

Programme ARAI 2

Caractérisation de la submersion marine liée aux houles cycloniques en Polynésie française

Rapport final

BRGM/RP- 58990 -FR
septembre 2010



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Programme ARAI 2 Caractérisation de la submersion marine liée aux houles cycloniques en Polynésie française

Rapport final

BRGM/RP- 58990 -FR
septembre 2010

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2008 PSP08ARN65

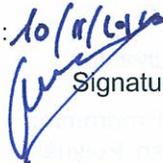
R. Pedreros, Y. Krien et B. Poisson

Vérificateur :

Nom : O. Sedan-Miegemolle

Date : 10/11/2010

Signature :



Approbateur :

Nom : H. Modaressi

Date : 17-12-2010

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 9001:2008.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Tuamotu, Cyclone, Submersion marine, Modélisation numérique, Aléa.

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

Pedrerós R., Krien Y., Poisson B. (2010) - Programme ARAI 2. Caractérisation de la submersion marine liée aux houles cycloniques en Polynésie française. Rapport BRGM/RP-58990-FR, 64 p., 43 fig., 4 tabl.

© BRGM, 2010, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le BRGM a réalisé entre 2002 et 2006 un programme pour la Polynésie française, dénommé ARAI, portant sur la gestion des risques naturels et l'élaboration de PPR (Plans de Prévention des Risques). Ce programme comportait un volet sur la houle cyclonique.

Le Service de l'Urbanisme a souhaité prolonger ces travaux dans le cadre du projet « ARAI 2 » (convention n° 8.0008 du 02/09/2008 modifiée par avenant le 31/12/2008), qui intègre une action dont l'objectif consiste notamment à mieux évaluer le risque lié à la houle cyclonique dans le cadre de l'élaboration de PPR, notamment pour ceux des Tuamotu. Des campagnes de mesures ont été réalisées afin d'obtenir des données bathymétriques-topographiques de bonne résolution/précision permettant des études plus fines de la submersion marine.

Ainsi, des modélisations ont été lancées pour déterminer la submersion générée par un événement cyclonique de référence, sur 8 sites de l'archipel des Tuamotu, pour lesquels des données topo- bathymétriques ont été acquises sous forme de profils 1D (2D sur le site d'Avatoru). Ces résultats visent notamment à préciser la zone d'aléa fort définie jusqu'à présent forfaitairement comme mesurant 30 m depuis la première limite de végétation côté océan.

Les niveaux d'aléas ont ensuite été calés en croisant les résultats quantitatifs issus de la modélisation en termes de hauteurs d'eau et de vitesses maximales. La zone dans laquelle des blocs peuvent être mis en mouvement par les vagues, a été intégrée au zonage grâce à l'estimation de la vitesse seuil permettant le déplacement de ces blocs.

Des règles ont pu être établies pour pouvoir extrapoler des résultats de modélisation sur un secteur donné de l'atoll à une cartographie d'aléa plus globale. Les situations dépendent de la qualité des données topographiques et du type de modélisations accessible (1D, 2D). Il reste nécessaire de disposer d'un minimum d'informations topographiques pour extrapoler les limites des zones d'aléa.

Sommaire

1. Cadre et objectifs de l'étude	9
2. La houle cyclonique en Polynésie	11
2.1. CONTEXTE	11
2.2. RAPPEL DES PHENOMENES ASSOCIES AUX CYCLONES	11
3. Méthodologie	13
3.1. DÉMARCHE GÉNÉRALE	13
3.2. DONNÉES UTILISÉES	14
3.2.1. Données bathymétriques/topographiques	14
3.2.2. Données de forçage du modèle : paramètres de houle	16
3.2.3. Données marégraphiques	16
3.2.4. Données de surcote atmosphérique	17
3.2.5. Elévation du niveau de la mer	17
3.3. DESCRIPTION ET PARAMETRAGE DES MODELES UTILISES	18
3.3.1. Modèle SWAN	18
3.3.2. SURFWB	20
3.4. DÉTERMINATION DE L'ALÉA	20
3.5. PROJECTION DE BLOCS	21
4. Résultats et analyse des simulations	25
4.1. MODELES 1D	25
4.1.1. Tikehau, profil Est	26
4.1.2. Tikehau, profil Ouest	32
4.1.3. Tikehau, profil Ouest dans l'hypothèse d'une absence de féo	35
4.1.4. Ahe	38
4.1.5. Makemo	42
4.1.6. Anaa, profil Nord	45
4.1.7. Anaa, profil Est	47
4.2. MODÈLE 2D – AVATORU A RANGIROA	50

5. Conclusions et exploitation des résultats à l'échelle de l'archipel	57
5.1. CONCLUSION SUR L'APPORT DES MODÉLISATIONS	57
5.2. CONCLUSION EN TERMES DE ZONAGE PPR	60
6. Bibliographie	63

Liste des illustrations

Figure 1 – Schéma illustrant les principaux paramètres entrant en compte dans l'évaluation des niveaux marins extrêmes.	12
Figure 2 – Exemple de données bathymétriques (rouge) et topographique (violet) levées dans le cadre de cette étude par le Service d'Urbanisme de Polynésie (Anaa, Tuamotu).	14
Figure 3 - Données bathymétriques et topographiques utilisées pour la réalisation du MNT dans la région d'Avatoru.	15
Figure 4 - MNT de la passe d'Avatoru avec un maillage 10 m * 10 m.	16
Figure 5 - Élévation moyen du niveau de la mer de 1990 à 2100 suivant plusieurs scénarios (GIEC)- des Garets, 2005.	17
Figure 6 – Vitesse seuil nécessaire pour qu'il y ait transport de blocs (pour différentes dimensions de blocs : a, b, et c), établie à partir de l'équation 1.	22
Figure 7 – Vitesse seuil nécessaire pour arracher un bloc à un substrat faillé en fonction de la longueur a du bloc (établie à partir de l'équation 2).	23
Figure 8 – Profils réalisés pour les simulations d'inondation cyclonique de l'atoll de Tikehau.	26
Figure 9- Résultats donnés par SWAN dans le cas du profil Est de Tikehau.	27
Figure 10 - Densité spectrale des vagues en fonction de la période (en secondes) à l'abscisse x=220 pour le profil Est de Tikehau.	28
Figure 11 - Série temporelle de hauteur d'eau appliquée en entrée de SURFWB pour le profil Est de Tikehau.	28
Figure 12 - SURFWB: niveau d'eau (en m) et vitesse horizontale (en m/s) à t = 30 s.	29
Figure 13 - Résultats de SURFWB dans le cas du profil Est de Tikehau (à comparer avec la Figure 9 obtenue avec SWAN).	30
Figure 14 – Volume d'eau cumulé par mètre de côte en fonction du temps.	31
Figure 15 – Niveaux d'aléa le long du profil Est de Tikehau établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.	31
Figure 16 – Niveaux d'aléa le long du profil Est de Tikehau (représentation cartographique) ...	32

Figure 17 – Résultats de SWAN (en haut) et de SURFWB (en dessous) pour le profil ouest de Tikehau.	33
Figure 18 - Niveaux d'aléa le long du profil Ouest de Tikehau (en présence d'un féo) établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.	34
Figure 19 - Niveaux d'aléa le long du profil Ouest de Tikehau en présence de féo (représentation cartographique)	35
Figure 20 - Résultats de SWAN (en haut) et de SURFWB (en dessous) pour le profil ouest de Tikehau.	36
Figure 21 - Niveaux d'aléa le long du profil Ouest de Tikehau (en l'absence de féo) établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.	37
Figure 22 - Niveaux d'aléa le long du profil Ouest de Tikehau en l'absence de féo (représentation cartographique).	38
Figure 23 - Résultats donnés par SWAN (en haut) et par SURFWB (en dessous) pour le profil de Ahe. Voir les Figure 9Figure 13 etFigure 14 pour une légende plus détaillée.	40
Figure 24 - Niveaux d'aléa au niveau du village de Tenukupara (atoll d'Ahe) établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.	41
Figure 25 - Niveaux d'aléa au niveau du village de Tenukupara, atoll d'Ahe (représentation cartographique).....	42
Figure 26 - Résultats donnés par SWAN (en haut) et par SURFWB (en dessous) pour le profil de Makemo.	43
Figure 27 - Niveaux d'aléa au niveau du village de Puheva (atoll de Makemo) établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.	44
Figure 28 - Niveaux d'aléa au niveau du village de Puheva, atoll de Makemo (représentation cartographique).	45
Figure 29 - Résultats donnés par SWAN (en haut) et par SURFWB (en dessous) pour le profil Nord d'Anaa.	46
Figure 30 - Niveaux d'aléa au niveau de la partie nord du village de Tukahora (atoll d'Anaa) établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.	47
Figure 31 - Niveaux d'aléa au niveau du village de Tukahora, atoll d'Anaa (représentation cartographique).....	47
Figure 32 – Données bathymétriques utilisées pour compenser l'absence de mesures offshore pour le profil est d'Anaa.....	48
Figure 33 - Résultats donnés par SWAN (en haut) et par SURFWB (en dessous) pour le profil est d'Anaa.	49
Figure 34 - Niveaux d'aléa au niveau de la partie est du village de Tukahora (atoll d'Anaa) établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.	50
Figure 35 - Carte topo-bathymétrique d'Avatoru.	51
Figure 36 - Submersion d'Avatoru en considérant une élévation du plan d'eau de 1.8 m.	52

Figure 37 – Calculs issus de SWAN sur Avatoru : a) hauteur significative et direction de propagation des vagues ; b) Setup. Les isocontours correspondent aux profondeurs.	53
Figure 38 – Emplacement des spectres issus de SWAN pour forcer SURFWB.....	54
Figure 39 – Carte de la submersion à Avatoru : a) hauteurs maximales et b) vitesses maximales.	55
Figure 40 - Carte de l'aléa à Avatoru.....	56
Figure 41 – Synthèse des résultats issus du couplage SWAN/SURFWB sur les 8 sites d'étude.....	57
Figure 42 – Limites de la modélisation 1D testée sur Avatoru.....	59
Figure 43 – Cartographie Exemple de cartographie 2D de l'aléa à dire d'expert basée sur quelques profils (calculs 1D) et une connaissance de la topographie (ceci est un exercice de style car la topographie du site n'est pas connue).	60

Liste des tableaux

Tableau 1 – Hauteur de la pleine mer de vives-eaux par rapport au zéro hydrographique retenue pour les atolls étudiés	16
Tableau 2- Table des aléas en fonction des couples de valeurs hauteur d'eau/vitesse (Stollsteiner 2009).	21
Tableau 3 – Liste des 8 sites des Tuamotu étudiés et conditions initiales en termes du niveau d'eau et des vagues pour les calculs de submersion.....	25
Tableau 4 - Récapitulatif ds situations en termes de zonage PPR.	61

1. Cadre et objectifs de l'étude

La Polynésie française est soumise au risque de submersion marine générée par les cyclones et les tempêtes australes. Celui-ci est *a priori* d'autant plus élevé que le niveau de la mer est susceptible de s'élever de plusieurs dizaines de centimètres au cours des prochaines décennies. Le Service de l'Urbanisme de Polynésie a confié au BRGM la mission d'évaluer la force des courants induits par les vagues ainsi que la hauteur et la pénétration maximale de la submersion dans le cas d'un évènement cyclonique de référence sur 10 sites de l'archipel des Tuamotu. Sur ces 10 sites, 9 ont fait l'objet d'une étude 1D pour laquelle l'inondation est évaluée à partir de calculs le long d'un profil (voir par exemple la Figure 8). Une étude 2D a aussi été réalisée pour le dernier site : la passe d'Avatoru sur l'atoll de Rangiroa. Ces travaux reposent sur les campagnes d'acquisition de données topographiques et bathymétriques préalablement acquises par le Service de l'Urbanisme de Polynésie dans le cadre du projet.

Ce rapport a pour principal objectif de cartographier les niveaux d'aléa pour les intégrer dans les PPR pour chacun des sites étudiés et d'extrapoler ces résultats afin de proposer une réglementation applicable à l'ensemble de l'archipel. Nous commencerons par un bref rappel sur le contexte polynésien et les principaux phénomènes associés à la houle cyclonique. Nous décrirons ensuite les données et les outils numériques utilisés lors de cette étude. Nous présenterons dans une troisième partie les résultats des simulations. La dernière partie de ce rapport sera consacrée exploitation des résultats à l'échelle de l'archipel.

2. La houle cyclonique en Polynésie

2.1. CONTEXTE

La Polynésie française s'étend sur un large territoire de 2 500 000 km², dont seule une petite portion des terres (environ 4000 km²) est émergée. Celles-ci peuvent être des « îles hautes » comme pour la plupart des îles de la Société, des Marquises et des Gambier, ou encore des atolls, comme pour l'archipel des Tuamotu.

Elle est soumise à un climat océanique pour lequel on distingue deux saisons : l'hiver austral (mai-septembre), qui est une période de mer calme avec des vents dominants d'Est, et l'été austral (octobre-avril), propice aux cyclones.

Près de 40 cyclones ont été ainsi répertoriés depuis une quarantaine d'années, occasionnant des dégâts importants, et parfois de nombreux morts (ex : archipel des Tuamotu, 1903).

La synthèse et l'exploitation des informations existantes sur les surcotes marines indiquent que les houles cycloniques peuvent atteindre 12 mètres d'amplitude. La nécessité de cartographier l'aléa houle cyclonique s'impose donc, compte tenu de la morphologie de certaines terres émergées comme les atolls (de très faible altitude) et de l'élévation du niveau de la mer associée au changement climatique.

2.2. RAPPEL DES PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS AUX CYCLONES

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

- la « surcote atmosphérique », c'est-à-dire l'élévation du niveau d'eau généré à la fois par la chute de pression atmosphérique associée au cyclone (phénomène de baromètre inverse) et par les courants induits par les vents qui poussent les masses d'eau vers la côte ;
- et le « wave setup » (ou « setup »), c'est-à-dire la surcote générée par le déferlement des vagues à l'approche de la côte.

Le niveau moyen atteint par l'eau est donc la somme de ces contributions avec celle de la marée astronomique, c'est-à-dire la variation du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle de la lune et du soleil. 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 1 illustre de manière schématique l'ensemble des processus qui contribuent à l'élévation du niveau de la mer lors d'un événement cyclonique.

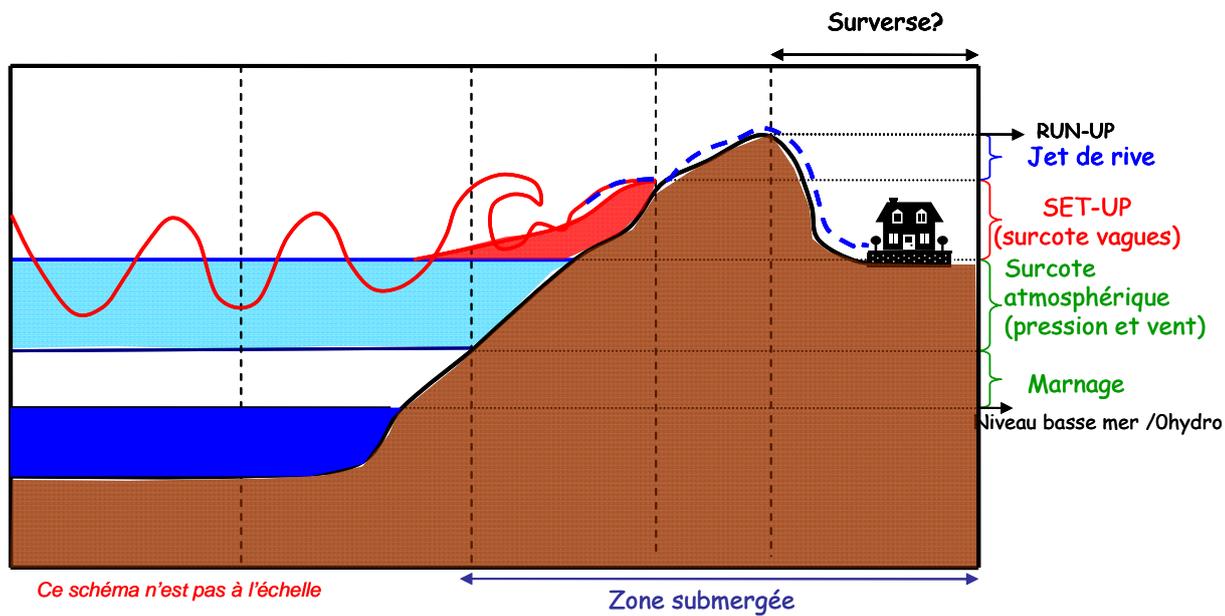


Figure 1 - Schéma illustrant les principaux paramètres entrant en compte dans l'évaluation des niveaux marins extrêmes.

3. Méthodologie

3.1. DÉMARCHE GÉNÉRALE

Il n'existe pas encore à notre connaissance de code de calcul capable de simuler de manière réellement satisfaisante l'ensemble des mécanismes physiques associés à la houle, de sa formation au large jusqu'à la submersion des terres, en passant par la propagation ou encore la perte d'énergie associée au déferlement. La partie « submersion » en particulier est souvent traitée de manière sommaire. Pour cette étude, nous avons donc fait le choix de combiner deux modèles numériques :

- SWAN, un code couramment utilisé pour la propagation des vagues, qui tient compte du déferlement mais qui ne donne pas des résultats très satisfaisants en termes de submersion ;
- SURFWB, un modèle « vague à vague » performant pour la modélisation de la submersion, mais qui ne tient pas encore compte du déferlement.

Le couplage de ces 2 codes représente une amélioration importante dans le traitement de la submersion par rapport aux études précédentes dédiées aux surcotes générées par les houles cycloniques en Polynésie française (Pedreros, 2006 a, b).

La méthodologie employée dans cette étude est la suivante :

- on considère la période et la hauteur significative de vagues caractéristiques de l'évènement de référence pour l'archipel des Tuamotu établi lors du projet ARAI-1 (des Garets, 2005) ;
- on impose ces valeurs en entrée de SWAN, et on modélise la propagation de la houle jusqu'à ce que toutes les vagues aient déferlées ;
- on transforme le spectre de vagues obtenu en sortie de SWAN en une série temporelle de hauteur d'eau ;
- on applique cette série temporelle en entrée de SURFWB pour le calcul de l'inondation.

Cette démarche sera illustrée ultérieurement plus en détail dans le cas du profil Est de Tikehau (paragraphe 4.1.1).

Les données bathymétriques et topographiques proviennent du SHOM (Service Hydrographique de la Marine) et du Service de l'Urbanisme de Polynésie.

Les conditions de forçage (période et hauteur significative des vagues) sont issues d'une étude préalable réalisée par le BRGM (des Garets, 2005).

Ces sources de données sont décrites dans les paragraphes suivant, de même que les principales caractéristiques de SWAN et de SURFWB.

3.2. DONNÉES UTILISÉES

3.2.1. Données bathymétriques/topographiques

Les données bathymétriques et topographiques utilisées proviennent essentiellement de campagnes topo-bathymétriques commanditées par le Service de l'Urbanisme de Polynésie dans le cadre de cette étude (voir Figure 2 pour un exemple de profil 1D, et Figure 3 pour le site 2D). Ces données ont une résolution spatiale métrique, avec une précision altimétrique de quelques dizaines de centimètres. Elles ont été parfois complétées par des données existantes du SHOM et du Service de l'Urbanisme, notamment dans la région de la passe d'Avatoru, sur l'atoll de Rangiroa (Figure 3). Il s'agit, pour le cas du SHOM, de sondes bathymétriques couvrant des profondeurs allant de 10 à 200 m, de résolution de l'ordre de 25-50m près des côtes. Pour le Service de l'Urbanisme, cela concerne un relevé topographique réalisé en 2005.

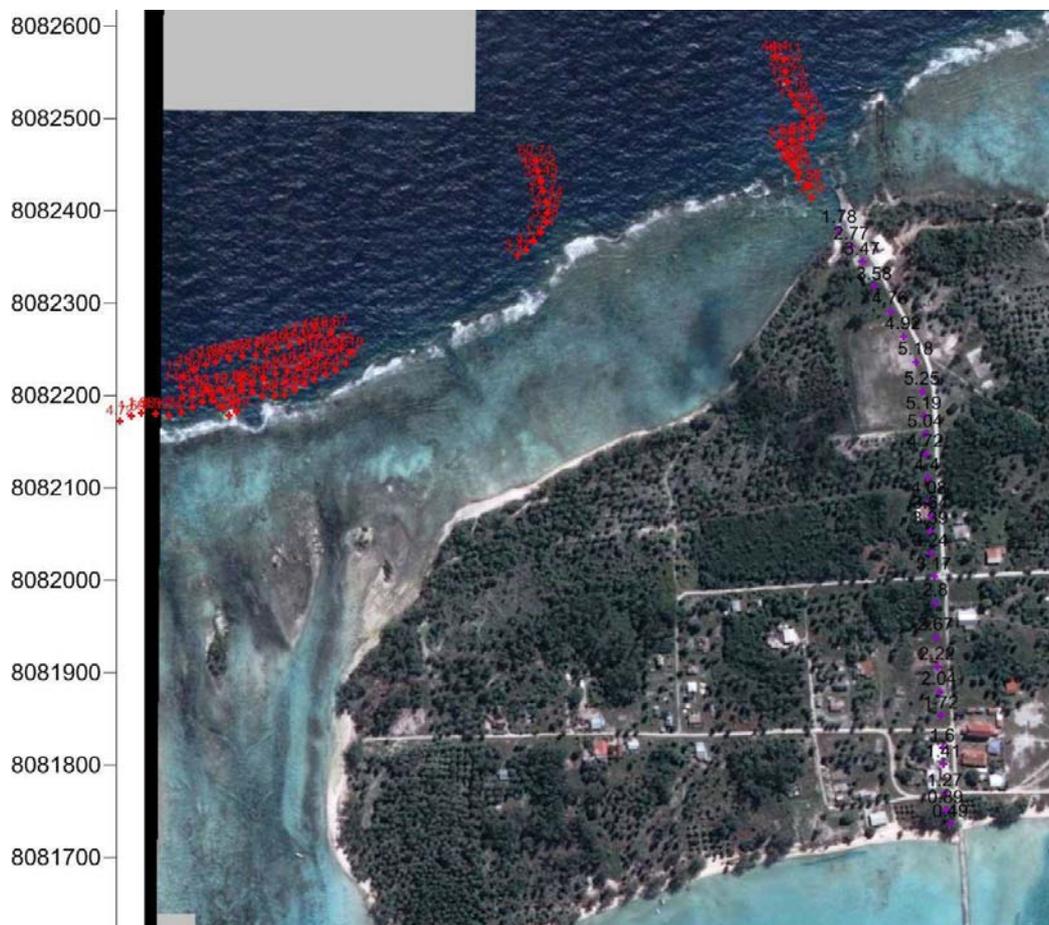


Figure 2 - Exemple de données bathymétriques (rouge) et topographique (violet) levées dans le cadre de cette étude par le Service d'Urbanisme de Polynésie (Anaa, Tuamotu).

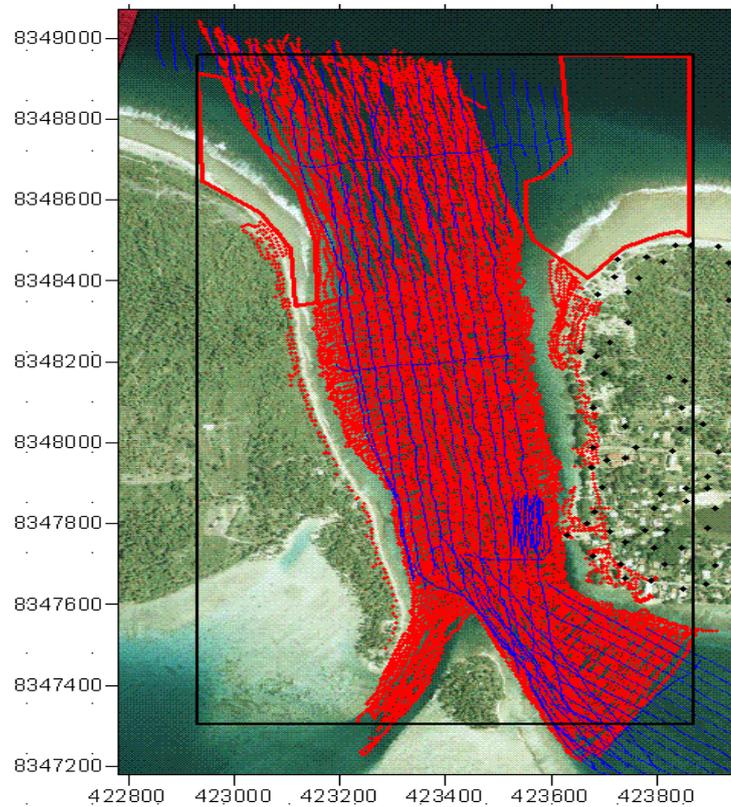


Figure 3 - Données bathymétriques et topographiques utilisées pour la réalisation du MNT dans la région d'Avatoru.

En bleu : données du SHOM ; en noir et en rouge respectivement : données topographiques 2005 et données bathy/topo 2008 du Service de l'Urbanisme de Polynésie. Les polygones correspondent aux zones dans lesquelles la bathymétrie a dû être extrapolée. Le rectangle noir donne la position du MNT.

L'ensemble de ces données ont été utilisées pour construire des modèles numériques de terrain (MNT) sur les 10 sites sélectionnés pour cette étude. Dans le cas des profils 1D, la première étape consiste à projeter les points de mesure sur une droite. Les valeurs obtenues pour l'altitude le long de chaque profil sont ensuite suréchantillonnées pour avoir une valeur tous les 2 mètres. Pour le site 2D (la passe d'Avatoru, Rangiroa), un MNT d'environ 950 m de large sur 1,6 km de long, de maille 10 m * 10 m et centré sur la passe a été réalisé en utilisant le logiciel Surfer (Golden Software) par la méthode de triangulation par interpolation linéaire. L'ensemble des données topographiques et bathymétriques fournies par le Service de l'Urbanisme de Polynésie sur le site d'Avatoru ont été utilisées (points rouge, Figure 3). Celles-ci ont été complétées par les données SHOM dans les rares zones où l'on ne disposait pas de données, comme dans la partie Nord-Est de la passe. Les polygones rouges dans la Figure 3 indiquent les principales régions dans lesquelles la bathymétrie a été interpolée en raison de l'absence de données.



Figure 4 - MNT de la passe d'Avatoru avec un maillage 10 m * 10 m.

3.2.2. Données de forçage du modèle : paramètres de houle

Les données utilisées pour forcer le modèle SWAN sont issues du rapport sur les surcotes marines de Des Garets (2005), réalisé dans le cadre du projet ARAI-1. Ce rapport indique que les houles de tempête ont une période généralement comprise entre 10 et 15 secondes pour des amplitudes atteignant couramment les 10-15 mètres. (ce fut le cas par exemple lors du cyclone Nano qui a ravagé l'archipel des Tuamotu en janvier 1983). Il préconise de prendre une hauteur significative de 12 m et une période de 13s pour l'évènement de référence dans l'archipel des Tuamotu.

3.2.3. Données marégraphiques

Atoll	Hauteur PMVE/0 hydrographique
Tikehau	0.8 m
Ahe	0.6 m
Makemo	0.6 m
Anaa	0.8 m
Rangiroa	0.5 m

Tableau 1 - Hauteur de la pleine mer de vives-eaux par rapport au zéro hydrographique retenue pour les atolls étudiés

Tous les calculs sont effectués en considérant une marée de pleine mer de vives-eaux (PMVE). La hauteur de référence entre la PMVE et le zéro hydrographique (ZH) est déterminée à partir des cartes du SHOM lorsque celles-ci sont disponibles. En l'absence d'informations, nous avons utilisé la valeur proposée par le Service de l'Urbanisme. Les valeurs retenues pour les différents atolls sont présentées Tableau 1.

3.2.4. Données de surcote atmosphérique

Les surcotes marines associées aux cyclones sont relativement faibles en Polynésie en raison de l'absence de plateau continental. Elles peuvent néanmoins atteindre des hauteurs de l'ordre du mètre comme ce fut le cas à Tiputa sur l'atoll de Rangiroa lors du passage du cyclone Orama en 1983 (des Garets, 2005). Nous avons considéré dans cette étude la valeur de référence (1 m) proposée dans le cadre du projet ARAI-1 (des Garets, 2005).

3.2.5. Élévation du niveau de la mer

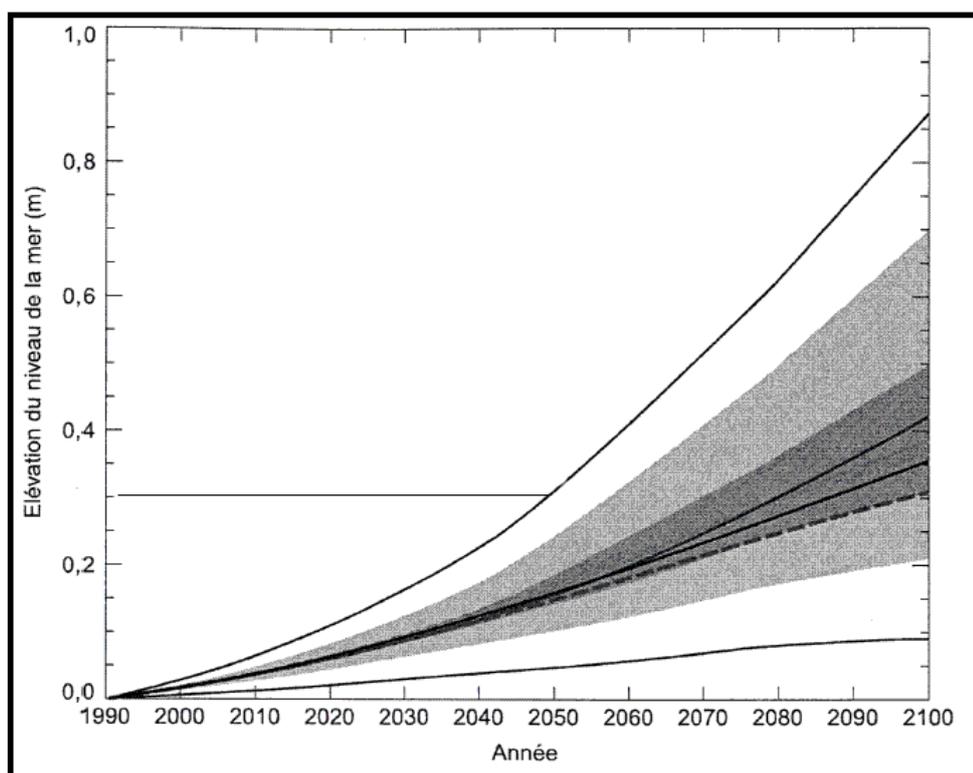


Figure 5 - Élévation moyen du niveau de la mer de 1990 à 2100 suivant plusieurs scénarios (GIEC)- des Garets, 2005

Le réchauffement de la planète devrait provoquer une augmentation significative du niveau moyen de la mer dans les prochaines décennies en raison de la dilatation thermique de l'eau et de la fonte des glaciers et des calottes polaires. Il est encore

difficile de quantifier cette élévation avec précision compte tenu des incertitudes sur les modèles et des disparités locales. Nous nous en sommes tenu une fois de plus aux recommandations du rapport de des Garets, 2005, qui préconise de prendre en compte la valeur réaliste la plus contraignante donnée par les modèles en 2050, à savoir une élévation de 30 centimètres (Figure 5).

3.3. DESCRIPTION ET PARAMÉTRAGE DES MODÈLES UTILISÉS

3.3.1. Modèle SWAN

Description

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, à partir de données de vent, de bathymétrie et de courants. On pourra se référer à Booij *et al.* (2004) pour une description détaillée du modèle. 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 peut fonctionner en mode stationnaire (données de forçage constantes dans le temps) ou transitoire (données de forçage dépendantes du temps) en 1D ou en 2D. Il est formulé en coordonnées cartésiennes (domaine de faible emprise) ou sphériques (domaine de grande emprise), le maillage pouvant être rectangulaire ou curviligne.
 - 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.

Les propriétés de SWAN et les phénomènes qu'il peut modéliser sont résumés dans le tableau suivant (cf. Illustration 1).

Propriétés des modèles	SWAN
Base des formulations	Conservation de l'action de la houle
Domaine de propagation	360°
Théorie de la houle	Linéaire
Stationnaire ou transitoire	Stationnaire/Transitoire
Caractéristiques maillage	Différences finies, cartésien, sphérique, rectangulaire, curviligne
Densité maillage/longueur d'onde des vagues	Indépendant
Dépendance de la qualité des résultats/densité maillage	Faible
Réfraction	Oui
Diffraction	Oui (depuis déc. 2004)
Réflexion	Oui (ouvrages)
Gonflement	Oui
Déferlement	Battjes et Janssen (1978)
Interaction houle-courant	Oui
Interactions vague-vague	Triplet, quadruplet
Génération de la houle (Vent)	Modèles de Phillips, Miles/champs de vent homogènes ou hétérogènes
Dissipation énergie par frottements au fond	Modèle de Hasselman et al. (1973), Collins (1972), Madsen et al. (1988)
Dissipation énergie par moutonnement	Oui
Calcul de la surcote (set-up)	Oui (profil et zone)
Prise en compte d'obstacles	Modèle de Seelig

Illustration 1 - Tableau récapitulatif des propriétés de SWAN.

Limites

SWAN ne doit pas être utilisé sur des domaines où les variations de hauteur d'eau sont importantes sur une échelle horizontale de quelques longueurs d'onde. C'est pourquoi les résultats de SWAN ne seront pas précis à proximité immédiate d'obstacles (jetées, brises lames) ou au niveau des ports.

Paramètres

Le code SWAN est ici utilisé en configuration « standard », avec un coefficient de frottement de Madsen de 0,05 et un coefficient de déferlement de 0,73.

3.3.2. SURFWB

Description

Le code SURFWB est développé par Fabien Marche et Philippe Bonneton des universités Montpellier II et Bordeaux 1 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 bi-dimensionnel 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).

Limites

SURFWB ne modélise pas encore le déferlement (son implémentation fait l'objet d'une thèse à l'université Bordeaux 1. Il est donc nécessaire de coupler SURFWB à un code qui tienne compte du déferlement (SWAN dans cette étude).

Paramètres

Le principal paramètre modulable dans SURFWB est le coefficient de friction. Nous avons considéré ici un coefficient de Manning uniforme égal à 0,03. Cette valeur est valable pour des plages de sable grossier ou du beach-rock (grès de plage), caractéristiques des sites considérés dans cette étude.

3.4. DÉTERMINATION DE L'ALÉA

En accord avec le service de l'Urbanisme, l'évaluation des niveaux d'aléas des sites étudiés se fera en croisant les résultats donnés par SURFWB en termes de hauteurs d'eau et de vitesses selon la classification de l'aléa couramment utilisée lors des études d'inondation (voir Tableau 2 issu de Stollsteiner, 2009). Ces niveaux permettront par la suite d'identifier les zones pour lesquelles la construction d'habitations doit être proscrite. Ils ont été établis en regardant à chaque pas de temps et en chaque point du profil ou de la zone considéré, la classe d'aléa correspondante en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse. Le niveau d'aléa le plus élevé obtenu en chaque point pendant la durée de la simulation a été retenu.

Hauteur \ Vitesse	Vitesse < 0,5 m/s	Vitesse >= 0,5 m/s
H < 0,5 m	Faible	Moyen
0,5 =< H < 1 m	Moyen	Fort
H > 1 m	Fort	Très fort

Tableau 2 - Table des aléas en fonction des couples de valeurs hauteur d'eau/vitesse (Stollsteiner, 2009).

À noter que cette classification constitue une amélioration par rapport à la classification précédente utilisée pour la prise en compte de l'aléa surcotes marines dans les Tuamotu (Mompelat, 2006) qui se basait uniquement sur les 3 classes de hauteur d'eau (< à 0,5 m, entre 0,5 et 1 m, >= à 1 m) et ne tenait donc pas compte des vitesses.

3.5. PROJECTION DE BLOCS

Lors d'un événement cyclonique, des blocs plus ou moins volumineux peuvent être entraînés par les vagues, ou encore arrachés à leur substrat. Ils sont susceptibles d'être déplacés sur plusieurs dizaines, voire centaines de mètres et de provoquer des dégâts considérables, en particulier sur l'habitat. Il est donc important d'en tenir compte, dans la mesure du possible, pour identifier les zones constructibles.

Des expressions analytiques simples ont été établies pour permettre d'estimer les conditions hydrauliques nécessaires pour qu'il y ait transport. Nous utiliserons dans cette étude les formules développées par Nott (2003), qui expriment la vitesse minimum u_{\min} pour laquelle un bloc sera transporté ou excavé du substrat par :

$$\text{Transport de blocs : } u_{\min}^2 = \frac{2ag(\rho_s - \rho_w)/\rho_w}{C_d(ac/b^2) + C_1} \quad (1)$$

$$\text{Excavation du substrat : } u_{\min}^2 = \frac{ag(\rho_s - \rho_w)/\rho_w}{C_1} \quad (2)$$

avec :

- a, b, et c les trois axes du bloc (exprimés en mètres),
- $\rho_w = 1,02$ la densité de l'eau,
- $\rho_s = 2,1$ la densité du bloc,
- $C_d = 2$ le coefficient de trainée,
- $C_1 = 0,178$ le coefficient de soulèvement.

La vitesse seuil nécessaire au transport est représentée pour plusieurs exemples de blocs dans la Figure 6. On constate qu'il n'y a pas de relation simple entre cette vitesse et le volume d'un bloc car la forme de celui-ci joue un rôle prépondérant.

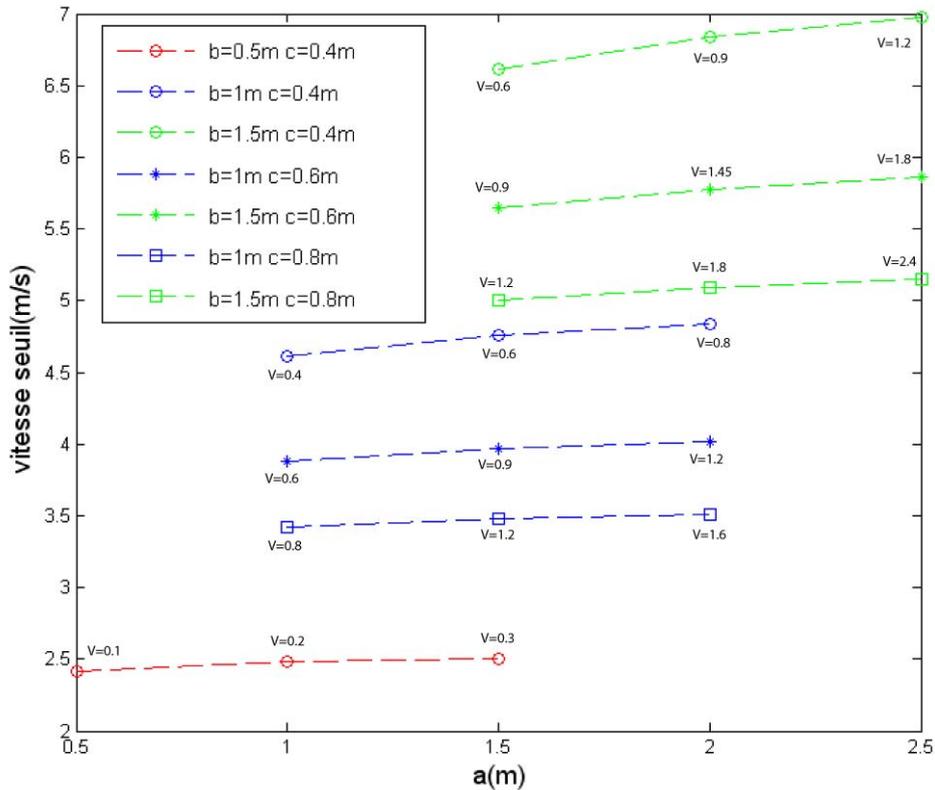


Figure 6 - Vitesse seuil nécessaire pour qu'il y ait transport de blocs (pour différentes dimensions de blocs : a, b, et c), établie à partir de l'équation 1. Pour chaque bloc est indiqué le volume V correspondant.

La Figure 7 représente la vitesse seuil nécessaire pour arracher un bloc au niveau du platier récifal en fonction de sa longueur.

Ces 2 figures montrent qu'il faut une vitesse minimale proche de 2.5 m/s pour transporter ou excaver les blocs les plus petits (quelques centaines de kg) et qu'avec des vitesses supérieures à 4 m/s ceux-ci peuvent dépasser plusieurs tonnes.

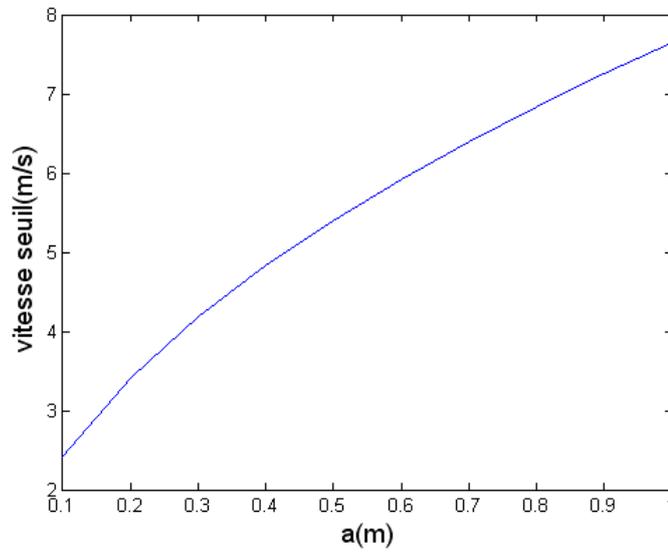


Figure 7 - Vitesse seuil nécessaire pour arracher un bloc à un substrat faillé en fonction de la longueur a du bloc (établie à partir de l'équation 2).

4. Résultats et analyse des simulations

La modélisation basée sur les codes SWAN et SURF-WB a été réalisée pour déterminer la submersion générée par un événement cyclonique de référence sur 8 sites de l'archipel des Tuamotu qui sont listés Tableau 3.

Type de calcul	Atoll	Site	Altitude du plan d'eau / 0 hydrographique (m)	Vagues
Profil 1D	Tikehau	1) Profil Est	2,1	Hs : 12 m Tp : 13 s
		2) Profil ouest avec Feo	2,1	
		3) Profil Ouest sans Féo	2,1	
	Ahe	4) Tenukupara	1,9	
	Makemo	5) Puheva	1,9	
	Anaa	6) Profil Nord	2,1	
		7) Profil Est	2,1	
2D	Rangiroa	8) Avatoru	1,8	

Tableau 3 - Liste des 8 sites des Tuamotu étudiés et conditions initiales en termes du niveau d'eau et des vagues pour les calculs de submersion.

7 sites de ces sites seront traités sous forme de profil. Seules les données topobathymétriques acquises à Avatoru permettent un traitement de ce site en 2D.

Initialement deux autres profils sur Fakarava et Mataiva devaient être modélisés. A ce jour, les levés topo-bathymétriques n'ont toujours pas été réalisés, c'est pourquoi ils sont absents de ce rapport.

Les caractéristiques des vagues cycloniques considérées sont les mêmes pour les 8 sites, à savoir : une hauteur significative (Hs) de 12 m, une période pic de 13 s et arrivant frontalement au rivage.

Les niveaux d'eau initiaux qui intègrent une surcote atmosphérique de 1 m, une élévation du niveau de la mer de 0,30 m ainsi que la marée (niveau de PMVE) varient entre 1,8 (Avatoru) à 2,1 m (Tikehau, par exemple).

4.1. MODELES 1D

Nous présenterons dans cette partie les résultats obtenus pour les 7 profils. La démarche adoptée dans cette étude dans le cas des études 1D sera décrite en détails pour le profil Est de Tikehau (4.1.1). Elle reste valable pour les autres profils.

4.1.1. Tikehau, profil Est

Le profil topo-bathy a été réalisé au niveau de la piste de l'aérodrome du village de Tuherahera, au sud-ouest de l'atoll (voir Figure 8).



Figure 8 - Profils réalisés pour les simulations d'inondation cyclonique de l'atoll de Tikehau.

Une première étape pour le calcul de l'inondation a été de forcer le modèle SWAN (3.3.1) avec les conditions aux limites correspondant à l'évènement extrême de référence

Les résultats donnés par SWAN sont représentés dans la Figure 9. La hauteur significative des vagues à la côte est de l'ordre de 2 m, pour un setup d'environ 1,3 m. Ces résultats ne permettent pas de déterminer si la côte sera ou non inondée, et encore moins de quantifier cette inondation en termes de volume d'eau ou de vitesse horizontale. Comme mentionné précédemment, il est nécessaire pour cela de coupler SWAN avec un code « vague à vague » performant (SURFWB dans cette étude). L'idée consiste à établir une série temporelle de hauteur d'eau à partir des résultats de SWAN, et de l'appliquer en entrée de ce nouveau code.

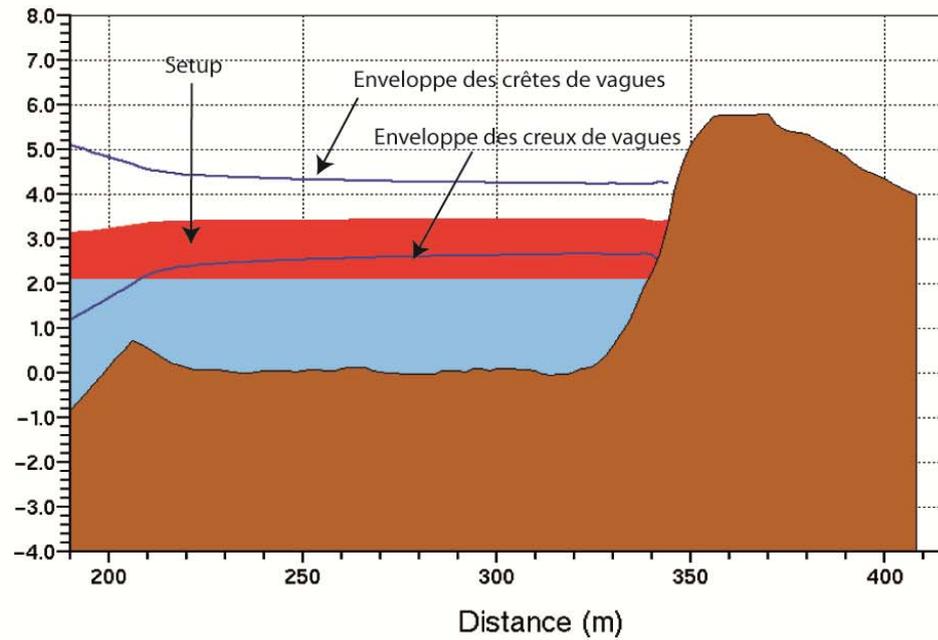
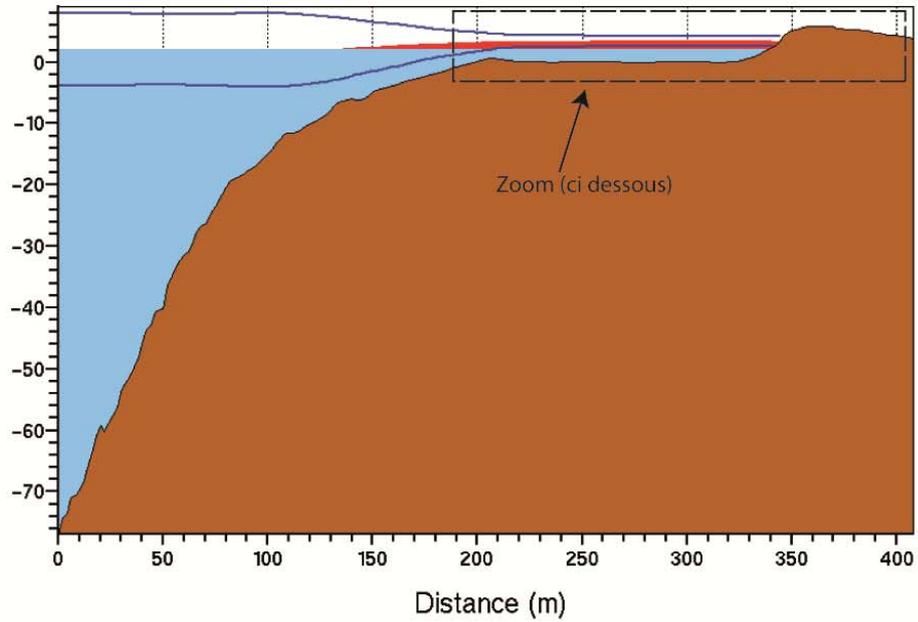


Figure 9 - Résultats donnés par SWAN dans le cas du profil Est de Tikehau.

En haut : tout le profil ; en bas : zoom. Marron : topographie ; bleu clair : niveau d'eau initial (tenant compte de la marée, de la surcote atmosphérique et de l'élévation du niveau de la mer) ; rouge : setup (élévation due aux vagues) ; courbes bleues : enveloppes des crêtes et des creux de vagues

Le spectre de vagues donné par SWAN à l'abscisse $x = 220$ m (choisi de telle façon que toutes les vagues aient déjà déferlées) est représenté dans la Figure 10. On retrouve la période pic $T_p = 13$ s imposée en conditions aux limites de même que deux périodes plus courtes à environ 3,5 s et 6,5 s. Ce spectre est utilisé pour générer une série temporelle de hauteur d'eau par transformée de Fourier (Figure 11). Celle-ci est appliquée en entrée de SURFWB pour le calcul de la submersion.

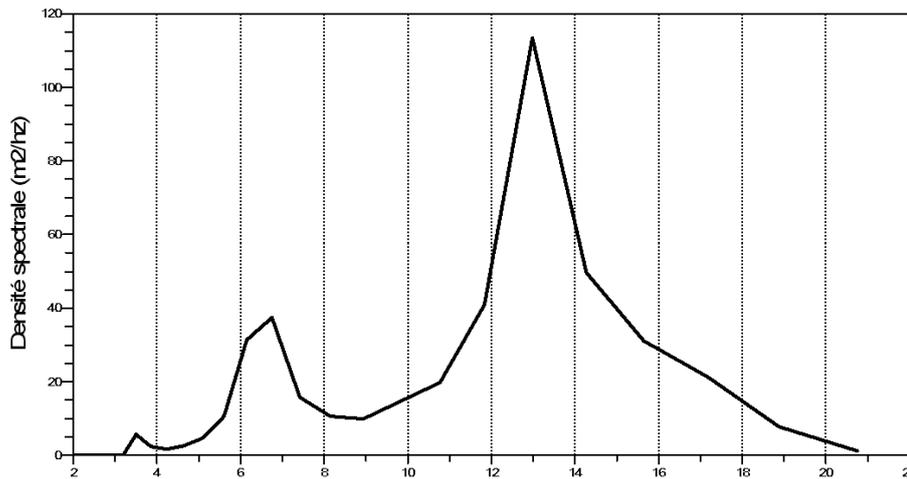


Figure 10 - Densité spectrale des vagues en fonction de la période (en secondes) à l'abscisse $x = 220$ pour le profil Est de Tikehau.

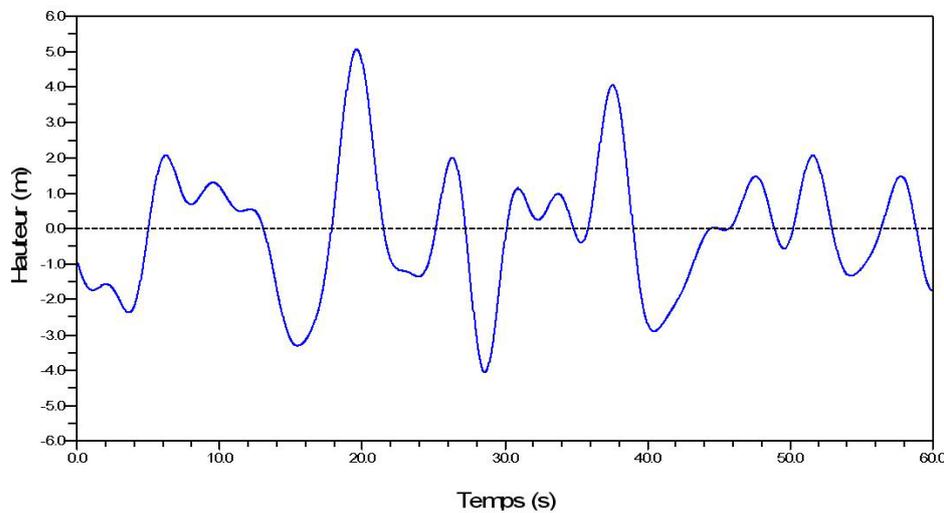


Figure 11 - Série temporelle de hauteur d'eau appliquée en entrée de SURFWB pour le profil Est de Tikehau.

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 (ex : Figure 12 pour $t = 30$ s).

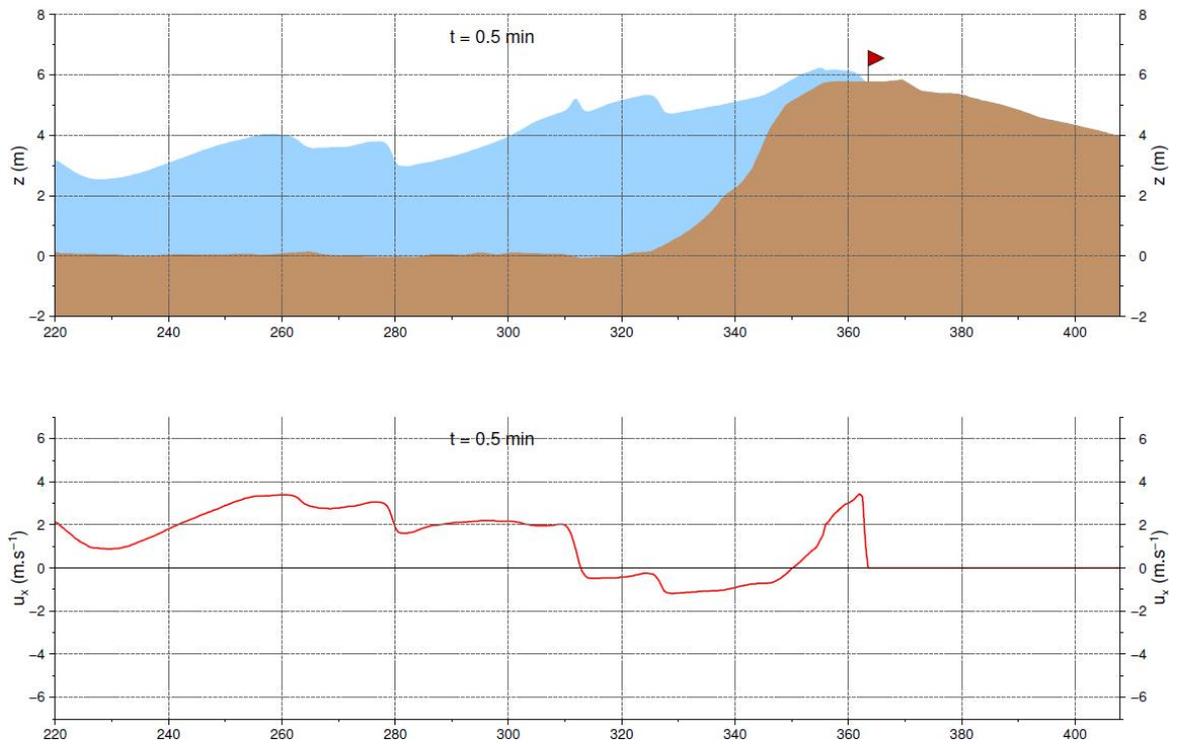


Figure 12 - SURFWB : niveau d'eau (en m) et vitesse horizontale (en m/s) à $t = 30$ s.
Le drapeau rouge indique l'emplacement de la ligne d'eau.

Les résultats des simulations entre $t = 0$ et $t = 8$ mn (voir Figure 13) indiquent que la zone en arrière de la plage serait complètement inondée dans le cas de l'évènement de référence, mais avec des hauteurs de submersion qui ne devraient pas dépasser la dizaine de centimètres. Les vitesses maximales à terre pourraient toutefois atteindre 2 à 3 m/s dans les premières dizaines de mètres après le franchissement des eaux.

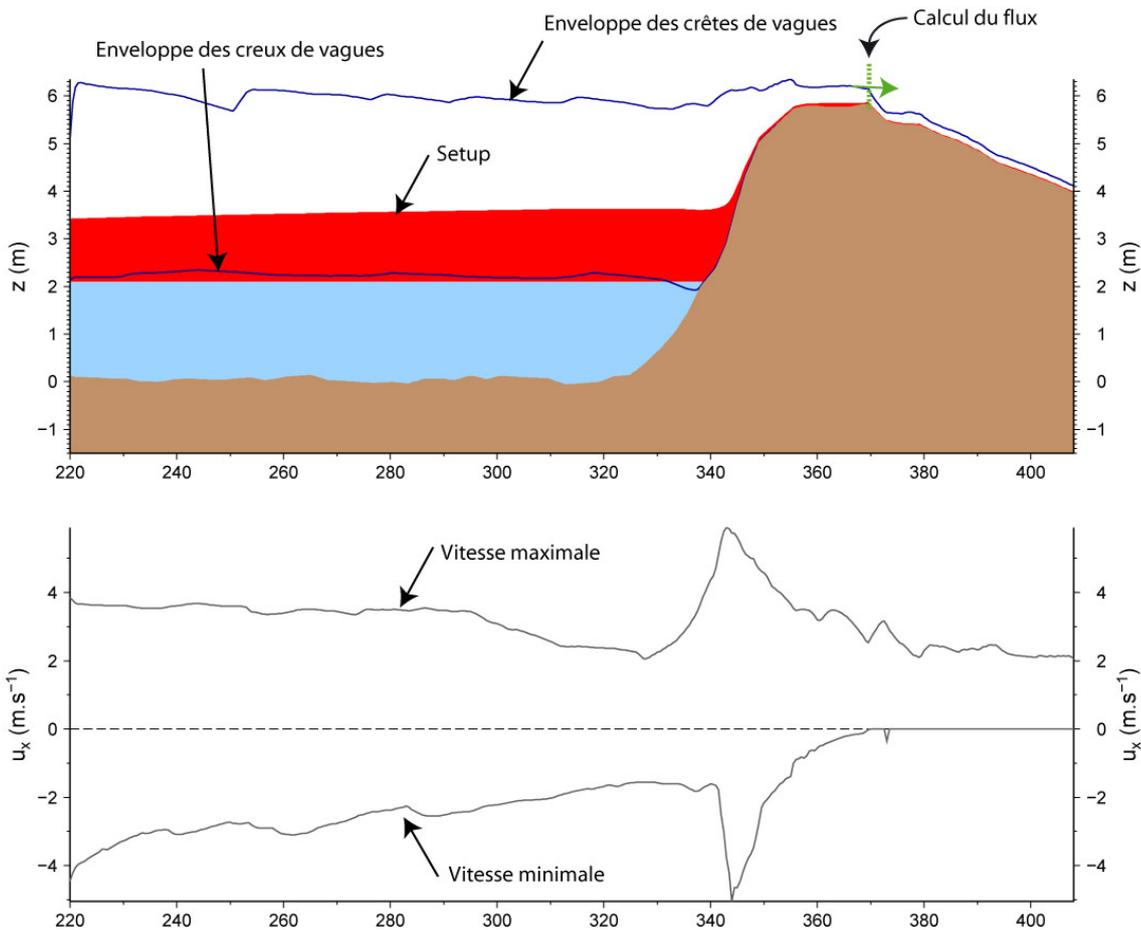


Figure 13 - Résultats de SURFWB dans le cas du profil Est de Tikehau (à comparer avec la Figure 9 obtenue avec SWAN).

En haut : enveloppes des crêtes et des creux de vagues, setup, et abscisse pour lequel on fait le calcul de flux (voir Figure 14) ; en bas : vitesses horizontales minimales et maximales le long du profil. Ces courbes ont été obtenues à partir des sorties de SURFWB entre $t = 30$ s (après l'arrivée sur la partie émergée de la première vague) et $t = 8$ mn (instant où on arrête le calcul, déterminé de manière arbitraire, mais de telle manière qu'il soit grand devant la période pic des vagues).

Une autre manière de quantifier l'importance de la submersion consiste à calculer le volume d'eau cumulé à l'intérieur des terres. En intégrant par rapport au temps le flux d'eau franchissant l'abscisse d'altitude maximale (voir Figure 13), on obtient ainsi la courbe représentée dans la Figure 14. On constate que ce volume reste assez faible, de l'ordre du millier de mètres cube par mètre de côte pendant la durée du calcul, à savoir 8 minutes. L'inondation n'est d'ailleurs pas continue.

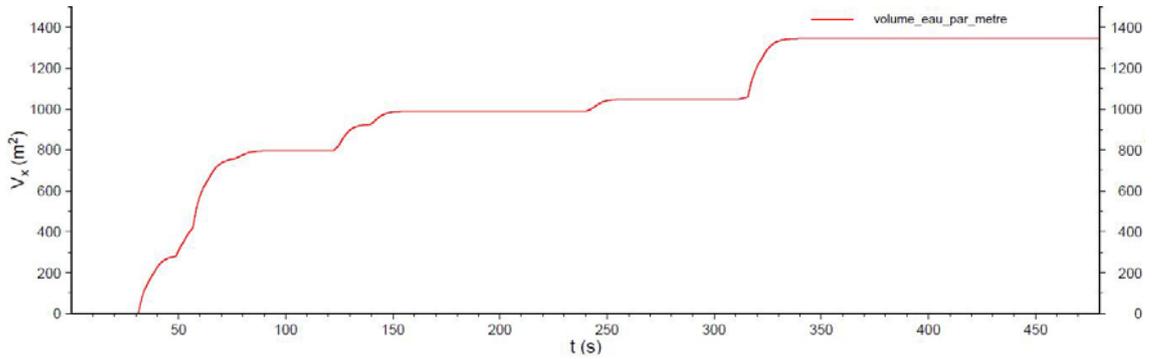


Figure 14 - Volume d'eau cumulé par mètre de côte en fonction du temps.

Les résultats indiquent que le bourrelet surplombant la façade océanique joue un rôle relativement efficace puisque les terrains qui se trouvent en arrière sont en aléa modéré. Si les vitesses d'écoulement restent élevées, les hauteurs d'eau sont en effet relativement faibles comme on l'a vu précédemment.

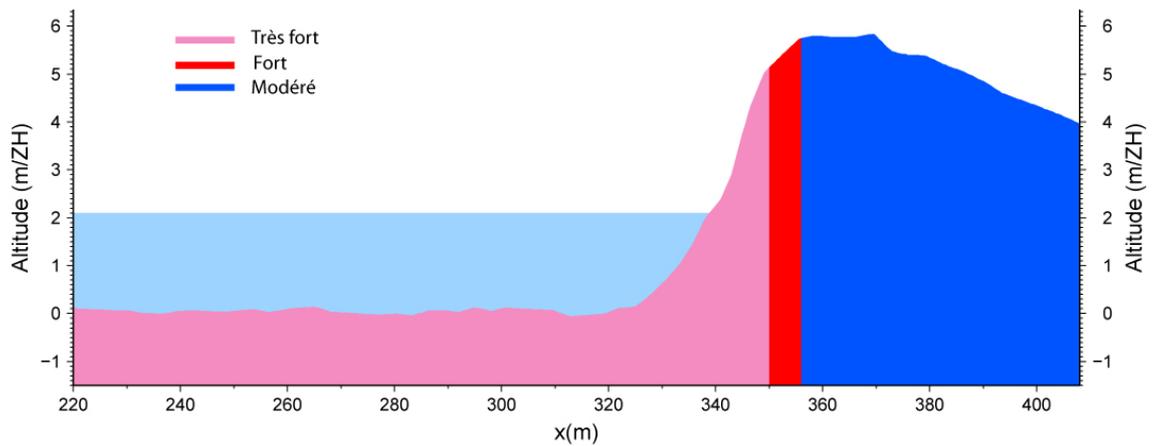


Figure 15 - Niveaux d'aléa le long du profil Est de Tikehau établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.

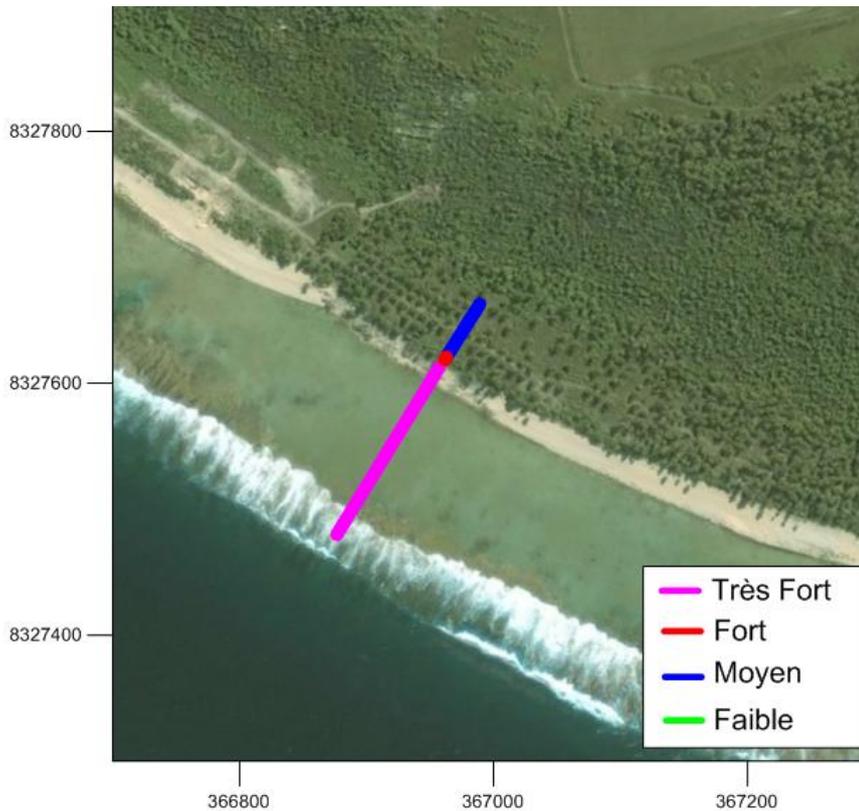


Figure 16 - Niveaux d'aléa le long du profil Est de Tikehau (représentation cartographique).

Les vitesses de l'ordre de 4 m/s au niveau du platier (Figure 13), indiquent que des blocs de plusieurs tonnes peuvent être transportés et par la suite projetés en haut du bourrelet (les vitesses atteignent près de 6 m/s au niveau de la pente). Seuls les blocs de quelques dixièmes de mètres cube -donc de quelques centaines de kilos- seront entraînés à l'intérieur des terres où les vitesses chutent rapidement à 2-3 m/s.

4.1.2. Tikehau, profil Ouest

Ce profil a été réalisé au niveau de la partie ouest du village de Tuherahera (Figure 8). Il passe par un féo (corail dolomitisé émergé suite au soulèvement de l'atoll).

La démarche employée pour les calculs d'inondation, les cartes d'aléa, et les transports de blocs est la même que pour le profil Est de Tikehau (4.1.1). Nous nous contenterons donc, de même que pour les profils suivants, de présenter et d'analyser les principaux résultats.

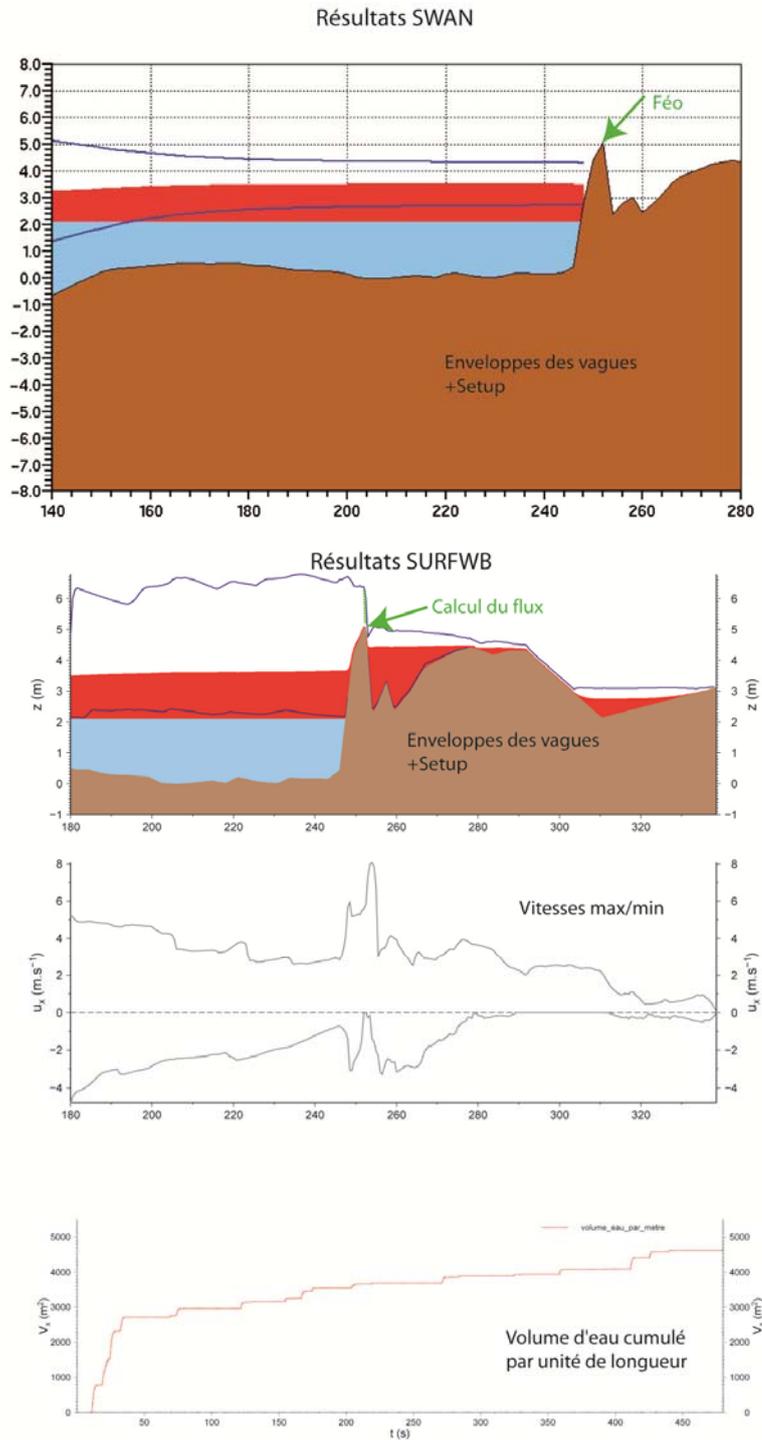


Figure 17 - Résultats de SWAN (en haut) et de SURFQB (en dessous) pour le profil ouest de Tikehau.

Pour rappel, le setup est représenté en rouge, et les courbes bleues correspondent aux enveloppes des crêtes et des creux de vagues (voir les légendes des Figure 9, Figure 13, et Figure 14 pour plus de détails).

Les calculs réalisés avec SURFWB indiquent que les vagues générées par l'évènement de référence sont suffisantes pour surmonter l'obstacle constitué par le féo et submerger les terres. Les dépressions situées en arrière du féo ont tendance à se remplir d'eau, jusqu'à atteindre des hauteurs de l'ordre de 1-2 m. Celui-ci est toutefois suffisamment efficace pour limiter les volumes en surverse (moins de 5 000 m³ par mètre de côte pendant toute la durée de la simulation-à savoir 8 mn). Par ailleurs, les vitesses décroissent toutefois assez rapidement avec la distance au féo, et deviennent proches de zéro à l'extrémité du profil, côté lagon (l'eau cesse donc de se propager). Les niveaux d'aléa (voir Figure 18 et Figure 19) diminuent eux aussi lorsque l'on s'éloigne de la côte. Ils s'échelonnent de « très fort » au niveau de la dépression en arrière du féo (où l'eau peut être stockée) à « faible » à l'extrémité du profil, au niveau duquel les vitesses sont faibles et les hauteurs d'eau inférieures à 0,50 m.

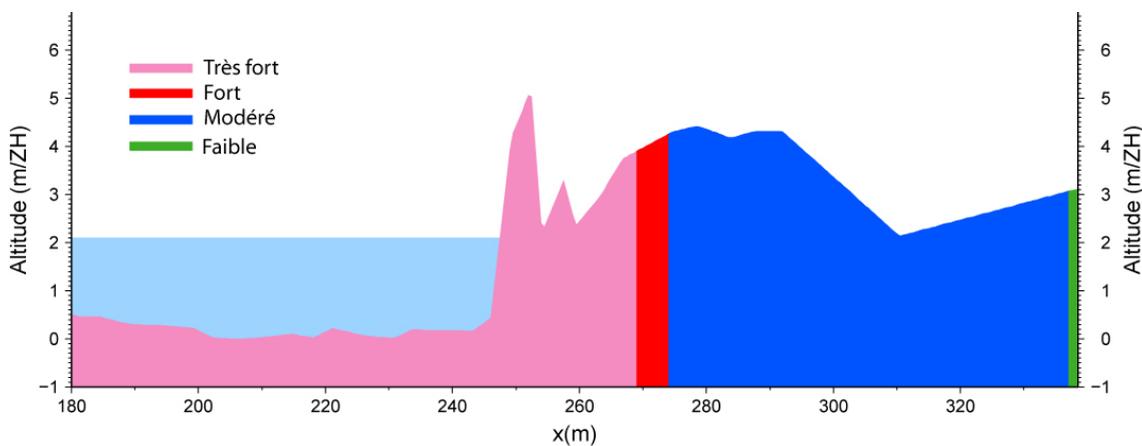


Figure 18 - Niveaux d'aléa le long du profil Ouest de Tikehau (en présence d'un féo) établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.

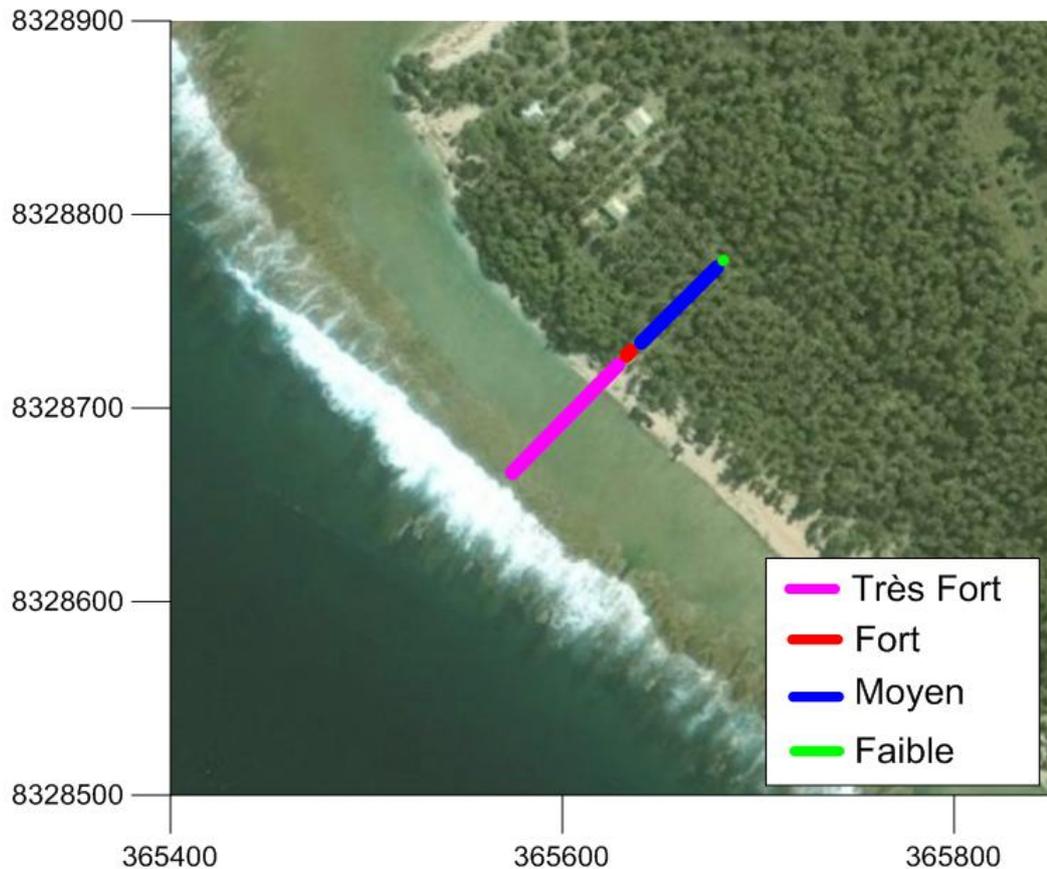


Figure 19 - Niveaux d'aléa le long du profil Ouest de Tikehau en présence de féo (représentation cartographique)

Il est peu probable dans ce cas de figure que des blocs importants puissent être transportés en arrière de la plage, compte tenu du rôle protecteur du féo.

4.1.3. Tikehau, profil Ouest dans l'hypothèse d'une absence de féo

Les féo ne sont pas présents de manière continue tout le long de la côte. Ils ne jouent donc pas en certains endroits le rôle protecteur mentionné ci-dessus. Ceci est d'autant plus vrai que les masses d'eau peuvent se déplacer latéralement (càd dans une direction parallèle à la côte), ce qui a pour effet de diminuer la capacité des féo à endiguer la submersion. La Figure 20 montre les résultats qui seraient obtenus pour le profil Ouest de Tikehau en l'absence de féo.

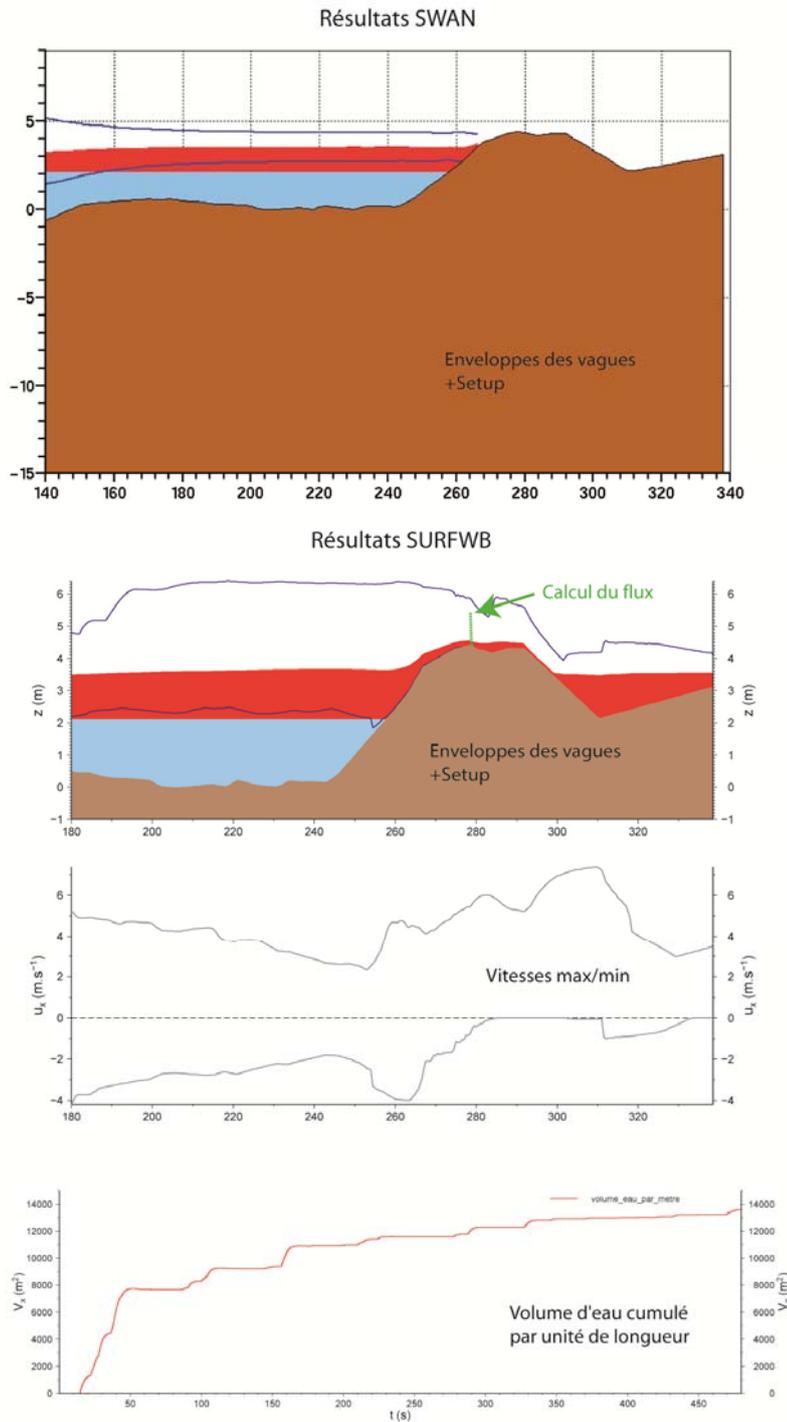


Figure 20 - Résultats de SWAN (en haut) et de SURFWB (en dessous) pour le profil ouest de Tikehau.

Pour rappel, le setup est représenté en rouge, et les courbes bleues correspondent aux enveloppes des crêtes et des creux de vagues.

Les hauteurs significatives de vagues et le setup après déferlement sont les mêmes que précédemment (environ 1,9 m et 1,4 m respectivement), mais l'inondation implique cette fois des volumes d'eau nettement plus importants en raison de l'absence de féo (près de 14 000 m³ par mètre de côte pendant le temps de la simulation, soit environ 3 fois plus que précédemment). Ceci se traduit par des hauteurs d'eau en général supérieures à 1 m, et qui peuvent atteindre 2 m dans les zones de dépression topographique, comme pour l'abscisse $x \approx 310$ m, et des vitesses plus importantes (de l'ordre de 5 m/s en moyenne contre 2 m/s dans le cas de la présence d'un féo). Remarquons toutefois que ces résultats ont été obtenus en supposant que l'eau pouvait s'écouler librement à droite du profil. Les hauteurs d'eau pourraient être encore plus importantes en cas d'obstacle.

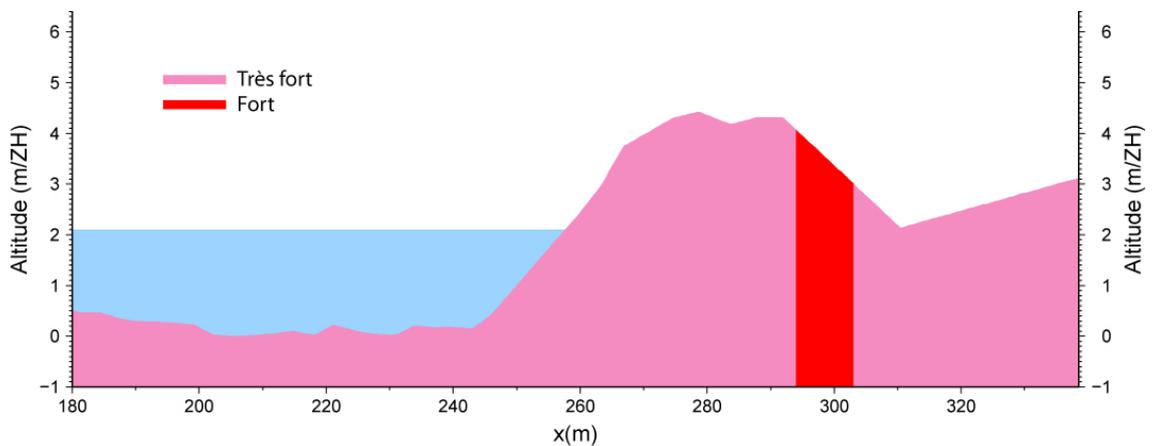


Figure 21 - Niveaux d'aléa le long du profil Ouest de Tikehau (en l'absence de féo) établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.

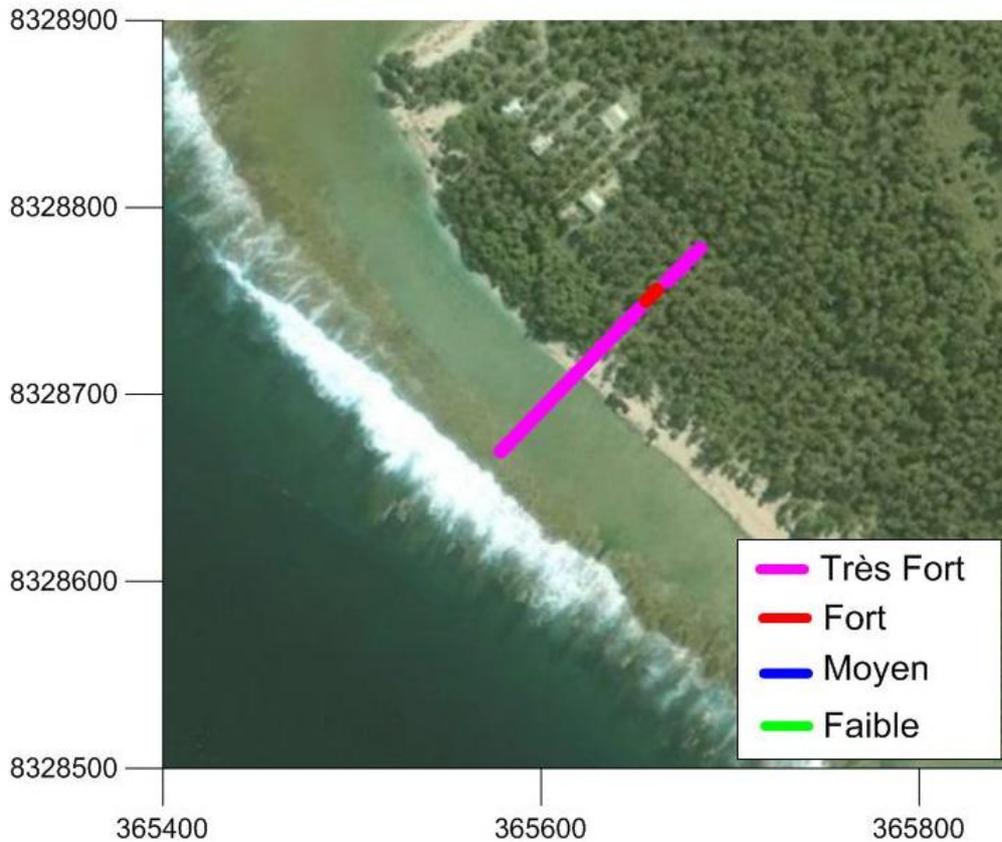


Figure 22 - Niveaux d'aléa le long du profil Ouest de Tikehau en l'absence de féo (représentation cartographique).

Compte tenu de ces résultats, l'aléa est classé dans la catégorie « très fort » le long de la majorité du profil (Figure 21 et Figure 22). Il n'est considéré comme « fort » que sur une portion d'une dizaine de mètres.

Les vitesses, supérieures en général à 4 m/s, semblent suffisamment élevées pour permettre le transport de blocs de l'ordre du mètre cube (voir Figure 6). Des excavations de blocs d'une dizaine de kilos sont en outre envisageables.

4.1.4. Ahe

Ce profil a été réalisé au niveau du village de Tenukupara sur l'atoll d'Ahe. Les résultats donnés par SWAN (un setup d'environ 1,5 m après déferlement pour des hauteurs de vagues caractéristiques de l'ordre de 1,8 m, voir Figure 23) indiquent avant même de faire des calculs précis avec SURFWB que l'atoll serait submergé dans le cas de l'évènement de référence considéré dans cette étude. L'altitude maximale le long du profil (environ 2.8 m) est en effet trop faible pour que la topographie constitue une barrière efficace à la propagation des vagues. Les modélisations effectuées avec SURFWB (Figure 23, en bas) confirment que les terres émergées seraient totalement submergées, de manière permanente (le volume d'eau

cumulé augmente de façon continue) avec des hauteurs d'eau supérieures à 0.40 m. Les quantités d'eau impliquées sont de l'ordre de 60 000 m³ par minute, soit environ 4 fois plus que pour Tikehau dans le cas de figure où on ne tient pas compte des féo. Les vitesses horizontales sont importantes, de l'ordre de 4-5 m/s en régime permanent, ce qui permettrait le transport de blocs de plusieurs tonnes sur l'ensemble des terres émergées.

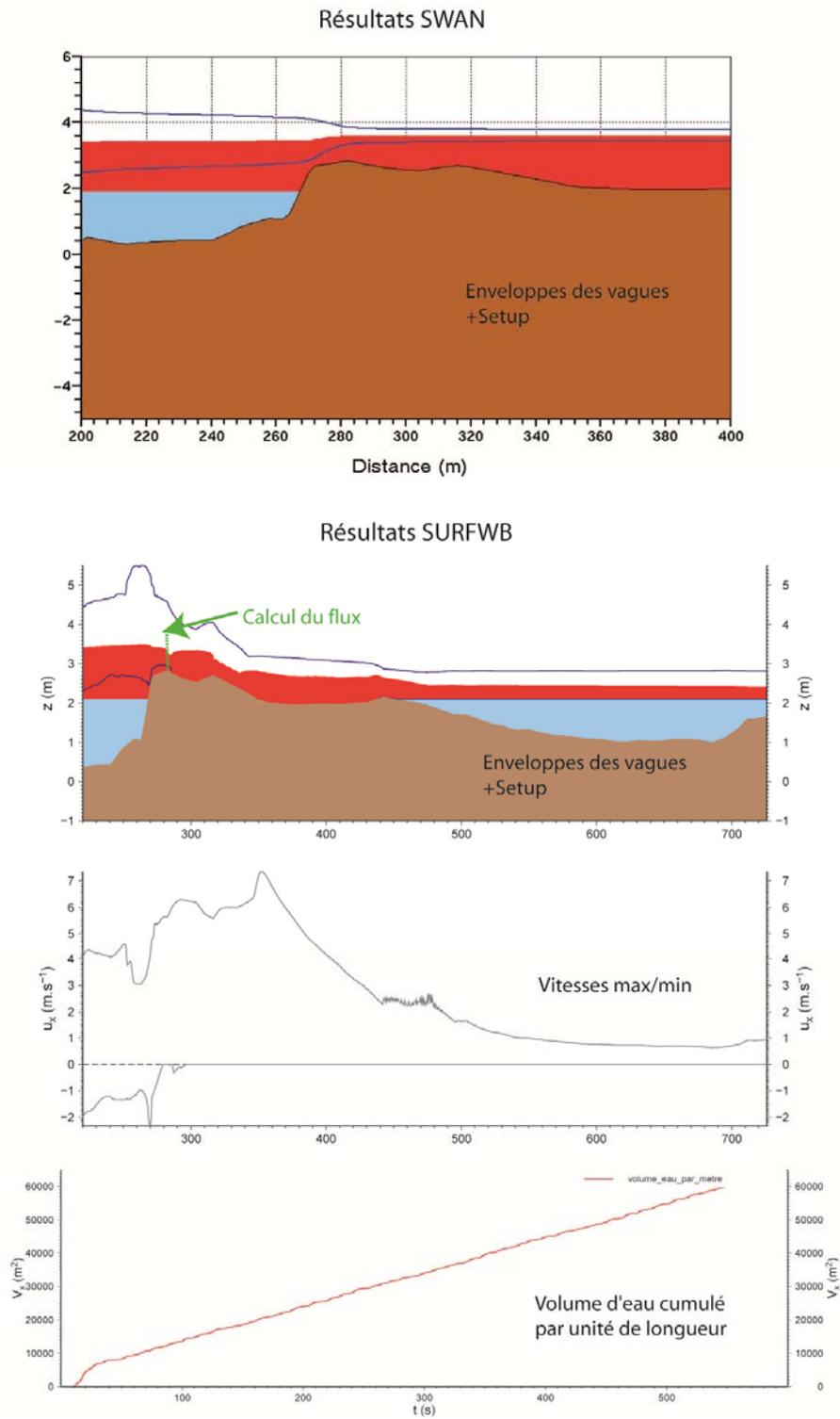


Figure 23 - Résultats donnés par SWAN (en haut) et par SURFWB (en dessous) pour le profil de Ahe.

Voir les Figure 9 Figure 13 et tFigure 14 pour une légende plus détaillée.

Le croisement des données de hauteur d'eau et de vitesse donne des niveaux d'aléa qui vont de « fort » à « très fort », et ne plaide donc pas en faveur de constructions dans cette zone.

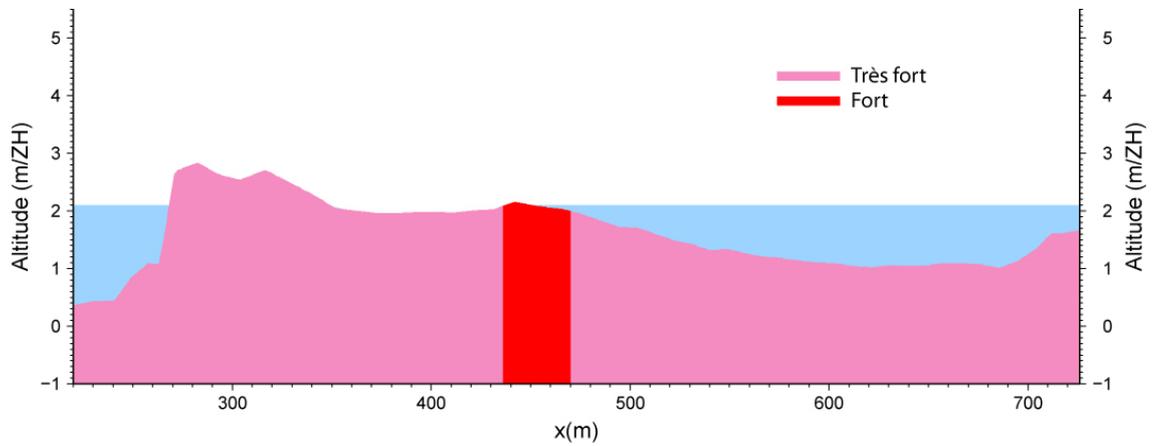


Figure 24 - Niveaux d'aléa au niveau du village de Tenukupara (atoll d'Ahe) établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.



Figure 25 - Niveaux d'aléa au niveau du village de Tenukupara, atoll d'Ahe (représentation cartographique).

4.1.5. Makemo

Ce profil a été réalisé au niveau du village de Puheva, sur l'atoll de Makemo. Les données topographiques relevées indiquent ici des variations latérales d'altitude qui ne sont pas négligeables. Selon que l'on contourne le phare par l'ouest ou par l'est par exemple, on peut se trouver avec des différentiels d'altitude de plus de 1 m. Partant du principe que l'écoulement se ferait principalement là où la topographie est la plus basse, nous n'avons pas tenu compte -en cas de variations latérales- des points d'altitude les plus élevés (nous n'avons pas considéré les relevés à l'ouest du phare par exemple). Les résultats indiquent (Figure 26) que la topographie (qui culmine à environ 5 m au niveau de la route orientée Est-Ouest au sud du phare) permet de limiter de manière importante les quantités d'eau susceptibles de submerger les terres émergées (moins de 350 m³ par mètre de côte pendant la durée de la simulation). Les hauteurs d'eau maximales au niveau des zones d'habitations sont rarement supérieures à 0,10-0,20 m. Les vitesses, relativement faibles (inférieures à 2 m/s en général, voir Figure 26), rendent peu probable le transport de blocs de plus de quelques dizaines de kilos sur quelques dizaines de mètres.

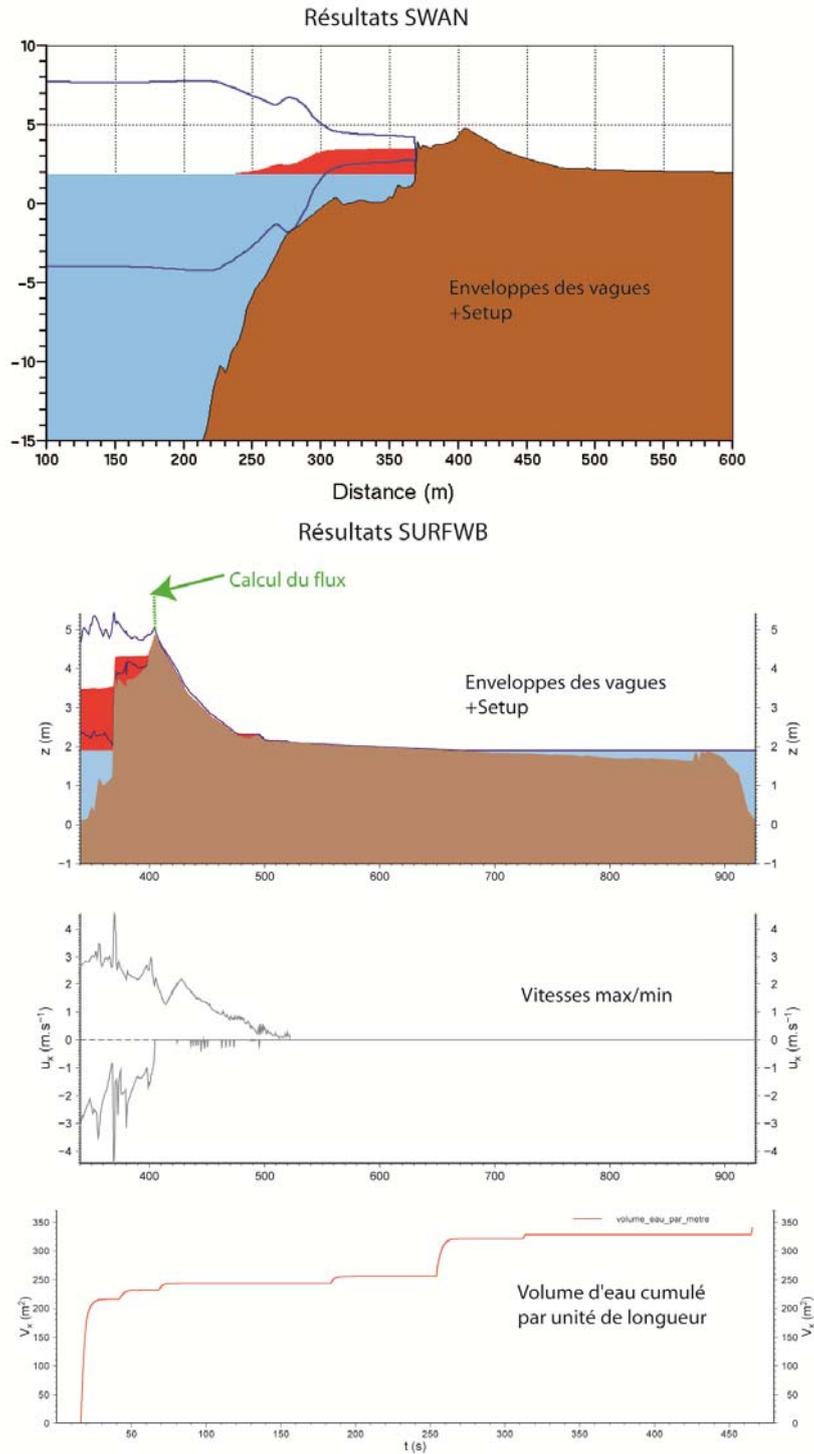


Figure 26 - Résultats donnés par SWAN (en haut) et par SURFWB (en dessous) pour le profil de Makemo.

Ces résultats donnent un niveau d'aléa « faible » dans la zone où sont situées la plupart des habitations. Il atteint toutefois un niveau « modéré » sur une petite centaine de mètre, juste au sud du phare (Figure 27 et Figure 28).

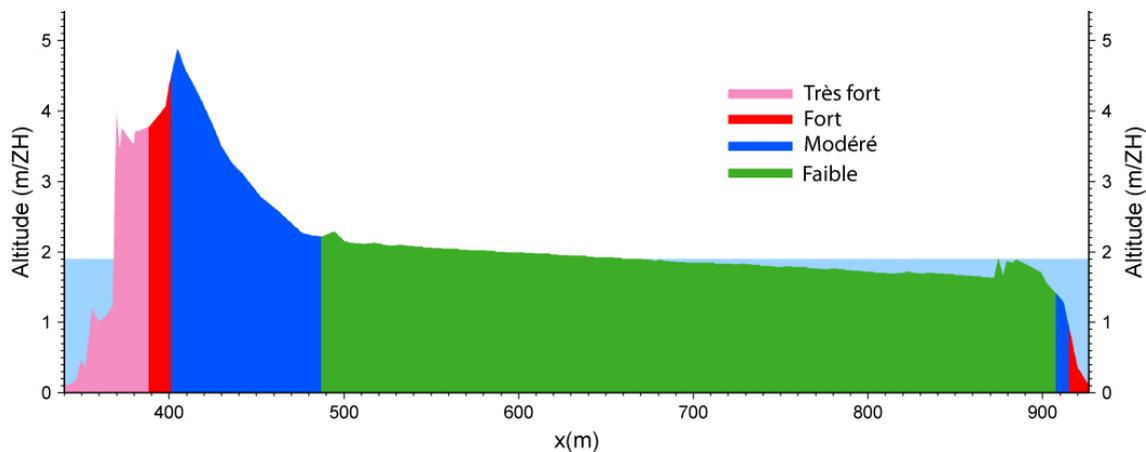


Figure 27 - Niveaux d'aléa au niveau du village de Puheva (atoll de Makemo) établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.

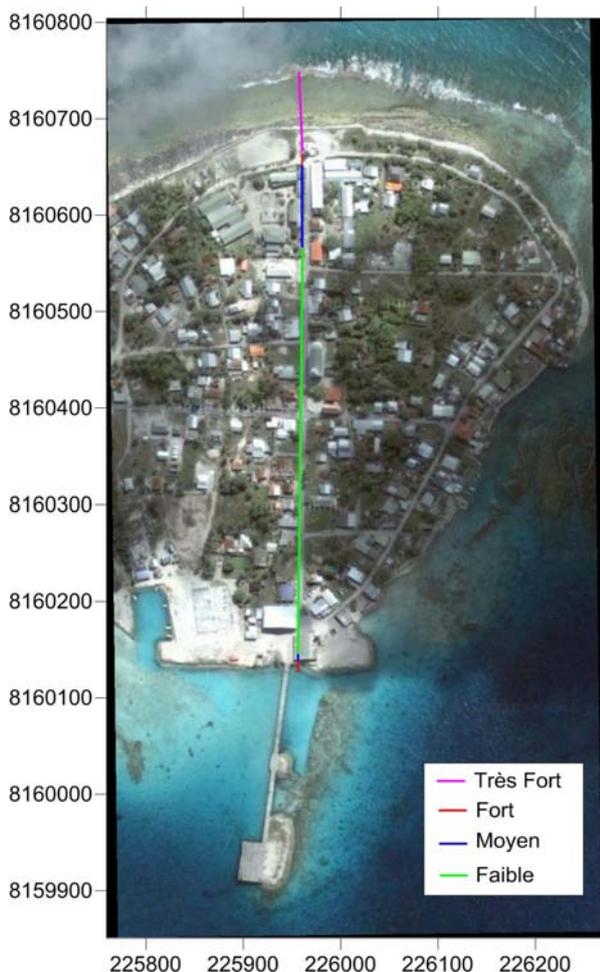


Figure 28 - Niveaux d'aléa au niveau du village de Puheva, atoll de Makemo (représentation cartographique).

4.1.6. Anaa, profil Nord

Ce profil a été réalisé dans la partie nord du village de Tukuhora, sur l'atoll de Anaa (voir Figure 31). Les résultats de SWAN et SURFWB indiquent que l'eau n'inonderait qu'une petite partie de cette zone, en raison de la topographie qui culmine rapidement à plus de 5m (Figure 29). En conséquence, la majorité du profil est classé en aléa « faible » (Figure 30 et Figure 31). La partie la plus au sud (sur une centaine de mètres) peut se retrouver en revanche sous le niveau d'eau, ce qui implique un aléa plus important (de « modéré » à « fort »).

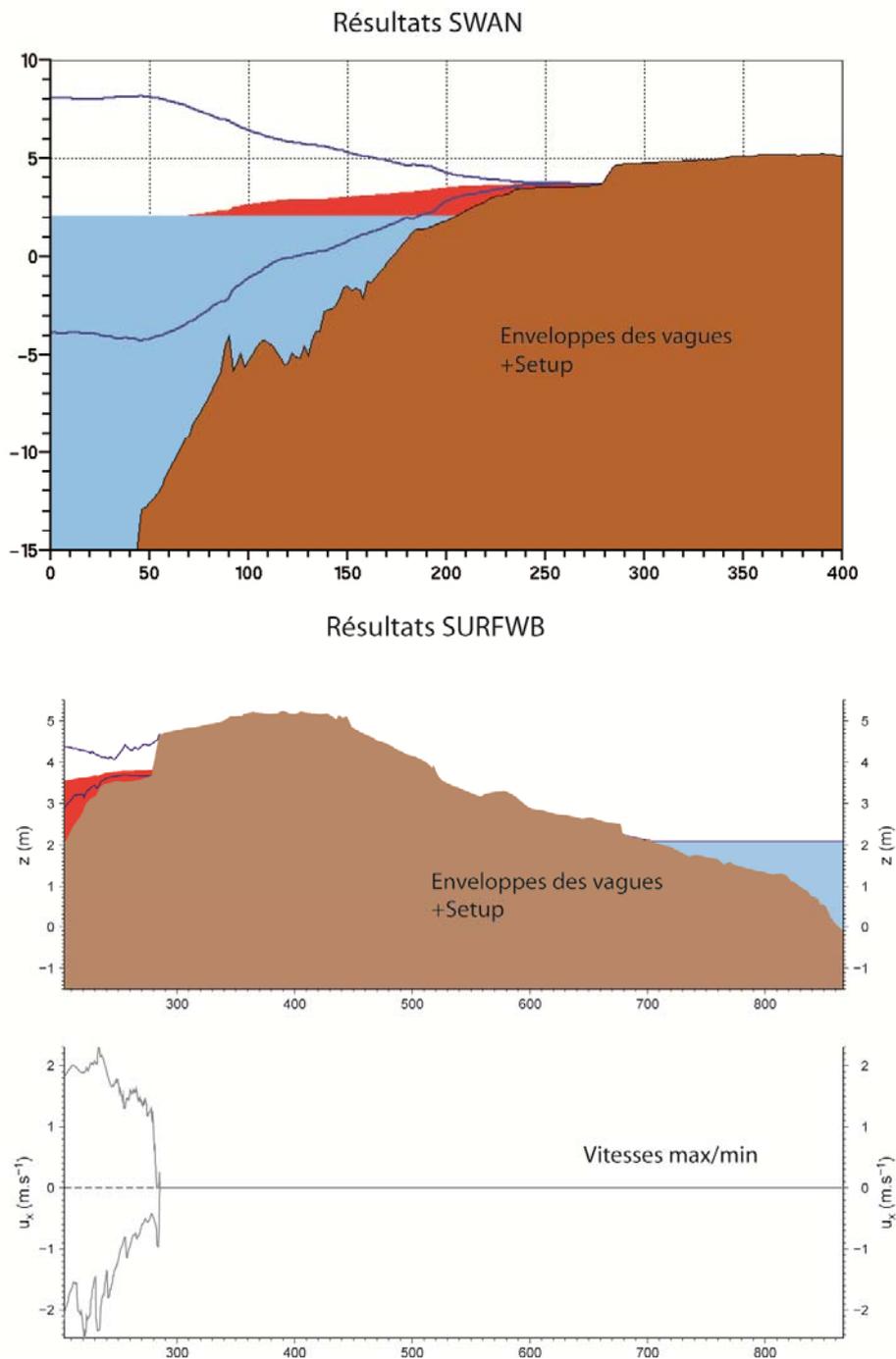


Figure 29 - Résultats donnés par SWAN (en haut) et par SURFWB (en dessous) pour le profil Nord d'Anaa.

Voir les Figure 9 et Figure 13 pour une légende plus détaillée (contrairement aux figures du même type réalisées pour les autres profils, le volume d'eau cumulé en fonction du temps n'est ici pas représenté, dans la mesure où il n'y a pas d'eau en surverse dans ce cas précis).

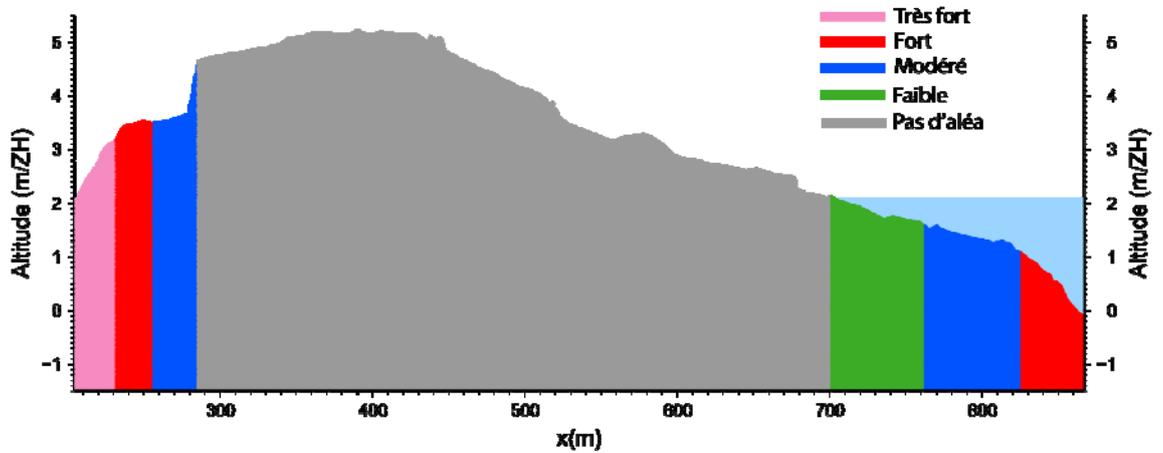


Figure 30 - Niveaux d'aléa au niveau de la partie nord du village de Tukahora (atoll d'Anaa) établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.

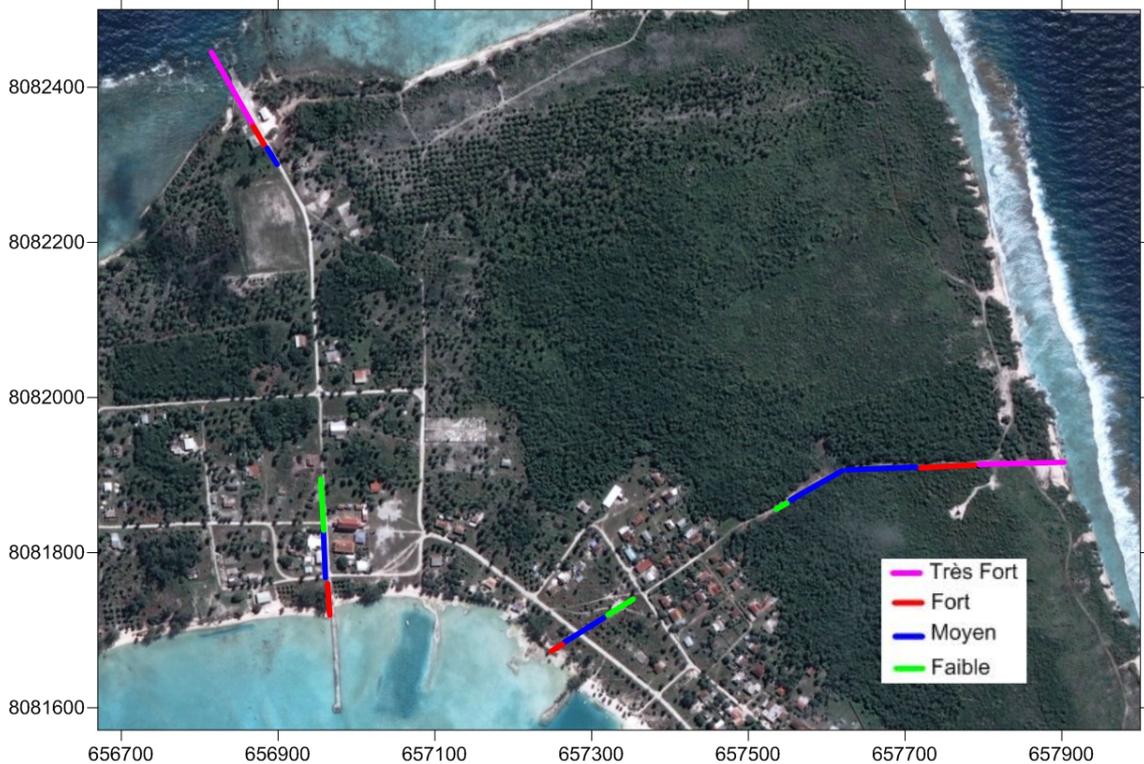


Figure 31 - Niveaux d'aléa au niveau du village de Tukahora, atoll d'Anaa (représentation cartographique).

4.1.7. Anaa, profil Est

Ce profil a été réalisé à l'est du village de Tukuroa (atoll d'Anaa), à quelques centaines de mètres au nord de la piste de l'aéroport. Les données bathymétriques n'étant pas

disponibles, ce sont celles qui ont été réalisées près de la côte au nord du village qui ont été utilisées (Figure 32). Les résultats obtenus ne sont donc à priori pas valides s'il y a d'importantes variations latérales de bathymétrie dans la zone d'étude.



Figure 32 - Données bathymétriques utilisées pour compenser l'absence de mesures offshore pour le profil est d'Anaa.

Les résultats (Figure 33) indiquent que seule la partie Est du profil serait submergée dans le cas de l'évènement de référence considéré dans cette étude. Les hauteurs de submersion seraient dans l'ensemble inférieures à 1 m, et on s'attend à ce que les vitesses soient relativement modérées (2-3 m/s. Il faut noter par ailleurs que la submersion n'est pas continue.

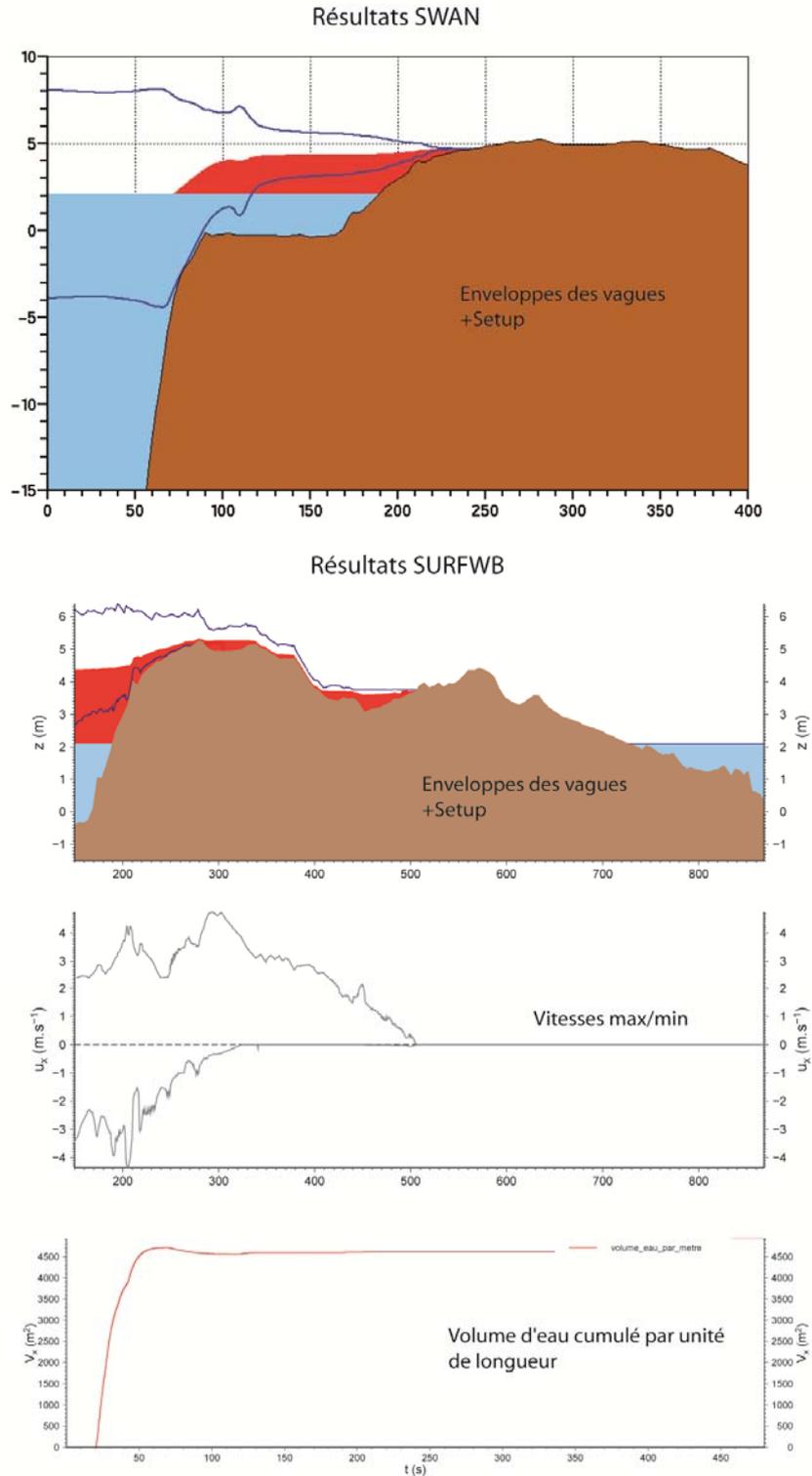


Figure 33 - Résultats donnés par SWAN (en haut) et par SURFWB (en dessous) pour le profil est d'Anaa.

Le croisement des résultats de SURFWB avec la table des aléas indique que les niveaux d'aléa varient de « faible » à « très fort » le long du profil (voir Figure 34).

Compte tenu des vitesses calculées, les blocs transportés ne devraient pas dépasser les quelques centaines de kilos sur la partie submergée.

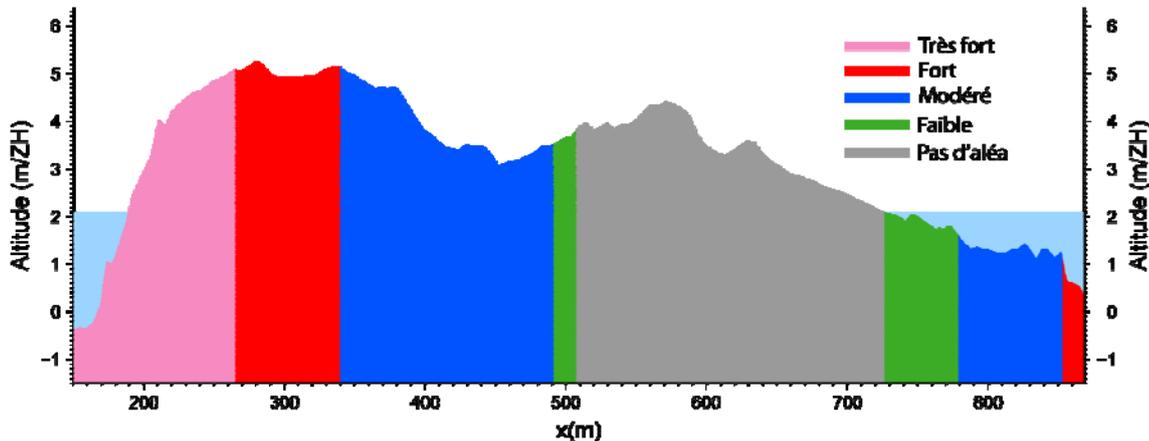


Figure 34 - Niveaux d'aléa au niveau de la partie est du village de Tukahora (atoll d'Anaa) établis à partir des couples de hauteurs d'eau / vitesses calculés par SURFWB.

4.2. MODÈLE 2D – AVATORU A RANGIROA

Ce site se caractérise par un tombant récifal très abrupte côté océanique, une passe d'une profondeur moyenne de 15 à 20 m (maximum de 34 m) et des profondeurs pour le lagon inférieures à 10 m (Figure 35). Les altitudes pour Avatoru restent inférieures à 5 m, les secteurs les plus hauts se situant sur des bourrelets à proximité immédiate des rivages océaniques et de la passe.

Etant donné cette configuration (présence de la passe), il est nécessaire de mettre en place un couplage SWAN/SURFWB en 2 dimensions pour déterminer la submersion.

Deux MNT ont été utilisés pour les calculs : un MNT de grande emprise maillé à 10 m pour SWAN, et un deuxième centré sur Avatoru suréchantillonné à 2,5 m pour SURFWB.

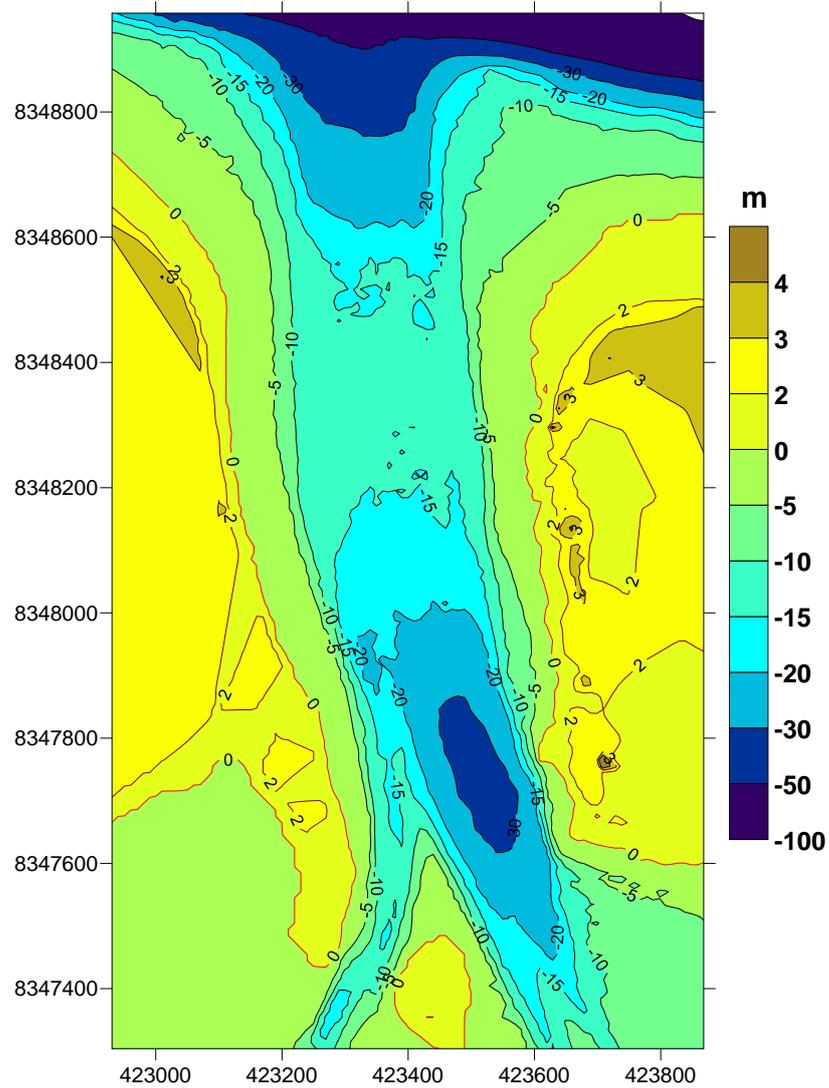


Figure 35 - Carte topo-bathymétrique d'Avatoru.
Les altitudes sont données par rapport au zéro hydrographique.

Une première évaluation de l'exposition d'Avatoru à la submersion consiste à considérer uniquement l'élévation du niveau de la mer de 1.8 m sans tenir compte des effets des vagues (Figure 36). On constate, d'ores et déjà, une extension importante de la submersion sur le secteur bordant le lagon.

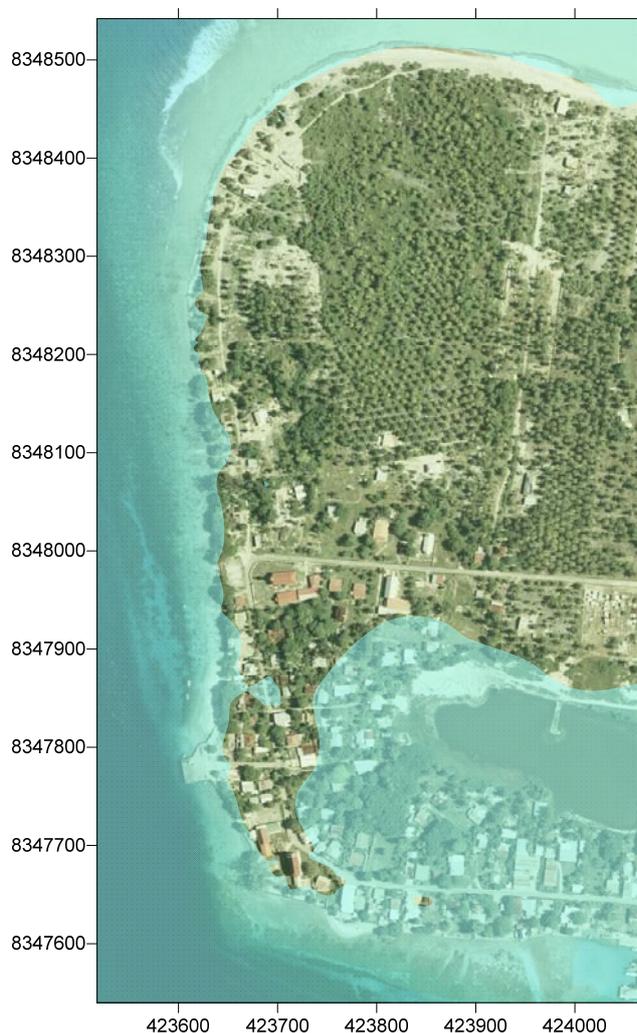


Figure 36 - Submersion d'Avatoru en considérant une élévation du plan d'eau de 1,8 m.

La première phase pour quantifier les effets des vagues cycloniques consiste à les propager depuis le large jusqu'au rivage avec le code SWAN. C'est ce que représente la Figure 37. Bien que SWAN fournisse des résultats sur le domaine terrestre, ceux-ci ne seront pas commentés car ils se situent en dehors du domaine validité du modèle (pas de prise en compte du franchissement). Comme on pouvait s'y attendre, c'est la façade océanique qui est la plus exposée avec des vagues frontales atteignant environ 4 m de hauteur significative par des profondeurs de 3,5 m¹. En pénétrant dans la passe, les hauteurs des vagues décroissent progressivement pour atteindre des hauteurs inférieures à 1 m au niveau du lagon. Néanmoins celles-ci :

¹ À noter que les profondeurs représentées Figure 37 tiennent compte de la cote par rapport au zéro hydrographique, de la surélévation du niveau de la mer de 1,8 m ainsi que du setup.

- demeurent importantes (4 à 6 m de hauteur) dans le chenal, là où les profondeurs sont les plus importantes ;
- atteignent des valeurs proches de 3 m sur une grande portion des rives de la passe d'Avatoru (par des fonds de 3,5 m) à l'exception de l'extrémité sud où elles ne font que 1,5 m.

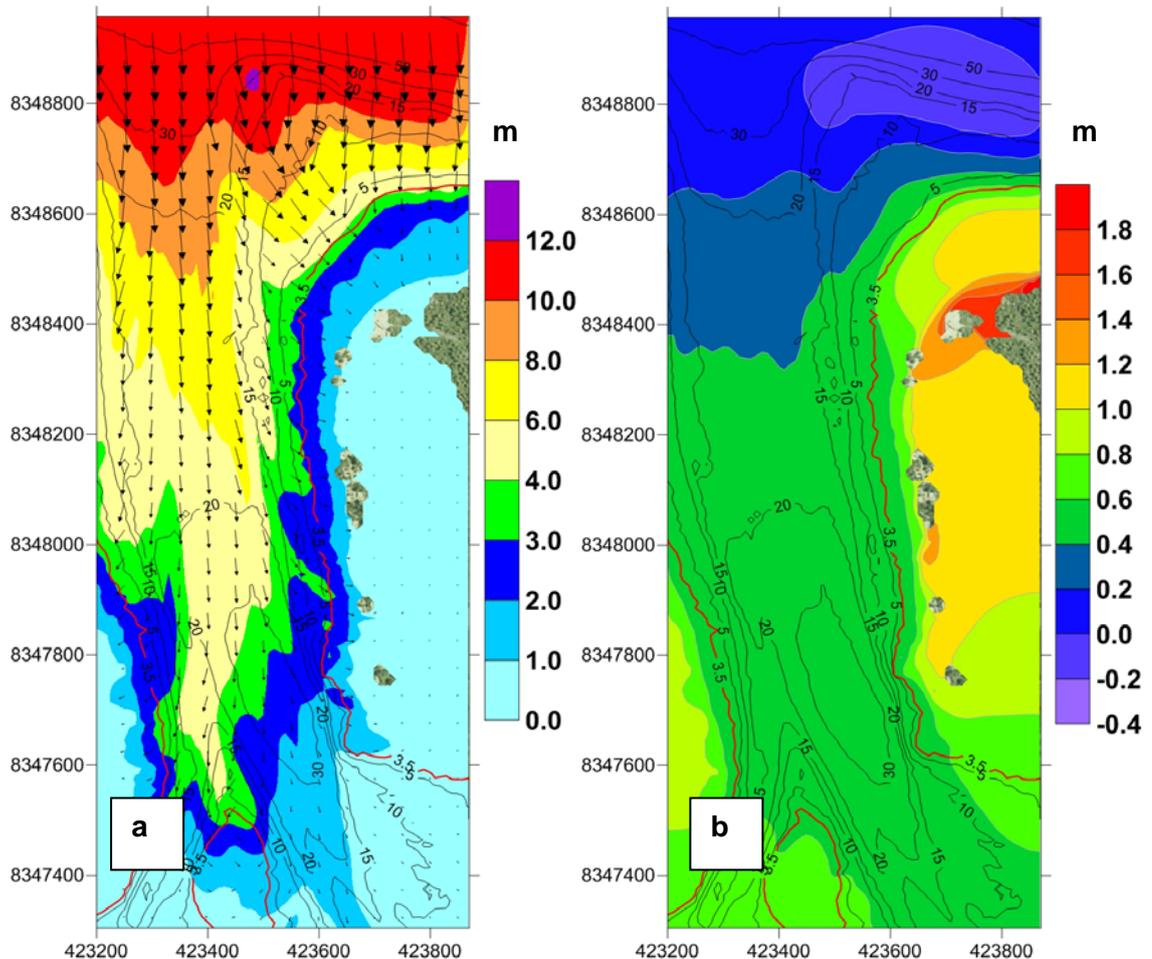


Figure 37 - Calculs issus de SWAN sur Avatoru : a) hauteur significative et direction de propagation des vagues ; b) Setup. Les isocontours correspondent aux profondeurs.

La répartition du setup (Figure 37) est plus homogène. Il est maximal sur la façade océanique avec 1 m, puis le lagon avec des hauteurs de 0,6 à 0,8 m et il atteint 0,4 à 0,6 m dans la passe. Ainsi le niveau moyen du plan d'eau incluant le setup atteindrait 2,4 à 2,8 m.

Afin de tenir compte des différences d'incidence et de hauteur des vagues sur la façade océanique et sur les rives d'Avatoru, 3 simulations différentes ont été réalisées avec SURFWB. Les spectres permettant de construire les séries temporelles pour SURFWB ont été extraits de SWAN à environ 3,5 m de profondeur sur les 3 emplacements signalés Figure 38.

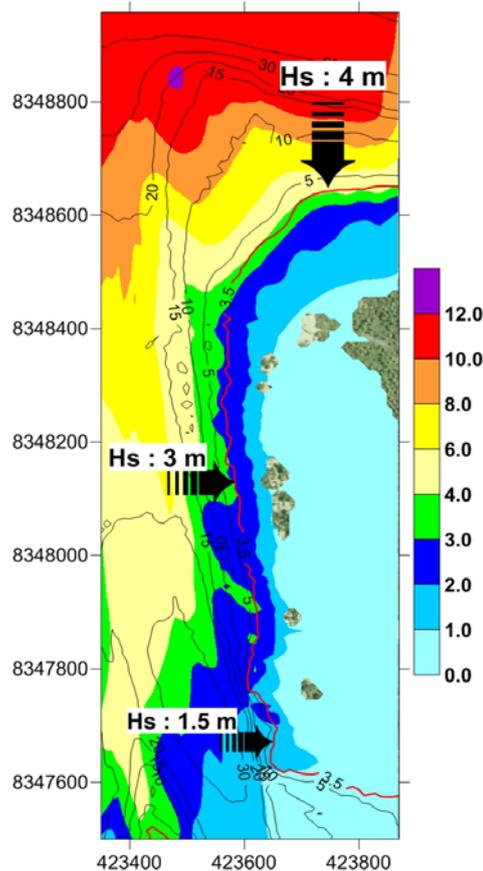


Figure 38 - Emplacement des spectres issus de SWAN pour forcer SURFWB.

Par la suite les résultats des 3 simulations de SURFWB ont été combinés en faisant un découpage par « secteurs » en privilégiant pour :

- la façade océanique : la simulation avec des hauteurs significatives de 4 m ;
- les rives de la passe d'Avatoru : la simulation avec des Hs de 3 m ;
- les rives sud : la simulation avec un Hs de 1,5 m.

Le résultat final de cette fusion est représenté (Figure 39). Les hauteurs maximales de 4 m et plus se concentrent sur les platiers récifaux (façade océanique et passe). Ces valeurs sont de 1,5 à 2 m lors du franchissement du bourrelet et diminuent progressivement en se propageant à l'intérieur des terres. Toutefois, elles peuvent être importantes (jusqu'à 3 m) au niveau des dépressions (exemple au nord : $x = 423700$, $y = 8348200$). Les vitesses maximales de 4 à 5 m/s sont atteintes lors du franchissement du bourrelet côtier pour chuter juste après à des valeurs de 1 à 2 m/s. Les vitesses sont plus homogènes (1 à 2 m/s) au niveau des côtes basses bordant le lagon.

Les fortes vitesses (4 à 5 m/s) calculées près des rives océaniques et de la passe, indiquent que des blocs de plusieurs tonnes pourraient être projetés dans ces secteurs

et transportés sur une distance maximale d'environ 90 m à l'intérieur des terres pour les plus petits d'entre eux (quelques centaines de kg), là où les vitesses chutent en dessous du seuil critique nécessaire au transport qui est proche de 2,5 m/s (voir Figure 6).

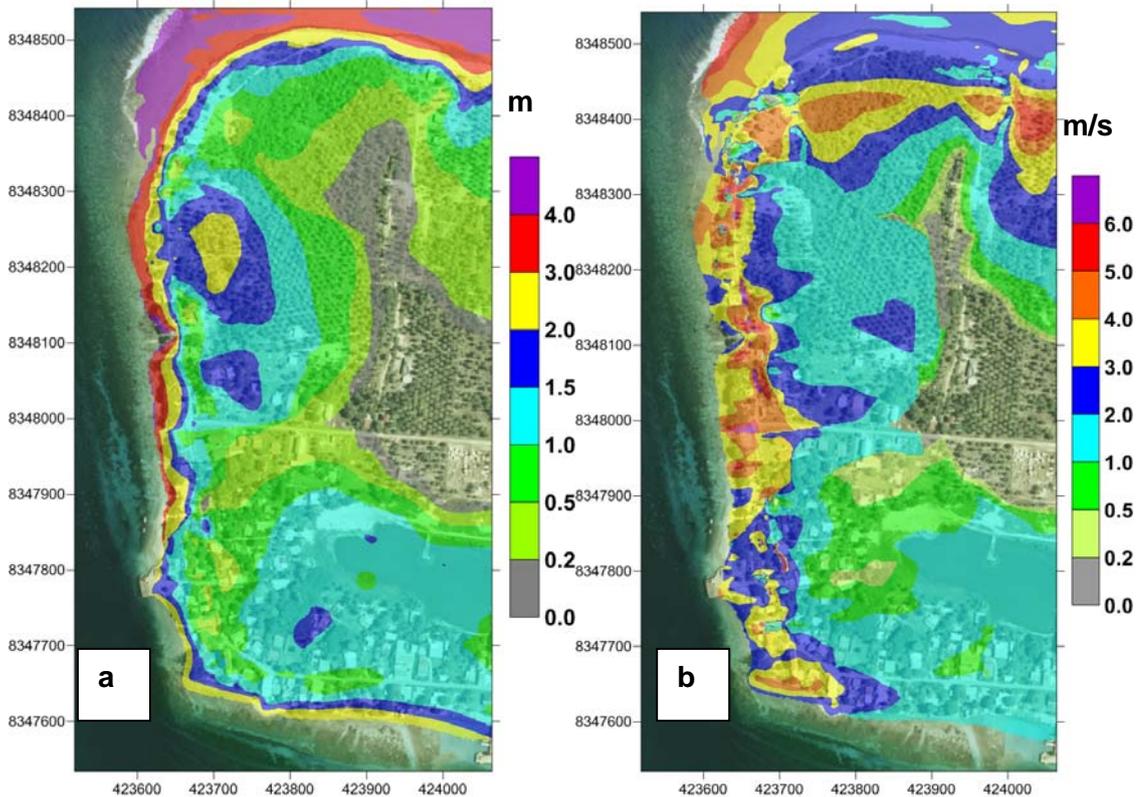


Figure 39 – Carte de la submersion à Avatoru :
a) hauteurs maximales et b) vitesses maximales.

La carte d'aléa résultant du croisement des valeurs de vitesse et de hauteur (Figure 40) indique que l'aléa très fort est majoritaire sur Avatoru. Il devient moins important en s'éloignant des différents rives (océaniques, passe et lagon).

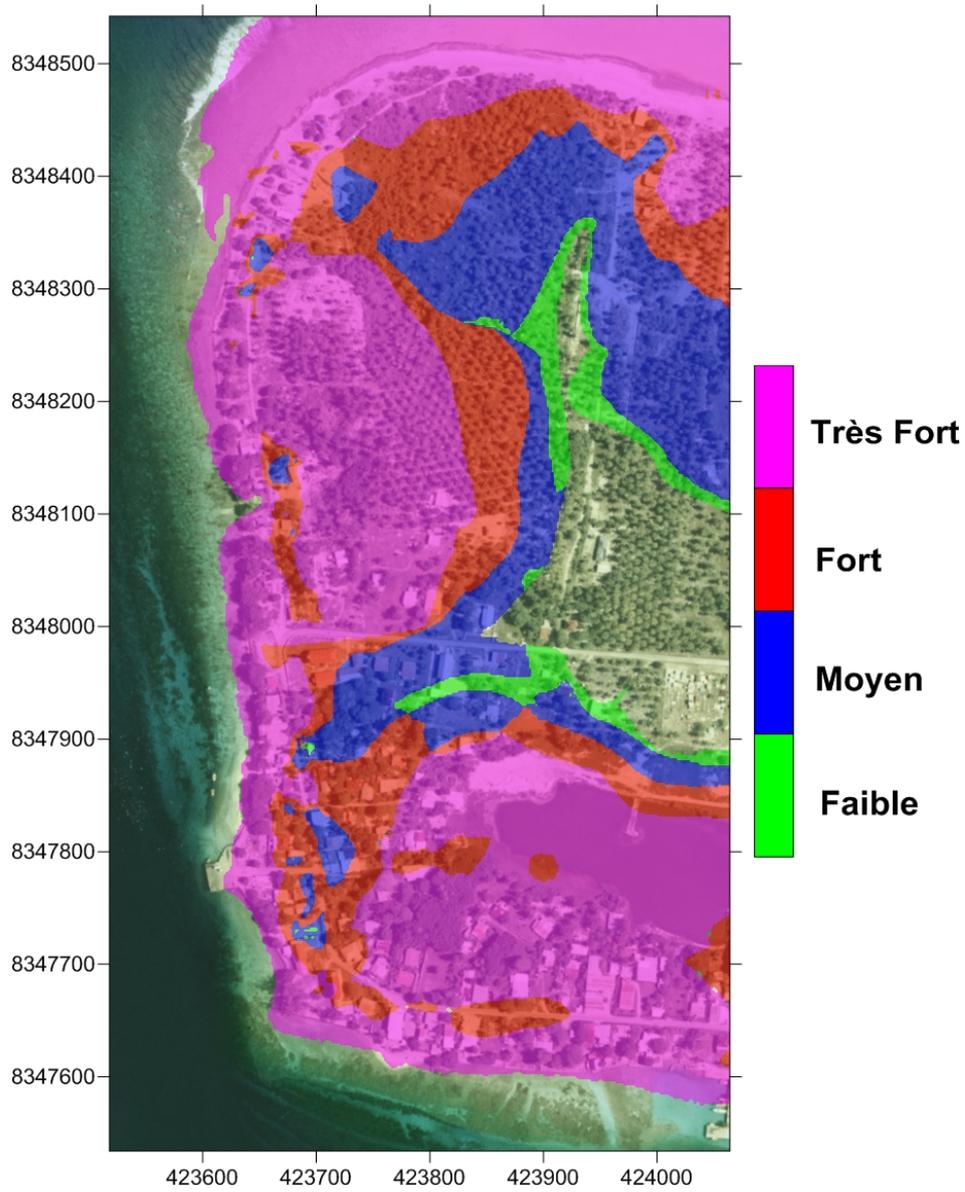


Figure 40 - Carte de l'aléa à Avatoru.

5. Conclusions et exploitation des résultats à l'échelle de l'archipel

5.1. CONCLUSION SUR L'APPORT DES MODÉLISATIONS

Les principaux résultats de l'évènement de référence simulé sur les 8 sites étudiés sont synthétisés Figure 41.

Atoll	Site	Pente tombant récif (%)	Setup (m)	Alt. max. plan d'eau (m)	Alt. bourrelet (m)	Haut. max. franch. (m)	Vit. max. platier (m/s)	Vit max. franchiss. (m/s)	Dist. project. blocs (m)
Tikehau	1) Profil Est	10	1	6,2	5,8	0,6	4	5,5	10-20
	2) Profil ouest avec Feo	10	1,3	6,2	5	1,2	4 à 5	8	40
	3) Profil Ouest sans Féo	10	1,3	6,2	4,3	2,1	4 à 5	6 à 7	> 50
Ahe	4) Tenukupara	12	1,5	5,5	2,8	1,7	4,5	6 à 7	~ 140
Makemo	5) Puheva	19	1,6	5,5	5	1,2	3	4	~ 25
Anaa	6) Profil Nord	9	1	4,5	5	-	-	-	-
	7) Profil Est	50	2,1	6,1	5,2	1,2	2,5	4	~ 110
Rangiroa	8) Avatoru	10	1	4,5	3,6	1,7	4	5-6	~ 90

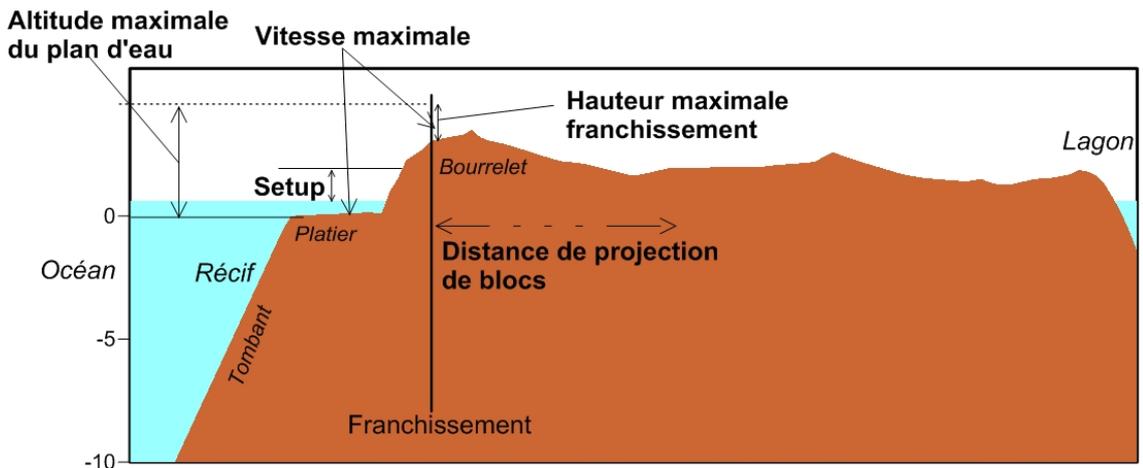


Figure 41 - Synthèse des résultats issus du couplage SWAN/SURFWB sur les 8 sites d'étude. Les paramètres indiqués dans le tableau sont définis dans le schéma idéalisé du dessous (ce schéma n'est pas à l'échelle).

On constate que :

- **les valeurs de setup s'étalent de 1 à 2.1 m** et qu'ils croissent avec la pente du tombant récifal. Il est de 1-1,3 m pour des pentes de l'ordre de 10 % (Tikehau par exemple), de ~ 1,5 m pour des pentes de 12-19 % (Ahe par exemple) et de 2,1 m pour des pentes de l'ordre de 50 % (profil Est d'Anaa). On peut donc rapidement approcher l'ordre de grandeur de l'élévation du plan d'eau moyen lors d'un événement cyclonique de référence si l'on connaît grossièrement la pente du tombant récifal. Une fois cette pente estimée, il suffit d'ajouter le setup correspondant aux altitudes de référence (1 m de surcote atmosphérique, 0,30 m d'élévation du niveau de la mer et la hauteur de la PMVE). À titre d'exemple, **cette valeur peut varier entre 2,8 et 4,2 m** si l'on considère les 8 cas traités ici (voir Tableau 3). Un premier tri des atolls les plus exposés à la submersion peut être effectué grâce à ce premier calcul. Si l'altitude maximale de l'atoll est proche de l'altitude du plan d'eau moyen calculée, il est très probable qu'il soit complètement submergé dans le cas de l'évènement de référence comme c'est le cas pour Ahe (aléa « très fort » ou « fort »)
- les altitudes maximales du plan d'eau, correspondant au niveau moyen auquel s'ajoute l'amplitude des crêtes des vagues, se situent entre **4,5 et 6,2 m**. Dans les cas étudiés, seul le profil Nord d'Anaa est suffisamment haut pour empêcher le franchissement des vagues. Dans les autres cas, la hauteur maximale de la submersion atteint 0,6 à 2,1 m lors du franchissement du bourrelet
- les vitesses maximales au niveau du platier sont en général de l'ordre de **4 m/s** ce qui permet le transport de blocs de plusieurs tonnes pouvant être projetés en haut du bourrelet où l'on observe une accélération de la vitesse qui atteint **5 à 8 m/s**
- en pénétrant dans les terres, les vitesses et les hauteurs de submersion chutent rapidement. En connaissant la vitesse seuil du transport des blocs (~ 2,5 m/s) et en faisant l'hypothèse d'une hauteur minimale de 0,5 m nécessaire au transport, il est possible d'estimer la distance maximale de projection des blocs par rapport au sommet du bourrelet. Celle-ci varie alors de **quelques dizaines à la centaine de mètres**.

En ce qui concerne l'aléa, on distingue notamment le profil Ouest de Tikehau (cas sans féo) et celui d'Ahe, (altitudes maximales des rives de 4,3 m et 2,8 m respectivement très inférieures aux altitudes maximales du plan d'eau de 6,2 et 5,5) respectivement, et qui sont caractérisés par des aléas « forts » ou « très forts ». Les autres sites, pour lesquels l'altitude maximale est supérieure ou égale à 5m, présentent tous des zones d'aléa « modéré » à « faible » en arrière, c'est-à-dire côté lagon. À l'avant (côté océan), les terrains sont directement exposés à la houle cyclonique, et présentent donc tous des niveaux d'aléa élevés. Compte tenu des estimations des distances de projection des blocs, il conviendrait de pondérer les niveaux d'aléa proches de la façade océanique (sommet du bourrelet) afin de les reclasser en aléa « très fort ».

De façon à estimer les limites de la modélisation 1D par rapport à la 2D, un test a été effectué sur Avatoru sur un profil éloigné de la passe (Figure 42). Il s'agit de comparer l'aléa issu du calcul 1D à celui issu du calcul 2D sur ce même profil. Sur la façade océanique, on retrouve les mêmes types d'aléa avec une légère surestimation sur le

côté exposé aux vagues et une sous-estimation à l'intérieure des terres dû à la non prise en compte des échanges latéraux des écoulements. Il existe, par contre une sous-estimation notable de l'aléa côté lagon liée principalement à l'absence du setup sur cette façade dans le calcul 1D. Pour pallier à ce manque, le niveau du lagon pourrait être surélevé en fonction du setup calculé côté océan. Pour Avatoru, par exemple, le calcul 2D montre que le setup au niveau du lagon équivaut à 60-80 % du setup côté océanique.

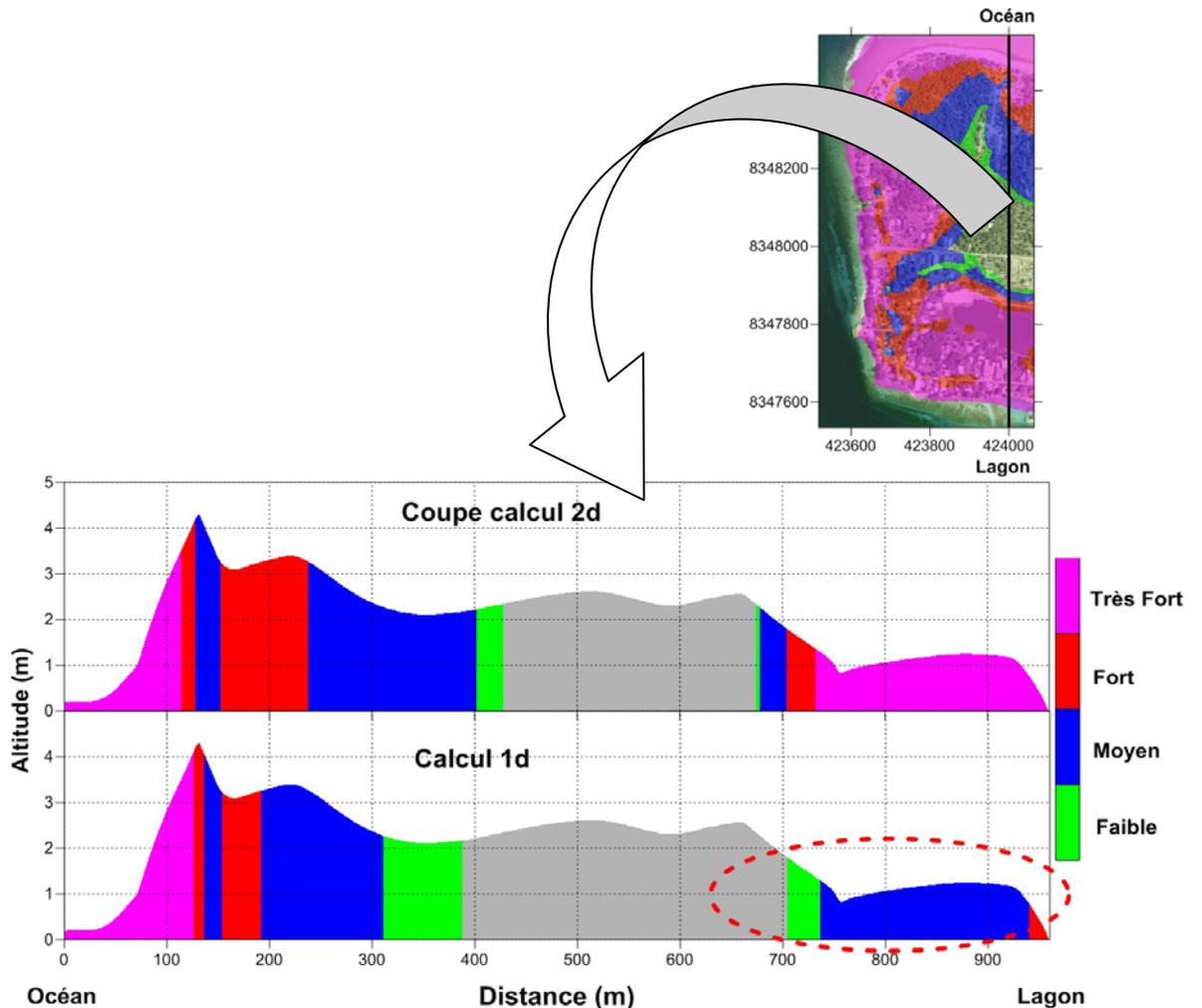


Figure 42 - Limites de la modélisation 1D testée sur Avatoru.

Aussi, il sera possible d'établir une cartographie à dire d'expert basée sur quelques profils (calculs 1D) et une connaissance de la topographie pour guider l'interpolation des classes d'aléa entre les profils. La Figure 43 montre, à titre d'exemple, et ce sous réserve de validation, ce que peut produire une telle démarche.

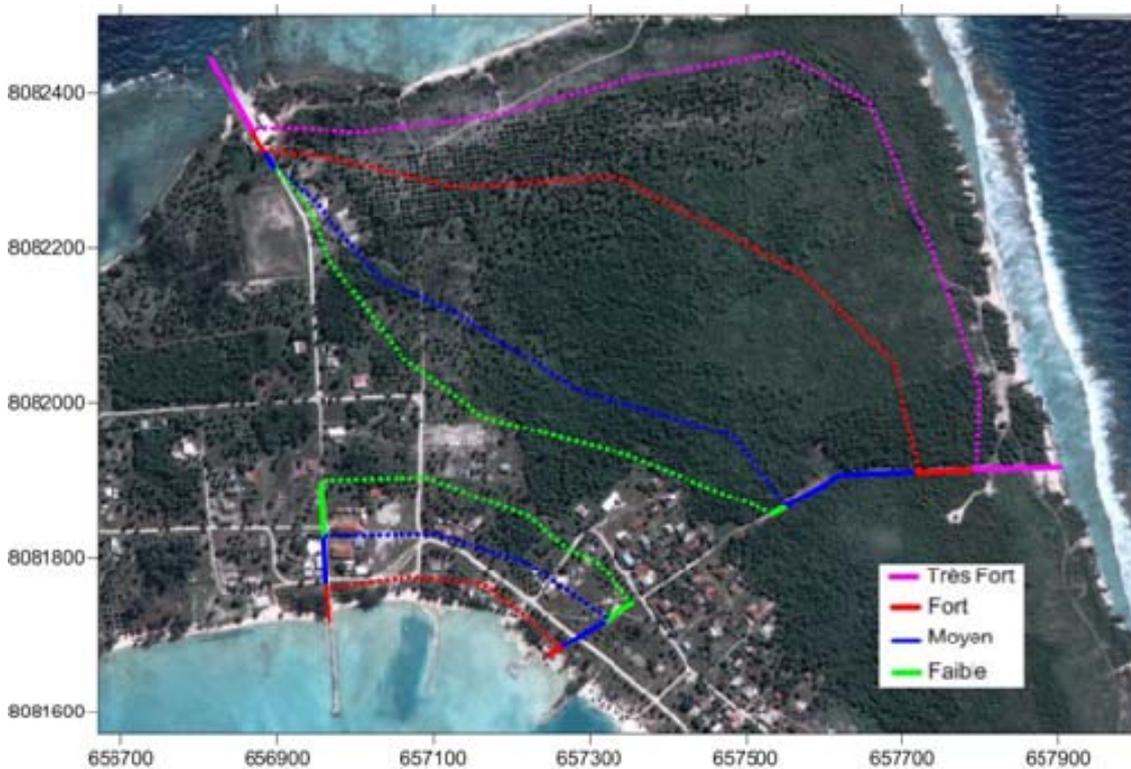


Figure 43 - Cartographie Exemple de cartographie 2D de l'aléa à dire d'expert basée sur quelques profils (calculs 1D) et une connaissance de la topographie (ceci est un exercice de style car la topographie du site n'est pas connue).

5.2. CONCLUSION EN TERMES DE ZONAGE PPR

En termes d'exploitation de cette étude dans le cadre de la réalisation de cartes d'aléa pour les PPR, plusieurs situations peuvent donc se présenter, en fonction de la nature et de la qualité des données et modélisations disponibles dans un secteur donné de l'atoll. Elles peuvent être résumées dans le tableau suivant :

	Levé topographique disponible dans la zone d'étude Situation T1	Pas de levé. Uniquement des indications qualitatives sur le relief Situation T2
Modélisation 2D de la zone d'étude Cas M1	M1T1 Le résultat de la modélisation est directement exploitable en termes de cartographie de l'aléa. C'est la technique qui donne les meilleurs résultats. À terme, elle pourrait être appliquée pour les zones très importantes.	M1T2 Sans objet

	Levé topographique disponible dans la zone d'étude Situation T1	Pas de levé. Uniquement des indications qualitatives sur le relief Situation T2
Deux profils 1D encadrant la zone d'étude Cas M2	<p>M2T1</p> <p>Une interpolation des limites des zones, guidée par la topographie, peut produire une carte d'une précision suffisante pour des zones importantes, en particulier coté océans. Coté lagon, compte tenu de la nécessité d'une correction qualitative des niveaux d'aléa (sous-estimé par le calcul 1D), la précision est moindre. Elle dépendra en tout état de cause de la typologie des profils, et de la distance entre ces profils.</p>	<p>M2T2</p> <p>Situation identique à 2 situations M3T2 distinctes</p>
Un seul profil 1D dans la zone d'étude Cas M3	<p>M3T1</p> <p>L'extrapolation de part et d'autre du profil est envisageable sous réserve que la morphologie de la topographie et de la bathymétrie varie peu dans la zone d'étude. Dans ce cas la cartographie peut être considérée comme suffisamment précise pour des zones importantes à moyennement importantes, en tenant compte de la précision moindre coté lagon.</p>	<p>M3T2</p> <p>L'extrapolation de part et d'autre du profil est délicate. Elle n'est plus possible dès que les éléments qualitatifs topographiques montrent que cette topographie change. Dans ce cas on se trouve dans une situation équivalente à M4T2.</p> <p>Si par contre les éléments topographiques montrent une certaine homogénéité, on peut l'utiliser pour des zones moyennement importantes.</p>
Pas de modélisation dans la zone d'étude Cas M4	<p>M4T1</p> <p>Utilisation des considérations générales et des enseignements exposés au chapitre 5.1.</p> <p>Zonage extrêmement qualitatif. Les liens entre Matrice Hauteur/Vitesse et niveau d'aléa sont subjectifs.</p> <p>À utiliser dans des zones peu importantes, ou en attente d'acquisition de données bathymétriques en vue de modélisations.</p>	<p>M4T2</p> <p>Utilisation des considérations générales et des enseignements exposés au chapitre 5.1.</p> <p>Zonage extrêmement qualitatif et peu précis.</p> <p>À réserver aux zones peu importantes</p>

Tableau 4 - Récapitulatif ds situations en termes de zonage PPR.

6. Bibliographie

Battjes J.A. and Janssen J.P.F.M. (1978) - Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, p. 569-587.

Booij N., Haagsma I.J.G.; Holthuijsen L.H., Kieftenburg A.T.M.M.; Ris R.C., Van der Westhuysen A.J. and Zijlema M. (2004) - Swan Cycle III version 40.41. User's Manual, 115 p.

Collins J.I. (1972) - Prediction of shallow water spectra, *J. Geophys. Res.*, 77, No. 15, p. 2693-2707.

des Garets E. (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.

Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D.E., Enke K., Ewing J.A., Gienapp H., Hasselmann D.E., Kruseman P., Meerburg A., Müller P., Olbers D.J., Richter K., Sell W. and Walden H. (1973) - Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Deutsch. Hydrogr. Z. Suppl.*, 12, A8.

Madsen O.S., Poon Y.-K. and Graber H.C. (1988) - Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory, Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, p. 492-504.

Marche F., Bonneton P., Fabrie P. and Seguin N. (2007) - Evaluation of well-balanced bore-capturing schemes for 2D wetting and drying processes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 53: p. 867-894.

Mompelat J.M. (2006) - Note technique sur la prise en compte de l'aléa surcotes marines dans les Tuamotu et sur la définition des valeurs de surcotes de référence associés. Réf. Pol/06/078.

Moon I-J, Ginis I, Hara T. (2003) - Numerical Simulation of Sea Surface Directional Wave Spectra under Hurricane Wind Forcing. *Journal of Physical Oceanography*, vol. 33, p. 1680-1706

Nott J. (2003) - Waves, coastal boulder deposits and the importance of the pre-transport setting, *Earth and Planetary Science Letters*, 210, p. 269-276.

Pedreiros R. (2006 a) - Détermination des surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie française : 2- Mise en place de la modélisation. BRGM/RP-55031-FR, 54 p., 33 fig., 2 tabl.

Pedreiros R. (2006 b) - Détermination des surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie française : 3 – Cahier des simulations. BRGM/RP-55032-FR, 62 p., 26 fig., 15 tabl.

Stollsteiner P. (2009) - Programme ARAI 2. Action 4 - Appui à maîtrise d'œuvre pour l'évaluation détaillée de l'aléa inondation. Rapport BRGM/RP-57375-FR. 5 ann.



Centre scientifique et technique
Service risques naturels et sécurité du stockage de CO2
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34