

Bilan des connaissances sur les surcotes marines en Polynésie

Rapport final

BRGM/RP-55038-FR

Février 2005



Ministère du
Développement Durable
Service de l'Urbanisme



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Bilan des connaissances sur les surcotes marines en Polynésie

Rapport final

BRGM/RP-55038-FR
Février 2005

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2005 POLYNESIE

E. des Garets
Avec la collaboration de
Jean-Marc Mompelat

Vérificateur :

Original signé par
E. PALVADEAU

Approbateur :

Original signé par
J.-M. MOMPELAT

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



Ministère du
Développement Durable
Service de l'Urbanisme



Mots clés : surcotes marines, cyclone, Polynésie française

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

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.

Synthèse

La Polynésie s'étend sur un territoire de 2 500 000 km², avec environ 4 000 km² de terres émergées réparties sur près de 120 îles. La morphologie de ces îles est soit de type atoll, comme c'est le cas notamment pour l'archipel des Tuamotu, soit de type « îles hautes » comme la plupart des îles de la Société, des Marquises et des Gambier.

La Polynésie est soumise à un climat océanique comprenant deux saisons majeures ; l'été austral (octobre - avril) et l'hiver austral (mai – septembre). L'hiver austral est une période de mer calme avec des vents dominants d'Est, tandis que l'été austral est propice à la formation de cyclones.

La synthèse et l'exploitation des informations existantes sur les surcotes marines permet de conclure que la Polynésie est soumise à deux types de houle ; les houles saisonnières n'excédant que rarement les 3 mètres d'amplitude, et les houles cycloniques pouvant atteindre 12 mètres d'amplitude.

Les cyclones à l'origine de ces fortes houles n'ont pas la même fréquence d'apparition d'un archipel à un autre et ils sont de moins en moins fréquents du Nord vers le sud. L'impact de la houle cyclonique dépend de paramètres statiques et de paramètres dynamiques. Ainsi les propriétés de la houle jouent un rôle important mais également la bathymétrie, le niveau moyen de la mer et les vents associés aux cyclones.

Ces différents résultats amènent donc au choix des événements de référence qui seront modélisés afin d'établir les zones soumises à l'aléa cyclonique en Polynésie. De plus une partie de ce rapport est dédiée à la présentation de quelques ouvrages de protections complémentaires des méthodes déjà utilisées en Polynésie.

Sommaire

1. Introduction	9
2. L'état de la mer en Polynésie	11
2.1. Le vent	12
2.2. La houle	13
2.2.1. Houles saisonnières en Polynésie.....	13
2.2.2. Houles saisonnières à Tahiti	15
2.3. Les marées astronomiques	15
3. Les phénomènes cycloniques.....	17
3.1. Les cyclones tropicaux dans l'Océan Pacifique sud.....	18
3.2. La houle	21
3.2.1. Caractéristiques physiques	21
3.2.2. Dégâts engendrés par la Houle	22
3.3. Les marées de tempêtes	25
4. Les changements climatiques futurs.....	27
4.1. Les causes des variations du niveau de la mer	27
4.2. Evolution future des phénomènes météorologiques extrêmes.....	27
4.3. Elévation globale du niveau de la mer.....	28
4.4. Valeur retenue pour la modélisation de l'aléa cyclonique	29
5. Le zonage de l'aléa cyclonique	31
5.1. Les valeurs de références	31
5.1.1. La houle	31
5.1.2. La surcote statique	32
5.2. Méthodologie.....	33
5.2.1. Les îles hautes	33
5.2.2. Les Atolls	34

6. Les ouvrages de protection	35
6.1. Enrochements	35
6.2. Digue verticale.....	36
6.3. Digue à talus	37
6.4. Digue mixte	40
6.5. Digue semi flottante.....	40
7. Conclusion	43
8. Bibliographie	45
9. Glossaire	47
10. Annexes	49

Table des illustrations

Tables des figures

Figure 1 : probabilité d'occurrence de phénomènes cycloniques sur la Polynésie française (Service de météorologie de la Polynésie).....	12
Figure 2 : rose des vents en Polynésie (source Météo France)	13
Figure 3 : amplitude moyenne des marées dans le Pacifique (d'après shom).....	16
Figure 4 : la Polynésie française (source Météo France MET_MAR n°120).....	18
Figure 5 : schéma type d'un cyclone tropical de l'hémisphère Sud vu en plan puis en coupe (MET_MAR n°120)	19
Figure 6 : élévation moyen du niveau de la mer de 1990 à 2100 suivant plusieurs scénarios (GIEC).....	29
Figure 7: schéma de principe de réalisation d'un enrochement sain.....	35
Figure 8 : exemple de corrélation entre la hauteur de houle prédite par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) et l'amplitude déduite des enregistrements microsismiques (Barruol et al.).....	56
Figure 9 : azimuth mesuré et déduit de la houle, la tableau de gauche correspond à la houle oblique, celui de droite à la houle normale à l'atoll de Reao (Barruol et al.).....	57

Table des photos

Photo 1: accumulation de galets contre les enrochements protégeant la route dans le secteur de Vairao, lors d'une houle de 3-4 m de direction S, SW.	23
Photo 2: impact directe de la houle sur le rivage et sur une habitation, l'érosion du rivage entraîne une déstabilisation des cocotiers.	24
Photo 3: remontée de la houle dans la rivière « Punaruu », la houle d'origine est une houle saisonnière de 3-4 m de direction S, SW.....	24
Photo 4: obstruction de l'exutoire de la rivière « Punaruu » par l'action combinée de la houle et de la marée.....	25

Table des tableaux

Tableau 1 : phénomènes cycloniques ayant intéressé la Polynésie (1970 – 2004)	31
Tableau 2 : nombre de cyclones d'intensité connue par archipel.....	32
Tableau 3 : houles de références par archipels.....	32
Tableau 4 : valeurs paroxysmales par archipel	32

Table des annexes

Annexe 1 : Liste des cyclones ayant affectés la Polynésie de 1831 à nos jours (source Lambert.J. et Météo France)	49
Annexe 2 : Tableau de synthèse des phénomènes cycloniques ayant intéressé la Polynésie depuis 1970	54
Annexe 3 : Modélisation de la houle à partir d'enregistrements sismiques	56

1. Introduction

La Polynésie s'étend sur un territoire de 2 500 000 km², avec environ 4 000 km² de terres émergées réparties sur près de 120 îles. La morphologie de ces îles est soit de type atoll, comme c'est le cas notamment pour l'archipel des Tuamotu, soit de type « îles hautes » comme la plupart des îles de la Société, des Marquises et des Gambier.

La Polynésie est soumise à un climat océanique comprenant deux saisons majeures ; l'été austral (octobre - avril) et l'hiver austral (mai – septembre). L'hiver austral est une période de mer calme avec des vents dominants d'Est, tandis que l'été austral est propice à la formation de cyclones.

Cette étude est un premier bilan des connaissances en vue de la réalisation de l'action 3.4. du programme ARAI « cartographie de l'aléa houle cyclonique ». La synthèse et l'exploitation des informations existantes sur les surcotes marines va permettre la mise en place d'une méthodologie d'évaluation de cet aléa. Enfin l'application de cette dernière aboutira sur un zonage de l'aléa en Polynésie.

A la date de réalisation de la présente étude il n'existe aucun document de synthèse sur les phénomènes cycloniques en Polynésie.

Ce document aborde 5 thèmes majeurs se référant aux phénomènes cycloniques en Polynésie :

- Les vents et la mer en Polynésie ; présentation de la météorologie de la Polynésie.
- Les phénomènes cycloniques ; caractéristiques et historique des cyclones ayant intéressés la Polynésie
- Les changements climatiques futurs ; présentation des évolutions climatiques sur 100 ans et prise en compte de ces changements dans l'étude des cyclones.
- Le zonage de l'aléa cyclonique ; explication sommaire du zonage de l'aléa, une étude spécifique aux modèles utilisés est rédigée par ailleurs.
- Les ouvrages de protection ; présentation de diverses techniques de protections face aux houles cycloniques.

Les différents organismes consultés sont :

- IRD Institut de Recherche pour le Développement
- Météo France
- Bureau d'étude BCEOM
- DEQ-MAR Direction de l'Equipement service MARitime
- DEQ-INFRA Direction de l'Equipement service INFRAstructure
- Université de Hawaï
- Université de Polynésie
- Divers sites Internet

2. L'état de la mer en Polynésie

Les dépressions tropicales fortes et les cyclones sont relativement peu fréquents en Polynésie. Leur intensité est très nettement inférieure à celle des typhons, cyclones ou ouragans de l'océan Indien, de l'Atlantique ou du Pacifique ouest. Les vents moyens atteignent ou dépassent rarement 100 à 120 km/h pendant des périodes le plus souvent inférieures à 24 heures en un lieu donné.

Bien qu'importants, ce ne sont pas les effets destructeurs des vents qui sont les plus à craindre en Polynésie, mais ceux des surcotes marines. Les atolls, dont l'élévation au-dessus du niveau moyen de la mer est très faible, sont, de ce fait, particulièrement vulnérables.

Les catastrophes de 1878, 1903 et 1906 (respectivement 117, 517 et 150 morts) qui ont ravagé les Tuamotu sont anciennes mais les 5 cyclones de la saison 1982 – 1983 sont venu rappeler que le risque est toujours bien réel.

On peut donc s'attendre à subir, plusieurs fois par siècle, entre novembre et avril (été austral) des cyclones avec des vents moyens de 100 à 120 km/h (pendant des durées de quelques heures à une journée) et des marées de tempêtes accompagnées de vagues de 8 à 10 m.

Les phénomènes cycloniques se produisent assez régulièrement dans un couloir privilégié Cook – Australes – Rapa ou dans son voisinage (Figure 1).

Le risque de subir une dépression tropicale forte ou un cyclone (vent moyen près du centre supérieur ou égal à 48 nœuds) semble très faible aux Marquises.

Des Tuamotu à la Société, on peut estimer entre 4 et 8 (croissant du Nord Est au Sud Ouest de la zone) le nombre de cyclone de ce type à attendre par siècle (source Météo France).

Les atolls des Tuamotu, étant donné leur étendue en longitude et latitude ainsi que leur dispersion relative, ne paraissent menacés de subir un cyclone que tous les dix à vingt-cinq ans en moyenne c'est à dire 4 à 10 cyclones par siècle (DUPON.J.F.).

Sur les australes enfin c'est une fois tous les deux à trois ans que se produirait un événement cyclonique de forte intensité.

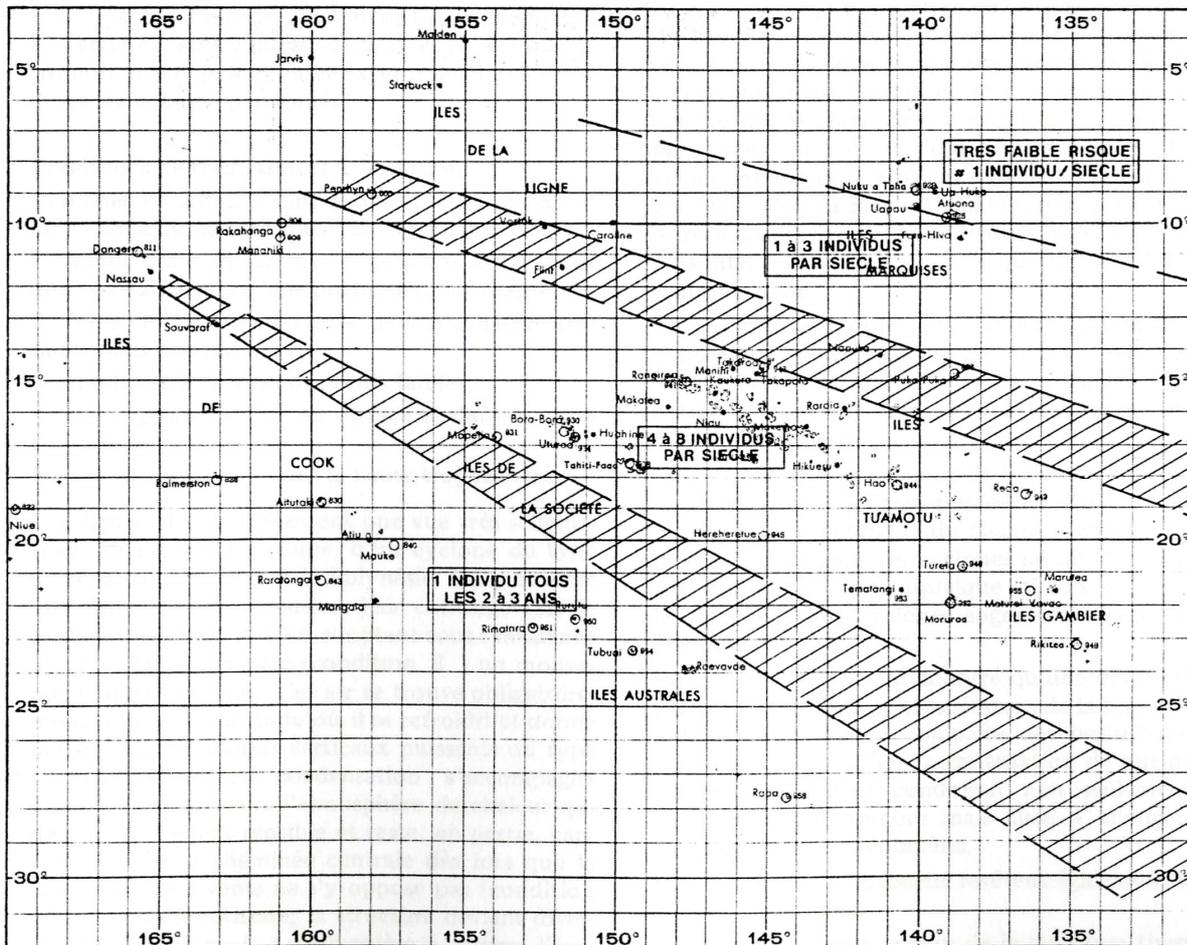


Figure 1 : probabilité d'occurrence de phénomènes cycloniques sur la Polynésie française (Service de météorologie de la Polynésie).

2.1. LE VENT

La Polynésie, étant pratiquement située en toute saison au nord des anticyclones subtropicaux de surface, les alizés (vents à composantes est) y prédominent toute l'année soufflant le plus souvent d'une direction comprise entre le nord-est et le sud-est (Cauchard. G. et Inchauspé. J.).

Habituellement modérée (20 à 40 km/h), leur vitesse atteint souvent 40 à 60 km/h en hiver.

Hormis les brises sur les îles hautes, les vents à composantes ouest sont rares et passagers, ils sont toujours l'indice d'une situation perturbée (Figure 2). Pratiquement inconnus au nord du 10°S, leur fréquence atteint :

- 7% sur le 15°S
- 18% sur le 20°S

– 30% sur le 25°S

Ils sont parfois assez forts au sud du 20°S (60 à 100 km/h), mais des vitesses supérieures à 100 km/h sont rares.

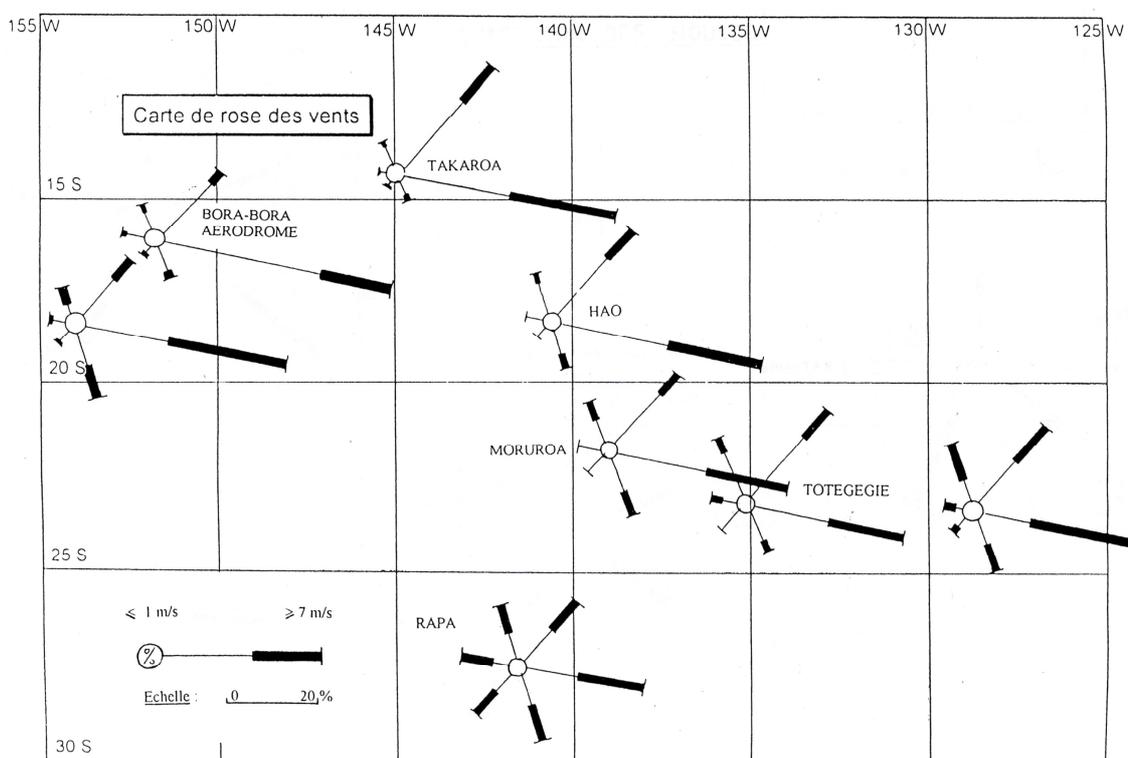


Figure 2 : rose des vents en Polynésie (source Météo France)

2.2. LA HOULE

2.2.1. Houles saisonnières en Polynésie

On observe deux grandes origines prédominantes de houles longues (Figure 3). La première de sud-ouest, très fréquente, elle provient soit de l'Océan glacial Antarctique soit de l'est de la Nouvelle Zélande. Surtout active en été austral son amplitude est généralement comprise entre 2 et 4 mètres mais elle peut atteindre 5 à 6 mètres et provoquer l'ensachage des lagons de la Société. Elle a peu d'effet sur les atolls dont les côtes sud sont fractionnées et généralement inhabitées.

La seconde de nord à nord-ouest, originaire du Pacifique nord, est occasionnelle en été austral, dangereuse parce qu'intéressant les faces habitées des atolls (Météo France).

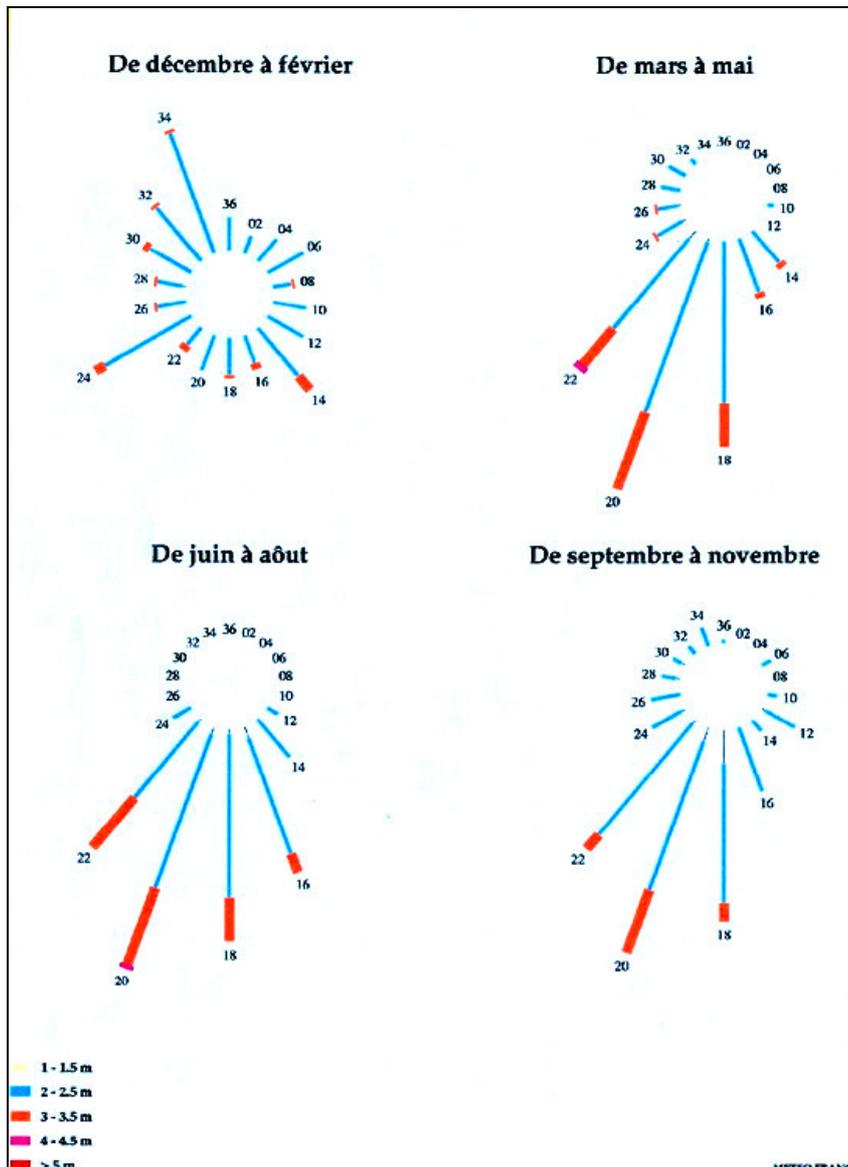


Figure 3 :roses de houle à Tahiti

Les houles d'ouest croissent du nord au sud en liaison avec les phénomènes générateurs qui sont soit des dépressions tropicales formées au voisinage des îles Cook soit des dépressions formées sur des ondulations de front froid entre Kermadec et les Cook.

Les houles de nord en provenance de l'hémisphère nord ont une grande période et une hauteur généralement inférieure à 4 mètres ; elles sont surtout sensibles dans la zone de la Société et ouest Tuamotu et s'atténuent ensuite rapidement lors de leur progression vers le sud.

Les houles du nord de période moyenne sont engendrées comme celles d'ouest par des dépressions tropicales ou subtropicales et à la limite par des cyclones centrés à l'ouest du territoire.

Les houles d'ENE sont produites par les alizés, donc par des vents généralement modérés. Les houles formées n'auront donc pas de hauteurs importantes ni de longues périodes. Elles s'amortissent en traversant le Territoire d'est en ouest.

Les houles susceptibles de transporter une énergie notable sont relativement peu nombreuses sur le Territoire. Les houles très fortes, de hauteur supérieure à 4 mètres proviennent surtout du sud-ouest et se produisent au cours de l'hiver austral à raison d'environ 3 ou 4 épisodes annuels sur la Société, 6 à 8 sur le sud est des Tuamotu et les Gambier (service de la météorologie de la Polynésie, 1982).

2.2.2. Houles saisonnières à Tahiti

Tahiti étant située au milieu du Pacifique, les houles peuvent venir de toute part. Mais la moitié nord des Tuamotu filtre nettement les houles de NE à E. On peut distinguer 3 types de houles et leurs saisons respectives (Laurent. V., 2003) :

- Les houles issues des dépressions polaires ou subtropicales de l'hémisphère sud. Leurs directions sont comprises entre WSW et SSE. Elles sont moyennes à longues et peuvent atteindre régulièrement 2.5 m et parfois 3.5 m. Elles sévissent toute l'année, avec un maximum en hiver austral car le flux perturbé d'ouest est plus proche de la Polynésie en cette saison et les dépressions hivernales plus profondes.
- Les houles issues des dépressions polaires ou subtropicales de l'hémisphère nord. Leurs directions sont comprises entre le Nord-Ouest et le Nord-Est. Elles sont parfois moyennes, généralement longues et peuvent atteindre régulièrement 1.5 m, parfois 2.5 m et exceptionnellement 4 m. Elles sévissent de septembre à mai avec un maximum de décembre à février. C'est un effet de saison chaude.
- Les houles d'alizés. Pour les directions comprises entre le Nord-Est et l'Est, seule la mer du vent générée entre les Tuamotu et la Société atteint Tahiti et Moorea. Elles sont courtes (moins de 10 s) et ne dépassent guère 1.5 m. Pour les directions comprises entre SE et ESE, elles sont courtes à moyennes et font parfois 2 m, exceptionnellement 4 m. Elles sévissent ponctuellement toute l'année avec un minimum en été austral et un maximum en hiver.

2.3. LES MAREES ASTRONOMIQUES

La marée est la variation du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle de la Lune et du Soleil, astres dont les mouvements peuvent être calculés avec précision sur des

périodes de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers d'années. A ces mouvements d'allure régulière se superposent des variations de hauteur d'eau d'origine météorologique, appelées surcotes-décotes.

Les surcotes-décotes, différence entre les hauteurs d'eau observées et la marée prédite, ne font pas partie de la marée à proprement parler. Il est cependant légitime de s'y intéresser car leur étude permet d'obtenir des résultats importants dans de nombreux domaines (navigation, hydrographie, aménagements portuaires, études climatiques, risques de submersion).

Le marnage est la différence de hauteur entre une pleine mer et une basse mer successives. Le marnage varie selon la période de vive-eau (grande marée), moment où il est plus fort et la période de morte-eau (faible marée) où, *a contrario*, il est plus faible.

La Figure 4 montre l'amplitude moyenne des marées observée dans le Pacifique. Rappelons que l'amplitude (différence entre la hauteur d'une pleine mer ou d'une basse mer et le niveau moyen) est approximativement égale à la moitié du marnage.

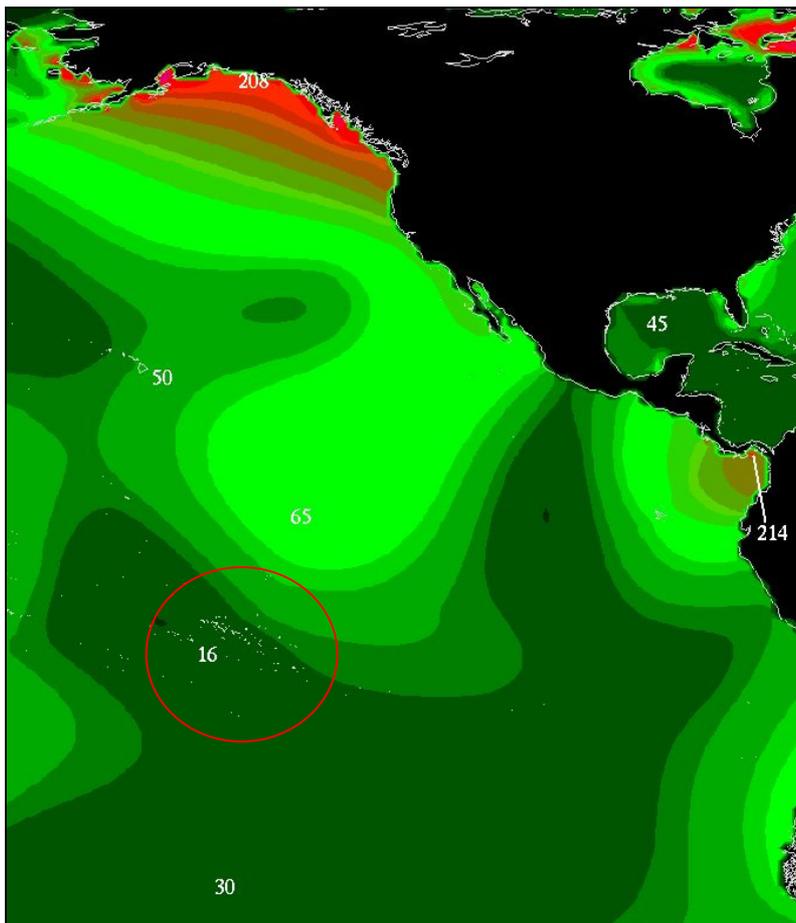


Figure 4 : amplitude moyenne des marées dans le Pacifique (d'après shom)

3. Les phénomènes cycloniques

La Polynésie française se situe au nord de la ceinture anticyclonique des hautes pressions subtropicales axée sensiblement est-ouest entre les 30^{ème} et 40^{ème} sud. Elle est donc soumise au régime des alizés de l'hémisphère sud.

A l'est du 140° ouest, le champ de pression est généralement élevé et stable, sous l'influence quasi permanente de l'anticyclone de Pâques.

A l'ouest du 140° ouest, les cellules anticycloniques sont mobiles d'ouest en est à partir de la Nouvelle Zélande et font suite à des dépressions polaires d'intensité, trajectoire et vitesse de déplacement très inégales, surtout au cours de l'hiver austral.

Les cyclones sont donc rares à l'est du 140° ouest, et possibles à l'ouest de cette même limite, particulièrement pendant l'été austral.

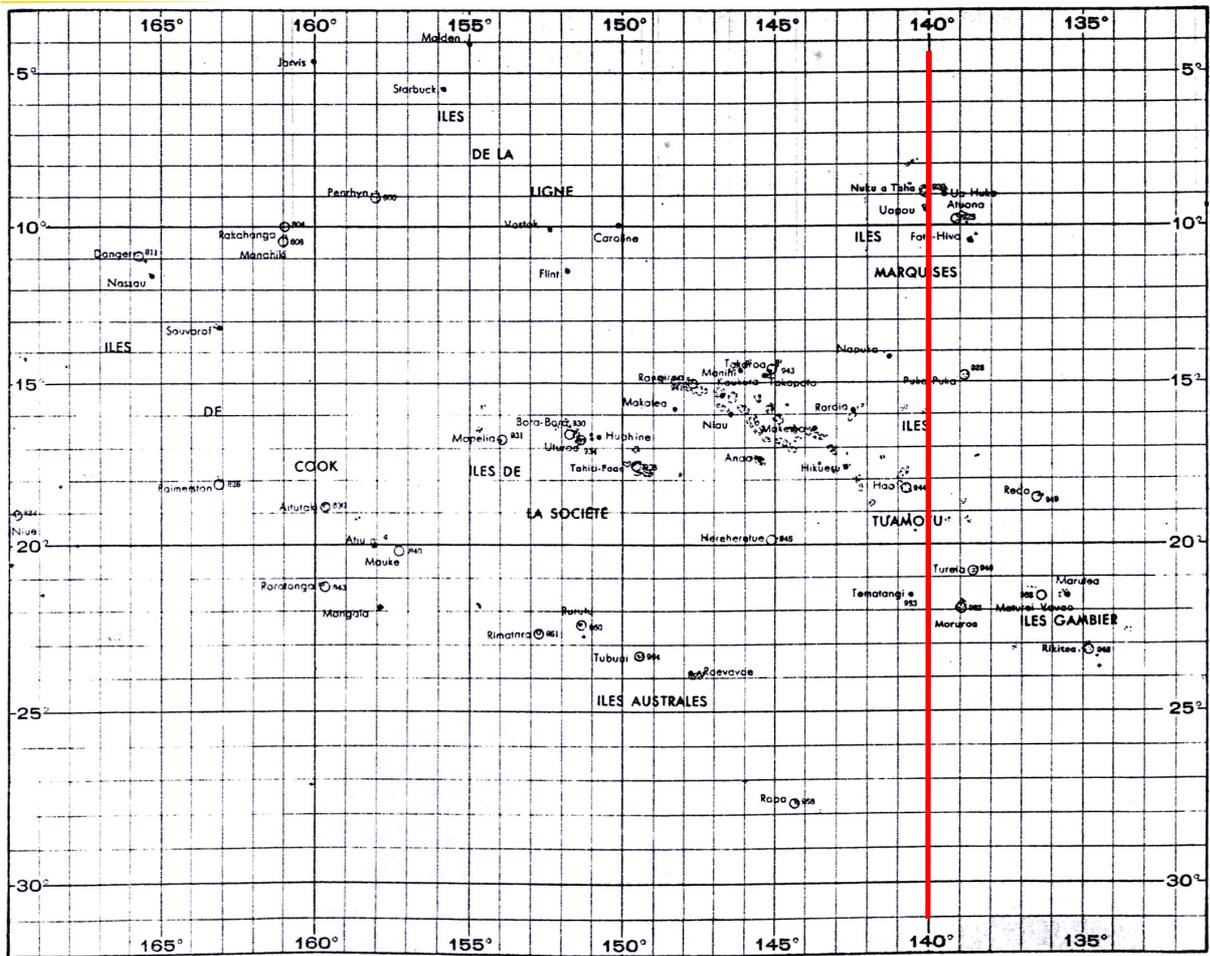


Figure 5 : la Polynésie française (source Météo France MET_MAR n°120).

3.1. LES CYCLONES TROPICAUX DANS L’OCEAN PACIFIQUE SUD

On sait que la zone intertropicale située, sur plus de 45° de latitude, à cheval sur l’équateur, reçoit un maximum de rayonnement solaire. C’est donc tout naturellement là que les couches supérieures de l’océan accumulent une grande quantité d’énergie solaire qui repasse finalement, en grande partie, à l’atmosphère par les voies du rayonnement infrarouge et surtout de l’évaporation (Météo France).

Cependant, les réserves thermiques accumulées dans la mer sont supérieures aux pertes qui s’opèrent par ces voies classiques. Des soupapes de sécurité sont nécessaires pour rétablir l’équilibre gain / perte puisque le bilan thermique du globe et, *a fortiori*, des mers, est nul du moins à l’échelle de temps d’une vie humaine.

L'une de ces soupapes libératrices d'un trop plein d'énergie est sans conteste constituée par le cyclone tropical, machine thermique exceptionnelle affectée d'une dynamique particulière.

Certaines conditions sont propices à la formation du cyclone, dont cinq sont absolument essentielles :

1. Température de la mer supérieure à 27°C sur une vaste zone et une profondeur suffisante ;
2. Force de Coriolis faible mais non nulle ;
3. Cisaillement vertical des vents faibles ;
4. Convergence de l'air en surface et dans la basse troposphère ;
5. Divergence de l'air dans la haute troposphère.

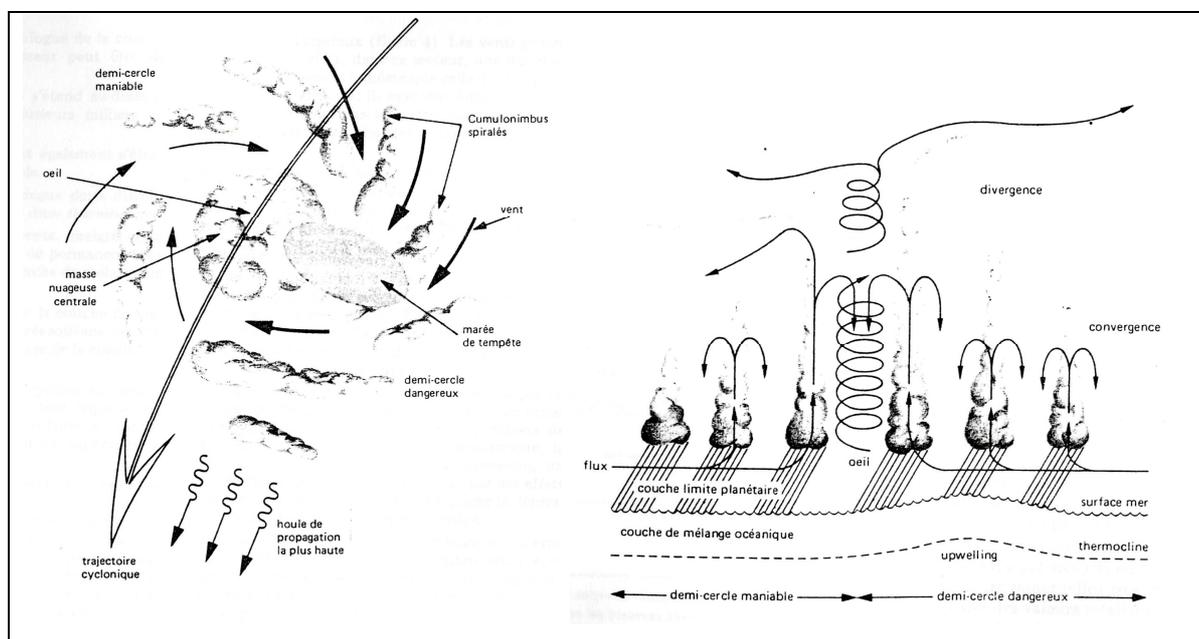


Figure 6 : schéma type d'un cyclone tropical de l'hémisphère Sud vu en plan puis en coupe (MET_MAR n°120)

La Figure 6 présente une vue schématisée, en plan et en coupe, d'un cyclone du type de ceux qui touchent la Polynésie. On y observe que dans les basses couches l'air converge vers le centre (condition 4) en adoptant sous l'influence de la rotation terrestre (condition 2) un mouvement tourbillonnaire. Cet air se trouve obligatoirement projeté en altitude où il se refroidit et donne naissance à des nuages verticaux puissants du type Cumulonimbus ; la condensation s'accompagne d'une libération de chaleur dans l'atmosphère qui reste, en partie, cantonnée dans la cheminée centrale dès lors que la disposition des vents ne s'y oppose pas (condition 3). A haute altitude, la structure devient divergente (condition 5) de manière à assurer l'évacuation d'une partie de l'air ascendant puisé dans les basses couches.

On voit ainsi fonctionner un cycle thermodynamique assuré d'une vie longue dès lors qu'il dispose d'une réserve de carburant suffisante, à savoir une importante réserve d'énergie d'origine océanique.

La direction interrégionale de Météo France classe les cyclones en fonction de la vitesse moyenne du vent au voisinage du centre de la perturbation. Il s'agit de vitesses de vent moyennées sur 10 minutes. En pointe, dans les rafales, le vent peut dépasser de 50% ces valeurs (Plan de Secours Spécialisé Cyclone).

DEFINITION DES PERTURBATIONS

Vitesse moyenne du vent

25 Kt (nœuds)	50 km/h Dépression tropicale FAIBLE
33Kt	61 km/h
34KT	62 km/h Dépression tropicale MODEREE
47 Kt	87 km/h
48Kt	88km/h Dépression tropicale FORTE
63Kt	117 km/h
64Kt	118 km/h Cyclone tropical
95 Kt	176 km/h
96 Kt et +	177 km/h et + Cyclone tropical INTENSE

DEGATS PREVISIBLES

Cyclone TROPICAL

Arbres abattus
Toitures endommagées
Eboulement, Glissement de terrain
Embarcation détruites au port
Erosion des plages
Destruction des constructions légères

Cyclone tropical INTENSE

Dégâts considérables
Bâtiments endommagés
Installations portuaires,
aéroportuaires et industrielles
détruites

Depuis 1831, 61 phénomènes cycloniques tropicaux ont affecté la Polynésie (Annexe 1).

Il est à noter que l'activité cyclonique est concentrée sur de courtes périodes (source ORSTOM) :

- En 1970 : du 20 février au 5 mars
- En 1978 : du 16 au 27 février
- En 1981 : du 5 au 24 mars
- En 1986 : du 5 au 13 février
- En 1986-1987 : du 25 décembre au 5 janvier et du 26 février au 5 mars
- Exceptionnellement en 1983 : elle s'est manifestée sans répit de la mi-janvier à la fin du mois d'avril.

3.2. LA HOULE

Les houles de tempête ont une période généralement comprise entre 10 et 15 secondes et une longueur d'onde de 150 à 300 mètres.

Les vagues les plus importantes, atteignant couramment 10 à 15 mètres avant de toucher les hauts fonds, sont générées par les vents du quadrant arrière du demi cercle dangereux (Figure 6). Les vents générateurs ont, en effet, dans ce secteur, une direction qui est sensiblement la même que celle dans laquelle le cyclone se déplace. Ils exercent donc une action plus durable que dans les autres quadrants où les vents générateurs changent constamment de direction (source Météo France).

3.2.1. Caractéristiques physiques

Houles observées en Polynésie durant l'été austral de 1982-1983 (Météo France) :

– Cyclone Nano.

Sur l'atoll de Hao la houle est de 15 m en mer et de 4 m dans le lagon.

Sur les atolls de Rea et Hereheretue (situées à 500 km de l'œil du cyclone) la houle a une amplitude de 5 à 7 mètres en mer.

A Tureia ; les vagues sont évaluées à 16-18 m (tout a été emporté)

– Cyclone Orama.

A Takapoto, Manihi et Ahe la houle a une amplitude de 6 à 8 mètres en mer.

A Anaa, la houle mesure 12 mètres de haut dans l'œil de la dépression.

– Cyclone Reva.

Houle de 5 à 6 mètres à Rangiroa.

Creux de 12 m signalés en mer.

- Cyclone Veena.
Houle de 6 mètres à Manihi et Ahe.
Houle de 5 à 7 mètres sur les côtes orientales de Tahiti et Moorea.
- Cyclone William.
Houle de 8 à 9 mètres entre les îles de Hao, Puka Puka et Reao.

3.2.2. Dégâts engendrés par la Houle

La base de données ARAI contient 220 événements associés aux surcotes marines, ces événements sont rattachés à cinq types de phénomènes :

- La houle (46 événements) ;
- Les cyclones (127 événements) ;
- Les érosions de rivage (1 événement) ;
- Les marées de tempête (7 événements) ;
- Les tsunamis (39 événements).

Les houles les plus énergétiques sont celles pour lesquelles la vitesse de déplacement est proche de la vitesse de déplacement du cyclone.

Plusieurs phénomènes associés à la houle sont potentiellement destructeurs :

En accumulant des galets, la houle peut se construire des zones à pente douce lui permettant de pénétrer plus loin à l'intérieur des terres (Phénomène de tremplin Photo 1).



Photo 1: accumulation de galets contre les enrochements protégeant la route dans le secteur de Vairao, lors d'une houle de 3-4 m de direction S-SW.

De la même façon et dans des contextes similaires la houle peut entraîner des dommages par affouillement (sape des matériaux servant de base aux enrochements), par déstabilisation directs d'enrochements mal calibrés, ou par érosion de rivage non protégé (Photo 2).



Photo 2: impact direct de la houle sur le rivage et sur une habitation, l'érosion du rivage entraîne une déstabilisation des cocotiers.

La houle peut aussi se charger en matériaux (galets et blocs issus du fond marin et/ou produits de démantèlement), tous ces matériaux déposés successivement les uns derrière les autres engendrent un phénomène de poussée globale très destructeur. Certains matériaux peuvent également être projetés.

Les inondations de rivière sont également accrues du fait de l'action combinée de la houle et de la marée de tempête qui ralentissent l'écoulement de la rivière par un phénomène de contre courant (Photo 3), mais aussi par une accumulation de matériau à son embouchure (Photo 4).



Photo 3: remontée de la houle dans la rivière « Punaruu », la houle d'origine est une houle saisonnière de 3-4 m de direction S, SW.



Photo 4: obstruction de l'exutoire de la rivière « Punaruu » par l'action combinée de la houle et de la marée.

Les zones en remblais méritent une attention particulière ; elles sont plus sensibles aux effets de la houle du fait qu'elles modifient le profil naturel du rivage.

Des inondations peuvent avoir lieu sous l'action des vagues avec une impossibilité pour les eaux de retourner à la mer. Ce cas se présente fréquemment lorsque des enrochements sont mal conçus et qu'ils ne permettent pas l'évacuation des eaux les ayant submergés.

3.3. LES MAREES DE TEMPETES

La marée de tempête se révèle comme un phénomène des plus dangereux parmi ceux qui accompagnent le cyclone tropical. Elle se traduit par un niveau de la mer anormalement élevé par rapport à celui lié simplement à la marée astronomique.

Une tempête, tropicale ou non, se traduit par un minimum de pression de dimensions comprises entre quelques centaines et quelques milliers de kilomètres de rayon. Par effet barométrique, la surface de la mer subit, sous la dépression, un soulèvement qui est encore accentué par des effets dynamiques liés au vent qui accompagne la dépression et au déplacement propre de celle-ci.

Ainsi se forme une onde dont le mécanisme interne est le même que celui de la marée astronomique, et dont la hauteur dépend du creux barométrique, de la vitesse de

déplacement de ce dernier, des caractéristiques géométriques du bassin océanique, etc. (Météo France, 1983).

Les îles de la Polynésie étant dépourvues de plateau continental, les surcotes marines associées aux cyclones sont relativement faibles (pour un cyclone tropical intense, la surcote engendrée est de l'ordre du mètre pour des vagues atteignant 10 mètres de haut).

Deux types d'îles composent la Polynésie, les îles hautes avec une barrière de corail à faible distance de la cote et les îles basses avec de vastes lagons.

Îles de la société :

Pour les cyclones ayant intéressés l'île de Tahiti de 1970 à 1991 les surcotes maximum mesurées à Papeete sont comprises entre 0.15 et 0.45 mètre.

Îles Gambier :

Pour les cyclones ayant intéressés les îles Gambier (Rikitéa) les surcotes maximum sont comprises entre 0.18 et 0.27 mètre (Daniel.P., 1995).

Îles Tuamotu :

Dans les atolls, des phénomènes de résonance de la houle associés au phénomène d'ensachage se développent dans les grands lagons entraînant des surcotes de 1 à 2 mètres. Dans les grands atolls la houle se produisant dans le lagon est « indépendante » de la houle en mer. Ainsi cette houle peut avoir un mouvement de va et viens à l'intérieur du lagon, c'est ce phénomène que l'on appelle résonance de la houle.

Le risque est d'autant plus grand que ces îles ont une altitude maximale très faible (de l'ordre de quelques mètres).

- Hao : surcote de 1 à 1.45 m respectivement de Otepa à Vainono (cyclone Nano, 1983) ;
- Rangiroa : 1 m à Tiputa (cyclone Orama, 1983) ;
- Anaa : 0.70 m à Tukahora (cyclone Orama, 1983) ;
- Lors du cyclone Veena (1983) l'atoll Hereheretue est uniformément recouvert de plus d'1 mètre d'eau par la marée de tempête.

4. Les changements climatiques futurs

les phénomènes cycloniques sont fortement dépendants du climat et de ses variations. Les conséquences pourront être d'autant plus importantes que le niveau moyen des océans se sera élevé sous l'effet d'un réchauffement global. Pour la Polynésie française et, en particulier, pour les îles basses (atolls principalement) un réchauffement planétaire aurait donc des conséquences importantes sur l'aléa houle cyclonique et sur le niveau de risque lié à cet aléa.

4.1. LES CAUSES DES VARIATIONS DU NIVEAU DE LA MER

L'eau de mer se dilate en se réchauffant, cette dilatation thermique apparaît comme l'une des principales causes des variations historiques du niveau de la mer (GIEC). L'ampleur du réchauffement et la profondeur de la couche d'eau concernée varient selon le lieu considéré. En outre, pour une variation donnée de la température, les eaux chaudes se dilatent davantage que les eaux froides. La répartition géographique de la variation du niveau de la mer est également conditionnée par les fluctuations géographiques de la dilatation thermique, les variations de la salinité, les régimes de vent et la circulation océanique. Les variations régionales et/ou locales du niveau de la mer peuvent donc être d'une ampleur très différente de celle observée en moyenne à l'échelle du globe.

Après l'expansion thermique, la fonte des glaciers et des calottes glaciaires (pôle Nord) devrait être l'une des principales causes de l'élévation du niveau de la mer au cours du siècle prochain.

Au 20^{ème} siècle, la température moyenne globale à la surface de la terre s'est accrue d'environ 0,6°C.

Globalement il est très probable que les années 90 aient été la décennie la plus chaude depuis que l'on tient des relevés, c'est à dire depuis 1861 (GIEC, 2001).

Les mouvements verticaux des terres émergées dus à des processus géologiques naturels tels que les lents déplacements du manteau ou les déformations tectoniques de la croûte terrestre, peuvent avoir des effets importants sur le niveau de la mer à l'échelle locale.

4.2. EVOLUTION FUTURE DES PHENOMENES METEOROLOGIQUES EXTREMES

Les modèles ne concordent guère quant à l'évolution future de l'intensité, de la fréquence et de la variabilité des tempêtes aux latitudes moyennes. Peu d'indices

concourent à indiquer un changement de la fréquence prévue des cyclones tropicaux ou une modification de leurs zones de formation.

En revanche, certaines mesures laissent entrevoir un accroissement de leur intensité, et il semble ressortir de certaines études théoriques ou de simulation que la limite supérieure de cette intensité pourrait augmenter. Quant à l'intensité moyenne et maximale des précipitations associées à ces cyclones tropicaux, elle devrait s'accroître sensiblement.

4.3. ELEVATION GLOBALE DU NIVEAU DE LA MER

Au 20^{ème} siècle le niveau de la mer s'est élevé de 1 à 2 millimètres par an. Depuis le dernier maximum glaciaire remontant à quelques 20 000 ans le niveau de la mer s'est élevé de plus de 120 mètres. L'élévation la plus rapide du niveau de la mer à l'échelle du globe a eu lieu entre 15 000 et 6 000 ans avant notre ère au rythme moyen de 10 mm environ par an. Puis l'élévation s'est poursuivie à un rythme de 0.5 mm par an de 6000 à 3000 ans, et enfin à un rythme de 0.1 à 0.2 mm par an durant les derniers 3 000 ans. Ce rythme est à peu près 10 fois inférieur à celui observé au 20^{ème} siècle (source GIEC).

Le niveau moyen global de la mer devrait augmenter de 0.09 à 0.88 mètres entre 1990 et 2100 (Figure 7). Ce relèvement sera principalement dû à la dilatation thermique des océans et à la perte de masse des glaciers et des calottes glaciaires.

Cette fourchette reflète l'incertitude systématique propre à la modélisation. Les principaux facteurs qui contribuent à cette élévation du niveau de la mer sont :

- Une dilatation thermique de 0,11 à 0,43 m qui s'accroîtra tout au long du 21^{ème} siècle ;
- Une contribution de 0,01 à 0,23 m des glaciers ;
- Une contribution de – 0,02 à + 0,09 m du Groenland
- Une contribution de – 0,17 à + 0,02 m de l'Antarctique

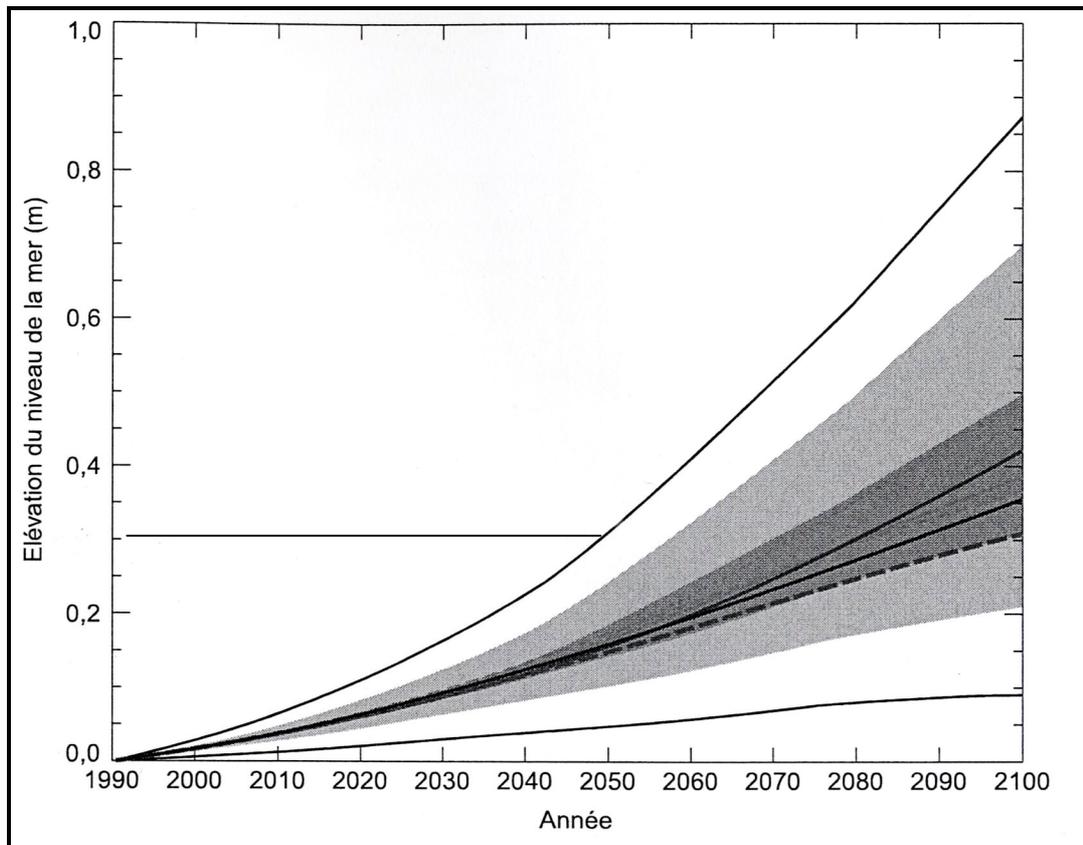


Figure 7 : élévation moyen du niveau de la mer de 1990 à 2100 suivant plusieurs scénarios (GIEC)

4.4. VALEUR RETENUE POUR LA MODELISATION DE L'ALEA CYCLONIQUE

En définitive il est difficile de prendre en compte la surélévation globale du niveau de la mer dans l'étude des impacts de la houle étant donné :

- L'écart des mesures selon les scénarios de modélisation ;
- Les grandes disparités locales par rapport au niveau global.

Cependant nous avons fait le choix de prendre en compte la valeur la plus contraignante en 2050 à savoir une surélévation du niveau moyen de la mer de 0,30 mètre.

Nous attirons l'attention des décideurs sur cette problématique qui peut avoir des répercussions importantes qui devront être prises en compte dans l'aménagement futur des îles de la Polynésie.

Le cas des atolls des Tuamotu, qui culminent parfois à seulement quelques mètres au-dessus du niveau de la mer, est particulièrement sensible. En effet le niveau de la mer pourrait augmenter de 0,90 mètre durant les 100 prochaines années.

5. Le zonage de l'aléa cyclonique

5.1. LES VALEURS DE REFERENCES

5.1.1. La houle

Les données cycloniques historiques s'étalent sur la période allant de 1831 à nos jours, soit un total de 133 ans. Les données numériques fiables (intensité des cyclones, hauteur de houle) n'existent que depuis la saison chaude 1969 – 1970, soit 34 ans.

Il semble cependant possible de retrouver les caractéristiques de houles plus anciennes notamment grâce aux enregistrements sismiques disponibles en Polynésie (Annexe 3).

Depuis l'année 1831 61 cyclones sont répertoriés dans les archives historiques, 39 d'entre eux se sont produits durant les 34 dernières années (1970 – 2004), soit 64% des cyclones inventoriés.

Les analyses qui vont suivre sont effectuées à partir des données existantes depuis 1970 (Annexe 2). De plus nous émettons l'hypothèse qu'un cyclone d'intensité x peut potentiellement se reproduire et atteindre cette intensité en tout point de sa trajectoire.

Les phénomènes cycloniques sont en majeure partie des cyclones tropicaux (vent compris entre 118 et 179 km/h) (Tableau 1).

Ils sont plus fréquents du nord vers le sud et leur intensité augmente également avec la longitude (Tableau 2).

Les houles associées à ces cyclones oscillent entre 4 et 12 mètres d'amplitude (Tableau 3).

type de perturbation	nombre de phénomènes
Cyclone tropical intense	4
Cyclone tropical	17
Dépression tropicale forte	9
Dépression tropicale modérée	9

Tableau 1 : phénomènes cycloniques ayant intéressé la Polynésie (1970 – 2004)

Archipels	Nombre de cyclones	Cyc. Trop. Intense	Cyc. Trop.	Dépr. Trop. forte	Dépr. Trop. Modérée
Marquises	2		1		1
Gambier	11	1	7	1	2
Tuamotu	18	3	7	4	4
Société	20	2	9	5	4
Australes	21	2	10	6	2

Tableau 2 : nombre de cyclones d'intensité connue par archipel

Archipels	houles de références	hauteurs de houle
Marquises	1	7 m
Gambier	5	7 à 11 m
Tuamotu	11	4 à 12 m
Société	9	4 à 12 m
Australes	9	4 à 11 m

Tableau 3 : houles de références par archipels

Etant donnée la faible période couverte par les archives cycloniques (133 ans) et la qualité de celles-ci (intensité non définie systématiquement) il semble judicieux de choisir les valeurs de références issues des événements paroxysmaux subis par chaque archipel (Tableau 4).

Archipels	Intensités cycloniques	hauteurs de houle
Marquises	Cyc. Trop.	7 m
Gambier	Cyc. Trop. Intense	11 m
Tuamotu	Cyc. Trop. Intense	12 m
Société	Cyc. Trop. Intense	12 m
Australes	Cyc. Trop. Intense	11 m

Tableau 4 : valeurs paroxysmales par archipel

Il est rappelé que huit cyclones ont été meurtriers durant les derniers 133 ans (1843, 1878, 1903, 1905, 1906, 1983, 1997 et 1998). Les décès sont dus soit aux surcotes engendrées par les marées de tempête, soit par les inondations et mouvements de terrains induits par les précipitations.

Cependant la majeure partie des décès est liée à l'absence d'abris hors d'eau sur les atolls des Tuamotu.

5.1.2. La surcote statique

Elle est composée de la marée astronomique (0.2 m), de la marée de tempête (entre 0 et 1m) et d'une surélévation moyenne du niveau global des océans (0.3 m).

La valeur de la marée astronomique est la valeur moyenne des marées en Polynésie.

La surélévation moyenne du niveau des océans est issue des études du GIEC (paragraphe 4.3)

Enfin la valeur de la marée de tempête est déduite de la pression au centre du cyclone par rapport à la pression moyenne au niveau de la mer (1 cm par hPa).

5.2. METHODOLOGIE

La méthodologie de modélisation de la houle cyclonique fait l'objet d'un rapport complet intitulé « Détermination des surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie »

Afin de cartographier l'aléa houle cyclonique, il est utile de dissocier les grands ensembles morphologiques côtiers de la Polynésie. En effet c'est la morphologie du littoral qui conditionne l'impact de la houle sur le rivage.

Deux types d'îles composent la Polynésie ; les îles « hautes » et les atolls parmi lesquelles on peut distinguer plusieurs classes morphologiques distinctes.

5.2.1. Les îles hautes

5.2.1.1. Côtes sans lagon ni récif frangeant

Plages et baies

Si l'isobathe correspondant à l'amplitude de la houle considérée est très proche de la côte (isobathe – 10 m pour une houle d'amplitude 10 m), l'impact sera très fort au rivage. Dans le cas contraire, le potentiel d'inondation est élevé au rivage mais le potentiel de destruction du à l'action mécanique de l'eau est plus modéré.

Falaise

Le zonage de l'aléa est difficile à réaliser dans ce type de contexte.

Ainsi par exemple, pour une hauteur affectée de l'ordre de 20 m et un talus de 60°, la largeur à considérer est de 12 m, soit 1/2 mm au 25000^{ème} et environ 2 mm au 5000^{ème}.

En pratique on indiquera le plus souvent le long de la côte une bande de largeur forfaitaire qui sera souvent exagérée par rapport à la réalité. Dans la plupart des cas, ces zones seront, par ailleurs, déjà incluses dans des zones d'aléa éboulement élevé qui s'imposeront compte tenu du contexte (la houle étant un des facteurs concourant à un niveau d'aléa mouvement de terrain fort).

Si le tracé de la côté le permet, on pourra réaliser un zonage automatique en considérant une largeur forfaitaire à partir du trait de côte.

5.2.1.2. Côtes à récif immergé

Pour les plus fortes houles, une grande partie de l'énergie sera dispersée par déferlement au droit du récif. L'impact va donc dépendre de la profondeur du récif et de la distance par rapport au rivage.

Par ailleurs une onde résultante égale à la hauteur d'eau sur le récif va passer dans le lagon. Cette houle va s'amplifier à nouveau proportionnellement à la profondeur du lagon (plus celui-ci est profond plus la houle augmentera son amplitude) et à la distance au rivage (plus la distance est grande plus la houle pourra se reformer).

Les houles de moindre ampleur perdront moins d'énergie au niveau du récif (pas de déferlement) ; d'autant moins que le récif est plus profond.

D'une manière générale, quelque soit l'amplitude des houles leur énergie après le passage du récif sera d'autant plus grande que celui-ci est profond.

5.2.1.3. Côtes des îles hautes avec lagon

A priori, la houle du large n'arrive pas jusqu'au rivage. Il faut toutefois considérer une houle de très faible ampleur au sein du lagon et une montée des eaux liées au phénomène d'ensachage (cf. glossaire).

Cas de côtes au droit des passes des îles hautes avec lagon :

La houle arrive jusqu'au rivage. Une modélisation fine, tenant compte de la bathymétrie, de l'amplitude et de la direction de la houle, devra permettre de mesurer la zone de déferlement ainsi que la marée de tempête associée.

5.2.2. Les Atolls

Dans la majorité des cas un zonage ne sera sans doute pas nécessaire dans les atolls, dans la mesure où, en cas de fortes houles (survenant plusieurs fois par siècle), c'est l'ensemble de l'atoll qui est submergé avec un impact dynamique fort aussi bien côté océan que côté lagon. Cela est particulièrement vrai pour les grands atolls (phénomène de résonance).

En revanche pour les petits atolls, l'impact dynamique côté lagon serait a priori plus limité. Aussi il pourrait y avoir une différence de zonage entre l'intérieur et l'extérieur de la bande de terre.

6. Les ouvrages de protection

Les ouvrages de protection contre la houle sont les ouvrages qui permettent de protéger un port ou une partie d'un port (plan d'eau, terre-plein) contre les actions de la houle (attaque directe, franchissements, submersion, érosion...).

Certains de ces ouvrages peuvent aussi être utilisés pour protéger des installations ou des ouvrages isolés (prise d'eau, émissaire en mer) ou même des portions de littoral. Ce sont des ouvrages artificiels construits par l'homme.

Certains de ces ouvrages peuvent être situés à l'intérieur d'un port ; ils permettent alors d'améliorer ou de compléter la protection contre la houle : jetées intérieures, contre jetées, talus de terre-pleins ou plages d'amortissement.

6.1. ENROCHEMENTS

Ceux ci doivent avoir une granulométrie décroissante de la mer vers la terre, avec une implantation d'un système d'évacuation des eaux (protégé contre l'accumulation de matériaux). Il est également judicieux d'utiliser un géotextile pour limiter l'affouillement des matériaux à la base par circulation d'eau entre les blocs (Figure 8)

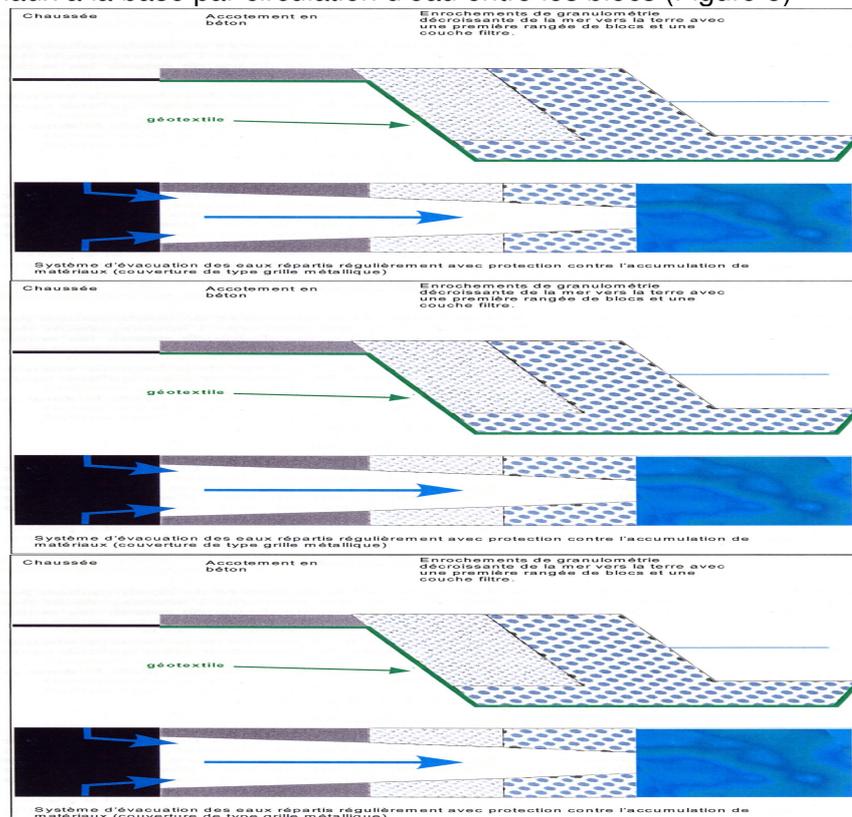


Figure 8: schéma de principe de réalisation d'un enrochement sain.

6.2. DIGUE VERTICALE

Les digues verticales sont constituées d'une muraille à parements verticaux. Leur utilisation est soumise à conditions :

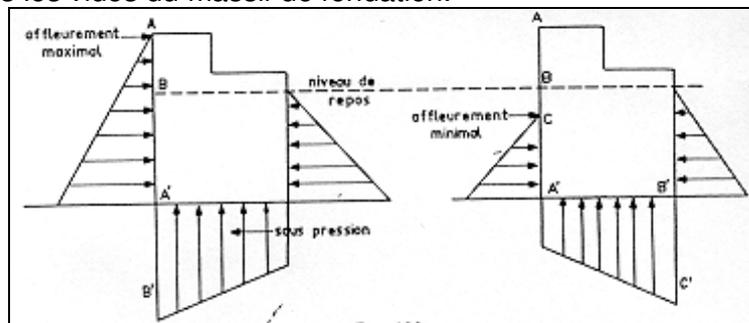
- pas de jetées verticales sur des fonds meubles à cause du grand pouvoir d'affouillement des lames devant les jetées réfléchissantes,
- comme le dimensionnement (volume de maçonnerie) augmente très vite avec l'amplitude de la houle maximale, pour des raisons économiques, les jetées ne sont plus utilisées pour les creux de 6 à 7 m,
- comme le volume de maçonnerie augmente peu avec la profondeur, les digues verticales sont intéressantes en cas de grande profondeur ou des mers à fortes marées,
- les jetées verticales sont économiquement valables dans les régions pauvres en matériau d'enrochement de qualité.

Calcul des jetées verticales :

Le calcul de la stabilité des jetées verticales s'effectue à partir des pressions dues aux clapotis créés lors des phénomènes de réflexion.

On peut donc tracer un gradient de pression sur chaque paroi de la digue.

Il faut aussi prendre en compte la présence d'une sous pression due au va et vient de l'eau dans les vides du massif de fondation.



On peut considérer que côté port le gradient est constant alors que du côté du large, l'ampleur de la réflexion entraîne une variation du profil de sous pression.

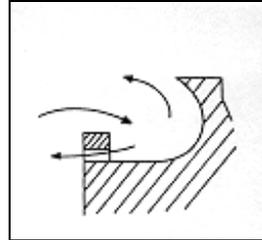
Au voisinage du musoir, la diffraction de la houle autour du musoir doit être prise en compte ainsi que le fait que de l'autre côté de la jetée, le niveau varie avec une phase différente.

Inconvénients des digues verticales :

- le franchissement :

Un des inconvénients des digues verticales est la nécessité d'avoir une côte d'arase très élevée pour ne pas être franchie. Ceci peut être évité par des dispositifs tels que la bordure de déversement, qui est de l'ordre de 5 m, munis d'évents vers la mer.

Ce système permet aussi d'étaler les efforts sur l'ouvrage dans le temps et en diminue les valeurs extrêmes.



- une forte **réflexion**

Les jetées verticales étant très réfléchissantes, on peut munir le parement d'orifices et d'une chambre d'expansion de la houle, ce système pouvant être combiné avec le dispositif anti franchissement.

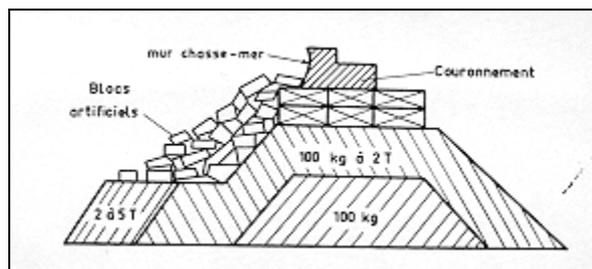
6.3. DIGUE A TALUS

Structure

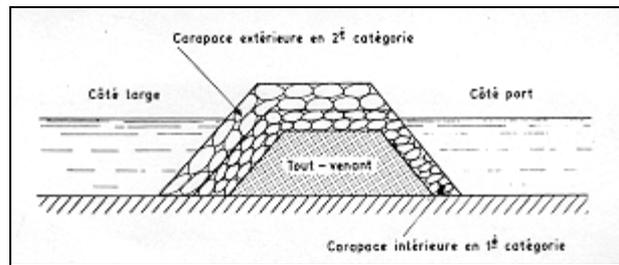
Les digues à talus sont constituées d'un massif en pierres ou en blocs de béton qui montent jusqu'à la surface libre, couronné par un édifice en maçonnerie plus ou moins monolithique, qui repose sur le massif et empêche le franchissement de l'ouvrage par gros temps.

La constitution de l'ouvrage est un compromis entre les matériaux disponibles et l'action destructrice de la houle.

- **les blocs naturels** ne dépassent pas 10 tonnes en général. Ce poids est insuffisant pour assurer la stabilité des massifs d'enrochements, de sorte qu'il faille en général les protéger par des blocs artificiels en béton.



- **les noyaux** des massifs sont constitués de matériaux de granulométrie étendue (tout venant) pour éviter le tassement intérieur de l'ouvrage et la traversée du massif par la houle.

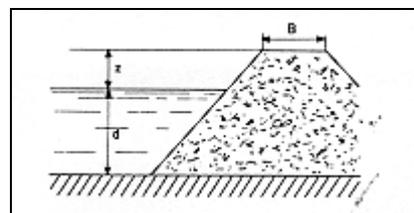


Il convient d'éviter de mettre en contact des couches de matériau dont les poids unitaires ont un rapport de 3 à 5 pour éviter que les petits éléments ne pénètrent dans les intervalles des gros et que ces derniers ne disparaissent dans la couche sous-jacente.

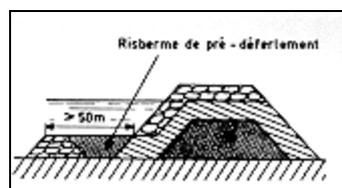
- le couronnement de la digue est une partie fragile constituée par soit des blocs analogues à ceux de la carapace, soit des massifs de béton parfois profilés en forme de chasse mer et servant de piste.

Inconvénients des digues à talus

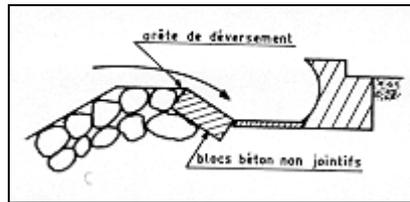
- **Le franchissement** : ce phénomène peut être évité par soit une superstructure résistante par son poids à la poussée du jet de lame, soit en élargissant la berme B de la crête de l'ouvrage ou en élevant la cote z d'arase de l'ouvrage.



On peut aussi faire déferler la houle en avant de l'ouvrage sur un risberme de pré déferlement de longueur, en général, supérieure à 50 m.



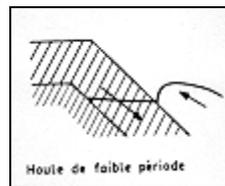
On peut aussi disposer, en haut de carapace, un bassin de déversement en forme de canal, d'évacuation soit latéralement, soit par des orifices ou des perméabilités dans les blocs de la carapace.



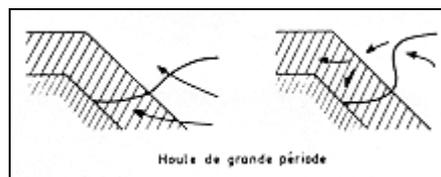
- **le grand glissement** : l'inconvénient des digues à talus est le risque de grand glissement qui caractérise la rupture d'équilibre de l'ensemble "ouvrage + terrain".

- **la destruction** des digues à talus : la carapace est soumise à la fois à l'action de la masse d'eau "extérieure" due à la vague et celle de l'eau "interne" se déplaçant dans la carapace mais déphasée par rapport à la première. C'est ce déphasage qui jouera donc un rôle important dans le processus de destruction de la carapace. Le déphasage dépend des caractéristiques géométriques, de la perméabilité de l'ouvrage, pour beaucoup de la période de la houle.

Cas des périodes faibles : l'eau interne est en retard par rapport à la vague externe. La montée de la vague est alors contrariée, et la descente de l'eau est ralentie. L'effet destructeur est faible (même dans le cas des houles déferlantes et celles de hauteur croissante).



Cas des houles de grandes périodes : l'eau interne et la vague sont en phase. Il y a donc un freinage de la vague faible. Le déferlement frappe une carapace vide d'eau, à l'intérieur de laquelle l'eau se dissocie, soit vers le haut en provoquant le franchissement, soit en s'écoulant rapidement vers le bas.



Les effets nocifs s'atténuent pour les houles de très grandes périodes pour lesquelles la vitesse des particules diminue.

Les houles les plus dangereuses, pour les talus d'enrochement, sont celles ayant une période de 8 secondes.

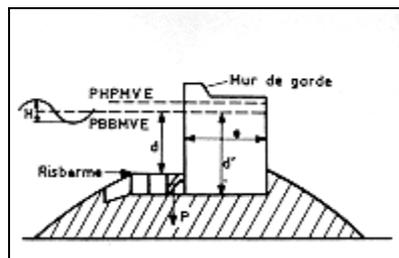
Les différents inconvénients, observés sur l'étude des digues à talus montrent que pour améliorer la stabilité d'une jetée, il faut freiner l'eau à sa descente dans la carapace et faire déferler les vagues avant l'ouvrage. C'est à partir de ces constatations qu'ont été édifiées les digues mixtes.

6.4. DIGUE MIXTE

Comme leur nom l'indique, elles reprennent certains principes des digues à talus et des digues verticales. Elles comportent une muraille reposant sur un massif de fondation, en enrochement ou sur le fond dur.

Un principe de base est d'éviter le déferlement de la houle sur un mur ; pour cela, celui-ci doit descendre à une profondeur au moins égale à 2,5 fois le creux, sous le niveau le plus bas.

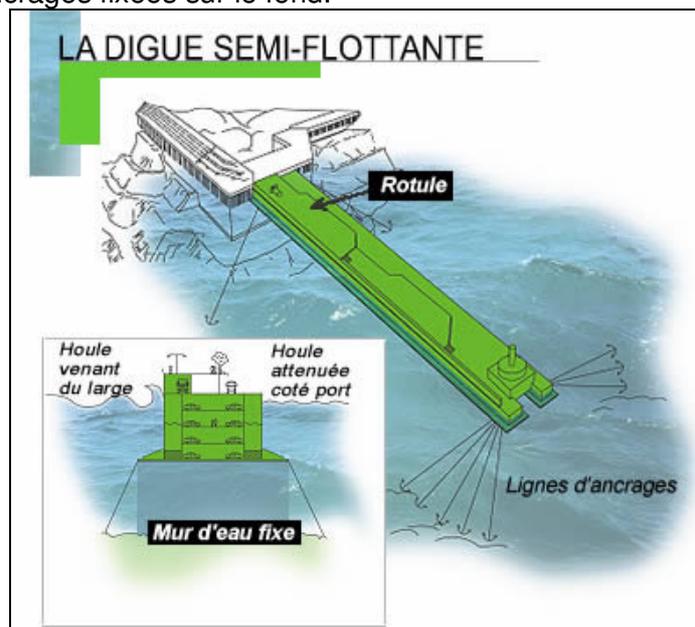
La stabilité du massif d'enrochement, soumis aux efforts verticaux dus à la présence de la digue, est assurée grâce à la risberme.



Elles permettent une économie des matériaux d'enrochements et allient les avantages des digue à talus et des digues verticales.

6.5. DIGUE SEMI FLOTTANTE

Elle s'articule à un terre-plein par l'intermédiaire d'un caisson de culée auquel elle est reliée par l'intermédiaire d'une rotule métallique. L'extrémité côté large est amarrée par deux séries d'ancrages fixées sur le fond.



"un mur d'eau fixe"

La tranquillisation de l'avant-port est assurée par la technique du "mur d'eau fixe", brevet déposé par la Principauté de Monaco.

Le principe du "mur d'eau fixe" consiste à mobiliser l'inertie de la masse d'eau située entre la face inférieure d'un caisson et le fond de la mer qui se comporte alors comme un véritable mur sur lequel la houle incidente est réfléchiée. Les courants ne sont pas arrêtés par l'ouvrage.

En jouant sur la largeur et l'immersion du caisson, les caractéristiques de l'ouvrage peuvent être adaptées à l'importance de la houle à atténuer. Le mur d'eau fixe permet de diviser par cinq l'amplitude de la houle pour la digue.

7. Conclusion

Le but de l'action 3.4 du programme ARAI est de réaliser une cartographie de l'aléa houle cyclonique sur l'ensemble de la Polynésie française

Le but de ce rapport était de dresser un bilan des connaissances sur les surcotes marines en Polynésie.

Il en ressort :

- Que la Polynésie est soumise à deux types de houle ; les houles saisonnières n'excédant que rarement les 3 mètres d'amplitude, et les houles cycloniques pouvant atteindre 12 mètres d'amplitude.
- Que les cyclones à l'origine de ces fortes houles n'ont pas la même fréquence d'apparition d'un archipel à un autre et sont de moins en moins fréquents du nord vers le sud.
- Que l'impact de la houle cyclonique dépend de paramètres statiques et de paramètres dynamiques. Ainsi les propriétés de la houle jouent un rôle important mais également la bathymétrie, le niveau moyen de la mer et les vents associés aux cyclones.
- Que les données disponibles pour la modélisation de la houle ne concerne que les dernières 35 années. En conséquence ce sont les événements paroxysmaux ayant intéressés chaque archipel qui sont retenus comme terme de référence à la modélisation de l'aléa.

Un rapport méthodologique présentant le choix des outils numériques et leurs caractéristiques sera édité lors de la modélisation détaillée de sites tests.

Cette étude a permis de mettre en avant les paramètres à retenir pour modéliser les houles cycloniques en Polynésie à l'aide d'outils numériques.

8. Bibliographie

Anonyme – Le cyclone IMA (6-13 février 1986).

Anonyme – Saison 1991-1992 des perturbations tropicales dans le Pacifique sud-est.

BARRUOL.G., REYMOND.D., FONTAINE.F., HYVERNAUD.O., MAURER.V., MAAMAATUAIHUTAPU.K. (2004) – Swell-induced seismic noise, 33 p.

BERGES.R., CAUCHARD.G. (1984) – La saison chaude 1982-1983 en Polynésie. Météo France MET_MAR n°124.

BORRAS.C., MARGNOUX.L. – La houle et les ouvrages en mer. www.enseeiht.fr/hmf/travaux.

CAUCHARD.G., INCHAUSPE.J. (1976) – Le climat de la Polynésie. Météorologie tropicale n°6, série 6.

CEP. Centre d'Expérimentation du Pacifique. Service météorologique (1979) – Vents, cyclones et houles en Polynésie française.

DANIEL.P.– Instruments et techniques. Prévoir les surcotes liées aux cyclones. Un logiciel pour les Dom Tom. Météo France MET_MAR n°163 pp.11-16.

DANIEL.P., POITEVIN.J. (1995) – Surcotes liées au passage d'un cyclone en Polynésie.

DUPON.J.F. (1987) – Les atolls et le risque cyclonique. Le cas des Tuamotu. Cah. Sci. Hum. 23 (3-4) pp. 567-599.

GIEC (2001) – Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Bilan 2001 des changements climatiques : Rapport de Synthèse.

La documentation française (1997) – Guides – Plans de prévention des risques littoraux (PPR). 54 p.

LAMBERT.J. (2004) – Programme ARAI. Relevé de phénomènes naturels en Polynésie française (1831-2003). Etude documentaire. BRGM/RP-52267-FR, 37 p.

LAURENT.V. (2003) – Houle saisonnière à Tahiti. Météo France Direction interrégionale de la Polynésie française. DIRPF/PROD/CLIM-Etudes.

MARTIN.R., MOMPÉLAT.J.M. (2000) – Conséquences de la houle cyclonique générée par le cyclone Lenny sur la côte sous le vent de la Guadeloupe. Rapport BRGM/RP-50169-FR, p. 38, fig.11.

Météo France (1983) – Cyclones sur la Polynésie Française. MET_MAR n°120 (1983) pp.14-30.

Météo France – Les houles en Polynésie (Iles de la société et du nord-ouest Tuamotu).

ORSTOM (1993) – Atlas de la Polynésie française. ISBN 2-7099-1147-7. Edition Orstom.

PASCAL.R. – Situation météorologique particulière. Montée des eaux dans les lagons polynésiens. Météo France MET_MAR n° 166 pp. 12-15.

Plan de Secours Spécialisé Cyclone (2003) – document provisoire du mois de novembre 2003.

Polynésie française. Aviation civile. Météorologie (1983) - Le cyclone Reva (6 au 14 mars 1983) Compte rendu. Faa'a le 21 mars 1983.

Service de la météorologie de la Polynésie française (1982) – Notes succinctes sur insolation, rayonnement, vents houles, cyclones, précipitations et températures en Polynésie.

SHOM – Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/maree/marnage.htm

Techniques de l'Ingénieur www.techniques-ingenieur.fr

9. Glossaire

Arase : dernière assise d'un mur parfaitement horizontal.

Ensachage : élévation du niveau d'eau du lagon par la houle qui passe au dessus du récif, un phénomène de résonance de la houle dans les grands lagons peut également accentuer son rôle destructeur.

Musoir : extrême pointe d'une digue ou d'une jetée

10. Annexes

Annexe 1 : Liste des cyclones ayant affectés la Polynésie de 1831 à nos jours (source Lambert.J. et Météo France)

21-22 décembre 1831 : un cyclone ravageant les Cook du sud se manifeste par sa bordure orientale jusque sur les îles Sous-le-Vent..

21 décembre 1843 : forte dépression (peut être cyclone) affectant les îles Sous le Vent (4 morts à Raiatea). Gros dégâts à Maupiti, Tahaa, Huahine et Bora Bora où la mer aurait atteint le pied de la montagne.

22 janvier 1856 : coup de vent ou dépression sur Tahiti : gros arbres déracinés et mer envahissant le rivage.

2 février 1865 : tempête ou cyclone avec importants dégâts aux îles Sous le Vent, à Tahiti, (surtout de Punaauia à Mataeia) et aux Australes (un ou deux villages submergés et anéanti par la marée de tempête à Tubuai)

18-19 janvier 1877 : dépression sur la Société et les Tuamotu.

Février 1833, 8 février 1888, 16 mars 1989 : marées de tempête.

22 décembre 1901 : dépression sur Tahiti, mer démontée envahissant le rivage et détruisant une grande partie des quais de Papeete.

14-15 janvier 1903 : cyclone ravageant le nord et le centre des Tuamotu (517 morts, la plupart emporté par la marée de tempête ; 2 goélettes perdues et 83 côtres démolis).

23-26 mars 1905 : forte dépression ou cyclone du Nord des Tuamotu à l'Est de Tahiti. Gros dégâts sur les Tuamotu du Nord (4 morts à Arutua) ; 4 goélettes (4 membres d'équipage noyés) et 32 côtres perdus ; 175 maisons détruites. Dégâts matériels sur la côte est de Tahiti.

6 au 8 février 1906 : cyclone en provenance du Nord Ouest, passant entre Tahiti et les Tuamotu et se dirigeant ensuite vers les Gambier, dégâts considérables à Tahiti (2 morts et nombreuses destructions par la marée de tempête) et surtout aux Tuamotu (plus de 150 morts et nombreux villages rasés par le vent et la mer).

1 au 3 janvier 1926 : pluie très abondantes sur Tahiti, sans doute liées au passage d'une dépression.

6 au 12 février 1935 : cyclone et ravages considérables sur les Cook du Sud. Ne se manifeste que par sa bordure orientale sur la Société.

25-27 février 1937 : issue des Cook au Sud, une dépression traverse les Australes. Vent très fort et mer démontée à Tubuai.

6-8 février 1940 : dépression entre Tahiti et les Australes. Très forte houle le 9 dans le port de Papeete.

29-31 décembre 1940 : forte dépression au nord de Tahiti où le vent d'Est à Nord-Est a soufflé en tempête (> à 90 km/h).

16-18 janvier 1941 : forte dépression à l'Ouest de Tahiti, dégâts importants à Utuora et surtout à Bora Bora par le vent (95 km/h) et la mer démontée, mais moindres à Tahiti. Forte houle dans la passe de Papeete. Disparition de la goélette « Téréroa » qui se rendait à Raiatea.

15-17 février 1947 : dépression, sans doute assez faible, sur la Société et quelques dégâts à Tahiti.

4-7 janvier 1955 : faible dépression près des îles Sous le Vent et s'éloignant vers les Cook du Sud. Mer très forte à Mopelia.

10-12 mars 1955 : dépression dans le Sud de la Société, devient forte à l'Ouest de Rimatara (nuit du 11 au 12). Rafales > 100 km/h et mer très grosse à Rurutu.

18-21 novembre 1956 : faible dépression sur le Nord des Australes, le 20 et près de Rapa, le 21.

19-21 janvier 1958 : formée le 19 au Nord de Huahine, cette dépression passe entre Makatea et Tahiti. Houle de Nord Ouest à Makatea, atteignant une hauteur de 5 à 7 m.

26-28 janvier 1959 : dépression forte à l'Ouest de la Société puis sur Rurutu, rafales de 115 km/h à Bora Bora et de 146 km/h sur la « Jeanne d'Arc » à proximité. Mer grosse et très houleuse. Passe de Papeete impraticable du 27 au 29.

9 janvier 1960 : faible dépression sur Nord Ouest Tuamotu et la Société. Rafales de 100 km/h sur Makatea.

6-8 février 1960 : dépression modérée sur la Société et le nord des Tuamotu. Rafales de 100 km/h à Makatea avec forte houle de nord (hauteur > 4 m).

9-13 mars 1961 : dépression modérée sur la Société et le Nord des Tuamotu. Rafales > 100 km/h à Bora Bora et mer grosse.

29-31 janvier 1966 : une dépression modérée se déplace très vite des Cook du Sud à l'Est des Australes, puis de Rapa.

16-20 décembre 1967 : dépression le 16 près des îles Ellice, puis cyclone non dénommé traversant les Cook du Sud (vent > 100 km/h). Centre du météore à 300 km au Sud Ouest de Rimatara, le 18 en soirée, avec rafales estimées à 160 km/h. Houle cyclonique touchant de nombreux lagons, sauf les Marquises et les Tuamotu du Nord.

3-7 mars 1968 : faible dépression sur les îles Sous le Vent, puis sur Hereheretue et les Australes.

21-25 janvier 1970 : petite dépression faisant quelques dégâts sur des atolls de l'Ouest des Tuamotu.

20-24 février 1970 : cyclone « Dolly » en provenance de l'Ouest des Nouvelles Hébrides ; passe au Sud Ouest des Australes le 23, puis au voisinage Sud de Rapa. Quelques dégâts dus à la houle en Polynésie.

27 février au 5 mars 1970 : cyclone « Emma » en provenance du Nord des Cook du Sud. Passe le 2 mars près de Mopelia, le 3 en début de journée près de Rurutu, le 4 près de Tubuai et le 5 au Sud de Rapa. La montée des eaux atteint 3 m à Rurutu (où la mer pénètre parfois jusqu'à 400 m dans les terres), 2 à 3 m à Tubuaï, 2 m à bora Bora, 1 m à Tahiti. Rafales de 120 à 160 km/h par endroits, de la Société à l'Ouest des Australes où l'on déplore un blessé grave et de nombreux dégâts.

16-19 décembre 1971 : faible dépression, de la Société à l'Ouest des Australes.

16 mars 1974 : dépression « Stella », très éphémères entre les îles Sous le Vent et les Cook du Sud.

2-6 février 1976 : dépression « Frances » sur le Nord des Gambier, puis cyclone après son passage sur les Australes. Rafales de 105 km/h à Mururoa. Pas de marée de tempête.

15-20 avril 1977 : dépression puis cyclone « Robert », de petit diamètre, du Sud des îles de la Ligne à l'Ouest de Mopelia puis au Nord des Australes et au Sud des Gambier. Pas de dégâts. Une Goélette signale des creux de 10 à 11 m entre Tahiti et les Australes le 20.

6-10 décembre 1977 : dépression « Tessa », plutôt faible, issue des parages de Penrhyn. Passe entre Takaora et Puka Puka, puis au nord de Reao.

16-20 février 1978 : forte dépression « Diana » née au Nord Ouest des îles Sous le Vent. Passe au Sud immédiat de Mopelia (rafales 110 à 115 km/h), au Sud de Raiatea puis à l'Ouest de Rimatara. Nombreux dégâts aux îles Sous le Vent.

16-27 février 1978 : cyclone « Charles », très puissant formé dans l'Ouest des Cook du Sud où des vents moyens ont atteint 115 km/h. Sa trajectoire, très occidentale, épargne la Polynésie.

27-29 novembre 1980 : forte dépression « Diola », du centre des Tuamotu au Sud puis au Sud Ouest de cet archipel. Vents violents voisins de 120 km/h, provoquant des vagues de 6 à 8 m qui ont submergé partiellement des atolls. Dégâts matériels importants.

12-17 janvier 1981 : faible dépression, du Sud Ouest de Mopelia aux Australes. Pas de dégâts notables.

5-8 mars 1981 : dépression modérée, de diamètre restreint, du Sud de Mopelia à l'Ouest des Australes. Dégâts matériels surtout sur le centre des Australes.

9-13 mars 1981 : dépression puis cyclone « Tahmar » s'approchant à 180 km du sud de Tahiti puis à 300 km du Sud Ouest de Hereheretue avant de disparaître dans l'Ouest des Australes. Dégâts matériels très importants dans les archipels de la Société en raison du vent et des fortes pluies, moins sérieux aux Australes, mais sévères sur les atolls des Tuamotu (tels que Anaa) à cause de la marée de tempête.

17-24 mars 1981 : dépression « Fran », modérée puis forte, de l'Ouest de la Société à l'archipel Tubuaï. Rafales entre 90 et 130 km/h. Pas de victimes mais de nombreux dégâts, très importants ; inondations à Tahiti, récoltes détruites à plus de 50% à Rurutu, 21 toitures emportées dans l'Ouest des Australes où la mer a pénétré localement à une centaine de mètres à l'intérieur des terres. Dégâts mineurs à Tubuaï et Rapa.

10-15 décembre 1982 : cyclone « Lisa » sur la Société, dommage à Tahiti.

23-27 janvier 1983 : Tuamotu ; passage du cyclone « Nano » sur Hao ; les vents de 65 à 85 nœuds causent des dégâts considérables : le village d'Otepa est complètement détruit ; l'aérodrome est recouvert d'énormes blocs de corail arrachés et transportés par la mer.

23-25 février 1983 : Tuamotu ; cyclone meurtrier. Passage du cyclone « Orama » à proximité de Rangiroa le 23 février, puis sur Anaa le 25 ; les vents atteignent 100 nœuds. A Anaa, il y a 1 mètre d'eau dans l'église. L'atoll est complètement détruit. 6 morts.

12-13 mars 1983 : Tuamotu Gambier ; Passage du cyclone « Reva ». A Faa'a, les vents atteignent 70 nœuds. Dans l'île de Napuka (Tuamotu), le cyclone fait beaucoup de dégâts ; il se dirige ensuite vers Anaa et Moruroa (Gambier)

11-12 avril 1983 : Société ; cyclone « Veena » sur Tahiti, Moorea et Tetisura ; rafales de vent dépassant les 140 km/h, accompagnées d'abondantes précipitations : 1 mort et 50 blessés.

11-12 décembre 1991 : Société, Australes ; passage du cyclone « Wasa » : Moorea, Tahiti, Bora Bora (société) et Tubuaï (Australes) sont endommagées. Dans cette dernière, l'eau est montée de 1.20 m au dessus du sol dans la station météorologique.

20 mai 1996 : Australes ; dépression tropicale responsable de peu de dommages.

19 juillet 1996 : Tahiti, Société, Tuamotu ; cyclone meurtrier accompagné d'une immense houle de plus de 6 mètres, qui dévaste les côtes Sud-Est des îles, à Tahiti et dans les archipels. Plusieurs maisons à Tahiti sont détruites. On recense 2 morts et le bilan est estimé à 898 millions Fcfp de dommages dont 385 millions Fcfp pour 265 habitations principales endommagés, 405 millions pour les ouvrages publics et 108 millions pour les aéroports. L'atoll Nengo Nengo, noyé sous l'eau, a été frappé d'importants dommages matériels dans les fermes aquatiques.

3 novembre 1997 : Société ; cyclone meurtrier « Martin ». 3 morts et 8 personnes disparues (dont 6 enfants) à Bellinghausen. Dans cette île, d'importants dommages matériels ont été enregistrés : plusieurs maisons envolées, arbres arrachés. Jeudi 6 novembre, madame A. H. est rapatriée de Bellinghausen à Tahiti : « elle est la seule survivante de l'atoll ». Les îles de Mopelia et de Scilly sont aussi touchées.

25 novembre 1997 : Iles Sous le Vent ; passage du cyclone « Oséa » aux îles Sous le Vent et au large de Tahiti ; l'île de Maupiti est ravagée à 90% ainsi que Bora Bora à 30% et Raiatea. Environ 700 maisons ont été détruites et 1000 personnes sont sans abri ; les routes sont impraticables, l'électricité et le téléphone sont coupés. Le plan Orsec cyclone est déclenché : des militaires quittent Tahiti pour secourir et ravitailler les sinistrés.

1 février 1998 : Tuamotu ; passage de la dépression « Veli » ; Mataiva est l'atoll le plus touché ; plusieurs aéroports ont été endommagés et doivent fermer.

6 février 1998 : cyclone « Wes » sur les îles de la Société.

25 avril 1998 : Tahiti et Société ; cyclone meurtrier « Alan » : destruction de maisons d'habitation à Huahine ; les districts de Maroe et Fitiï sont dévastés à 80%. Dix morts, une fillette disparue et 20 blessés sur les îles Sous le Vent. Les îles de Tahaa (6 morts) et Raiatea sont les plus touchées. Les pluies torrentielles déclenchent une série d'éboulements. 750 maisons sont détruites.

29 avril 1998 : Tuamotu ; dépression tropicale « Bart ». Ni victimes ni dégâts.

26 février 2000 : Gambier, Australes ; cyclone Kim ; vent de 90 à 130 km/h soulevant une mer importante ; dégâts mineurs dans ces deux archipels.

Mars 2001 : Gambier ; la dépression tropicale Rita a traversé Rikitea sans dégâts majeurs.

Annexe 2 : Tableau de synthèse des phénomènes cycloniques ayant intéressé la Polynésie depuis 1970 (données Météo France modifiées)

Date	Nom	Intensité	Région touchée	Vent moy	Pression	Houle
		Dép. trop. modérée (DTm) Dép. trop. forte (DTf) Cyc. Trop. (CT) Cyc. Trop. intense (CTi)	Marquises (M) Gambier (G) Tuamotu (T) Société (S) Australes (A)	kt	hPa	m
28-03 mar 2001	RITA	DTm	G-T			
23-01 mar 2000	KIM	CTi	G-T-A	100	955	8.5
30-04 nov 1997	MARTIN	CTi	S-A	100	955	5
21-27 nov 1997	OSEA	CT	S-A	90	954	5
02-10 dec 1997	PAM	CT	A	65	976	4
31-02 fev 1998	URSULA	CT	S-T	65	976	4
31-04 fev 1998	VELI	DTf	T	55	980	4
31-04 fev 1998	WES	DTm	S	45	991	
20-26 avr 1998	ALAN	DTm	S	45	991	
29-01 mai 1998	BART	DTm	T	35	997	6
30-03 jan 1995	WILLIAM	CT	A	35	970	
05-13 dec 1991	WASA	CT	G-T-S-A	90	955	
05-09 fev 1992	CLIFF	CT	G-T	70	975	8
23-29 mar 1992	HETTIE	DTf	T-S-A	55	980	4
12-17 fev 1990	PENNY	DTf	A	60	975	
23-01 mar 1989	HINANO	CT	G	65	970	
23-27 fev 1989	JUDY	CT	T-S-A	65	970	
28-03 mar 1988	CILLA	DTm	A	45	985	
27-05 jan 1987	SALLY	CT	A	65	965	6
05-09 fev 1986	JUNE	DTf	G-T	55	997	
06-14 fev 1986	IMA	CT	S-A	75	970	
10-16 dec 1982	LISA	DTf	S-A	55	985	
23-26 jan 1983	NANO	CT	M-G-T	80	980	7
20-28 fev 1983	ORAMA	CTi	T	100	950	12
19-22 mar 1983	SABA	DTm	M-G-T			
25-02 mar 1983	PREMA	DTm	S	41	990	
07-16 mar 1983	REVA	CT	T-S	90	957	12
07-14 avr 1983	VEENA	CTi	T-S	100	950	7
15-23 avr 1983	WILLIAM	CT	G-T	76	965	9
09-13 mar 1981	TAHMAR	CT	S-A	67	990	7,6
20-23 mar 1981	FRAN	DTf	S-A	54	985	6,5
27-28 nov 1980	DIOLA	DTf	T			
05-11 dec 1977	TESSA	DTm	T	40	990	
16-22 fev 1978	DIANA	DTf	S-A	50	980	

16-23 avr 1977	ROBERT	CT	G-S-A	80	955	11
02-09 fev 1976	FRANCES	CT	G-S-A	65	970	
16-19 dec 1971	VIVIENNE	DTm	S-A	40	990	
11-24 fev 1970	DOLLY	CT	A	65	970	
01-05 mar 1970	EMMA	DTf	S-A		980	

Annexe 3 : Modélisation de la houle à partir d'enregistrements sismiques

Lors de la réalisation du programme PLUME (Polynesian Lithosphere and Upper Mantle Experiment), financé par le ministère de la recherche, les chercheurs ont mis au point une méthode permettant de caractériser la houle dans le Pacifique Sud à partir de l'analyse des bruits sismiques enregistrés sur leurs stations (Barruol et al.)

En analysant le contenu spectral des stations sismiques installées dans la Pacifique Sud, ils montrent que la houle génère un pic caractéristique dans les enregistrements microsismiques, pour une période comprise entre 13 et 20 secondes. L'analyse spectrale met aussi en évidence que le bruit microsismique généré par la houle est défini dans une ellipse suivant 3 dimensions.

La quantification du bruit microsismique permet l'extraction de l'amplitude et de l'azimut du bruit (respectivement l'allongement et l'azimut de l'ellipse). Ils montrent que l'amplitude de ce bruit microsismique est très bien corrélée avec la hauteur de la houle observée à proximité de la plupart des stations sismiques (Figure 9).

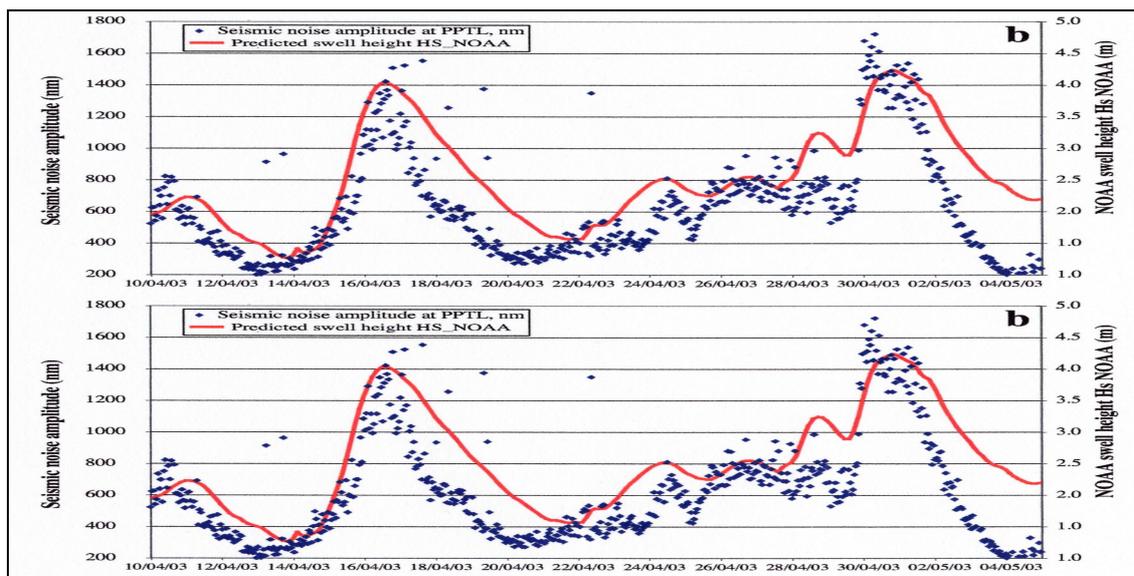


Figure 9 : exemple de corrélation entre la hauteur de houle prédite par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) et l'amplitude déduite des enregistrements microsismiques (Barruol et al.).

Pour l'azimut du bruit, la meilleure corrélation avec la direction de la houle, est observée dans le cas des îles ayant un faible allongement. Les stations installées sur des atolls allongés dans l'archipel des Tuamotu montrent une corrélation entre l'azimut de vibration de l'atoll (allongement de l'ellipse issue du bruit microsismique) et la normale au plus grand côté de l'atoll. Cette observation montre une forte influence du phénomène de la réfraction de la houle ou d'une réponse anisotropique due à la structure géométrique de l'atoll (Figure 10).

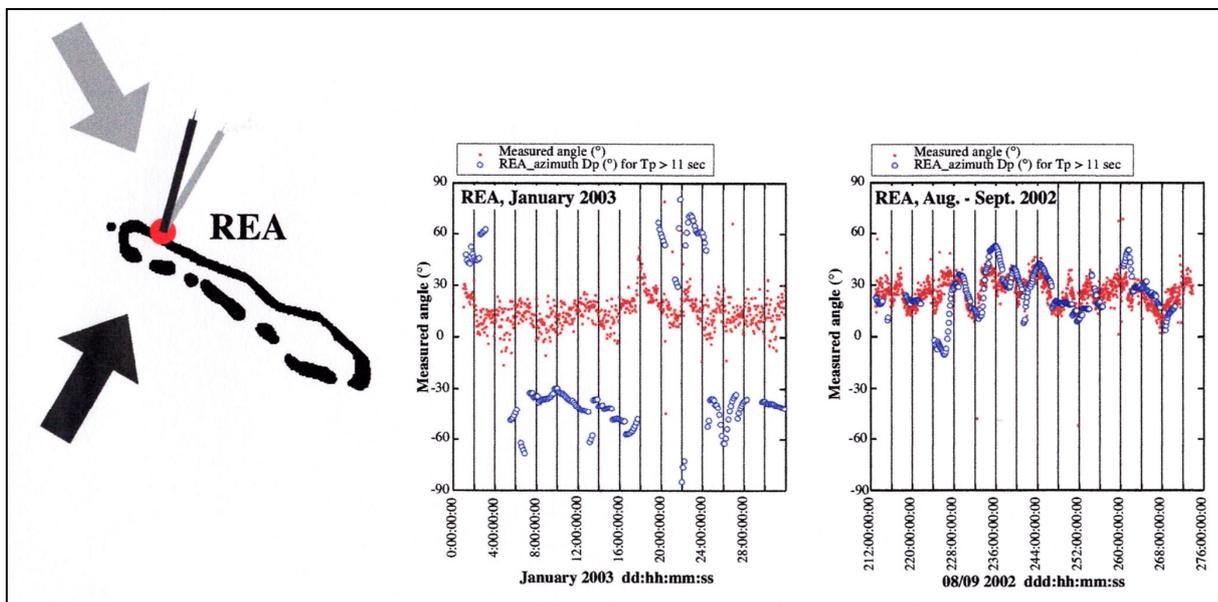


Figure 10 : azimuth mesuré et déduit de la houle, la tableau de gauche correspond à la houle oblique, celui de droite à la houle normale à l'atoll de Reao (Barruol et al.).

Pour une île de forme sub circulaire, la corrélation entre l'azimut déduit et l'azimut mesuré est bonne quelle que soit le direction de la houle.

En définitive il est possible d'obtenir la hauteur de la houle ayant affecté une île à partir des enregistrements microsismiques quelle que soit le type d'île. La direction de la houle ne s'obtient de façon fiable que dans le cas des îles ayant un rivage sub circulaire.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

BRGM Polynésie

Antenne POL
Hauts de Pamatai – BP 60066
98703 – Faa'a – Polynésie française
Tél. : 006 89 80 07 45