

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MODÉLISATION DE LA DISSIPATION DE L'ÉNERGIE  
DES VAGUES PAR LA VÉGÉTATION  
DE MARAIS LITTORAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI**

**comme exigence partielle  
du programme de maîtrise en océanographie**

**PAR**

**NICOLAS LAMBERT**

**JUIN 2009**

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

## Résumé

Les marais salés sont des écosystèmes composés de plantes halophytes qui ont une dynamique sédimentaire grandement modélée par l'hydrodynamisme local causé par les vagues. Celles-ci, en se propageant dans les marais, contribuent au transport du sédiment en place. D'un autre côté, la végétation présente dans ces marais freine l'action des vagues tout au long de leur progression. Il est donc important de bien connaître l'interaction entre la végétation et l'hydrodynamisme de vagues. Le but de ce travail est de construire un modèle numérique de vagues qui soit en mesure de simuler la propagation des vagues dans les zones littorales ayant une couverture végétale. Le modèle de vagues *SWAN* a été utilisé comme modèle de base et une routine y a été ajoutée afin de calculer l'énergie des vagues dissipée par la végétation. La modélisation de cette routine est basée sur le calcul de la force de traînée causée par le mouvement entre l'eau et la végétation, et ce, sur l'ensemble de la hauteur de la couverture végétale. Ce calcul est répété indépendamment pour chacune des fréquences de vagues et pour chaque direction de propagation.

Une série de mesures de terrain a été réalisée en vue de calibrer les paramètres de cette nouvelle routine. Le modèle *SWAN*, utilisé sans considérer la végétation, donne une hauteur significative en moyenne trois fois plus élevée que les données réellement mesurées à la station la plus haute dans le marais. La nouvelle routine a permis d'obtenir une hauteur significative de seulement 6 % plus élevée que la hauteur mesurée. À l'aide de ces simulations, il fut possible de conclure que l'atténuation de la hauteur des vagues causée par la végétation représente, sur 566 m, une perte d'énergie de 37 % à 88 %. Une série de simulations avec le nouveau modèle a aussi permis de déterminer les paramètres qui influencent le plus la dissipation : le niveau de l'eau, la densité de la végétation et la période des vagues. Cela a confirmé les analyses mathématiques préliminaires. Avec ces nouvelles données, il sera possible de mieux simuler l'hydrodynamisme au sein des marais salés et ainsi de bien comprendre la dynamique sédimentaire de ces milieux.

## **Modeling wave dissipation by vegetation in saltmarshes**

### **Abstract:**

Saltmarshes are ecosystems composed of halophyte plants, which influence significantly the sedimentary dynamic. Saltmarshes are modulated by local wave hydrodynamics. As waves progress in the marsh, they erode sediment. However, vegetation dissipates the wave energy and minimises erosion. Therefore, it is important to learn more about the interaction between vegetation and wave hydrodynamics. The purpose of this study was to build a numerical model to simulate the wave propagation through a vegetated intertidal zone. The existing SWAN model (Simulating WAVes Nearshore) was used as base model, and a new routine was added to calculate the wave energy dissipation by the vegetation. This routine calculates the drag force caused by the movement of water in the vegetation over the entire canopy height. These calculations are repeated for each wave frequency and for each wave propagation direction.

Field measurements were recorded at the Isle-Verte marsh to calibrate the parameters of the new routine. When dissipation by the vegetation was ignored, the waves height generated by the SWAN model was generally three times higher than the actual measurements at the most landward station in the saltmarsh. When the new routine was added to the model, simulated wave heights were only 6% higher than the measured heights. The results showed a wave energy dissipation of 37% to 88%, and this dissipation was primarily due to wave attenuation by the vegetation over 566 metres. Several simulations of the SWAN model with the new routine were made to determine the influence of different parameters on the dissipation, such as water level, vegetation density and wave period. These model results confirmed preliminaries mathematics analyses. These results will be useful in future studies to better simulate the hydrodynamics in saltmarshes and to understand the sedimentary dynamic in these environments.

## Tables des matières

Résumé .....	ii
Tables des matières .....	iii
Remerciements .....	v
Liste des tableaux .....	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des symboles.....	ix
<b>1. Introduction</b> .....	1
<b>2. Matériel et méthodes</b> .....	9
Mesures de terrain .....	9
Modélisation .....	18
Calibration et validation .....	28
<b>3. Résultats</b> .....	31
Mesures de terrain .....	31
Modélisation sans l'effet de la végétation.....	39
Calibration .....	41
Validation .....	45
<b>4. Discussion</b> .....	51
Analyse des variables environnementales .....	51
Validité de l'analyse mathématique .....	54
Qualité des prédictions .....	55
Scénarios .....	61
<b>5. Conclusion</b> .....	71
Références .....	73
Annexe A : Calculs.....	78
Annexe B : Syntaxe du fichier de commande afin d'y inclure la végétation.....	81
Annexe C : Code FORTRAN de la routine de la végétation .....	84

## Remerciements

Cette maîtrise a été faite sous la direction du professeur Urs Neumeier dont l'aide et le soutien furent essentiels à l'accomplissement de ce travail. L'Institut des sciences de la mer de Rimouski m'a aussi accordé un précieux soutien technique et logistique. J'aimerais aussi remercier feu François Saucier, mon co-directeur, pour ses précieux conseils, son aide logistique et les précieuses données du modèle STLE400. L'aide de Simon Senneville m'a aussi permis de passer au travers plusieurs problèmes techniques. Les précieux conseils de Pierre St-Laurent furent aussi d'une aide indispensable. Tous mes remerciements à l'intention de Gilles Desmeubles et Sylvain Leblanc pour leur aide sur le terrain. Merci aussi à Serge Labonté de nous avoir donné l'autorisation d'effectuer les travaux de terrain dans la réserve nationale de faune de la Baie de l'Isle-Verte. Finalement, ce travail a été fait grâce au financement du CRSNG.

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Revue de la littérature des études qui mettent en évidence l'atténuation des vagues par la végétation.....	3
Tableau 2 : Caractéristiques des stations V1 à V4. Un ADCP a été installé à la station V1 et trois houlographes ont été installés aux stations V2, V3 et V4.....	11
Tableau 3 : Caractéristiques des stations veg1 à veg8. L'altitude a été déterminée à partir du relevé topographique.....	13
Tableau 4 : Caractéristiques des vagues mesurées pour une sélection des bursts de l'expérience de terrain (cf. texte).....	36
Tableau 5 : $C_D$ obtenu lors de la calibration des bursts 846 à 850.....	42
Tableau 6 : Comparaison entre les enregistrements effectués sur le terrain et les modélisations avec et sans végétation pour la grille normale.....	49
Tableau 7 : Revue de la littérature des études qui ont effectué des simulations de vagues en utilisant SWAN.....	60
Tableau 8. Caractéristiques des cinq bursts qui ont servi lors de la simulation des scénarios.....	61

## Liste des figures

Fig. 1. Carte marine de la batture de l'Isle-Verte et emplacements de l'ADCP (V1) et des trois houlographes (V2, V3, V4).....	9
Fig. 2. Photographies du marais de l'Isle-Verte prises le 5 septembre 2007 lors de l'installation des houlographes.....	10
Fig. 3. Topographie de la grille 2 mesurée en 2007.....	11
Fig. 4. Montage qui permet de photographier une section de la végétation.....	13
Fig. 5. (A) Exemple d'image binaire d'une section de la végétation (station veg4). (B) Obstruction volumique de la végétation.....	13
Fig. 6. Modélisation du comportement des vagues dans la grille 1 le 13 septembre 2007 à 4h00 avec les vagues mesurées en V1.....	19
Fig. 7. Division verticale de la végétation en couches de L1, L2... séparées aux hauteurs h1, h2... ..	22
Fig. 8. Schéma du fonctionnement de SWAN pour les étapes 1 à 6.....	24
Fig. 9. Schéma du fonctionnement de la routine VegNL, qui modélise la dissipation par la végétation.....	26
Fig. 10. Variables environnementales mesurées lors de l'expérience de terrain du 5 sept. au 9 oct. 2007.....	30
Fig. 11. Direction d'où proviennent les vents pendant l'expérience.....	31
Fig. 12. Paramètres environnementaux mesurés le long du transect V2-V3-V4.....	32
Fig. 13. Distribution verticale de l'obstruction mesurée à partir des photographies prises aux stations veg1 à veg8.....	33
Fig. 14. Spectre directionnel des vagues mesurées en V1 le 13 septembre 2007 à 4h00 (HM).....	35

Fig. 15. Spectre de vague pour les stations V1, V2, V3 et V4 et hauteur significative (éq. 2.7) pour les mesures faites le 13 septembre 2007 à 4h00.....	35
Fig. 16. Modélisation du 13 septembre 2007 à 4h00 (HM).....	36
Fig. 17. Disposition des deux grilles de calculs.....	41
Fig. 18. Burst 846 à 850 (du 23 septembre à 23h30 au 24 septembre à 1h30) utilisés pour calibrer le modèle avec la végétation.....	43-44
Fig. 19. Modélisation du 13 septembre 2007 à 4h00 (HM) en considérant la végétation et en utilisant la grille réduite.....	45
Fig. 20. Comparaison entre les hauteurs significatives mesurées et simulées avec la grille réduite, avec ou sans la végétation, pour les stations V3 et V4.....	46
Fig. 21. Modélisation du 13 septembre 2007 à 4h00 (HM) en considérant la végétation et en utilisant la grille normale.....	47
Fig. 22. Comparaison entre les hauteurs significatives mesurées et simulées avec la grille normale, avec ou sans la végétation, pour les stations V2, V3 et V4.....	49
Fig. 23. Modélisation de cinq bursts en ne changeant que le niveau de l'eau.....	62
Fig. 24. Modélisation de cinq bursts en ne changeant que la densité de la végétation.....	63
Fig. 25. Modélisation de cinq bursts en ne changeant que la hauteur de la végétation.....	65
Fig. 26. Modélisation de différentes situations théoriques où la période de vagues incidente a été modifiée.....	65
Fig. 27. Hauteurs significatives relatives des vagues au niveau des stations V3 et V4 lors d'une simulation de moyenne tempête.....	67
Fig. 28. Hauteurs significatives relatives des vagues au niveau des stations V3 et V4 ( $H_4 = H_{m0}(V4)$ ) lors d'une simulation de forte tempête.....	68

## Liste des symboles

$a$ :	amplitude des vagues ( $H_{waves}/2$ ) [m]	$m_n$ :	$n^{\text{ième}}$ moment du spectre d'énergie [ $m^2 \cdot Hz^n$ ]
$A$ :	aire de l'objet, section perpendiculaire au courant [ $m^2$ ]	$N(\sigma, \theta)$ :	densité d'action des vagues ( $= \rho g \cdot E(\sigma, \theta) / \sigma$ ) [ $J \cdot s / m^2$ ]
$C_D$ :	coefficient de traînée [-]	$O$ :	obstruction verticale volumique [ $m^2/m^3$ ]
$c_x, c_y, c_\theta, c_\sigma$ :	vitesse de propagation selon $x, y$ et $\theta$ et la fréquence angulaire relative $\sigma$	$O_a$ :	obstruction verticale mesurée sur la distance $a$ [-]
$d$ :	profondeur totale de l'eau [m]	$p$ :	pression [Pa]
$E(f)$ :	variance spectrale à la surface	$p_{atm}$ :	pression atmosphérique [Pa]
$E(f, \theta)$ :	variance spectrale directionnelle [ $m^2 / Hz / deg.$ ]	$S_{en}$ :	terme de sources d'énergie [ $J/m^2$ ]
$E(\sigma, \theta)$ :	variance spectrale selon la fréquence angulaire relative $\sigma$	$T_{m0l}$ :	période moyenne [s]
$E_{corr}(f)$ :	variance spectrale corrigée	$u$ :	vitesse horizontale [ $m / s$ ]
$E_n$ :	variance spectrale à $f_n$ [ $m^2 / Hz$ ]	$u_f$ :	la vitesse horizontale induit par la vagues de fréquence $f$
$E_{nm}$ :	variance spectrale à la fréquence $f_n$ dans la direction $\theta_m$ [ $m^2 / Hz / deg.$ ]	$u_{rms}$ :	vitesse $\sqrt{\langle u^2 \rangle}$ [ $m / s$ ]
$E_{surf}(f)$ :	variance spectrale de la surface calculée avec l'équation d'équilibre hydrostatique 2.2 (non-corrigée)	$w$ :	vitesse verticale.
$E_z(f, z)$ :	variance spectrale mesurée à une profondeur $z$ [ $Pa^2 / Hz$ ]	$\vec{x}$ :	vecteur position
$\vec{F}_D$ :	force de traînée [N]	$z$ :	profondeur sous le niveau de l'eau (positif vers le bas) [m]
$f_n$ :	$n^{\text{ième}}$ fréquence [Hz]	$z_h$ :	profondeur du houlographe
$g$ :	accélération gravitationnelle [ $9,81 m/s^2$ ]	$\alpha$	distance d'atténuation [m]
$h_i$ :	hauteur d'une couche [m]	$\Delta f_n$ :	différence entre $f_n$ et $f_{n-1}$ [Hz]
$H_{m0}$ :	hauteur significative des vagues [m]	$\Delta \theta_m$ :	différence entre $\theta_m$ et $\theta_{m-1}$ [deg]
$H^*_{m0}$ :	hauteur significative pour les vagues dont le fréquence est entre 0 et 0,5 Hz [m]	$\epsilon_f$ :	l'énergie dissipée [ $J / s$ ]
$k$ :	nombre d'ondes ( $2\pi /$ longueur d'onde)	$\eta$ :	position verticale de l'eau [m]
$\vec{k}_n$ :	vecteur nombre d'ondes associé à $f_n$ , dans la direction de propagation	$\eta(t, \vec{x})$ :	position de la surface par rapport au niveau moyen [m] à $\vec{x}$
$\vec{k}_{nm}$ :	vecteur nombre d'ondes associé à $f_n$ , dans la direction $\theta_m$ .	$\theta_m$	$m^{\text{ième}}$ angle de propagation des vagues
$m_0$ :	moment 0 du spectre d'énergie [ $m^2$ ]	$\rho$ :	densité de l'eau [ $1025 kg / m^3$ ]
$m_1$ :	moment 1 du spectre d'énergie [ $m^2 \cdot Hz$ ]	$\sigma$ :	fréquence angulaire relative (par rapport au courant). [Hz]
		$\varphi$ :	l'angle de déphasage [deg]
		$\omega$ :	fréquence angulaire ( $2\pi \cdot f$ )

## 1. Introduction

Les marais salés (*saltmarsh*) sont des zones de végétation situées dans la zone intertidale et ils sont composés de plantes qui sont adaptées aux eaux salées. Les nutriments essentiels à leur croissance sont apportés par la marée (Poulin et Pelletier, 2007) et les moments d'exposition à l'air libre leur permettent d'être en contact avec le gaz carbonique de l'atmosphère. Par contre, ces écosystèmes sont grandement influencés par le déferlement des vagues qui arrivent du large. Ces vagues dissipent leur énergie, entre autres, au contact des plantes et celles-ci sont vulnérables lorsque cette énergie est trop importante. Möller et al. (1999) ont mesuré cette dissipation des vagues dans un marais de l'est de l'Angleterre et ils ont estimé que la végétation a été en mesure de réduire la hauteur des vagues de 88,5 % sur une distance de 205 m. D'autres plantes aquatiques dissipent aussi l'énergie des vagues, comme les herbiers (*seagrass*), situés surtout dans la zone subtidale peu profonde (Chen et al., 2007), et les algues marines, qui sont, quant à elles, vulnérables à la dissipation de l'énergie des vagues lorsque celle-ci est trop importante (D'Amours et Scheibling, 2007). D'autres plantécosystèmes plus résistantes, comme les mangroves, ne sont pas directement influencées par les vagues, mais ils en amortissent grandement l'énergie lorsque celles-ci progressent vers la berge (Quartel et al., 2007).

D'un autre côté, le fait que la végétation dissipe l'énergie des vagues fait en sorte que la dynamique sédimentaire est différente de celle aux endroits dépourvus de végétation. À ces endroits, en général, les vagues en provenance du large érodent le sédiment lorsqu'elles

déferlent sur l'estran. En analysant le lien entre le transport sédimentaire et différents processus biologiques (macrophytes, micro-organismes, macrofaunes benthiques), Le Hir et al. (2007) en sont venus à la conclusion que la présence de végétation aquatique protège les sédiments de l'effet d'érosion des vagues de par la réduction de leur énergie lorsqu'elles entrent en contact avec la couverture végétale. Watts et al. (2003) ont aussi déduit que les plantes qui composent les marais salés protègent les berges en diminuant grandement la turbulence et le cisaillement causé par les vagues. Selon Madsen et al. (2001), cette altération de l'hydrodynamisme local a pour conséquence de non seulement favoriser le dépôt des particules en suspension dans l'eau, mais aussi de réduire considérablement la resuspension des sédiments du fond causée par la turbulence de la houle. Cela a pour conséquence que dans les marais, le taux de sédimentation est plus élevé (Coops et al., 1996; Widdows et al., 2008) que sur les berges sans végétation et la taille moyenne des grains présents dans le sédiment est plus petite (Yang et al., 2008).

Le rôle protecteur de la végétation face à l'érosion causée par le mouvement des vagues a été mis en évidence par Turker et al. (2006). Ceux-ci ont effectué des expériences dans un canal à houle et ils ont déterminé que la protection du sédiment augmente avec la densité et la taille des plantes. Van der Wal et al. (2008) ont aussi confirmé, à l'aide d'analyses de photos aériennes, qu'en présence de marais salé, le phénomène d'érosion des berges était réduit. Drapeau (1992) arrive même à la conclusion que la végétation des marais favorise la formation de schorre qui, par la suite, aide à la progression du marais vers le large. De plus, Morris (2007) a démontré que dans certaines conditions, les marais

peuvent résister à une hausse du niveau marin, car dans les cas étudiés, la montée des eaux peut être compensée par le taux de sédimentation plus élevé. La présence d'une couverture végétale peut donc être un bon moyen d'atténuer l'effet d'érosion causé par l'action répétée des vagues sur les berges.

Tableau 1 : Revue de la littérature des études qui mettent en évidence l'atténuation des vagues par la végétation.

Référence	Lieu	Plantes	Méthodes de mesures	Observation*
Wayne (1976)	Adams Beach, USA	<i>Spartina alterniflora</i>	-	Réduction de 71 % de l'énergie des vagues sur 20 m; $\alpha=16,1$ m
Knutson et al. (1982)	Chesapeake Bay	<i>Spartina alterniflora</i>	Perche à houle à deux endroits	Réduction de 94 % de l'énergie des vagues sur 30 m; $\alpha = 10,7$ m
Asano et al. (1988)	Canal à houle	Plantes artificielles : Algues laminaires	Perches à houle situées sur un transect	Atténuation des vagues variables selon plusieurs paramètres $\alpha$ entre 9,9 m et 66,7 m
Moeller et al. (1996)	North Norfolk, Angleterre	<i>Spartina anglica</i> (entre autre)	Capteurs de pression disposés sur un transect	Corrélation négative entre l'atténuation et la profondeur de l'eau
Coops et al. (1996)	Canal à houle	<i>Phragmites australis</i> et <i>Scirpus lacustris</i>	Perche à houle	Diminution jusqu'à 29 % de la hauteur des vagues sur 4 m; $\alpha = 11,7$ m
Mork (1996)	Hustadvika, Norvège	<i>Laminaria hyperborea</i>	Profils de vitesse avec des <i>ultrasonic current meters</i> (UCMs)	45 % à 61 % de réduction sur 258 m; $\alpha = 432$ m à 274 m
Mendez et al. (1999)	Canal à houle	Plantes artificielles : <i>Laminaria hyperborea</i>	Capteurs de pression	Diminution de 2 % à 50 % de la hauteur de vagues selon les conditions
Möller et al. (1999)	North Norfolk, Angleterre	<i>Spartina anglica</i> (entre autre)	Capteurs de pression disposés sur un transect	63 % de réduction sur 200 m; $\alpha = 201$ m donnée de Moeller et al. (1996)

Lovas et Torum (2001)	Maquette en laboratoire (échelle 1 :10)	Plantes artificielles : <i>Laminaria hyperborea</i>	Profil vertical de vitesse avec des ADVs	L'amplitude des vitesses diminue dans la végétation et au-dessus
Möller et Spencer (2002)	Essex, Angleterre	<i>Aster, Suaeda, Puccinellia, Salicornia, Limonium</i>	Capteurs de pression disposés sur deux transects	87 % de réduction sur 163 m; $\alpha = 80$ m
Spratt et al. (2005)	Freiston, Angleterre	<i>Spartina anglica</i> (autres)	Capteurs de pression disposés sur plusieurs transects	87 % de réduction sur 140 m; $\alpha = 68,6$ m
Cooper (2005)	Wash, Angleterre	<i>Salicornia europaea</i> et <i>Suaeda maritima</i> .	Capteur de pression disposé sur plusieurs transects	94,3 % de réduction sur 300 m et 69,0 % de réduction sur 250 m; $\alpha = 105$ m et 213 m
Möller (2006)	Dengie Peninsula, Angleterre	<i>Spartina anglica</i>	Capteurs de pression disposés sur trois transects	Réduction de 2% à 7% sur 10 m; $\alpha = 495$ m à 138 m
Neumeier et Amos (2006)	Freiston Shore, Angleterre	<i>Spartina anglica</i>	Profils des vitesses orbitales en utilisant un ADV	Diminution de 10 % à 20 % de la vitesse orbitale dans la végétation
Widdows et al. (2008)	Tavy estuary, Angleterre	<i>Spartina anglica</i>	Vitesse de l'eau en utilisant un ADV	Diminution de 70 % à 80 % de la vitesse du courant près du fond

\* Dans certains cas, il s'agit de mesures de la hauteur des vagues et dans d'autres cas, il s'agit de mesures des vitesses de l'eau au sein de la végétation.

Plusieurs expériences ont tenté de mesurer cette atténuation induite par la végétation halophyte dans les marais. Le Tableau 1 résume les différentes études à ce sujet. Certains auteurs ont effectué des mesures de hauteur des vagues sur des transects qui traversent la zone intertidale. Par exemple, Cooper (2005) a pu mesurer cette atténuation en disposant des capteurs de pression dans la zone intertidale d'un marais du *Wash* en Angleterre. En appliquant le modèle d'atténuation exponentiel ( $H_b = H_a e^{-x/\alpha}$ , avec  $x$  comme la distance horizontale et  $\alpha$  étant la distance d'atténuation, éq. 3.1), celui-ci obtient 105 m et 213 m comme valeurs du paramètre  $\alpha$ . Ce paramètre représente la distance que les vagues doivent

parcourir pour qu'il ne reste que 36,8 % ( $e^{-1}$ ) de leur hauteur significative de départ. Cooper (2005) arrive à la conclusion que l'atténuation générée par la végétation, donc la valeur de  $\alpha$ , dépend de la hauteur de la végétation, de sa densité et des propriétés de la plantes en contact avec l'eau (rugosité et rigidité). En effectuant des mesures semblables, les études de Moeller et al. (1996) et de Möller (2006) ont mis en évidence le lien entre la réduction de l'énergie des vagues et la profondeur relative de l'eau (hauteur des vagues / profondeur). Wayne (1975) arrive à la conclusion que des vagues ayant de longues périodes et se propageant dans des eaux plus profondes subissent une atténuation semblable à des vagues de courtes périodes qui progressent dans des eaux moins profondes. Finalement, les analyses spectrales de la propagation de vagues dans un marais effectuées par Neumeier et Amos (2006) démontrent que le degré de réduction de l'énergie hydrodynamique est influencé par la période d'oscillation de la houle.

Bien que ces études mettent en évidence certaines tendances dans l'atténuation, il reste que l'effet de la végétation sur les vagues est difficile à prévoir et à modéliser. Teeter et al. (2001), en analysant les études de l'hydrodynamisme dans la végétation halophyte, sont venus à la conclusion que ce phénomène est difficilement modélisable surtout en raison de sa complexité mathématique. Dean et Bender (2006) ont tenté de contourner ce problème en élaborant une méthode qui schématise les végétations comme de simples tubes verticaux. Ils déduisent par la suite la perte d'énergie des vagues causée par la force de traînée générée par le mouvement de l'eau à travers la végétation. Bien que ce modèle théorique donne des résultats intéressants, le fait qu'elle ne tienne pas compte de

l'hétérogénéité verticale des plantes fait en sorte qu'elle est difficilement utilisable dans un modèle numérique s'appliquant aux zones côtières.

Une étude de Kobayashi et al. (1993) fut l'une des premières à tenter de déterminer théoriquement la valeur du coefficient d'atténuation causé par la présence de végétation. Pour ce faire, ils ont fait l'analyse mathématique de la force de traînée causée par la couverture végétale et ils en ont par la suite déduit la perte d'énergie des vagues. Afin de simplifier leurs calculs, Kobayashi et al. (1993) ont, entre autres, utilisé la force de traînée moyenne sur une période d'oscillation au lieu de faire ces calculs de façon continue. Ils ont aussi fait leurs calculs pour des vagues monochromatiques, ce qui permet d'obtenir une solution analytique de l'atténuation des vagues en fonction des caractéristiques de la végétation. Par contre, cette étude n'est pas en mesure d'inclure les autres phénomènes qui agissent lors de l'atténuation de l'énergie des vagues. Ce qui n'est pas le cas d'une autre étude effectuée par Möller et al. (1999) qui inclut l'atténuation des vagues causée par la couverture végétale aux autres sources de dissipation de l'énergie telles la friction avec le fond, le déferlement des vagues et les variations de la topographie. Cependant, cette analyse utilise un modèle d'atténuation linéaire ( $H_b = \alpha(\Delta x) H_a$ ) pour calculer la hauteur résultante des vagues, au lieu du modèle exponentiel décrit précédemment. De plus, cette étude traite la végétation seulement en deux dimensions (comme une surface horizontale), ce qui réduit la justesse des calculs. Kobayashi et al. (1993) quant à eux, avaient tenu compte de la composante verticale de la végétation en intégrant sur la hauteur des plants la dissipation de l'énergie causée par la vitesse de l'eau à cette hauteur. Ce qui implique que la hauteur de la

végétation est un paramètre qui intervient directement dans les calculs de la distance d'atténuation  $\alpha$  (selon un modèle d'atténuation exponentiel).

Mendez et Losada (2004) parviennent, de la même façon que Kobayashi et al. (1993), à formuler une analyse mathématique qui interprète la végétation comme étant un facteur de perte d'énergie de par la force de traînée qu'elle induit au contact avec l'eau. Mais, leur recherche inclut aussi l'effet du déferlement des vagues et du changement de la topographie dans les zones côtières dans les calculs de l'atténuation des vagues. Cela a permis de prédire la courbe d'atténuation des vagues monochromatiques ou irrégulières en considérant les caractéristiques de la végétation, des vagues et de l'environnement. Ce modèle reste tout de même une solution analytique unidirectionnelle qui a été testée avec des mesures effectuées dans un canal à houle. L'implantation de cette solution à un modèle numérique côtier reste difficile. Li et Yan (2007) ont, pour leur part, développé un modèle hydrodynamique en trois dimensions qui permet de prédire le comportement de l'eau en contact avec la végétation en traitant, eux aussi, la végétation comme une source de dissipation de l'énergie des vagues. Les vagues y sont par contre traitées de façon monochromatique. Vo-Luong et Massel (2008) ont récemment réussi à faire l'analyse complète de la progression du spectre de vagues dans une forêt de mangrove en analysant la dissipation des vagues engendrée par leur déferlement et le contact de l'eau avec les troncs et les racines de mangrove. Ils ont aussi été en mesure de valider leurs modèles analytiques de cette dissipation en effectuant des mesures sur le comportement des vagues dans une forêt de mangrove située au Vietnam.

Par contre, il n'existe encore aucun modèle qui soit en mesure de modéliser le comportement du spectre complet de vagues lors de sa progression dans un marais salé. L'objectif de ce travail est donc de construire un modèle numérique qui permettra de simuler la progression des vagues dans un milieu où il y a de la végétation. Pour ce faire, il a d'abord fallu analyser l'interaction des vagues avec la végétation de façon mathématique. Dans cette analyse, la dissipation de l'énergie a été calculée indépendamment pour chacune des vagues de fréquences différentes. De plus, cette dissipation a été considérée sur l'ensemble de la hauteur de la végétation en intégrant sur la verticale, les pertes d'énergie induites par la végétation. Par la suite, un algorithme a été construit afin de calculer, de façon numérique, l'effet de cette dissipation d'énergie sur le comportement des vagues. Le modèle *SWAN* (Holthuijsen, 2007) a été utilisé pour intégrer l'effet de la végétation aux autres conditions environnementales. En effet, *SWAN* est couramment utilisé pour prédire l'aspect des vagues en milieux côtiers face à diverses conditions environnementales, telles le vent et la topographie du milieu. Une fonction supplémentaire, qui sert à calculer la dissipation de l'énergie des vagues au contact avec la végétation, a donc été intégrée à ce modèle déjà existant. Cette approche a pour but de pouvoir appliquer *SWAN* à des zones côtières où sont situés des marais salés. Une série de mesures effectuées dans le marais de l'Isle-Verte a permis d'effectuer les calibrations nécessaires de ce nouveau modèle et de juger de la fiabilité de ces modélisations.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1 Mesures de terrain

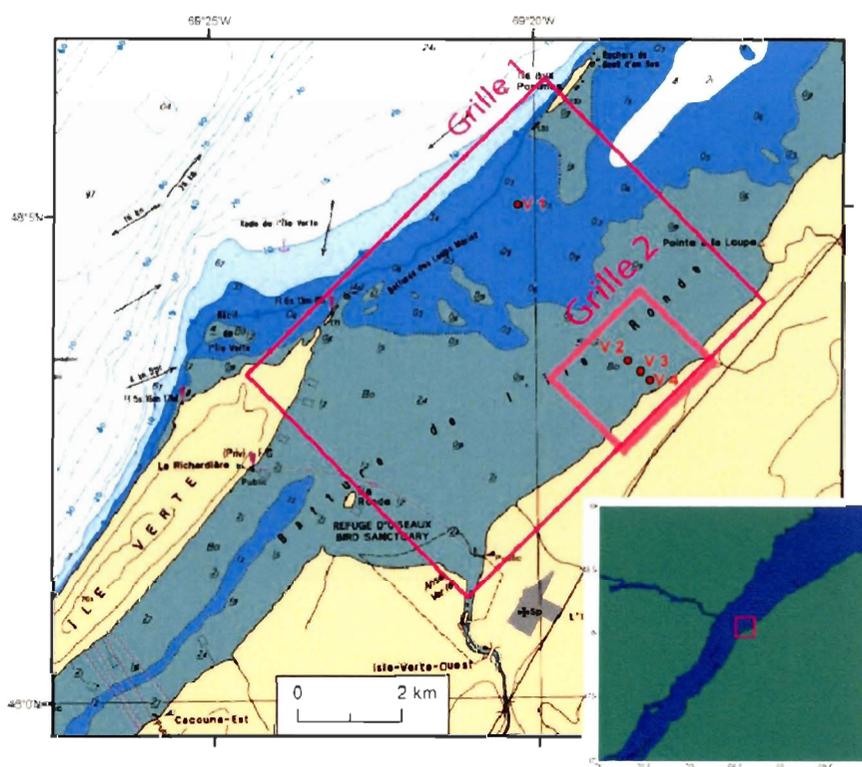


Fig. 1. Carte marine de la batture de l'Isle-Verte et emplacements de l'ADCP (V1) et des trois houlographes (V2, V3, V4). La zone d'étude est couverte par deux grilles : une première plus étendue qui couvre les 4 appareils de mesure et une seconde, plus petite, pour mieux résoudre le marais inférieur.

La zone d'étude se situe sur la rive sud de l'estuaire du St-Laurent, sur la batture de l'Île Ronde près de l'Isle-Verte (48° 05' N, 69° 20' O) (Fig. 1). La batture est composée de sédiments de tailles très variées (du bloc métrique au sable fin) dont la granulométrie moyenne est de 0,5 mm (Drapeau et Morin, 1981). La topographie du secteur est très plate et uniforme et il y a très peu de chenaux de marée. Dans les périodes de marée de vive-eau, le marnage atteint 5 m, la zone intertidale s'étend alors sur 5 km. Celle-ci se caractérise par

la présence d'un marais littoral d'une largeur de 1 km (Fig. 3). La couverture végétale du marais supérieur est composée de *Spartina patens* et d'autres halophytes, dans le marais inférieur, *Spartina alterniflora* est dominante (Fig. 2). Devant le marais se trouvent des herbiers à *Zostera marina*.



Fig. 2. Photographies du marais de l'Isle-Verte prises le 5 septembre 2007 lors de l'installation des houlographes.

Les mesures de terrain ont été effectuées sur un transect (V1-V2-V3-V4) perpendiculaire à la côte de l'estuaire du St-Laurent au niveau du marais de l'Isle-Verte (Fig. 1 et Tableau 2). Ce transect couvre une distance de 4,2 km avec un dénivelé de 5,3 m (pente moyenne de 1,26 ‰). Le transect V2-V3-V4 est situé dans la partie supérieure de la zone intertidale et couvre essentiellement le marais inférieur. La section entre V1 et V2 est dépourvue de végétation rigide (*Z. marina* est flexible) et le fond y est parsemé de bloc (0,5 m à 2 m). Les vagues ont été mesurées dans la période allant du 6 septembre au 4 octobre 2007, lors de la période pendant laquelle la biomasse végétale est maximale. *Sp. alterniflora* atteignait alors une hauteur entre 14 cm et 31 cm.

Tableau 2 : Caractéristiques des stations V1 à V4. Un ADCP a été installé à la station V1 et trois houlographes ont été installés aux stations V2, V3 et V4.

Station	X MTM 7	Y MTM 7	Distance à partir de V2 (m)	Altitude à partir du zéro des cartes marines* (m)	Temps de submersion**	Commentaire
V1	391385,97	5327922,53	-3630,8	-2,4	100 %	
V2	393504,25	5324973,65	0,00	1,76	53,6 %	9 mètres devant les dernières zones de <i>Sp. alterniflora</i> .
V3	393740,80	5324767,51	313,8	2,43	34,9 %	Milieu du marais inférieur.
V4	393928,31	5324598,60	566,1	2,90	24,0 %	Sommet du marais inférieur.

\* À cet endroit, le niveau moyen de l'eau est situé à 2,4 m.

\*\* Le temps de submersion est défini comme étant la fraction du temps où il y a au moins 20 cm d'eau (hauteur des capteurs de pression au-dessus du sol durant l'expérience).

## Topographie

Un relevé topographique de la région a été accompli à l'aide d'un récepteur GPS de précision. Les mesures ont été réalisées le 12 septembre 2007 en une série de transects perpendiculaires à la côte, espacés de 200 m. Sur chacun d'eux, les mesures ont été faites à chaque

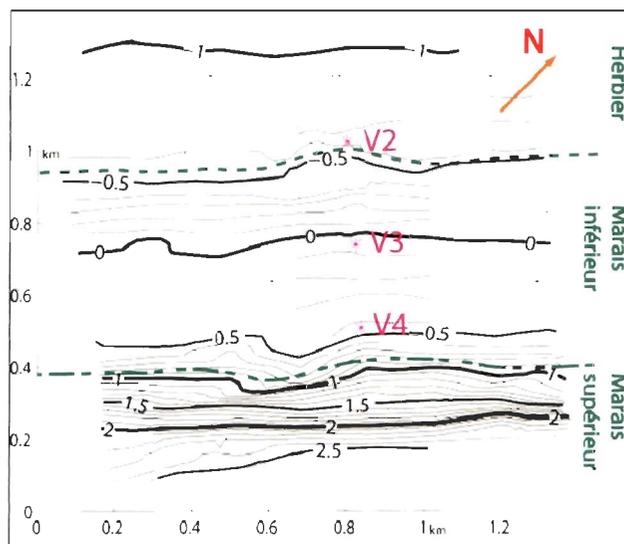


Fig. 3. Topographie de la grille 2 mesurée en 2007. Celle-ci est divisée en mailles de 35 m. Altitude en mètre à partir du niveau moyen de la mer qui est situé à 2,4 m au-dessus du zéro des cartes marines.

carte topographique a été réalisée à partir de ces points avec le logiciel *MATLAB* (Fig. 3). Cette carte est représentée numériquement par une matrice de 40 par 39 cellules carrées, dont chacune mesure 35 m de côté.

Pour la région située entre la côte et l'Île-Verte, une numérisation de la carte marine (Fig. 1) a été utilisée afin d'obtenir la position de points de sondage et des isobathes. La topographie est représentée numériquement par une matrice de 114 par 85 cellules de 70 m de côté. Toutefois, les isobathes n'étant pas des mesures directes, mais des résultats extraits d'analyse de données, la fiabilité de ceux-ci est incertaine. Il est possible que les données d'origine directement mesurées dans cette baie aient été peu nombreuses étant donné le manque d'accessibilité par voie maritime ou que la bathymétrie se soit modifiée depuis l'époque des relevés.

### **Mesures de la végétation**

Une première méthode pour caractériser la couverture végétale consiste à prélever des échantillons de la végétation présente dans le marais. Ceux-ci furent récoltés en deux séances, le 5 septembre et le 5 octobre. Cette collecte a été faite en déposant un cylindre de plastique (de 16,25 cm de diamètre intérieur) sur le marais et coupant au raz du sol les plantes se trouvant à l'intérieur. Pour chacune des huit stations (entre V2 et V4, veg1 à veg8), quatre échantillons ont été récoltés. Par la suite, ces plantes furent mesurées, séchées et pesées en laboratoire afin d'en connaître la biomasse et la densité des plantes par m<sup>2</sup>. La hauteur de la végétation a été définie comme étant la hauteur moyenne des 5 plus grandes plantes parmi chaque échantillon. Les moyennes des quatre répliqués ont été utilisées afin de caractériser la végétation de chaque station.

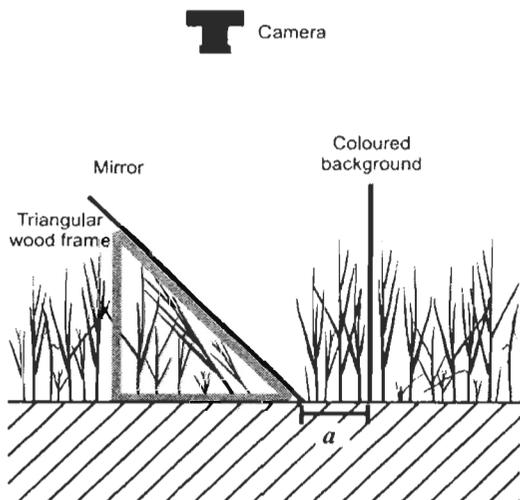


Fig. 4. Montage qui permet de photographier une section de la végétation afin d'en déduire l'obstruction volumique ( $m^2/m^3$ ) causée par la végétation.  $a = 10$  cm.

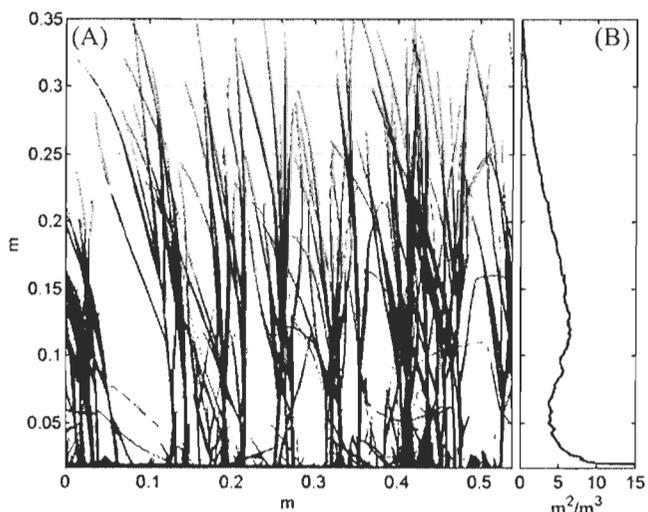


Fig. 5. (A) Exemple d'image binaire d'une section de la végétation (station veg4). (B) Obstruction volumique de la végétation calculée avec 2.1.

Tableau 3 : Caractéristiques des stations veg1 à veg8. L'altitude a été déterminée à partir du relevé topographique.

Station	X MTM 7	Y MTM 7	Distance à partir de V2 (m)	Altitude à partir du zéro des cartes (m)	Hauteur* (cm)	Biomasse** (g/m <sup>2</sup> )	Densité de plantes (plants/m <sup>2</sup> )
veg1	393540,73	5324939,80	49,8	1,94	26,8	67,98	4,22
veg2	393592,82	5324903,78	112,8	1,99	31,0	110,41	482
veg3	393647,29	5324846,50	191,4	2,19	26,1	176,35	579
veg4	393703,89	5324797,30	266,4	2,34	21,0	83,65	639
veg5	393760,39	5324748,10	341,3	2,52	21,8	101,13	675
veg6	393816,99	5324698,90	416,3	2,59	21,0	108,73	747
veg7	393873,59	5324649,70	491,3	2,78	18,4	130,45	856
veg8	393928,31	5324598,60	566,1	2,90	15,9	67,22	1290

\* La hauteur est définie comme étant la hauteur moyenne des 5 plus grandes plantes parmi chaque échantillon.

\*\* La biomasse a été pesée en laboratoire après que les plants aient été séchés.

Le principe de la seconde méthode est de prendre une photographie numérique de la végétation, devant un arrière-plan rouge, à l'aide du montage illustré à la Fig. 4 (Neumeier, 2005). Ce cliché illustre la distribution verticale de la couverture végétale sur une certaine épaisseur  $a$  (de 10 cm pour cette expérience). En utilisant un logiciel de traitement d'image (Image-Pro Express 6.0), les pixels de l'image qui composent la végétation ont été différenciés numériquement de ceux constituant l'arrière-plan. Chacune des photos a été convertie en image binaire de présence/absence de végétaux (Fig. 5). L'obstruction verticale volumique  $O$  a été extraite selon la hauteur (éq. 2.1), avec une résolution verticale de 2 mm pour chaque cliché. L'obstruction pour une station a été obtenue en faisant la moyenne des quatre répliqués.

$$O = -\frac{1}{a} \ln(1 - O_a)$$

$O$ : obstruction verticale volumique $[m^2/m^3]$ $a$ : distance en x sur laquelle l'obstruction a été mesurée [m] $O_a$ : obstruction verticale mesurée sur la distance $a$ [-]	2.1
---	-----

### Mesures des vagues.

Trois houlographes *TWR-2050* de la compagnie *RBR* ont été disposés le 3 septembre 2007 aux stations V2, V3 et V4 au niveau du marais inférieur (Fig. 1) et ils ont été récupérés le 5 octobre 2007. Ils ont mesuré la pression de l'eau à 20 cm au-dessus du sol, 4 fois par seconde (4 Hz) sur une période (burst) de 8,53 minutes (2048 mesures), et ce, à toutes les 30 minutes. Ces données sont utilisées pour calculer la variance spectrale  $E_n$  (éq. 2.3) des vagues. Les houlographes ont également mesuré toutes les 10 minutes la pression moyenne pendant une minute, fonctionnant comme un marégraphe. Afin de compenser le

temps de parcours entre les trois houlographes, un délai de 1'30" (temps de parcours moyen) a été instauré entre le début des bursts des trois houlographes, à partir de V2.

Une fois les données des houlographes téléchargées sur un ordinateur, celles-ci ont subi les analyses mathématiques pour extraire des informations sur les vagues :

1. D'abord, la série temporelle de la pression atmosphérique a été extraite des mesures de pression faites par les houlographes au moment où ils étaient hors de l'eau. La pression atmosphérique a été soustraite des mesures des houlographes afin d'avoir seulement la valeur de la pression causée par la hauteur de la colonne d'eau. Cette hauteur a alors été calculée en utilisant l'équation d'équilibre hydrostatique (éq. 2.2).

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho \quad \rightarrow \quad p = -g\rho z + p_{atm}$$

$z$ : profondeur (négatif vers le bas)[m] $p$ : pression [Pa] $g$ : accélération gravitationnelle [9,81 m/s <sup>2</sup> ] $\rho$ : densité de l'eau [1025 kg /m <sup>3</sup> ] $p_{atm}$ : pression atmosphérique [Pa]	2.2
--	-----

2. Chacune des séries de mesures du niveau de l'eau  $\eta(t)$  a subi une analyse spectrale de type « Fast Fourier Transform » (FFT) pour obtenir la variance spectrale  $E_n$  (éq. 2.3). Toutefois, les données de vagues ont été mesurées près du fond et la façon dont celles-ci sont atténuées de la surface vers le fond est différente selon la fréquence des vagues (éq. 2.4). Les analyses spectrales ont donc été corrigées pour les variances spectrales des fréquences inférieures à 0,5 Hz (éq. 2.5). Au-delà de 0,5 Hz, le facteur de correction est trop grand et le bruit électronique de l'appareil deviendrait par la suite trop important (Tucker et Pitt, 2001).

$$\eta(t, \vec{x}) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2E_n \Delta f_n} e^{i(2\pi f_n t - \vec{k}_n \cdot \vec{x})}$$

$\eta(t, \vec{x})$  : position de la surface par rapport au niveau moyen [m] à  $\vec{x}$   
 $\vec{x}$  : vecteur position  
 $f_n$  : n<sup>ième</sup> fréquence [Hz]  
 $E_n$  : variance spectrale à  $f_n$  [m<sup>2</sup> / Hz]  
 $\Delta f_n$  : différence entre  $f_n$  et  $f_{n-1}$  [Hz]  
 $\vec{k}_n$  : nombre d'ondes associé à  $f_n$  (éq.2.15) dans la direction de propagation

2.3

$$E_z(f_n, z) = \left[ \frac{\rho g \cosh[k_n(d-z)]}{\cosh[k_n d]} \right]^2 E(f_n)$$

$E_z(f, z)$  : variance spectrale mesurée à une profondeur  $z$  [Pa<sup>2</sup> / Hz]  
 $E(f)$  : variance spectrale à la surface  
 $d$  : profondeur totale de l'eau [m]

2.4

$$E_{corr}(f) = \left[ \frac{\cosh[k(d-z_h)]}{\cosh[kd]} \right]^{-2} E_{surf}(f)$$

$E_{corr}(f)$  : variance spectrale corrigée.  
 $E_{surf}(f)$  : variance spectrale de la surface calculée avec l'équation d'équilibre hydrostatique 2.2  
 $z_h$  : profondeur du houlographe

2.5

3. Afin de mieux résumer l'aspect des vagues, quelques paramètres utiles furent calculés à l'aide de la variance spectrale telles la hauteur significative  $H_{m0}$  (éq. 2.7) et la période moyenne  $T_{m01}$  (éq. 2.8).

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n E(f) df$$

$m_n$  : n<sup>ième</sup> moment du spectre d'énergie [m<sup>2</sup> • Hz<sup>n</sup>]

2.6

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$$

$H_{m0}$  : hauteur significative [m]  
 $m_0$  : moment 0 du spectre d'énergie [m<sup>2</sup>]

2.7

$$T_{m01} = m_0 / m_1$$

$T_{m01}$  : période moyenne [s]  
 $m_1$  : moment 1 du spectre d'énergie [m<sup>2</sup>•Hz]

2.8

Un ADCP *Workhorse Sentinel* (RD Instruments) 1200 kHz a été installé du 6 septembre au 9 octobre 2007 à la station V1 (Fig. 1). Cela permet donc de savoir quel a été l'aspect de la houle au large avant d'atteindre la zone intertidale. L'installation de l'ADCP s'est faite au même moment que les houlographes (du 3 septembre au 6 octobre 2007) et il mesurait la hauteur et la direction des vagues à une fréquence de 2 Hz, pendant 10 min à toutes les 30 min. L'analyse spectrale directionnelle a été faite en utilisant les logiciels *WaveMon* et *WaveView* (éq. 2.9).

$$\eta(t, \vec{x}) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{2E_{nm} \Delta f_n \Delta \theta_m} e^{i(2\pi f_n t - \vec{k}_{nm} \cdot \vec{x})}$$

$\eta(t, \vec{x})$ : position de la surface de l'eau par rapport au niveau moyen [m] $E_{nm}$ : variance spectrale à la fréquence $f_n$ dans la direction $\theta_m$ [ $\text{m}^2 / \text{Hz} / \text{deg.}$ ] $\Delta \theta_m$ : différence entre $\theta_m$ et $\theta_{m-1}$ [deg] $\vec{k}_{nm}$ : vecteur nombre d'ondes associé à $f_n$ (éq. 2.15) dans la direction $\theta_m$ .	2.9
--	-----

Dans le cas d'une variance spectrale directionnelle ( $E_{nm}$ ), les paramètres tels que  $H_{m0}$  (éq. 2.7) et  $T_{m01}$  (éq. 2.8) se calculent de la même façon, mais les moments du spectre d'énergie  $m_n$  (éq. 2.6) se calculent avec  $E_{mn}$  (éq. 2.10). De plus, il est possible d'utiliser  $E_{nm}$  pour calculer la direction de propagation moyenne (éq. 2.11, IAHR (1989)).

$$m_n = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f^n E(f, \theta) d\theta df$$

$E(f, \theta)$ : variance spectrale directionnelle [ $\text{m}^2 / \text{Hz} / \text{deg.}$ ]	2.10
---	------

$$\theta_{m01} = \arctan(m_{01}/m_{10})$$

$$m_{pq} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} E(f, \theta) k(f)^{p+q} \cos^p \theta \sin^q \theta d\theta df \quad 2.11$$

## 2.2 Modélisation

### Le modèle numérique SWAN

Le modèle SWAN (*Simulation of WAVes in Nearshore*, Booij et al. (1999)) est basé sur l'équation d'action qui décrit le comportement d'une oscillation quelconque dans l'espace :

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

<p><math>N(\sigma, \theta)</math> : densité d'action des vagues (<math>= \rho g \cdot E(\sigma, \theta) / \sigma</math>) [<math>J \cdot s / m^2</math>]  <math>E(\sigma, \theta)</math> : variance spectrale  <math>\sigma</math> : fréquence angulaire relative (par rapport au courant). [Hz]  <math>c_x, c_y, c_\theta, c_\sigma</math> : vitesses de propagation selon  <math>x, y</math> et <math>\theta</math> et la fréquence angulaire  relative <math>\sigma</math>  <math>S_{en}</math> : terme de sources d'énergie [<math>J/m^2</math>]</p>	2.12
---	------

Dans le cas de vagues, le terme de source ( $S_{en}$ ) inclut les phénomènes qui peuvent ajouter de l'énergie aux vagues (*wind growth*), en dissiper (*white capping, breaking, bottom friction*), transférer de l'énergie d'une fréquence à une autre (*nonlinear triad interactions, nonlinear quadruplet interactions, shoaling, courant*) ou transférer de l'énergie d'une direction à une autre (*diffraction, réfraction*). Chacun de ces processus est calculé de façon indépendante à partir des conditions du milieu. Booij et al. (1999) et Holthuijsen (2007) décrivent de façon détaillée les prémisses analytiques de ces processus ainsi que leur solution numérique utilisée dans SWAN. Ce modèle est écrit en *FORTRAN95* et est publié sous la *GNU Free Documentation License*. Le code source est disponible à l'adresse internet <http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>.

La Fig. 6 illustre un exemple des résultats d'une simulation effectuée avec SWAN, version 40.51. La grille de calcul s'étend sur une surface de 7,6 km par 4,7 km dans la baie de l'Île-Verte, autour de notre zone d'étude (Fig. 1). Les conditions hydrodynamiques (courants) ont été tirées du modèle STLE400 (Saucier et Chassé, 2000). La topographie du milieu a été obtenue par la méthode décrite précédemment et les conditions de vent mesurées à la station météorologique de l'Île-Rouge ont été obtenues d'Environnement Canada. Les conditions à la frontière NW ont été imposées avec la variance spectrale obtenue avec l'ADCP à 4h00 le 13 septembre 2007. En plus de la hauteur significative et la direction moyenne (représentée à la Fig. 6), il est aussi possible d'obtenir de SWAN d'autres paramètres ( $T_{m01}$ ,  $T_{m02}$ , l'énergie dissipée, la variance spectrale) qui permettent de caractériser la houle présente dans chacune des cellules de la grille.

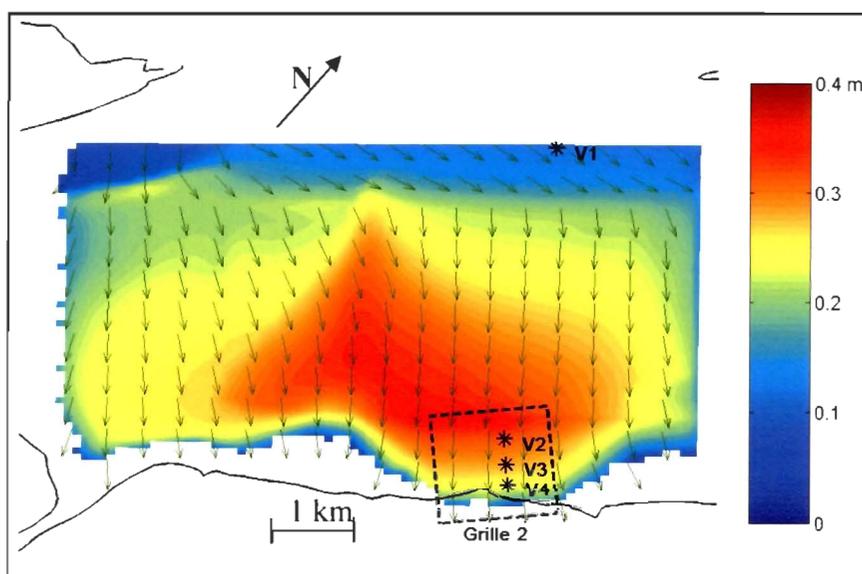


Fig. 6. Modélisation du comportement des vagues dans la grille 1 le 13 septembre 2007 à 4h00 avec les vagues mesurées en V1. Les mailles de la grille mesurent 100 m par 100 m. Les flèches indiquent la direction de propagation dominante et la couleur indique la hauteur significative. Les conditions à la frontière supérieure ont été imposées en utilisant les mesures de terrain de l'ADCP à la station V1. Par contre, les conditions varient le long de cette frontière en raison des ajustements faits par *SWAN* lors des différentes itérations de la modélisation.

### Interaction entre les vagues et la végétation.

Le principal phénomène qui se produit dans la végétation en présence de vagues est la force de traînée (Young et al., 2004) qui induit une dissipation d'une partie de l'énergie des vagues. Cette force de traînée se produit lorsqu'un objet est en mouvement par rapport à son milieu. La force  $\vec{F}_D$  (éq. 2.13) dépend 1° du coefficient de traînée, qui varie selon la morphologie de l'objet et le nombre de Reynolds; 2° de l'aire perpendiculaire au courant de l'objet; 3° du carré de la vitesse de l'eau. L'influence cette dernière est donc prédominante.

$$\vec{F}_D = -\frac{1}{2} C_D A \rho |\vec{u}| \cdot \vec{u}$$

$\vec{F}_D$ : force de traînée [N] $C_D$ : coefficient de traînée [-] $A$ : aire de l'objet, section perpendiculaire au courant [m <sup>2</sup> ]	2.13
--	------

Pour calculer la force de traînée, il est nécessaire de connaître la vitesse de l'eau au sein de la végétation. Les vagues induisent un mouvement orbital à l'eau et l'amplitude de ce mouvement diminue avec la profondeur. L'équation 2.14 décrit le comportement de la vitesse horizontale  $u$  et de la vitesse verticale  $w$  induites par la houle (Tucker et Pitt, 2001). Il est important de noter que l'amplitude de la vitesse décroît de façon exponentielle avec un coefficient proportionnel au nombre d'ondes  $k$ . Donc, la vitesse orbitale des vagues de période plus grande (nombre d'ondes plus petit) sera davantage présente au niveau du fond que celle des vagues de courtes périodes.

$$\eta = \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh[kd]} a \sin[kx - \omega t + \varphi]$$

$$u = \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh[kd]} a \omega \cos[kx - \omega t + \varphi]$$

$$w = \frac{\sinh(k(z+d))}{\sinh(kd)} a \omega \sin[kx - \omega t + \varphi]$$

$\eta$ : position verticale de l'eau. [m] $u$ : vitesse horizontale [m / s] $w$ : vitesse verticale. $k$ : nombre d'ondes ( $2\pi$ / longueur d'onde) $z$ : profondeur sous le niveau de l'eau (négatif vers le bas) $d$ : profondeur (positif). $\omega$ : fréquence angulaire ( $2\pi \cdot f$ ) $a$ : amplitude des vagues ( $H_{waves}/2$ ) [m] $\varphi$ : l'angle de déphasage [deg]	2.14
---	------

Dans le cas des vagues, le lien entre la fréquence angulaire  $\omega$  et le nombre d'ondes  $k$  est la relation de dispersion, bien connu, qui s'écrit :

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad 2.15$$

Le modèle SWAN est basé sur l'équation d'action (éq. 2.12), ce qui signifie qu'il est recommandé d'inclure une source  $S_{en}$  qui ne varie pas dans le temps sinon, cette source devra être incorporée à l'équation d'action sous sa forme spectrale. Afin d'éviter d'avoir à faire l'analyse spectrale de la force de traînée, origine de la dissipation de l'énergie des vagues, il est nécessaire de considérer la force de traînée de façon constante dans le temps; cela simplifie donc sa compatibilité avec les autres termes de l'équation 2.12. Le seul paramètre dans la force de traînée qui, dans le cas des vagues, varie avec le temps est la vitesse de l'eau. Cette vitesse fluctue de façon sinusoïdale. Celle-ci sera remplacée dans les calculs par une valeur de vitesse constante, la vitesse  $u_{rms}$  (*root mean square*). Le calcul est aisé pour une onde harmonique simple :

$$\sqrt{\langle u^2 \rangle} = u_{rms} = \frac{a\omega \cosh[k(z+d)]}{\sqrt{2} \sinh[kd]} \quad 2.16$$

Par contre, la valeur de  $u_{rms}$  est plus complexe à calculer si cette houle est composée de plusieurs ondes de fréquences et de directions différentes.

$$(u_{rms})^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\cosh^2[k(z+d)]}{g^2 \sinh^2[kd]} (2\pi f)^2 E(f, \theta) df d\theta \quad 2.17$$

$E(f,\theta)$  étant la variance spectrale directionnelle des vagues. Comme l'utilisation de cette équation risque d'être trop intensive en calcul dans le cadre d'une division verticale de la végétation,  $u_{rms}$  sera simplifié en considérant la houle comme étant une seule onde, celle qui est prédominante. Celle-ci est considérée comme étant une vague ayant une hauteur égale à  $H_{m0}$  (éq. 2.7) et une période  $T_{m0l}$  (éq. 2.8). Il suffit donc de prendre la formule 2.16 et de remplacer

l'amplitude  $a$  par  $H_{m0}/2$  et le nombre d'onde  $k$  par  $k_{m0l}$  (associé à la période  $T_{m0l}$ ). Cette approximation permettra donc d'avoir un profil de vitesse qui dépendra seulement de la hauteur verticale et non du spectre complet de vagues et de ses divisions de fréquences et de directions ( $df$  et  $d\theta$ ).

Pour calculer l'énergie dissipée par la végétation pour chaque fréquence, il faut multiplier l'équation de la force de traînée, force qui ne dépend pas de la fréquence, et la vitesse orbitale propre à chaque fréquence (éq. 2.18a). Le fait d'avoir une force de traînée qui est indépendante de la fréquence rend possible le calcul de la dissipation pour chacune des fréquences, car autrement, ce calcul serait difficile à faire de façon numérique. En effet, si la force de traînée dépendait d'une fréquence, la dissipation serait composée non seulement d'une partie propre à chaque fréquence (la dissipation pour une fréquence serait égale à la vitesse orbitale de cette fréquence multiplier par la force de traînée à cette même

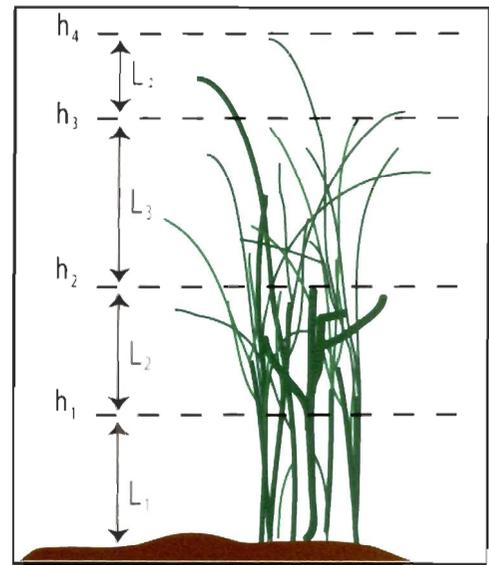


Fig. 7. Division verticale de la végétation en couches de  $L_1, L_2, \dots$  séparées aux hauteurs  $h_1, h_2, \dots$ . Les divisions sont établies aux endroits où la densité de la végétation change.

fréquence), mais aussi de dissipation résultant du produit de la force pour une fréquence et la vitesse orbitale des autres fréquences. Cela découle du fait que la force de traînée totale est la somme des forces de traînée de chaque fréquence ( $F_D = \sum_n F_D(f_n)$ ) et que la vitesse orbitale totale est la somme des vitesses de chaque fréquence ( $u_{total} = \sum_m u(f_m)$ ). La dissipation totale serait donc composée de deux sommations (éq. 2.18), ce qui introduirait des produits croisés (quand  $m \neq n$ ) difficiles à intégrer aux calculs de la dissipation.

La végétation est divisée verticalement en plusieurs couches avec, pour chacune, une densité végétale considérée comme étant homogène (Fig. 7). Nous calculons la dissipation séparément pour chaque fréquence et nous l'intégrons sur la hauteur de chaque couche (éq. 2.18b, les calculs détaillés sont présentés à l'Annexe A.).

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad \varepsilon_f(h) &= F_D(h) \cdot u_f(h) \\
 \text{(b)} \quad \varepsilon_f(L_i) &= \int_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{1}{2} \rho C_{D_i} A_i (u_{rms}(h))^2 \cdot u_f(h) dh
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

$\varepsilon_f$  : l'énergie dissipée [ J / s ]  
 $F_D$  : la force de traînée  
 $u_f$  : vitesse maximale pour les vagues  
de fréquence  $f$  (éq. 2.14) [ m / s ]  
 $h_i$  : hauteur d'une couche [ m ]  
 $u_{rms}$  : vitesse *rms* de l'eau [ m / s ]

En faisant la somme de la dissipation calculée dans chaque couche verticale, on obtient l'énergie dissipée pour chaque fréquence dans chaque cellule. Le coefficient de traînée ( $C_D$ ) est indéterminé et sa valeur sera définie expérimentalement lors de la calibration du modèle (section 2.3 et 3.3). L'aire perpendiculaire au courant ( $A_i$ ) est estimée comme étant égale à l'obstruction verticale volumique ( $O$ , éq. 2.1) moyenne dans la couche  $L_i$ . En faisant appel à l'équation d'action (éq. 2.12) utilisée par SWAN, il est possible d'intégrer sur l'ensemble de la surface du marais le nouveau terme de perte d'énergie causée par l'interaction entre les vagues et la végétation ( $S_{veg} = \varepsilon(f, \theta)$ ).

## Programmation

Le fonctionnement de SWAN peut se résumer en six étapes principales (Fig. 8):

1<sup>er</sup> lire les paramètres d'entrée (topographie, vent, courants, conditions aux frontières) ; 2<sup>e</sup> calculer le spectre de vagues initial dans chaque cellule; 3<sup>e</sup> calculer les sources et les pertes (dont la végétation); 4<sup>e</sup> calculer les nouveaux spectres de vagues en

tenant compte des sources et des pertes; 5<sup>e</sup> refaire les étapes 2 à 4 avec les nouveaux spectres pour chaque itération; 6<sup>e</sup> calculer les paramètres de sortie requis (ex. : hauteur significative, direction dominante, la période moyenne, etc.). Selon les exigences de l'utilisateur, SWAN peut fonctionner en mode stationnaire ou en mode non-stationnaire. En mode non-stationnaire, les étapes 2 à 4 sont répétées pour chaque pas de temps avec, possiblement, de nouvelles conditions environnementales. Dans le mode stationnaire, les étapes 2 à 4 sont répétées, avec les mêmes conditions, jusqu'à ce que la houle atteigne un certain état d'équilibre.

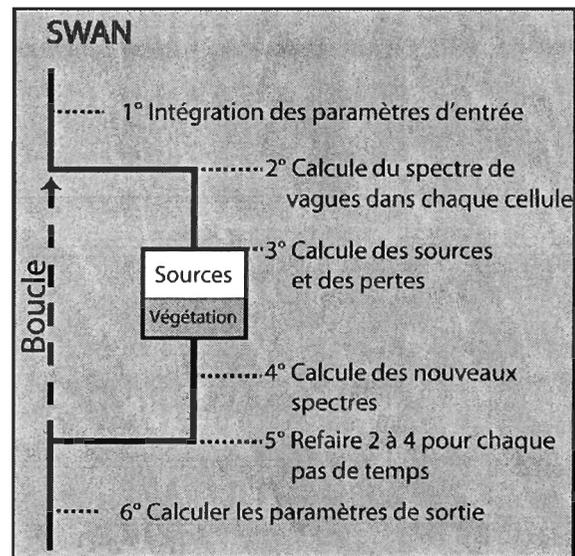


Fig. 8. Schéma du fonctionnement de SWAN pour les étapes 1 à 6. La routine de la végétation s'intègre aux calculs des différentes sources d'énergie à l'étape 3.

Avant de lancer une simulation, l'utilisateur doit préparer un fichier de commande. Ce fichier sert à définir la grille de calcul, les variables environnementales, les phénomènes physiques à calculer et leurs paramètres ainsi que les paramètres calculés à la sortie de la simulation. Le fichier de commande peut aussi contenir des références vers des fichiers

ASCII qui contiennent certains paramètres comme la bathymétrie. SWAN décode les différentes commandes en repérant les mots-clefs prédéfinis et leurs paramètres associés. Par exemple, « WIND [vel] [dir] » signifie que la simulation s'effectuera avec un vent de vitesse `vel` dans la direction `dir`. De même, la commande `CGRID` est utilisée afin de définir la taille de la grille de calcul, le nombre de divisions en x et en y, son angle par rapport au nord et le domaine de fréquence des vagues simulées.

La façon d'inclure la végétation dans une simulation, détaillée dans l'annexe B, est différente si celle-ci est constante partout sur la grille ou si elle est variable. D'une part, le mot-clef `VEGETATION` permet de définir les paramètres de la végétation sur l'ensemble de la grille. Ces paramètres sont le nombre de divisions verticales (`vegbn`), la hauteur (`vegh[:]`) et la constante de traînée (`vegcv[:]`) de chaque couche. D'autre part, si la végétation est variable sur la grille, il faut utiliser le mot-clef `INPgrid` suivi de du mot-clef secondaire `VEGETation`. Cette commande est utilisée afin de définir la grille d'entrée (le nombre et la taille des cellules, l'angle de la grille selon l'axe des x, etc.) des valeurs données aux paramètres de la végétation (`VEGH` et `VEGCV`). `INPgrid` est aussi utilisée pour établir la bathymétrie, le courant, le vent ou le niveau de l'eau, dans le cas où le niveau varie dans le domaine. Par la suite, la commande `READinp`, suivie encore par `VEGETation`, définit, entre autres, le nom du fichier qui contient les valeurs, dans quel ordre elles sont placées dans le fichier (`[idla]`) et leur format (ASCII ou binaire). En utilisant les mots-clefs `INPgrid` et `READinp`, il est donc possible de restreindre la zone de végétation à une partie du domaine et d'en faire varier la hauteur et la densité.

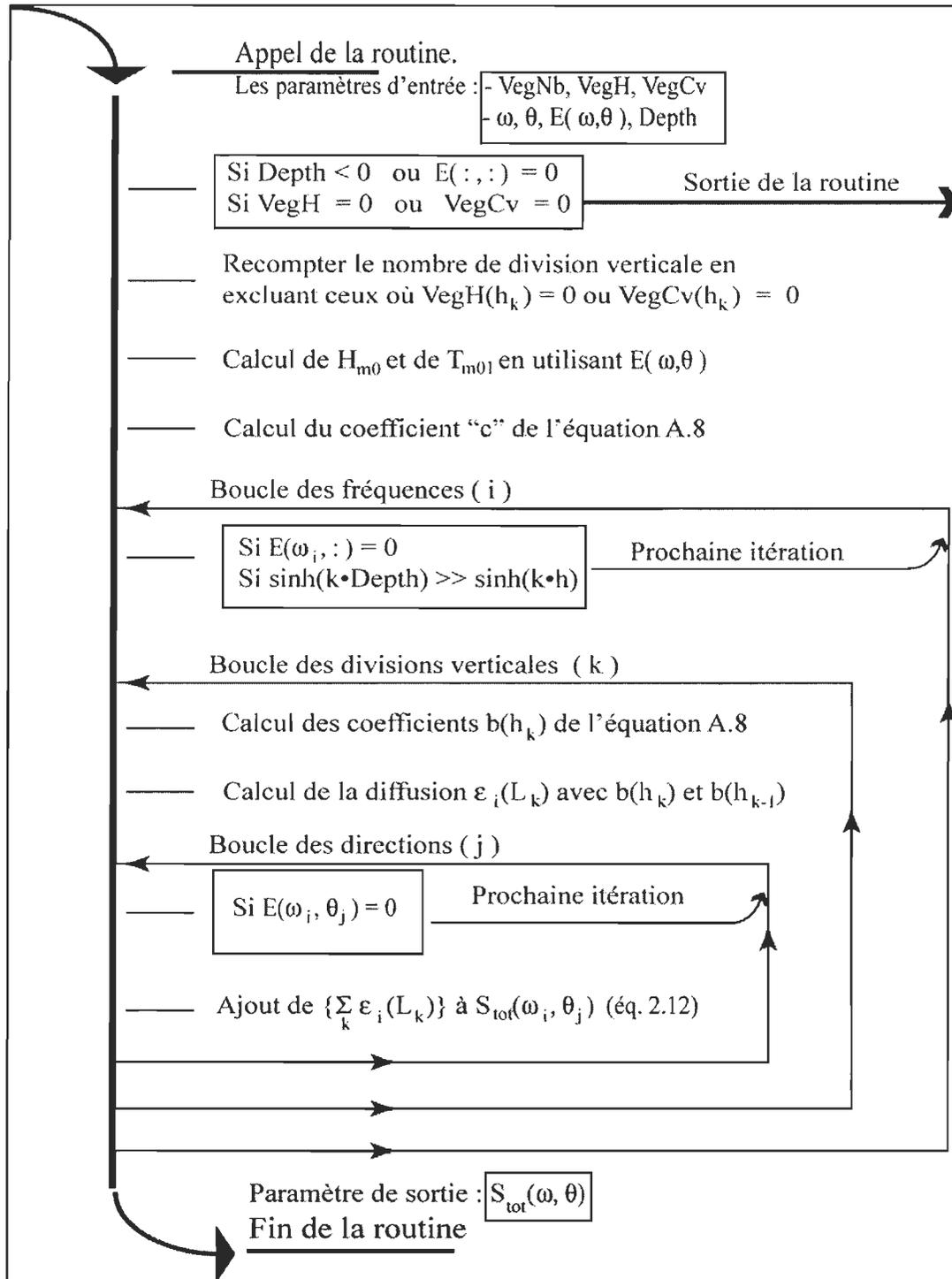


Fig. 9. Schéma du fonctionnement de la routine VegNL, qui modélise la dissipation par la végétation. Celle-ci prend en entrée les paramètres de la végétation (VegNb, VegH, VegCv) les paramètres de vagues ( $\omega$ ,  $\theta$ ,  $E(\omega, \theta)$ ) et la profondeur (Depth).

La nouvelle routine de la végétation VegNL (le code complet de la routine est en annexe C) s'applique séparément pour chaque cellule (Fig. 9). Pour que la routine soit appelée, il faut que la valeur de vegnb soit non-nulle; cela signifie qu'il y a de la végétation dans la simulation. La routine reçoit comme valeur d'entrée le spectre de vagues  $E(\omega, \theta)$ , la profondeur à ce point et les paramètres de chaque couche de végétation. La routine est optimisée afin d'éviter les calculs inutiles et pour cela, l'algorithme effectue des tests pour savoir si les calculs valent la peine d'être faits (présence d'eau, de vagues et de végétation à cet endroit).

Par la suite, les paramètres  $H_{m0}$  et  $T_{m01}$  sont calculés afin de remplacer le spectre complet par une vague unique dans les calculs de  $u_{rms}(h)$  (eq. 2.17). La première boucle est celle des fréquences. Encore là, l'algorithme contient des raccourcis qui permettent d'éviter des calculs inutiles. Dans le cas où il n'y a aucune énergie pour cette fréquence, les calculs s'interrompent et passent à l'itération suivante. Il en va de même dans le cas où, pour cette fréquence, l'eau est trop profonde pour que les vagues atteignent la végétation près du fond (si  $\sinh(k \cdot d) \gg \sinh(k \cdot h)$  éq. A.4).

Ensuite, arrive la boucle pour les différentes divisions verticales de la végétation. Les principaux calculs de la dissipation sont alors effectués étant donné que ceux-ci dépendent de la fréquence et de la hauteur. Pour la dernière boucle, celle des directions, il ne reste qu'à utiliser la variance spectrale  $E(\sigma_n, \theta_m)$  de la fréquence et dans la direction en question pour calculer la dissipation  $(\sum_k \varepsilon_i(L_k))$ . Cette dissipation peut alors être ajoutée à la

dissipation totale  $S_{tot}(\omega, \theta)$  calculée par SWAN. Après avoir comptabilisé tous les phénomènes qui influencent l'énergie des vagues, dans toutes les cellules du domaine, le modèle utilise le terme  $S_{tot}(\omega, \theta)$  pour calculer le spectre de vagues présent pour la prochaine itération.

### 2.3 Calibration et validation

Le principe de la calibration d'un modèle est de faire plusieurs simulations numériques en changeant certains paramètres de calibration, et ce, dans le but que la simulation numérique s'approche le plus possible des valeurs mesurées sur le terrain. Dans le cas présent, le paramètre qui doit être calibré est le coefficient de traînée ( $C_D$ ) qui est inconnu pour la végétation aquatique présente dans le marais. La variance spectrale des vagues est utilisée comme outil de comparaison. Les valeurs simulées seront comparées aux valeurs mesurées en utilisant la racine de la somme des carrés des différences (*rmse*) (éq. 2.19). Dans un premier temps, cette erreur a été calculée sur l'ensemble de l'échelle de fréquence, mais pour la suite de la calibration, ce calcul fût réduit à la variance spectrale des fréquences entre 0 et 0,5 Hz. Le but est donc de trouver une valeur de  $C_D$  qui donne une simulation avec une valeur *rmse* minimale.

$$rmse = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \right]^{1/2}$$

<p><i>rmse</i> : root mean square error  <math>N</math> : nombre total de valeurs discrétisées de variance spectrale  <math>y_i</math> : <math>i^{\text{ème}}</math> valeur de variance spectrale calculée par SWAN  <math>x_i</math> : <math>i^{\text{ème}}</math> valeur de variance spectrale mesurée sur le terrain</p>	2.19
---	------

Cette calibration a été faite pour un épisode de vagues importantes qui s'est produit du 23 septembre à 23h30 au 24 septembre à 1h30. Afin de vérifier si le modèle est fiable,

celui-ci a été validé en comparant les mesures de terrain aux vagues simulées pour les autres épisodes où les vagues étaient assez élevées pour se propager vers le marais. La hauteur significative  $H_{m0}$  et la période moyenne  $T_{m01}$  ont été utilisées pour comparer ces spectres.

Par contre, les appareils de mesure utilisés, des houlographes avec capteur de pression, détectent mal les vagues de hautes fréquences, car ils sont positionnés sur le fond où ces vagues sont peu perceptibles. Les mesures de terrain des vagues dont la fréquence est plus haute que 0,5 Hz sont peu fiables. En fait, le facteur de correction qui compense l'atténuation des vagues sur la verticale (éq. 2.5) serait trop important pour ces hautes fréquences et cela amplifierait de manière substantielle les bruits de l'appareil. Aussi, l'atténuation n'a pas été corrigée pour les fréquences supérieures à 5 Hz. De plus, les oscillations qui ont une fréquence plus petite que 0,04 Hz ont aussi été ignorées, car ils sont souvent dus à des effets de marées, ce qui est hors de notre champ d'étude.

Afin de comparer les données simulées avec des mesures fiables, la hauteur significative et la période moyenne seront calculées avec un domaine restreint de la variance spectrale  $E(f)$ . Par conséquent, pour valider le modèle, les énergies des vagues de fréquence plus élevée que 0,5 Hz ont été ignorées (éq. 2.20).

$$m_n^* = \int_{0,04}^{0,5} f^n E(f) df \quad 2.20$$

$$H_{m0}^* = 4\sqrt{m_0^*} \quad 2.21$$

$$T_{m01}^* = m_0^*/m_1^* \quad 2.22$$

Par la suite, les hauteurs de vagues simulées et les hauteurs mesurées sur le terrain seront comparées graphiquement en utilisant une courbe de tendance et l'indice de corrélation  $R^2$ . Dans le cas idéal, la pente de cette courbe s'approche de 1 et l'indice de corrélation se rapprochant le plus possible de 1. °

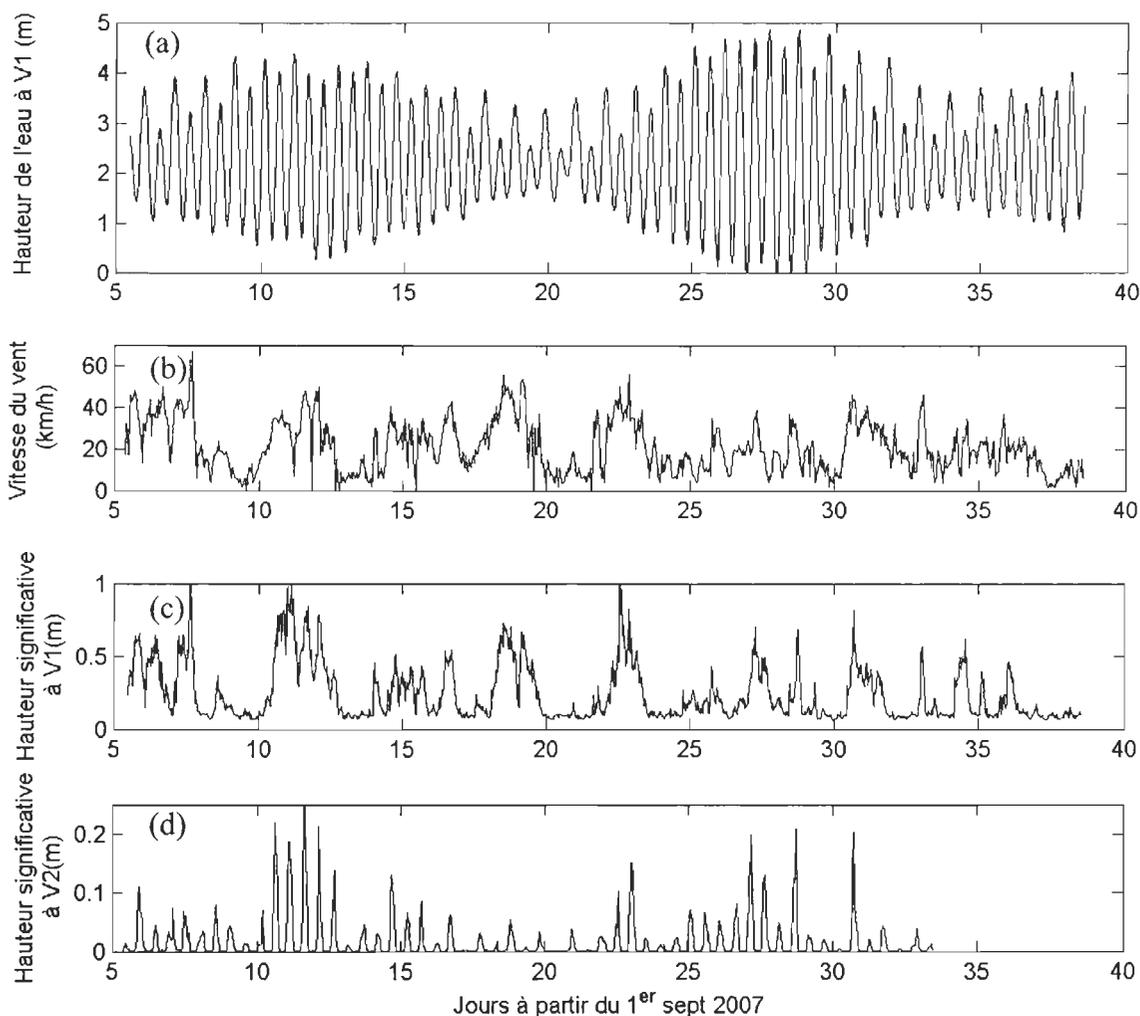


Fig. 10. Variables environnementales mesurées lors de l'expérience de terrain du 5 sept. au 9 oct. 2007. (a) Niveau de l'eau (à partir du zéro des cartes marines) mesuré par l'ADCP à V1. (b) Vitesse du vent mesurée par la station météorologique sur l'Île-Rouge. (c) Hauteur significative (éq. 2.7) mesurée par l'ADCP à V1. (d) Hauteur significative (éq. 2.7) mesurée par un houlographe à V2.

### 3. Résultats

#### 3.1 Mesures de terrain

Les mesures de terrain ont été effectuées du 5 septembre au 9 octobre 2007, durant deux cycles complets de marée de vive-eau / morte-eau (Fig. 10a). Au cours de cette période, la houle a atteint une hauteur significative de 1 m (Fig. 10c). Il y a un lien entre la force du vent et la hauteur des vagues; les épisodes de forts vents conduisent à des épisodes de grande houle (Fig. 10b-c). Par contre, la corrélation entre le vent et la hauteur significative des vagues est statistiquement significative ( $R^2 = 0,48$   $p < 0,01$ ). La Fig. 11 montre que lors des mesures des vagues, les vents provenaient majoritairement du sud-ouest. Une portion importante des vents viennent du nord-ouest, pratiquement dans la même direction que le transect V1-V4. La hauteur des vagues à la station V2 (Fig. 10d) est

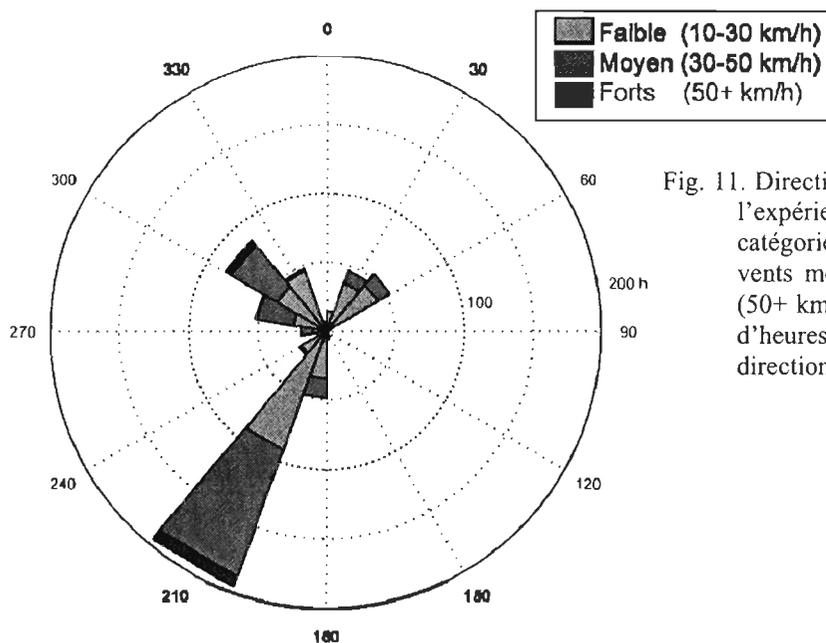


Fig. 11. Direction d'où proviennent les vents pendant l'expérience. Les vents sont séparés en trois catégories : les vents faibles (10-30 km/h), les vents moyens (30-50 km/h) et les vents forts (50+ km/h). L'axe radial représente le nombre d'heures où les vents étaient dans cette direction.

évidemment liée à celle mesurée à V1, mais aussi au cycle de marée, car V2 est hors de l'eau à marée basse.

Les stations où un houlographe a été déployé (V2 à V4) et celles où une analyse de la végétation a été faite (veg1 à veg8) se trouvent sur un même transect perpendiculaire à la côte (Fig. 1). Pour cette partie du transect, le sol possède une pente de 2,0 ‰ plutôt

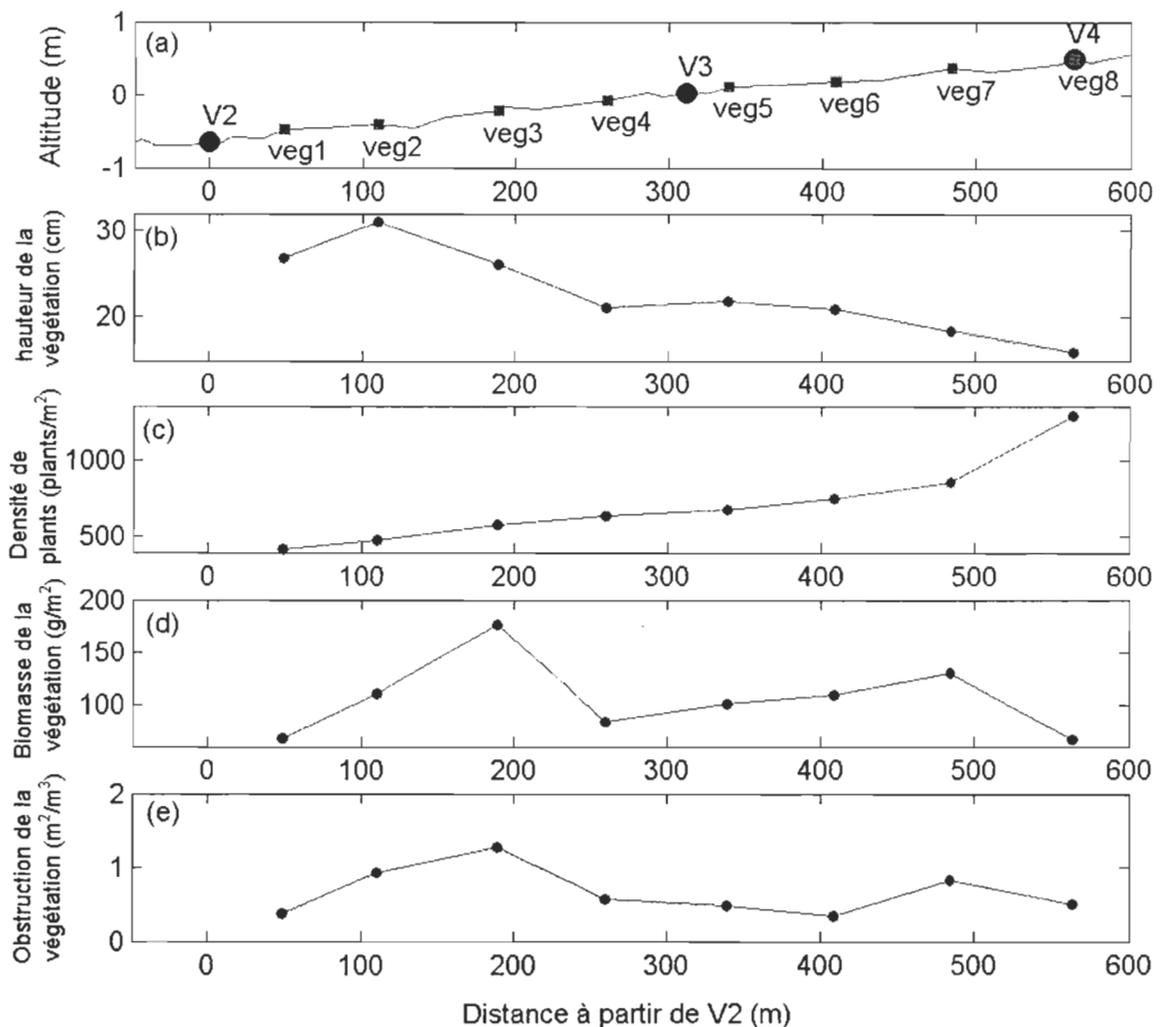


Fig. 12. Paramètres environnementaux mesurés le long du transect V2-V3-V4. (a) Altitude par rapport au niveau d'eau moyen. (b) Hauteur moyenne de la végétation. (c) Nombre de plants par  $m^2$ . (d) Biomasse de la végétation. (e) Obstruction verticale total causée par la végétation (éq. 2.1, intégrée sur la verticale).

régulière (Fig. 12a). La végétation de la batture est plus haute dans les zones les plus basses et plus petites dans les zones les plus élevées (Fig. 12b). Par contre, la densité de plantes est plus élevée dans les stations supérieures (Fig. 12c). Il y a donc une forte corrélation négative entre la hauteur des plantes et leur densité au sol ( $R^2 = 0,837$ ,  $p < 0,01$ ). Il n'y pas de tendance claire dans la distribution de la biomasse et le maximum se trouve à la station veg3 (Fig. 12d).

Les photos prises aux stations veg1 à veg8 ont permis d'obtenir la distribution verticale de l'obstruction causée par la végétation (Fig. 13). La distribution de l'obstruction de la végétation le long du transect montre (Fig. 12e) qu'il y a une corrélation entre

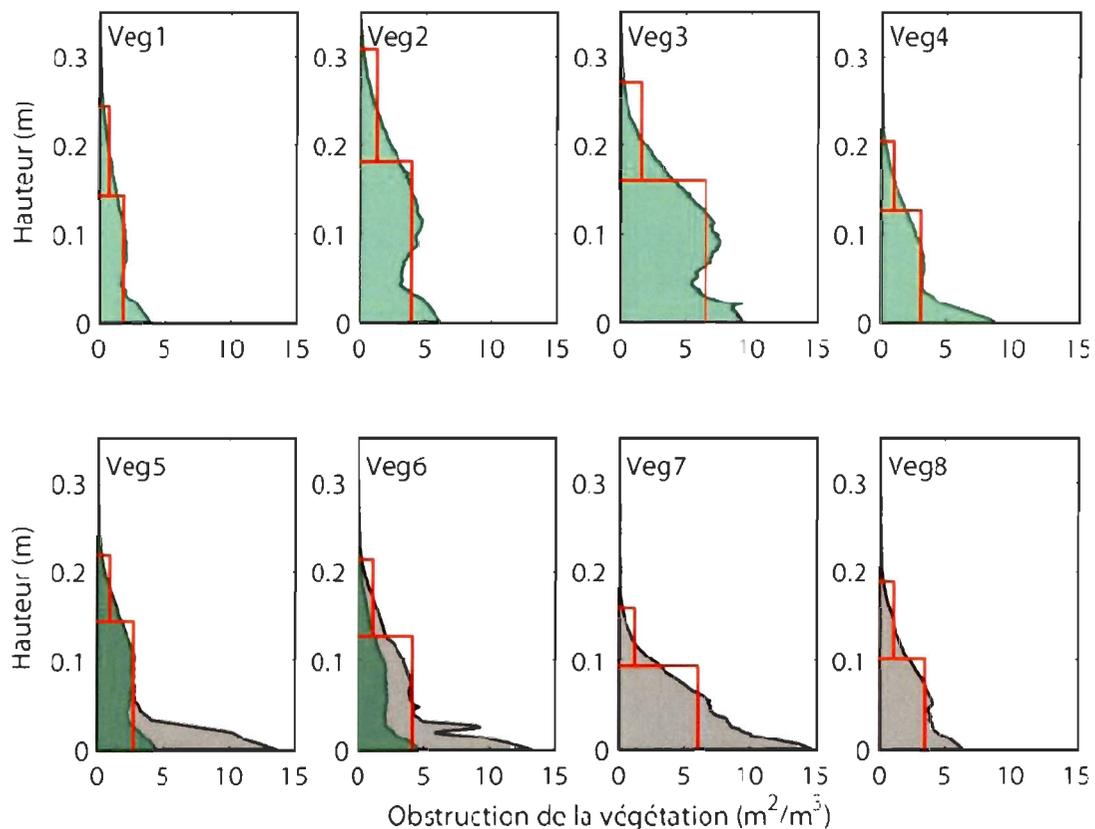


Fig. 13. Distribution verticale de l'obstruction mesurée à partir des photographies prises aux stations veg1 à veg8. Les courbes vertes représentent les mesures de terrain faites le 5 sept. 2007 et les courbes noires illustrent les mesures faites le 5 oct. 2007. La ligne rouge représente les deux couches d'obstruction utilisée pour la modélisation.

l'obstruction et la biomasse ( $R^2 = 0,6922$   $p=0,01$ ). Dans tous les cas, le maximum de l'obstruction se situe près du sol et pour les stations veg1 à veg6, il y a un deuxième maximum vers 8-12cm. Pour les stations veg5 et veg6, les mesures de l'obstruction ont été répétées à un mois d'intervalle et celles-ci sont plus élevées le 5 octobre que celles prises un mois plus tôt. Il est donc possible que l'obstruction de la végétation ait été légèrement plus élevée à la fin de l'expérience qu'au début. Pour la modélisation, la végétation a été simplifiée en deux couches avec pour chacune, la valeur moyenne de l'obstruction mesurée. Pour les stations veg5 et veg6, les valeurs des couches ont été calculées à partir des mesures du 5 octobre afin d'avoir une certaine cohérence avec les stations veg7 et veg8, qui se situent également entre V3 et V4.

Les houlographes ont fait la mesure des vagues à chaque demi-heure tout au long de l'expérience. Durant cette période, les périodes de forte houle sont d'un plus grand intérêt. Par exemple, les données prises le 13 septembre 2007 à 4h00 montrent la progression de vagues en provenance du nord-ouest (Fig. 14) de la station V1 jusqu'à la station V4. Les vagues proviennent du nord-ouest ( $324,8^\circ$ ), ce qui se rapproche de la direction des vents qui arrivent avec un angle de  $300^\circ$ . La houle possède donc un bon angle pour que sa propagation se fasse dans la même direction que le transect V1-V4. Lors de son cheminement, la hauteur significative de la houle en V1 est plus faible qu'en V2 (Fig. 15). Par la suite, celle-ci diminue au fur et à mesure qu'elle perd de l'énergie entre V2 et V4. De plus, de V1 à V4, la fréquence moyenne des vagues augmente, car les vagues de basse fréquence sont plus fortement atténuées que celles de haute fréquence.

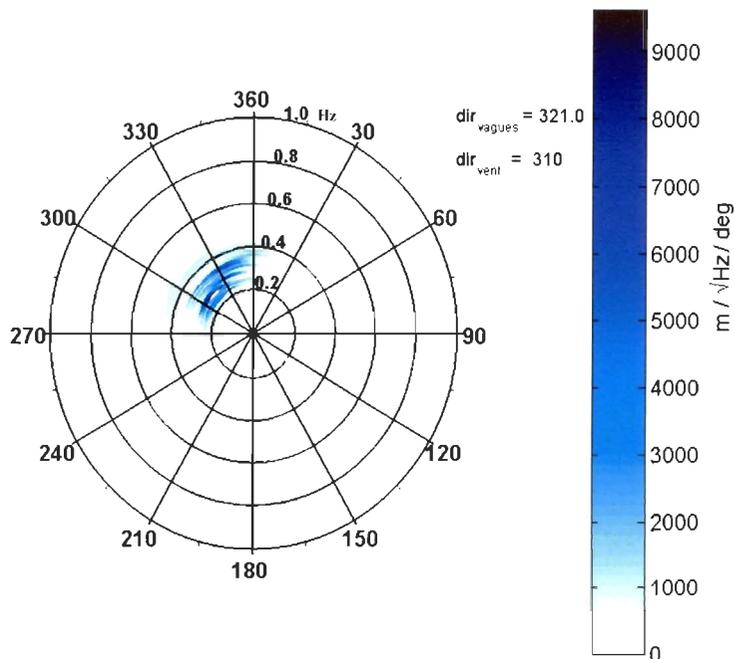


Fig. 14. Spectre directionnel des vagues mesurées en V1 le 13 septembre 2007 à 4h00 (HM). La direction des vagues ( $dir_{vagues}$ ) est définie avec l'éq. 2.11 et celle des vents ( $dir_{vent}$ ) a été mesurée à la station météo de l'Île-Rouge.

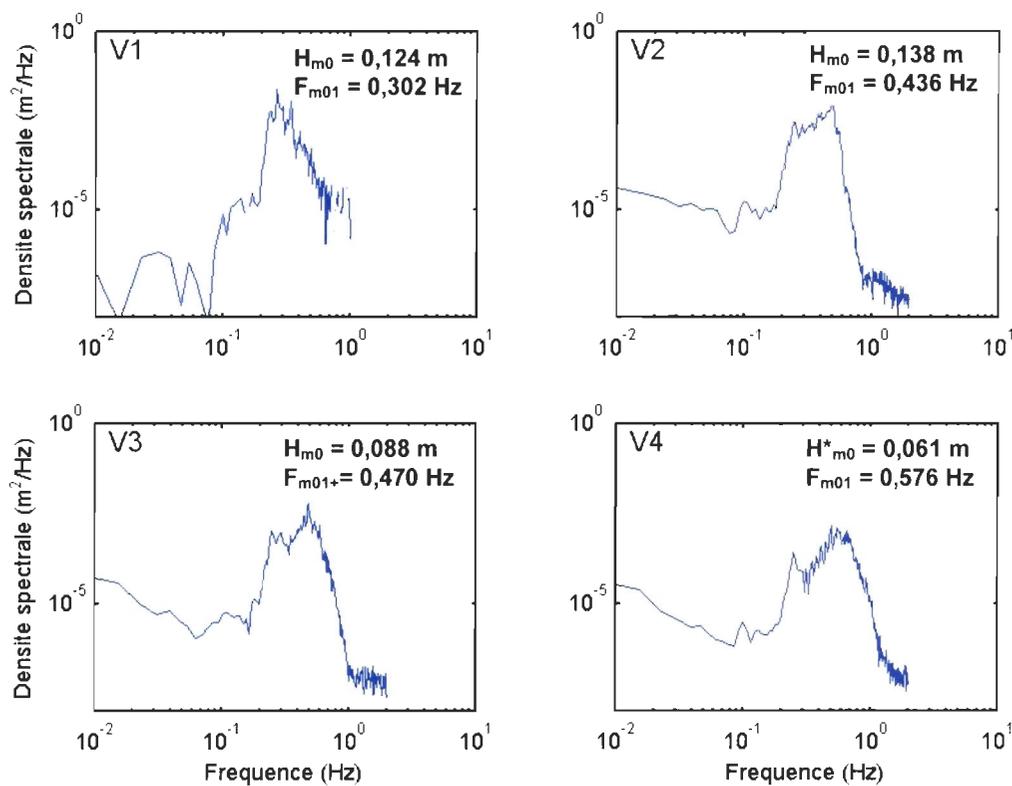


Fig. 15. Spectre de vague pour les stations V1, V2, V3 et V4 et hauteur significative (éq. 2.7) pour les mesures faites le 13 septembre 2007 à 4h00. La fréquence moyenne  $F_{m01}$  est définie comme étant  $1/T_{m01}$  (éq. 2.8).

Tableau 4 : Caractéristiques des vagues mesurées pour une sélection des bursts de l'expérience de terrain (cf. texte).

Burst	Date	V1				V2		$\alpha$ V2-V3 * (m)	V3		$\alpha$ V3-V4 * (m)	V4	
		Hauteur d'eau	H <sub>m0</sub>	F <sub>m01</sub>	Dir	H <sub>m0</sub>	F <sub>m01</sub>		H <sub>m0</sub>	F <sub>m01</sub>		H <sub>m0</sub>	F <sub>m01</sub>
30	06 sept 23:30	3,73	0,067	0,340	254	0,098	0,487	764	0,065	0,522	853	0,045	0,641
105	08 sept 13:00	3,225	0,091	0,283	322	0,062	0,463	608	0,037	0,579	240	0,010	1,013
155	09 sept 14:00	3,424	0,048	0,461	74	0,079	0,525	657	0,049	0,634	210	0,011	0,980
254	11 sept 15:30	4,033	0,082	0,335	66	0,184	0,448	967	0,133	0,465	666	0,083	0,523
278	12 sept 03:30	4,364	0,233	0,163	14	0,175	0,286	1176	0,134	0,306	912	0,095	0,355
303	12 sept 16:00	3,996	0,143	0,262	310	0,210	0,425	747	0,138	0,470	974	0,100	0,511
327	13 sept 04:00	3,863	0,124	0,302	321	0,126	0,436	590	0,074	0,470	403	0,034	0,576
352	13 sept 16:30	4,154	0,044	0,399	237	0,138	0,484	462	0,070	0,503	1128	0,053	0,556
450	15 sept 17:30	3,977	0,049	0,314	309	0,111	0,446	1080	0,083	0,486	3096	0,075	0,540
474	16 sept 05:30	3,479	0,036	0,397	309	0,057	0,490	683	0,036	0,601	418	0,017	0,869
499	16 sept 18:00	3,741	0,057	0,354	265	0,088	0,504	468	0,045	0,551	774	0,030	0,705
548	17 sept 18:00	3,698	0,060	0,346	297	0,050	0,467	755	0,033	0,535	518	0,018	0,675
824	23 sept 12:30	2,796	0,079	0,348	313	0,051	0,599	335	0,020	0,895	105	0,001	0,806
849	24 sept 01:00	3,699	0,063	0,352	317	0,152	0,440	848	0,105	0,492	774	0,070	0,581
973	26 sept 15:00	3,963	0,022	0,389	13	0,051	0,378	2125	0,044	0,397	3292	0,040	0,427
1022	27 sept 15:30	3,491	0,012	0,527	61	0,062	0,460	-1921	0,073	0,490	3659	0,067	0,520
1047	28 sept 04:00	3,378	0,057	0,380	18	0,167	0,419	4208	0,155	0,445	1267	0,121	0,464
1071	28 sept 16:00	3,718	0,053	0,239	29	0,114	0,287	1541	0,093	0,348	1923	0,079	0,328
1220	01 oct 18:30	3,469	0,067	0,344	249	0,076	0,452	4611	0,071	0,499	1552	0,058	0,527

\*  $\alpha$  est la distance pour que la hauteur significative ait diminué d'un facteur  $e^1$  (2,7183) calculée entre les deux stations (distance d'atténuation).

Le Tableau 4 montre les caractéristiques des vagues mesurées par l'ADCP et les trois houlographes à certains bursts lors de l'expérience de terrain. Ces bursts sont tous sensiblement aux mêmes heures de marée, soit HM-2 (deux heures avant la marée haute); le plus souvent, c'est à ce moment que les vagues étaient les plus présentes. Dans tous les cas, la hauteur significative est plus petite à V1 qu'à V2. Ce phénomène peut être dû à l'augmentation de la hauteur des vagues lorsque le train d'ondes arrive dans une zone moins profonde (*shoaling*). Ce phénomène est généralement bien modélisé par *SWAN*, comme le montre la Fig. 6 où la hauteur des vagues augmente lors de leurs progressions vers la rive. Par contre, la hauteur des vagues diminue de V2 à V4 avec différente atténuation, sauf pour le burst 1022 où les vagues sont plus hautes à V3 qu'à V2. La distance d'atténuation est la distance pour que la hauteur significative ait diminué d'un facteur  $e^1$  (2,7183), calculée entre les deux stations en supposant que l'atténuation des vagues se fasse de façon exponentielle:

$$H_{m0}(b) = H_{m0}(a) e^{-x/\alpha}$$

$\alpha$ : distance d'atténuation entre les stations $a$ et $b$ $x$ : distance en mètre à partir de $a$ vers la station $b$ $H_{m0}(a)$ : Hauteur significative à la station $a$	3.1
--	-----

En ayant les hauteurs significatives à la station V2 et V3, il est possible de calculer la distance d'atténuation  $\alpha$  :

$$\alpha = x \cdot \left[ \ln \left( \frac{H_{m0}(a)}{H_{m0}(b)} \right) \right]^{-1} \quad 3.2$$

La distance d'atténuation  $\alpha$  varié de 335 m à 4611 m (médiane de 764) entre les stations V2 et V3 (sauf pour le burst 1022 où  $\alpha$  est négatif) et elle varie de 105 m à 3659 m (médiane de 853) les stations V3 et V4. Le fait que l'atténuation du burst 1022 soit négative indique que lors de leur progression, la hauteur significative des vagues a augmenté. Cela peut être dû à la direction de cette progression qui ne se situe pas dans l'axe du transect; les vagues arrivent à 60° à V1 alors que le transect est orienté à 300°. Les vagues à V3 ne sont pas les mêmes que celles qui sont passées par V2. La fréquence dominante est, le plus souvent, plus basse à V1 et elle va en augmentant vers V4.

### 3.2 Modélisation sans l'effet de la végétation

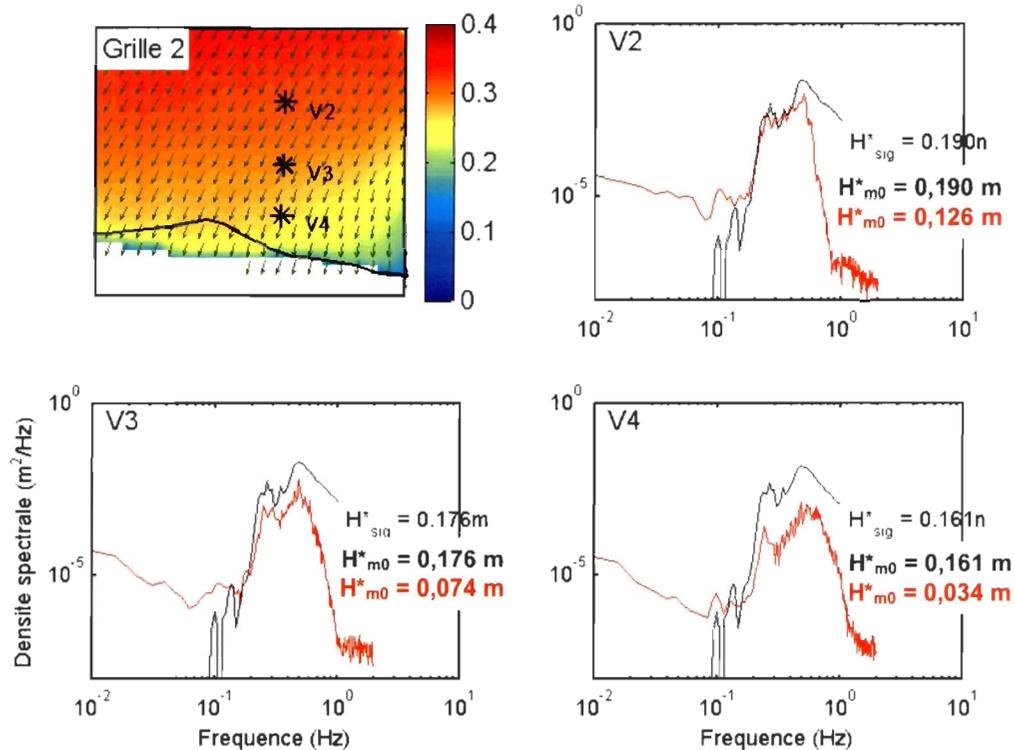


Fig. 16. Modélisation du 13 septembre 2007 à 4h00 (HM). La carte de la grille 2 illustre la hauteur significative et la direction obtenue lors de la simulation sur l'ensemble de la zone. Les mailles de la grille mesurent 50m par 25m. La courbe noire représente les résultats modélisés et la courbe rouge représente les résultats mesurés.

Une première série de modélisations a d'abord été faite sans considérer la végétation. La Fig. 16 illustre plus précisément les résultats de la modélisation des vagues présentes le 13 septembre 2007 à 4h00 (Fig. 6). Dans ce cas, la direction de propagation est pratiquement la même que pour le transect V2-V4. La hauteur des vagues modélisées (calculée sans les énergies des vagues de plus de 0,5 Hz, éq. 2.21 et des vagues de moins de 0,04 Hz, cf. section 2.3) diminue légèrement à l'approche du rivage, mais la majorité de l'énergie se dissipe au-delà de V4, dans la partie la plus rapprochée de la côte. En comparant le spectre de vagues mesuré en V2 et celui simulé

au même endroit, ceux-ci concordent pour les fréquences entre 0,1 Hz et 0,5 Hz. Pour les fréquences plus basses, les données mesurées dépassent légèrement celles simulées et pour les plus hautes fréquences, les données mesurées sont en deçà des valeurs prévues par le modèle SWAN. Au total, la simulation surestime la hauteur des vagues d'un facteur de 1,7. Pour les stations V3 et V4, la différence entre les deux courbes s'accroît davantage; l'énergie simulée par le modèle est pratiquement toujours plus élevée que celle mesurée. La surévaluation de la hauteur significative passe à la station V3 à un facteur de 2,9 et de 5,7 à V4.

Le Tableau 6 représente, en résumé, la modélisation de plusieurs bursts. Les bursts modélisés ont été choisis en raison de leur direction de propagation (entre 300° et 360° à V1), pour qu'elle soit proche de la direction du transect V1-V4, et aussi de leur hauteur significative (au-dessus de 5 cm à V4), pour que l'atténuation des vagues soit perceptible. Pour toutes les stations, la hauteur significative simulée sans végétation est toujours plus élevée que celle mesurée par les houlographes et l'écart entre les deux va en augmentant en s'approchant de la berge.

La corrélation ( $R^2$ ) entre les hauteurs significatives mesurées et celles simulées sans végétation est meilleure pour la station V2 (Fig. 22). C'est aussi à cette station que la pente de la courbe qui relie les deux séries de hauteurs significatives est le plus près de 1 ( $m = 1,66$ ). Pour les stations V3 et V4 cette pente va en augmentant pour atteindre 3,03 à la station V4. Et c'est aussi à la station V4 que la corrélation entre les valeurs mesurées et celles simulées sans végétation est la moins bonne.

### 3.3 Calibration

Pour la calibration de la fonction VEGNL, les simulations ont été calculées sur une partie de la grille 2 seulement avec les mesures effectuées à la station V2 (Fig. 17). Ainsi, la différence entre les simulations avec la grille normale et les mesures à V2 (Fig. 16 et Tableau 6) ne sera pas prise en considération, car ces erreurs ne sont pas dues à la

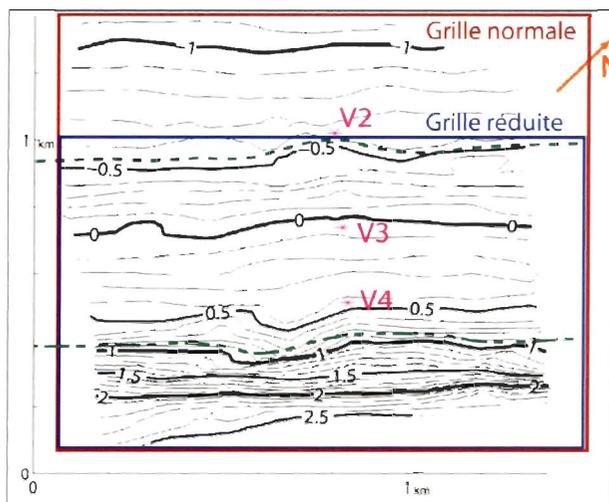


Fig. 17. Disposition des deux grilles de calculs. La grille réduite utilise les données enregistrées à la station V2 comme conditions à la frontière supérieure. La grille normale utilise les données simulées par la modélisation de la grille 1 (Fig. 1). Cette dernière utilise les données de la station V1 comme conditions à la frontière supérieure.

végétation. Ces erreurs sont considérées comme étant intrinsèques au modèle et elles ne doivent pas être compensées par la calibration de la végétation. Les séquences (bursts) qui ont été choisies sont celles qui s'étendent du 23 septembre à 23h30 au 24 septembre à 1h30 (burst 846 à 850, jour 23 sur la Fig. 10). Durant cette période, les vagues ont atteint une hauteur significative de 13,4 cm à V2, ce qui est suffisant pour détecter la dissipation générée par la végétation. Cet épisode se situant entre les heures de marée HM-1 et HM+1.

La Fig. 18 illustre les spectres des stations V3 et V4 des 5 bursts utilisés pour la calibration avec, pour chacune, les mesures de terrain, les simulations sans végétation et celles avec la végétation. Par contre, pour le burst 846, la propagation des vagues de la

station V3 vers V4 ne sera pas prise en compte, car l'énergie des vagues se situe principalement au-dessus de 0,5 Hz. Cette portion du spectre est difficile à mesurer par les houlographes (les houlographes sont situés près du fond et les vagues de courtes périodes y sont pratiquement imperceptible, cf. section 2.3) et il est préférable de ne pas calibrer le modèle avec ces vagues. Dans l'ensemble, la calibration tend à rapprocher grandement les données de terrain des simulations. Bien qu'à plusieurs reprises les hauteurs significatives de données mesurées et de celles simulées soient différentes, la forme du spectre de vagues concorde entre la fréquence 0,1 et 0,5 Hz. Par contre, le spectre à la station V4 ne coïncide que pour une petite partie du spectre pour les bursts 847, 849 et 850. Il y a donc une bonne partie du spectre dont l'énergie est sous-estimée.

Pour ce qui est des valeurs du coefficient de traînée ( $C_D$ ) obtenue lors de ces calibrations (Tableau 5), celles-ci sont plus élevées au début et à la fin pour la station V3. A la station V4, au contraire, le  $C_D$  maximum se situe plutôt au centre (848). Les valeurs des coefficients de traînée qui sont utilisées pour valider le modèle sont donc les moyennes de celles obtenues lors de la calibration. Pour la végétation entre V2 et V3,  $C_D$  est donc 0,0637 et 0,235 pour la partie entre V3 et V4.

Burst	$C_D$ calibré pour la section V2-V3	$C_D$ calibré pour la section V3-V4
846	0,0688	-
847	0,0759	0,236
848	0,0491	0,354
849	0,0488	0,185
850	0,0760	0,168
<b>Moyenne</b>	<b>0,0637</b>	<b>0,235</b>

Tableau 5 :  $C_D$  obtenu lors de la calibration des bursts 846 à 850.

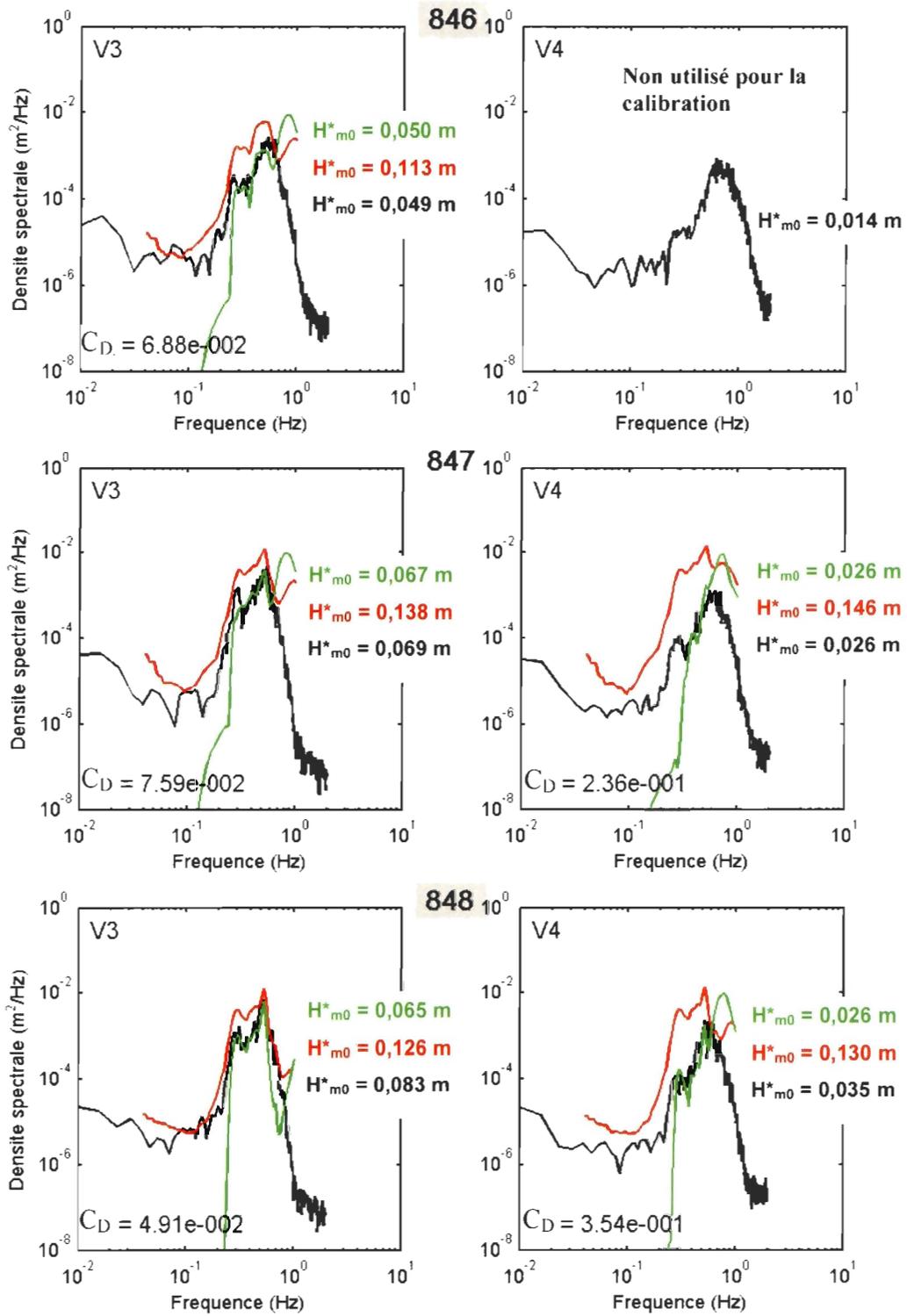


Fig. I8. (début)

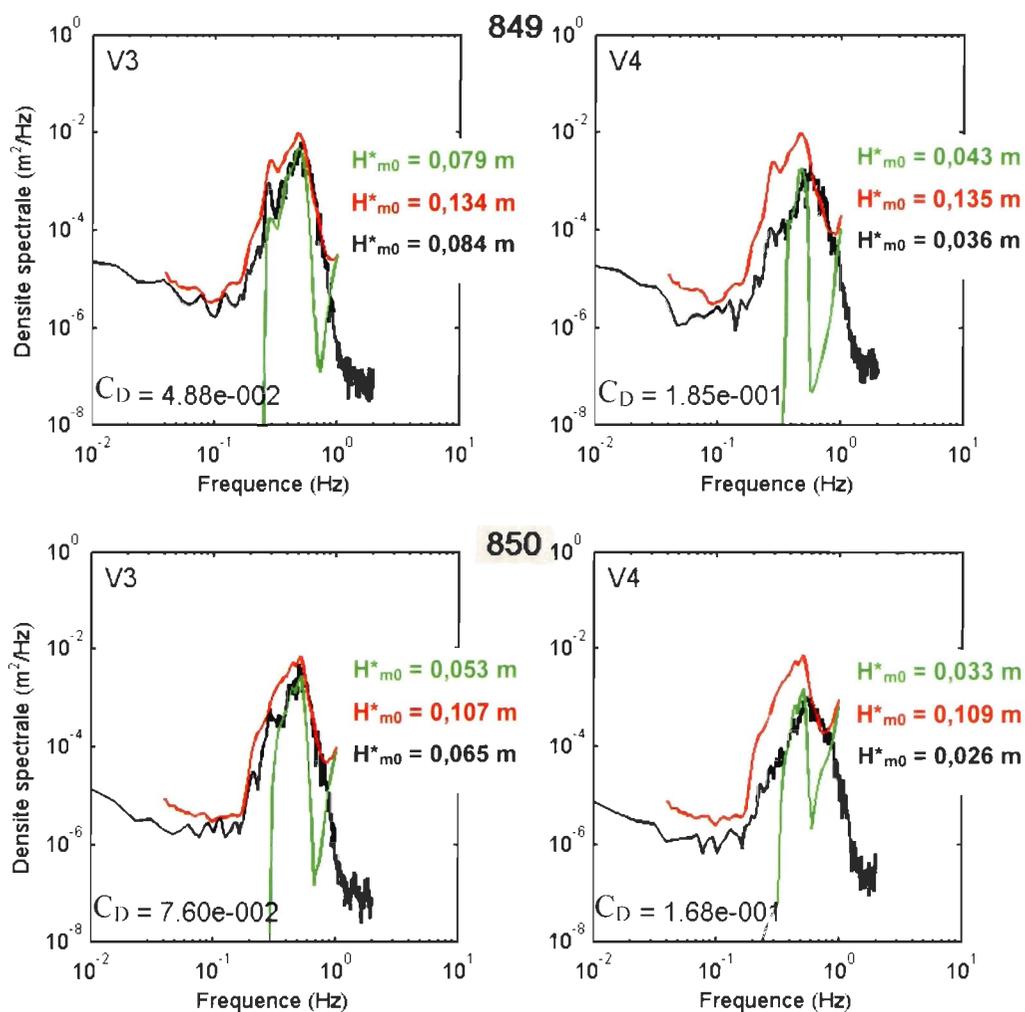


Fig. 18. Burst 846 à 850 (du 23 septembre à 23h30 au 24 septembre à 1h30) utilisés pour calibrer le modèle avec la végétation. Les courbes noires illustrent les mesures de terrain, les courbes rouges illustrent les simulations sans végétation et les vertes illustrent les simulations avec la végétation calibrée. Les valeurs de  $C_D$  donnent les valeurs du coefficient de traînée utilisées pour la portion qui précède la station.

### 3.4 Validation

#### Domaine réduit

Pour valider le modèle, tous les bursts du Tableau 6 ont été utilisés à l'exemption des bursts 846 à 850 qui ont été utilisés pour calibrer le modèle. Pour une première validation, les simulations ont été faites en utilisant la grille réduite du marais (Fig. 17) et les données mesurées à la station V2 ont été utilisées comme conditions à la frontière supérieure. En utilisant comme exemple la période du 13 septembre 2007 à 4h00 (Fig. 19), l'écart entre la simulation et les mesures de terrain est considérablement réduit lorsque la végétation est incluse dans les calculs. La hauteur significative est donc passée de 0,100 m à 0,054 m à la station V3 et elle est passée de 0,099 m à 0,033 m à la station V4.

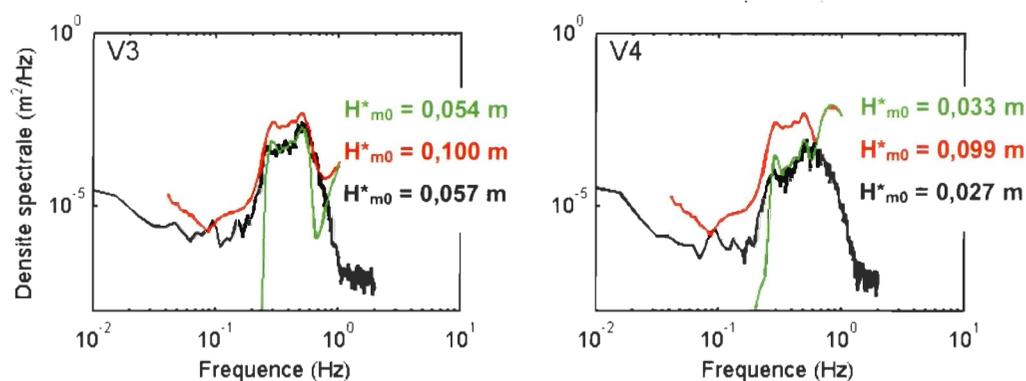


Fig. 19. Modélisation du 13 septembre 2007 à 4h00 (HM) en considérant la végétation et en utilisant la grille réduite (Fig. 17). La courbe noire représente les résultats mesurés, la courbe rouge les données simulées sans végétation et la courbe verte les données simulées en considérant la végétation.

La Fig. 20 illustre graphiquement la relation entre les valeurs mesurées et celles simulées. La station V2 n'est pas illustrée ici, car par définition, la hauteur significative simulée est égale à la hauteur significative mesurée; les simulations ont été faites avec la grille réduite (Fig. 17). À la station V3, la pente de la courbe de tendance était de 1,48 et elle passée à 1,08 avec l'ajout de la végétation. De plus, le coefficient de détermination  $R^2$  est passé de 0,873 à 0,902. À la station V4, la pente de la courbe de tendance était de 2,16 et elle passée à 1,35 avec l'ajout de la végétation. De la même façon qu'à V3, le coefficient de détermination  $R^2$  à la station V4 est passé de 0,513 à 0,902.

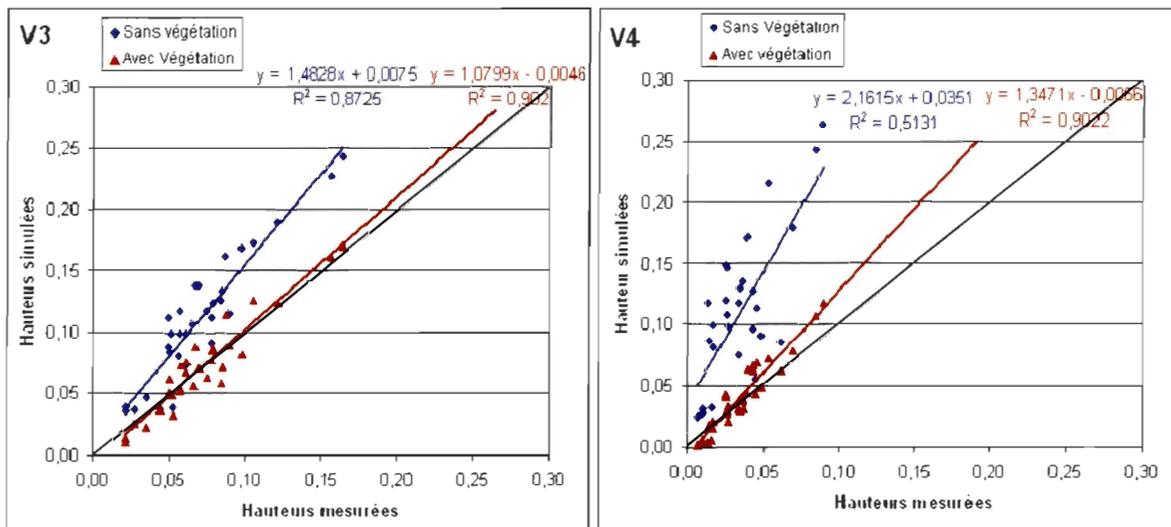


Fig. 20. Comparaison entre les hauteurs significatives mesurées et simulées avec la grille réduite, avec ou sans la végétation, pour les stations V3 et V4.

## Domaine large

Afin de mieux évaluer l'efficacité de l'ensemble du modèle, une simulation a été faite en utilisant la grille 2 avec les conditions à sa frontière déterminée par les simulations de la grille 1 qui elle a les mesures de la station V1 comme conditions frontière. La Fig. 21 illustre les vagues simulées pour la période du 13 septembre 2007 à 4h00 avec les trois courbes (valeurs mesurées, simulées seul et simulées avec végétation). En comparaison avec la carte de la Fig. 16, en présence de végétation, la hauteur significative diminue plus graduellement à l'approche de la côte. Évidemment, le spectre de vagues reste inchangé à la station V2, car le marais salé débute après cette station. Les vagues ne rencontrent donc aucune végétation avant d'arriver à cette

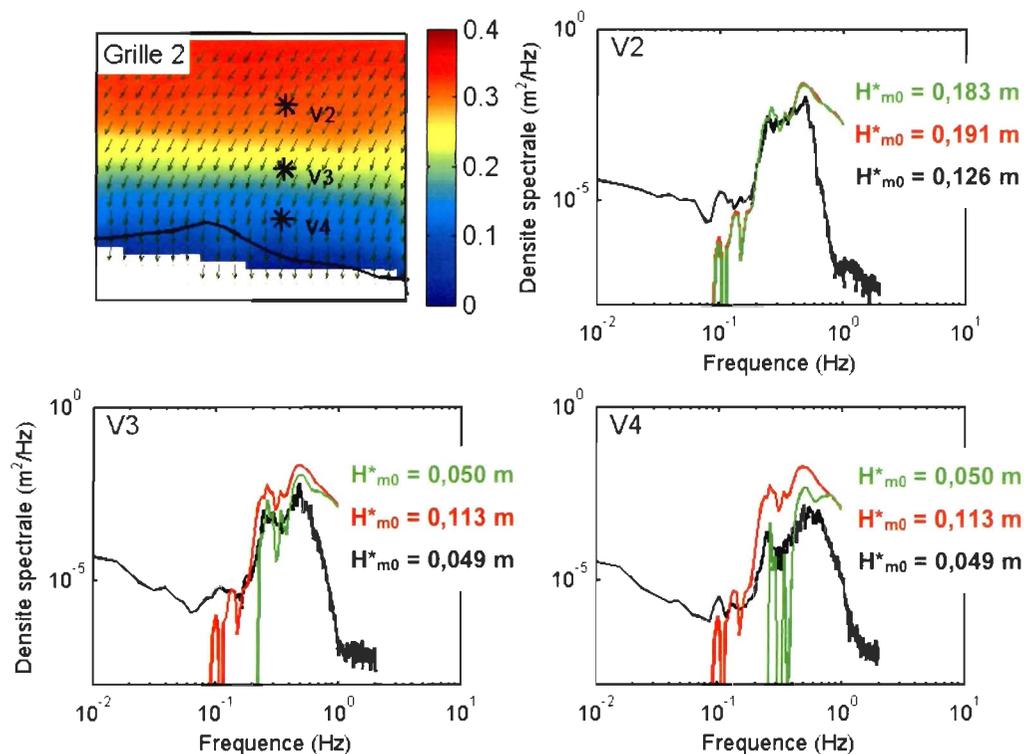


Fig. 21. Modélisation du 13 septembre 2007 à 4h00 (HM) en considérant la végétation et en utilisant la grille normale (Fig. 17). La carte de la grille 2 illustre la hauteur significative. La courbe noire représente les résultats mesurés, la courbe rouge les données simulées sans végétation et la courbe verte les données simulées en considérant la végétation.

station. Pour les stations V3 et V4, le fait d'ajouter la végétation rapproche les valeurs simulées de celles mesurées sur le terrain. Ce rapprochement est plus évident en ce qui concerne les valeurs de hauteur significative; à la station V3, la simulation surestime encore la hauteur des vagues, mais à V4, la simulation se rapproche grandement des mesures.

Le Tableau 6 montre le reste des résultats pour les autres bursts utilisés pour la validation. Les bursts utilisés pour la calibration, 846 à 850, y sont illustrés, mais ils ne seront pas pris en compte lors des prochains calculs. Pour la station V2, les valeurs de hauteurs significatives restent, encore une fois, pratiquement inchangées. Pour tous les bursts, l'ajout de la végétation tend à rapprocher les simulations des mesures de terrain aux stations V3 et V4. En effet, lors de la modélisation sans végétation, les résultats des stations V2, V3 et V4 qui se situent dans l'intervalle  $0,5 H^*_{mes} < H^*_{m0} < 2 H^*_{mes}$  représentent respectivement 46,1 %, 22,6 % et 6,5 %. Par contre, lors des modélisations avec la végétation, les résultats qui se situent dans cet intervalle représentent 51,6 %, 58,1 % et 96,7 %. C'est à la station V4 que le changement est le plus important : les simulations sans végétation qui se rapprochent d'un facteur de 2 des mesures ne représentaient que 6,5 %, alors que 96,7 % des simulations avec végétation se rapprochent des mesures de terrain.

La Fig. 22 illustre graphiquement la relation entre les valeurs mesurées et celles simulées. À la station V3, la pente de la courbe de tendance s'est rapprochée de 1 en passant de 2,38 à 1,34 avec l'ajout de la végétation. De plus, la corrélation entre les

deux séries de données est plus importante; le facteur  $R^2$  est passé de 0,504 à 0,643. À la station V4, la pente de la courbe de tendance s'est aussi rapprochée de 1 en passant de 3,03 à 1,07 avec l'ajout de la végétation. De plus, la corrélation entre les deux séries de données est encore plus importante que la comparaison mesures-simulation sans végétation ; le facteur  $R^2$  est passé de 0,376 à 0,775.

Tableau 6 : Comparaison entre les enregistrements effectués sur le terrain et les modélisations avec et sans végétation pour la grille normale.

Burst	H* <sub>m0</sub> V2			H* <sub>m0</sub> V3			H* <sub>m0</sub> V4		
	mesuré	simulée sans végétation	simulée avec végétation	mesurée	simulée sans végétation	simulée avec végétation	mesurée	simulée sans végétation	simulée avec végétation
31	0,058	0,076	0,076	0,034	0,055	0,046	0,016	0,043	0,013
32	0,042	0,083	0,082	0,021	0,063	0,045	0,007	0,052	0,006
300	0,196	0,392	0,389	0,121	0,364	0,185	0,053	0,33	0,06
301	0,240	0,425	0,422	0,163	0,396	0,222	0,089	0,364	0,082
302	0,234	0,435	0,423	0,156	0,395	0,225	0,084	0,36	0,086
303	0,193	0,382	0,371	0,105	0,350	0,205	0,069	0,323	0,082
304	0,173	0,392	0,380	0,087	0,356	0,182	0,040	0,324	0,064
305	0,149	0,432	0,429	0,067	0,392	0,151	0,025	0,33	0,048
325	0,101	0,233	0,232	0,051	0,216	0,091	0,017	0,198	0,026
326	0,189	0,242	0,240	0,097	0,221	0,124	0,039	0,199	0,035
327	0,126	0,190	0,189	0,074	0,176	0,113	0,034	0,161	0,035
328	0,102	0,180	0,180	0,057	0,170	0,096	0,027	0,16	0,028
329	0,093	0,286	0,290	0,049	0,261	0,119	0,015	0,233	0,033
447	0,112	0,313	0,311	0,057	0,280	0,138	0,025	0,248	0,036
448	0,120	0,332	0,327	0,078	0,302	0,175	0,043	0,272	0,058
449	0,113	0,339	0,338	0,077	0,308	0,187	0,046	0,279	0,067
450	0,103	0,305	0,307	0,061	0,279	0,187	0,043	0,253	0,073
451	0,087	0,186	0,183	0,056	0,179	0,123	0,034	0,169	0,044
499	0,065	0,108	0,110	0,027	0,093	0,062	0,010	0,085	0,012
548	0,040	0,119	0,116	0,021	0,094	0,063	0,010	0,08	0,013
846*	0,107	0,302	0,303	0,049	0,267	0,102	0,014	0,216	0,023
847*	0,136	0,290	0,288	0,069	0,264	0,122	0,026	0,236	0,037
848*	0,130	0,268	0,267	0,083	0,240	0,127	0,035	0,213	0,034
849*	0,139	0,160	0,159	0,084	0,149	0,102	0,036	0,135	0,03
850*	0,111	0,209	0,208	0,065	0,188	0,105	0,026	0,169	0,03
1020	0,048	0,036	0,037	0,043	0,036	0,035	0,037	0,035	0,027
1118	0,095	0,233	0,232	0,077	0,222	0,194	0,061	0,207	0,107
1124	0,092	0,047	0,047	0,050	0,046	0,038	0,017	0,045	0,016
1217	0,187	0,155	0,151	0,089	0,118	0,098	0,048	0,096	0,042
1219	0,110	0,141	0,136	0,060	0,121	0,108	0,045	0,108	0,068
1221	0,051	0,109	0,109	0,052	0,087	0,080	0,027	0,074	0,044

\* Les burst 846 à 850 ont été utilisés pour la calibration.

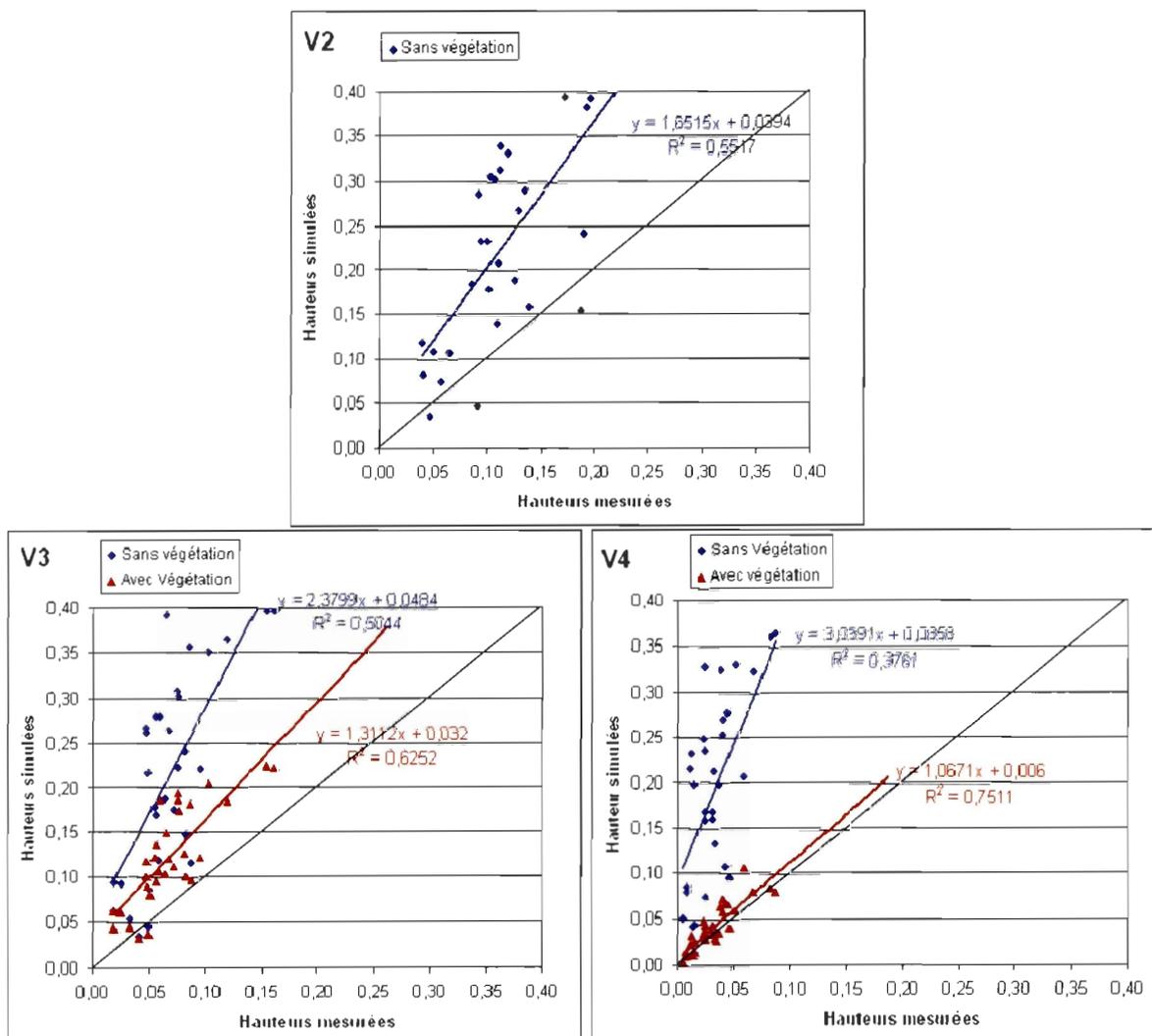


Fig. 22. Comparaison entre les hauteurs significatives mesurées et simulées avec la grille normale, avec ou sans la végétation, pour les stations V2, V3 et V4. Pour chacune des séries de mesures, une courbe de tendance a été ajoutée avec l'équation correspondante ( $x : H^*_{m01}$  mesurées  $y : H^*_{m01}$  simulées) et le coefficient de détermination  $R^2$ .

## 4. Discussion

### 4.1 Analyse des variables environnementales

Lors des mesures de terrain, la hauteur de vagues était reliée à la vitesse du vent (Fig. 10) et ce lien est statistiquement significatif ( $R^2 = 0,48$ ,  $p < 0,01$ ). Par contre, à plusieurs reprises, des épisodes de forts vents n'engendrent pas des vagues de forte amplitude. Goda (2003) a développé une formule empirique qui permet de prédire la hauteur de vagues en fonction des conditions de vents. L'un des paramètres, qui permet de faire ce calcul, est le *fetch* qui est en fait la distance sur laquelle le vent agit et celui-ci peut varier selon la surface d'eau libre et le temps durant lequel ces vents se maintiennent. Il est donc normal que la vitesse des vents ne puisse, à elle seule, déterminer l'amplitude des vagues.

Dans le cas de la région de l'Île-Verte, les vents viennent majoritairement du sud-sud-est (Fig. 11) et dans ce cas, le *fetch* est très court; par rapport au transect V1-V4, ces vents arrivent de la terre ferme. Dans ces moments, les vagues ont donc une faible amplitude. Pour ce qui est des vents en provenance du nord-est, ceux-ci se trouvent dans l'axe de l'estuaire et à ce moment, le *fetch* est très long, ce qui peut se traduire par des vagues d'une bonne amplitude. Par contre, ces vagues, en se réfractant sur la Rive-Sud, arrivent sur le transect V1-V4 en ayant été atténuées par les irrégularités de la côte et les obstacles qui s'y trouvent (dont l'Île aux Pommes). Les meilleurs moments pour avoir un *fetch* de longueur appréciable et une progression sans trop d'obstacles sont les épisodes où le vent provient du nord-ouest. À ce moment, le *fetch* peut atteindre 26 km

et les vagues arrivent avec un angle perpendiculaire à la côte (dans le même angle que le transect V1-V4).

Les moments où les vagues sont les plus importantes dans la partie supérieure du transect (la partie V2 - V4) sont ceux où un fort vent vient du nord-ouest (Fig. 10d). De plus, comme cette partie du transect se situe dans la zone intertidale, il y a seulement des vagues lors que ces stations sont submergées. Cela arrive dans 24 % du temps pour la station la plus haute (V4). Les moments où les conditions environnementales sont adéquates pour effectuer de bonnes mesures de vagues tout le long du transect sont donc peu nombreux. Les épisodes de vagues qui réunissent ces conditions ont fait l'objet d'une modélisation (Tableau 6) et ces burst représentent environ 2,5 % du temps total des mesures de terrain (du 6 septembre au 4 octobre 2007).

À propos des analyses de la couverture végétale, on remarque qu'il y a certains liens entre les caractéristiques de la végétation le long de cette portion du transect. Par exemple, en allant vers le large, la hauteur des plantes augmente et la densité des plantes va en diminuant. Par contre, la densité de biomasse ne semble pas suivre de tendance claire en fonction de la position dans la zone intertidale. D'un autre côté, la densité de biomasse et l'obstruction de la végétation ont des tendances similaires ( $R^2 = 0,6922$   $p=0,01$ ). Ce lien est très conséquent, car plus il y a de biomasses à un endroit, plus la couverture végétale risque d'être importante. En revanche, la disposition de la biomasse peut faire en sorte que l'obstruction des végétaux ne soit pas celle attendue. Par exemple, pour la même biomasse, des plantes avec un petit nombre de grosses tiges

risquent de moins bloquer le passage de l'eau que des plantes avec un grand nombre de petites tiges. Il ne faut donc pas déduire l'obstruction végétale en mesurant seulement la densité de la biomasse.

Pour ce qui est des mesures de l'atténuation des vagues par la végétation, le Tableau 4 présente quelques exemples de moments où l'effet de la couverture végétale est perceptible. Les valeurs du paramètre  $\alpha$  définissent la réduction de la hauteur des vagues selon le modèle exponentiel (éq. 3.1). Lors de la présente étude, celles-ci se sont avérées être plus grandes que celles présentées dans les autres travaux consultés dans la littérature (Tableau 1). En effet,  $\alpha$  se situe entre 335 m et 4611 m (avec une médiane de 778 m) lors des mesures effectuées sur la batture près de l'Île-Verte alors que la littérature présente des valeurs de  $\alpha$  entre 10,7 m et 495 m. Ce qui signifie que, l'atténuation causée par la végétation s'était révélée plus grande lors de ces études que dans la présente recherche. Il faut noter que dans la plupart de ces études, les mesures ont été faites sur de courtes distances (aussi peu que 4 m pour Coops et al. (1996)). De plus, la taille moyenne de la végétation, sa densité et le type de plante sont différents au cours de ces expériences et Cooper (2005) a montré que ces facteurs affectent grandement l'atténuation de vagues. Sans oublier que l'ensemble des travaux présent au Tableau 1 ont été fait dans des régions tempérées, ce qui fait en sorte que les variétés de plantes sont sans doute différentes, de même que leur densité et leur taille. Il faut donc prendre ces facteurs en considération lors d'une comparaison entre les présentes mesures et les autres travaux.

## *4.2 Validité de l'analyse mathématique*

L'analyse mathématique de l'interaction entre l'eau et la végétation sert de base à la construction de la nouvelle routine. Celle-ci se doit d'être appropriée à la situation présente de par sa justesse et son caractère modélisable. Le concept de force de traînée (éq. 2.13) s'applique lorsqu'un objet est en mouvement dans un fluide quelconque (Young et al., 2004). Dans le cas de plantes aquatiques submergées par l'eau, cette notion s'applique facilement, car dans le cas de vagues, il est facile de connaître la vitesse de l'eau au niveau de la végétation (éq. 2.14). Parmi les études qui ont tenté de représenter mathématiquement l'effet de la couverture végétale sur la progression de la houle vers la berge, plusieurs s'y sont pris en utilisant la force de traînée comme source de dissipation de l'énergie des vagues. Par exemple, une étude de Mendez et Losada (2004) calcule la force de traînée générée par les plantes halophytes pour développer un modèle empirique de l'atténuation de la hauteur des vagues lors de leur progression dans un marais salé. Cependant, ceux-ci ne font l'analyse des vagues que sous la forme monochromatique, ce qui réduit l'applicabilité de ce modèle à un milieu naturel.

Dans le cas de représentation de vagues générées en milieu naturel, une représentation des vagues selon un modèle spectral (traiter séparément chaque vague de fréquence différente) reste la façon la plus complète de représenter la réalité. Gorman et Neilson (1999) est un exemple de recherches qui utilisent une décomposition spectrale des vagues dans le but d'avoir une vision complète des vagues présentes lors des mesures effectuées dans leur zone d'étude. Par contre, lors de la présente étude, le

calcul de la force de traînée s'effectue avec un concept simplifié du spectre de vagues. En effet, l'ensemble des vagues a été réduit à une seule ayant une amplitude égale à  $H_{m0} / 2$  (éq. 2.7) et une période de  $T_{m0l}$  (éq. 2.8). Par contre, cette simplification a seulement été nécessaire pour calculer la force de traînée, le calcul de la dissipation a ensuite tout de même été fait en fonction du spectre de vagues complet (éq. 2.18a-b). Cette représentation, déjà utilisée par Mirfenderesk et Young (2003), a l'avantage de grandement faciliter le calcul de la dissipation des vagues, surtout en ce qui concerne l'application de ce calcul à une modélisation numérique. Malgré cette approximation, les résultats de l'algorithme reste satisfaisante, donc le fait de ne pas considérer le spectre entier modifie peu la précision du calcul.

### ***4.3 Qualité des prédictions***

Pour mieux évaluer la fiabilité des résultats obtenus, il est pertinent de les comparer avec ceux des autres modélisations de la littérature. Le Tableau 7 énumère plusieurs recherches qui ont eu pour but de modéliser le comportement des vagues dans divers milieux, le plus souvent afin d'analyser un aspect spécifique des vagues. Par exemple, Lin et al. (2002) ont simulé la propagation des vagues dans la Baie de Chesapeake aux États-Unis, afin d'analyser l'interaction vent-vagues dans cette région. Lors de cette recherche, ils ont comparé leurs modélisations avec des mesures de terrain et ils ont obtenu un coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0,51. Londhe et Panchang (2006) ont fait le même genre de simulation à quelques endroits aux États-Unis pour obtenir un coefficient de détermination entre 0,45 et 0,86 selon les endroits. Il semble

donc que les simulations de vagues n'arrivent pas toujours à reproduire précisément la réalité. Dans le cas de la présente étude, une fois que l'effet de la végétation a été inclus dans le modèle de vagues, le coefficient de corrélation varie entre 0,57 et 0,75. Ceci, en comparaison avec les autres études, est acceptable même s'il reste encore un écart non négligeable entre la modélisation et les vagues présentes sur le terrain. Celle-ci peut être due à l'imprécision de la bathymétrie, la macrorugosité du fond et aux mesures du vent qui ont été faites à environ 15 km du milieu étudié.

Tableau 7 : Revue de la littérature des études qui ont effectué des simulations de vagues en utilisant SWAN.

Auteur	Lieu	phénomène particulier*
Gorman et Neilson (1999)	Port de Manukan, Nouvelle-Zélande	dynamique non-linéaire <i>four-wave</i>
Padilla-Hernandez et Monbaliu (2001)	Lac George, Australie	friction du fond
Wood et al. (2001)	Tunnel de vagues	<i>triad interactions; breaking</i>
Johannessen et Swan (2002)	Tunnel de vagues	dynamique non-linéaire
Lin et al. (2002)	Baie de Chesapeake, USA	interaction vent-vagues
Rogers et al. (2002)	Lac Michigan et Baie du Mississippi, USA	interaction vent-vagues
Wornom et al. (2002)	Golf du Mexique	effet global des vagues
Holthuijsen et al. (2003)	Tunnel de vagues	réfraction et diffraction
Rogers et al. (2003)	Lac Michigan Baie du Mississippi, USA	effet global des vagues
Carniello et al. (2005)	Lagon de Venise, Italie	friction du fond, <i>breaking</i>
Moghimi et al. (2005)	Bassin de Hoernum, Allemagne	interaction vent-vagues
Signell et al. (2005)	Mer Adriatique, Italie	interaction vent-vagues
Castelle et Bonneton (2006)	Côte d'Aquitaine, France	bathymétrie
Londhe et Panchang (2006)	Golf du Maine, Golf de l'Alaska et Golf du Mexique, USA	effet global des vagues

\* La plupart de ces études ont porté une attention particulière à un phénomène qui influence le comportement des vagues afin d'en valider l'effet.

Les premières simulations complètes des vagues, qui ne tiennent pas compte de la végétation, présentent des hauteurs significatives au-dessus des valeurs mesurées par les houlographes (Fig. 22), l'écart s'accroissant à mesure que l'on s'approche de la berge. En effet, le facteur entre la hauteur simulée et celle mesurée passe de 1,66 à V2, à 2,38 à V3 et à 3,03 à V4. Cela signifie que la dissipation de l'énergie des vagues est assez importante pour que les simulations soient erronées au niveau du marais. De plus, la faible corrélation entre les deux séries de valeurs au niveau des stations supérieures (V3 et V4) indique que cette atténuation supplémentaire n'est pas constante, mais qu'elle varie selon le contexte hydrodynamique. Le rôle de la nouvelle routine, une fois calibrée, est précisément de calculer quelle sera la dissipation causée par la végétation en fonction des conditions environnementales.

Au départ, la calibration a été faite dans l'optique que le paramètre  $C_D$  reste constant tout au long de la période de mesures, même si quelques travaux tendent à le considérer comme étant variable selon les conditions hydrodynamiques (Li et Yan, 2007; Mendez et al., 1999). Cette calibration a été faite sur les bursts 846 à 850, soit du 23 septembre à 23h30 au 24 septembre à 1h30. Ceux-ci ont été choisis parce qu'ils présentent des conditions de vagues optimales pour juger de leur progression vers la berge, soit une hauteur de vagues appréciable (10 à 13 cm) et un angle d'approche perpendiculaire à la côte ( $\approx 315^\circ$ ). De plus, ces bursts se situent à différents cycles de la marée (HM-1 à HM+1) et ainsi, avec une faible variation des courants de flot et de jusant.

La calibration s'est effectuée en comparant les spectres de vagues mesurés et simulés en utilisant le *root mean square error* (éq. 2.19). L'avantage de cette méthode, c'est que l'erreur sur l'ensemble du spectre est considérée et ainsi, la calibration sera optimisée pour que les deux spectres soient similaires. Certaines études, telles Padilla-Hernandez et Monbaliu (2001), ont utilisé la hauteur significative  $H_{m0}$  et la période moyenne  $T_{m01}$  pour calibrer un phénomène de vagues particulier (par exemple : la friction des vagues avec le fond). Bien que cela donne de bons résultats, il reste qu'en procédant ainsi, il est possible que la forme des spectres simulée soit différente de ceux mesurés. En effet, les écarts positifs peuvent compenser ceux négatifs pour donner des mêmes valeurs de  $H_{m0}$  et de  $T_{m01}$  même si les courbes des spectres diffèrent.

La Fig. 18 présente les deux courbes qui ont été utilisées lors de la calibration des bursts 846 à 850. En raison de la méthode de calibration avec *rmse*, ces courbes sont proches l'une de l'autre, surtout pour la partie entre 0,1 Hz et 0,5 Hz. Pour certains bursts à la station V4, l'écart entre le spectre simulé et celui mesuré reste quand même important malgré la minimisation de cet écart. Cela est probablement dû à l'accumulation des erreurs de modélisation le long du parcours entre V2 et V4. Étant donné que le trajet entre V2 et V3 est moins grand, ces erreurs sont moins apparentes sur les courbes de la station V3 à la Fig. 18. Comme résultats de ces calibrations, les valeurs de  $C_D$  sont de 0,0637 et de 0,235 pour les sections V2-V3 et V3-V4 respectivement. Lors de travaux similaires, les valeurs de  $C_D$  obtenues par Mendez et al. (1999) se situaient entre 0,09 et 1,55. Ces valeurs ne sont donc pas beaucoup plus

élevées que celle obtenue pour la section V2-V3, mais il est possible que la valeur de  $C_D$  change en fonction de l'espèce végétale considérée : *Laminaria hyperborea* versus *Spartina alterniflora* pour la présente étude. En effet, Mendez et al. (1999) explique que le coefficient de traînée  $C_D$  peut être plus petit lorsque la végétation étudiée est plutôt rigide.

Une fois que le modèle a été calibré, les simulations effectuées sur l'ensemble du domaine montrent des résultats qui se rapprochent grandement des mesures de terrain. Le fait que le facteur entre les hauteurs significatives mesurées et celles simulées (Fig. 22) se rapproche grandement de 1 signifie que le nouveau modèle reproduit avec davantage d'exactitude la progression des vagues dans le marais. Le spectre simulé (Fig. 21) semble aussi mieux refléter les mesures même si les deux courbes divergent à quelques endroits, en particulier à la station V4. Par contre, lors des simulations, une bonne partie de l'énergie de vagues se situe au-dessus de 0,5 Hz. Les houlographes ne sont pas capables de mesurer correctement ces vagues; ils étaient placés près du fond où les variations de pression induites par les vagues de courtes périodes sont très faibles. Il est donc impossible de savoir si le nouveau modèle réussit à bien calculer la dissipation de la végétation sur les vagues de petite période. Mais, étant donné que le but premier de ces nouvelles simulations est de mieux évaluer la dynamique sédimentaire, principalement influencée par les vagues de longue période, les erreurs de simulation sur les vagues de petites périodes peuvent donc ne pas être prises en considération.

Il y a aussi une différence entre la réalité et le modèle pour la hauteur des vagues à la station V2 alors que les vagues qui s'y trouvent n'ont pas encore été en contact avec la végétation. Cet écart doit donc être le résultat de sources d'erreur qui se situent en dehors du marais. La principale difficulté dans la modélisation, mis à part la végétation, est la difficulté à définir la topographie dans la zone subtidale. Celle-ci est plutôt changeante, irrégulière et difficilement mesurable et l'effet de la microtopographie est difficile à intégrer au modèle. De plus, la zone située au large de la station V2 n'était pas dépourvue de végétation, un herbier à *Z. marina* se trouvait à cet endroit et ce type de végétation n'a pas été considéré dans le nouveau modèle. Ainsi, il est possible que ces erreurs sur la topographie fassent en sorte que le modèle numérique sous-estime la friction produite par le fond et dans ce cas, la hauteur des vagues simulées y est plus grande qu'en réalité.

Les écarts entre les simulations et les mesures de terrain qui se produisent dans la zone située avant la station V2 n'ont pas été pris en considération dans les simulations qui ont été faites seulement au niveau du marais (Fig. 17). Les comparaisons entre les deux spectres de la Fig. 19 présentent donc un écart moins important. Il en va de même pour l'ensemble des simulations de la Fig. 20;  $R^2 = 0,902$  et  $0,9022$  comparativement à  $R^2 = 0,6252$  et  $0,7511$  à la Fig. 22. Ce qui démontre que les écarts qui sont présents malgré l'ajout de l'effet de la végétation sont dus à des imprécisions commises par le modèle dans la zone située avant la station V2.

#### 4.4 Scénarios

Nous avons été en mesure de construire un modèle fiable qui peut être utile pour calculer l'hydrodynamique des vagues présentes dans le marais salé. Plusieurs paramètres peuvent avoir un effet sur cette hydrodynamique, et dans le but de mieux comprendre leur rôle dans l'atténuation de vagues par la végétation, le nouveau modèle a été utilisé pour calculer l'énergie des vagues dissipée avec différents scénarios. Dans trois séries de modélisation, un paramètre a été modifié en gardant les autres conditions fixes. Les paramètres testés sont : 1° le niveau de l'eau, 2° la densité de la végétation, 3° la période des vagues. Finalement, l'atténuation en conditions de tempête (niveau d'eau élevé, vagues hautes de longue période) a été modélisée afin de mieux évaluer le rôle protecteur de la végétation sur l'érosion côtière.

Tableau 8. Caractéristiques des cinq bursts qui ont servi lors de la simulation des scénarios.

Burst	niveau* (m)	Vent (m/s)	H* <sub>m0</sub> (V2) (m)	T <sub>m01</sub> (V2) (sec.)	Répartition de l'énergie**			
					0 à 2 sec.	2 à 3 sec.	3 à 4 sec.	4 à 10 sec.
303	3,99	11,4	0,173	2,35	20,4 %	60,5 %	8,6 %	10,5 %
327	3,86	5,3	0,117	2,29	22,0 %	63,0 %	11,5 %	3,5 %
449	4,04	9,2	0,114	2,25	17,1 %	77,2 %	5,3 %	0,4 %
848	3,75	7,6	0,12	2,28	31,3 %	50,3 %	16,1 %	2,3 %
1221	3,04	7,8	0,054	2,17	42,0 %	44,7 %	6,3 %	7,0

\* La section V2-V3 se situe, en moyenne, à un niveau de 2,10 m et la section V3-V4, à un niveau de 2,67 m.

\*\* La répartition de l'énergie a été illustrée en séparant le spectre en quatre domaines, contenant chacun un certain pourcentage de l'énergie totale des vagues.

La Fig. 23 illustre l'atténuation de la hauteur des vagues pour différentes simulations où le niveau de l'eau était différent. Pour tous les bursts considérés (Tableau 8), l'énergie des vagues se propage plus efficacement lorsque le niveau de l'eau est plus élevé que lorsqu'il est plus bas. Cet effet s'explique facilement par le fait que lorsque le

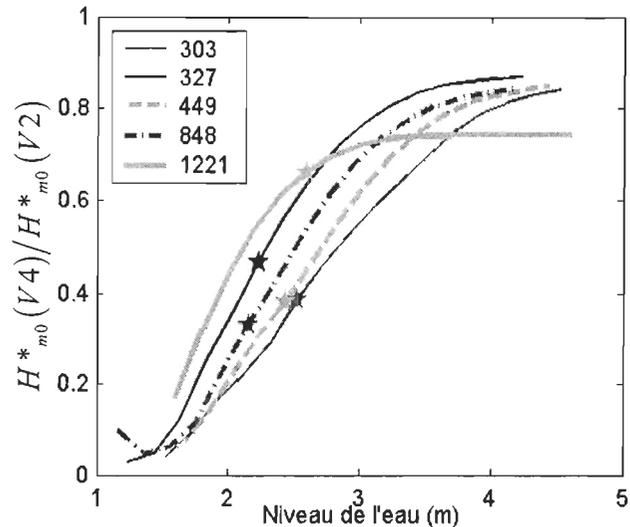


Fig. 23. Modélisation de cinq bursts en ne changeant que le niveau de l'eau. L'atténuation est déterminée par la hauteur significative à V4 divisée par celle à V2. L'étoile représente la hauteur de la colonne d'eau réel du burst.

niveau de l'eau est trop haut, la vitesse orbitale de l'eau induite par les vagues est plus faible au niveau de la végétation. En effet, la vitesse orbitale diminue de façon exponentielle avec la profondeur (éq. 2.14). Du même coup, la dissipation de l'énergie causée par la force de traînée engendrée par l'écoulement de l'eau au travers la végétation se voit grandement diminuée. Le contraire se produit lorsque le niveau de l'eau est abaissé; la vitesse orbitale est plus grande au niveau de la végétation, la force de traînée entre l'eau et la couverture végétale est plus importante et ainsi, la dissipation de l'énergie des vagues est plus significative. Lors de leurs observations de terrain, Moeller et al. (1996) avaient déjà remarqué qu'il avait une relation entre l'atténuation de l'énergie des vagues par la végétation et le niveau de l'eau. En effet, lors d'une étude subséquente (Möller et al., 1999), ils ont déterminé qu'au niveau du marais salé, il y avait une corrélation négative entre le niveau de l'eau et la portion de l'énergie des

vagues qui a été dissipée. Par contre, dans notre cas, la diminution de la hauteur significative des vagues n'est pas la même d'un burst à l'autre. Cela est probablement dû au fait que le spectre de vague était différent, ce qui change le profil de la vitesse orbitale qui se propage vers le fond. L'atténuation des vagues ne change donc pas de la même façon lorsque l'on modifie le niveau de l'eau. Cette atténuation semble avoir un lien avec la période moyenne des vagues ( $T_{m0l}$ , Tableau 8). En effet, pour le burst 1221, avec la période la plus courte et une grande fraction d'énergie au-dessus de 0,5 Hz, l'atténuation est dissociée du changement du niveau de l'eau au-dessus de 3 m.

Un autre paramètre qui a beaucoup d'incidence sur la dissipation des vagues est la densité de la végétation présente dans le marais salé. La Fig. 24 présente le changement de l'atténuation provoqué par le changement de densité de la couverture végétale.

Comme on peut s'y attendre, l'énergie des vagues est moins grande lorsqu'il y a davantage de végétation. En effet, pour tous les bursts simulés, la hauteur des vagues diminue au fur et à mesure que l'on augmente la densité de la végétation. Par contre, l'effet des variations de la densité est plus important lorsqu'il y a peu de végétation et cet effet se

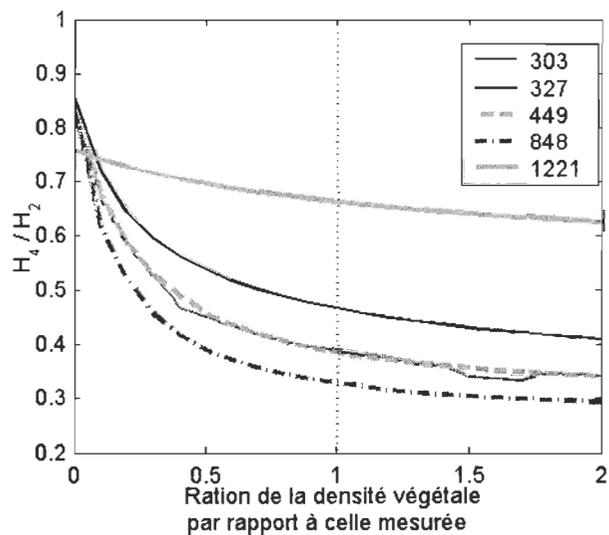


Fig. 24. Modélisation de cinq bursts en ne changeant que la densité de la végétation. L'atténuation est déterminée par la hauteur significative à V4 ( $H_4 = H_{m0}(V4)$ ) divisée par celle à V2 ( $H_2 = H_{m0}(V2)$ ). La droite verticale représente la densité mesurée (densité = 1).

stabilise lorsque la couverture végétale est plus importante. La densité de la végétation a donc un certain effet, mais cet effet plafonne au moment où la densité est plus importante.

Dans les marais situés sur les berges de l'estuaire du St-Laurent, la densité de la végétation est souvent relativement faible dans la zone à *Spartina alterniflora*. Ces simulations suggèrent en revanche que cette végétation clairsemée suffit pour atténuer les vagues de manière significative. Lors d'une étude de Fonseca et Cahalan (1992) qui mesurait la dissipation de l'énergie des vagues par différentes espèces d'herbes marines, les auteurs en sont aussi venus à la conclusion que la variation de la densité de la végétation est un facteur moins important que la présence/absence de la végétation. Ces conclusions indiquent donc que les variations saisonnières de la densité de la végétation auraient un impact important sur l'amortissement de l'énergie des vagues surtout lorsqu'il y a apparition de la végétation au printemps ou disparition à l'automne. Lors de leurs séries de mesure effectuées en Angleterre à trois différents moments de l'année (février, juin et novembre), Möller et Spencer (2002) sont arrivés, eux aussi, à la conclusion qu'une fraction de la couverture végétale maximale suffit à atténuer la hauteur des vagues de façon significative.

La hauteur de la végétation est aussi un paramètre qui a une influence sur l'atténuation des vagues. La Fig. 25 illustre l'atténuation des vagues pour différentes hauteurs de la végétation. L'atténuation augmente lorsque les plantes aquatiques sont plus hautes. De plus, l'effet de la hauteur est plus important lorsque la végétation est plus basse que la moitié de la hauteur mesurée sur le terrain et par la suite, l'atténuation varie peu pour la végétation plus haute. La façon dont l'atténuation varie avec la hauteur de la végétation (Fig. 25) est très semblable à la variation de l'atténuation des vagues selon la densité de la couverture végétale (Fig. 24).

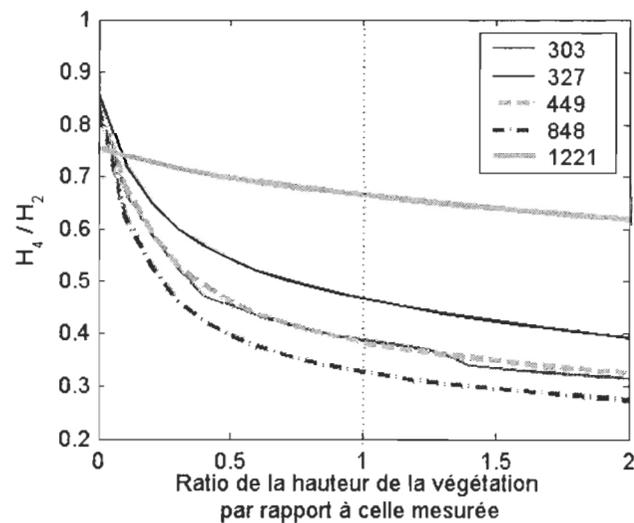


Fig. 25. Modélisation de cinq bursts en ne changeant que la hauteur de la végétation. L'atténuation est déterminée par la hauteur significative à V4 ( $H_4 = H_{m0}(V4)$ ) divisée par celle à V2 ( $H_2 = H_{m0}(V2)$ ). La droite verticale représente la hauteur normale.

La période des vagues incidente est un autre paramètre qui influence l'atténuation des vagues. La Fig. 26 présente une série de simulations où la période des vagues a été changée afin de mettre en évidence son rôle

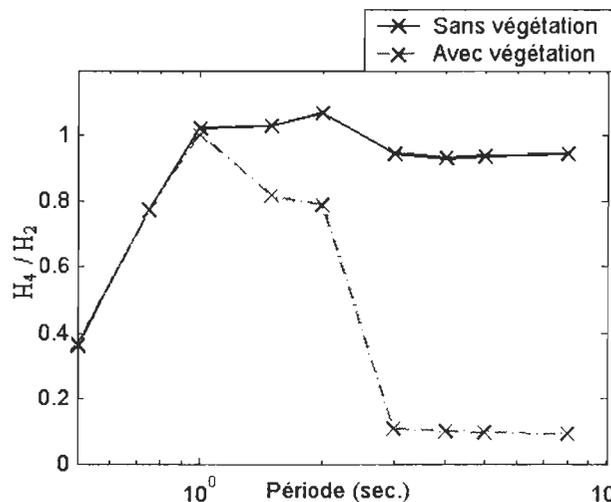


Fig. 26. Modélisation de différentes situations théoriques où la période de vagues incidente a été modifiée. Elles ont été faite sans végétation et avec végétation. L'atténuation est déterminée par la hauteur significative à V4 ( $H_4 = H_{m0}(V4)$ ) divisée par celle à V2 ( $H_2 = H_{m0}(V2)$ ).

dans la dissipation de l'énergie des vagues. Lors de ces simulations, le spectre de vagues fût modulé selon la méthode de *JONSWAP* (Holthuijsen, 2007), la hauteur des vagues était de 0,2 m à V2 avec un angle de provenance de 300°. La vitesse du vent était de 5,3 m/s et le niveau de l'eau était de 3,9 mètres. Pour les vagues de période d'une seconde et moins, il n'y a pratiquement pas de différence entre les simulations avec et sans végétation. Pour les périodes supérieures à une seconde, les simulations sans végétation montrent que l'atténuation est, à peu de choses près, nulle entre les stations V2 et V4. Par contre, en présence de végétation, l'atténuation devient importante, et à partir des périodes de trois secondes, il ne reste que 10 % de la hauteur de la houle incidente. L'atténuation causée par la végétation est donc plus grande lorsque la période des vagues est élevée.

Les vagues de longue période ont aussi une grande longueur d'onde (éq. 2.15) et de ce fait, la vitesse orbitale de l'eau produite par ces vagues se propage davantage vers le fond (éq. 2.14). La force de traînée induite par le mouvement de l'eau est donc plus

marquée et du même coup, l'énergie des vagues est davantage dissipée. Le comportement de l'atténuation des vagues est donc conforme à ce que l'on peut s'attendre, car la Fig. 26 montre que les vagues possédant une période d'oscillation plus longue se sont propagées avec une énergie bien moins grande que les vagues qui avaient une période plus courte. Dans une étude de Wayne (1975), celui-ci arrive en effet à la conclusion que la dissipation des vagues de grande période est équivalente à la dissipation de plus petites vagues situées dans une eau moins profonde.

La grande majorité de l'érosion des berges se produit lors de violentes tempêtes qui ont lieu à l'automne. Il est donc utile de simuler numériquement une situation de tempête afin de mieux évaluer l'efficacité de la végétation dans la dissipation de l'énergie des vagues de ce cas bien précis. À ce moment, plusieurs facteurs peuvent

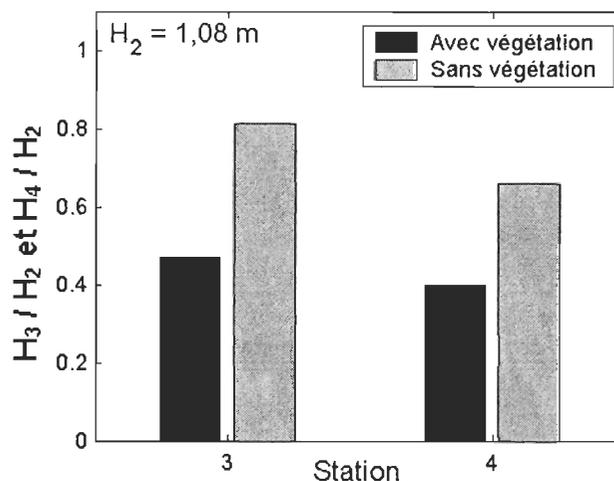


Fig. 27. Hauteurs significatives relatives des vagues au niveau des stations V3 et V4 lors d'une simulation de moyenne tempête ( $H_2 = H_{m0}(V2)$ ). La hauteur des vagues à l'Île-Verte est de 3 mètres, la période est de 4 secondes et le niveau de l'eau 4,5 mètres au-dessus du zéro des cartes.

influencer la hauteur des vagues qui se propagent vers le sommet du marais comme la hauteur des vagues provenant du large, la période de ces vagues, le niveau de l'eau, etc. Pour un premier scénario de « moyenne » tempête (Fig. 27), la hauteur des vagues au niveau de l'Île-Verte était de trois mètres, leur période était de quatre secondes. Ce sont

là les conditions de moyenne tempête dans cette région de l'estuaire (Koutitonsky, 1978). De plus, lors de cette simulation, les vents étaient de 25 m/s et le niveau de l'eau était de 4,5 mètres au-dessus du zéro des cartes marines ; il s'agit de la hauteur de l'eau à marée haute, lors des marées de morte-eau.

Une simulation a été faite dans un milieu dépourvu de végétation et une autre dans un milieu avec de la végétation. Dans les deux cas, la hauteur significative des vagues au niveau de la station V2 était de 1,08 mètre. Donc, avant même d'être en

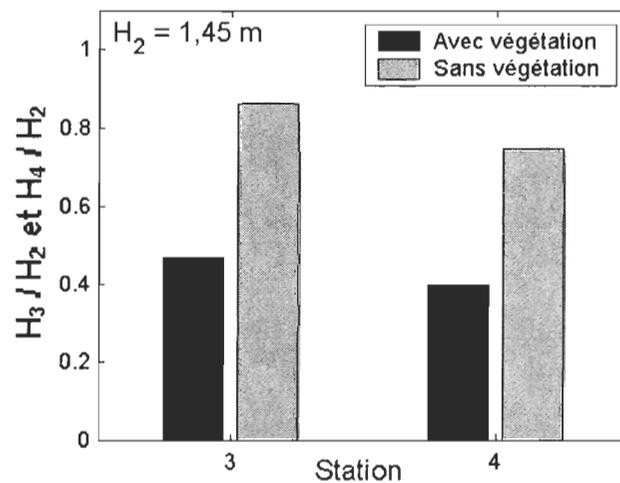


Fig. 28. Hauteurs significatives relatives des vagues au niveau des stations V3 et V4 ( $H_4 = H_{m0}(V4)$ ) lors d'une simulation de forte tempête. La hauteur des vagues à l'Île-Verte est de 3 mètres, la période est de 6 secondes et le niveau de l'eau 5,5 mètres au-dessus du zéro des cartes.

contact avec la végétation, les vagues ont subi une atténuation de 64 %. Par la suite, dans le cas où il n'y avait aucune végétation, les vagues sont arrivées à la station V3 avec 81,5 % de leur hauteur et elles possédaient 65,9 % de leur hauteur à la station V4. Pour ce qui est du milieu avec une végétation aquatique, les vagues avaient 47,3 % de leur hauteur à leur arrivée à la station V3 et 39,7 % de leur hauteur à la station V4. L'atténuation des vagues est donc plus importante dans un marais qui possède une couverture végétale.

Un second scénario a été fait avec des conditions de « forte » tempête plus violente (Fig. 28). La hauteur des vagues au niveau de l'Île-Verte était de trois mètres,

leur période était de six secondes, les vents étaient de 25 m/s et le niveau de l'eau était de 5,5 mètres au-dessus du zéro des cartes marines ; en période de grande marée, le niveau de l'eau est de 5,2 mètres et à ça s'ajoute une surcote de tempête de 0,3 mètre. Il s'agit des conditions de forte tempête dans cette région de l'estuaire (Danard et al., 2003; Koutitonsky, 1978).

Deux simulations ont été faites dans ces conditions : une sans végétation et une autre avec de la végétation. Dans les deux cas, la hauteur significative des vagues au niveau de la station V2 était de 1,45 mètre. L'atténuation des vagues a donc été de 52 % lors de leurs progressions vers la station V2. Par la suite, dans le cas où il n'y avait aucune végétation, les vagues sont arrivées à la station V3 avec 86,4 % de leur hauteur et elles possédaient 75,0 % de leur hauteur à la station V4. Pour ce qui est du milieu avec une végétation aquatique, les vagues avaient 47,1 % de leur hauteur à leur arrivée à la station V3 et 40,1 % de leur hauteur à la station V4. L'atténuation des vagues est donc plus importante en présence d'une couverture végétale.

Lors de ces simulations, une partie de l'atténuation des vagues s'est produite avant même d'arriver à la hauteur du marais. Cela suppose que dans cet environnement, d'autres facteurs que la végétation freinent les vagues dans leur progression vers la berge. La topographie de ce secteur est sans doute la principale source de dissipation de leur énergie. En effet, la bathymétrie des environs de l'Île-Verte est caractérisée par un estran large et pratiquement horizontal et de ce fait, la friction de l'eau sur le fond agit sur une longue distance. Cela fait en sorte que l'énergie des vagues est dissipée lors de son avancement vers la côte. Malgré tout, la végétation absorbe néanmoins une bonne

partie de cette énergie lors de sa progression dans le marais, ce qui peut s'avérer important en cas de tempête. Au cours de ces épisodes, les vagues ont généralement une période d'oscillation assez longue (pour la simulation à la Fig. 28, la période était de 3,6 secondes à V2), ce qui compense largement le fait que le niveau de l'eau est élevé. De plus, la dissipation est d'autant plus grande que la hauteur des vagues peut être élevée, car une hauteur significative élevée implique de grandes vitesses orbitales au niveau de la végétation et la dissipation est proportionnelle au cube de la vitesse (eq. 2.18). Ce qui explique aussi le fait que l'atténuation de la végétation lors de la plus petite tempête (Fig. 27) est très semblable à l'atténuation lors de la forte tempête; une vague de courte période qui se propage dans une eau moins profonde subit une atténuation semblable à une vague de longue période qui progresse dans une eau plus profonde.

Malgré la présence de végétation, la simulation de la Fig. 28 montre que les vagues ont tout de même une hauteur de 57 cm à la station V4, mais il faut aussi considérer que la berge se situe à 200 m de cette station. Les vagues risquent fort bien de s'atténuer grandement jusqu'à la côte, d'autant plus que la végétation y est plus dense. L'implantation de végétation comme moyen de protection des berges reste donc un moyen assez efficace. Il faut tout de même garder en tête que le marais de l'Île-Verte est situé sur un estran d'environ 800 mètres et qu'ailleurs dans l'estuaire, l'estran est bien moins large et de ce fait, la dissipation de l'énergie des vagues avant leur arrivée à la côte risque d'être moins appréciable.

## 5. Conclusion

Le but de ce travail était d'être en mesure de modéliser la dissipation de l'énergie des vagues produite par la végétation aquatique. Pour ce faire, une nouvelle fonction fut ajoutée au modèle numérique *SWAN* qui calcule le comportement de la houle selon les conditions environnementales. Ce modèle était en mesure de calculer l'effet du vent, la friction produite au fond, le déferlement sur la berge ainsi que d'autres phénomènes propres aux vagues, mais il ne pouvait calculer la friction de l'eau avec la végétation. La nouvelle fonction, *VEGNL*, utilise le principe de la force de traînée afin de calculer cette friction et ainsi déduire la dissipation de l'énergie des vagues. Cette fonction fut calibrée en utilisant des mesures effectuées sur un transect perpendiculaire à la côte dans la région de l'Isle-Verte. L'ajout de la végétation a donné en moyenne des dissipations de 80 % sur 566 m sur l'ensemble du marais.

Le nouveau modèle a aussi permis d'examiner l'influence de divers paramètres. D'abord, l'atténuation des vagues diminue avec la hauteur de la colonne d'eau, mais pour la végétation étudiée, cette atténuation devient négligeable au-dessus de 3 m. Ensuite, l'atténuation augmente avec la densité de la végétation, mais cette augmentation est surtout marquée pour les faibles densités. Finalement, l'atténuation est importante pour les vagues ayant une période de plus de trois secondes et elle est moins notable pour les vagues de plus courte période.

La prochaine étape, pour que le modèle *SWAN* soit en mesure de simuler efficacement la dissipation de l'énergie des vagues causée la végétation, serait d'inclure

aussi l'effet des herbiers (à *Zostera marina* pour la région de l'Île-Verte). En effet, l'écart entre les simulations et les données de terrain à la station V2 s'explique en partie par le fait que la dissipation au niveau de l'herbier n'a pas été considérée. Par contre, la *Z. marina* est une plante flexible et donc, sa position est fortement influencée par le mouvement de l'eau. Cela complique grandement le calcul de la force de traînée induite entre l'eau et ces plantes aquatiques.

Une autre amélioration qui peut être faite pour ajuster le nouveau modèle serait d'effectuer des calibrations du coefficient  $C_D$  dans des conditions environnementales variées. En effet, étant donné que la présente étude a été faite à un seul endroit et à un seul moment, on ne peut pas avoir une idée des facteurs qui influencent la valeur du coefficient de traînée  $C_D$ . Le fait d'avoir des simulations dans des milieux variés permettrait, à tout de moins, de savoir quels paramètres environnementaux doivent être considéré lors que l'on désire déterminer la valeur de ce coefficient pour un milieu donné.

Ce travail nous a permis de mieux comprendre le rôle de la végétation dans la dissipation des vagues. En effet, nous avons été en mesure de calculer l'énergie absorbée par la couverture végétale, et ce, en utilisant un modèle numérique qui peut s'ajuster aux conditions environnementales de divers milieux. Ce modèle pourrait être utilisé afin de mieux prévoir la dynamique sédimentaire de divers marais et aussi, afin de comprendre le rôle de la végétation dans la protection des rives de l'érosion côtière, plus particulièrement lors de tempêtes violentes.

## Références

- Asano, T., Tsutsui, S. et Sakai, T., 1988. Wave damping characteristics due to seaweed. Proc. 35th Coast. Engrg. Conf. in Japan. Japan Society of Civil Engineers (JSCE): 138-142.
- Booij, N., Ris, R.C. et Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions - 1. Model description and validation. Journal of Geophysical Research-Oceans, 104(C4): 7649-7666.
- Carniello, L., Defina, A., Fagherazzi, S. et D'Alpaos, L., 2005. A combined wind wave-tidal model for the Venice lagoon, Italy. Journal of Geophysical Research-Earth Surface, 110(F4): F04007.
- Castelle, B. et Bonneton, P., 2006. Modelling of a rip current induced by waves over a ridge and runnel system on the Aquitanian Coast, France. Comptes Rendus Geoscience, 338(10): 711-717.
- Chen, S.N., Sanford, L.P., Koch, E.W., Shi, F. et North, E.W., 2007. A nearshore model to investigate the effects of seagrass bed geometry on wave attenuation and suspended sediment transport. Estuaries and Coasts, 30(2): 296-310.
- Cooper, N.J., 2005. Wave dissipation across intertidal surfaces in the Wash tidal inlet, eastern England. Journal of Coastal Research, 21(1): 28-48.
- Coops, H., Geilen, N., Verheij, H.J., Boeters, R. et van der Velde, G., 1996. Interactions between waves, bank erosion and emergent vegetation: An experimental study in a wave tank. Aquatic Botany, 53(3-4): 187-198.
- D'Amours, O. et Scheibling, R.E., 2007. Effect of wave exposure on morphology, attachment strength and survival of the invasive green alga *Codium fragile* ssp. *tomentosoides*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 351(1-2): 129-142.
- Danard, M., Munro, A. et Murty, T., 2003. Storm surge hazard in Canada. Natural Hazards, 28(2-3): 407-431.
- Dean, R.G. et Bender, C.J., 2006. Static wave setup with emphasis on damping effects by vegetation and bottom friction. Coastal Engineering, 53(2-3): 149-156.
- Drapeau, G., 1992. Sediment Dynamics in the St-Lawrence Estuary. Géographie physique et quaternaire, 46(2): 233-242.
- Drapeau, G. et Morin, R., 1981. Contribution des vagues au transport des sédiments littoraux dans la région de Trois-Pistoles, estuaire du Saint-Laurent, Québec. Géographie physique et Quaternaire, 19(2): 245-251.
- Fonseca, M.S. et Cahalan, J.A., 1992. A preliminary evaluation of wave attenuation by 4 species of seagrass. Estuarine Coastal and Shelf Science, 35(6): 565-576.

- Goda, Y., 2003. Revisiting Wilson's formulas for simplified wind-wave prediction. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 129(2): 93-95.
- Gorman, R.M. et Neilson, C.G., 1999. Modelling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary. *Coastal Engineering*, 36(3): 197-217.
- Holthuijsen, L., 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, Cambridge, 448 p.
- Holthuijsen, L.H., Herman, A. et Booij, N., 2003. Phase-decoupled refraction-diffraction for spectral wave models. *Coastal Engineering*, 49(4): 291-305.
- IAHR, 1989. List of Sea-State Parameters. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 115(6): 793-808.
- Johannessen, T.B. et Swan, C., 2002. On the nonlinear dynamics of wave groups produced by the focusing of surface-water waves. *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 459(2032): 1021-1052.
- Knutson, P.L., Seeling, W.N. et Inskeep, M.R., 1982. Wave damping in *Spartina alterniflora* marshes. *Wetlands*, 2: 87-104.
- Kobayashi, N., Raichle, A.W. et Asano, T., 1993. Wave Attenuation by Vegetation. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 119(1): 30-48.
- Koutitonsky, V.G., 1978. Étude des paramètres hydrodynamiques pour le port de Gros-Cacouna - Vrac solide. Etude préparée par INRS-Océanologie pour Gouvernement du Québec, Comité Interministeriel Portuaire, 73-95 p.
- Le Hir, P., Monbet, Y. et Orvain, F., 2007. Sediment erodability in sediment transport modelling: Can we account for biota effects? *Continental Shelf Research*, 27(8): 1116-1142.
- Li, C.W. et Yan, K., 2007. Numerical investigation of wave-current-vegetation interaction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(7): 794-803.
- Lin, W.Q., Sanford, L.P. et Suttles, S.E., 2002. Wave measurement and modeling in Chesapeake Bay. *Continental Shelf Research*, 22(18-19): 2673-2686.
- Londhe, S.N. et Panchang, V., 2006. One-day wave forecasts based on artificial neural networks. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23(11): 1593-1603.
- Lovas, S.M. et Torum, A., 2001. Effect of the kelp *Laminaria hyperborea* upon sand dune erosion and water particle velocities. *Coastal Engineering*, 44(1): 37-63.
- Madsen, J.D., Chambers, P.A., James, W.F., Koch, E.W. et Westlake, D.F., 2001. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia*, 444(1-3): 71-84.

- Mendez, F.J. et Losada, I.J., 2004. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. *Coastal Engineering*, 51(2): 103-118.
- Mendez, F.J., Losada, I.J. et Losada, M.A., 1999. Hydrodynamics induced by wind waves in a vegetation field. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 104(C8): 18383-18396.
- Mirfenderesk, H. et Young, I.R., 2003. Direct measurements of the bottom friction factor beneath surface gravity waves. *Applied Ocean Research*, 25(5): 269-287.
- Moeller, I., Spencer, T. et French, J.R., 1996. Wind wave attenuation over saltmarsh surfaces: Preliminary results from Norfolk, England. *Journal of Coastal Research*, 12(4): 1009-1016.
- Moghimi, S., Gayer, G., Gunther, H. et Shafieefar, M., 2005. Application of third generation shallow water wave models in a tidal environment. *Ocean Dynamics*, 55(1): 10-27.
- Möller, I., 2006. Quantifying saltmarsh vegetation and its effect on wave height dissipation: Results from a UK East coast saltmarsh. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 69(3-4): 337-351.
- Möller, I. et Spencer, T., 2002. Wave dissipation over macro-tidal saltmarshes: Effects of marsh edge typology and vegetation change. *Journal of Coastal Research*, SI 36: 506-521.
- Möller, I., Spencer, T., French, J.R., Leggett, D.J. et Dixon, M., 1999. Wave transformation over salt marshes: A field and numerical modelling study from north Norfolk, England. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 49(3): 411-426.
- Mork, M., 1996. The effect of kelp in wave damping. *Sarsia*, 80(4): 323-327.
- Morris, J.T., 2007. Ecological engineering in intertidal saltmarshes. *Hydrobiologia*, 577: 161-168.
- Neumeier, U., 2005. Quantification of vertical density variations of salt-marsh vegetation. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 63(4): 489-496.
- Neumeier, U. et Amos, C.L., 2006. Turbulence reduction by the canopy of coastal *Spartina* salt-marshes. *Journal of Coastal Research*, SI 39: 433-439.
- Padilla-Hernandez, R. et Monbaliu, J., 2001. Energy balance of wind waves as a function of the bottom friction formulation. *Coastal Engineering*, 43(2): 131-148.
- Poulin, P. et Pelletier, E., 2007. Determination of ammonium using a microplate-based fluorometric technique. *Talanta*, 71(4): 1500-1506.

- Quartel, S., Kroon, A., Augustinus, P., Van Santen, P. et Tri, N.H., 2007. Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta, Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(4): 576-584.
- Rogers, W.E., Hwang, P.A. et Wang, D.W., 2003. Investigation of wave growth and decay in the SWAN model: Three regional-scale applications. *Journal of Physical Oceanography*, 33(2): 366-389.
- Rogers, W.E., Kaihatu, J.M., Petit, H.A.H., Booij, N. et Holthuijsen, L.H., 2002. Diffusion reduction in an arbitrary scale third generation wind wave model. *Ocean Engineering*, 29(11): 1357-1390.
- Saucier, F.J. et Chasse, J., 2000. Tidal circulation and buoyancy effects in the St. Lawrence Estuary. *Atmosphere-Ocean*, 38(4): 505-556.
- Signell, R.P., Carniel, S., Cavaleri, L., Chiggiato, J., Doyle, J.D., Pullen, J. et Sclavo, M., 2005. Assessment of wind quality for oceanographic modelling in semi-enclosed basins. *Journal of Marine Systems*, 53(1-4): 217-233.
- Spratt, A.T., Neumeier, U. et Lavender, S.J., 2005. Predictions of saltmarsh suitability as a coastal defence measure based on numerically-modelled extrapolations from a present day Digital Terrain Model. In: Teeuw R., Whitworth M. & Laughton K. (eds) *Proceedings of RSPSoc 2005: Measuring, Mapping and Managing a Hazardous World*, 6-9 September 2005, Portsmouth, UK. The Remote Sensing and Photogrammetry Society (RSPSoc).
- Teeter, A.M., Johnson, B.H., Berger, C., Stelling, G. et Scheffner, N.W., 2001. Hydrodynamic and sediment transport modeling with emphasis on shallow-water, vegetated areas (lakes, reservoirs, estuaries and lagoons). *Hydrobiologia*, 444(1-3): 1-24.
- Tucker, M.J. et Pitt, E.G., 2001. *Waves in Ocean Engineering*. Elsevier Ocean Engineering, 5. Elsevier, Amsterdam, 521 p.
- Turker, U., Yagci, O. et Kabdasli, M.S., 2006. Analysis of coastal damage of a beach profile under the protection of emergent vegetation. *Ocean Engineering*, 33(5-6): 810-828.
- Van der Wal, D., Wielemaker-Van den Dool, A. et Herman, P.M.J., 2008. Spatial patterns, rates and mechanisms of saltmarsh cycles (Westerschelde, The Netherlands). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 76(2): 357-368.
- Vo-Luong, P. et Massel, S., 2008. Energy dissipation in non-uniform mangrove forests of arbitrary depth. *Journal of Marine Systems*, 74(1): 603-622.
- Watts, C.W., Tolhurst, T.J., Black, K.S. et Whitmore, A.P., 2003. In situ measurements of erosion shear stress and geotechnical shear strength of the intertidal sediments of the experimental managed realignment scheme at Tollesbury, Essex, UK. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 58(3): 611-620.

- Wayne, C.J., 1975. Sea and marsh grasses: their effect on wave energy and nearshore sand transport. M.S. Thesis, Florida State University, Tallahassee, 135 pp.
- Wayne, C.J., 1976. The effects of sea and marsh grass on wave energy. Coastal Research Notes, 14: 6-8.
- Widdows, J., Pope, N.D. et Brinsley, M.D., 2008. Effect of *Spartina anglica* stems on near-bed hydrodynamics, sediment erodability and morphological changes on an intertidal mudflat. Marine Ecology-Progress Series, 362: 45-57.
- Wood, D.J., Muttray, M. et Oumeraci, H., 2001. The SWAN model used to study wave evolution in a flume. Ocean Engineering, 28(7): 805-823.
- Wornom, S.F., Allard, R. et Hsu, Y.L., 2002. An MPI quasi time-accurate approach for nearshore wave prediction using the SWAN code - Part II: Applications to wave hindcasts. Coastal Engineering Journal, 44(3): 257-280.
- Yang, S.L., Li, H., Ysebaert, T., Bouma, T.J., Zhang, W.X., Wang, Y., Li, P., Li, M. et Ding, P., 2008. Spatial and temporal variations in sediment grain size in tidal wetlands, Yangtze Delta: On the role of physical and biotic controls. Estuarine Coastal and Shelf Science, 77(4): 657-671.
- Young, D.F., Munson, B.R. et Okiishi, T.H., 2004. A Brief Introduction to Fluid Mechanics. Wiley, Hoboken, New Jersey, 533 p.

## Annexe A : Calculs

### A.1 Calcul de la dissipation due à la force de traînée.

Selon l'équation 2.18, l'énergie dissipée pour chaque fréquence  $\varepsilon_f(L_i)$  ce calcul en multipliant la force de traînée globale par la vitesse induite par cette fréquence pour une couche de végétation  $L_i$ .

$$\varepsilon_f(L_i) = F_D(L_i) \cdot u_f(L_i) = \int_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{1}{2} \rho C_{Di} A_i (u_{rms}(h))^2 \cdot u_f(h) dh \quad A.1$$

Ici,  $u_{rms}$  représente la vitesse moyenne induite par l'ensemble des vagues. Au lieu de calculer cette vitesse en utilisant la variance spectrale  $E(f, \theta)$  (éq. 2.17), le calcul sera simplifié en résumant l'ensemble des vagues en une vague unique. De plus, la composante verticale de la vitesse sera négligée, car, près du fond, elle est négligeable par rapport à la composante horizontale. Dans ce cas,  $u_{rms}$  se calcule simplement par :

$$\sqrt{\langle u^2 \rangle} = u_{rms} = \frac{\alpha \omega \cosh[k(z+d)]}{\sqrt{2} \sinh[kd]} \quad A.2$$

Pour que cette vague représente l'ensemble de la variance spectrale, l'amplitude de celle-ci est déterminée à l'aide de  $H_{m0}$ , sa fréquence par  $T_{m01}$  et son nombre d'ondes par  $k_{m01}$  (éq. 2.15)

$$\alpha \equiv H_{m0}/2 \quad \omega \equiv \omega_{m01} = 2\pi/T_{m01} \quad k \equiv k_{m01}(\omega_{m01}) \quad z+d \equiv h$$

$$\Rightarrow u_{rms}(h) = \frac{H_{m0}\omega_{m0t}}{2\sqrt{2}} \frac{\cosh[k_{m0t}h]}{\sinh[k_{m0t}d]} \quad \text{A.3}$$

Pour  $u_f$  (éq. A.1), il suffit de calculer la vitesse avec les caractéristiques spécifiques à la vague de fréquence  $f$ :

$$a \equiv a_f \quad \omega \equiv \omega_f \quad k \equiv k_f(\omega_f)$$

$$\Rightarrow u_f(h) = a_f \omega_f \frac{\cosh(k_f h)}{\sinh(k_f d)} \quad \text{A.4}$$

En remplaçant les vitesses dans l'équation de dissipation de l'énergie, celle-ci deviens :

$$\varepsilon_f(L_i) = \frac{1}{2} \rho C_{Di} A_i \frac{a_f \omega_f}{\sinh(k_f d)} \left( \frac{a_d \omega_d}{\sqrt{2} \sinh(k_d d)} \right)^2 \int_{h_{i-1}}^{h_i} \cosh(k_f h) \cosh^2(k_d h) dh \quad \text{A.5}$$

Pour calculer l'intégrale, il faut remplacer les  $\cosh$  en utilisant les équations générales :

$$\cosh^2(A) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cosh(2A) \quad \cosh(B) \cosh(C) = \frac{1}{2} [\cosh(B+C) + \cosh(B-C)]$$

Cela donne donc que :

$$\begin{aligned} \Rightarrow \cosh(k_f h) \cosh^2(k_d h) &= \frac{1}{4} [\cosh[(k_f + 2k_d)h] + \cosh[(k_f - 2k_d)h]] \\ &+ \frac{1}{2} \cosh[k_f h] \end{aligned} \quad \text{A.6}$$

Il est alors facile de calculer cette intégrale; il s'agit de l'addition de trois *cosh*. En

$$\text{général : } \int_a^b \cosh(kx) dx = \left| \frac{\sinh(kx)}{k} \right|_{x=a}^{x=b}$$

L'équation complète devient donc :

$$\varepsilon_f(L_i) = \frac{1}{8} \rho C_{D_i} A_i \frac{a_f \omega_f}{\sinh(k_f d)} \left( \frac{a_d \omega_d}{\sqrt{2} \sinh(k_d d)} \right)^2 \cdot \left[ \frac{\sinh[(k_f + 2k_d)h]}{k_f + 2k_d} + \frac{\sinh[(k_f - 2k_d)h]}{k_f - 2k_d} + \frac{2 \sinh[k_f h]}{k_f} \right]_{h_{i-1}}^{h_i} \quad \text{A.7}$$

L'énergie dissipée pour une fréquence  $f$ , dans la couche horizontale  $L_i$  est donc :

$$\boxed{\varepsilon_f(L_i) = c a_f C_{v_i} [b_f(h_i) - b_f(h_{i-1})]} \quad \text{A.8}$$

$$\text{où } c = \frac{1}{8} \rho \left( \frac{a_d \omega_d}{\sqrt{2} \sinh(k_d d)} \right)^2$$

$$C_{v_i} = C_{D_i} A_i$$

$$b_f(h_i) = \frac{\omega_f}{\sinh(k_f d)} \left\{ \frac{\sinh[(k_f + 2k_d)h_i]}{k_f + 2k_d} + \frac{\sinh[(k_f - 2k_d)h_i]}{k_f - 2k_d} + \frac{2 \sinh[k_f h_i]}{k_f} \right\}$$

avec  $b_f(h=0) = 0$

Il suffit de faire la somme des énergies dissipées pour chaque couche pour avoir l'énergie dissipée pour la fréquence  $f$  à cet endroit :

$$\varepsilon_{f \text{ tot}} = c a_f \sum_{i=1}^n C_v(L_i) [b_f(h_i) - b_f(h_{i-1})] \quad \text{A.9}$$

## Annexe B : Syntaxe du fichier de commande

### afin d'inclure la végétation.

Ces commandes sont écrites selon les conventions de SWAN qui sont expliquées dans le manuel d'utilisateur. Les commandes sont utilisées pour définir, entre autre, les grilles de calculs, les paramètres environnementaux et le format des fichiers des paramètres d'entrée et de sortie du modèle.

#### ***B.1 Végétation uniforme dans tout le domaine***

VEGetation	<	[vegnb]    vegh 1 vegcv 1 ... vegh n vegcv n   [vegnb] FILE 'fnames'
------------	---	---

**VEGetation** : Ce mot clef indique au modèle que les valeurs qui suivent vont servir à paramétrer la végétation. Ceux-ci seront considérés comme étant constants dans tout le domaine de la grille de calcul.

**[vegnb]** : La valeur qui suit le mot clef indique le nombre de divisions verticales de la végétation. Cette valeur doit être un entier positif.

**vegh\_1 vegcv\_1 ... vegh\_n vegcv\_n** :

Les paramètres de la végétation sont ensuite définis en commençant par la hauteur de la première couche (*vegh\_1*) et sont coefficient de traînée (*vegcv\_1*), puis les couches suivante jusqu'à la couche *vegnb*.

**FILE** : L'utilisateur peut décider de plutôt définir les paramètres dans un fichier texte.

**'fnames'** : Ce qui suit le mot clef FILE est le nom du fichier qui contient les paramètres de la végétation. Ce fichier texte ASCII doit contenir, dans le bon ordre, les valeurs des paramètres *vegh\_1 vegcv\_1 ... vegh\_n vegcv\_n*.

**Exemples** : Une végétation composée de quatre divisions verticales de 0,12; 0,08; 0,14 et 0,09 cm ayant un coefficient de traînée de 0,145; 0,124; 0,203; 0,064.

```
VEGetation 4 0.12 0.145    0.08 0.124    0.14 0.203    0.09 0.064
```

## B.2 Végétations variable dans le domaine

```

INPgrid < | < | ... | > &
          | < | VEGEtation | >
          | < | VEGH | >
          | < | VEGCV | >
          | < | ... | >

& < | ->REGular [xpin] [ypin] [alpin] [mxinp] [myinp] [dxinp] [dyinp] | > &
  | CURVilinear [stagr] [stagry] [mxinp] [myinp] | >

& NONSTATIONary [tbegin] [deltinp] < | -> SEC | > [tendinp]
  | MIN | >
  | HR | >

```

**INPgrid** : Ce mot-clef sert à définir la grille d'entrée de tous les paramètres environnementaux qui peuvent varier le long du domaine (Bathymétrie, courant, niveau d'eau, vent, végétation). Le mot-clef qui suit définit le paramètre en question.

**VEGEtation** : Indique que les valeurs qui suivent définissent la grille d'entrée des paramètres de la végétation (hauteur des divisions et coefficient de traînée). Il est possible d'avoir des grilles d'entrée différentes pour la hauteur des divisions verticales (VEGH) et leurs coefficients de traînée (VEGCV). Dans ce cas, il faut définir chaque grille séparément en utilisant deux fois le mot-clef **INPgrid** pour chacun des paramètres.

**REGular** : Indique que la grille d'entrée est uniforme et rectangulaire.

**CURVilinear**: Indique que la grille d'entrée est courbe, de type longitude-latitude.

**Pour une grille de type REGular**

[xpin] [ypin] : coordonnées x et y de l'origine de la grille d'entrée.

[alpin] : angle de la grille d'entrée par rapport à l'axe des x.

[mxinp] [myinp] : nombre de cellules en x et en y que possède la grille d'entrée.

[dxinp] [dyinp] : taille des cellules en x et en y de la grille d'entrée.

**Pour une grille de type CURVilinear** (habituellement, x signifie la longitude et y la latitude)

[stagr] [stagry] : position initiale, en x et en y, de la grille d'entrée, par rapport à la grille de calcul. Par exemple, 0.5 indique que la grille de calcul débute à mi-chemin de la première cellule de calcul.

[dxinp] [dyinp] : taille des cellules en x et en y de la grille d'entrée.

**NONSTATIONary** : L'utilisateur peut décider de faire varier la végétation dans le temps si la simulation se fait en mode non-stationnaire.

[tbegin] : moment initial de la variable.

[deltinp] : durée des intervalles de temps avec les unités définies avec la prochaine option : SEC, MIN, HR, DAY.

[tendinp] : moment final de la variable.

```

...
READinp < VEGetation [vegnb] >[fac]< 'fname1' >[idla] &
...
& < -> FREe >
   UNFormatted

```

- READinp** : Ce mot clef doit suivre INPgrid. Il indique les paramètres de lecture du fichier qui contient les valeurs d'entrée des conditions environnementales.
- VEGetation** : Indique que les paramètres de lecture qui suivent concernent la végétation.
- [vegnb]** : Nombre de division verticale de la végétation. Cette valeur doit être un entier.
- [fac]** : Facteur multiplicatif des valeurs qui seront lues. Par exemple, si les hauteurs sont données en centimètre, `fac = 0.01`.
- 'fname1'** : Nom du fichier qui contient les valeurs des paramètres de la végétation. Tous les paramètres sont dans le même fichier et ceux-ci doivent être dans le bon ordre (`vegh_1 ... vegh_n vegcv_1 ... vegcv_n`).
- SERIES** : Dans le cas où la simulation est en mode non-stationnaire, un fichier doit définir le nom des fichiers qui contiennent les paramètres aux différents pas de temps.
- 'fname2'** : Nom du fichier qui définit le nom des fichiers qui contiennent les paramètres aux différents pas de temps. Chacun de ces fichiers ont le même format que `'fname1'`.
- [idla]** : Chiffre de 1 à 6 qui définit l'ordre dans lequel les cellules sont écrites dans le fichier. Cette grille 2D peut se lire vers le bas ou vers le haut, vers la gauche ou vers la droite.
- FREe** : Indique que le fichier est écrit en format ASCII.
- UNFormatted** : Indique que le fichier est écrit en format binaire.

Exemple : Une végétation composée de deux couches qui s'étend sur une grille de 200 par 300 cellules, chacun de 2 m par 2 m. Les valeurs sont écrites dans un fichier ASCII du nom de « végétation1.dat »

```

INPgrid VEGetation REGular 0 0 0 100 150 2 2
READinp VEGetation 2 1 'végétation1.dat' 3 FREe

```

## Annexe C : Code FORTRAN de la routine de la végétation

```

1  ! -----
2  SUBROUTINE VEGENL (    DEP2          ,SPCSIG      ,KWAVE      ,
3  &                    AC2            ,DISSC1      ,IMATDA      ,
4  &                    IDCMIN         ,IDCMAX      ,ISSTOP      )
5  ! -----
6
7  USE SWCOMMVEG! Contient :VEGNB, VEGH, VEGCV, VEGH2, VEGCH2, VEGDISS
8  USE SWCOMM3
9  USE SWCOMM2 ! Contiens :MDC, MSC, FRINTF, VARVEG
10 IMPLICIT NONE
11
12 ! variable en argument
13 !   INTEGER  VEGNB          ! nombre de divisions en z
14 !   INTEGER  MDC           ! nombre de division en teta
15 !   INTEGER  MSC           ! nombre de division en freq
16 !   REAL     FRINTF        ! df / f
17 !   REAL     VEGH (VEGNB)  ! hauteur de chaque cell
18 !   REAL     VEGCV (VEGNB) ! coeff "Cv" de chaque cell.
19 !   REAL     VEGH2 (MCGRD,VEGNB) ! hauteur des cell. lus avec READInp
20 !   REAL     VEGCV2 (MCGRD,VEGNB) ! coeff. de trainé lus avec READInp
21 !   REAL     VEGDISS (MCGRD) ! dissipation due a la végétation
22 !   LOGICAL  VARVEG       ! si la végé (oui/non) est variable dans l'espace
23 !   INTEGER, INTENT(IN) :: ISSTOP ! max en fréq.
24 !   INTEGER, INTENT(IN) :: IDCMIN (MSC) , IDCMAX (MSC)
25 !   Min et Max du domaine angulaire
26 !   REAL,     INTENT(IN) :: DEP2 (MCGRD)
27 !   Depth, DEP2 doit être DEP2(KCGRD(1)) (pointer)
28 !   REAL,     INTENT(IN) :: SPCSIG (MSC) ! fréquence angulaire
29 !   REAL,     INTENT(IN) :: KWAVE (MSC) ! nombre d'onde
30 !   REAL,     INTENT(IN) :: AC2 (MDC, MSC, MCGRD) ! "action density" local
31 !   REAL,     INTENT(INOUT) :: DISSC1 (MDC, MSC)
32 !   Coefficient de dissipation
33 !   REAL,     INTENT(INOUT) :: IMATDA (MDC, MSC)
34 !   Coefficients diagonale de la matrice
35
36 ! variable local
37 !   INTEGER  IH            ! compteur en z
38 !   INTEGER  IDDUM        ! compteur de direction
39 !   INTEGER  ID           ! compteur de direction
40 !   INTEGER  IS           ! compteur de fréquence
41 !   INTEGER  NBLOCAL     ! division max de végétation local
42 !   REAL     DEPTH       ! profondeur local
43 !   REAL     VEGH_LOCAL (VEGNB) ! hauteur des cell. local, cette cellule

```

```

44     REAL VEGCV_LOCAL(VEGNB) ! coeff. de trainé des cells local
45     REAL SBOTEO             ! dissipation par freq et dir, temp.
46     REAL ETOT              ! énergie total (m0), temp.
47     real EATOT             ! autre façon que ETOT pour calculer m0
48     REAL EFTOT            ! énergie-freq total (m2), temp.
49     REAL EADD              ! densité d'énergie * dteta * df, temp.
50     REAL HSIG              ! hauteur significative calculer
51     REAL USIG              ! amplitude urms significative, HSIG/(2*sqrt(2))
52     REAL TSIG              ! période significative calculer
53     REAL OMEGASIG         ! fréquence angulaire significative (1/TSIG)
54     REAL KSIG              ! nombre d'onde significatif
55     REAL NULLCG, NULLLN, NULLND ! dummy variable pour la routine KSCIP1
56     REAL K                  ! nombre d'onde, temp.
57     REAL KPLUS             ! K + 2*KSIG, dans coeff. "b"
58     REAL KMINUS           ! K - 2*KSIG, dans coeff. "b"
59     REAL SINH_KMINUS      ! sinh(kminus * depth), dans coeff. "b"
60     REAL C                  ! coeff. "c" ds coeff "b"
61     REAL D                  ! diffusion (sans Af) pour une freq et un teta, temp.
62     REAL DSDD              ! AC1 * DSDD = énergie
63     REAL VEGDISS_TEMP(MDC,MSC)
64     !   dissipation dynamique due a la végétation, temp.
65     REAL DUM_LEAK(MCGRD), DUM_DISCO(MDC,MSC), DUM_LEAKC1(MDC,MSC)
66     !   dummy variable pour ADDDIS
67     REAL H(0:VEGNB)       ! hauteur des cell de vegetation
68     REAL B(0:VEGNB)       ! coeff. "b"
69     REAL DS2(MSC-1)       ! delta oméga, pour calculer Hsig
70     REAL SUM_AC2_DIR(MSC)
71     !   calcul: SPCSIG(:)**2 * SUM(AC2(:, :, KCGRD(1)), 2), temp.
72     LOGICAL ANYBIN(MDC, MSC) ! présence/absence d'énergie dans AC2(MDC, MSC)
73     !   -----
74
75     DEPTH = DEP2(KCGRD(1))
76     IF ( DEPTH.LE.0. ) RETURN ! return si pas d'eau
77     IF ( ALL( AC2(:, :, KCGRD(1)).EQ.0. ) ) RETURN
78     !   return si pas d'énergie
79     IF (VARVEG) THEN ! définir si la végétation change avec la position
80         VEGH_LOCAL(:) = VEGH2(KCGRD(1), :)
81         VEGCV_LOCAL(:) = VEGCV2(KCGRD(1), :)
82     ELSE ! définir si la végétation ne change pas avec la position
83         VEGH_LOCAL(:) = VEGH(:)
84         VEGCV_LOCAL(:) = VEGCV(:)
85     ENDIF
86     IF(SUM(VEGH_LOCAL(:)).LE.0..OR.SUM(VEGCV_LOCAL(:)).LE.0.) RETURN
87     !   return si pas de végé. localement
88
89

```

```

90 !      initialiser les variables locales
91      B(0) = 0.
92      NBLOCAL = 0
93      H(0) = 0
94      VEGDISS_TEMP(:, :) = 0
95      ANYBIN(:, :) = .FALSE.
96
97 !      déterminer la hauteur total (H) et le nombre de couche local (NBLOCAL)
98      DO 200, IH = 1, VEGNB ! boucle en z
99          H(IH) = H(IH-1) + VEGH_LOCAL(IH)
100         IF ( VEGCV_LOCAL(IH).GT.0. .AND. VEGH_LOCAL(IH).GT.0.) THEN
101             ! compte pas si dh=0 ou coeff. = 0
102             NBLOCAL = IH
103             IF (H(IH).GE.DEPTH) THEN ! compte pas la végét au-dessus de l'eau
104                 H(IH)=DEPTH
105                 EXIT
106             ENDIF
107         ENDIF
108     200 CONTINUE
109
110 !      calcul de la hauteur significative (HSIG) et fréquence significative (OMEGASIG)
111 !      pour calculer le coeff. "c"
112     DS2=SPCSIG(2:MSC)-SPCSIG(1:MSC-1)
113     SUM_AC2_DIR(:) = SPCSIG(:) * SUM(AC2(:, :, KCGRD(1))*DDIR, 1)
114     EATOT = SUM((SUM_AC2_DIR(2:MSC)+SUM_AC2_DIR(1:MSC-1)) * DS2)
115     ETOT = SUM(SUM_AC2_DIR * SPCSIG * FRINTF) ! ETOT = m0
116     EFTOT = SUM(SUM_AC2_DIR * SPCSIG * FRINTF * SPCSIG) ! EFTOT = m1
117     IF (ETOT .LE. 0. .AND. EFTOT .LE. 0.) RETURN ! sortir si HSIG=0
118     HSIG = 4.*SQRT(EATOT) ! hauteur significative : HSIG = 4*SQRT(m0)
119     TSIG = 2.*PI*(ETOT/EFTOT) ! periode significative : TSIG = m0/m1
120     OMEGASIG=(EFTOT/ETOT) ! OMEGASIG = 2*PI/TSIG
121
122     CALL KSCIP1 (1, OMEGASIG , DEPTH, KSIG,
123 &              NULLCG, NULLLN, NULLND) ! calcul KSIG avec OMEGASIG
124 !      **** début du calcul de l'intégrale ****
125     USIG = HSIG / (2*SQRT(2.)) ! amplitude significative
126     C=0.125* RHO * (USIG * OMEGASIG / SINH(KSIG*DEPTH))**2 ! coeff. "c"
127     DO 400 IS = 1, MSC ! boucle de fréquence
128         SBOTEO = 0.
129         KPLUS = KWAVE(IS) + 2*KSIG
130         IF (ALL(AC2(:, IS, KCGRD(1)) .EQ. 0) .OR.
131 !      saute si il n'y a pas d'énergie a cette fréq.
132 &         KPLUS*(DEPTH-H(NBLOCAL)) .GE. 25) CYCLE
133 !      ou si le résultat pas trop petit
134
135

```

```

136      K = KWAVE(IS)
137      KMINUS = K - 2*KSIG
138      DO 370, IH = 1, NBLOCAL ! boucle en z
139          IF (ABS(KMINUS) .LE. 0.01) THEN      ! pour pas divise par 0
140              SINH_KMINUS = H(IH)
141          ELSE
142              SINH_KMINUS = SINH ( KMINUS * H(IH) ) / KMINUS
143          ENDIF
144          B(IH) = SPCSIG(IS) / SINH(K*DEPTH) *
145      &          ( SINH (KPLUS * H(IH)) / KPLUS +
146      &          SINH_KMINUS + 2*SINH (K * H(IH)) / K )
147          D = C * VEGCV_LOCAL(IH) * ( B(IH) - B(IH-1) ) ! diffusion
148          DO 360 IDDUM = IDCMIN(IS) , IDCMAK(IS) ! boucle de direction
149              ID = MOD ( IDDUM - 1 + MDC , MDC ) + 1
150
151              IF(AC2(ID,IS,KCGRD(1)) .NE. 0. ) THEN
152      !          verifier que AC2 egal pas 0;
153              DSDD = DDIR * FRINTF * SPCSIG(IS)**2 ;
154      !          pour avoir l'energie
155              SBOTEO=D * SQRT(2/(AC2(ID,IS,KCGRD(1))*DSDD))/(RHO*GRAV)
156              ANYBIN(ID,IS) = .TRUE.
157          ELSE
158              SBOTEO = 0
159          ENDIF
160      !          *** ajoute le résultat dans les matrices de dissipation
161              IMATDA(ID,IS) = IMATDA(ID,IS) + SBOTEO
162              DISSC1(ID,IS) = DISSC1(ID,IS) + SBOTEO
163              VEGDISS_TEMP(ID,IS) = VEGDISS_TEMP(ID,IS) + SBOTEO
164      360      CONTINUE ! fin boucle direction
165      370      CONTINUE ! fin boucle en z
166      400      CONTINUE ! fin boucle freq
167
168      ! met a 0 les variables DUM
169      DUM_DISCO(:, :) = 0
170      DUM_LEAKC1(:, :) = 0
171      ! appelle la routine qui calcul VEGDISS avec VEGDISS_TEMP
172      CALL      ADDDIS(VEGDISS      ,DUM_LEAK      ,
173      &          AC2      ,ANYBIN      ,
174      &          DUM_DISCO      ,VEGDISS_TEMP      ,
175      &          DUM_LEAKC1      ,SPCSIG      )
176      RETURN
177      END  SUBROUTINE ! fin de végé
178

```

