

Détermination des surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie française

1-Méthodologie

BRGM/RP-55030-FR
novembre 2006

Détermination des surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie française

1-Méthodologie

Rapport final

BRGM/RP-55030-FR
novembre 2006

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2006 03RISH03

N. auteur: R. Pedreros

Vérificateur :

Nom : O. Sedan Miegemolle

Date :

Signature :

(Ou Original signé par)

Approbateur :

Nom : J.M. Mompelat

Date :

Signature :

(Ou Original signé par)

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

Mots clés : Polynésie française, surcote, cyclone, houle, tension de radiation, modélisation, risque, aléa

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

Pederos R. (2006) : Détermination des surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie française : 1- Méthodologie. BRGM/RP-55030-FR, 32 p., 3 fig., 1 tabl.

© BRGM, 2006, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport est le premier des trois rapports consacrés à la détermination des surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie française. Cette action s'inscrit dans le projet de "cartographie de l'aléa cyclonique" du programme d'études et de prévention des risques naturels "ARAI".

Il décrit les différentes méthodes employées pour calculer les surcotes induites par les houles (lois empiriques, modèles numériques) en insistant sur leurs limites et avantages. Les modèles SWAN et le couplage REFDFDIF-SHORECIRC apparaissent comme les plus pertinents pour cette étude. Le choix définitif entre ces deux modèles est présenté dans le deuxième rapport dédié à la mise en place de la modélisation.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Les facteurs à l'origine des surcotes	9
2.1. INFLUENCE DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE ET DU VENT.....	9
2.2. INFLUENCE DE LA HOULE.....	9
2.3. ROLE DE LA BATHYMETRIE	11
3. Lois empiriques utilisées en génie côtier	15
4. Outils numériques les plus adaptés à l'étude	17
4.1. DESCRIPTION DES MODELES.....	18
4.1.1. SWAN	18
a) Processus pris en compte	19
b) Calcul des tensions de radiation et de la surcote.....	21
c) Limitations	22
4.1.2. REFDIF	22
a) Processus physiques pris en compte	23
b) Calcul des tensions de radiation.....	23
c) Limitations	24
4.1.3. SHORECIRC.....	25
5. Conclusion	27
6. Bibliographie	29

Liste des illustrations

Figure 1 : Atténuation de la houle et surcote induite au niveau du récif frangeant de Guam - Honolulu (d'après Massel et Gourlay, 2000, modifié).	11
Figure 2 : Bathymétries utilisées pour quantifier l'action du vent et la houle sur la génération des surcotes (d'après Weaver, 2004).....	12
Figure 3 : Surcotes générées au niveau des 3 bathymétries sous l'action du vent et de la houle. A : pente forte. B : pente moyenne. C : pente douce (d'après Weaver, 2004).....	13

Liste des tableaux

Tableau 1: Récapitulatif des principales propriétés des modèles REFDIF et SWAN	28
--	----

1. Introduction

Ce rapport a pour but de présenter la méthodologie et les outils numériques susceptibles d'être utilisés pour modéliser les surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie française. C'est le premier des trois rapports consacrés à cette problématique et correspond au Programme 3.4 mené par le BRGM pour le compte de la Polynésie française dans le cadre du programme d'études et de prévention des risques naturels "ARAI".

La première partie du rapport traite des facteurs engendrant les surcotes en détaillant l'action de la houle et le rôle de la bathymétrie. Par la suite, les lois empiriques généralement utilisées en génie côtier sont explorées. Enfin, sont présentés les outils numériques les plus adaptés à cette étude en tenant compte de la diversité des côtes de la Polynésie française et des données disponibles en entrée.

2. Les facteurs à l'origine des surcotes

Les surcotes marines correspondent à une surélévation momentanée du plan d'eau par rapport au niveau moyen. Elles ont lieu lors des tempêtes ou des cyclones sous l'action du vent, de la pression atmosphérique et de la houle. Les surcotes correspondant aux zones soumises à un fort marnage peuvent être accentuées si elles coïncident avec les pleines mers des vives-eaux.

2.1. INFLUENCE DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE ET DU VENT

La chute de la pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau, c'est le phénomène du baromètre inverse. Il s'agit d'une relation linéaire : la perte d'1 hPa équivaut à une élévation d'1 cm du plan d'eau. Il n'est pas rare qu'au niveaux des cyclones la pression chute à des valeurs de 950-960 hPa. Ainsi lors du cyclone ORAMA, qui a sévi en Polynésie Française du 20 au 28 février 1983, la pression est descendue à 950 hPa alors que la valeur moyenne pour ce mois est de 1006,4 hPa (climatologie moyenne établie pour Papeete à partir des enregistrements de 1875 à 1991, Climate Research Unit Southern Oscillation Index). Cela représente une surcote de 56,4 cm.

Le vent exerce une tension ou contrainte à la surface de l'océan qui est à l'origine de trois phénomènes :

- la génération de la houle
- la génération de courants
- la modification de l'élévation du plan d'eau (surcote, décote)

Cette contrainte τ est modélisée suivant une loi quadratique :

$$\tau = \rho_a C_d u_{10}^2$$

avec ρ_a : masse volumique de l'air; u_{10} : vitesse du vent à 10 m de la surface; C_d : coefficient de traînée ou de frottement air-eau. La valeur de ce paramètre dépend de la rugosité de la surface de l'océan ainsi que de la stratification de l'atmosphère. Sa valeur moyenne est de l'ordre de 10^{-3} (paramètre adimensionnel).

Les marées de tempête correspondent aux surcotes liées à l'action combinée du forçage atmosphérique (actions du vent et de la pression atmosphérique) et des marées astronomiques.

2.2. INFLUENCE DE LA HOULE

Les houles, en se propageant, transfèrent leurs flux de quantité de mouvement sur la colonne d'eau, modifiant ainsi l'élévation moyenne du plan d'eau. Cette force induite

par la houle est appelée **tension de radiation**. L'intensité des tensions de radiation varie en fonction des hauteurs et des directions des vagues, elles mêmes dépendantes des phénomènes de gonflement (shoaling), de réfraction, de diffraction (bathymétries particulières) et de dissipation qui ont lieu au niveau des côtes récifales. Malgré les pentes importantes dans ces zones, la réflexion est faible (grande absorption de l'énergie par les récifs) si bien qu'elle peut être négligée la plupart du temps (Massel et Gourlay, 2000). Longuet-Higgins et Stewart (1964) sont les premiers à utiliser le concept des tensions de radiations pour calculer les surcotes et les courants induits par la houle. Pour les surcotes (*set-up*), ils proposent la relation suivante (valable uniquement pour un calcul sur le profil) :

$$\frac{\delta\bar{\eta}}{\delta x} = - \frac{\delta S_{xx} / \delta x}{\rho g (h + \bar{\eta})} \quad (1)$$

$\bar{\eta}$: élévation moyenne du plan d'eau induite par la houle (surcote, décote)

ρ : masse volumique de l'eau de mer

h : hauteur de l'eau au repos

g : gravité

S_{xx} : tensions de radiations, $S_{xx} = E(n \cos^2 \theta + n - 1/2)$ (2)

où $E = \frac{1}{8} \rho g H^2$: énergie totale de la houle par unité de surface,

$n = \frac{C_g}{C}$: rapport entre la vitesse de phase et de groupe des vagues

et θ : angle d'incidence des vagues par rapport à la normale à la plage

Cette relation montre qu'il existe un équilibre entre le gradient des tensions de radiation et celui de l'élévation du plan d'eau. Lorsque le gradient des tensions de radiation augmente, celui du plan d'eau diminue et vice-versa.

Si l'on considère le cas d'une houle se propageant perpendiculairement sur un récif frangeant, nous pouvons constater (Figure 1) :

- sur la face externe du récif, la hauteur de la houle augmente (zone de gonflement) progressivement jusqu'au déferlement, les tensions de radiation sont alors maximales engendrant la decote du plan d'eau
- suite au déferlement, les hauteurs des vagues et par conséquent les tensions de radiation chutent brusquement transférant leur énergie à la colonne d'eau. Il en résulte une surélévation exponentielle du plan d'eau sur une centaine de mètres
- cette élévation se stabilise, dans le cas présent, aux environs de 0,65 m au niveau du lagon. Les vagues sont atténuées et n'atteignent plus que 1/5 des hauteurs à l'extérieur du récif
- la pente de la plage sous-marine induit de nouveau le gonflement et le déferlement des vagues qui se sont reformées dans le lagon. Cela s'accompagne d'une nouvelle décote et surcote du plan d'eau.

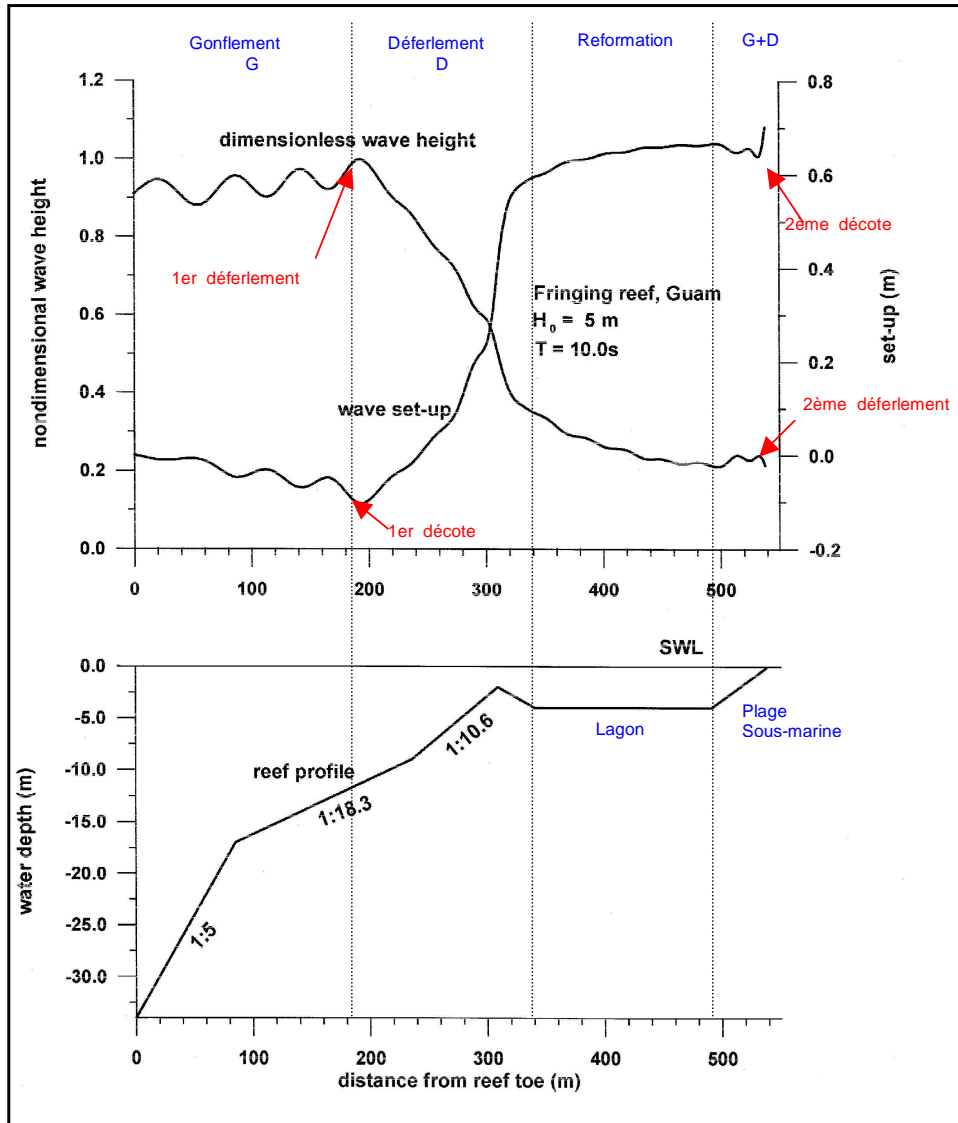


Figure 1 : Atténuation de la houle et surcote induite au niveau du récif frangeant de Guam - Honolulu (d'après Massel et Gourlay, 2000, modifié).

2.3. ROLE DE LA BATHYMETRIE

L'influence relative de la tempête de marée ou bien de la houle sur l'ampleur de la surcote est fortement dépendante de la bathymétrie du domaine considéré. En présence d'un plateau continental large, c'est-à-dire une zone de pente douce et de profondeur limitée, l'action du forçage atmosphérique est prépondérante. Par contre, lorsque les pentes sont fortes et que les côtes sont protégées par un récif frangeant comme à Tahiti, c'est l'action de la houle qui prédomine.

Les récents travaux de Weaver (2004) permettent de quantifier l'influence du vent et la houle sur la génération des surcotes au niveau de 3 bathymétries idéalisées différentes (Figure 2), traits : rouge, pente forte; vert, pente moyenne, bleu, pente douce.

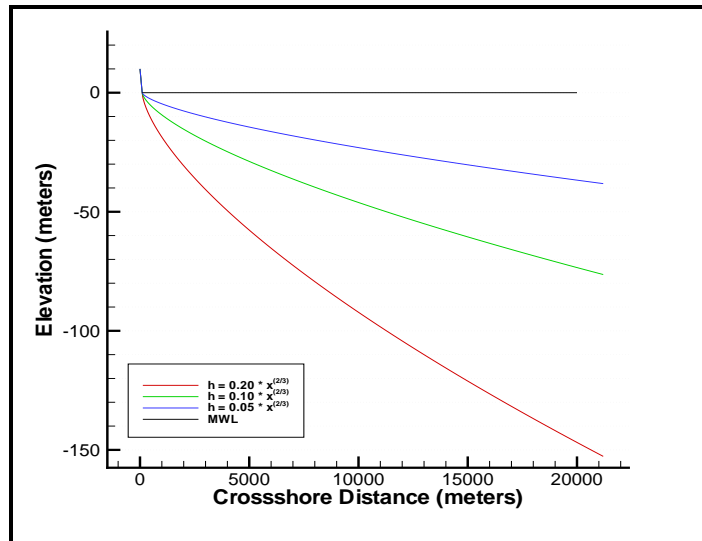


Figure 2 : Bathymétries utilisées pour quantifier l'action du vent et la houle sur la génération des surcotes (d'après Weaver, 2004).

Pour cela l'auteur fait appel à un modèle de circulation 2D Horizontal (ADCIRC 2DDI , Luettich et al., 1992) et à un modèle de génération et de propagation de la houle, SWAN (qui sera détaillé par la suite). Il effectue 3 tests pour chacune des bathymétries en imposant en entrée les vitesses de vent V (ms^{-1}) et les hauteurs de houle H (m) suivantes à SWAN pour calculer la surcote liée à la houle :

- conditions calmes : $V = 10$; $H = 1$
- conditions de tempête : $V = 30$; $H = 5$
- conditions cycloniques : $V = 56$; $H = 7$

Ensuite, il utilise ADCIRC avec les mêmes valeurs de vent pour avoir les surcotes dues au vent. Enfin, il utilise ADCIRC avec les données de vent et les tensions de radiation calculées à partir de SWAN pour avoir l'action combinée de ces facteurs. Les différents résultats sont présentés Figure 3.

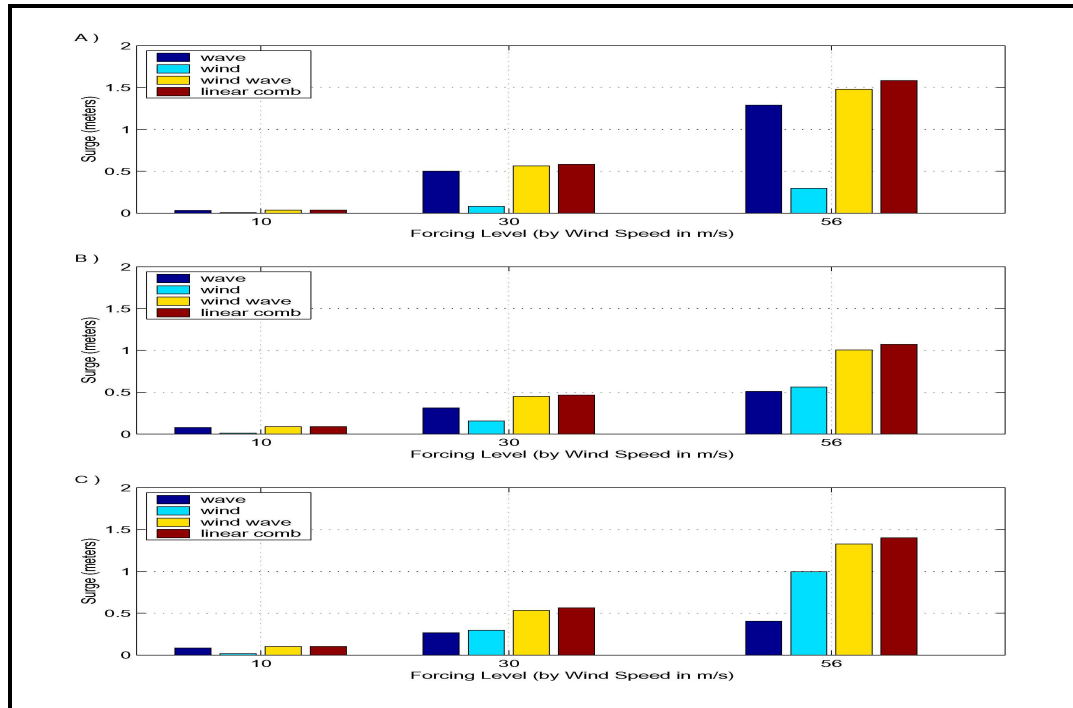


Figure 3 : Surcotes générées au niveau des 3 bathymétries sous l'action du vent et de la houle. A : pente forte. B : pente moyenne. C : pente douce (d'après Weaver, 2004).

Si l'on s'intéresse uniquement aux conditions cycloniques, il est possible de constater que les surcotes les plus importantes correspondent à la bathymétrie à pente forte. L'action de la houle (1.29m, en noir) est environ 4 fois plus importante que celle du vent (0.3m, en bleu). La surcote pour le profil à pente douce est légèrement inférieure mais cette fois-ci c'est le vent le facteur le plus important (1m de surcote contre 0.4m pour la houle). La surcote est minimale pour le profil à pente moyenne. Les actions du vent et de la houle sont alors comparables (proche de 0.5m).

Il est aussi intéressant de noter que la surcote déduite de la somme algébrique des contributions de la houle et du vent (en marron) est toujours supérieure à l'action combinée de ces facteurs (en jaune).

3. Lois empiriques utilisées en génie côtier

Pour déterminer la surcote engendrée par a houle, certains auteurs proposent des simplifications des équations 1 et 2 en cas d'incidence normale des vagues, bathymétrie simple, pentes faibles, etc... Ainsi pour le cas le plus simple, c'est-à-dire une plage quasi plane et une incidence normale des vagues de faible amplitude, Dean et Dalrymple (1991) estiment que la surcote moyenne du plan d'eau équivaut à 19% de la hauteur de la houle au point de déferlement (H_d):

$$\bar{\eta} = 0.19H_d$$

Komar (1998) propose une relation plus complexe pour tenir compte de la pente β de la plage. La surcote maximale au niveau du rivage $\bar{\eta}_{\max}$, est alors de :

$$\bar{\eta}_{\max} = 0.18g^{1/2} \beta H_0^{1/2} T$$

H_0 et T étant respectivement la hauteur et la période de la houle au large.

Une autre relation considérant la pente des plages fait appel au nombre d'Iribaren \mathcal{E}_0 pour calculer $\bar{\eta}_{\max}$:

$$\bar{\eta}_{\max} = 0.45H_0 \mathcal{E}_0 \quad \text{avec} \quad \mathcal{E}_0 = \frac{\beta}{(H_0 / L_0)^{1/2}}$$

L_0 étant la longueur d'onde de la houle au large.

Si l'on tient compte des phénomènes de gonflement et de déferlement mais toujours pour une incidence normale de la houle, alors $\bar{\eta}$ peut se calculer d'après Tait (1972) par :

$$\bar{\eta} = -\frac{H_0^2}{16h} (2n - 1) \quad \text{pour la zone allant jusqu'au point de déferlement}$$

$\bar{\eta}_d$, la surcote au point du déferlement, peut être calculée par cette relation en remplaçant H_0 par H_d .

et

$$\bar{\eta} = \bar{\eta}_d + \frac{3\gamma_d^2 / 8}{1 + 3\gamma_d^2 / 8} (h_d - h) \quad \text{à partir du point de déferlement et jusqu'au rivage}$$

avec : $\gamma_d = H_d / h_d$ h_d : hauteur du plan d'eau au point du déferlement

D'autres auteurs ont établi des formules empiriques à partir des mesures de terrain. Guza et Thornton (1981), par exemple, suite à des mesures sur une plage d'une pente moyenne de 2% et pour des hauteurs de houle comprises entre 0.6 et 1.6 m, proposent la relation suivante :

$$\bar{\eta}_{\max} = 0.17H_0$$

Ces formules présentent l'avantage d'une application aisée. Néanmoins, elles ne sont pas adaptées aux configurations rencontrées en Polynésie (présence de récifs, passes, linéaires côtiers accidentés, ...). De plus, elles n'ont pas été validées pour des conditions cycloniques. C'est pourquoi, il est nécessaire de faire appel à la modélisation numérique. Les outils les mieux adaptés à cette étude sont détaillés ci-après.

4. Outils numériques les plus adaptés à l'étude

L'objectif de l'étude est de calculer les surcotes induites par les houles cycloniques au niveau des rivages d'un nombre limité de sites à enjeux ou bien représentatifs des morphologies côtières de la Polynésie française. Les calculs de surcote se feront en :

- mode zonal pour les secteurs à enjeux et/ou au droit des passes (îles hautes avec lagon)
- mode profil pour les autres configurations (côtes sans lagon ni récif frangeant, côtes à récif immergé, Atolls).

Il est à noter que les surcotes liées aux marées de tempête ont déjà été étudiées par Météo France suivant la méthodologie établie par Poitevin et Daniel (1995).

Les valeurs caractéristiques de la houle (hauteurs, période et directions) utilisées en entrée des modèles seront établies à partir des données cycloniques paroxysmales enregistrées depuis 1970. Les bathymétries utiles aux différents calculs sont issues des données du SHOM.

Pour simuler de façon réaliste la transformation et l'action de la houle au niveau des zones d'intérêt, les simulations devront obligatoirement tenir compte des phénomènes suivants :

- propagation dans l'espace
- réfraction
- gonflement (shoaling)
- dissipation par déferlement
- dissipation par frottement au fond

Ces deux derniers phénomènes de dissipation sont particulièrement importants en présence de récifs (Gourlay, 1996a et b; Massel et Gourlay, 2000; Massel et Brinkman, 2001). De plus, il faudra considérer la diffraction pour les secteurs au droit des passes.

Il existe actuellement trois grandes familles de modèles de houle qui tiennent compte de ces phénomènes. Ils sont basés sur :

- les équations de Boussinesq modifiées
- l'équation de conservation d'action de la houle - modèles spectraux
- les équations de Berkhoff

Les modèles de la première famille sont très complets, capables de simuler l'action de chacune des vagues arrivant sur le rivage (déferlement et jet de rive). Ils nécessitent, néanmoins, des données très précises en entrée et d'énormes ressources en calcul et en post-traitement. Ils ne sont pas adaptés à cette étude. Ce type de modèle est le plus souvent implanté très localement et couplé à des modèles spectraux de plus

grande emprise géographique qui l'alimentent en temps réel à des fins d'alerte en cas d'inondation (Cheung et al., 2003).

Les modèles spectraux (conservation de l'action de la houle) sont plus adaptés. C'est le cas de SWAN, référence internationale des modèles de ce type en génie côtier, qui permet en outre de calculer directement la surcote. Jusqu'à fin 2004, ce code présentait le défaut de ne pas intégrer la diffraction, processus important à proximité des passes. Ce défaut a été corrigé depuis, la diffraction étant intégrée dans les dernières versions de SWAN.

Enfin, les modèles résolvant les équations de Berkhoff peuvent aussi répondre aux attentes de ce projet. Parmi ces modèles, REFDIF est le plus connu (une autre référence en génie côtier). Néanmoins, il ne calcule pas directement les surcotes. Celles-ci peuvent être déterminées en couplant REFDIF à SHORECIRC (modèle de circulation quasi 3D consacré aux environnements littoraux).

SWAN, REFDIF et SHORECIRC sont détaillés ci-après.

4.1. DESCRIPTION DES MODELES

Cette présentation reprend les bases théoriques, les processus pris en compte en détaillant, pour la houle, les phénomènes de dissipation liés au déferlement et au frottement au fond qui sont déterminants en milieu récifal, le calcul des tensions de radiation et les limites d'application des modèles.

4.1.1. SWAN

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

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) = S/\sigma$$

avec $S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib}$

$N(\sigma\theta)$: Spectre de densité de l'action de la houle
σ	: Fréquence relative
θ	: Direction de la houle
S_{in}	: Action du vent
S_{nl}	: Interaction houle-houle non linéaire
S_{wc}	: Dissipation liée au moutonnement
S_{bf}	: Dissipation liée au frottement au fond
S_{dib}	: Dissipation liée au déferlement bathymétrique

c_x et c_y correspondent aux vitesses de propagation de la houle

SWAN peut fonctionner en mode stationnaire ou transitoire. Il est formulé en coordonnées cartésiennes (domaines de faible emprise) ou sphériques (pour les petites et grandes échelles), le maillage pouvant être rectangulaire ou curviligne.

a) Processus pris en compte

SWAN peut modéliser 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 suivants de **génération et de dissipation** dus à la houle :

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

Dissipation par déferlement

SWAN fait appel à la théorie de la propagation des bores développée par Battjes et Janssen (1978) et adaptée en formulation spectrale par Eldeberky et Battjes (1995) pour calculer la dissipation D_{tot} des houles irrégulières suite au déferlement :

$$D_{tot} = -\frac{1}{4}k_1Q_b\left(\frac{\bar{\sigma}}{2\pi}\right)H_{mo(max)}^2$$

où :

k_1 : est une constante proche de 1

$\bar{\sigma}$: fréquence moyenne (Hz)

$H_{mo(max)}$: Hauteur maximale atteinte par les houles lors du déferlement, estimé par :

$$H_{mo(max)} = \gamma d$$

d : profondeur locale

γ : estimée par défaut à 0.73 par SWAN mais qui peut être modifiée en fonction de la pente.

Q_b est la fraction des vagues ayant déferlées établie à partir d'une approche probabiliste et en faisant l'hypothèse d'une distribution de Rayleigh des hauteurs des vagues :

$$\frac{1-Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_{mo(max)}^2} \quad E_{tot} : \text{énergie totale des vagues contenue dans le spectre}$$

Finalement, le taux de dissipation correspondant à chaque composante spectrale $S_{dib}(\sigma, \theta)$ est déterminé par :

$$S_{dib}(\sigma, \theta) = -D_{tot} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}}$$

E_{tot} étant l'énergie contenue par chaque composante spectrale de fréquence σ et de direction θ .

Les valeurs de k_1 et de γ , 1 et 0.73 respectivement, sont de valeurs "standards" qui pourront être ajustées en milieu récifal.

Dissipation par frottement au fond

SWAN peut calculer la dissipation liée au frottement au fond selon 3 méthodes : celle de JONSWAP (Hasselmann et al., 1973), la loi de friction de Collins (1972) et celle de viscosité turbulente de Madsen et al. (1988). Toutes ces formulations peuvent s'exprimer de la forme suivante :

$$S_{bf}(\sigma, \theta) = -C_{fond} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta)$$

$k = \frac{2\pi}{L}$, est le nombre d'onde. L correspond à la longueur d'onde

C_{fond} : est le coefficient de frottement au fond qui dépend généralement de la vitesse orbitale de la houle.

Hasselmann et al. (1973) estiment C_{fond} à 0.038 ou à 0.067 m^2s^{-3} en fonction des conditions de houle.

Collins (1972) utilise une formulation classique de dissipation pour déterminer ce paramètre :

$$C_{fond} = C_f g U_{rms} \quad \text{avec } C_f = 0.015 \text{ et } U_{rms} \text{ étant la racine des moindres carrés des vitesses des vagues.}$$

Enfin Madsen et al. (1988) proposent la relation suivante tenant compte de la rugosité du fond et de la vitesse des vagues :

$$C_{fond} = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms}$$

f_w étant un paramètre de friction adimensionnel qui peut être estimé par :

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log_{10} \left(\frac{1}{4\sqrt{f_w}} \right) = m_f + \log_{10} \left(\frac{a_b}{K_n} \right)$$

$$m_f = -0.08$$

K_n : facteur d'échelle de la rugosité du fond.

a_b représente l'incursion des vagues près du fond. Elle est calculée par :

$$a_b^2 = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

b) Calcul des tensions de radiation et de la surcote

SWAN est capable de calculer la surcote induite par la houle en mode profil ou zonal. Pour cela il se sert des tensions de radiations qui sont calculées de la façon suivante :

$$S_{xx} = E(n \cos^2 \theta + n - 1/2)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = En \cos \theta \sin \theta$$

$$S_{yy} = E(n \sin^2 \theta + n - 1/2)$$

$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$: énergie totale de la houle par unité de surface,

n est le rapport de la vitesse de groupe sur la vitesse de phase. S_{xy} et de S_{yy} sont nécessaires pour le calcul zonal. La surcote est alors estimée par l'intégration de l'équation suivante :

$$\frac{\delta F_x}{\delta x} + \frac{\delta F_y}{\delta y} + \frac{\delta}{\delta x} \left(gd \frac{\delta \eta}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(gd \frac{\delta \eta}{\delta y} \right) = 0$$

$$\text{où, } F_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad \text{et} \quad F_y = -\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}$$

c) Limitations

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 ou au niveau des ports.

4.1.2. REFDIF

REFDIF (REFraction DIFfraction), développé par Kirby et Dalrymple (1995), est un modèle capable de simuler la propagation d'une houle monochromatique en zone côtière. Il se base sur une formulation parabolique de l'équation de Berkhoff (ou dite de "faible pente", 1972) et de l'équation de l'interaction houle-courant de Kirby (1984) résolues suivant un schéma numérique implicite à différences finies de Crank-Nicolson :

$$\frac{D^2 \varphi}{Dt^2} + \nabla \cdot U \frac{D\varphi}{Dt} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \varphi) + (\sigma^2 - k^2 CC_g) \varphi = 0$$

$\varphi(x,y)$: potentiel de surface lié au déplacement de la surface libre η par la relation :

$$\varphi = -\frac{g}{\sigma} \eta$$

$U = (U(x,y), V(x,y))$: vitesses du courant

$$\text{avec } \begin{cases} C = \sqrt{(g/k) \tanh(kh)} & \text{vitesse de phase} \\ C_g = C(1 + 2kh / \sinh(2kh)) / 2 & \text{vitesse de groupe} \end{cases}$$

où la profondeur est $h(x,y)$ et g est l'accélération de la gravité. Le nombre d'onde, k , est relié à la pulsation, σ , et à la profondeur h par la relation linéaire de dispersion :

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh)$$

$$k = \frac{2\pi}{L}, \text{ où } L \text{ correspond à la longueur d'onde}$$

a) Processus physiques pris en compte

REFDIF est capable de simuler les phénomènes de :

- réfraction
- diffraction
- gonflement
- d'interaction houle-courant
- dissipation liée au déferlement bathymétrique

Dissipation par déferlement

Pour déterminer les zones où les vagues déferlent (zone de surf), REFDIF applique un critère de déferlement γ tenant compte du rapport entre la hauteur de la houle et la profondeur de l'eau $\gamma = \frac{H}{h}$. Tout dépassement d'un seuil de γ établi à 0.78, implique le déferlement de la houle. Une partie de l'énergie des vagues est alors transformée en courant moyen et l'autre est dissipée par viscosité dans les structures tourbillonnaires. Pour modéliser cette dissipation D, Kirby et Dalrymple (1995) font appel à la relation de Dally et al. (1985) :

$$D = \frac{K_1 C_g (1 - (K_2 h / H)^2)}{h}$$

où K_1 et K_2 sont des constantes empiriques : $K_1 = 0.017$ et $K_2 = 0.4$

Dissipation par frottement au fond

REFDIF offre à l'utilisateur le choix entre trois mécanismes de frottement au fond liés : au développement d'une couche limite laminaire, à la porosité du sable ou au développement d'une couche limite turbulente. C'est le dernier de ces mécanismes qui est important dans les côtes à récifs. Pour déterminer la dissipation engendrée par ce mécanisme, REFDIF fait appel à la relation décrite par Dean et Dalrymple (1984) :

$$D = \frac{2\sigma_f (H/2)(1-i)}{3\pi \sinh 2kh \sinh kh} \quad \text{où } f \text{ est le paramètre de friction de Darcy-Weisbach estimé à } f = 0.01$$

b) Calcul des tensions de radiation

REFDIF calcule les tensions de radiation de la même façon que SWAN sur le domaine situé à l'extérieur de la zone de déferlement. A l'intérieur de cette zone, REFDIF tient en plus compte de l'action de la propagation des bores. Ainsi, par exemple, S_{xx} , équivaut à :

$$S_{xx} = E(n \cos^2 \theta + n - 1/2) + 0.06HC^2$$

$$n = \frac{C_g}{C} \text{ (rapport entre la vitesse de phase et de groupe)}$$

c) Limitations

REFDIF se base sur les hypothèses suivantes :

- équation de faible pente : l'équation 2D de Berkhoff correspond à une intégration verticale pondérée des équations 3D de Laplace. Cette simplification suppose une réflexion de la houle négligeable et une variation faible de la bathymétrie par rapport à la longueur d'onde de la houle considérée. Les tests effectués par Booij (1983) montrent que les résultats obtenus avec cette méthode sont très précis pour des pentes allant jusqu'à 1:3.
- REFDIF utilise une extension des perturbations de Stokes de 3^{ème} ordre. Par conséquent il est limité aux domaines d'application de la théorie de la houle de Stokes, c'est à dire des zones dont le paramètre d'Ursell (U) reste inférieur à 40 ($U = HL^2/h^3$; H : hauteur de la houle, L : longueur d'onde; h : profondeur). Pour élargir le domaine d'application de REFDIF, Kirby et Dalrymple (1986) ont développé une nouvelle méthode basée sur les travaux de Hedges (1976). Elle correspond à une option de REFDIF.
- Le domaine de propagation de la houle est confiné à un secteur de +/- 45° par rapport à l'angle d'incidence.
- Les conditions de houle imposées au large de la zone modélisée sont considérées comme étant homogènes.

4.1.3. SHORECIRC

Le développement du modèle SHORECIRC a débuté en 1992 au sein du « Center for Applied Coastal Research » de l'Université du Delaware ; le modèle a connu depuis lors de nombreuses améliorations et applications en domaine côtier (Shi et al., 2003). Les bases théoriques du modèle peuvent être consultées dans Putrevu et Svendsen (1999) et les détails pratiques concernant son utilisation sont disponibles dans la notice d'utilisation « Quasi-3D nearshore circulation model SHORECIRC version 2.0 » rédigée par Svendsen, Haas et Zhao.

SHORECIRC est un modèle de circulation transitoire à surface libre qui résout les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement intégrées suivant la direction verticale (équations de Saint-Venant).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} + \frac{\partial Q_\alpha}{\partial x_\alpha} &= 0 \\ \frac{\partial Q_\beta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(\frac{Q_\alpha Q_\beta}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_{-h_0}^{\bar{\zeta}} V_{d\alpha} V_{d\beta} dz + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_{\bar{\zeta}_i}^{\bar{\zeta}} (u_{w\alpha} V_{d\beta} + u_{w\beta} V_{d\alpha}) dz \\ &= -g(h_0 + \bar{\zeta}) \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x_\beta} + \frac{\tau_\beta^B - \tau_\beta^S}{\rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(S_{\alpha\beta} - \int_{-h_0}^{\bar{\zeta}} \tau_{\alpha\beta} dz \right) \end{aligned}$$

où :

- $\bar{\zeta}$ est l'élévation de la surface libre moyenne ;
- Q_α et Q_β sont respectivement les flux de masse suivants les axes x_α et x_β ;
- $V_{d\alpha}$ et $V_{d\beta}$ sont respectivement les vitesses du courant variant avec la profondeur suivant les axes x_α et x_β ;
- h_0 est le niveau d'eau au repos ;
- $u_{w\alpha}$ et $u_{w\beta}$ sont respectivement les vitesses orbitales induites par les vagues suivant les axes x_α et x_β (issues de REFDIF) ;
- τ_α^B et τ_β^B sont respectivement les contraintes de cisaillement du frottement au fond suivant les axes x_α et x_β ;
- τ_α^S et τ_β^S sont respectivement les contraintes de cisaillement dues au vent suivant les axes x_α et x_β ;
- $S_{\alpha\beta}$ sont les tensions de radiations (issues de REFDIF) ;
- $\tau_{\alpha\beta}$ sont les contraintes de cisaillement turbulentes.

Ces équations sont résolues dans un maillage cartésien orthonormé direct. La résolution numérique se fait par une méthode aux différences finies à l'aide de schémas d'ordre élevé, ce qui garantit une précision importante : schémas temporels du 3ème ordre (méthode prédicteur-correcteur Adams-Bashforth-Moulton), schémas spatiaux à l'ordre 4 excepté pour les termes de diffusion à l'ordre 2. Le code numérique

calcule lui-même son pas de temps afin de vérifier les critères de stabilité (critère de Courant qui relie la vitesse de propagation des phénomènes et le rapport $\Delta x / \Delta t$) ; ce calcul est réalisé à l'initialisation et le pas de temps n'est pas adaptatif. Le pas de temps vaut fréquemment 1/30 à 1/40 de la période de houle.

Ces équations d'évolution font l'hypothèse hydrostatique et prennent en compte l'effet sur la dynamique de la pente de la surface libre, du frottement au fond et des forçages que constituent les tensions de radiation liées à la houle et le cisaillement de surface résultant de l'action du vent. En sortie du modèle, on obtient en chaque point de la grille :

- l'élévation de la surface libre et donc la surcote
- et les composantes horizontales du flux de masse intégrées sur la colonne d'eau et directement reliées aux composantes de la vitesse

Le code numérique propose deux modes de résolution :

- en mode 2DH : il calcule en tout point du domaine les flux intégrés sur la colonne d'eau ;
- en mode quasi-3D : il résout les équations 2DH mais déduit par le biais d'une solution analytique, la distribution verticale des courants.

SHORECIRC souffre d'un nombre d'applications très limité sur des environnements naturels. Son comportement sur des morphologies complexes est donc incertain.

5. Conclusion

Ce rapport détaille les méthodes de calcul des surcotes marines induites par les houles. Il présente :

- dans un premier temps, les principales lois empiriques utilisées en génie côtier. Ces lois permettent de déterminer directement la surcote en fonction des caractéristiques des vagues (hauteur, période et direction) et de la pente sous-marine du littoral étudié. Néanmoins ces lois ne sont pas universelles. Elles correspondent à des simplifications extrêmes des zones côtières (bathymétrie simpliste : pas de présence de barres sous-marines, récifs, passes, etc.) et n'ont pas été validées pour des fortes conditions de houle et de surcroît en cas de cyclone. C'est pourquoi cette approche n'est pas privilégiée dans cette étude
- et dans un deuxième temps, deux modèles numériques susceptibles de répondre aux besoins de l'étude. Ils offrent un calcul « complet » des surcotes en tenant compte des principaux phénomènes que subissent les vagues depuis le large jusqu'au rivage (réfraction, gonflement, diffraction, déferlement). Il s'agit de SWAN et du couplage REFDIR-SHORECIRC. Les principales caractéristiques de ces modèles sont décrites Tableau 1.

Ces deux modèles seront testés par la suite (voir rapport n°2 sur la mise en place de la modélisation) afin de choisir le plus adapté aux différentes morphologies rencontrées en Polynésie Française.

Propriétés des modèles	REFDIF	SWAN
Base des formulations	Berkhoff parabolisé	Conservation de l'action de la houle
Domaine de propagation	+/- 45°	360°
Théorie de la houle	Stokes (faiblement non linéaire)	Linéaire
Stationnaire ou transitoire	Stationnaire	Stationnaire/Transitoire
Caractéristiques maillage	Différence finies, cartésien, rectangulaire	Différences finies, cartésien, sphérique, rectangulaire, curviligne
Densité maillage/longueur d'onde des vagues	dépendant	Indépendant
Dépendance de la qualité des résultats/densité maillage	forte	Faible
Réfraction	Oui	Oui
Diffraction	Oui	Oui (depuis déc. 2004)
Réflexion	Non	Oui (ouvrages)
Gonflement	Oui	Oui
Déferlement	Dally et al. (1985)	Battjes et Janssen (1978)
Interaction houle-courant	Oui	Oui
Interactions vague-vague	Non	Triplet, quadruplet
Génération de la houle (Vent)	Non	Modèles de Phillips, Miles/champs de vent homogènes ou hétérogènes
Dissipation énergie par frottements au fond	Terme dissipatif selon nature du fond	Modèle de Hasselman et al. (1973), Collins (1972), Madsen et al. (1988)
Dissipation énergie par moutonnement	Non	Oui
Calcul de la surcote (set-up)	Non	Oui (profil et zone)
Prise en compte d'obstacles	Non	Modèle de Seelig

Tableau 1: Récapitulatif des principales propriétés des modèles REFDIF et SWAN

6. Bibliographie

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

Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffracton. Proc. 13th Int. Conf. Coastal Engrg., ASCE, Vancouver.

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, 115p.

Cheung, K.F., Phadke, A.C., Wei, Y., Rojas, R., Douyere, Y., Martino, C.D., Houston, S.H., Liu, P.L.-F., Lynett, P.J., Dodd, N., Liao, S., and Nakazaki, E., 2003. Modeling of storm-induced coastal flooding for emergency management. Ocean Engineering, 30(11), 1353-1386.

Collins, J.I., 1972: Prediction of shallow water spectra, J. Geophys. Res., 77, No. 15, 2693-2707.

Dally, W.R., R.G. Dean and R.A. Dalrymple, 1985. Wave height variations across beaches of arbitrary profile. J. Geophys. Research, 90, 11917-11927.

Dean, R.G. and R.A. Dalrymple, 1984. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, Englewood Clis: Prentice-Hall.

Dean, R.G. and R.A. Dalrymple, 1991. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, World Scientific.

Eldeberky, Y. and J.A. Battjes, 1995: Parameterization of triad interactions in wave energy models, Proc. Coastal Dynamics Conf. '95, Gdansk, Poland, 140-148.

Gourlay MR, 1996. Wave set-up on coral reefs 1. Set-up and wave-generated flow on an idealized two dimensional horizontal reef, Coast Eng, 27, 161-193.

Gourlay MR, 1996. Wave set-up on coral reefs 2 : Set-up on reefs with various profiles, Coast Eng, 28, 17-55.

Guza, R.T., and E.B. Thornton, 1984. Swash on Steep and Shallow Beaches. Pages 708–723 in Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering, Houston, Texas. American Society of Civil Engineers.

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

Hedges, T.S., 1976. An empirical modification to linear wave theory. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 61, 575-579.

Kirby, J.T., 1984. A note on linear surface wave-current interaction. *J. Geophys. Res.*, 89, 745-747.

Kirby, J. T. and Dalrymple, R. A., 1986. An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models. *Coast. Eng.*, 9, 545-561.

Kirby, J. & Dalrymple, R.A., 1995. REFDIR1 v2.5 Refraction diffraction model. Technical report, CACR.

Komar, P. D., 1998. Beach processes and sedimentation. New Jersey, Prentice Hall, USA. 577 p.

Longuet-Higgins, M. S., and R. W. Steward, 1964. Radiation stress in water waves; a physical discussion, with applications, *Deep Sea Res.*, 11, 529-562.

Luettich, R. A., Westerink, J. J. & Sheffner, N. W., 1992. ADCIRC: An Advanced Three-Dimensional Circulation Model for Shelves, Coasts and Estuaries. Report 1: Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL with Applications. Tech. Rep. DRP-92-6. Department of the Army, Washington, DC.

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

Massel S. R., Brinkman R.M., 2001. Wave-induced set-up and flow over shoals and coral reefs. Part 1. A simplified bottom geometry case *OCEANOLOGIA*, 43 (4), pp. 373–388.

Massel S.R., Gourlay M.R., 2000. On the modelling of wave breaking and set-up on coral reefs, *Coast. Eng.*, 39, 1–27.

Poitevin J., Daniel, P 1995. Surcotes liées au passage d'un cyclone en Polynésie. *Rapport Météo-France*, 21p.

Putrevu, U. and Svendsen, I. A., 1999, Three-dimensional dispersion of momentum in wave-induced nearshore currents, *Eur. J. Mech. B/Fluids*, 83-101.

Shi, F., Svendsen, I. A., Kirby, J. T. and Smith, J. M., 2003. A curvilinear version of a quasi-3D nearshore circulation model, *Coastal Engineering*, 49, 99-124.

SVENDSEN, I.A.; HAAS, K. and ZHAO, K., 2004. Quasi-3D nearshore circulation model Shorecirc version 2.0. User's Manual, 65p.

Tait R.J. (1972). Wave set-up on coral reefs. *J Geoph Res*, 77(12), 2207-2211.

Weaver R.J. 2004. Effect of wave forces on storm surge. Master of Science thesis, Univ. of Florida, 65 p.



**Centre scientifique et technique
Service ARN/ESL**

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