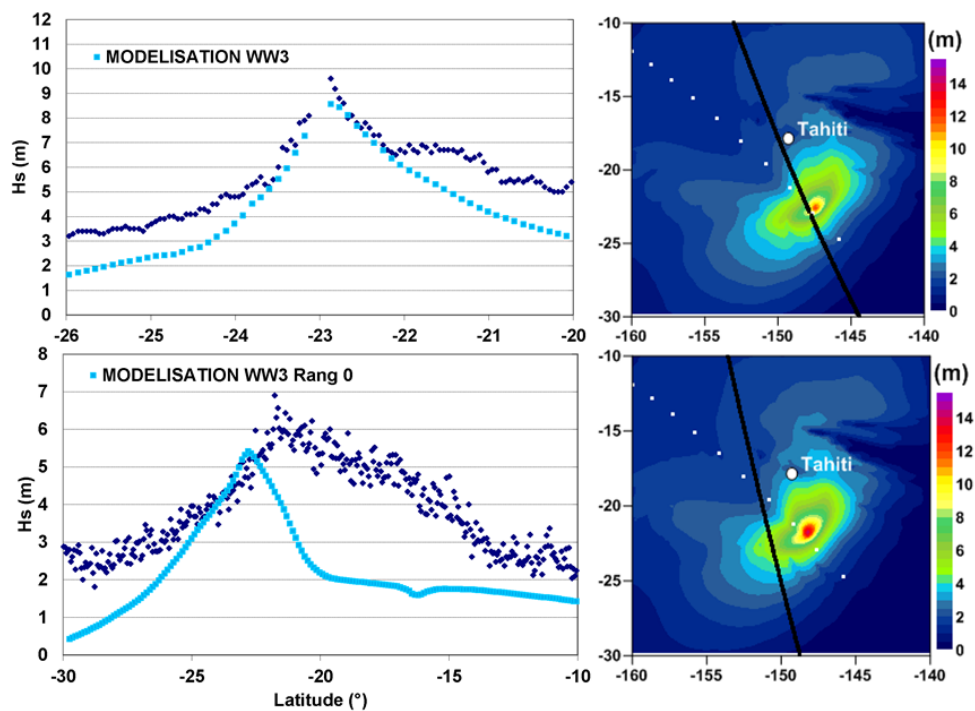


Figure 18. Comparaison de la hauteur des vagues modélisées avec les fauchées satellites du CERSAT pour le cyclone MARTIN le 04/11/1997 à 20h30 (haut) et à 8h45 (bas).

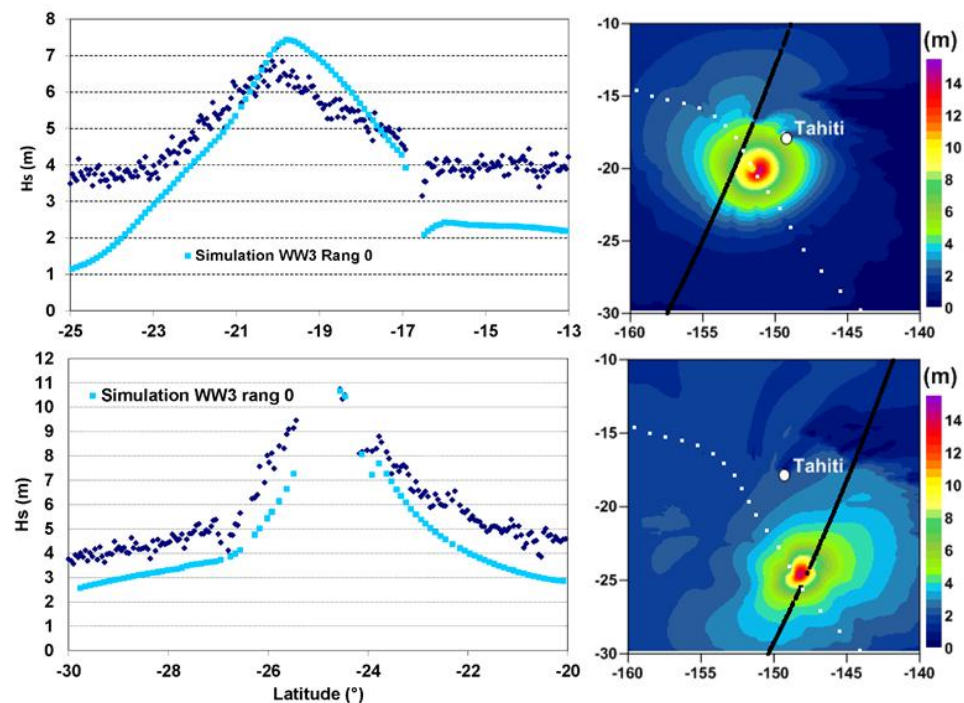


Figure 19. Comparaison de la hauteur des vagues modélisées avec les fauchées satellites du CERSAT pour le cyclone OLI le 04/02/2010 à 21h (bas) et le 05/02/2010 à 21h (haut)

En conclusion, même si les champs de vent utilisés sont très schématiques, les champs de houle modélisés sont en accord avec les observations. La validation est tout de même meilleure pour le cyclone Oli (pour lequel les paramètres sur la taille du cyclone sont renseignés). L'objectif de l'étude n'étant pas de reproduire parfaitement tous les cyclones, mais de créer un jeu de données représentatif de la zone étudiée, la validation est satisfaisante.

3.2.2. Niveaux d'eau

La validation de la surcote atmosphérique est plus complexe :

- ✓ D'une part, en Polynésie, les marégraphes sont souvent situés à l'intérieur du lagon ou des ports (comme à Papeete). Les hauteurs d'eau enregistrées prennent en compte divers phénomènes pendant les épisodes cycloniques : la surcote atmosphérique mais aussi le wave setup et le remplissage du lagon par les pluies.
- ✓ D'autre part, les îles hautes et les atolls de Polynésie française sont caractérisés par l'absence de plateau continental, ne permettant pas la génération de surcotes importantes de plusieurs mètres. Les surcotes cycloniques sont principalement dues au phénomène de baromètre inverse qui est directement lié à la pression locale à la surface de l'océan. L'exactitude de la représentation du champ de pression est donc primordiale pour obtenir la bonne surcote à un endroit donné. Or, les modèles paramétriques employés n'offrent qu'une vision schématique des champs de pression dont l'incertitude croît avec l'ancienneté des cyclones et le peu de paramètres disponibles pour les décrire.

Pour ces deux raisons, la validation des surcotes seules n'est pas développée mais le paragraphe suivant propose une décomposition des différentes composantes du niveau d'eau (marée, surcote due à la dépression, surcote due au vent, wave setup) dans le lagon de Tubuai pendant le cyclone Oli (2010) pour lequel (1) les paramètres cycloniques sont bien renseignés et (2) on dispose de données de validation des niveaux d'eau avec le marégraphe de Tubuai.

3.2.3. Décomposition de la surcote dans le lagon pour le cyclone Oli

La surcote générée dans le lagon de Tubuai pendant le cyclone Oli a été enregistrée par le marégraphe (décrit au paragraphe 2.2.3). Les données téléchargeables sur le site REFMAR sont celles du capteur radar qui n'a pas enregistré le pic du cyclone. En revanche, les données du capteur de pression (indisponibles au moment de l'étude) indiquent une surcote de l'ordre de 1.3m dans le lagon (cf. Figure 20, téléchargée sur le site REFMAR).

Afin d'estimer le wave setup engendré par les vagues dans le lagon pendant le cyclone, un emboîtement supplémentaire a été mis en place avec le code SWAN dans le lagon de Tubuai à une résolution plus fine (de l'ordre de 50m) et avec des coordonnées cartésiennes (métriques). Le calcul prend en compte les niveaux d'eau

calculés par le rang 2 du modèle MARS (intégrant le niveau de marée et la surcote atmosphérique).

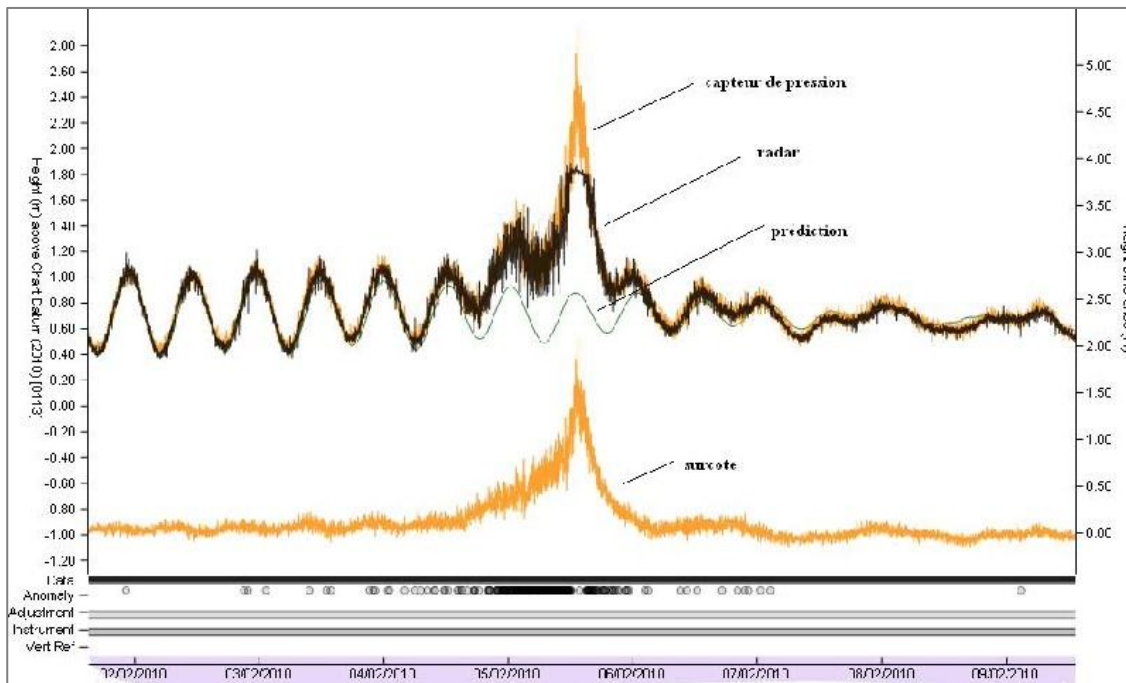


Figure 20. Niveaux d'eau calculés par les capteurs de pression (orange) et le radar (noir) au marégraphe de Tubuai (image extraite du site REFMAR).

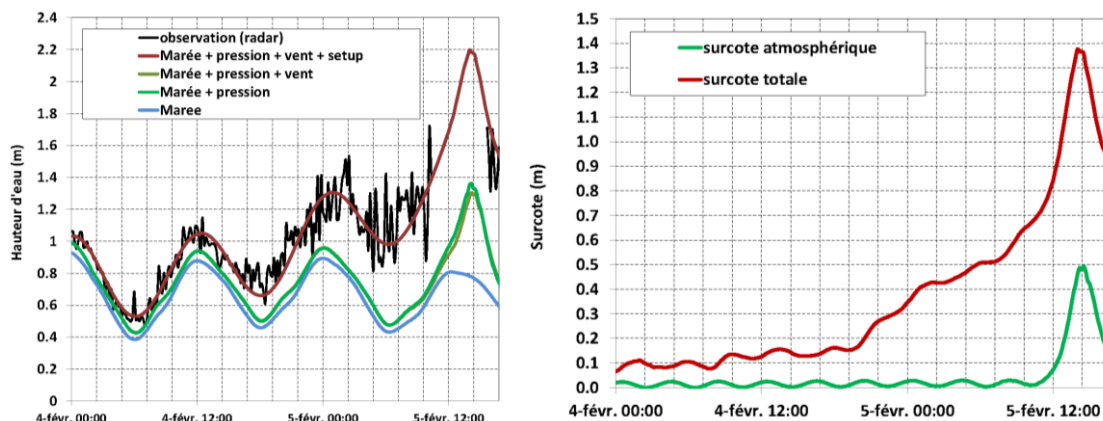


Figure 21. Gauche : Comparaison des résultats de simulation avec les enregistrements du capteur radar. Droite : comparaison de la surcote atmosphérique (vert) et de la surcote totale comprenant la surcote atmosphérique et le setup (rouge).

La Figure 21 présente la décomposition des différents facteurs d'élévation du niveau d'eau : la courbe bleue représente uniquement le niveau de marée simulé avec MARS, les courbes vertes prennent en compte également les composantes de la surcote atmosphérique et la courbe rouge prend en compte l'ensemble des phénomènes y

compris le setup lié aux vagues calculé avec SWAN. Le niveau d'eau total en rouge (marée + surcote atmosphérique + wave setup) correspond bien aux enregistrements du capteur radar.

On remarque que la contribution des vagues dans l'élévation du plan d'eau est majoritaire et précède celle du vent et de la pression. En effet, celles-ci se propagent en amont du cyclone. Au moment du pic, la composante de la surcote liée aux vagues (wave setup) est d'environ 90cm alors que l'apport de la surcote atmosphérique seule est de l'ordre de 50cm. La surcote totale calculée est d'environ 1.4m et correspond bien aux enregistrements du capteur de pression montrés sur la Figure 20. Notons également que la surcote atmosphérique calculée est due essentiellement au phénomène de baromètre inverse et que la composante liée au vent est négligeable.

3.2.4. Conclusions et leçons tirées de la validation

Les tests de validation décrits précédemment permettent de conclure que :

- (1) Pour les cyclones récents, dont les champs de vent et de pression ont été analysés en détail et pour lesquels on dispose des paramètres clefs (R_m et B), les modèles de vagues et de niveaux d'eau sont correctement validés. Il s'agit principalement des cyclones postérieurs aux années 2000 (cf. exemple du cyclone OLI ci-dessus).
- (2) Pour les cyclones plus anciens, pour lesquels on ne dispose que du paramètre V_m , les champs de vent et de pression paramétriques reconstitués comportent de fortes incertitudes. Les simulations de houles et de niveaux d'eau effectuées doivent être considérées comme des scénarios possibles (ou comme des cyclones se rapprochant de cyclones historiques) plutôt que comme des représentations fidèles de la réalité.
- (3) Le set-up lié au déferlement des vagues peut constituer une partie très importante de la surcote observée dans le lagon.
- (4) En ce qui concerne la surcote atmosphérique, les tests réalisés avec MARS-2DH sur le cyclone OLI permettent de conclure que :
 - ✓ A l'extérieur du lagon, les grandes profondeurs caractéristiques des tombants des récifs entourant les îles Polynésiennes font que l'on n'observe pas d'interactions surcote-marée ni d'amplification de la surcote liée au vent. La surcote atmosphérique peut-être directement approchée à partir du champ de pression. Ce constat a été vérifié sur l'ensemble des 72 cyclones historiques constituant la base de données.
 - ✓ A l'intérieur du lagon, pour le type de site étudié, avec un lagon relativement étroit de l'ordre du kilomètre, l'influence du vent est très faible.

Suite aux modélisations réalisées sur les cyclones historiques et aux tests de validation, il a été décidé de ne pas utiliser le modèle MARS-2DH pour les cyclones

synthétiques et de déduire directement la surcote atmosphérique à partir du champ de pression (l'analyse statistique étant effectuée sur des points à l'extérieur du lagon).

3.3. RESULTATS DES SIMULATIONS DES CYCLONES HISTORIQUES

La Figure 23 et la Figure 24 présentent la carte des hauteurs significatives de vagues maximales et la carte des surcotes atmosphériques maximales calculées pour tous les cyclones historiques retenus pour l'étude au premier rang de simulation. On remarque que les vagues se propagent au-delà de la trajectoire cyclonique alors que la surcote atmosphérique reste relativement localisée et affecte moins de secteurs pour un cyclone donné. Pour l'archipel de la Société les résultats de modélisation sont détaillés pour les cyclones les plus impactant dans l'Annexe 2.

Si l'on compare les hauteurs de vague et de surcote calculées pour les cyclones historiques (postérieurs à 1977) avec les scénarios de référence retenus pour les projets de PPRL de 2006 (Figure 22. Scénarios de référence pour la houle cyclonique (hauteur significative et période) retenue dans les projets de PPRL réalisés en 2006. Valeurs extraites du rapport Des Garets (2005).Figure 22), on remarque que :

- ✓ Pour les surcotes atmosphériques : Des valeurs de plus de 1m ont été calculées pour les cyclones historiques les plus intenses à l'extrême ouest de la grille de calcul. Au niveau des archipels Polynésiens, les surcotes maximales modélisées sont plus faibles que la valeur de référence de 2006 : elles sont de l'ordre de 70-80cm pour la Société (Martin, Oli) et les Australes (Oli), 60cm pour les Tuamotu (Orama, Veena), 40cm pour les Gambiers, et presque nulle pour les Marquises.
- ✓ Pour les houles : La hauteur significative maximale simulée est de 20m en pleine mer dans la partie ouest du bassin. Pour les archipels Polynésiens, les hauteurs significatives maximales modélisées sont de l'ordre de 15-16m en pleine mer pour la Société (Martin) et les Australes (Oli), et 12m pour les Tuamotu (Veena, Orama) et les Gambiers. Enfin, aux Marquises, les houles modélisées n'excèdent pas 3m.

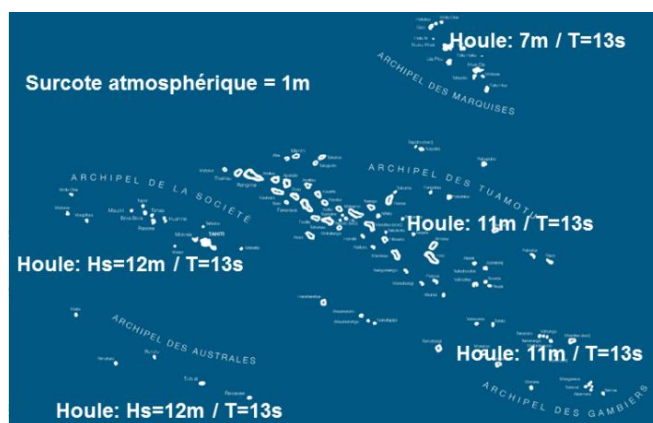


Figure 22. Scénarios de référence pour la houle cyclonique (hauteur significative et période) retenue dans les projets de PPRL réalisés en 2006. Valeurs extraites du rapport Des Garets (2005).

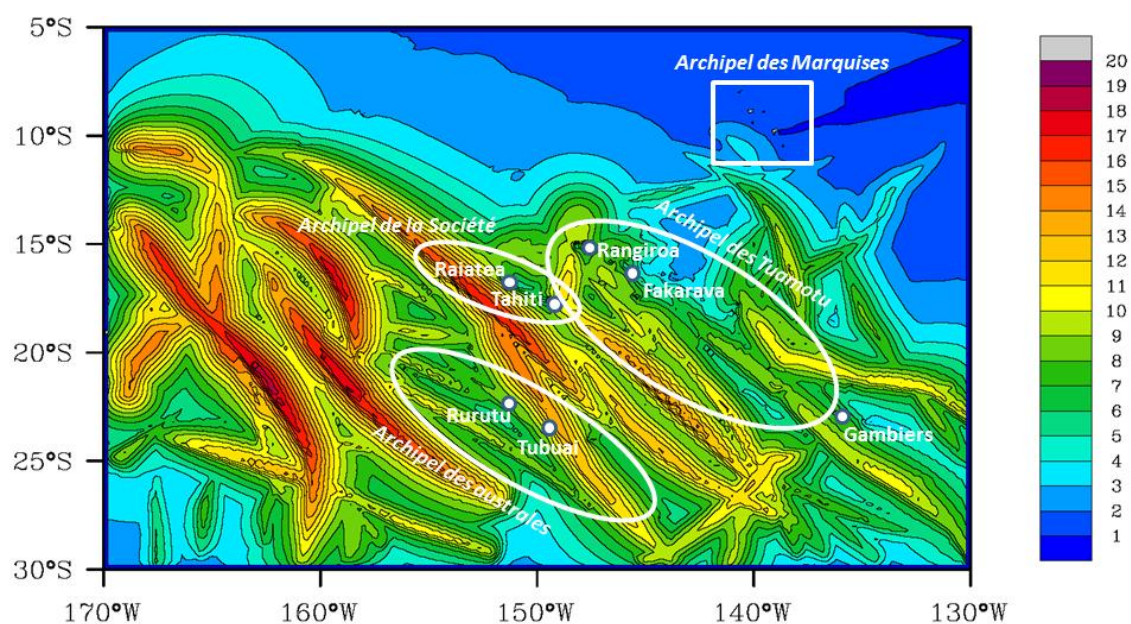


Figure 23. Carte des hauteurs significatives maximales exprimées en mètre calculées au rang 0 (Polynésie Française) pour les cyclones historiques.

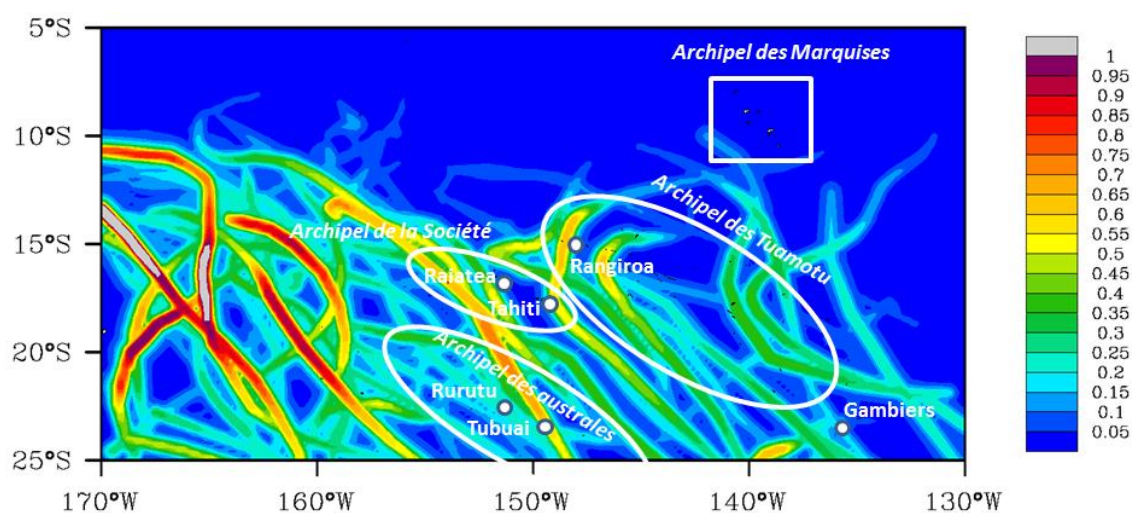


Figure 24. Carte des surcotes atmosphériques maximales (correspondant au baromètre inverse) exprimées en mètre calculées au rang 0 pour les cyclones historiques.

4. Etude statistique et proposition de nouvelles valeurs de référence

Ce paragraphe présente les résultats de l'étude statistique sur les vagues et les niveaux d'eau des événements saisonniers d'une part (paragraphe 4.1), et cycloniques d'autre part (paragraphe 4.2). Les différents points d'analyse utilisés pour extraire les données sont tous situés **avant le récif barrière**. Les résultats ne prennent donc pas en compte les phénomènes locaux qui participent à l'élévation du plan d'eau à l'intérieur du lagon (set-up, ensachage, friction du vent, etc.). Ceux-ci sont considérés lors de la propagation des scénarios choisis sur les 4 sites pilotes par une modélisation vague-à-vague (paragraphe 5).

4.1. EVENEMENTS SAISONNIERS

Pour les événements saisonniers, seules les vagues sont étudiées. On considère que, pendant ces forts épisodes de houle, la surcote atmosphérique est négligeable. L'analyse est d'abord menée ponctuellement sur 4 points hauturiers localisés au large des sites pilotes (4.1.1 à 4.1.4). Puis, une synthèse régionale est proposée pour le secteur de Tahiti et Moorea d'une part, et Tubuai d'autre part, à l'aide des points utilisés pour les sites pilotes et de 2 points supplémentaires (4.1.5).

Pour le secteur de Tahiti et Moorea, on utilise les données IOWAGA du modèle « Polynésie Française » (disponibles sur l'archipel de la Société et une partie des Tuamotu à une résolution de 0.05°), et pour Tubuai, on utilise les sorties du modèle global (d'une résolution de 0.5°). Ces données sont décrites en détail dans le paragraphe 2.2.1. Les séries temporelles des paramètres de vagues (Hs, Tp, Dp) sont extraites du 01/01/2001 au 31/12/2010, soit 10 ans de données à une fréquence de 3h.

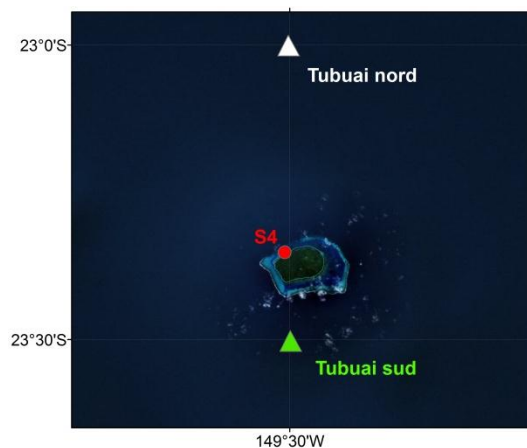


Figure 25. Localisation des points utilisés pour l'analyse statistique des houles saisonnières dans le secteur de Tubuai (S4). Triangle blanc : site de Tubuai nord. Triangle vert : point d'analyse supplémentaire pour l'analyse régionale (Tubuai sud).

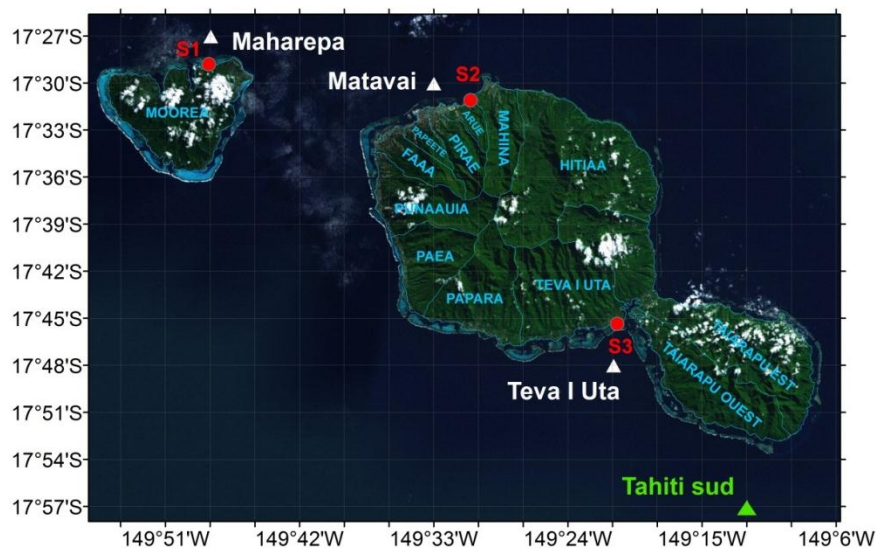


Figure 26. Localisation des points utilisés pour l'analyse statistique des houles saisonnières sur le secteur de Tahiti et Moorea. Triangles blancs : sites de Maharepa (S1), Matavai (S2), et Teva I Uta (S3). Triangle vert : point d'analyse supplémentaire pour l'analyse régionale (Tahiti sud).

Outre les houles cycloniques, la Polynésie Française est soumise à trois grands régimes de houles saisonnières : les houles d'alizés (provenant du sud-est ou de l'est au nord-est), les houles longues en provenance de l'hémisphère nord et les houles de secteur sud ou houles australes. Elles sont caractérisées par des hauteurs, périodes et directions bien spécifiques et, même si elles sont présentes toute l'année, elles sont plus ou moins marquées selon la saison (voir la description au paragraphe 1.1.1).

La méthode employée pour traiter les houles saisonnières est similaire à celle explicitée dans Lecacheux et al. (2012) :

- ✓ Tout d'abord, les dates correspondant à des événements cycloniques sont ôtées des séries temporelles manuellement.
- ✓ Puis, une classification des états de mer est effectuée à partir des triplets (H_s , T_p , D_p) à l'aide d'un algorithme *K-means* afin d'identifier les classes de vague dominantes dans la série temporelle. Le nombre de classe ($k=18$) est choisi arbitrairement de manière à séparer distinctement les grands régimes de vague sans pour autant obtenir une multitude de classe difficilement interprétable. Les classes correspondant aux trois grands types de houle précités (australes, alizés, houle du nord) sont ensuite regroupées dans la mesure du possible en fonction de leurs caractéristiques et de leur saisonnalité. Une vérification de l'homogénéité des classes est menée afin de corriger manuellement certaines erreurs de classification (e.g. élimination de la mer de vent).

L'analyse statistique est enfin conduite sur le ou les principaux types de houle affectant chaque site. Pour cela, les données sont ré-échantillonnées avec la méthode Peak Over Threshold (ou POT). Un critère de durée minimum de 72h entre chaque apex est

appliqué pour assurer l'indépendance du jeu de données final (on considère ainsi que les épisodes de forte houle ont une durée moyenne de 3 jours). La loi de Pareto généralisée (ou loi GPD) est ensuite ajustée aux données, en testant plusieurs seuils, plusieurs méthodes de calcul des paramètres (méthode du maximum de vraisemblance, méthode des moments, méthode des moments pondérés) et plusieurs tests statistiques (chi-deux, Kolmogorov-Smirnov, modified shape and scale parameters...) et visuels (graphe quantile-quantile notamment). Seul le meilleur ajustement est présenté dans les résultats. Ceux-ci sont à prendre avec précaution car l'extrapolation des extrêmes est faite sur une base de 10 ans de données uniquement. Les valeurs des Hs centennales sont donc entourées d'une forte incertitude (en particulier pour le site de Tubuai nord, cf. 4.1.4). Les valeurs des houles décennales et centennales sont présentées avec leur intervalle de confiance à 95%.

4.1.1. Site 1 : Maharepa

Pour le site de Maharepa, situé au nord de Moorea, deux types de houle peuvent être impactantes : les houles longues en provenance du nord, et les houles d'alizés de l'est et du nord-est.

Les classes correspondant aux houles du nord sont principalement présentes entre septembre et mai. Leurs barycentres ont des hauteurs comprises entre 0.8m et 2.3m associées à des périodes pics de 10s à 20s. La loi GPD est ajustée au-dessus du seuil $H_s = 1.5\text{m}$ et les paramètres de la loi sont calculés par la méthode des moments (cf. Figure 27). Les résultats sont présentés dans le Tableau 1. Les périodes pics associées à ce type de houle ont une moyenne d'environ 16.5s (+/- 2s).

Les classes correspondant aux houles d'alizés de l'est et du nord-est interviennent toute l'année mais sont prépondérantes pendant l'hiver austral de mai à octobre. Leurs barycentres ont une hauteur significative maximale de 1.4m et une période pic inférieure à 9.4s. La loi GPD est ajustée au-dessus du seuil $H_s = 1.4\text{m}$ et les paramètres de la loi sont calculés par la méthode des moments (cf. Figure 28). Les résultats sont présentés dans le Tableau 2. Les périodes pics associées à ce type de houle sont de l'ordre de 7s (+/- 1s).

Tableau 1: résultats de l'analyse statistique des Hs à Maharepa : houles du Nord

Période de retour	Hs (m)	Intervalle de confiance à 95% (m)
10 ans	2.24	[2.08 ; 2.40]
100 ans	2.36	[2.07 ; 2.65]

Tableau 2: résultats de l'analyse statistique des Hs à Maharepa : houles d'alizés

Période de retour	Hs (m)	Intervalle de confiance à 95% (m)
10 ans	2.26	[2.04 ; 2.48]
100 ans	2.52	[2.08 ; 2.96]

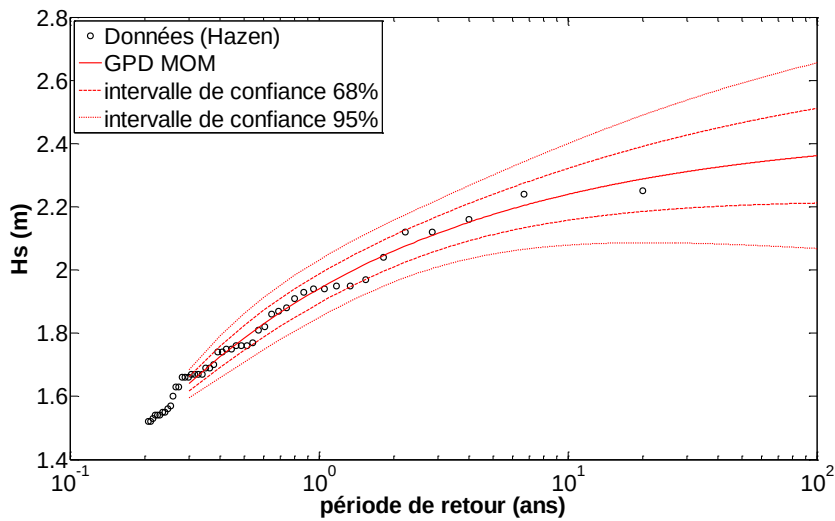


Figure 27. Loi GPD pour les houles longues du nord pour le site de Maharepa

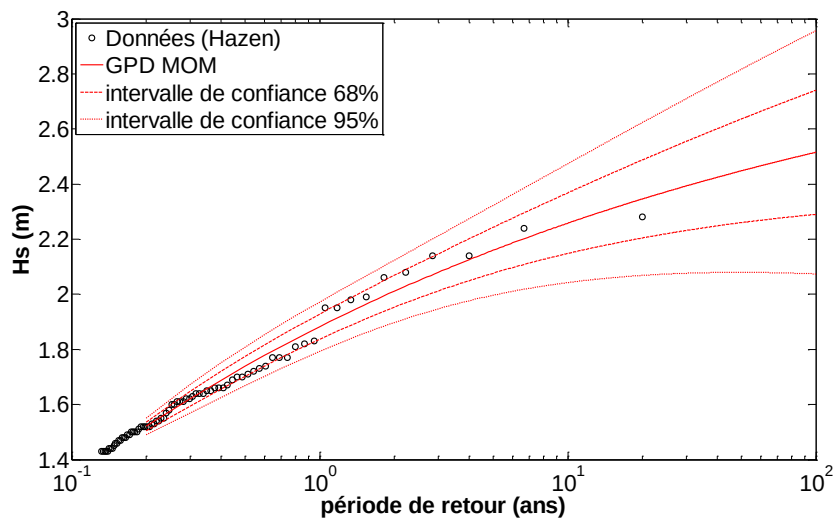


Figure 28. Loi GPD pour les houles d'alizés du nord et du nord-est pour le site de Maharepa

4.1.2. Site 2 : Matavai

Pour le site de Matavai, l'analyse statistique est effectuée uniquement sur les houles longues en provenance du nord qui ont des caractéristiques similaires à celles du site de Maharepa (4.1.1). En effet, la pointe Venus protège le site d'étude des houles d'alizés qui sont très peu présentes et fortement atténuées.

La loi GPD est ajustée au-dessus du seuil $H_s = 1.4\text{m}$ et les paramètres de la loi sont calculés par la méthode des moments (cf. Figure 29). Les valeurs obtenues sont très similaires à celles du site de Maharepa (cf Tableau 3). Les périodes pics associées à ces houles sont d'environ 15.5s (+/- 2s).

Tableau 3: résultats de l'analyse statistique des Hs à Matavai : houles du Nord

Période de retour	Hs (m)	Intervalle de confiance à 95% (m)
10 ans	2.24	[2.05 ; 2.43]
100 ans	2.38	[2.03 ; 2.73]

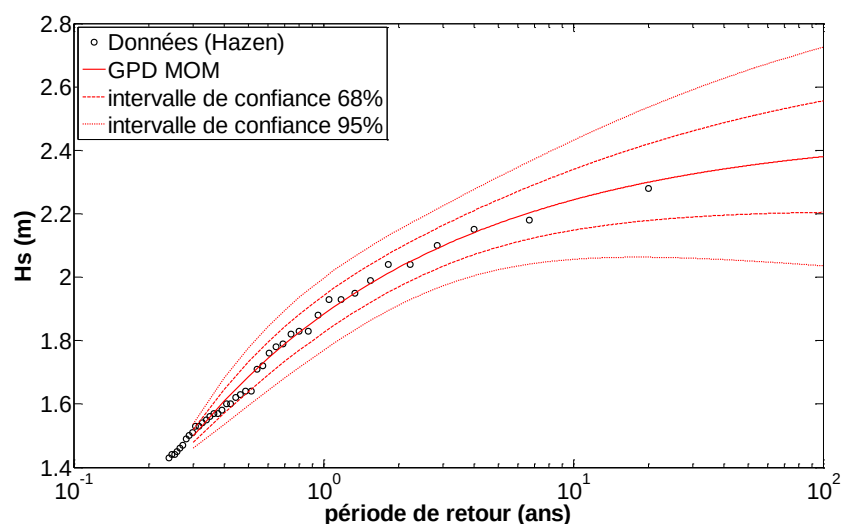


Figure 29. Loi GPD pour les houles longues de l'hémisphère nord pour le site de Matavai

4.1.3. Site 3 : Teva I Uta

Le cas de Teva I Uta est particulier de par sa localisation moins ouverte que les sites de Maharepa et Matavai. A cet endroit, toutes les houles ont été filtrées et modifiées dans la baie et sont toutes originaires du sud. Les différents types de houle sont ainsi difficilement identifiables. La classification à l'aide de l'algorithme K-means n'ayant pas d'intérêt sur ce point, un simple critère directionnel a été utilisé pour distinguer les groupes de houle homogènes. Seules les houles dont la direction est comprise entre 135° et 225° ont été retenues. Il s'agit principalement de houles australes qui ont été transformées en rentrant dans la baie.

La loi GPD est ajustée au-dessus du seuil $H_s = 2.8\text{m}$ et les paramètres de la loi sont calculés par la méthode des moments (cf. Figure 30). Les résultats sont présentés dans le Tableau 4. Les périodes pics associées ont une moyenne d'environ 15s (+/- 2.5s).

Tableau 4: résultats de l'analyse statistique des Hs à Teva I Uta : houles du Sud

Période de retour	Hs (m)	Intervalle de confiance à 95% (m)
10 ans	3.94	[3.64 ; 4.24]
100 ans	4.28	[3.67 ; 4.89]

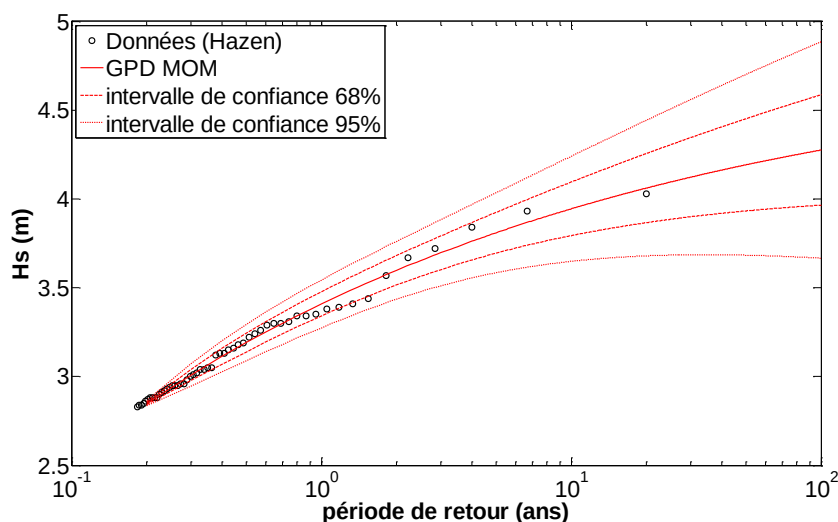


Figure 30. Loi GPD pour les houles de secteur sud pour le site de Teva I Uta

4.1.4. Site 4 : Tubuai nord

Pour le site de Tubuai nord, l'analyse statistique est effectuée sur les houles en provenance du nord ainsi que sur les houles d'alizés en provenance de l'est et du nord est.

Sur ce secteur, les houles en provenance du nord sont très peu fréquentes et ne sont présentes qu'entre octobre et mars-avril. Les hauteurs significatives les plus élevées ont des valeurs supérieures à celles observées sur les sites de Matavai et Maharepa suggérant une origine différente de ces houles du Nord. Une analyse fine de chaque évènement a été réalisée (visualisation des grilles de sorties WW3, analyse de la variation des directions et des périodes des vagues autour du pic de Hs) et a permis d'en éliminer certains qui étaient générés par des dépressions locales. La loi GPD est ajustée sur les données restantes au-dessus du seuil $H_s = 1,9\text{m}$ et les paramètres de la loi sont calculés par la méthode des moments (cf. Figure 31). Les résultats sont présentés dans le Tableau 5. Les périodes pics associées sont d'environ 16s (+/- 2s).

Tableau 5: résultats de l'analyse statistique des Hs à Tubuai Nord : houles en provenance du Nord

Période de retour	Hs (m)	Intervalle de confiance à 95% (m)
10 ans	2.82	[2.58 ; 3.06]
100 ans	3.05	[2.57 ; 3.54]

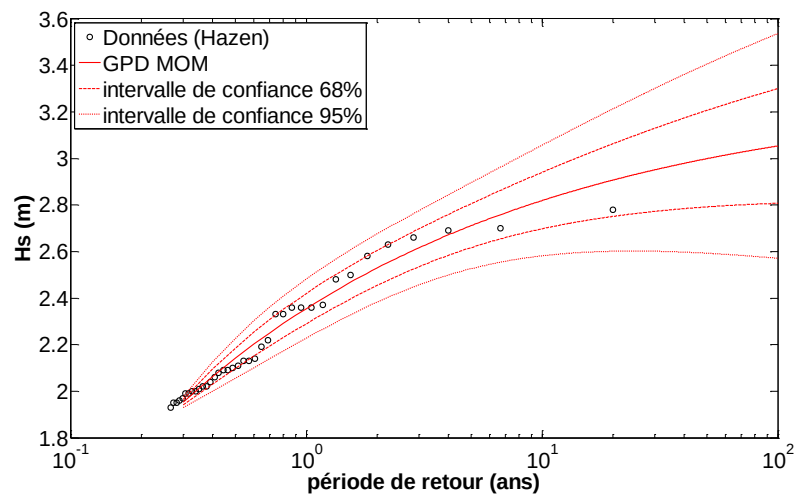


Figure 31. Loi GPD ajustée pour les houles du nord sur le site de Tubuai Nord

Notons que malgré l'élimination de certains événements du jeu de données statistiques, les valeurs décennales et centennales à Tubuai restent supérieures à celles de Maharepa et Matavai (de l'ordre de 60 à 70 cm). L'influence de dépressions locales plus faibles et difficilement identifiables pourrait expliquer cette différence. Notons également qu'en raison du très faible nombre d'événements représentatifs des houles longues du Nord, les résultats sont entourés d'une forte incertitude.

Les houles d'alizés de l'est et du nord-est interviennent toute l'année mais sont également assez peu représentées sur ce secteur. Le seuil utilisé est de 2.50m et la loi GPD est ajustée avec la méthode de maximum de vraisemblance (cf. Figure 32). Les résultats sont présentés dans le Tableau 6. Les périodes pics associées sont d'environ 8.5s (+/- 1s).

Tableau 6: résultats de l'analyse statistique des Hs à Tubuai Nord : houles d'alizés du Nord-Est

Période de retour	Hs (m)	Intervalle de confiance à 95% (m)
10 ans	4.94	[4.33 ; 5.56]
100 ans	5.74	[4.58 ; 6.91]

De la même manière que pour les houles du Nord, les résultats présentés ici sont à prendre avec précaution à cause des fortes incertitudes associées. Le même travail d'analyse que pour les houles du Nord a été réalisé afin de vérifier la bonne appartenance de chaque événement à la classe des houles d'alizés du Nord-Est. Aucun élément n'a permis d'écarter les trois valeurs les plus élevées de la distribution empirique (voir Figure 32).

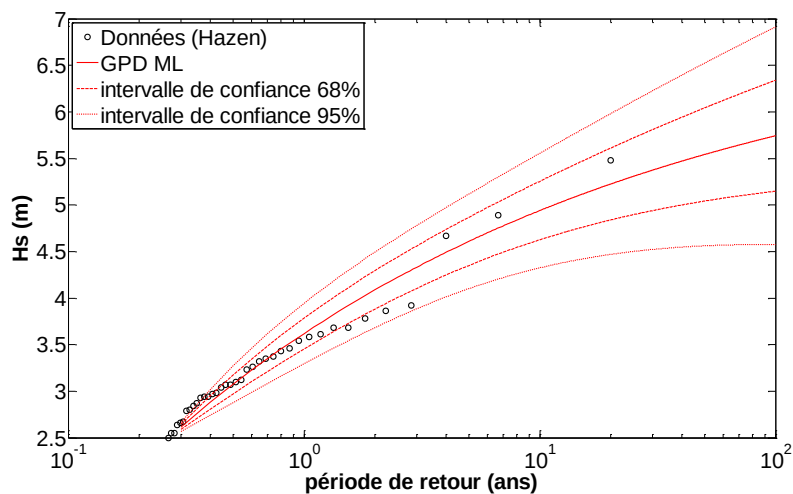


Figure 32. Loi GPD ajustée pour les houles d'alizés de l'est et du nord-est sur le site de Tubuai Nord

4.1.5. Synthèse régionale

Les points utilisés pour les sites de Matavai/Maharepa et Tubuai nord ont permis d'étudier les valeurs extrêmes des houles du nord et des houles d'alizés de l'est et du nord-est sur les secteurs de Tahiti/Moorea et Tubuai respectivement. En revanche, les houles en provenance du sud n'ont pas pu être correctement étudiées (le point de Teva I Uta ne peut être utilisé pour caractériser ces houles partout car elles sont fortement transformées en entrant dans la baie). Afin d'avoir une vision plus régionale autour des îles, deux points supplémentaires situés au sud de Tahiti (cf. Figure 26) et de Tubuai (cf. Figure 25) ont été étudiés.

Tahiti sud

Sur ce point, les classes obtenues correspondent principalement à des houles australes et des houles d'alizés du sud est qui sont présentes de manière homogène toute l'année avec une forte prédominance des houles australes. Pour les deux types de houle, la loi GPD est ajustée au-dessus du seuil $H_s = 2.5\text{m}$ et les paramètres de la loi sont calculés par la méthode du maximum de vraisemblance. Les résultats sont présentés sur la Figure 33 pour les houles australes et sur la Figure 34 pour les houles d'alizés.

Les valeurs de H_s décennale et centennale pour les houles australes sont présentées dans le Tableau 7. Les périodes pics associées aux houles australes ont une moyenne d'environ 15.5s (+/- 1.5s).

Les valeurs de H_s décennale et centennale pour les houles d'alizés du sud sont présentées dans le Tableau 8. Les périodes pics associées aux houles d'alizés du sud ont une moyenne d'environ 10s (+/- 1.5s).

Tableau 7: résultats de l'analyse statistique des Hs à Tahiti Sud : houles australes

Période de retour	Hs (m)	Intervalle de confiance à 95% (m)
10 ans	4.56	[4.23 ; 4.89]
100 ans	4.98	[4.42 ; 5.54]

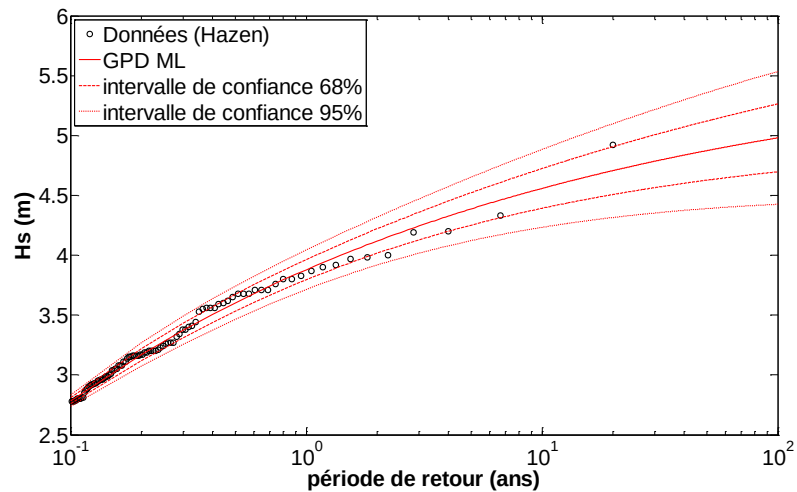


Figure 33. Loi GPD pour les houles australes pour le site de Tahiti sud

Tableau 8: résultats de l'analyse statistique des Hs à Tahiti Sud : houles d'alizés du Sud

Période de retour	Hs (m)	Intervalle de confiance à 95% (m)
10 ans	4.60	[4.05 ; 5.15]
100 ans	5.37	[4.20 ; 6.54]

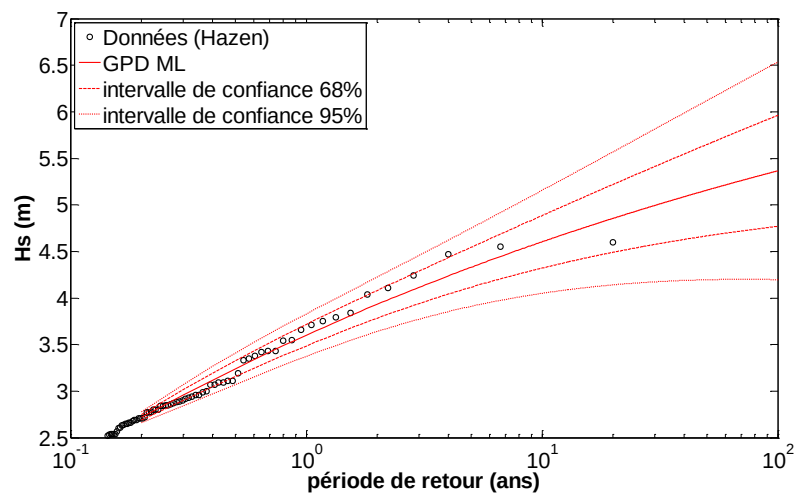


Figure 34. Loi GPD pour les houles d'alizés pour le site de Tahiti sud

Tubuai sud

Au sud de Tubuai, les houles australes et d'alizés de secteur sud-est sont également prédominantes. Pour les deux types de houle, la loi GPD est ajustée avec la méthode des moments (et un seuil de 4.2m pour les houles australes et 3m pour les houles d'alizés). Les résultats sont présentés Figure 35 pour les houles australes et Figure 36 pour les houles d'alizés.

Les valeurs de Hs décennale et centennale pour les houles australes sont présentées dans le Tableau 9. Les périodes pics associées aux houles australes ont une moyenne d'environ 15s (+/- 2s).

Les valeurs de Hs décennale et centennale pour les houles d'alizés du sud sont présentées dans le Tableau 8. Les périodes pics associées aux houles d'alizés du sud ont une moyenne d'environ 9.5s (+/- 1s).

Tableau 9: résultats de l'analyse statistique des Hs à Tubuai Sud : houles australes

Période de retour	Hs (m)	Intervalle de confiance à 95% (m)
10 ans	5.80	[5.38 ; 6.22]
100 ans	6.28	[5.40 ; 7.16]

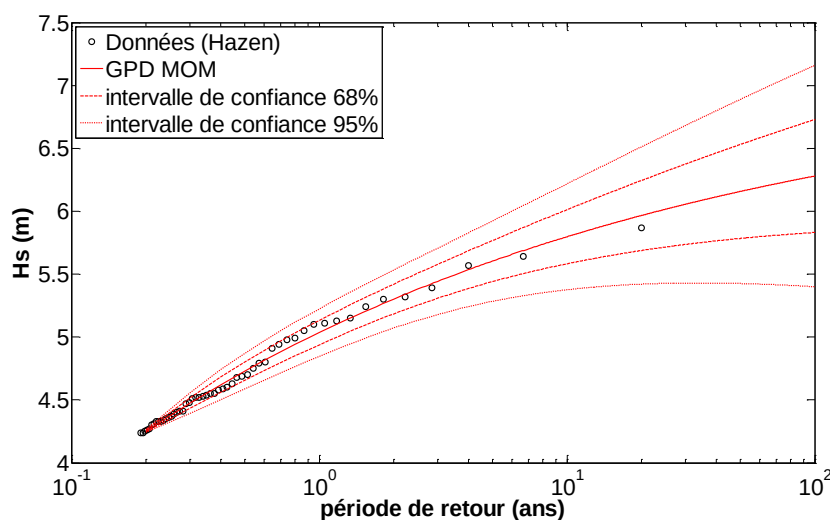


Figure 35. Loi GPD pour les houles australes pour le site de Tubuai sud

Tableau 10: résultats de l'analyse statistique des Hs à Tubuai Sud : houles d'alizés du Sud

Période de retour	Hs (m)	Intervalle de confiance à 95% (m)
10 ans	5.10	[4.66 ; 5.54]
100 ans	5.48	[4.68 ; 6.28]

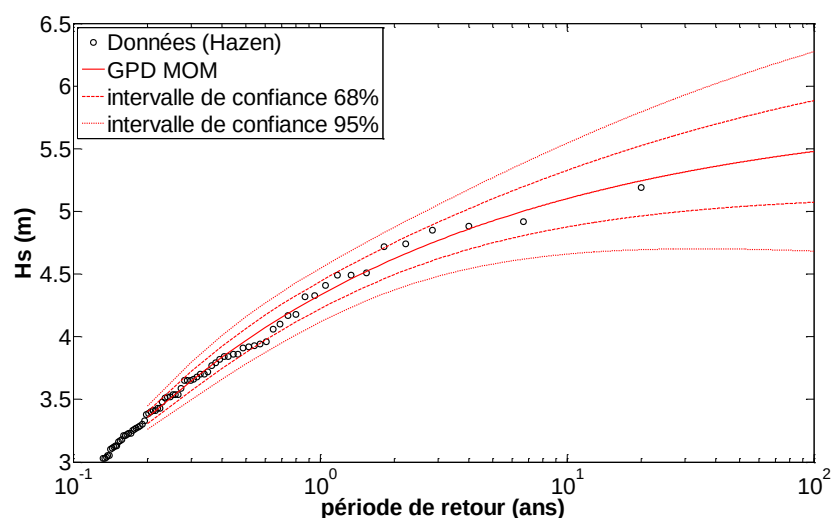


Figure 36. Loi GPD pour les houles d'alizés pour le site de Tubuai sud

Synthèse

Le Tableau 11 synthétise les résultats sur les houles saisonnières extrêmes obtenus pour le secteur de Tahiti/Moorea et celui de Tubuai. De manière générale, on remarque que les secteurs sud des îles sont les plus affectés par les houles saisonnières (en particulier les houles australes qui ont des périodes importantes de l'ordre de 15s). Ces statistiques étant calculées à partir de 10 ans de données seulement, les résultats doivent être utilisés avec précaution et les intervalles de confiance doivent être pris en compte.

Tableau 11. Synthèse des résultats sur les houles extrêmes au large pour les îles de Tahiti/Moorea et Tubuai. Les valeurs présentées sont arrondies au dixième (la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95% est indiquée entre parenthèses pour les Hs centennales) Les cases grisées indiquent les points pour lesquelles les incertitudes sont très fortes.

	Secteur de TAHITI / MOOREA				Secteur de TUBUAI			
	Hs 10yr	Hs 100yr	Période pic moyenne	Point de référence	Hs 10yr	Hs 100yr	Période pic moyenne	Point de référence
Houles du nord	2.2m	2.4m (2.7m)	16.5s	Maharepa	2.8m	3.1m (3.5m)	16s	Tubuai nord
Houles d'alizés (est au nord-est)	2.3m	2.5m (3m)	7.0s	Maharepa	4.9m	5.7m (6.9m)	8.5s	Tubuai nord
Houles d'alizés (sud-est)	4.6m	5.4m (6.5m)	10.0s	Tahiti sud	5.1m	5.5m (6.3)	9.5s	Tubuai sud
Houles australes	4.6m	5m (5.5m)	15.5s	Tahiti sud	5.8m	6.3m (7.2m)	15.0s	Tubuai sud

4.2. EVENEMENTS CYCLONIQUES

Pour les évènements cycloniques, les vagues et la surcote atmosphérique sont tous deux considérés. L'analyse est menée de manière régionale sur les îles de Tahiti et Moorea (4.2.1) puis sur Tubuai (4.2.2). Le faible échantillonnage des données historiques induit de très fortes incertitudes sur les résultats de l'analyse statistique qui se traduisent par des intervalles de confiance importants dans le calcul des valeurs extrêmes. Une quantification précise des hauteurs de houle correspondant à différentes périodes de retour n'est donc pas possible. Il s'agit ici de faire une analyse par grandes façades, ou secteurs d'exposition homogène, pour lesquels on cherche des ordres de grandeur pour les houles cycloniques décennales, cinquantennales et centennales.

L'analyse des résultats de la modélisation (3.3) a montré que, dans le cas des îles hautes de Polynésie, les **surcotes atmosphériques** cycloniques étaient essentiellement dues au phénomène de baromètre inverse (à l'extérieur du lagon). Ce phénomène étant très localisé au niveau de la dépression, très peu d'évènements ont engendré une surcote atmosphérique significative au niveau des îles étudiées parmi l'échantillon de cyclones utilisé. En conséquence, l'analyse statistique n'a pu être conduite mais **un ajustement des valeurs de référence est proposé pour chaque île au regard des résultats de simulations obtenus.**

La méthode employée pour définir les gammes de valeurs correspondant aux différentes houles extrêmes conjuguent (1) **les résultats de l'analyse statistique** et (2) **une expertise** :

- ✓ Tous d'abord, les résultats de modélisation de l'ensemble des cyclones historiques et synthétiques sont extraits sur 210 points répartis autour de Tahiti, Moorea et Tubuai le long de l'isobathe 200m qui précède le lagon. L'analyse statistique est conduite en chaque point sur la hauteur significative des vagues (H_s) à l'aide des fonctions de la boîte à outils WAFO de Matlab (BRODTKORB *et al.*, 2000). Chaque cyclone est représenté par le pic de hauteur significative qui a été simulé sur le point considéré. Tout d'abord, les évènements indépendants sont sélectionnés par la méthode des seuils (Peaks Over Threshold, POT) avec un seuil fixé à 2m. Puis, une loi Generalized Pareto Distribution (GPD) est ajustée avec la méthode du maximum de vraisemblance.
- ✓ Les résultats obtenus sont considérés et analysés de manière globale en recherchant des secteurs d'exposition homogène. Ceux-ci sont souvent séparés par des pointes ou des caps qui découpent les façades de même orientation. Des gammes de valeurs de houle d'occurrence décennale, cinquantennale et centennale sont proposées pour chaque secteur. Elles sont souvent arrondies à l'unité supérieure afin de suivre une approche conservative, adaptée à une étude de l'aléa.
- ✓ Enfin, ces résultats sont analysés et pondérés au regard de l'échantillon de cyclones utilisé afin de prendre en compte les incertitudes inhérentes à la courte période historique utilisée comme référence.

4.2.1. Tahiti et Moorea

Les figures suivantes présentent les valeurs de houles décennales, cinquantiennes et centennales calculées avec l'échantillon complet des cyclones historiques et synthétiques pour les îles de Moorea (Figure 37) et Tahiti (Figure 38). Des grands secteurs d'exposition homogène ont été découpés afin de proposer pour chacun une gamme valeur de référence correspondant à l'ordre de grandeur des houles décennales et centennales.

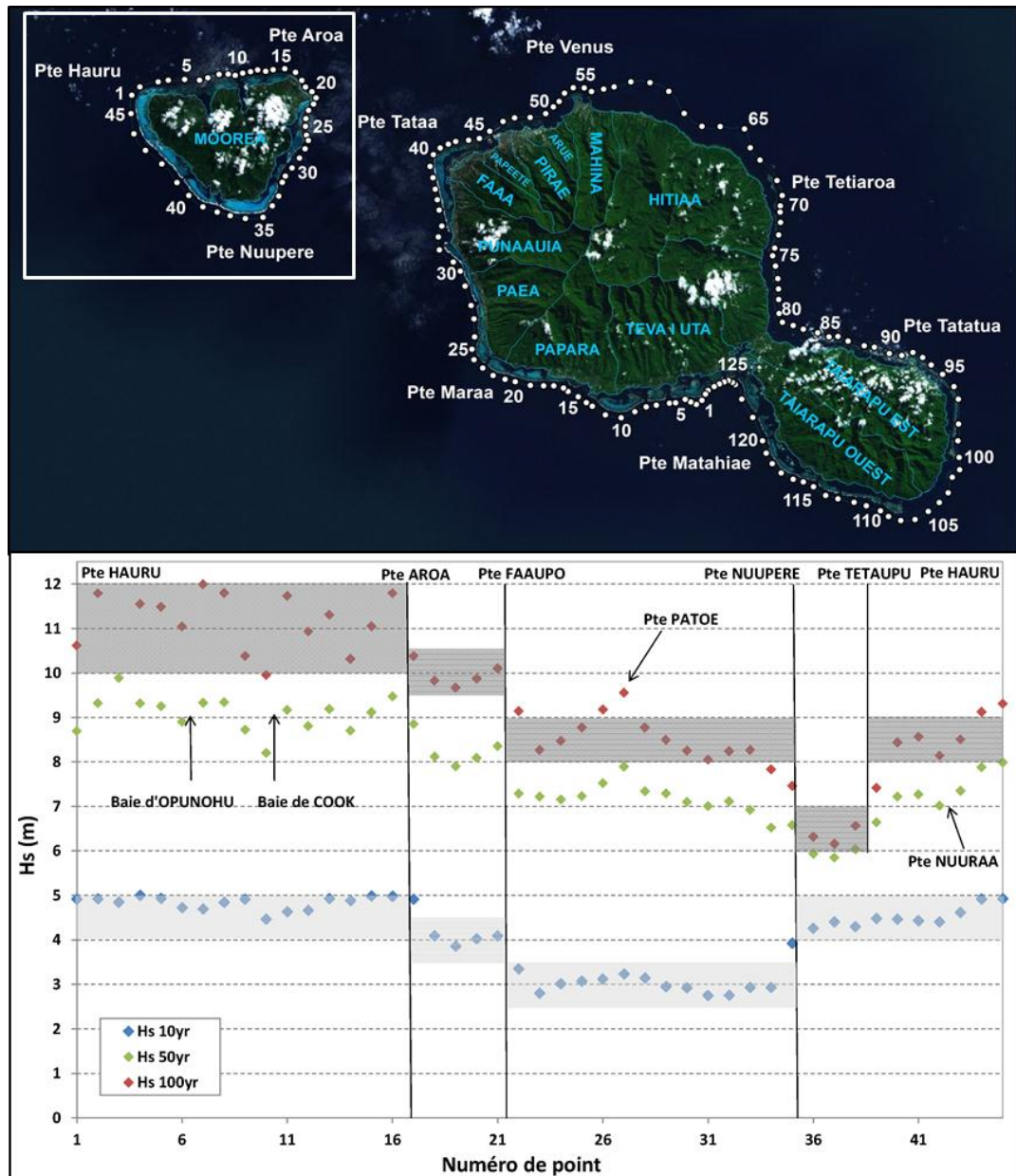


Figure 37. Résultats de l'analyse statistique au niveau de l'isobathe 200m à Moorea. Le découpage des différents secteurs ainsi que les pointes sont indiqués par des segments noirs.

De manière générale, les houles les plus extrêmes (cinquantennales et centennales) et les houles plus fréquentes (de l'ordre du décennal) ne se répartissent pas selon les mêmes secteurs. En effet, elles sont générées par des cyclones aux caractéristiques différentes (distance par rapport aux îles, forme de la trajectoire, intensité). Une analyse séparée est donc proposée pour ces deux types d'occurrence. Pour les houles les plus extrêmes, l'analyse est basée uniquement sur les houles centennales. En effet, étant données les incertitudes, la différence entre les valeurs de houles centennales et cinquantennales n'est pas suffisamment significative.

Houles de plus forte occurrence (ordre de grandeur décennal)

Les hauteurs de houles calculées pour une période de retour décennale s'échelonnent **de 2m dans les zones les plus protégées à 5m dans les secteurs les plus exposés**. On distingue 3 secteurs types:

Les façades orientées vers l'ouest et le sud-ouest (Moorea ouest, communes de Paea, Papara et Taiarapu-ouest) sont les plus fréquemment exposées aux houles cycloniques venant de l'ouest et du nord-ouest. Celles-ci sont principalement engendrées par les cyclones qui traversent le corridor préférentiel s'étirant des Samoa aux Australes (cf. Figure 40) durant la première partie de la saison cyclonique, de novembre à janvier (Larrue et al., 2010). La Figure 39 montre que, parmi l'échantillon de cyclones simulés, les épisodes de houle cyclonique excédant 2m (valeur seuil pour l'analyse statistique) sont beaucoup plus fréquents sur ces façades que sur celles de la côte est. Les types de cyclones qui génèrent les houles comprises entre 2m et la valeur décennale dans ce secteur sont très variables. Il peut s'agir de cyclones de forte catégorie qui passent à plus de 1000km de Tahiti ou encore de dépressions tropicales dont la trajectoire passe beaucoup plus proche (cf. Figure 41, C et D). Dans ces secteurs, les hauteurs de houle décennale s'échelonnent **de 4m à 5m** pour les zones les plus exposées (Pointe Maraa à Tahiti ou Pointe Hauru à Moorea). La gamme des périodes associées à ces hauteurs est très large (**entre 8s et 15s**) dû à la grande variabilité de distance à laquelle passent ces trajectoires. Certaines communes orientées à l'ouest sont un peu moins exposées de par leur configuration en fond de baie (Teva I Uta) ou grâce à la protection offerte par Moorea (de Punaauia à Papeete).

Les façades orientées vers le nord (Moorea nord, Pirae, Arue, Mahina, Hitiaa nord) sont exposées un peu moins fréquemment que les côtes ouest (cf. Figure 39) mais peuvent subir des houles en provenance à la fois du nord-ouest et du nord-est. Les cyclones qui engendrent les houles comprises entre 2m et la valeur décennale sur ce secteur sont en effet répartis de part et d'autre de Tahiti et Moorea à des distances excédant rarement les 500km (cf. Figure 41, A). Sur ces secteurs, la valeur de houle décennale est également comprise entre **4m et 5m**. La côte nord de Moorea est un peu plus exposée (la valeur décennale se rapprochant de 5m) car Tahiti, située au sud-est de Moorea, est protégé en partie contre les houles venant du nord-ouest (cf. exemple du cyclone Martin, Figure 42).

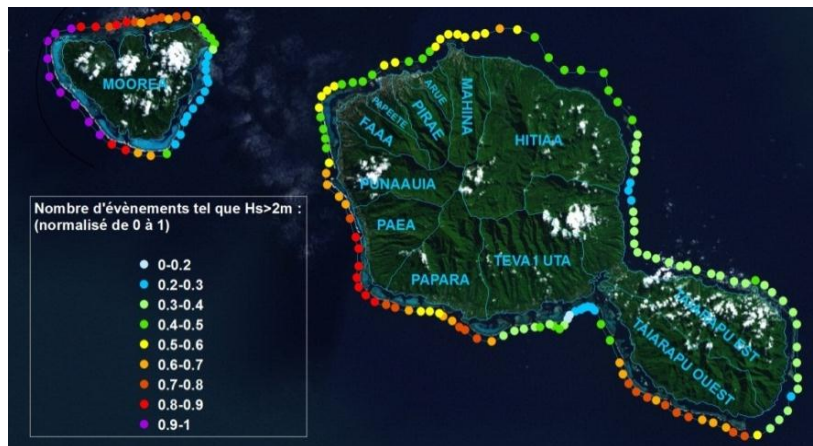


Figure 39. Répartition du nombre d'événements cycloniques ayant généré des valeurs de plus de 2m le long du littoral de Tahiti et Moorea.

Les façades orientées vers l'est sont les moins fréquemment frappées par les houles cycloniques (cf. Figure 39). Les événements qui engendrent les houles comprises entre 2m et la valeur décennale proviennent essentiellement de l'est ou du nord-est et traversent le couloir entre les archipels de la Société et des Tuamotu (cf. Figure 41, B). D'après Larrue et al. (2010), ces cyclones ont plutôt lieu pendant le deuxième trimestre de la saison cyclonique, entre février et avril. La valeur décennale sur ce secteur se situe entre **3m et 4m** et les périodes associées entre **10s et 12s**. La façade est de Tairarapu (points 92 à 102 sur la Figure 38) est un peu plus exposée due à sa configuration en pointe qui la met en première ligne en cas de houle cyclonique venant de l'est. La valeur décennale de Hs se rapproche alors plus de 4m.

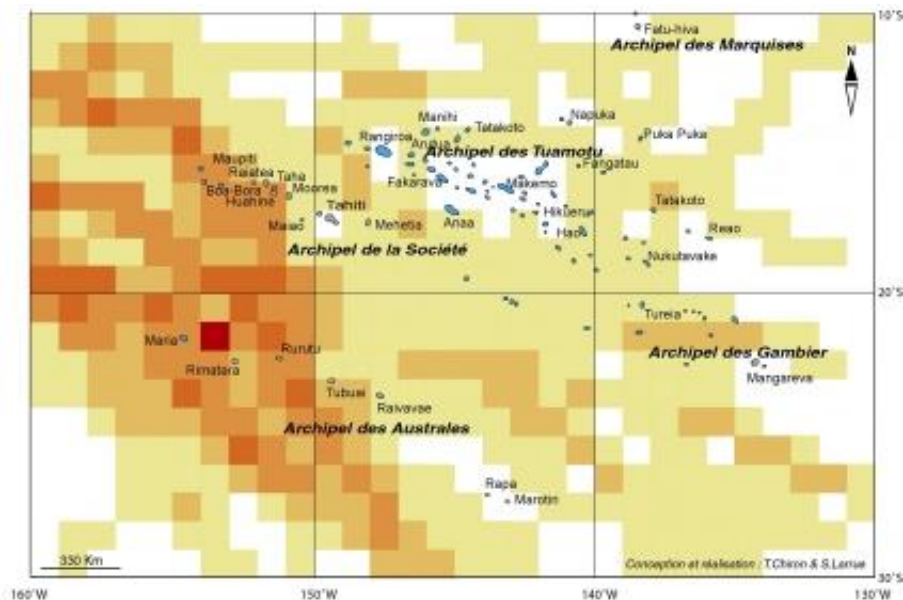


Figure 40. Fréquence de passage des cyclones et des tempêtes tropicales en Polynésie Française entre 1970 et 2009 (image extraite de Larrue et al., 2010)

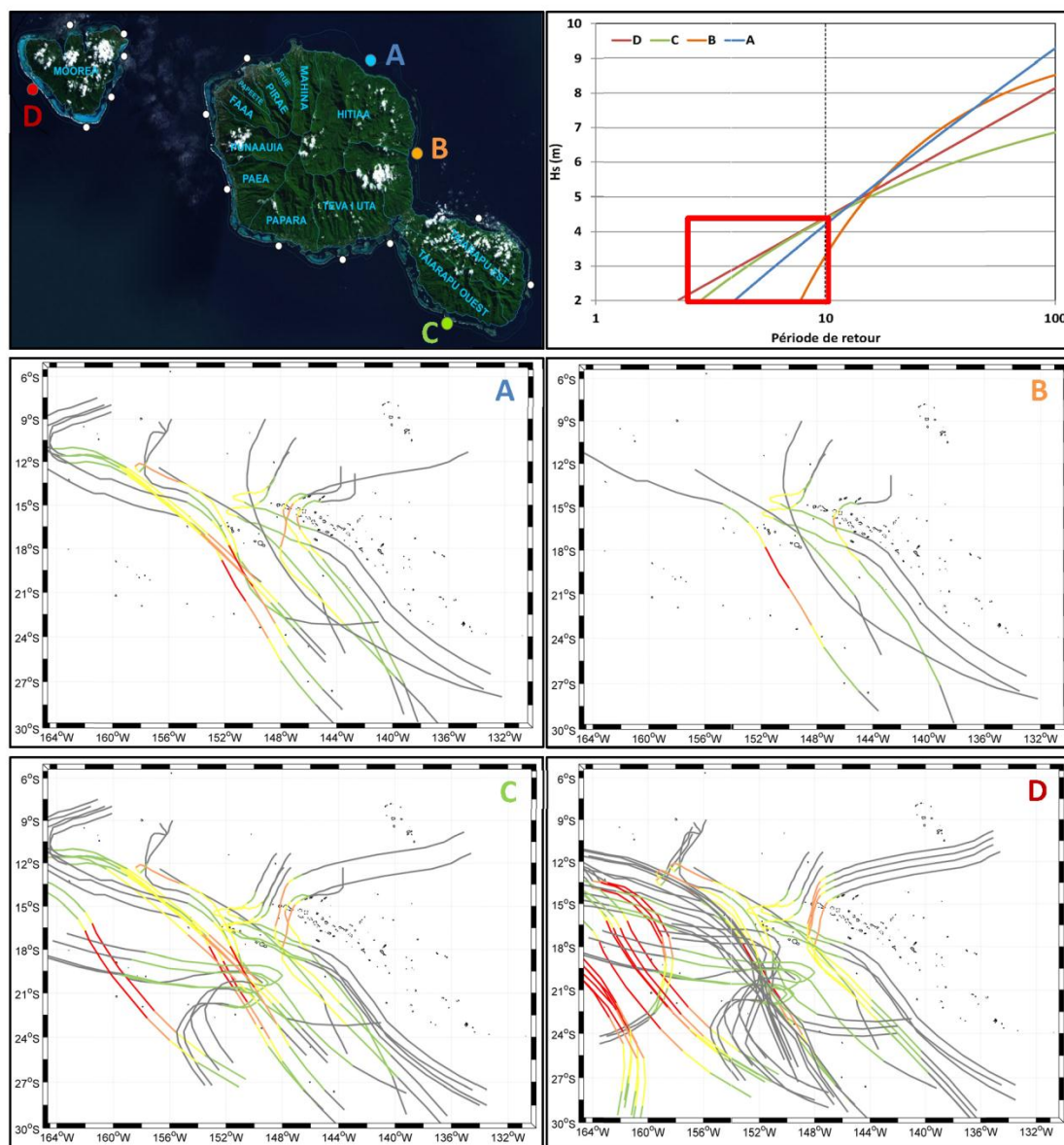


Figure 41. Exemples de distributions théoriques de H_s (m) pour 4 points de Tahiti et Moorea et trajectoires associées aux évènements qui ont engendré des hauteurs comprises entre le seuil (2m) et la valeur décennale en chaque point.

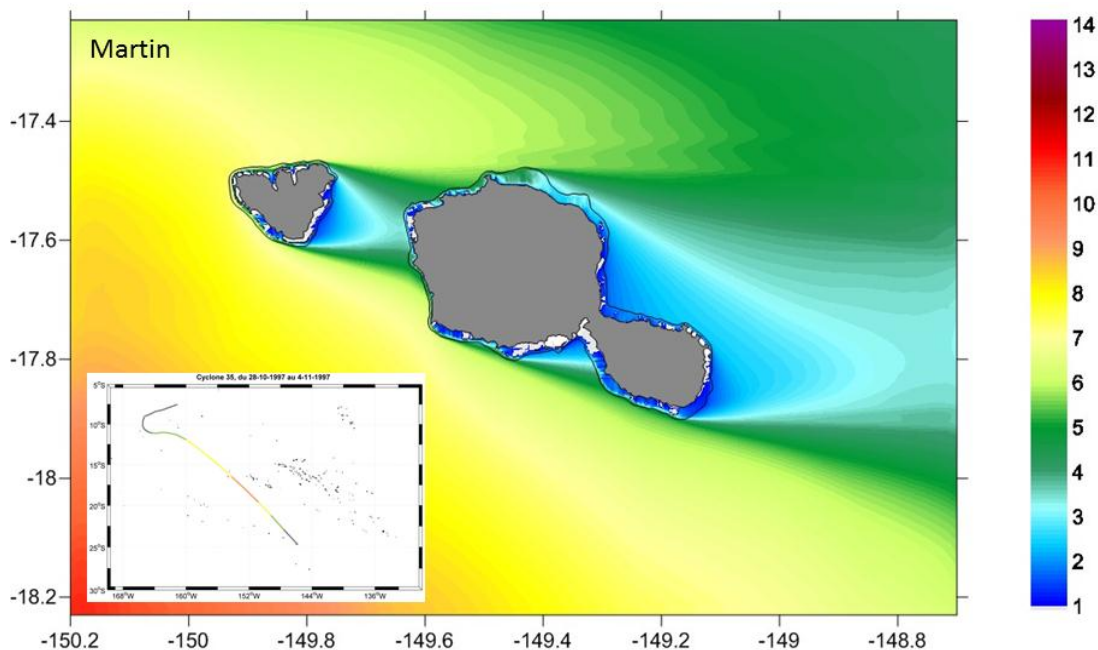


Figure 42. Hauteur significative de houle maximale calculée pour le cyclone Martin (1997) autour de Tahiti et Moorea. L'échelle de couleur est exprimée en mètres.

Houles plus extrêmes (ordre de grandeur centennal)

Les hauteurs de houles calculées pour une période de retour centennale s'échelonnent sur une gamme beaucoup plus large que les houles décennales, **de 5m dans les zones les plus protégées à 12m dans les secteurs les plus exposés**. Les cyclones qui génèrent les houles les plus extrêmes sont relativement similaires pour toutes les façades. Il s'agit principalement de cyclones traversant les îles ou passant à moins d'une centaine de kilomètres selon un axe nord-sud. Contrairement aux houles de type décennal, ce ne sont pas les façades ouest et sud-ouest qui sont les plus exposées mais les façades nord. On distingue 3 secteurs types:

Les côtes nord de Tahiti et Moorea (cf. Figure 43, A) sont les plus exposées aux houles extrêmes. En effet, en cas de passage d'un cyclone à proximité, elles sont dans l'axe de propagation principal du train de houle qui se déplace généralement dans le sens de la trajectoire du nord au sud en précédant l'œil du cyclone. Sur ces secteurs, **la valeur centennale de Hs se situe entre 10m et 12m pour des périodes d'environ 12s**. De la même manière que pour les houles de type décennal, on note une distinction entre les côtes nord de Tahiti et Moorea, cette dernière étant un peu plus exposée aux cyclones qui passent à l'ouest des deux îles.

Les côtes est-ouest comme Moorea est/ouest, Paea, Taïarapu-est (cf. Figure 43, D et B) sont un peu moins exposées car elles ne sont pas directement dans le sens de propagation de la houle. Sur ces secteurs, **la valeur centennale de Hs se situe entre 8m et 9m pour des périodes de 10s à 12s**. Il n'y a pas de distinction nette entre les façades ouest et est des îles car les cyclones passant les plus proches se répartissent

de la même manière des deux côtés. Cependant, de même que pour les valeurs de houle décennale, la pointe de Taiarapu-est (points 92 à 102 sur la Figure 38) est un peu plus exposée en cas de passage d'un cyclone très proche à l'est de Tahiti dû à sa configuration en pointe. La valeur centennale de Hs peut atteindre 10m dans ce secteur.

Les côtes orientées vers le sud-ouest (Papara, Taiarapou-ouest, cf. Figure 43 C) sont les moins exposées aux houles cycloniques extrêmes qui sont fortement réfractées avant d'arriver à la côte. Sur ces secteurs, **la valeur centennale de Hs se situe entre 6m et 7m pour des périodes n'excédant pas les 10s.**

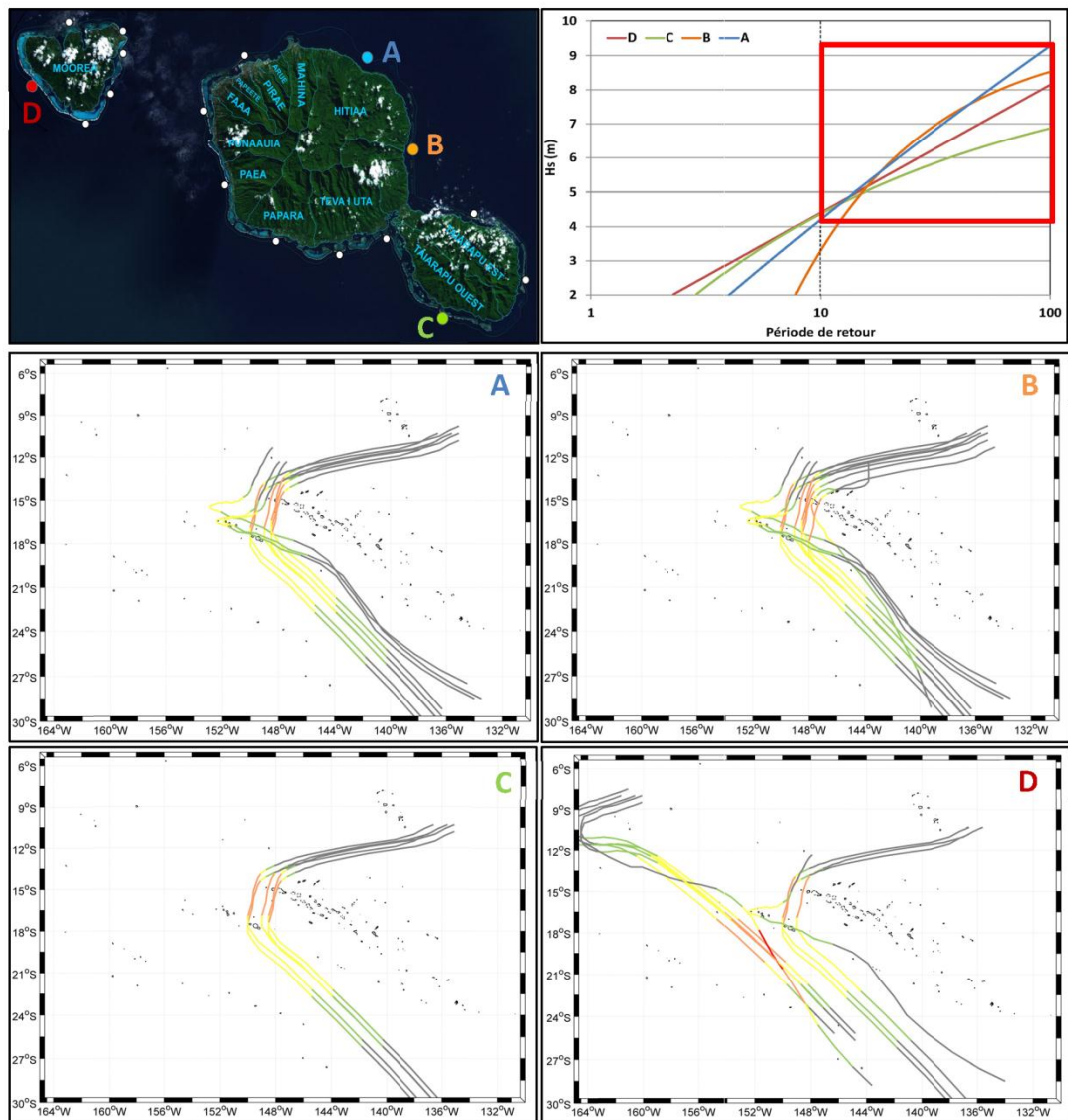


Figure 43. Exemples de distributions théoriques de Hs pour 4 points de Tahiti et Moorea et trajectoires associées aux évènements situés au dessus de la valeur décennale en chaque point.

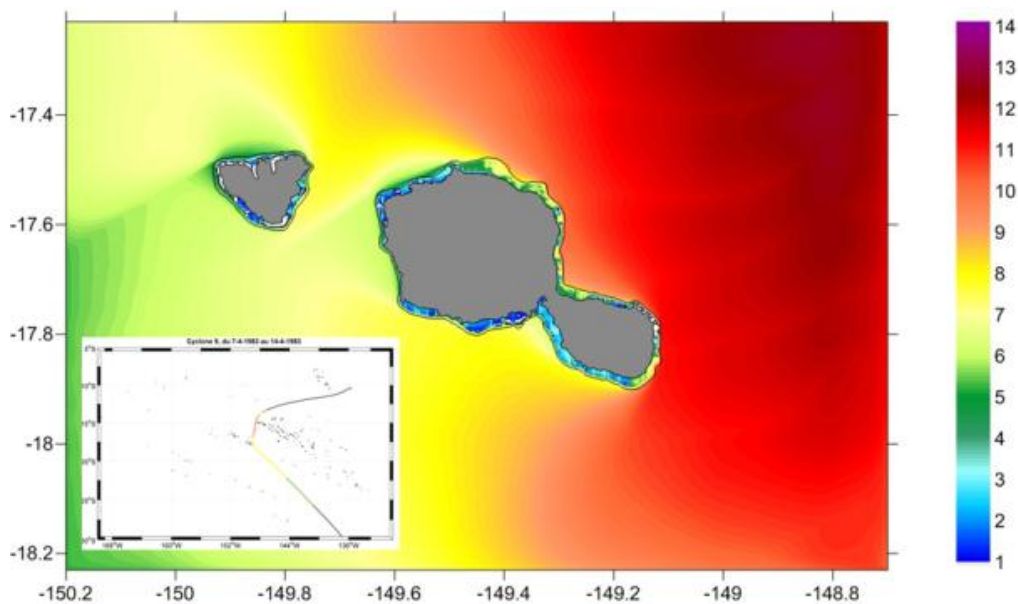


Figure 44. Hauteur de houle maximale calculée pour le cyclone Veena (1983) autour de Tahiti et Moorea

Synthèse

Sur les houles

Les résultats sur les houles cycloniques extrêmes sont synthétisés sur la Figure 45 (pour les houles d'ordre décennal) et la Figure 46 (pour les houles d'ordre centennal). De même que pour les houles saisonnières, le faible échantillonnage des données disponibles engendre de fortes incertitudes sur les résultats obtenus. Ceux-ci sont donc à prendre avec précaution et il est conseillé de garder une marge de sécurité en cas d'utilisation des résultats pour des études d'aléa.

Si les façades orientées vers le sud-ouest sont les plus fréquemment soumises aux houles cycloniques, celles qui sont exposées vers le nord sont les plus vulnérables en cas de passage d'un cyclone à proximité directe des îles car elles font face à l'axe de propagation principal des houles (pour une trajectoire type nord-sud). Ces façades sont donc potentiellement moins fréquemment exposées mais de manière plus violente.

Les résultats présentés ci-dessus ont été obtenus avec l'échantillon complet de cyclones (historiques et synthétiques). Afin d'évaluer la cohérence des résultats avec l'échantillon historique de référence, les mêmes statistiques ont été calculées avec les cyclones historiques seuls. De manière générale, les valeurs centennales obtenues ont tendance à être légèrement rehaussées (entre +0m et +1m) en rajoutant les cyclones synthétiques mais les résultats sont assez cohérents entre les deux échantillons. La différence la plus notable se situe au niveau des secteurs nord de Tahiti et Moorea qui apparaissent comme peu exposés avec l'échantillon historique et très fortement exposé avec l'échantillon complet. En effet, sur les 30 années historiques utilisées,

aucun cyclone n'a traversé les îles de Tahiti et Moorea. Or, les façades nord sont particulièrement exposées dans ce cas car elles font face à l'axe de propagation principal de la houle (pour une trajectoire type nord-sud). L'échantillon synthétique a permis d'envisager la traversée de Tahiti et Moorea par des cyclones tels que Veena.

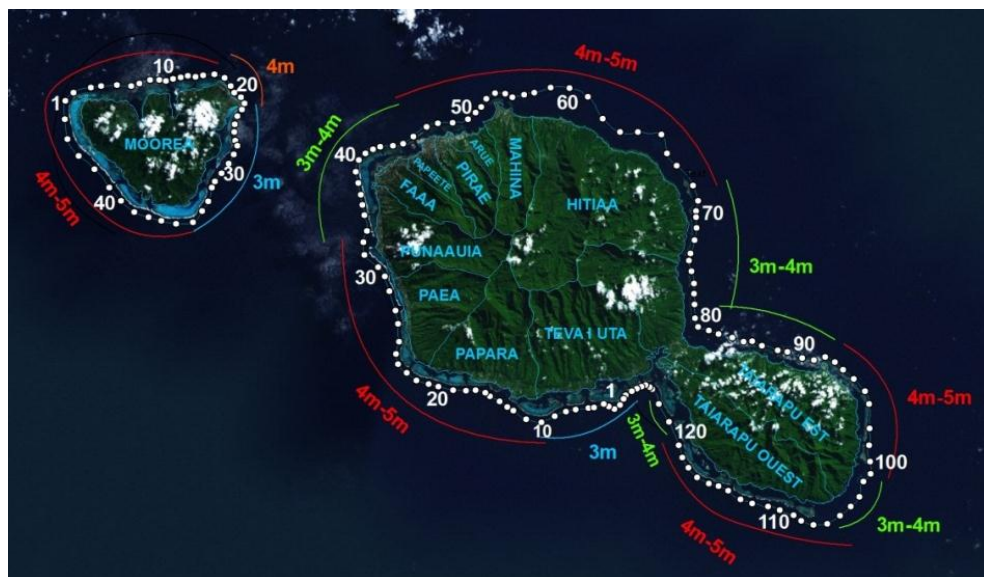


Figure 45. Synthèse des valeurs de référence de H_s pour un ordre de grandeur décennal. Les périodes pic associées ne sont pas indiquées car elles sont très variables.

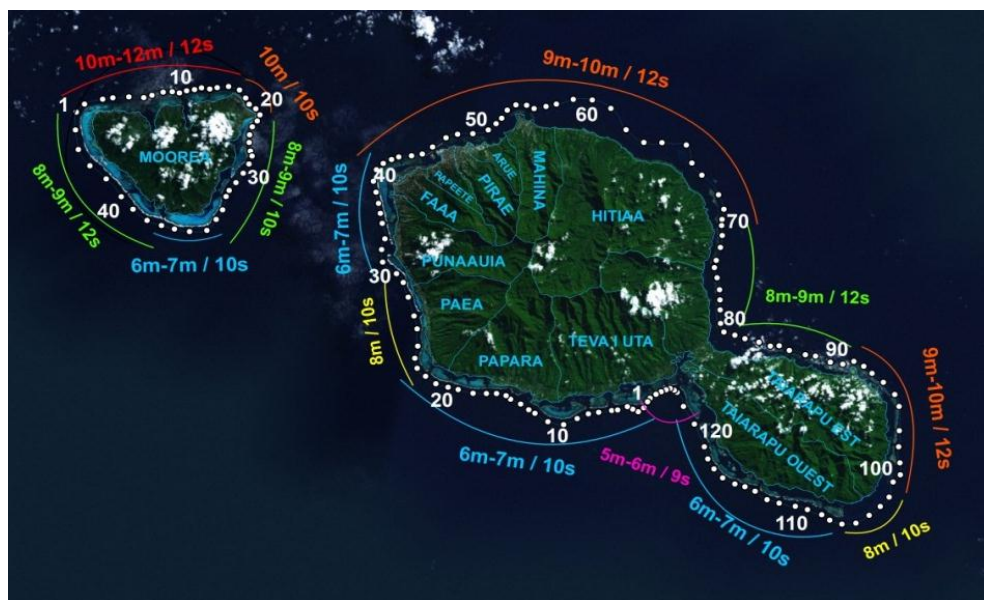


Figure 46. Synthèse des valeurs de référence de H_s pour un ordre de grandeur centennal et valeurs de période pic associées.

Nos résultats peuvent être comparés à ceux des travaux du bureau d'étude BAIRDS (2005) réalisée pour le projet (non abouti) de port à Faratea (communication personnelle). Ce secteur est situé vers le point n°80 sur la Figure 38. Les valeurs calculées dans notre étude s'échelonnent entre 3m et 4m, pour un ordre décennal, et entre 8m et 9m, pour un ordre centennal. Les résultats obtenus par BAIRDS sont inférieurs d'environ 1m mais du même ordre de grandeur. Les valeurs préconisées dans leur étude sont d'environ 2.1m pour une période de retour décennale et 7.4m pour une période de retour centennale. La présente étude est donc plus conservative.

Sur les surcotes atmosphériques

Si l'on ne considère que le phénomène de baromètre inverse, la surcote atmosphérique correspond à +1cm par hectopascal de dépression atmosphérique. L'échantillon utilisé, composé de cyclones historiques et synthétiques, représente environ 120 ans de données (30 ans historiques + 3 fois 30 ans fictifs). Dans les champs de pression paramétriques calculés avec cet échantillon, la dépression minimale dans le secteur de Tahiti et Moorea (centré sur Tahiti +/-1° en latitude et longitude) a une amplitude d'environ 50-60 hPa, soit une surcote de l'ordre de 50-60cm.

4.2.2. Tubuai

La Figure 47 présente les valeurs de houles décennales, cinquantiennes et centennales calculées avec l'échantillon complet des cyclones historiques et synthétiques pour Tubuai.

Ici, les secteurs déterminés pour les houles décennales et centennales sont les mêmes. Les valeurs de houle décennale s'échelonnent de 2m à 6m et celles de houle centennale varient entre 4m et 11m. De manière générale, les valeurs obtenues sont un peu plus faibles que pour les îles de Tahiti et Moorea. En effet, même si Tubuai a vécu un événement très extrême lors du passage du cyclone Oli, les cyclones historiques (dans les 30 dernières années) sont globalement de plus faible intensité. Les événements qui sont passés à l'ouest de l'île sont pour beaucoup des dépressions tropicales n'ayant pas atteint le stade de cyclone.

Tubuai étant relativement isolé, et sa géométrie étant plus simple que pour Tahiti et Moorea (qui jouent un rôle d'écran réciproque face aux houles), on distingue un découpage plus direct entre les façades nord, sud et latérales :

La côte nord de Tubuai est la plus exposée aux houles cycloniques avec des **valeurs décennales de 5m à 6m et des valeurs centennales de 10m à 11m**. Les périodes associées à ces houles sont plus importantes que pour les deux îles de l'archipel de la Société (**environ 13s pour les houles décennales et 15s pour les houles centennales**) car les îles de l'archipel des Australes sont souvent situées en queue de cyclone et le fetch parcouru par les houles cycloniques est généralement plus important que pour les îles de la Société.

Les côtes est/ouest sont exposées de manière assez similaire avec des **valeurs décennales allant de 3m à 4m** et des **valeurs centennales de 6m à 8m**. Les périodes associées sont de l'ordre de **7s et 10s** respectivement.

La côte sud est la moins exposée car les houles cycloniques sont très fortement réfractées avant d'atteindre la côte. La **valeur décennale de Hs se situe entre 3m et 4m** et la **valeur centennale entre 4m et 6m** pour des **périodes d'environ 6s et 9s** respectivement.

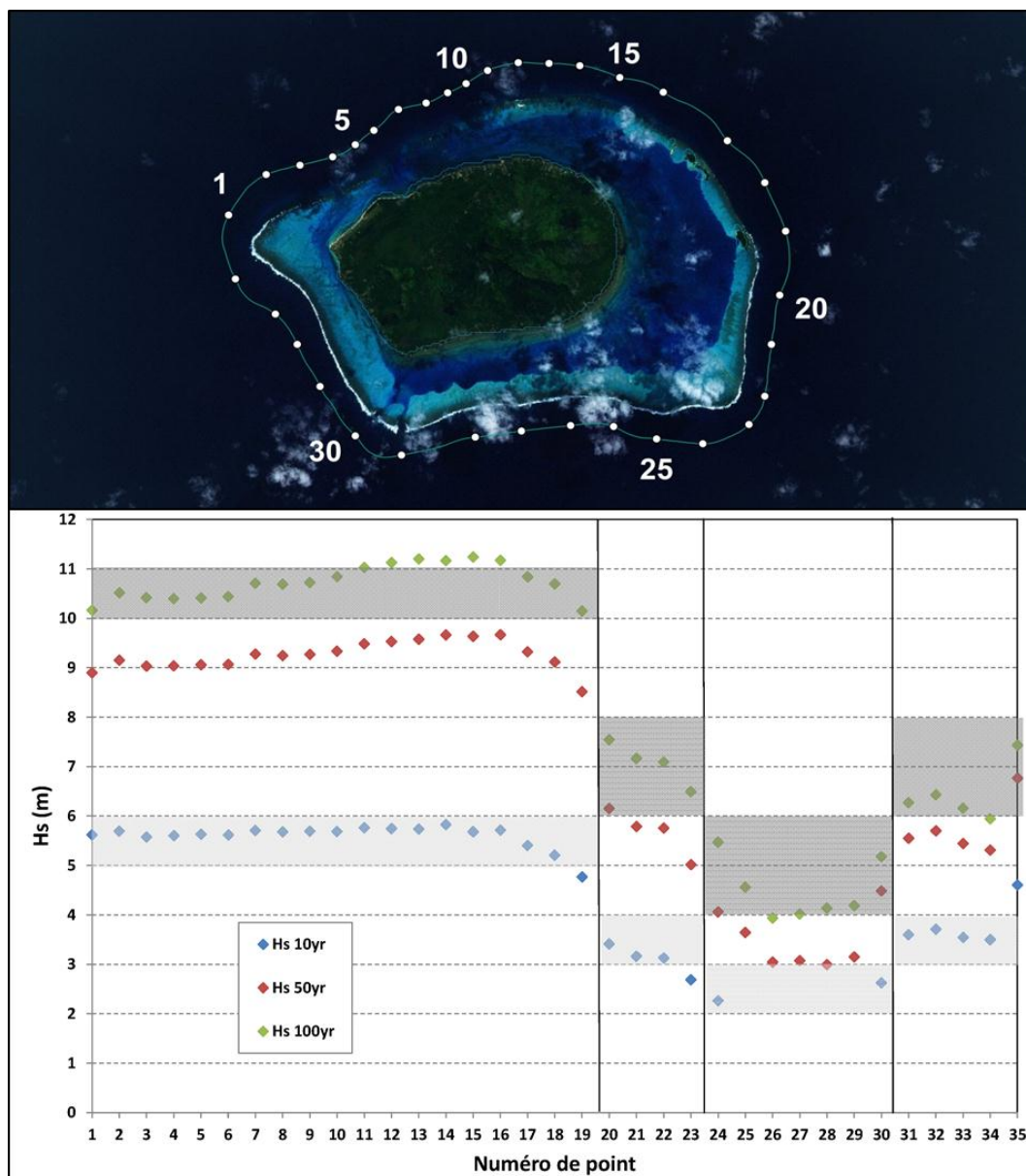


Figure 47. Résultats de l'analyse statistique au niveau de l'isobathe 200m à Tubuai.

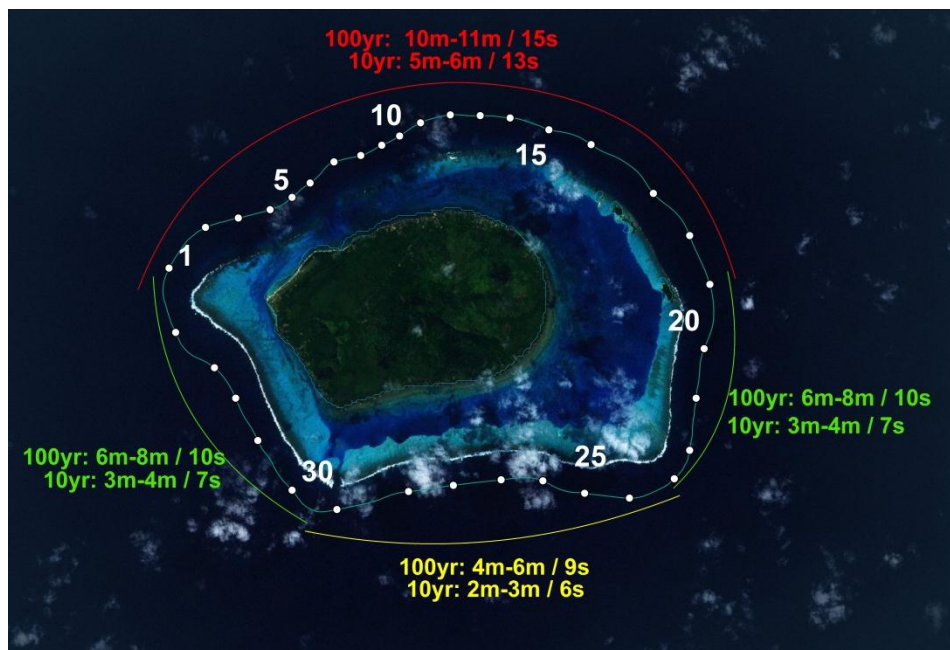


Figure 48. Synthèse des valeurs de référence de Hs pour un ordre de grandeur centennal et décennal et valeurs de période pic associées.

Pour la surcote atmosphérique, en appliquant la même méthode que pour le secteur de Tahiti et Moorea, la dépression minimale dans le secteur de Tubuai (centré sur Tubuai +/-1° en latitude et longitude) a une amplitude d'environ 60-70 hPa, soit une surcote de l'ordre de 60-70cm. La différence observée avec la valeur maximale de surcote calculée pour Tahiti/Moorea est due au passage du cyclone intense Oli à proximité de Tubuai dans les données historiques utilisées.

4.3. SYNTHÈSE SUR LES HOULES CYCLONIQUES ET SAISONNIÈRES

Des ordres de grandeur de houles et de surcotes ont été établis pour les événements cycloniques et saisonniers pour des périodes de retour d'un ordre décennal et centennal. Celles-ci permettent de pondérer, en fonction des façades considérées, le scénario de référence considéré de façon uniforme dans les projets de PPRL (Hs~12m / Tp~13s) et de prendre en compte les événements saisonniers en plus des événements cycloniques.

Pour les houles les plus fréquentes (de l'ordre du décennal), les événements cycloniques sont dominants pour les façades orientées au nord et à l'ouest, à Tahiti et Moorea comme à Tubuai. En revanche, pour les façades sud et sud-est des îles, les houles d'alizés du sud-est et les houles australes peuvent avoir des valeurs décennales plus importantes que les houles cycloniques :

- ✓ A Tahiti, houles australes, houles d'alizés et houles cycloniques sont du même ordre de grandeur (environ 4.5m pour les houles saisonnières et entre 3m et 5m pour les houles cycloniques. Les houles australes ayant des périodes très

longues (de l'ordre de 15s), elles peuvent être plus énergétiques que les houles cycloniques et doivent être prises en compte dans les projets de dimensionnement.

- ✓ A Tubuai, les houles d'alizés du sud-est et les houles australes ($H_s \sim 5\text{-}6\text{m}$ / $T_p \sim 10\text{s-}15\text{s}$) sont clairement dominantes par rapport aux houles cycloniques ($H_s \sim 2\text{m-}3\text{m}$ / $T_p \sim 6\text{s}$) pour cette période de retour.

Pour les houles de moindre occurrence (de l'ordre du centennal), les événements cycloniques restent dominants pour toutes les façades autour de Tahiti et Moorea. Pour Tubuai en revanche, les houles australes et les houles d'alizés du sud-est ont des valeurs centennales de H_s du même ordre de grandeur que les houles cycloniques au niveau de la façade sud (environ 6m). La période des houles australes est cependant plus longue que pour les houles cycloniques, ce qui les rend potentiellement plus dommageables sur ce secteur.

En ce qui concerne les surcotes atmosphériques, un ordre de grandeur de 50cm pour un scénario centennal paraît assez réaliste à la fois pour le secteur de Tahiti/Moorea et le secteur de Tubuai.

Ces résultats sont à prendre avec précaution car de nombreuses incertitudes persistent quant au jeu de données utilisé pour les cyclones comme pour les houles saisonnières :

- ✓ En ce qui concerne les cyclones, les données historiques ne couvrent qu'une trentaine d'années, ce qui constitue une période très courte pour caractériser une activité cyclonique (surtout aussi peu fréquente que celle de la Polynésie). Même si des cyclones synthétiques ont été ajoutés, l'échantillon final reste représentatif de l'échantillon historique utilisé. La méthode employée ne permet notamment pas d'envisager de cyclones plus intenses que ceux présents dans les données historiques. Or, d'après Larrue et al. (2010), les cyclones connus comme étant les plus meurtriers ont eu lieu au début du siècle (dont les cyclones de 1903 et 1906). Au-delà de la représentativité de l'échantillon utilisé, il existe également de nombreuses incertitudes sur les caractéristiques des cyclones historiques. Les paramètres descriptifs des cyclones peuvent varier d'une base à l'autre et certains (comme la taille des cyclones caractérisée par le rayon de vent maximum) sont manquants dans les bases de données pour les cyclones les plus anciens. Ces paramètres sont pourtant nécessaires pour avoir une représentation fidèle des événements historiques.
- ✓ Pour les houles saisonnières, la période temporelle utilisée est également limitée à une dizaine d'années. Les valeurs des extrêmes sont donc indicatives et il est essentiel de bien considérer les intervalles de confiance fournis pour une utilisation ultérieure de ces résultats. De plus, la classification des houles a aussi ses limites et même si un effort particulier a été fait pour ajuster manuellement les jeux de données, une certaine hétérogénéité peut persister comme on l'a vu notamment pour le cas des houles longues et d'alizés du nord à Tubuai.

Ces incertitudes sont à prendre en compte dans la réutilisation des résultats de l'étude (pour le dimensionnement d'ouvrages ou la cartographie des risques dans les PPRN). Les résultats présentés ici doivent être considérés comme des ordres de grandeur, et

non des valeurs précises, et des marges de sécurité doivent être prises en compte. De plus, la méthode employée consistant à traiter séparément les événements de différentes origines (houles cycloniques et houles saisonnières), la conjonction de plusieurs événements n'est pas prise en compte. Or, malgré l'indépendance des phénomènes, des événements de houles saisonnières extrêmes (notamment les houles d'alizés et les houles du nord) pourraient très bien coïncider avec des événements cycloniques.

4.4. CHOIX DES SCENARIOS POUR LES 4 SITES PILOTES

Ce paragraphe présente les scénarios retenus pour la modélisation de la submersion sur les 4 sites pilotes. Ceux-ci sont représentatifs d'un ordre de grandeur centennal pour un événement cyclonique. En effet, pour les sites choisis (situés sur les côtes nord des îles ou dans la baie de Teva I Uta), les houles cycloniques se sont avérées dominantes par rapport aux houles saisonnières (et sont accompagnées d'une surcote atmosphérique). Afin de prendre en compte l'impact potentiel du changement climatique, 2 scénarios sont proposés pour chaque site, un scénario dit « actuel » et un scénario prenant en compte l'élévation du niveau marin projetée à l'horizon 2100.

- ✓ Pour les vagues, les hauteurs et les périodes sont issues de l'analyse statistique à 200m de fond avant le récif barrière. La direction est considérée comme frontale.
- ✓ La surcote atmosphérique prise en compte est de 50cm.
- ✓ La valeur d'élévation du niveau marin est de 50cm. Elle correspond aux projections les plus récentes à l'horizon 2100 d'après l'étude de Slangen et al. (2011).
- ✓ Le niveau de marée considéré correspond aux plus hautes mers astronomiques renseignées dans les cartes bathymétriques du SHOM.

Tableau 12. Synthèse des scénarios choisis pour la modélisation de la submersion pour une période de retour d'ordre centennal (conditions avant le récif barrière).

	Maharepa	Matavai	Teva I Uta	Tubuai nord
Niveau de marée (cf niv. moyen)	0.1m	0.1m	0.1m	0.6m
Surcote atmosphérique	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
ENM (~2100)	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
Vagues (Hs/Tp)	12m / 12s	10m / 12s	6m / 9s	11m / 15s

5. Modélisation de la submersion sur les sites pilotes

Ce paragraphe présente les résultats de la modélisation de la submersion en 2D pour les scénarios de type centennal définis au paragraphe 4.4 sur les 3 sites de Maharepa (5.1), Teva I Uta (5.2) et Matavai (5.3). L'objectif est de préciser la zone d'aléa fort sur ces sites pilotes en utilisant les dernières données disponibles. Les principales évolutions par rapport au zonage initial (issu d'ARAI1) concernant :

- ✓ **Les données topographiques** : Les données utilisées dans la présente étude sont les MNT du service de l'urbanisme (à une maille de 2m à 5m) alors que les cartographies d'ARAI1 ont été réalisées avec des points cotés.
- ✓ **Les scénarios de référence** : Les scénarios utilisés ici sont issus d'une analyse statistique alors que ceux d'ARAI1 correspondent à un même scénario déterministe ($H_s=12m$, $T_p=13s$).
- ✓ **La méthode de calcul de la submersion et de cartographie de l'aléa** : Dans cette étude, la submersion est modélisée avec un code de calcul vague-à-vague en 2D et les niveaux d'aléa sont ensuite calés en croisant les résultats de hauteurs d'eau et de vitesses maximales (cf. Figure 49). Dans ARAI1, la submersion a été calculée par un croisement entre niveau d'eau en mer et topographie à terre et les niveaux d'aléa ont été calibrés en fonction de la hauteur de submersion à terre uniquement.

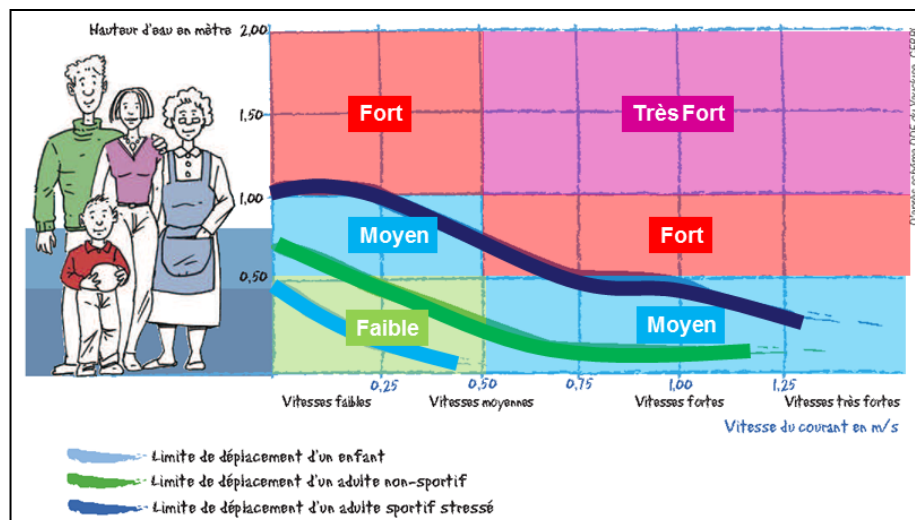


Figure 49. Méthode de définition des zones d'aléa par croisement hauteur d'eau – vitesse d'écoulement pour le scénario de référence.

La modélisation de la submersion avec des modèles vague-à-vague en 2D est particulièrement complexe pour le type de littoral rencontré en Polynésie. En effet, la présence de récifs (barrière et frangeant) multiplie les zones de déferlement et les très fortes pentes présentes sur les tombants induisent des problèmes de stabilité numérique. De plus, la variabilité du type de côte (et la présence de passes) engendrent des conditions limites au large hétérogènes.

La modélisation de la submersion est faite en 2 étapes, à l'aide de 2 modèles emboîtés :

- ✓ Tout d'abord, le modèle SWAN est implanté avant le récif barrière. Les caractéristiques des scénarios (vagues et niveau d'eau) sont imposées en entrée et on modélise la propagation des vagues dans le lagon ainsi que le setup engendré par le déferlement des vagues sur le récif barrière. Le calcul est fait en mode stationnaire avec les valeurs des paramètres par défaut de SWAN.
- ✓ Puis, le code SWASH est implanté avant le récif frangeant. En entrée, on impose le niveau d'eau correspondant au scénario ainsi que les caractéristiques des vagues et le setup (lié au premier déferlement sur le récif) calculés par SWAN à l'intérieur du lagon. SWASH calcule la propagation et le déferlement des vagues sur le récif frangeant (de même que le setup associé) ainsi que l'inondation à terre. La durée du calcul est fixée à 2 heures et les paramètres par défaut sont utilisés.

Les scénarios modélisés étant fictifs, il n'est pas possible de valider les modélisations réalisées avec SWASH à l'aide de mesures in-situ. Afin de contrôler les calculs effectués avec SWASH, le setup lié au déferlement au niveau de la côte calculé par SWASH a été comparé avec celui calculé par SWAN dans la première simulation.

Dans les chapitres suivants, les résultats sont présentés selon des profondeurs (en mer) pour les modélisations effectuées avec SWAN et pour les altitudes (à terre) pour les modélisations effectuées avec SWASH.

Afin de faciliter la lecture des cartes de niveau d'eau à terre calculé par SWASH, plusieurs isocontours topographiques sont tracés : le trait bleu foncé correspond à l'altitude atteinte par le niveau de la marée additionné à la surcote atmosphérique (et à l'élévation du niveau de la mer ou ENM pour les scénarios à 2100) et le trait bleu clair correspond à l'altitude atteinte par le niveau de la marée additionné à la surcote atmosphérique (et à l'ENM pour les scénarios à 2100) ainsi qu'au setup généré par le premier déferlement sur le récif barrière. L'isobathe représentée en rouge donne une indication de l'altitude du runup.

5.1. MAHAREPA



Figure 50. Emprise des modèles SWAN et SWASH. Le trait rouge indique l'isobathe 0m et les traits blancs les isobathes -200m, -1m et -10m. Les zones principales de déferlement calculées par SWAN ($0.5 < Q_b < 1$) sont indiquées en blanc.

La Figure 51 présente les hauteurs significatives calculées par SWAN et la Figure 52 le setup correspondant pour le scénario actuel. Les vagues qui déferlent sur le récif barrière engendrent un setup important dans le lagon. Il est d'environ 80cm au niveau de la passe mais atteint 2m à l'est du site là où la pente du tombant externe du récif barrière est très importante. Sur le secteur de Maharepa, le setup est d'environ 1.2m.

Les résultats de la modélisation de la submersion réalisée avec SWASH sont présentés de la Figure 53 à la Figure 55, pour le scénario actuel, et de la Figure 56 à la Figure 58 pour le scénario à 2100. Lors du second déferlement, le setup généré est beaucoup plus faible. Il oscille entre 0cm et 10cm dans les zones situées en face du récif barrière (pour lesquelles les vagues résiduelles dans le lagon sont très petites) et de l'ordre de 20cm en face de la passe. Les zones submergées sont fortement contrôlées par la topographie du site, et l'impact des vagues résiduelles dans le lagon est faible. L'altitude maximale atteinte par l'eau est d'environ 2m pour le scénario actuel et 2.5m pour le scénario à 2100. La vitesse maximale d'écoulement est de l'ordre de 3m/s et est atteinte en face de la passe au niveau du second déferlement.

La topographie extrêmement plate du site induit des zones d'aléa fort très étendues, jusqu'à 200m derrière le trait de côte par endroits.

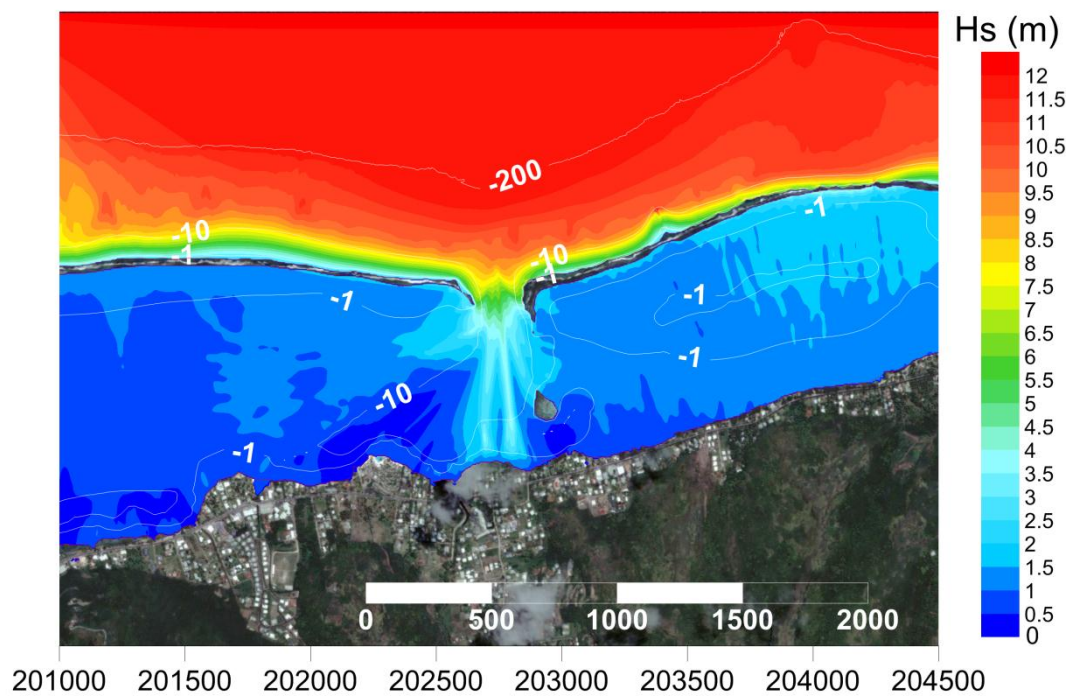


Figure 51. Résultats du modèle SWAN (actuel) : H_s (m). L'échelle est indiquée en mètres

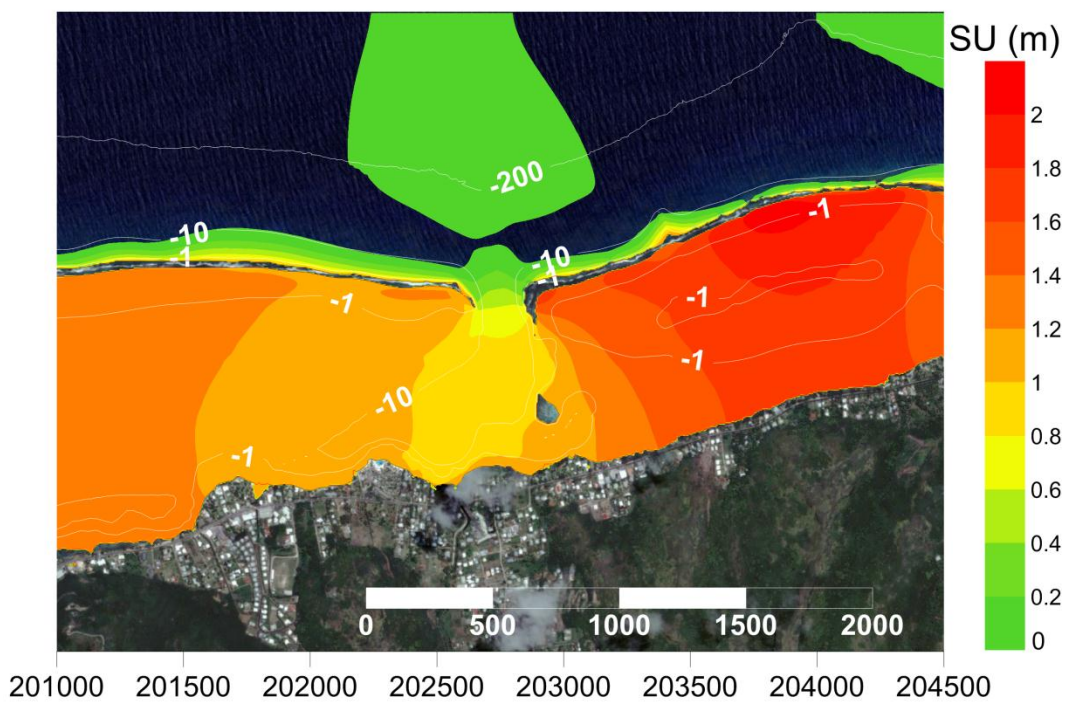


Figure 52. Résultats du modèle SWAN (actuel) : setup (m). L'échelle est indiquée en mètres



Figure 53. Résultats du modèle SWASH (actuel) : Hauteur d'eau maximale : Les traits représentent les isocontours topographiques par rapport au 0 IGN : bleu foncé : 0.6m / bleu clair : 1.8m / rouge : 2m. L'échelle est indiquée en mètres

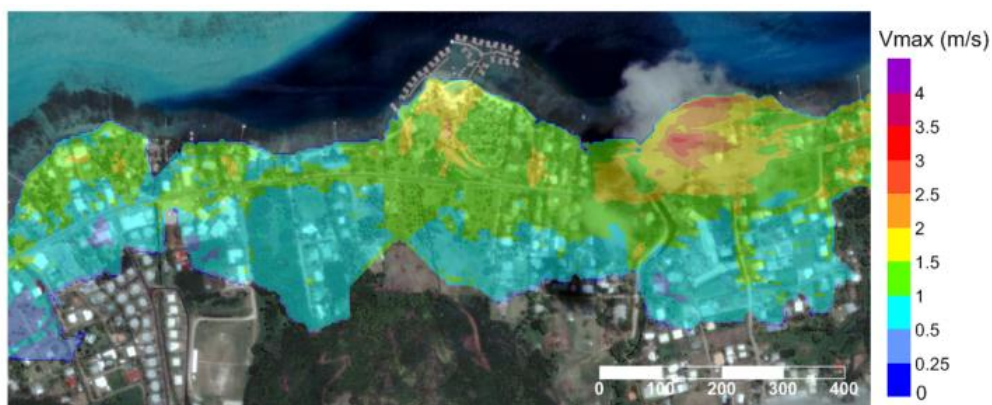


Figure 54. Résultats du modèle SWASH (actuel) : Vitesse maximale (m/s). L'échelle est indiquée en mètres



Figure 55. Carte d'aléa (actuel). L'échelle est indiquée en mètres



Figure 56. Résultats du modèle SWASH (2100) : Hauteur d'eau maximale : Les traits représentent les isocontours topographiques par rapport au 0 IGN : violet : 0.6m / bleu foncé : 1.1m / bleu clair : 2.3m / rouge : 2.5m. L'échelle est indiquée en mètres

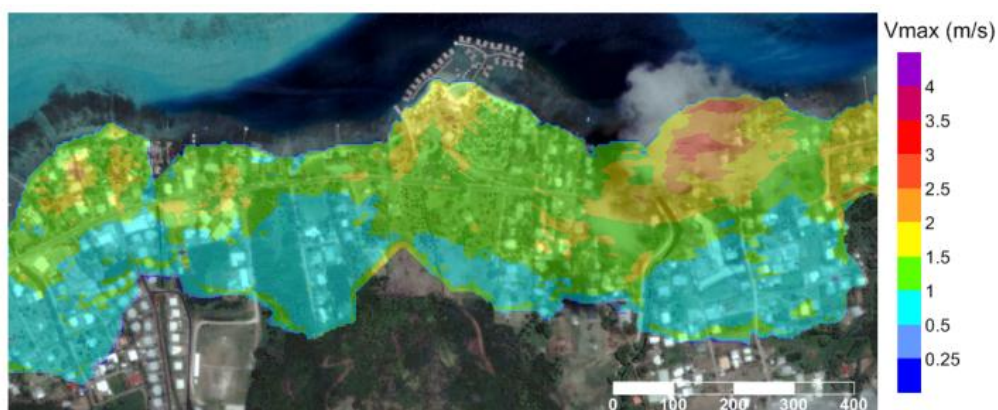


Figure 57. Résultats du modèle SWASH (2100) : Vitesse maximale (m/s). L'échelle est indiquée en mètres



Figure 58. Carte d'aléa (2100). L'échelle est indiquée en mètres

5.2. TEVA I UTA



Figure 59. Emprise des modèles SWAN et SWASH. Le trait rouge indique l'isobathe 0m et les traits blancs les isobathes -20m, -10m et -2m. Les zones principales de déferlement calculées par SWAN ($0.5 < Q_b < 1$) sont indiquées en blanc.

La Figure 60 présente les hauteurs significatives calculées par SWAN et la Figure 61 le setup correspondant pour le scénario actuel. Les vagues qui déferlent sur le récif barrière engendrent un setup assez modeste dans le lagon d'un maximum d'environ 35cm entre les deux passes.

Les résultats de la modélisation de la submersion réalisée avec SWASH sont présentés de la Figure 62 à la Figure 64, pour le scénario actuel, et de la Figure 65 à la Figure 67 pour le scénario à 2100. Lors du second déferlement, le setup généré est quasi nul car les vagues résiduelles dans le lagon sont très petites. Les zones submergées correspondent aux zones situées sous l'altitude correspondant à la somme du niveau de marée additionnée à la surcote atmosphérique (+ l'ENM pour le scénario à 2100) et au setup dans le lagon (isobathe en bleu clair). Les vagues résiduelles dans le lagon n'augmentent pas l'extension des zones submergées même si elles créent des courants de l'ordre de 1.5m/s (pour les deux scénarios). L'altitude maximale atteinte par l'eau est d'environ 0.95m pour le scénario actuel et 1.35m pour le scénario à 2100.

Les zones d'aléa fort calculées sont moins étendues qu'à Maharepa en raison de la topographie plus escarpée et du scénario de référence moins agressif en termes de

vagues. Elles sont plus étendues au niveau des zones basses situées aux embouchures.

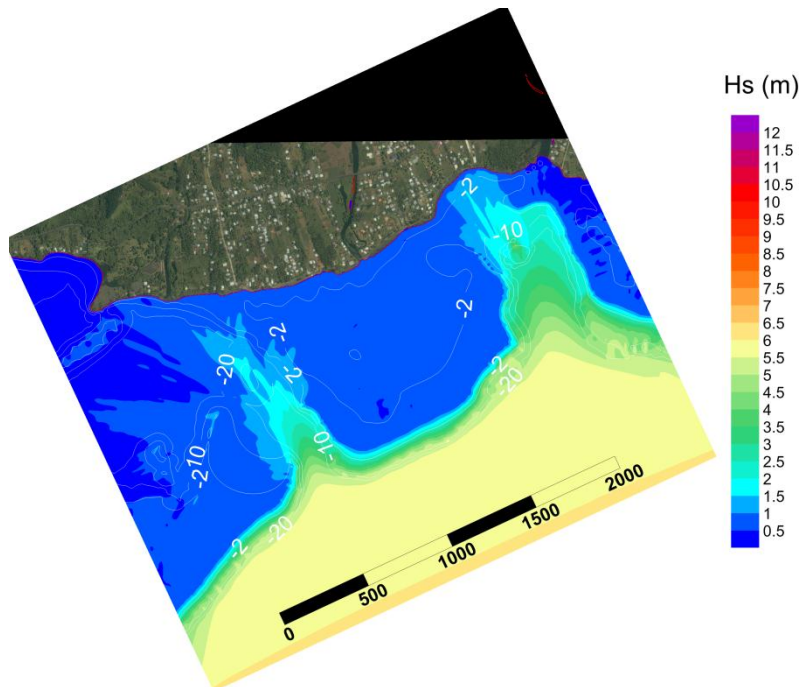


Figure 60. Résultats du modèle SWAN (actuel) : Hs (m). L'échelle est indiquée en mètres

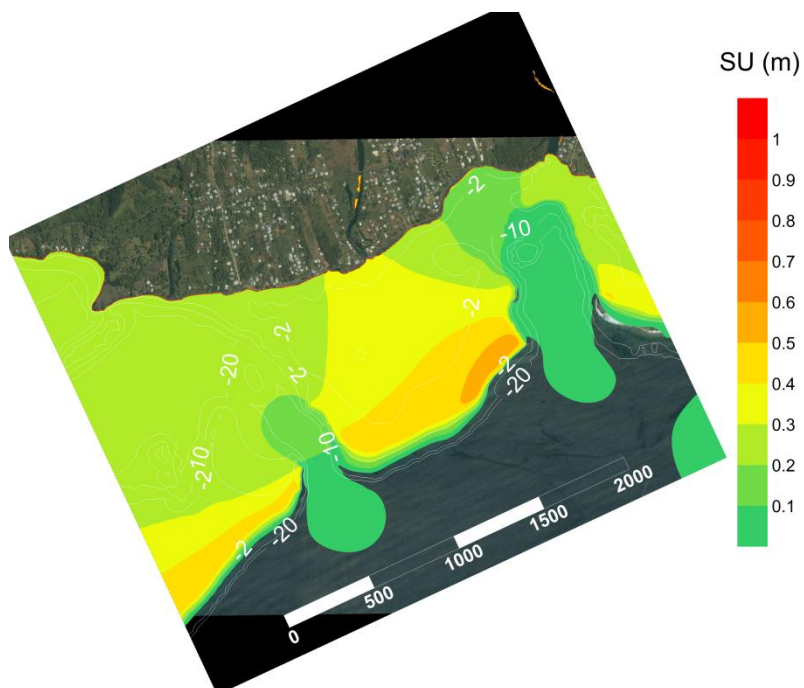


Figure 61. Résultats du modèle SWAN (actuel) : setup (m). L'échelle est indiquée en mètres

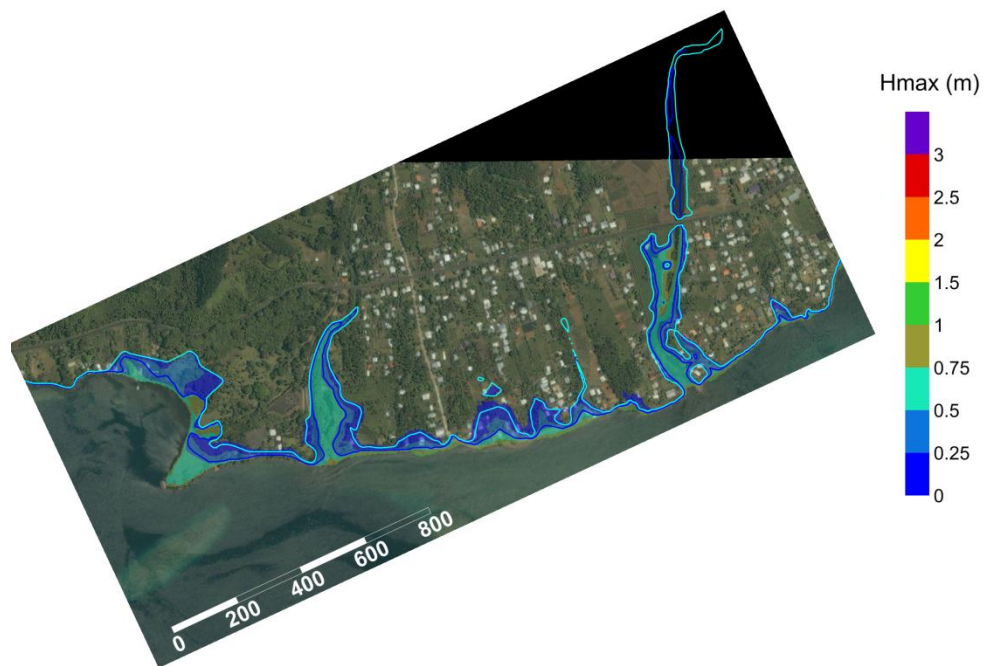


Figure 62. Résultats du modèle SWASH (actuel) : Hauteur d'eau maximale : Les traits représentent les isocontours topographiques par rapport au 0 IGN : bleu foncé: 0.6m / bleu clair : 0.95m. L'échelle est indiquée en mètres.

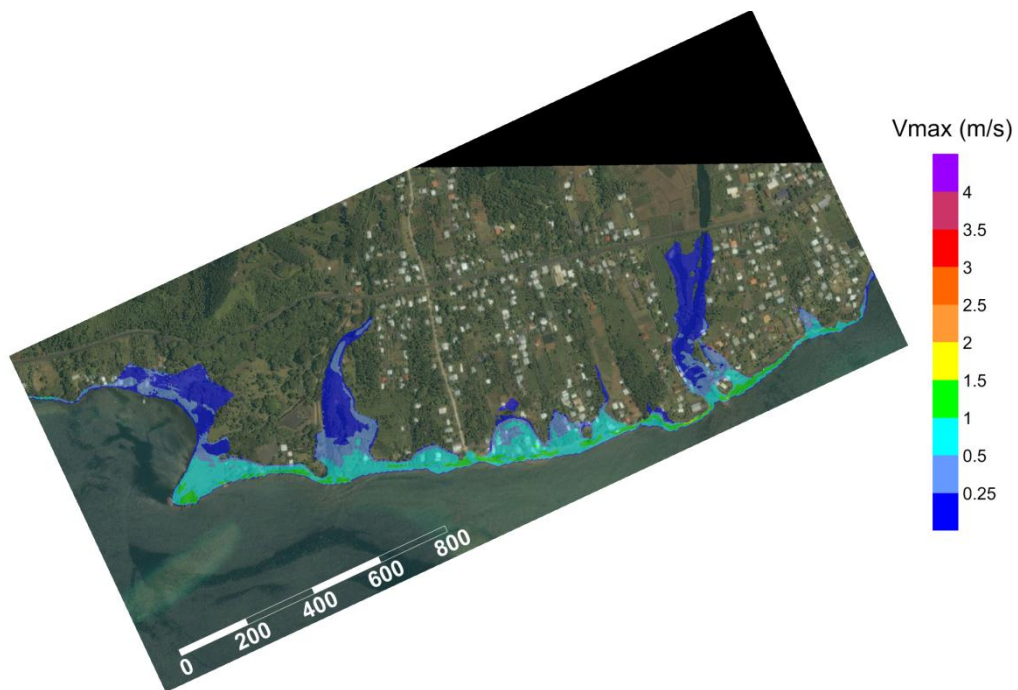


Figure 63. Résultats du modèle SWASH (actuel) : Vitesse maximale (m/s). L'échelle est indiquée en mètres.

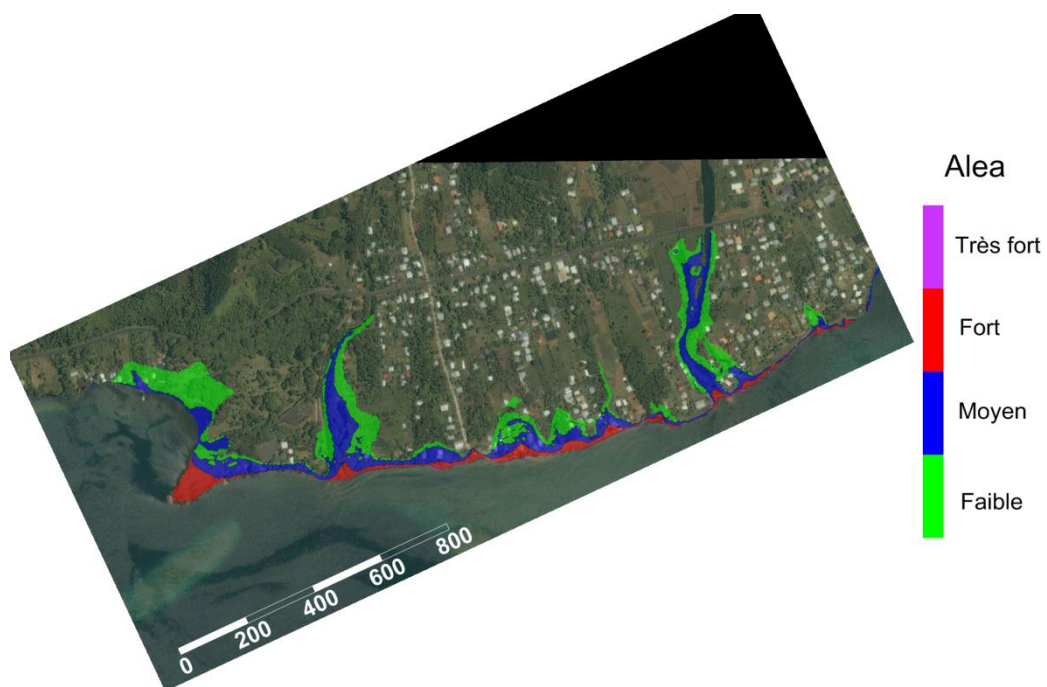


Figure 64. Carte d'aléa (actuel). L'échelle est indiquée en mètres.

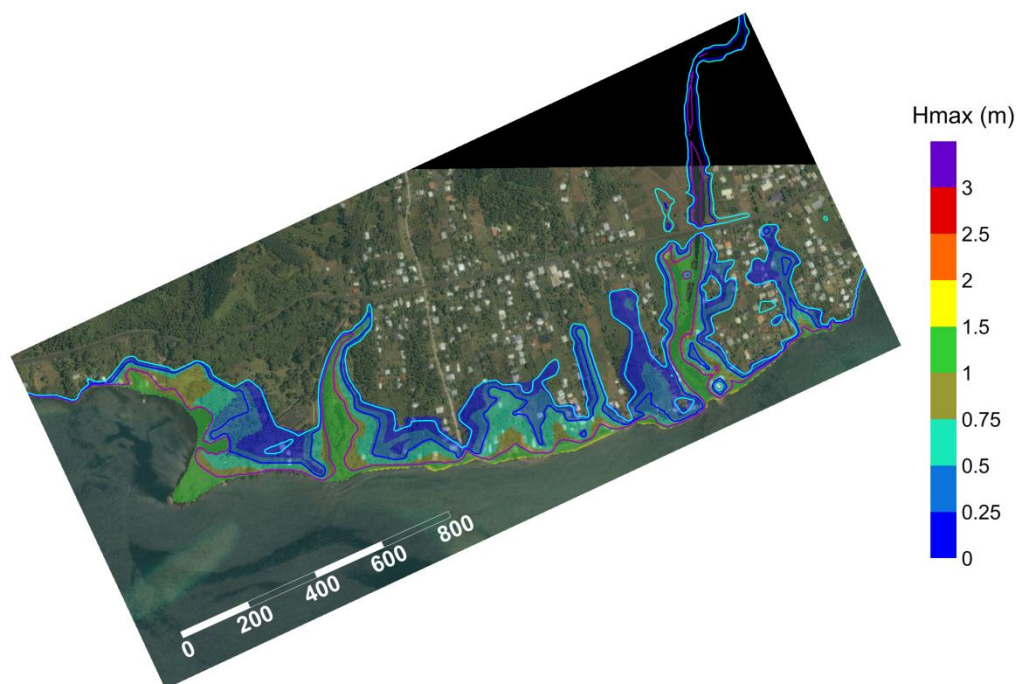


Figure 65. Résultats du modèle SWASH (2100) : Hauteur d'eau maximale : Les traits représentent les isocontours topographiques par rapport au 0 IGN : violet : 0.6m / bleu foncé: 1.1m / bleu clair : 1.45m. L'échelle est indiquée en mètres.

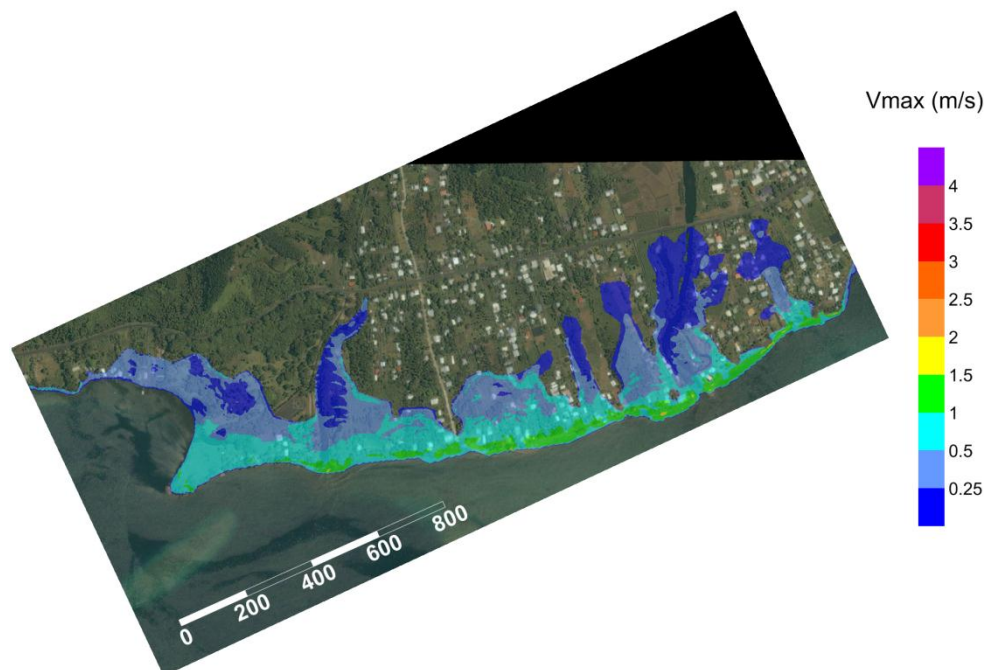


Figure 66. Résultats du modèle SWASH (2100) : vitesse maximale (m/s). L'échelle est indiquée en mètres.

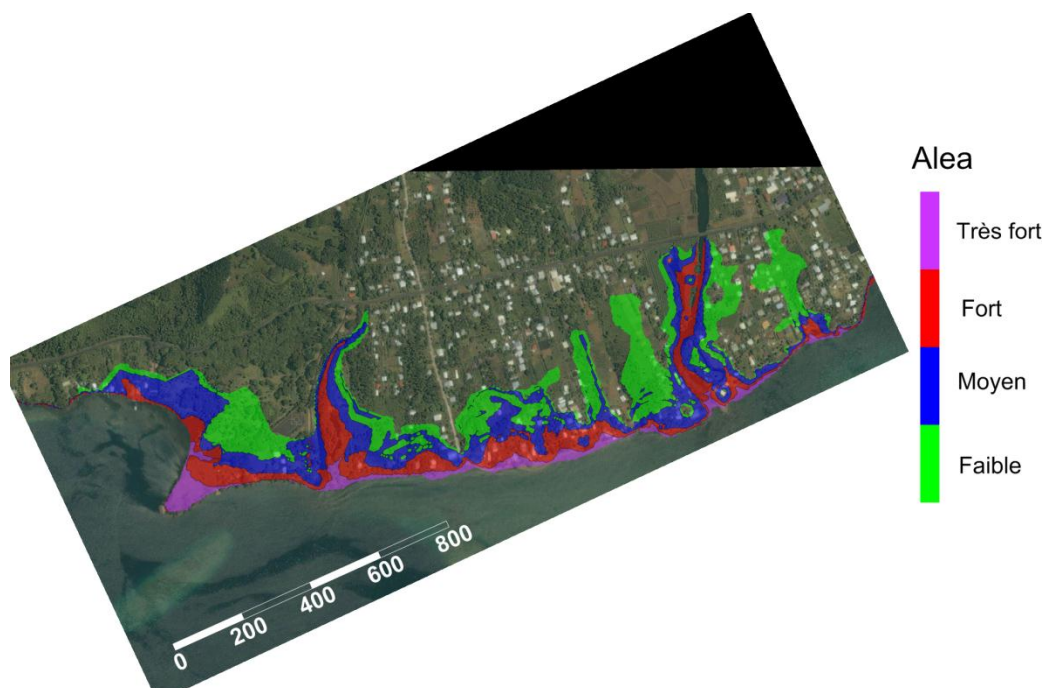


Figure 67. Carte d'aléa (2100). L'échelle est indiquée en mètres.

5.3. MATAVAI



Figure 68. Emprise des modèles SWAN et SWASH. Le trait rouge indique l'isobathe 0m et les traits blancs les isobathes -20m, -10m et -5m. Les zones principales de déferlement calculées par SWAN ($0.5 < Q_b < 1$) sont indiquées en blanc.

La Figure 69 présente les hauteurs significatives calculées par SWAN et la Figure 70 le setup correspondant pour le scénario actuel. Contrairement au site de Maharepa (comprenant un récif barrière), le setup engendré lors du premier déferlement des vagues reste modeste malgré les fortes hauteurs de vagues en entrée. Il est de l'ordre de 25cm au niveau de la frontière du modèle SWASH. En contrepartie, les vagues sont toujours assez importantes aux abords du littoral avec des valeurs de l'ordre de 6m.

Les résultats de la modélisation de la submersion réalisée avec SWASH sont présentés de la Figure 71 à la Figure 73, pour le scénario actuel, et de la Figure 74 à la Figure 76 pour le scénario à 2100. Lors du second déferlement, le setup généré est également important, particulièrement sur les deux plages de part et d'autre de la baie centrale où il atteint près de 70cm supplémentaires. Les secteurs situés en arrière de ces plages sont particulièrement vulnérables à la submersion. Ici, l'impact direct du déferlement des vagues sur le récif frangeant et du jet de rive engendré est beaucoup plus visible que sur les autres sites. Pour 2 heures de simulation, l'altitude maximale atteinte est de l'ordre de 3m pour le scénario actuel et 3.5m pour le scénario à 2100. La vitesse d'écoulement est maximale au niveau des deux plages où elle atteint près des valeurs supérieures à 3m/s (pour les deux scénarios).

Malgré l'altitude atteinte par le niveau d'eau, les zones d'aléa fort restent relativement restreintes en raison de la topographie particulièrement escarpée du site.

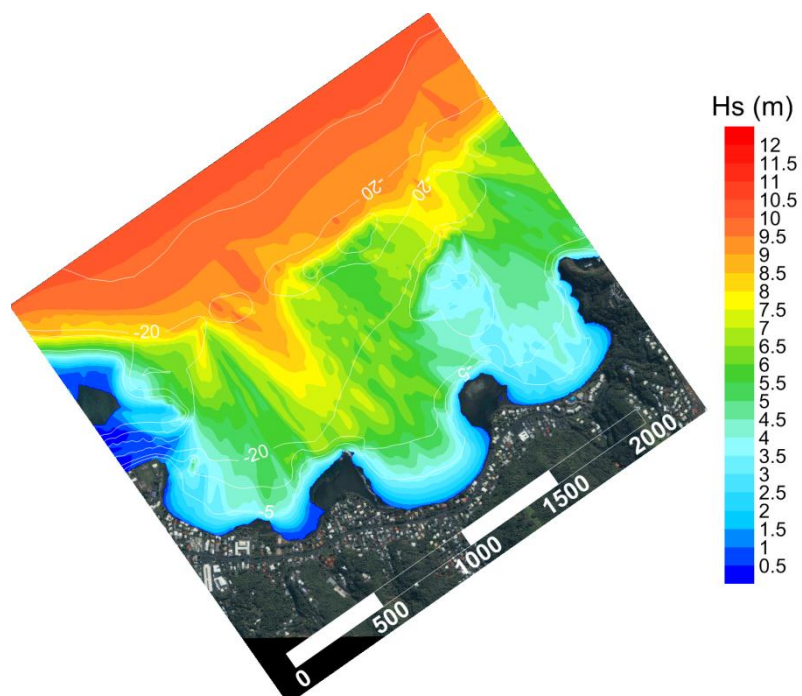


Figure 69. Résultats du modèle SWAN (actuel) : Hs (m). L'échelle est indiquée en mètres

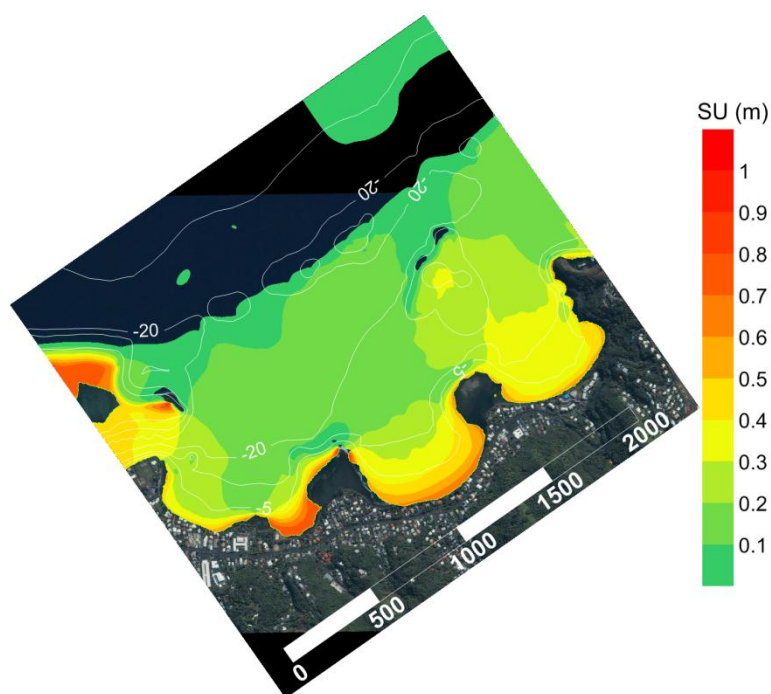


Figure 70. Résultat du modèle SWAN (actuel) : setup (m). L'échelle est indiquée en mètres

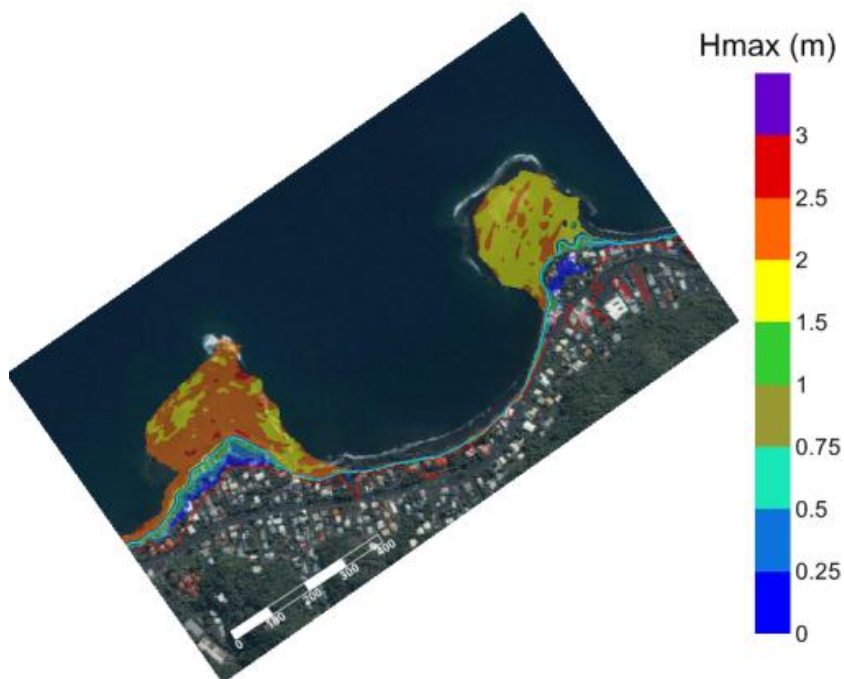


Figure 71. Résultats du modèle SWASH (actuel) : Hauteur d'eau maximale : Les traits représentent les isocontours topographiques par rapport au 0 IGN : bleu foncé : 0.6m / bleu clair : 0.85m / rouge : 3m. L'échelle est indiquée en mètres

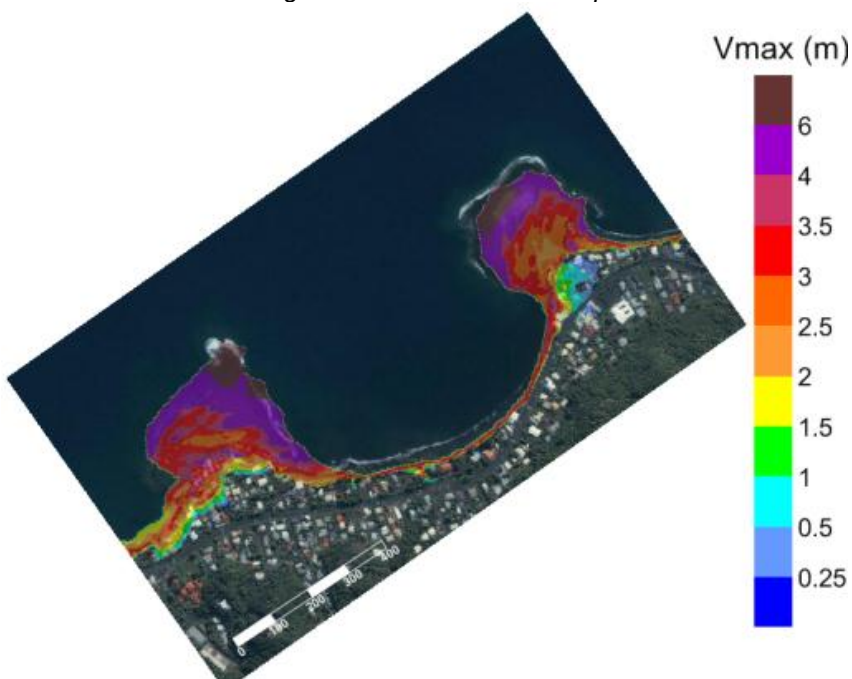


Figure 72. Résultats du modèle SWASH (actuel) : Vitesses max (m/s). L'échelle est indiquée en mètres

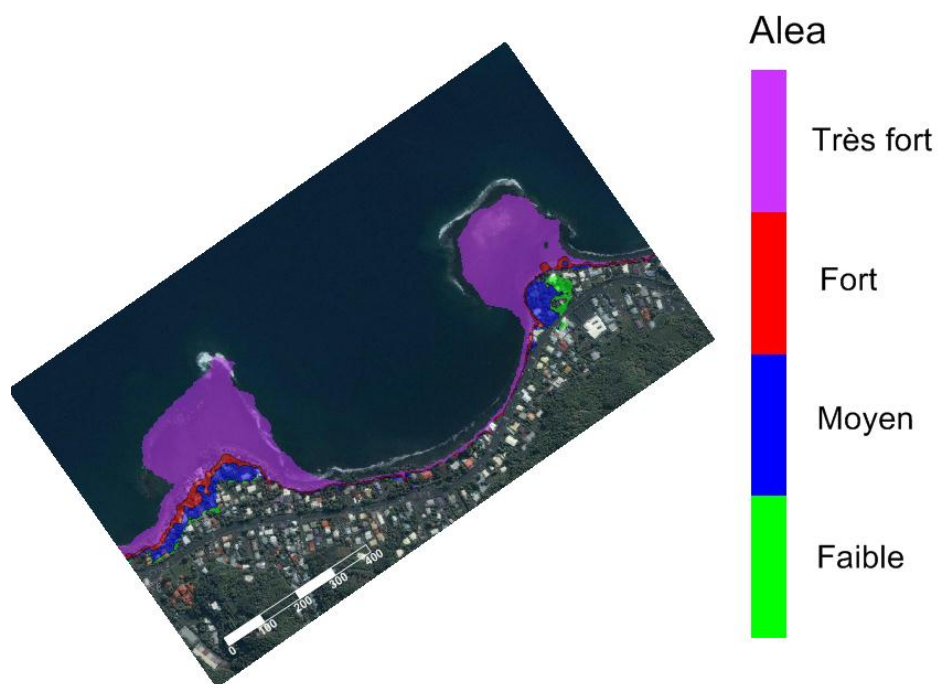


Figure 73. Carte d'aléa (actuel). L'échelle est indiquée en mètres

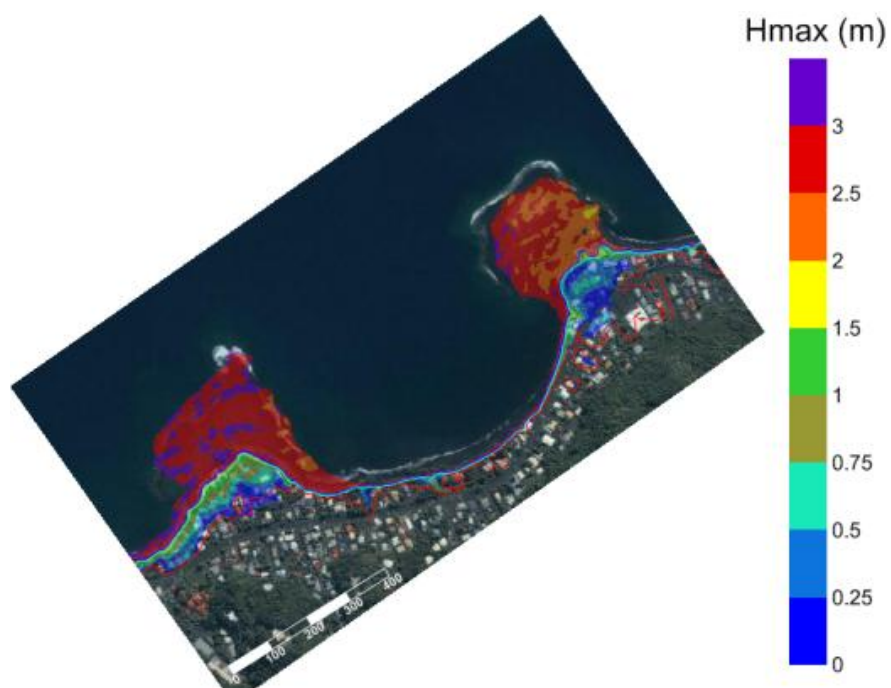


Figure 74. Résultats du modèle SWASH (2100) : Hauteur d'eau maximale : Les traits représentent les isocontours topographiques par rapport au 0 IGN : violet : 0.6m / bleu foncé : 1.1m / bleu clair : 1.35m / rouge : 3.5m. L'échelle est indiquée en mètres

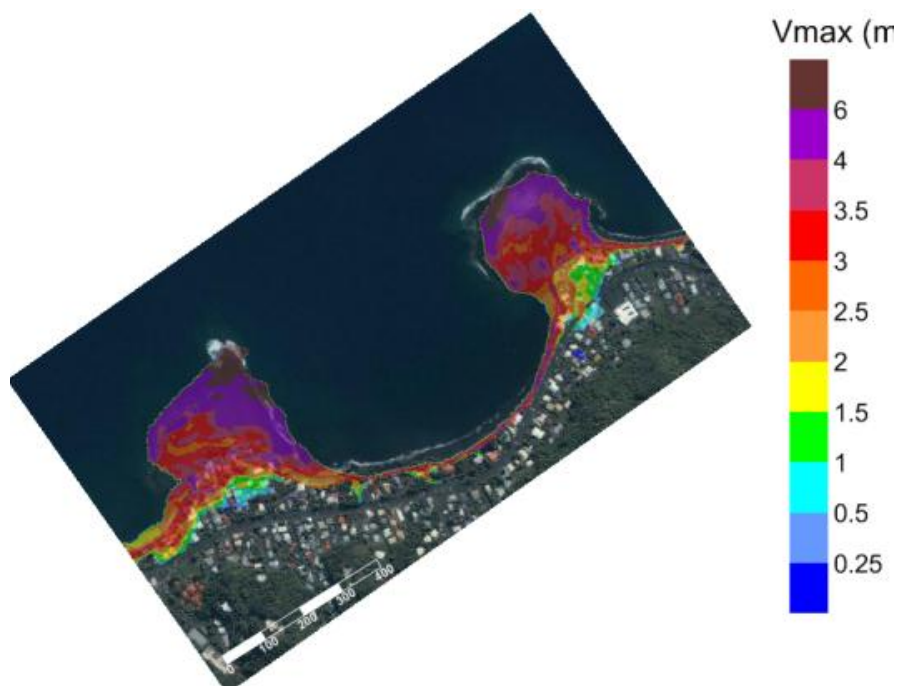


Figure 75. Résultats du modèle SWASH (2100) : Vitesse maximale (m/s). L'échelle est indiquée en mètres

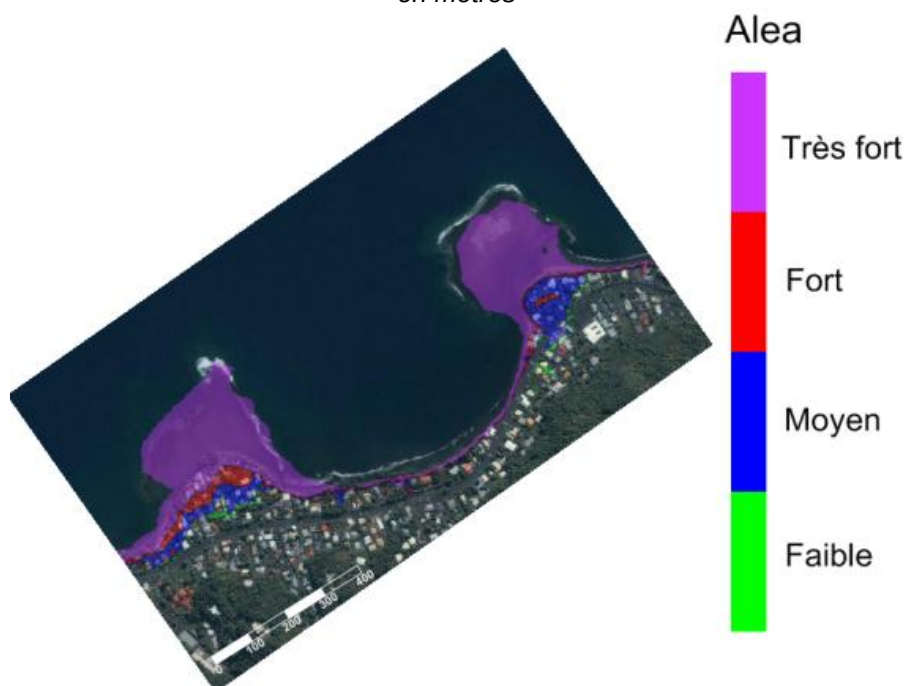


Figure 76. Carte d'aléa (2100). L'échelle est indiquée en mètres

5.4. SYNTHÈSE

Les simulations de la submersion réalisées sur les 3 sites pilotes permettent de conclure que :

- ✓ Pour les sites comprenant un récif barrière (type Maharepa et Teva I Uta) :
 - Le récif barrière offre une protection contre l'impact direct des vagues mais peut engendrer un set-up important dans le lagon. Le niveau de l'aléa submersion marine n'est donc pas systématiquement plus faible pour ce type de site.
 - L'utilisation de modèles vague-à-vague n'est pas systématiquement nécessaire pour calculer la submersion à terre, en particulier pour les sites moyennement ou faiblement exposés aux vagues cycloniques et dont la topographie est relativement linéaire. En effet, pour ce type de site, les vagues résiduelles dans le lagon ont peu d'impact en termes de franchissement. Une méthode adaptée pourrait consister à (1) simuler les vagues et le setup total à la côte - lié au déferlement sur les récifs barrière et frangeant - avec SWAN en utilisant une résolution bathymétrique de l'ordre de 10m et (2) évaluer les hauteurs de submersion par un croisement avec la topographie. Néanmoins, cette méthode n'apporte pas d'indications sur les vitesses d'écoulement.
- ✓ Pour les sites sans récif barrière (type Matavai), qui sont plus exposés aux vagues et aux franchissements par paquets de mer, l'utilisation de modèles vague-à-vagues pour le calcul de la submersion apporte une réelle amélioration par rapport à des méthodes plus simples comme le croisement entre une cote de référence statique et la topographie.

5.5. COMPARAISON AVEC LES CARTES D'ALEA ACTUELLES SUR LES SITES PILOTES

La Figure 77, la Figure 78 et la Figure 79 présentent des exemples de comparaison entre les cartes d'aléa submersion sur les sites de Teva I Uta, Matavai et Maharepa et les cartes d'aléa réalisées dans ARAI1 (comprenant la submersion et la bande d'impact direct des vagues). 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 et la valeur d'élévation du niveau de la mer). Pour le site de Matavai, le scénario est proche mais pour le site de Teva I Uta les vagues sont moins importantes dans la présente étude.
- ✓ Avec des données topographiques différentes. A l'époque d'ARAI1, seuls des points côtés plus ou moins résolus étaient disponibles. Depuis, des MNT à 5m ont été réalisés en 2006 par le service de l'urbanisme. Les différences peuvent être notables, particulièrement en zone littorale.
- ✓ Avec une méthode de calcul de l'inondation différente. Pour ARAI 1, les cartes ont été réalisées en effectuant des croisements entre une cote de référence

avec la topographie alors qu'ici, des modélisations vague-à-vague ont été mises en œuvre.

- ✓ Avec une méthode de classification de l'aléa différente. Pour ARAI1, seule la hauteur de submersion a été prise en compte alors que pour ARAI3 une matrice hauteur d'eau/vitesse d'écoulement a été utilisée.

Sur le site de Teva I Uta (cf. Figure 77), même si le scénario de référence calculé dans ARAI3 est moins intense, l'étendue des zones d'aléa n'est pas systématiquement revue à la baisse :

- L'extension de la zone d'aléa fort « ARAI3 » va généralement au-delà de la zone d'aléa fort « ARAI1 » dans les secteurs en bordure de rivière.
- A l'intérieur de la zone bleue de la cartographie « ARAI1 », on retrouve des niveaux d'aléa très variables allant de fort à faible dans la cartographie « ARAI3 ».



Figure 77. Extrait de la carte d'aléa submersion ARAI3 (2100) pour le site de Teva I Uta. Les contours rouge et bleu représentent les limites des zones d'aléa fort (submersion + impact des vagues) et moyen dans la cartographie d'ARAI1.

Le site de Matavai (cf. Figure 78) est particulier car sa topographie étant escarpée, le zonage ARAI1 est réduit à la zone d'aléa fort correspondant à la zone d'impact des vagues (les zones correspondant à l'aléa submersion étant incluses dans cette zone). Dans la cartographie ARAI3 :

- Au niveau des deux plages, les zones d'aléa submersion fort et moyen vont au-delà de la bande forfaitaire sur certains secteurs.
- Au niveau de la baie centrale, la nouvelle zone d'aléa fort submersion ne dépasse pas la largeur de la bande forfaitaire.

Pour le site de Maharepa (cf. Figure 79), les différences entre les deux cartographies sont très importantes. Pour ce site, le scénario de référence utilisé n'étant pas très différent entre ARAI3 et ARAI1, les différences constatées sont essentiellement dues à l'évolution des données topographiques disponibles. **Les points cotés utilisés pour réaliser les cartes lors du projet ARAI1**

surestimaient très nettement l'altitude des terrains. Il en résulte une sous-estimation des niveaux d'aléa dans la cartographie d'ARAI1.

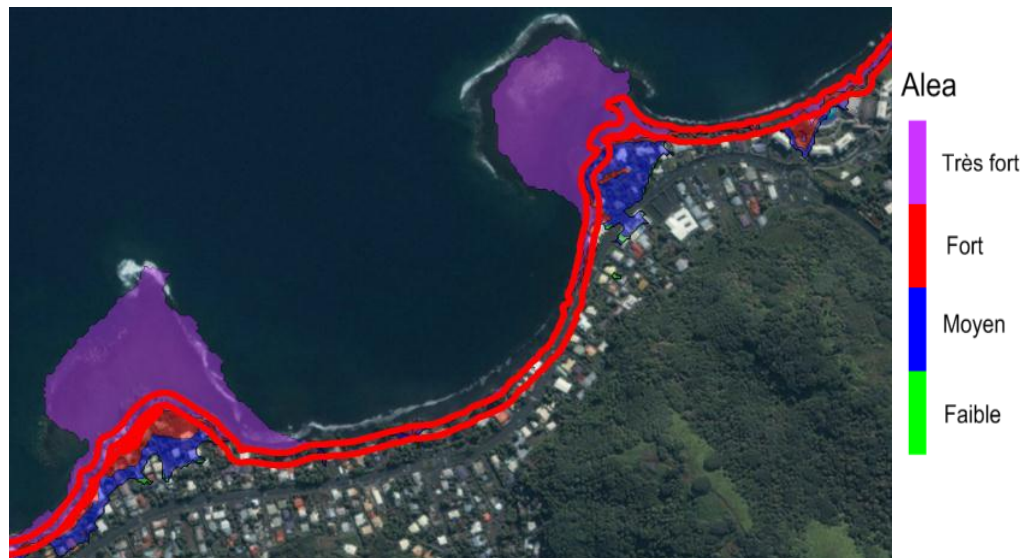


Figure 78. Extrait de la carte d'aléa submersion ARAI3 (2100) pour le site de Matavai. Les contours rouge représentent les limites de la zone d'aléa fort (submersion + impact des vagues) dans la cartographie d'ARAI1.

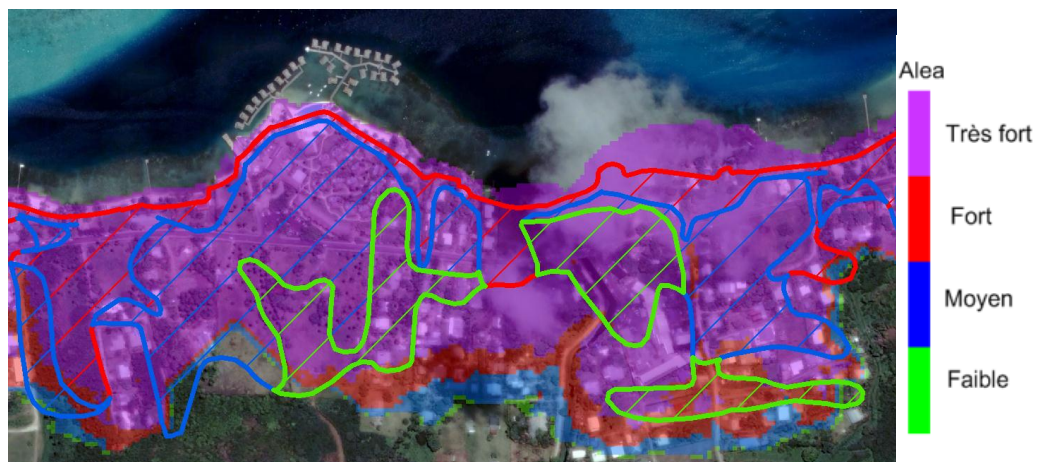


Figure 79. Extrait de la carte d'aléa submersion ARAI3 (2100) pour le site de Maharepa. Les contours rouge représentent les limites de la zone d'aléa fort (submersion + impact des vagues) dans la cartographie d'ARAI1.

6. Tests sur l'efficacité des ouvrages de protection contre la submersion marine

L'objectif de ce chapitre est de réaliser des tests sur l'efficacité des aménagements individuels (ou semi-collectifs) envisageables pour réduire l'aléa et la vulnérabilité du bâti sur des parcelles en bordure de littoral. Pour cela, des modélisations numériques de la submersion marine sont réalisées :

- ✓ sur 2 profils types rencontrés dans les îles de l'archipel de la Société (6.1)
- ✓ pour 3 scénarios correspondant aux scénarios centennaux de différentes façades de Tahiti et Moorea à l'horizon 2100 (6.2).
- ✓ pour le type d'aménagement individuel le plus répandu en Polynésie (6.3)

Cet exercice n'a pas pour objet le dimensionnement d'ouvrages de protection en Polynésie. Il s'agit de distinguer (1) les configurations pour lesquelles il n'est pas possible d'envisager des aménagements permettant de réduire le risque à un niveau acceptable et (2) les configurations pour lesquelles des études complémentaires pourraient être menées pour analyser la faisabilité et le dimensionnement de tels dispositifs. Ce type d'étude sort du cadre du projet ARAI3 et devrait être mené par un bureau d'étude compétent en la matière qui devra également prendre en compte les impacts environnementaux potentiels pour évaluer la viabilité globale du projet, au-delà des problématiques de réduction de l'aléa.

6.1. PROFILS TYPES RETENUS

Les profils testés ont été sélectionnés à partir de la classification de Garcin (2012) (rappelée sur la Figure 80) pour correspondre aux configurations types rencontrées sur les îles de Tahiti et Moorea. Ils sont directement extraits des sites tests de Matavai et Maharepa qui ont fait l'objet de modélisations numériques 2D de la submersion marine au chapitre précédent.

Le premier profil (cf. Figure 81), extrait du site de Matavai, est considéré comme exposé directement aux vagues. Il correspond au type P2 dans la classification de Garcin (2012). Il s'agit d'un site où il y a un récif barrière pour lequel le profil considéré est dans l'axe d'une passe. Dans ce cas, les facteurs conditionnant l'exposition de la côte sont la direction des houles par rapport à l'axe de la passe et la largeur du récif frangeant. Le setup augmente à partir de la zone de déferlement à l'aplomb du front récifal et reste élevé sur tout le platier et la zone de plage comme pour le type P1.

Le second profil (cf. Figure 82), extrait du site de Maharepa, est considéré comme protégé de l'impact direct aux vagues. Il correspond au type P4 dans la classification de Garcin (2012). Le profil cross-shore du segment montre un récif barrière, un lagon plus ou moins profond et large, puis un récif frangeant accolé au segment. La protection du segment est assurée par le récif barrière sur lequel les houles viennent déferler et ne peuvent donc atteindre directement la côte. Le setup augmente à partir

de la zone de déferlement à l'aplomb du front du récif barrière et reste assez élevé sur tout le lagon. Il y a à nouveau une remontée du setup au niveau du déferlement de l'avant récif frangeant, le setup reste ensuite élevé sur tout son platier. Ici, le lagon est peu profond.

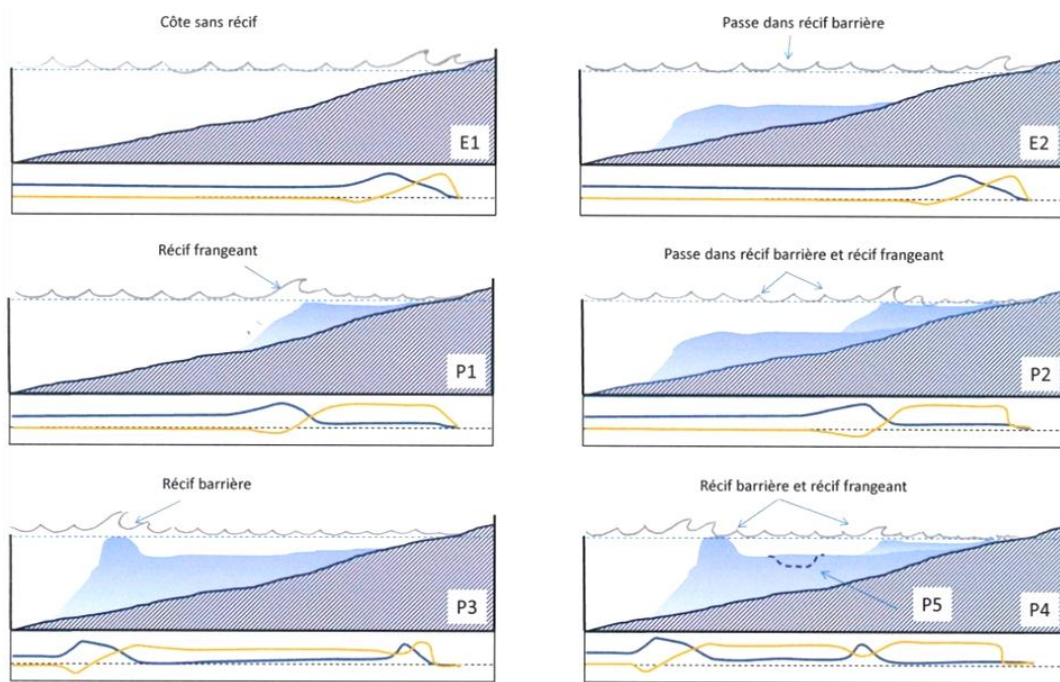


Figure 80. Schémas des différentstypes de côte rencontrés en Polynésie Française. Figure extraite de Garcin (2012).

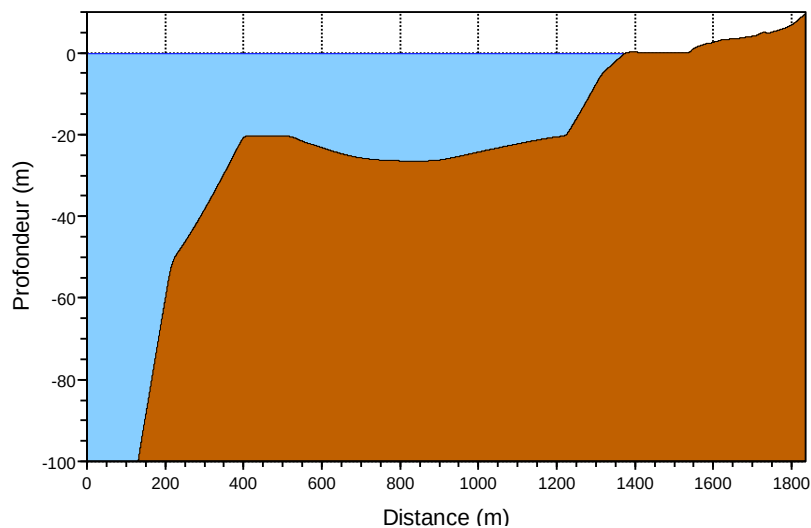


Figure 81. Coupe transversale du site de Matavai correspondant à un profil de type P2 dans la classification de Garcin (2012).

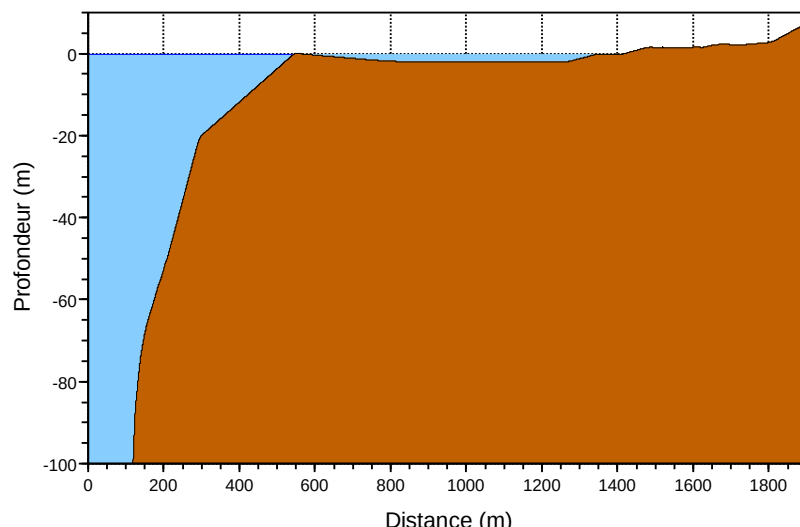


Figure 82. Coupe transversale du site de Maharepa correspondant à un profil de type P4 dans la classification de Garcin (2012).

6.2. SCENARIOS DE REFERENCE

L'efficacité des ouvrages est testée pour des conditions de type « centennales » de vagues cycloniques et de niveaux d'eau à l'horizon 2100 tels que définis au chapitre 4.

La cote du niveau d'eau est de **1.1 m** par rapport au zéro de référence (niveau moyen des mers). Elle tient compte de :

- ✓ la surcote atmosphérique de référence : **0.5 m**
- ✓ la plus haute mer astronomique : **0.1 m** par rapport au niveau moyen
- ✓ l'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2100 estimée à **0.5 m**.

Les caractéristiques des vagues de type « centennale » varient en fonction des façades considérées (Figure 46). Pour tenir compte de ces variations dans l'évaluation de l'efficacité des ouvrages, 3 scénarios de vagues ont été retenus :

- ✓ façade très exposée (façades nord des îles) : **Hs de 12 m et Tp de 12 s**
- ✓ façade exposée (façades est/ouest des îles) : **Hs de 9 m et Tp de 12 s**
- ✓ façade faiblement exposée : **Hs de 7 m et Tp 10 s**

Les directions sont considérées comme étant normales à la côte.

6.3. TYPE ET GEOMETRIE DES OUVRAGES TESTES

Ici, on teste l'efficacité d'un aménagement de haut de plage correspondant à un remblai protégé par un mur ou bien des enrochements (cf. Figure 83 et Figure 84). Il s'agit d'un ouvrage de type sub-vertical. En effet, ce type d'aménagement est fréquemment rencontré en Polynésie car il vise en général à stabiliser le trait de côte,

valoriser un terrain en le nivelant ou le remblayant et à délimiter une propriété (Garcin, 2012).

Ce type d'ouvrage est soumis à une forte turbulence liée aux interactions entre les ondes incidentes et réfléchies. En effet, sa structure verticale est particulièrement propice au phénomène de réflexion. On constate donc souvent des problèmes d'érosion (affouillement) en pied d'ouvrage qui peuvent soit occasionner une destruction totale de l'ouvrage pendant un évènement extrême soit occasionner un endommagement partiel qui surexpose les enjeux situés à l'arrière lors du prochain évènement. De plus, ce type d'aménagement perturbe la dynamique hydro-sédimentaire cross-shore en empêchant les transferts sédimentaires entre le bas de plage, la plage et le haut de plage. Il contribue donc à diminuer la résilience du littoral face aux processus d'érosion et peut aggraver l'exposition des enjeux. Les limites et impacts environnementaux de ce type d'ouvrage sont détaillés plus amplement dans le rapport de Garcin (2012).



Figure 83. Mur en enrochement de haut de plage avec remblai et enjeux en arrière (Commune d'Arue Plage Lafayette, photo C. Chene). Figure extraite de Garcin (2012).

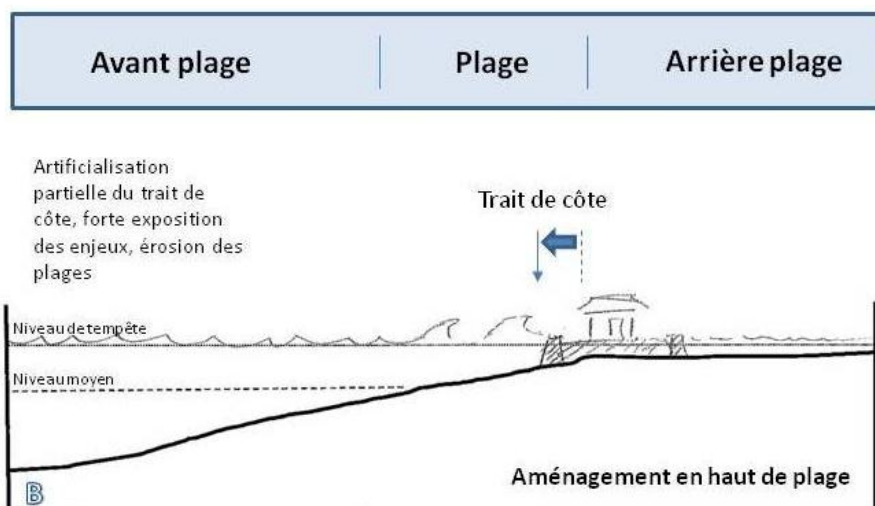


Figure 84. Localisation des aménagements situés en haut de plage. Figure extraite de Garcin (2012).

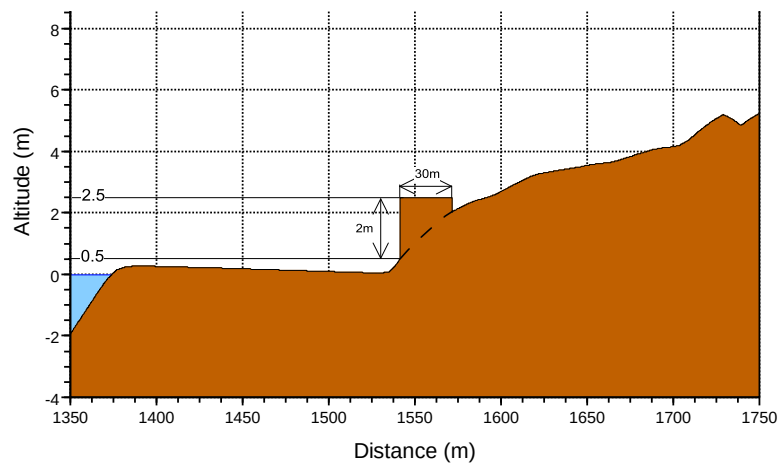


Figure 85. Prise en compte de l'aménagement sur le profil type P2-Matavai.

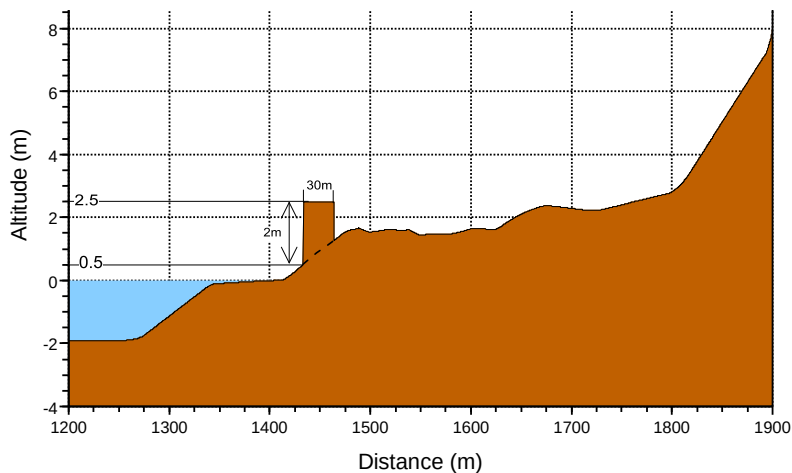


Figure 86. Prise en compte de l'aménagement sur le profil type P4-Maharepa. Le trait en pointillé indique la position du profil sans aménagement.

La Figure 85 et la Figure 86 indiquent la position de l'ouvrage respectivement sur les profils de Matavai (P2) et Maharepa (P3). Les dimensions, **2m de hauteur et 30m de largeur**, ont été fixées à partir de l'analyse bibliographique et du recensement des aménagements à Tahiti réalisés par Garcin (2012). Elles correspondent à des aménagements de taille conséquente, en particulier pour des propriétaires privés. Ces valeurs sont des approximations pour réaliser les cas tests mais ne sauraient remplacer des études de dimensionnements par un bureau d'études compétent.

6.4. METHODOLOGIE MISE EN OEUVRE

Afin de tester la capacité des aménagements à résister au franchissement des vagues, des modélisations de la submersion sont mises en œuvre sur les deux profils type. Au total, 6 simulations sont réalisées pour différentes configurations (2 profils et 3 scénarios par profil). A partir des modélisations réalisées, la hauteur d'eau et la vitesse

d'écoulement sont extraites sur des capteurs virtuels au niveau de l'aménagement afin :

- ✓ d'estimer l'aléa résiduel (croisement hauteur/vitesse : cf. Figure 49)
- ✓ de calculer les volumes franchissements afin d'estimer le degré d'endommagement à l'aide de critères correspondant à des seuils de volumes franchissants issus de la littérature (EurOtop, 2007).

Ici, on teste uniquement la capacité des aménagements à réduire l'aléa en faisant deux hypothèses fortes : (1) on suppose que l'aménagement n'est **pas altéré par le phénomène d'affouillement** (particulièrement présent pour les murs quasi-verticaux) (2) les modélisations étant effectuées en 1D, **on suppose qu'il n'est pas contourné**.

6.4.1. Définition des critères d'endommagement et limites de l'approche

Il existe peu de données dans la littérature définissant les seuils « hydrauliques » à partir desquels les ouvrages considérés dans cette étude peuvent être endommagés. Le rapport EurOtop (2007) propose une synthèse des travaux mondiaux réalisés sur les ouvrages de protection (solidité, efficacité, etc.). Une première estimation de ces seuils y est proposée pour différents types d'ouvrages. Ainsi, il est considéré que le seuil du volume franchissant pour lequel les ouvrages ne résistent pas est de l'ordre :

- ✓ **de 50 litres/s/m (0.05 m³/s/m) : pour une protection légère de type remblais correspondant au type d'aménagement testé dans cette étude.**
- ✓ de 200 litres/s/m et (0.2 m³/s/m) : pour une protection solide par des murs « massifs »

Ces valeurs sont des premières approximations déterminées à partir d'un nombre restreint de mesures et ne prenant pas en compte les problématiques d'altération des ouvrages dues à l'affouillement.

6.4.2. Modélisation numérique

La démarche appliquée est détaillée uniquement pour la configuration correspondant au profil P2-Matavai et le scénario « façade très exposée » mais reste valable pour les 5 autres simulations réalisées (cf. Figure 87). Une première étape consiste à forcer le modèle SWAN (cf. 2.4.1) avec les conditions aux limites correspondant au scénario de référence. SWAN calcule la hauteur significative des vagues ainsi que le setup à la côte. Le spectre fréquentiel des vagues calculé par SWAN est ensuite extrait sur un capteur virtuel après le déferlement des vagues. Cette information spectrale est transformée en une série temporelle intégrant le niveau moyen du plan d'eau ainsi que les crêtes et les creux des vagues qui est appliquée en entrée du modèle SURFWB (2.4.4) pour le calcul de la submersion. SURFWB permet de suivre l'évolution des vagues, la position de la ligne d'eau, ou encore les valeurs de vitesse horizontale en fonction du temps. Les modélisations sont réalisées sur une durée de 30 minutes, ce qui correspond approximativement à 150 vagues. Les valeurs de rugosité introduites dans SURFWB sont fortes afin de représenter les frottements importants que subit l'écoulement lors de sa propagation au niveau du récif frangeant et à terre.

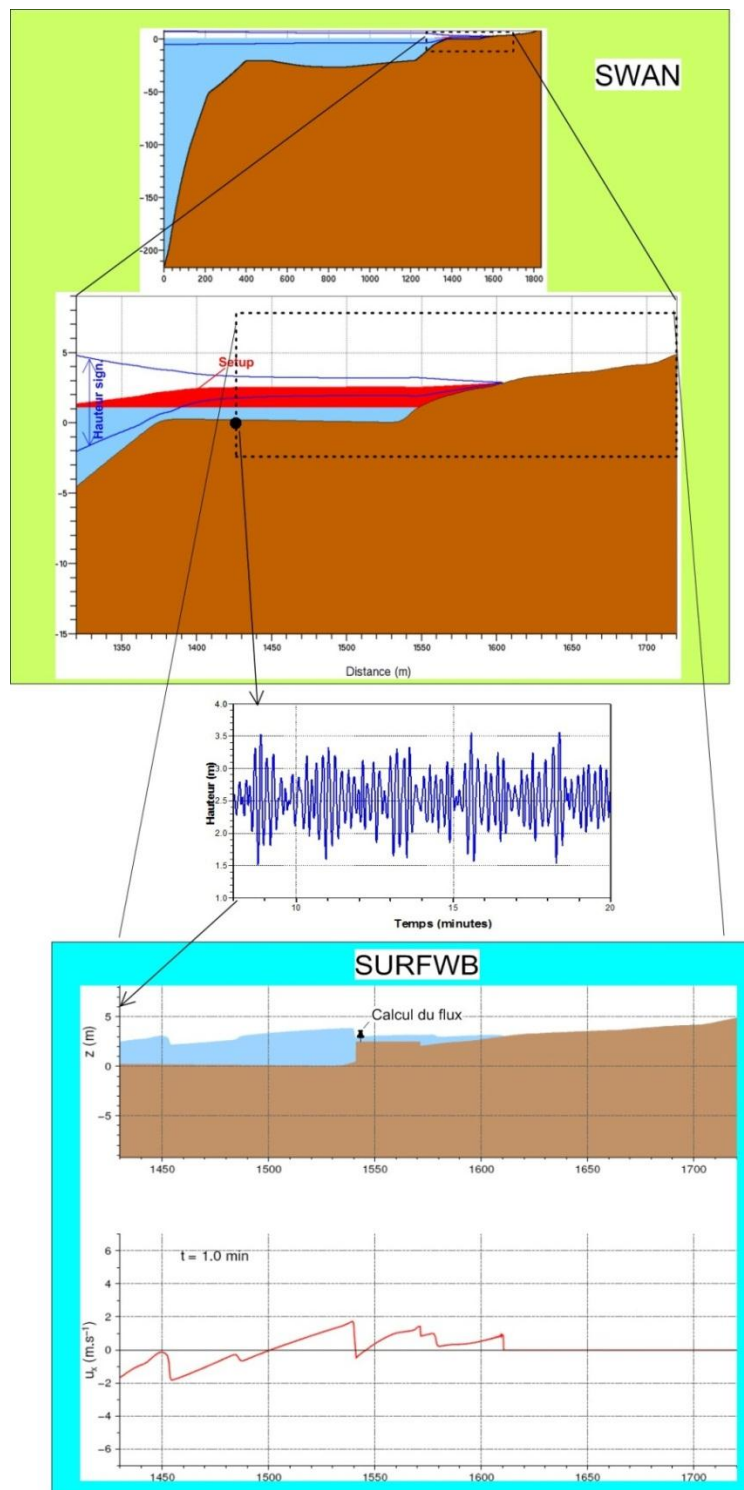


Figure 87. Méthode mise en œuvre pour calculer les hauteurs d'eau, vitesses et débits au niveau de l'ouvrage. Exemple pour le profil P2-Matavai, scénario « façade très exposée ».

La Figure 88 propose une comparaison entre des tests effectués en canal à houle et une modélisation réalisée avec SURF-WB. On note que SURF-WB reproduit de manière réaliste les phénomènes physiques, notamment le déferlement sur un mur quasi-vertical avec des projections d'eau au-dessus du mur.

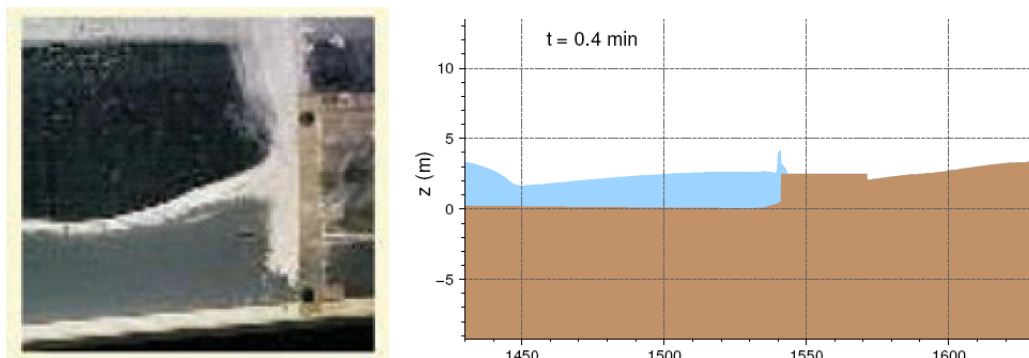


Figure 88. Comparaison entre des tests de franchissements effectués sur un canal à houle (figure extraite de EurOtop, 2007) avec une modélisation réalisée avec SURF-WB.

6.4.3. Résultats des simulations

Profil type P2 - Matavai

- Scénario façade très exposée

Les résultats pour cette configuration sont synthétisés sur la Figure 89 :

- ✓ La figure du haut représente le setup calculé par SWAN ainsi que l'enveloppe des crêtes et des creux de vagues calculés par SURF-WB. On note ici que la hauteur d'eau moyenne dépasse déjà la cote d'arase de l'ouvrage et que les vagues induisent un franchissement et une inondation importante à la fois sur la crête de l'ouvrage et à l'arrière jusqu'à une altitude d'environ 3m. La hauteur d'eau atteinte sur la crête de l'ouvrage est de l'ordre du mètre.
- ✓ Sur la figure du milieu, la vitesse d'écoulement à terre est maximale au niveau du mur (plus de 2m.s^{-1}) et reste importante sur toute la crête de l'ouvrage (entre 1m.s^{-1} et 2m.s^{-1}). Si l'on se réfère à la grille d'analyse de l'aléa présentée sur la Figure 49, on note que le niveau de l'aléa reste très élevé sur l'ensemble de l'aménagement à cause des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement élevées.
- ✓ Sur la figure du bas, les volumes franchissants sont indiqués (en bleu) et les seuils d'endommagement explicités au paragraphe 6.4.1 sont rappelés (en rouge). Les résultats indiquent que l'ouvrage subit une répétition de débordements dont le volume est bien supérieur aux seuils d'endommagement, même pour un ouvrage de type « solide ».

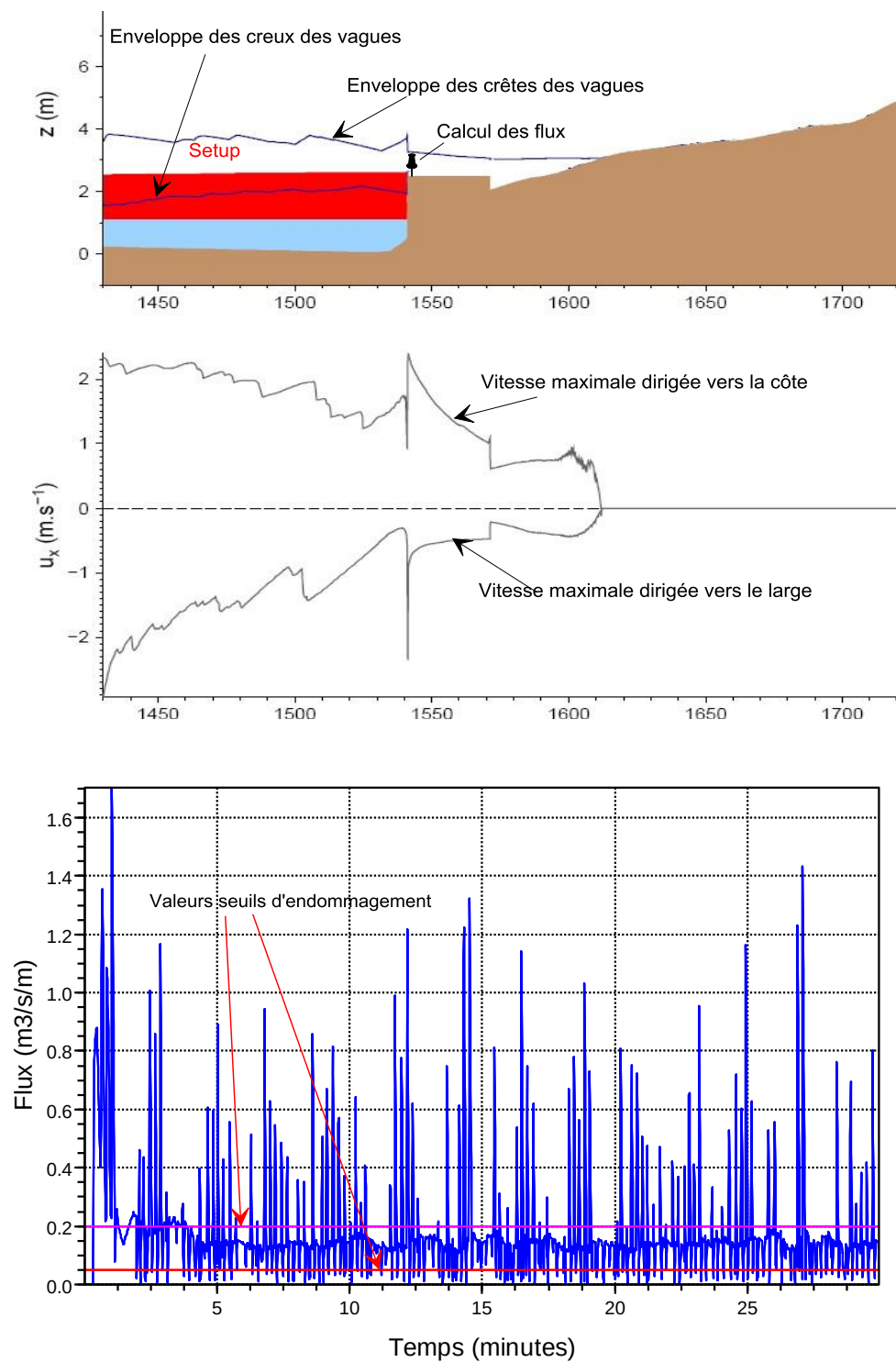


Figure 89. Résultat et analyse des simulations au niveau de l'ouvrage pour le site P2-Matavai, scénario « façade très exposée ».

Les résultats décrits précédemment indiquent que, pour ce type de configuration, un aménagement de type remblai + enrochements en haut de plage (1) ne suffit pas à réduire suffisamment le niveau de l'aléa et (2) serait fortement endommagé par un évènement de type centennal.

- **Scénario façade exposée**

Les résultats pour cette configuration sont synthétisés sur la Figure 90 :

- ✓ Ici, le niveau moyen reste inférieur à la cote d'arase de l'ouvrage mais les vagues induisent quand même un franchissement et une inondation importante qui atteint environ 2.5m d'altitude. La hauteur de submersion sur la crête de l'ouvrage est de l'ordre de 50cm.
- ✓ On note que la vitesse d'écoulement à terre reste importante au niveau du mur (plus de 2m.s^{-1}) et sur l'ensemble de l'ouvrage (supérieure à 0.5m.s^{-1}). Si l'on se réfère à la grille d'analyse de l'aléa présentée sur la Figure 49, on note que le niveau de l'aléa reste élevé sur la majeure partie de l'aménagement à cause des vitesses d'écoulement importantes.
- ✓ Les résultats sur les volumes franchissants indiquent que, sur la durée de la simulation (30min), l'ouvrage subit un certain nombre de débordements dont le volume est bien supérieur au seuil d'endommagement d'un ouvrage de type « léger » correspondant au type d'aménagement testé ici.

Les résultats décrits précédemment indiquent que, pour ce type de configuration, un aménagement de type remblai + enrochements en haut de plage (1) **ne suffit pas à réduire suffisamment le niveau de l'aléa** et (2) **serait endommagé par un évènement de type centennal**.

- **Scénario façade faiblement exposée**

Les résultats pour cette configuration sont synthétisés sur la Figure 91. Ici, le niveau moyen reste inférieur à la cote d'arase de l'ouvrage et les vagues induisent un franchissement et une inondation quasiment nuls.

Dans ce cas, **l'aménagement testé paraît efficace** contre la submersion liée aux franchissements des vagues pour réduire le niveau de l'aléa.

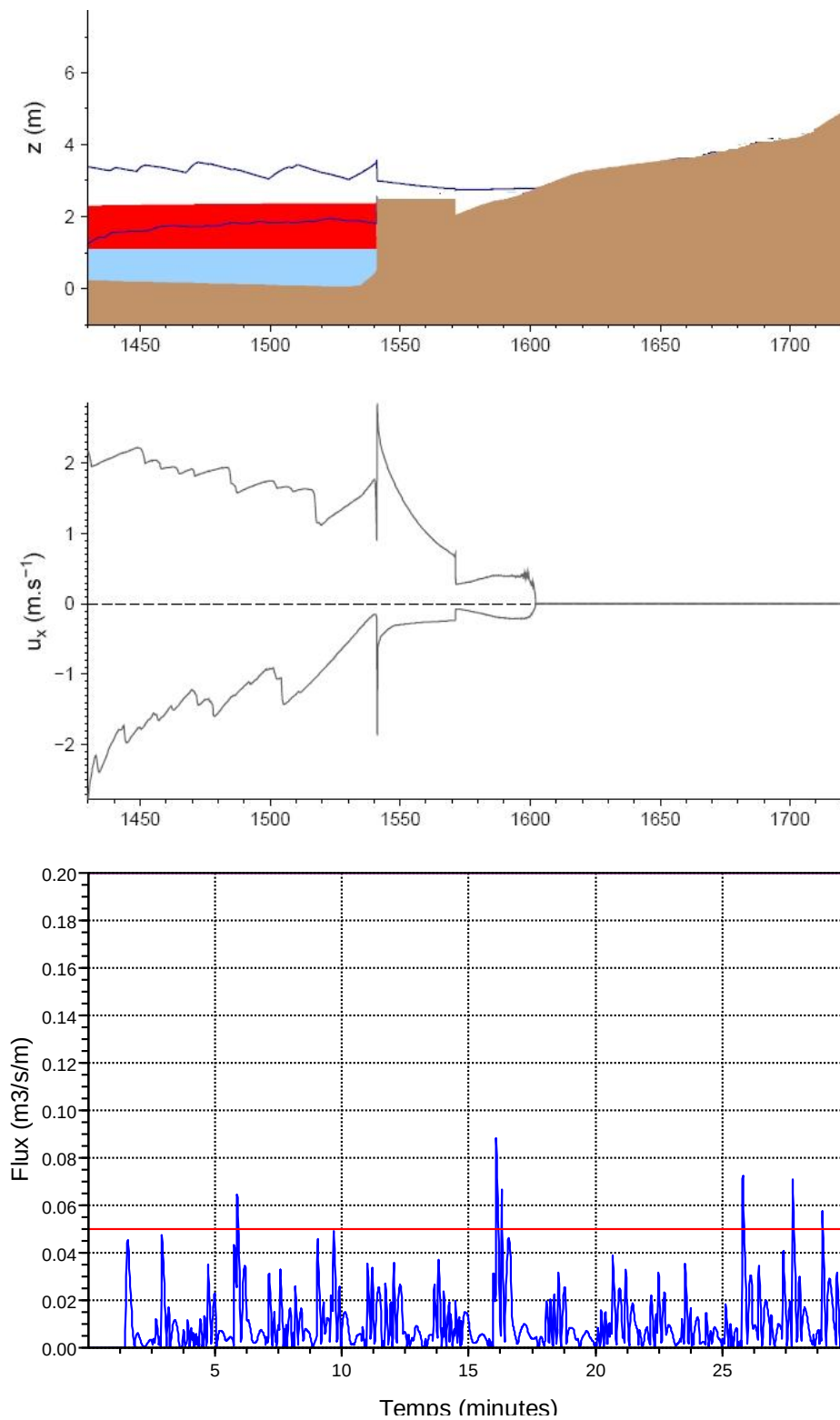


Figure 90. Résultat et analyse des simulations au niveau de l'ouvrage pour le site P2-Matavai, scénario « façade exposée ».

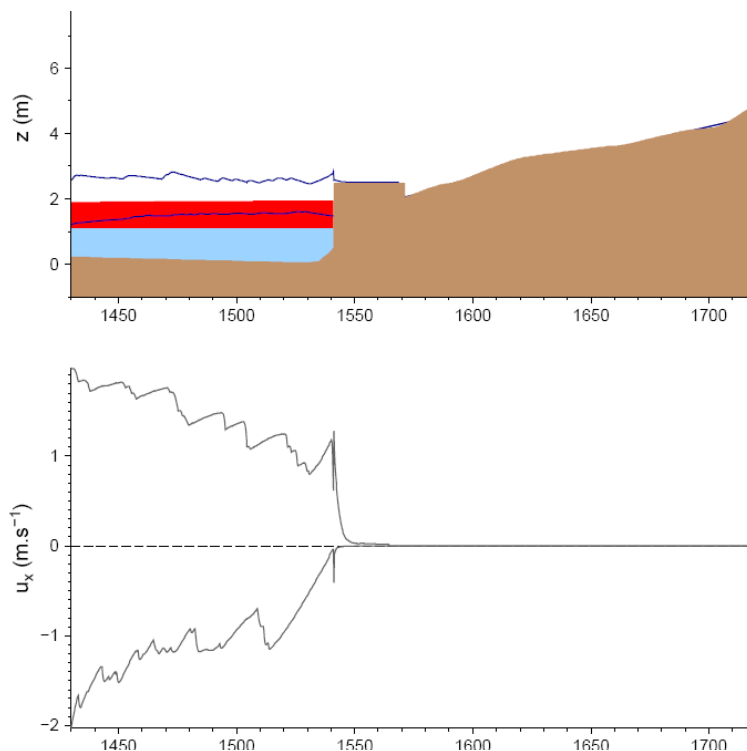


Figure 91. Résultat et analyse des simulations au niveau de l'ouvrage pour le site P2-Matavai, scénario « façade peu exposée ».

Profil type P4 - Maharepa

• Scénario façade très exposée

Les résultats pour cette configuration sont synthétisés sur la Figure 92:

- ✓ Ici, le niveau moyen est quasiment au niveau de la cote d'arase de l'ouvrage et les vagues induisent des débordements importants sur la crête de l'ouvrage et à l'arrière. La hauteur de submersion est de l'ordre du mètre au niveau du mur et reste supérieure à 50cm sur toute la longueur de l'aménagement.
- ✓ La vitesse d'écoulement à terre reste importante sur l'ensemble de l'ouvrage (de l'ordre de 0.8m.s^{-1}) et derrière (de l'ordre de 0.5m.s^{-1}). Si l'on se réfère à la grille d'analyse de l'aléa présentée sur la Figure 49, on note que le niveau de l'aléa reste élevé en bordure du littoral mais est réduit à l'arrière.
- ✓ Les résultats sur les volumes franchissants indiquent que l'ouvrage subit une répétition de débordements dont le volume est bien supérieur aux seuils d'endommagement même pour un ouvrage de type « solide ».

Les résultats décrits précédemment indiquent que, pour ce type de configuration, un aménagement de type remblai + enrochements en haut de plage (1) **réduit le niveau**

de l'aléa à l'arrière de l'ouvrage (2) mais serait fortement endommagé par un événement de type centennal.

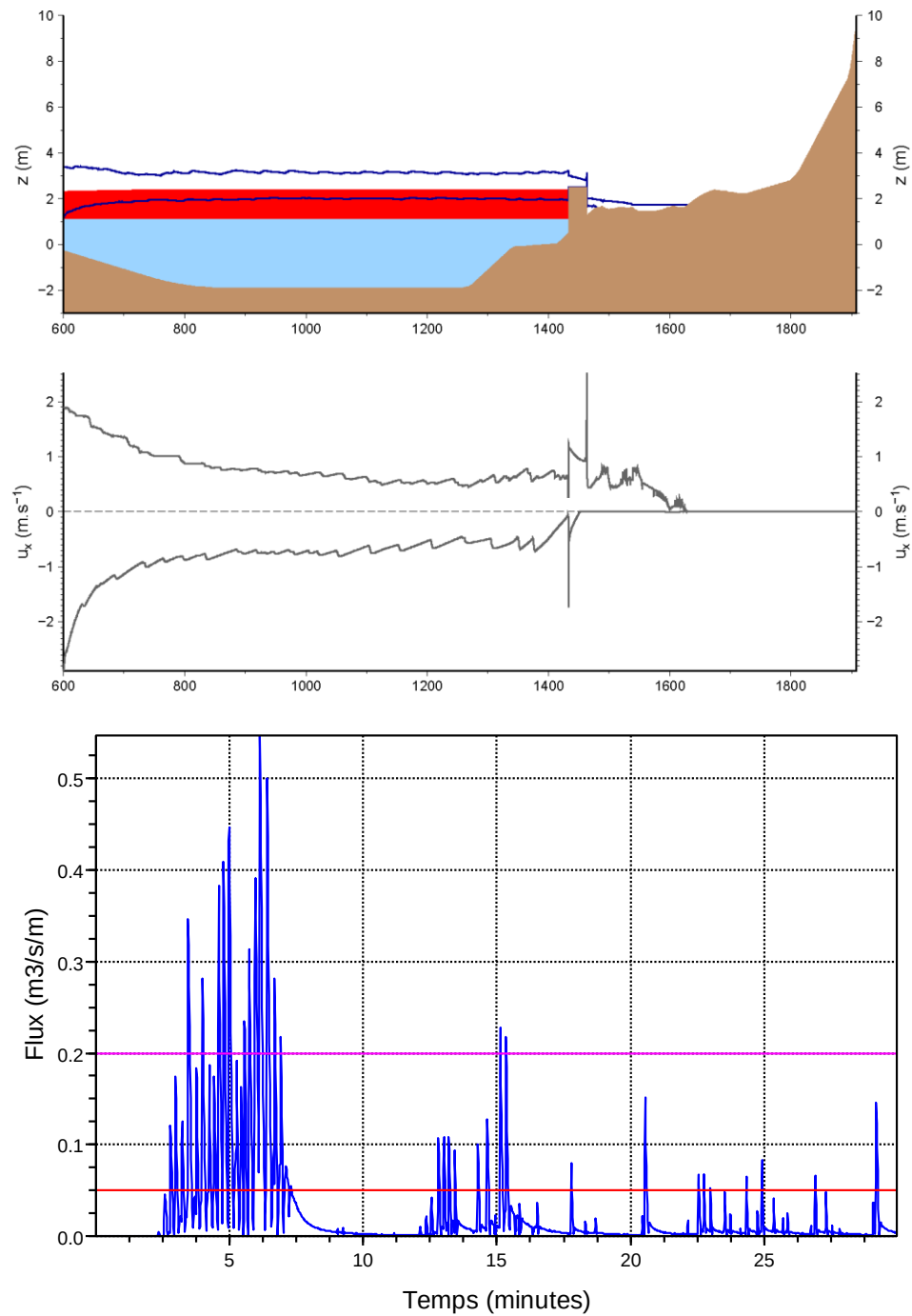


Figure 92. Résultat et analyse des simulations au niveau de l'ouvrage pour le site P4-Maharepa, scénario « façade très exposée ».

• Scénario façade exposée

Les résultats pour cette configuration sont synthétisés sur la Figure 93:

- ✓ Ici, le niveau moyen reste inférieur à la cote d'arase de l'ouvrage et les vagues induisent un franchissement relativement faible conduisant à une inondation de l'ordre de quelques dizaines de centimètres sur l'aménagement.
- ✓ La vitesse d'écoulement au niveau du mur est d'environ 1m.s^{-1} et décroît jusqu'à 0.5m.s^{-1} à l'arrière de l'ouvrage. Si l'on se réfère à la grille d'analyse de l'aléa présentée sur la Figure 49, on note que le niveau de l'aléa est considérablement réduit par l'aménagement.
- ✓ Les résultats sur les volumes franchissants indiquent que, au début de la simulation, l'ouvrage subit quelques débordements dont le volume atteint le seuil d'endommagement d'un ouvrage de type « léger » correspondant au type d'aménagement testé ici.

Les résultats décrits précédemment indiquent que, pour ce type de configuration, un aménagement de type remblai + enrochements en haut de plage (1) **réduit considérablement le niveau de l'aléa (2) mais serait certainement endommagé par un évènement de type centennal.**

• Scénario façade faiblement exposée

Les résultats pour cette configuration sont synthétisés sur la Figure 94. Ici, le niveau moyen reste inférieur à la cote d'arase de l'ouvrage et les vagues induisent un franchissement et une inondation quasiment nuls.

Dans ce cas, **l'aménagement testé paraît efficace contre la submersion** liée aux franchissements des vagues pour réduire le niveau de l'aléa.

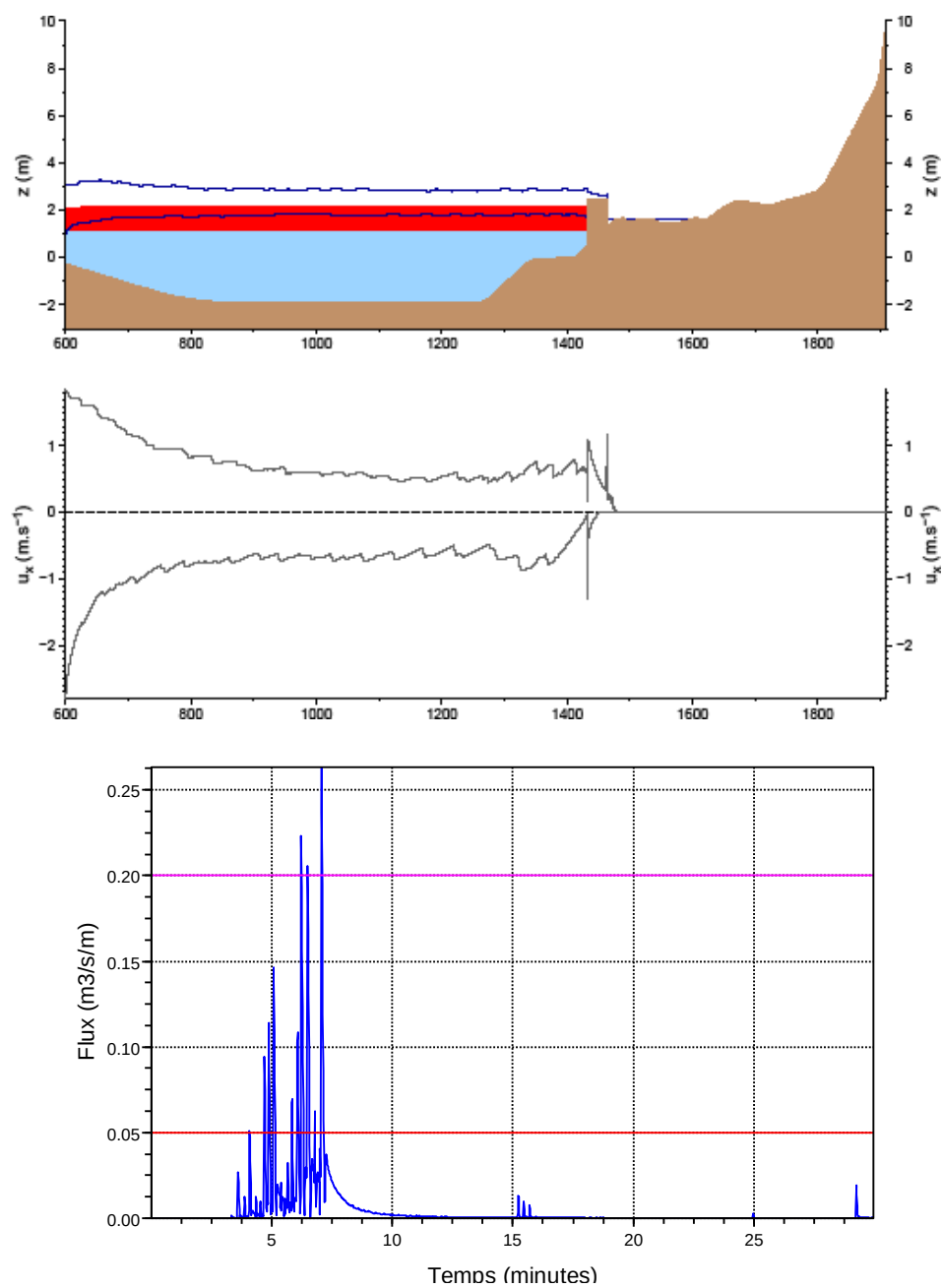


Figure 93. Résultat et analyse des simulations au niveau de l'ouvrage pour le site P4-Maharepa, scénario « façade exposée ».

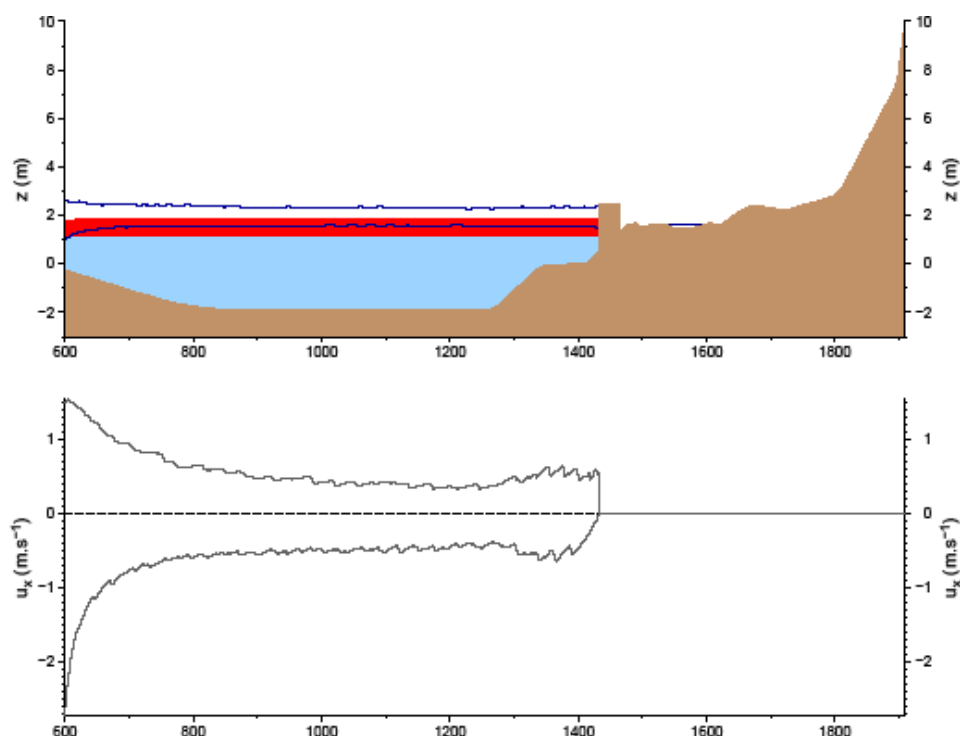


Figure 94. Résultat et analyse des simulations au niveau de l'ouvrage pour le site P4-Maharepa, scénario « façade peu exposée ».

6.5. SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Cette étude a permis de distinguer deux types de configurations (synthétisées dans le Tableau 13):

- ✓ Les configurations pour lesquelles la mise en œuvre d'aménagements de protection individuels (ou semi-collectifs) n'est pas envisageable car (1) ils ne permettraient pas de réduire suffisamment le niveau de l'aléa et/ou (2) les débits franchissants pour un scénario de type centennal seraient trop importants pour que l'ouvrage puisse tenir sans endommagement.
- ✓ Les configurations pour lesquelles des aménagements en bordure de littoral sont susceptibles d'être efficaces pour réduire le niveau de l'aléa. Cependant, des études complémentaires sont nécessaires afin de déterminer la viabilité de tels aménagements de protection, notamment pour (1) étudier leur solidité par rapport aux phénomènes d'érosion (affouillement) qui n'ont pas été pris en compte dans cette étude (2) analyser les impacts environnementaux induits dont la perturbation des flux sédimentaires et (3) faire une analyse de dimensionnement complète.

Tableau 13. Synthèse des résultats sur les tests d'efficacité des ouvrages de protection

	Façade très exposée (type nord)	Façade exposée (type est/ouest)	Façade faiblement exposée (type sud)
Profil de type P2	Aménagement non envisageable	Aménagement non envisageable	Aménagement envisageable mais étude complémentaire nécessaire
Profil de type P4	Aménagement non envisageable	Aménagement non envisageable	Aménagement envisageable mais étude complémentaire nécessaire

7. Conclusion générale

Dans cette étude, des ordres de grandeur de houles et de surcotes ont été établis pour les événements cycloniques et saisonniers pour des périodes de retour d'un ordre décennal et centennal. Celles-ci permettent de pondérer, en fonction des façades considérées, le scénario de référence considéré de façon uniforme dans le projet de PPR actuel ($H_s \sim 12\text{m}$ / $T_p \sim 13\text{s}$) et de prendre en compte les événements saisonniers en plus des événements cycloniques. Ces résultats sont à prendre avec précaution car de nombreuses incertitudes persistent quant au jeu de données utilisé pour les cyclones comme pour les houles saisonnières.

Pour les houles les plus fréquentes (de l'ordre du décennal), les événements cycloniques sont dominants pour les façades orientées au nord et à l'ouest, à Tahiti et Moorea comme à Tubuai. En revanche, pour les façades sud et sud-est des îles, les houles d'alizés du sud-est et les houles australes peuvent avoir des valeurs décennales plus importantes que les houles cycloniques :

- ✓ A Tahiti, houles australes, houles d'alizés et houles cycloniques sont du même ordre de grandeur (environ 4.5m pour les houles saisonnières et entre 3m et 5m pour les houles cycloniques). Les houles australes ayant des périodes très longues (de l'ordre de 15s), elles peuvent être plus énergétiques que les houles cycloniques et doivent être prises en compte dans les projets de dimensionnement.
- ✓ A Tubuai, les houles d'alizés du sud-est et les houles australes ($H_s \sim 5\text{-}6\text{m}$ / $T_p \sim 10\text{s-}15\text{s}$) sont clairement dominantes par rapport aux houles cycloniques ($H_s \sim 2\text{m-}3\text{m}$ / $T_p \sim 6\text{s}$) pour cette période de retour.

Pour les houles de moindre occurrence (de l'ordre du centennal), les événements cycloniques restent dominants pour toutes les façades autour de Tahiti et Moorea. Pour Tubuai en revanche, les houles australes et les houles d'alizés du sud-est ont des valeurs centennales de H_s du même ordre de grandeur que les houles cycloniques au niveau de la façade sud (environ 6m). La période des houles australes est cependant plus longue que pour les houles cycloniques, ce qui les rend potentiellement plus dommageables sur ce secteur.

En ce qui concerne les surcotes atmosphériques, un ordre de grandeur de 50cm pour un scénario centennal paraît assez réaliste à la fois pour le secteur de Tahiti/Moorea et le secteur de Tubuai.

Les modélisations de la submersion sur les sites test ont permis de réaliser de nouvelles cartes d'aléa pour une échéance actuelle et une échéance fin 2100. La comparaison de ces cartes avec les cartes d'aléa submersion d'ARAI1 n'est pas aisée car elles ont été réalisées avec des scénarios, des données topographiques, des méthodes de calcul de l'inondation et des méthodes de classification de l'aléa différentes. Sur le site de Maharepa, l'évolution des données topographiques est le

principal facteur de différence entre les cartes d'aléa. Sur les autres sites (Matavai et Teva I Uta), l'utilisation de scénarios de référence moins intenses ne permet pas systématiquement de réduire l'extension des zones d'aléa fort.

Enfin, les tests réalisés sur l'efficacité des ouvrages de protection ont permis de distinguer (1) les configurations pour lesquelles la mise en œuvre d'aménagements de protection individuels n'est pas envisageable et (2) les configurations pour lesquelles des aménagements en bordure de littoral sont susceptibles d'être efficaces pour réduire le niveau de l'aléa. Ces dernières correspondent aux sites situés sur les façades les moins exposées aux houles cycloniques (façades sud). Cependant, des études complémentaires sont nécessaires afin de déterminer la viabilité de tels aménagements (notamment par rapport aux problématiques d'affouillement) et le dimensionnement adéquat.

A l'issue de cette étude, le Pays dispose de nouveaux éléments pour faire évoluer sa politique de prévention des risques en zone littorale. La réévaluation des scénarios de référence centennaux ainsi que les modélisations de la submersion effectuées sur les sites tests constituent une base de réflexion pour une révision plus globale des plans de zonage des PPR littoraux sur les îles de Tahiti, Moorea et Tubuai. La synthèse et les tests réalisés sur les ouvrages de protection apportent également un éclairage sur les mesures envisageables pour réduire la vulnérabilité des habitations à proximité du littoral.

8. Bibliographie

Amante, C. and B. W. Eakins, ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp, March 2009.

Andréfouët S, Ardhuin F, Queffelec P, Le Gendre R., 2012: Island shadow effects and the wave climate of the Western Tuamotu Archipelago (French Polynesia) inferred from altimetry and numerical model data. *Mar Pollut Bull.* 2012; 65(10-12): 415-24. doi: 10.1016/j.marpolbul.2012.05.042.

F. ARDHUIN, E. ROGERS, A. BABANIN, J.F. FILIPOT, R. MAGNE, A. ROLAND, A.V.D. WESTHUYSEN, P. QUEFFEULOU, J.M. LEFEVRE, L. AOUF, AND F. COLLARD, 2010 : Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves: Part I, definition, calibration and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, 40 : 1917-1941.

Becker, J. J., D. T. Sandwell, W. H. F. Smith, J. Braud, B. Binder, J. Depner, D. Fabre, J. Factor, S. Ingalls, S-H. Kim, R. Ladner, K. Marks, S. Nelson, A. Pharaoh, R. Trimmer, J. Von Rosenberg, G. Wallace, P. Weatherall., *Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS*, *Marine Geodesy*, 32:4, 355-371, 2009.

BOOIJ N., HAAGSMA I.J.G., HOLTHUIJSEN L.H., KIEFTENBURG AT.M.M, RIS R.C., VAN DER WESTHUYSEN A.J., ZIJLEMA M. (2004). *Swan Cycle III version 40.41, User's Manual*, 115 p.

BRODTKORB P.A., JOHANNESSON P., LINDGREN G., RYCHLIK I., RYDEN J., SJÖ E. (2000). WAFO - a Matlab toolbox for analysis of random waves and loads, in: *Proceeding of the 10th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Seattle, USA, Vol. III, pp 343-350.

Chawla, A., and H. L. Tolman, 2007: Automated grid generation for WAVEWATCH III. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 254, 71 pp.

Chawla, A., and H. L. Tolman, 2008: Obstruction grids for spectral wave models, *Ocean Modelling*, 22, 12-25.

E. des Garets (2005) – Bilan des connaissances sur les surcotes marines en Polynésie. Rapport BRGM/RP-55038-FR, 57 p., 9 fig., 4 ph., 4 tab., 3 ann.

Garcin M. (2012). *Projet ARAI 3 : Aménagements et ouvrages côtiers polynésiens – incidence sur l'aléa submersion et impacts environnementaux*. Rapport BRGM/RP-61656-FR, 61 p., 45 fig., 3 tab.

Hardy, T., Mason, L., Astorquia, A., Harper, B. (2004): Queensland climate change and community vulnerability to tropical cyclones: Ocean hazards assessment, stage 2. Tropical cyclones-induced water level and waves: Hervey Bay and Sunshine Coast.

Jourdain, N.C., Marchesiello, P., Menkes, C.E., Lefevre, J., Vincent, E.M., Lengaigne, M., Chauvin, F. (2011): Mesoscale simulation of tropical cyclones in the South Pacific: climatology and interannual variability. *Journal of Climate*, vol.24(1); 2011; 3-25.

Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, 2010: The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data. *Bulletin of the American Meteor. Society*, 91, 363-376. [doi:10.1175/2009BAMS2755.1](https://doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1)

Sébastien Larrue et Thomas Chiron, « Les îles de Polynésie française face à l'aléa cyclonique », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 10 Numéro 3 | décembre 2010, mis en ligne le 20 décembre 2010, consulté le 04 janvier 2013. URL : <http://vertigo.revues.org/10558> ; DOI : 10.4000/vertigo.10558

Laurent, V., K. Maamaatuaiahutapu, J. Maiau, et P. Varney, 2004, *Atlas climatologique de la Polynésie française*, Météo-France, Direction interrégionale de Polynésie française, Papeete, 201 p.

LAZURE P., DUMAS F. (2007). *An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS)*. *Advances in Water Resources*. doi:10.1016/j.advwatres.2007.06.010

Lecacheux, S., Pedreros, R., Le Cozannet, G., Thiébot, J., De La Torre, Y., and Bulteau, T.: A method to characterize the different extreme waves for islands exposed to various wave regimes: a case study devoted to Reunion Island, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2425-2437, doi:10.5194/nhess-12-2425-2012, 2012.

Magne, R., Ardhuin, F., Roland, A., 2010. Prévisions et rejeux des états de mer du globe à la plage (waves forecast and hindcast from global ocean to the beach). *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 14, 149–162

Queffleulou, P., and Croizé-Fillon, D. (2009) : La mesure satellite de hauteur de vague par altimètre. Etat des lieux, application à la climatologie et à la modélisation des états de mer. Ateliers modélisation de l'atmosphère 2009.

Rapport Météo-France, 2002 : Evaluation du risque lié aux surcotes cycloniques sur les Antilles Françaises. Division études et développements, direction inter-régionales Antilles-Guyane.72p.

A. B. A. Slangen, C. A. Katsman, R. S. W. Van de Wal, L. L. A. Vermeersen, R. E. M. Riva, 2011: Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios. *Clim Dyn* (2012) 38:1191–1209. DOI 10.1007/s00382-011-1057-6

9. ANNEXE 1 : Synthèse des données utilisées pour chaque cyclone

ANNEE	CYCLONES	CENTRE	Vm	Pc	Rm	ANNEE	CYCLONES	CENTRE	Vm	Pc	Rm
1977	TESSA	JTWC	x			1993	NOT NAMED	JTWC	x		
1978	CHARLES	JTWC	x			1994	WILLIAM	JTWC	x		
1978	DIANA	JTWC	x			1997	NOT NAMED	JTWC	x		
1980	DIOLA	TCWC WELLINGTON	x			1997	MARTIN	JTWC	x		
1981	TAHMAR	TCWC WELLINGTON	x			1997	OSEA	JTWC	x		
1981	FRAN	TCWC WELLINGTON	x			1997	PAM	JTWC	x		
1982	LISA	JTWC	x			1998	NOT NAMED	JTWC	x		
1983	ORAMA	JTWC	x			1998	VELI	JTWC	x		
1983	PREMA	JTWC	x			1998	NOT NAMED	JTWC	x		
1983	REVA	JTWC	x			1998	ALAN	JTWC	x		
1983	TOMASI	JTWC	x			1998	BART	JTWC	x		
1983	VEENA	JTWC	x			1998	NOT NAMED	JTWC	x		
1983	WILLIAM	JTWC	x			1998	NOT NAMED	JTWC	x		
1983	NANO	TCWC WELLINGTON	x			1998	URSULA	TCWC WELLINGTON	x		
1983	SABA	TCWC WELLINGTON	x			1998	WES	RSMC NADI	x		
1985	NOT NAMED	JTWC	x			1999	NOT NAMED	JTWC	x		
1985	NOT NAMED	JTWC	x			1999	NOT NAMED	JTWC	x		
1986	IMA	JTWC	x			2000	KIM	JTWC	x		
1986	JUNE	JTWC	x			2000	NOT NAMED	JTWC	x		
1986	SALLY	JTWC	x			2001	NOT NAMED	JTWC	x		
1987	NOT NAMED	JTWC	x			2001	RITA	JTWC	x		
1987	WINI	JTWC	x			2001	NOT NAMED	JTWC	x	x	x
1987	NOT NAMED	JTWC	x			2003	NOT NAMED	JTWC	x	x	x
1988	CILLA	JTWC	x			2005	MEENA	JTWC	x	x	x
1989	HINANO	JTWC	x			2005	NOT NAMED	JTWC	x	x	x
1989	JUDY	JTWC	x			2005	NOT NAMED	JTWC	x	x	x
1990	PENNY	JTWC	x			2005	NOT NAMED	JTWC	x	x	x
1991	NOT NAMED	JTWC	x			2005	NOT NAMED	JTWC	x	x	x
1991	WASA	JTWC	x			2007	ZITA	JTWC	x	x	x
1991	ARTHUR	JTWC	x			2007	ARTHUR	JTWC	x	x	x
1992	NOT NAMED	JTWC	x			2009	JONI	JTWC	x	x	x
1992	CLIFF	JTWC	x			2009	KEN	JTWC	x	x	x
1992	NOT NAMED	JTWC	x			2010	NISHA	JTWC	x	x	x
1992	HETTIE	JTWC	x			2010	OLI	JTWC	x	x	x
1993	NOT NAMED	JTWC	x			2010	PAT	JTWC	x	x	x
1993	NOT NAMED	JTWC	x			2010	NOT NAMED	JTWC	x	x	x

Figure 95. Synthèse des paramètres disponibles pour chaque cyclone et source de donnée utilisée

10. ANNEXE 2 : Résultats des modélisations pour les cyclones les plus impactants pour les archipels de la Société

10.1. MARTIN (OCTOBRE-NOVEMBRE 1997)

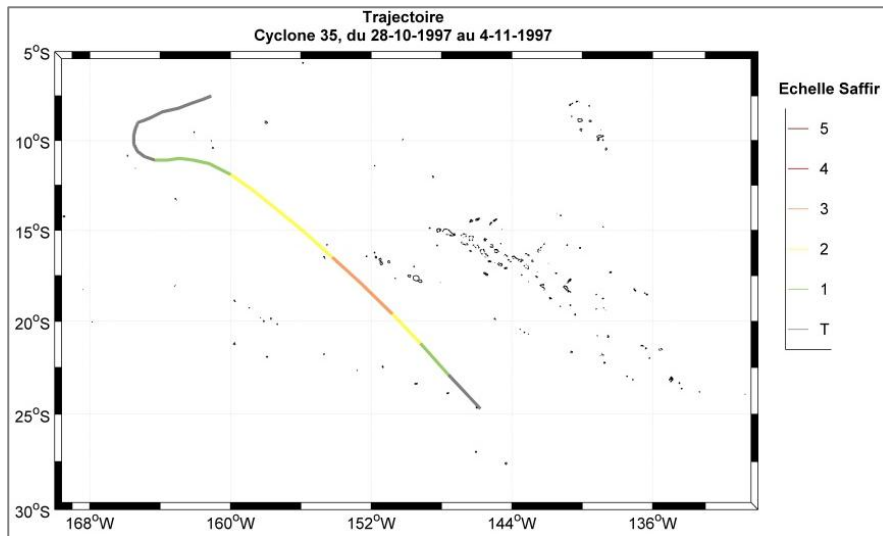


Figure 96. Trajectoire du cyclone Martin

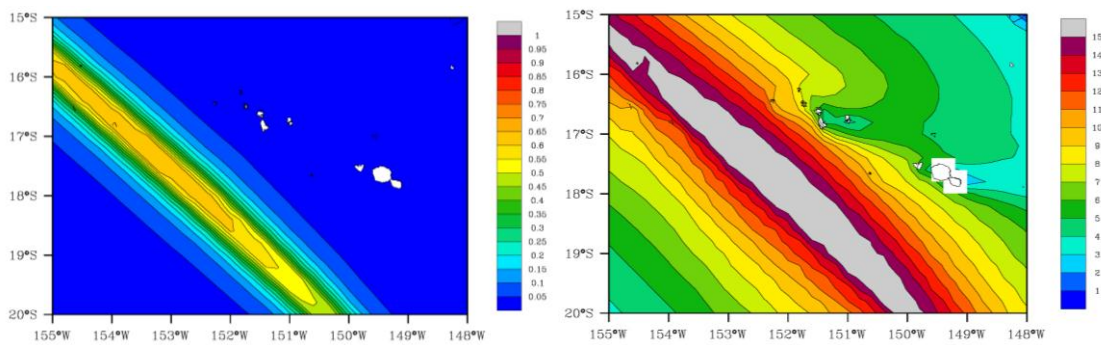


Figure 97. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Martin

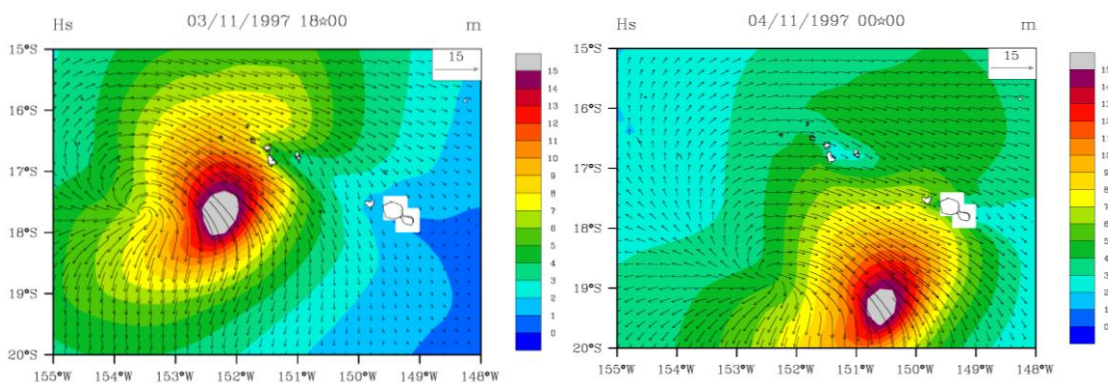


Figure 98. Exemple de champ de vagues du cyclone Martin

10.2. REVA (MARS 1983)

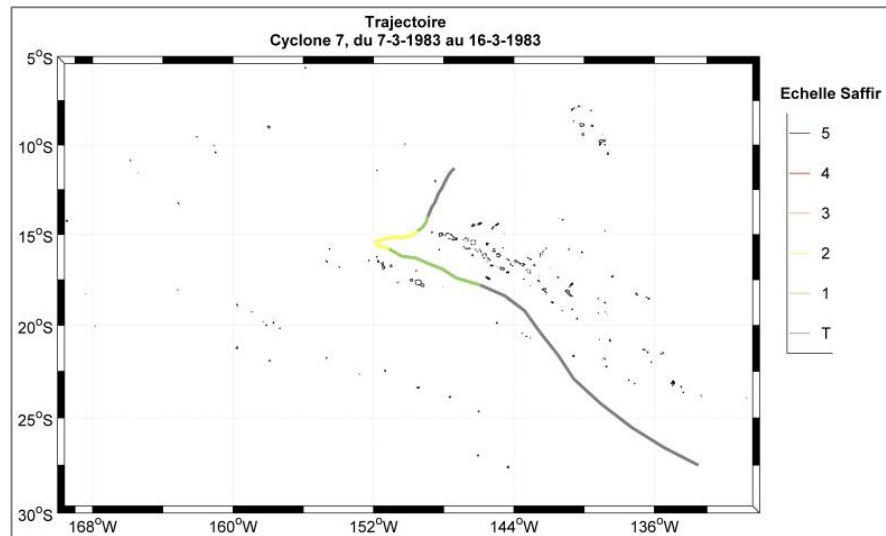


Figure 99. Trajectoire du cyclone Reva

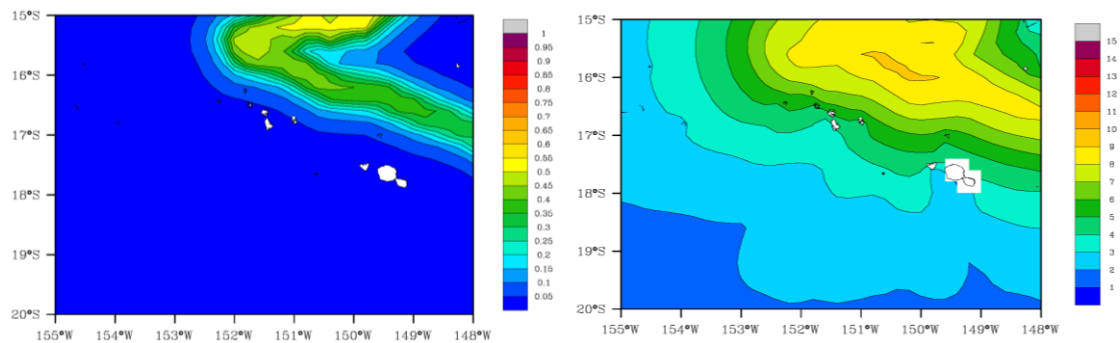


Figure 100. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Reva

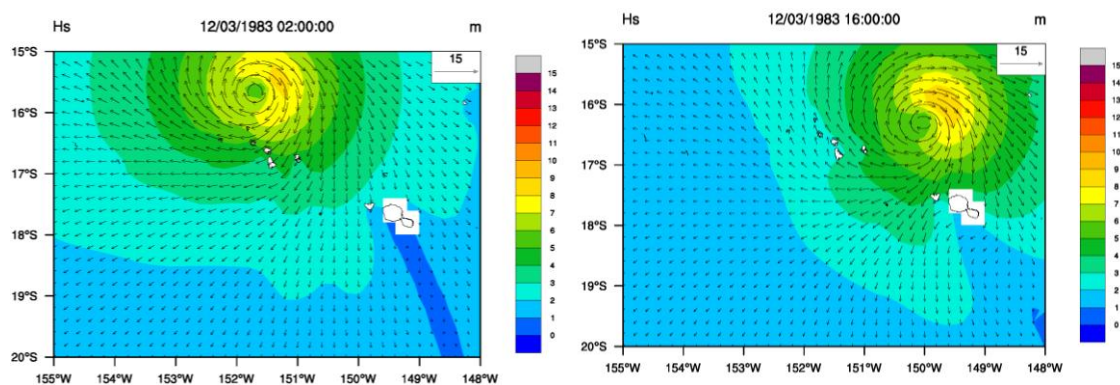


Figure 101. Exemple de champ de vagues du cyclone Reva

10.3. VEENA (AVRIL 1983)

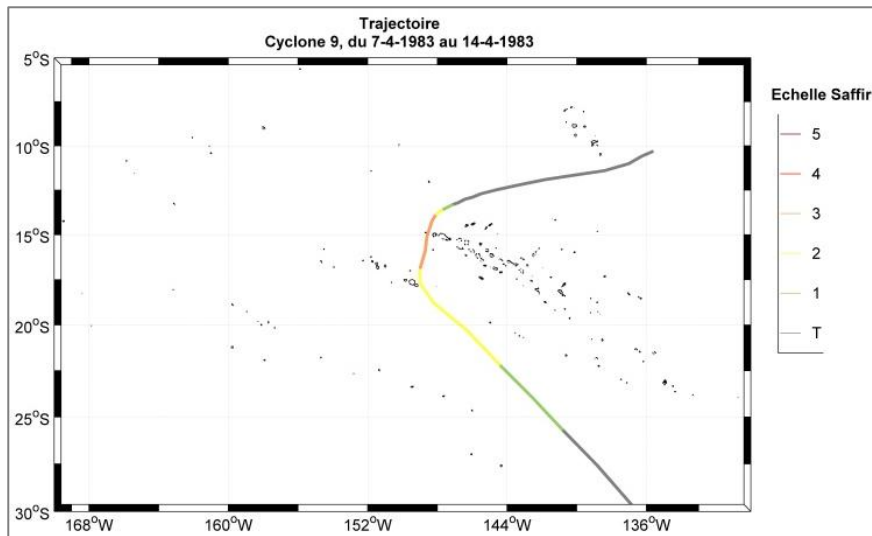


Figure 102. Trajectoire du cyclone Veena

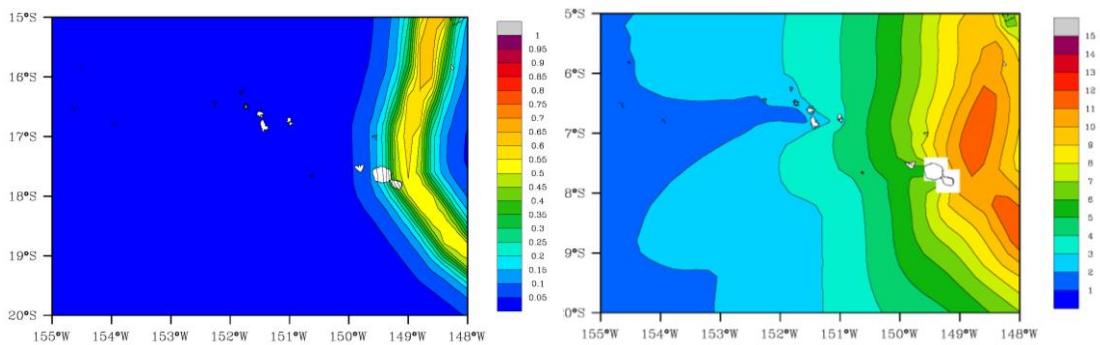


Figure 103. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Veena

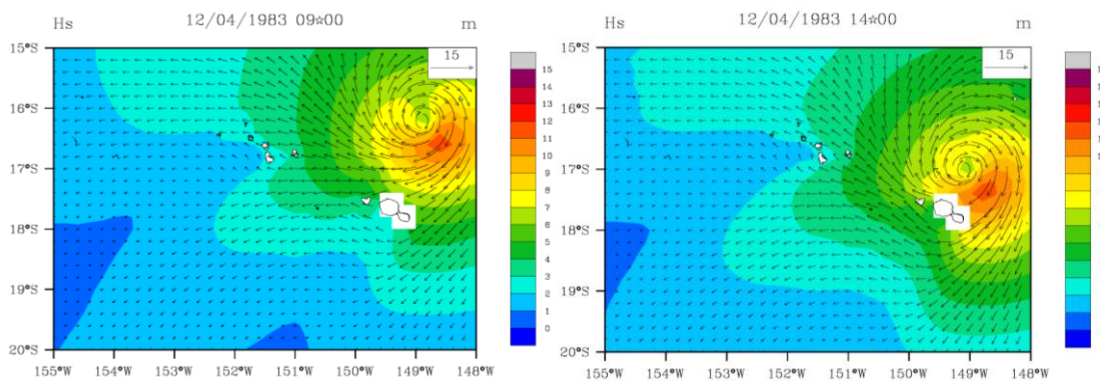


Figure 104. Exemple de champ de vagues du cyclone Veena

10.4. WASA (DECEMBRE 1991)

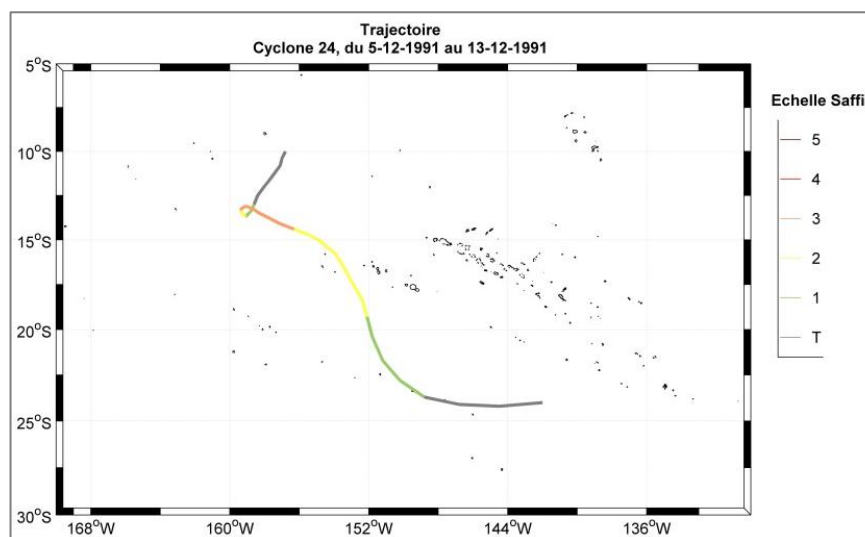


Figure 105. Trajectoire du cyclone Wasa

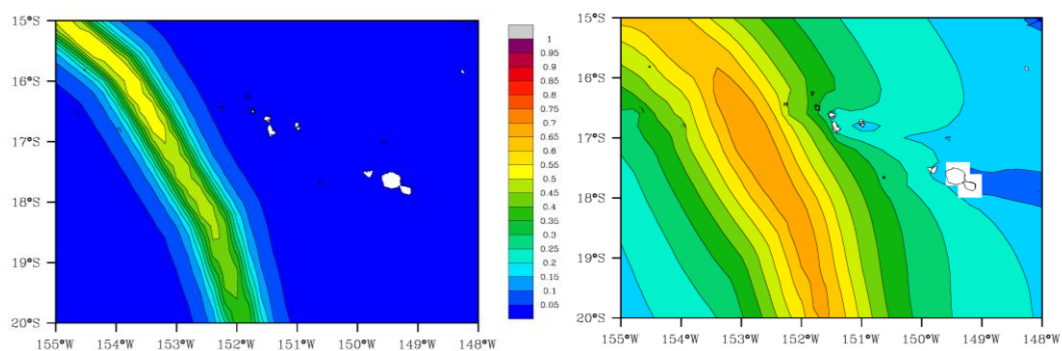


Figure 106. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Wasa

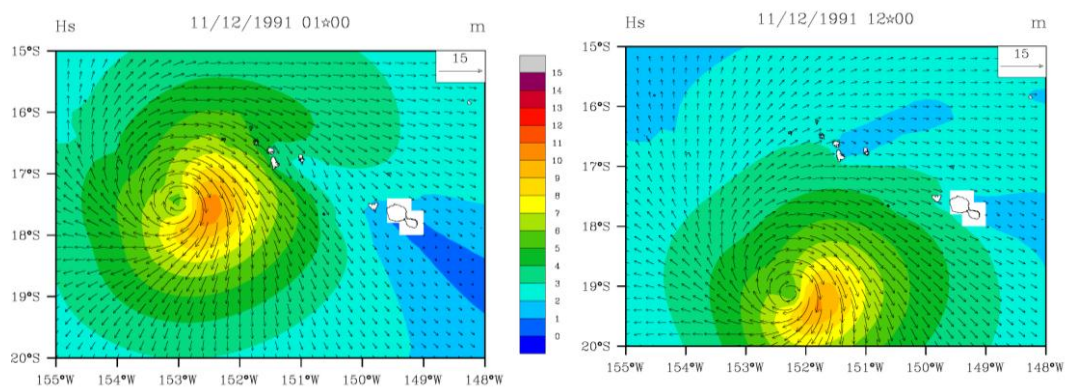


Figure 107. Exemple de champ de vagues du cyclone Wasa

10.5. OLI (JANVIER 2010)

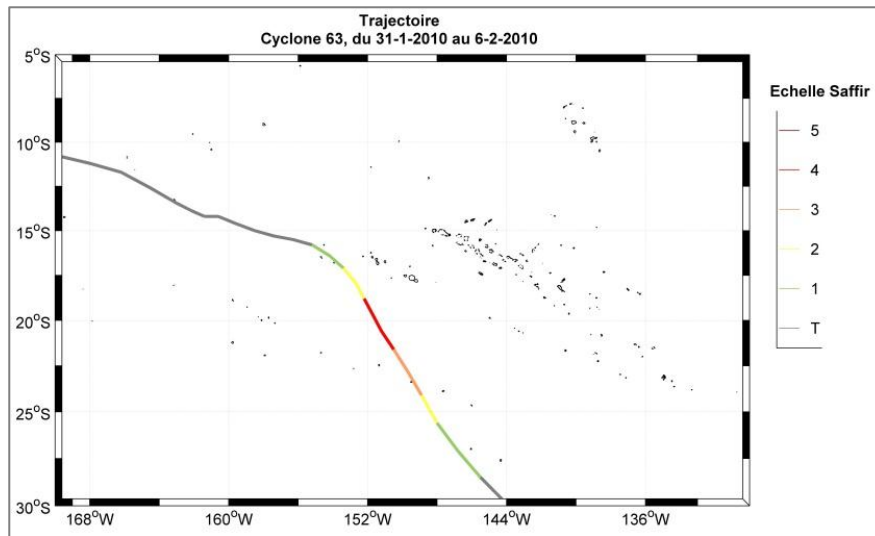


Figure 108. Trajectoire du cyclone Oli

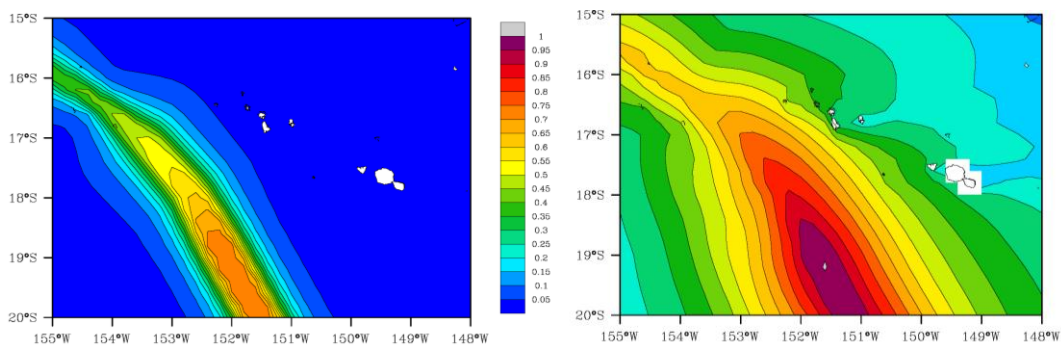


Figure 109. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Oli

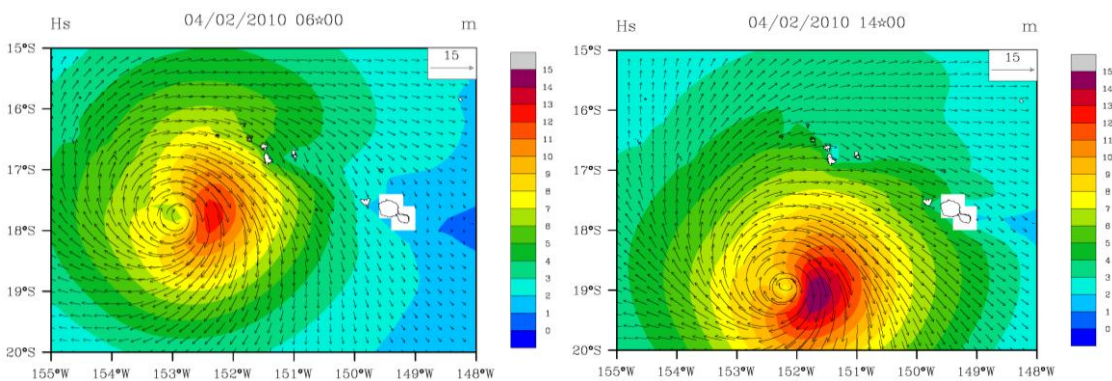


Figure 110. Exemple de champ de vagues du cyclone Oli

10.6. TAHMAR (MARS 1981)

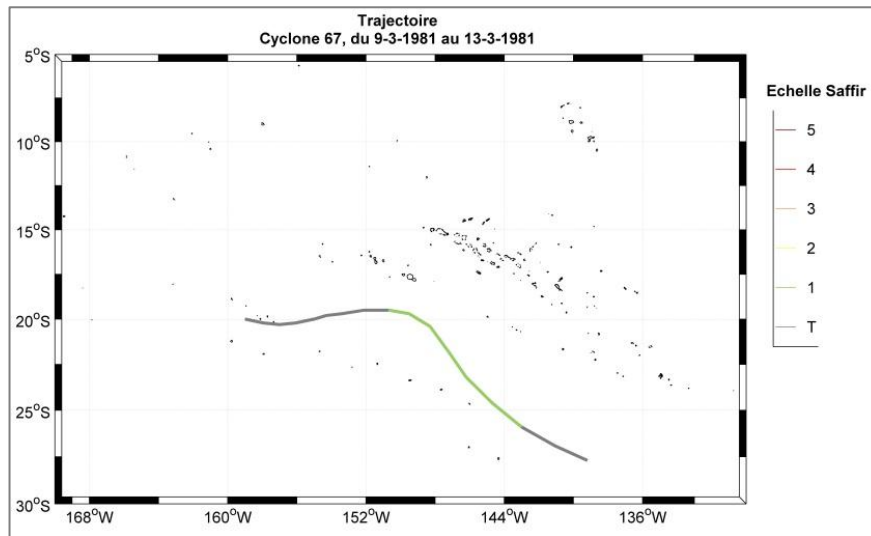


Figure 111. Trajectoire du cyclone Tahmar

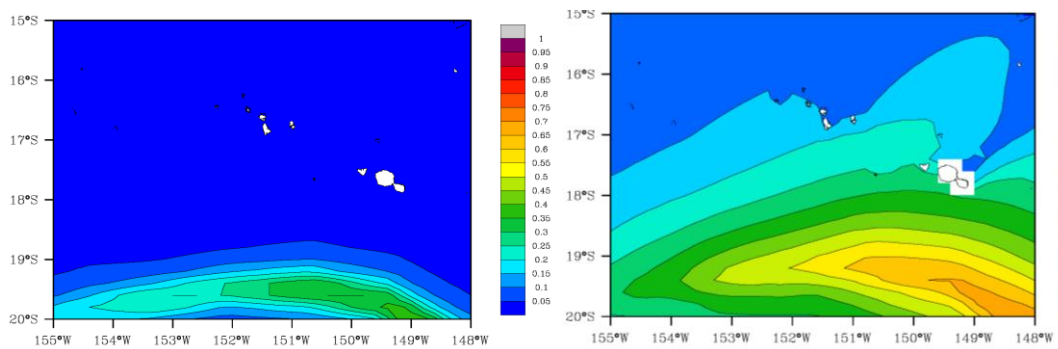


Figure 112. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Tahmar

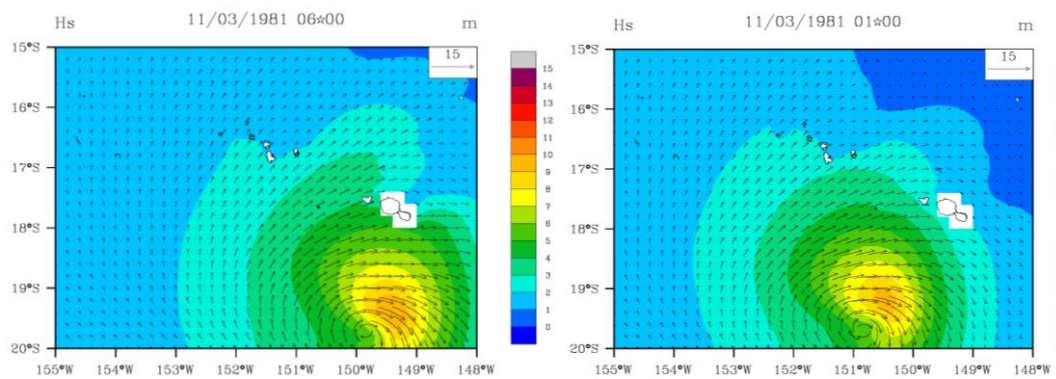


Figure 113. Exemple de champ de vagues du cyclone Tahmar

10.7. OSEA (NOVEMBRE 1997)

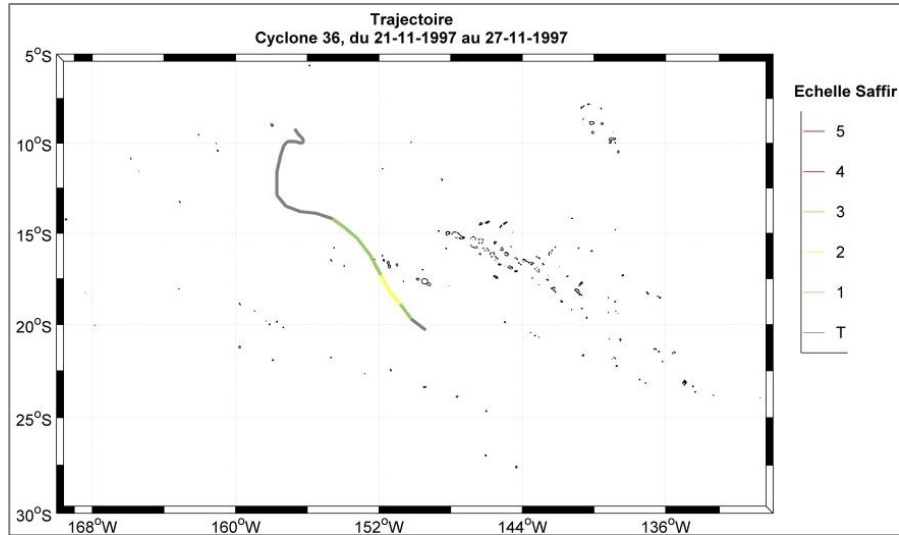


Figure 114. Trajectoire du cyclone Osea

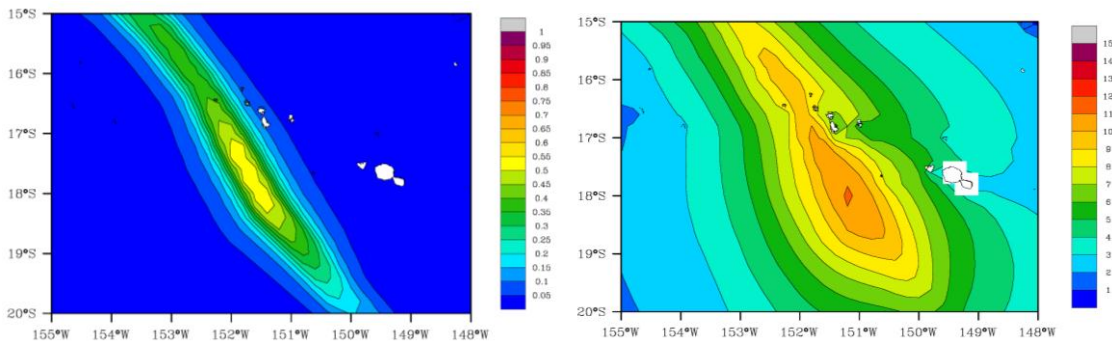


Figure 115. Gauche : surcote atmosphérique maximale (m). Droite : hauteur significative de vague maximale (m) pour le cyclone Osea

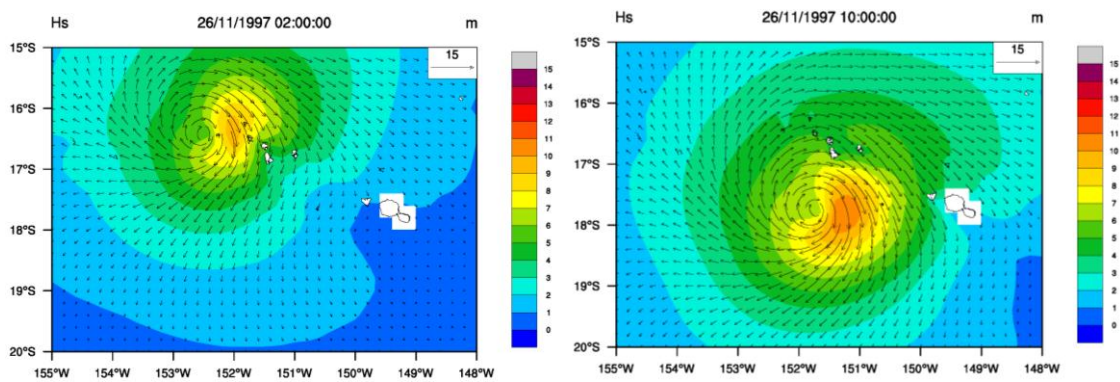


Figure 116. Exemple de champ de vagues du cyclone Osea



**Centre scientifique et technique
Direction Risques et Prévention**

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34