

LISE DUPUIS

**VALIDATION D'UN MODÈLE BIDIMENSIONNEL DE PRÉVISION
DE VAGUES DANS L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT**

Mémoire
présenté
à la Faculté des études supérieures
de l'Université Laval
pour l'obtention
du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

Département de génie civil
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL

DÉCEMBRE 1997



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-31711-0

Canada

RÉSUMÉ

Le modèle bidimensionnel WAWSP, conçu par M.A. Donelan en 1977, est utilisé pour reconstituer le climat des vagues dans l'estuaire du Saint-Laurent. Les prévisions du modèle 2D sont comparées à des mesures effectuées par deux bouées au cours des années 1991, 1992 et 1993, ainsi qu'aux prévisions obtenues avec les modèles unidimensionnels SPM-77 et SPM-84. Dans l'ensemble, le modèle WAWSP fournit de meilleures estimations des paramètres des vagues que les modèles 1D. Les prévisions sont excellentes pour la hauteur significative, dans la mesure où les données de vent utilisées représentent bien les conditions à la surface de l'eau. Les périodes de pointe calculées sont largement inférieures aux périodes mesurées. Quant aux directions, elles manquent de précision, notamment en raison de la présence de houle dans l'estuaire. Il y a lieu de croire, toutefois, que la validation du modèle bidimensionnel aurait bénéficié de l'amélioration de la qualité des données de vagues et de vent disponibles.

Yvon Ouellet, Ph.D.
Directeur de recherche

Lise Dupuis, B.Sc.A.

AVANT-PROPOS

En premier lieu, nos remerciements s'adressent à notre directeur de recherche, le professeur Yvon Ouellet, pour l'aide qu'il nous apportée tout au long de nos travaux et pour avoir partagé avec nous sa vaste connaissance du domaine maritime.

Nos remerciements vont également à messieurs Mark A. Donelan, de l'Université de Miami, et Michael G. Skafel, du Centre canadien des eaux intérieures de Burlington, qui ont accepté de nous fournir le programme WAWSP et qui ont aimablement répondu à nos demandes de renseignements.

Nous sommes également reconnaissants au Groupe interuniversitaire de recherche océanographique du Québec (GIROQ), qui a contribué à l'obtention des données de la bouée Wavec, et particulièrement à monsieur Jean-Yves Anctil, responsable de l'opération de la bouée. Nous tenons aussi à remercier le Service des données sur le milieu marin, de Pêches et Océans Canada, qui a effectué le traitement de ces données. Quant aux données de la bouée de Mont-Louis, elles nous ont été fournies par Environnement Canada, que nous remercions également.

En dernier lieu, il y a lieu de souligner que ces travaux n'auraient pu être réalisés sans l'aide financière du Fonds FCAR, du CRSNG et de l'Université Laval, qui ont toute notre reconnaissance.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Résumé	ii
Avant-propos	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	ix
Liste des symboles	xi
Chapitre 1 - Introduction	1
1.1 Généralités	1
1.2 Problématique	2
1.3 Objectif	2
1.4 Contenu	3
Chapitre 2 - Les modèles de prévision de vagues	4
2.1 Introduction	4
2.2 Modèles unidimensionnels	5
2.3 Modèles bidimensionnels	5
2.3.1 Modèles de première génération	6
2.3.2 Modèles de deuxième génération	6
2.3.3 Modèles de troisième génération	7
Chapitre 3 - Le modèle WAWSP	8
3.1 Introduction	8
3.2 Modèle mathématique	9
3.3 Fonction source	12
3.4 Schéma numérique	15
3.4.1 Schéma temporel	15
3.4.2 Schéma spatial	16

3.4.3 Conditions aux limites	17
3.5 Programme	17
3.5.1 Grille de calcul	17
3.5.2 Champ de vent	18
3.5.3 Valeurs initiales et autres paramètres	18
3.5.4 Sorties	18
3.6 Revue des applications antérieures	21
3.6.1 Donelan 1978	21
3.6.2 Clodman 1983	21
3.6.3 Schwab, Bennett, Liu et Donelan 1984	22
3.6.4 Schwab, Bennett et Lynn 1984	24
3.6.5 Liu, Schwab et Bennett 1984	25
3.6.6 Schwab 1989	26
3.6.7 Skafel et Bishop 1991	26
3.6.8 Skafel et Bishop 1993	28
3.6.9 April 1995	29

Chapitre 4 - Reconstitution des vagues dans l'estuaire du Saint-Laurent

4.1 Introduction	30
4.2 Données de vent	32
4.3 Données de vagues	34
4.3.1 Bouée d'Environnement Canada (ENVC)	34
4.3.2 Bouée de l'université Laval (ULAV)	36
4.4 Tests avec le modèle WAWSP	41
4.4.1 Tests sur les conditions aux limites	42
4.4.2 Tests sur la stabilité du schéma numérique	43
4.4.3 Tests sur les changements de la direction du vent	46
4.5 Prévisions avec le modèle WAWSP	50
4.5.1 Grille de calcul	50
4.5.2 Programme	50
4.5.3 Simulations	52
4.5.4 Résultats	54
a) Hauteurs significatives à la bouée ENVC	55
b) Hauteurs significatives à la bouée ULAV	58
c) Périodes à la bouée ENVC	61

d) Périodes à la bouée ULAV	64
e) Directions à la bouée ULAV	67
4.6 Prévisions avec les modèles unidimensionnels	76
4.6.1 Description des modèles	76
a) Modèle SPM-77	77
b) Modèle SPM-84	78
4.6.2 Fetchs	78
4.6.3 Simulations	84
4.6.4 Résultats	85
a) Hauteurs significatives à la bouée ENVC	85
b) Hauteurs significatives à la bouée ULAV	88
c) Périodes à la bouée ENVC	91
d) Périodes à la bouée ULAV	94
e) Directions à la bouée ULAV	97
4.7 Comparaison des climats de vagues	104
4.7.1 Bouée ENVC	104
4.7.2 Bouée ULAV au large de Mont-Louis (ULAV-92-93)	116
4.7.3 Bouée ULAV au large de Sainte-Flavie (ULAV-91)	126
Chapitre 5 - Évaluation de la performance du modèle WAWSP	136
5.1 Introduction	136
5.2 Données et simulations (rappel)	137
5.3 Hauteur significative	138
5.4 Période de pointe	144
5.5 Direction de propagation	147
5.6 Discussion des résultats	151
Chapitre 6 - Conclusion	154
Références	157
Annexe A - Statistiques des données de vent	
Annexe B - Statistiques des données de vagues	
Annexe C - Programme WAWSP_UL	

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1 Paramètres de la fonction source de quantité de mouvement τ_n (Donelan, 1977)	14
Tableau 3.2 Sommaire des données de vagues (Skafel et Bishop, 1991)	27
Tableau 4.1 Positions des stations de vent	33
Tableau 4.2 Contenu des fichiers de données provenant de la bouée ENVC	35
Tableau 4.3 Contenu des fichiers de données provenant de la bouée ULAV	37
Tableau 4.4 Fichiers de données de vagues traités	40
Tableau 4.5 Résultats du test de changement de la direction du vent de 180°	49
Tableau 4.6 Périodes de reconstitution des vagues	53
Tableau 4.7 Simulations effectuées avec le modèle WAWSP	53
Tableau 4.8 Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ENVC	56
Tableau 4.9 Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV	59
Tableau 4.10 Statistiques des périodes mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ENVC	62
Tableau 4.11 Statistiques des périodes mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV	65
Tableau 4.12 Statistiques de l'écart entre les directions mesurées et celles calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV en 1991	69
Tableau 4.13 Statistiques de l'écart entre les directions mesurées et celles calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV en 1992	70
Tableau 4.14 Statistiques de l'écart entre les directions mesurées et celles calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV en 1993	71
Tableau 4.15 Radiales selon les directions à l'emplacement des bouées ENVC, ULAV-91 et ULAV-92-93	80
Tableau 4.16 Fetchs effectifs modifiés à la bouée ENVC	81
Tableau 4.17 Fetchs effectifs modifiés à la bouée ULAV-91	82
Tableau 4.18 Fetchs effectifs modifiés à la bouée ULAV-92-93	83
Tableau 4.19 Simulations effectuées avec les modèles 1D	84
Tableau 4.20 Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ENVC	86
Tableau 4.21 Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV	89

Tableau 4.22	Statistiques des périodes mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ENVC	92
Tableau 4.23	Statistiques des périodes mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV	95
Tableau 4.24	Statistiques de l'écart entre les directions mesurées et celles calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV en 1991	98
Tableau 4.25	Statistiques de l'écart entre les directions mesurées et celles calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV en 1992	99
Tableau 4.26	Statistiques de l'écart entre les directions mesurées et celles calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV en 1993	100
Tableau 4.27	Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ENVC en 1991, 1992 et 1993	109
Tableau 4.28	Statistiques des périodes mesurées et calculées à la bouée ENVC en 1991, 1992 et 1993	114
Tableau 4.29	Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1992 et 1993	120
Tableau 4.30	Statistiques des périodes mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1992 et 1993	124
Tableau 4.31	Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1991	130
Tableau 4.32	Statistiques des périodes mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1991	134
Tableau 5.1	Tableau récapitulatif des comparaisons entre les hauteurs significatives calculées et mesurées pour les années 1991, 1992 et 1993	143
Tableau 5.2	Tableau récapitulatif des comparaisons entre les hauteurs significatives calculées et mesurées pour l'année 1992	143
Tableau 5.3	Tableau récapitulatif des comparaisons entre les périodes calculées et mesurées pour les années 1991, 1992 et 1993	146
Tableau 5.4	Tableau récapitulatif des comparaisons entre les périodes calculées et mesurées pour l'année 1992	146
Tableau 5.5	Tableau récapitulatif des erreurs quadratiques moyennes sur les directions pour les années 1991, 1992 et 1993	150
Tableau 5.6	Tableau récapitulatif des erreurs quadratiques moyennes sur les directions pour l'année 1992	150
Tableau A.1	Statistiques de la vitesse du vent et distributions par quadrant (1 ^{er} mai 1991 au 30 novembre 1993, n=15408)	A.4
Tableau B.1	Statistiques des hauteurs significatives et des périodes de pointe	B.3
Tableau B.2	Distribution des vagues par quadrant à la bouée ULAV	B.6

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 3.1	Molécule de différences finies	16
Figure 3.2	Exemple de graphiques tracés à partir des sorties du programme WAWSP	19
Figure 4.1	Carte de la région étudiée	31
Figure 4.2	Bouée d'Environnement Canada (ENVC)	39
Figure 4.3	Bouée de l'université Laval (ULAV)	39
Figure 4.4	Grille de calcul	41
Figure 4.5	Variation de la hauteur significative en fonction des conditions aux limites et du fetch ($U = 10$ m/s, $\Delta s = 8$ km)	43
Figure 4.6	Variation de la hauteur significative en fonction du fetch ($U = 25$ m/s, $\Delta s = 4$ km)	44
Figure 4.7	Variation de la hauteur significative en fonction du fetch ($U = 25$ m/s, $\Delta s = 8$ km)	45
Figure 4.8	Variation de la hauteur significative en fonction du fetch ($U = 25$ m/s, $\Delta s = 16$ km)	45
Figure 4.9	Direction des vagues lors d'un changement de la direction du vent de 90° ($U = 10$ m/s, $\Delta s = 8$ km)	47
Figure 4.10	Hauteur significative des vagues lors d'un changement de la direction du vent de 90° ($U = 10$ m/s, $\Delta s = 8$ km)	47
Figure 4.11	Direction des vagues lors d'un changement de la direction du vent de 180° ($U = 10$ m/s, $\Delta s = 8$ km)	48
Figure 4.12	Hauteur significative des vagues lors d'un changement de la direction du vent de 180° ($U = 10$ m/s, $\Delta s = 8$ km)	48
Figure 4.13	Plan d'eau modélisé	51
Figure 4.14	Comparaison des hauteurs significatives mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ENVC	56
Figure 4.15	Comparaison des hauteurs significatives mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV	59
Figure 4.16	Comparaison des périodes mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ENVC	62
Figure 4.17	Comparaison des périodes mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV	65
Figure 4.18	Comparaison des directions mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV en 1991	72
Figure 4.19	Comparaison des directions mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV en 1992	73

Figure 4.20	Comparaison des directions mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV en 1993	75
Figure 4.21	Comparaison des hauteurs significatives mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ENVC	86
Figure 4.22	Comparaison des hauteurs significatives mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV	89
Figure 4.23	Comparaison des périodes mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ENVC	92
Figure 4.24	Comparaison des périodes mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV	95
Figure 4.25	Comparaison des directions mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV en 1991	101
Figure 4.26	Comparaison des directions mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV en 1992	102
Figure 4.27	Comparaison des directions mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV en 1993	103
Figure 4.28	Courbes de fréquences des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ENVC en 1991, 1992 et 1993	107
Figure 4.29	Distributions des directions de vagues calculées à la bouée ENVC en 1991, 1992 et 1993, et hauteurs significatives moyennes par direction	112
Figure 4.30	Courbes de fréquences des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1992 et 1993	118
Figure 4.31	Distributions des directions de vagues mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1992 et 1993, et hauteurs significatives moyennes par direction	122
Figure 4.32	Courbes de fréquences des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1991	128
Figure 4.33	Distributions des directions de vagues mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1991, et hauteurs significatives moyennes par direction	132
Figure A.1	Rose des vents	A.3
Figure A.2	Distributions de la direction du vent et vitesses moyennes par direction	A.5
Figure B.1	Périodes de pointe en fonction des hauteurs significatives	B.4
Figure B.2	Distributions de la direction des vagues et hauteurs significatives moyennes par direction	B.7

LISTE DES SYMBOLES

c	Célérité
c_g	Vitesse de groupe moyenne
c_p	Célérité de la composante du spectre de fréquence f_p
e	Erreur
f	Fréquence
f_p	Fréquence de pointe du spectre
g	Accélération gravitationnelle
n	Nombre de valeurs
r	Coefficient de corrélation
s	Écart type d'un échantillon
	Coordonnée horizontale
s^2	Variance d'un échantillon
s_x	Coordonnée horizontale, direction est
s_y	Coordonnée horizontale, direction nord
t	Temps
x	Coordonnée horizontale, direction est
y	Coordonnée horizontale, direction nord
C_D	Coefficient de traînée
C_{Dr}	Coefficient de traînée de forme
$D(f, \theta)$	Fonction de répartition angulaire
E	Énergie totale par unité de surface
F	Fetch
F_e	Fetch effectif
F_{em}	Fetch effectif modifié
H_0	Hauteur des vagues avant leur atténuation
H_{m_0}	Hauteur caractéristique
H_s	Hauteur significative
M	Quantité de mouvement totale
N	Fraction de la quantité de mouvement totale
Q	Fonction source d'énergie
Q_{ds}	Énergie dissipée
Q_{in}	Énergie fournie aux vagues par l'atmosphère
Q_{nl}	Transfert non linéaire d'énergie entre les composantes du spectre

R	Longueur d'une radiale
$S_{\eta}(f)$	Fonction de densité spectrale d'énergie
$S_{\eta}(f, \theta)$	Fonction de densité spectro-angulaire d'énergie
T_0	Période des vagues avant leur atténuation
T_p	Période de pointe du spectre
T_s	Période de la houle significative
U	Vitesse du vent
U_{10}	Vitesse moyenne du vent à 10 m au-dessus de la surface de l'eau
X_{cal}	Valeur calculée
X_{mes}	Valeur mesurée
Z_0	Paramètre de rugosité
α	Paramètre de Phillips
β	Angle entre une radiale et la direction du vent
ε	Racine de l'erreur quadratique moyenne
ε_n	Racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée
ε_{θ}	Racine de l'erreur quadratique moyenne de directions
$\eta(t)$	Élévation de la surface libre par rapport au niveau moyen
θ	Direction de propagation des vagues
θ_p	Direction de la composante du spectre de fréquence f_p
θ_u	Direction du vent
κ	Constante de von Karman
λ	Fraction de la contrainte τ_f qui produit une augmentation ou une diminution de la quantité de mouvement
ρ_a	Masse volumique de l'air
ρ_w	Masse volumique de l'eau
σ_{η}	Écart type du profil de surface $\eta(t)$
σ_{η}^2	Variance du profil de surface $\eta(t)$
τ	Contrainte de cisaillement
τ_f	Contrainte due au frottement de forme
τ_n	Fonction source de quantité de mouvement
τ_s	Contrainte due au frottement de surface
ϕ	Angle entre la direction des vagues et celle du vent
χ	Coefficient d'atténuation des vagues
Δ	Écart entre deux valeurs

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Généralités

Les modèles de prévision de vagues peuvent être divisés en deux catégories: les modèles unidimensionnels et les modèles bidimensionnels. Les modèles unidimensionnels reposent sur des équations semi-empiriques qui estiment les paramètres des vagues en un point donné et dans des conditions de vent permanent. Des modèles numériques basés sur ces équations ont été développés pour tenir compte de changements dans la vitesse et la direction du vent. Quant aux modèles bidimensionnels, ils calculent l'évolution d'un champ de vagues dans le temps et dans l'espace en fonction d'un champ de vent non uniforme et non permanent. La plupart de ces modèles sont basés sur l'équation de conservation de l'énergie. Ils peuvent être de type paramétrique ou de type spectral discret. Le modèle WAWSP (Wave And Wind Stress Prediction) est du type paramétrique. À la différence des autres modèles bidimensionnels, ce modèle, développé par Donelan (1977) pour calculer les vagues limitées par le fetch, repose sur l'équation de conservation de la quantité de mouvement. Il est utilisé depuis plusieurs années aux États-Unis par le National Weather Service pour la prévision journalière des vagues sur les Grands Lacs (Schwab, 1989).

1.2 Problématique

Que ce soit dans le domaine du génie côtier ou de l'environnement, il est souvent nécessaire de connaître le climat des vagues en un endroit précis. C'est le cas notamment lorsque des ouvrages de protection contre les vagues doivent être construits ou lorsque l'on souhaite prévoir le transport littoral de sédiments. Un climat de vagues est constitué d'une série de données comprenant la hauteur, la période et la direction des vagues pour une période de quelques mois à quelques années. Il est rare que de telles données soient disponibles pour une longue période de temps. Le plus souvent, elles sont plutôt reconstituées à partir des enregistrements de vent effectués à proximité du site d'intérêt. Jusqu'à présent, la reconstitution du climat des vagues dans l'estuaire du Saint-Laurent s'est faite au moyen de modèles unidimensionnels. La plupart de ces modèles supposent que les vagues se propagent dans la direction du vent, ce qui constitue une limite importante puisqu'il a été montré qu'il pouvait exister une différence significative entre la direction des vagues et celle du vent dans le cas où les vagues sont limitées par le fetch. Plusieurs auteurs ont observé des différences pouvant atteindre 50° (Donelan, 1980; Schwab *et al.*, 1984a; Donelan *et al.*, 1985). Les modèles numériques bidimensionnels reflètent davantage la physique des processus impliqués dans la génération des vagues par le vent. La plupart requièrent toutefois de grandes capacités de calcul, ce qui limite leur utilisation. Du fait qu'il est de type paramétrique, le modèle WAWSP nécessite un temps de calcul plus court que les modèles spectraux discrets. Il est donc envisageable de l'utiliser pour établir le climat des vagues dans l'estuaire du Saint-Laurent, un plan d'eau semi-ouvert où les vagues sont limitées par le fetch.

1.3 Objectif

L'objectif de cette étude est de vérifier si le modèle WAWSP peut fournir une estimation acceptable du climat des vagues dans l'estuaire du Saint-Laurent. Pour ce faire, les caractéristiques des vagues calculées avec ce modèle sont comparées à des mesures effectuées à deux bouées mouillées dans l'estuaire en 1991, 1992 et 1993. Les vagues calculées avec le modèle WAWSP sont aussi comparées aux vagues prévues par des modèles unidimensionnels pour les mêmes périodes. Les paramètres utilisés pour la comparaison sont la hauteur significative des vagues, leur période de pointe et leur direction de propagation.

1.4 Contenu

Le chapitre 2 donne un aperçu des modèles existants de prévision de vagues. Une description du modèle WAWSP est présentée au chapitre 3, ainsi qu'une revue des applications de ce modèle réalisées par d'autres auteurs. Le chapitre 4 débute par une description des données de vent et de vagues utilisées dans cette étude (sections 4.2 et 4.3). On y présente ensuite les résultats de tests que nous avons effectués avec le modèle WAWSP sur des cas théoriques (section 4.4). Puis suivent les résultats des prévisions de vagues effectuées dans l'estuaire du Saint-Laurent avec le modèle WAWSP (section 4.5) et avec les modèles unidimensionnels (section 4.6). Ce chapitre se termine par une comparaison des climats de vagues à l'emplacement des bouées (section 4.7). Les principaux résultats du chapitre 4 sont résumés au chapitre 5 afin d'évaluer la performance générale du modèle WAWSP. Finalement, le chapitre 6 présente la conclusion de cette étude.

CHAPITRE 2

LES MODÈLES DE PRÉVISION DE VAGUES

2.1 Introduction

Les premières études sur la génération des vagues par le vent ont conduit à l'élaboration de modèles de prévision dits semi-empiriques; ce sont des modèles unidimensionnels constitués essentiellement de relations entre les paramètres du vent et ceux des vagues. Bien que ces modèles soient encore largement utilisés, l'avènement des ordinateurs a favorisé le développement des modèles numériques bidimensionnels, qui résolvent les équations différentielles décrivant les processus physiques de génération des vagues. Certains de ces modèles peuvent aussi simuler la propagation de la houle¹.

¹ Dans cette étude, les expressions "vagues générées par le vent " ou "vagues du vent" désignent le système d'oscillations forcées que le vent fait naître et se développer à la surface de l'eau, tandis que le terme "houle" est utilisé pour désigner le système d'oscillations libres que les vagues précédentes finissent par constituer lorsqu'il n'y a plus de vent ou lorsqu'elles sont sorties de la zone où le vent continue d'en former de nouvelles.

2.2 Modèles unidimensionnels

Les modèles unidimensionnels utilisent des équations semi-empiriques basées sur l'analyse dimensionnelle. Ils estiment la hauteur et la période des vagues en un point et à un instant donnés en fonction des paramètres du vent (vitesse, direction, durée et fetch). L'état de la mer est représenté soit par des paramètres statistiques comme la hauteur et la période significatives, soit par un spectre d'ondes. La méthode S.M.B. (Sverdrup et Munk, 1947; Bretschneider, 1952, 1958, 1973) et la méthode de Krilov (1966: voir Massel, 1989) appartiennent au premier groupe, tandis que les spectres P.M. (Pierson et Moskowitz, 1964) et JONSWAP (Hasselmann *et al.*, 1973), de même que la méthode de Donelan (1980) appartiennent au second.

Tous les modèles de cette catégorie reposent sur l'hypothèse d'un champ de vent uniforme dans le domaine spatial. Mis à part certains modèles comme ceux de Krilov et de Donelan, ils supposent aussi que la direction des vagues est identique à celle du vent.

2.3 Modèles bidimensionnels

Les modèles bidimensionnels de prévision de vagues évaluent la distribution spatiale et temporelle de l'énergie des vagues en fonction de l'évolution du champ de vent. La plupart de ces modèles sont basés sur l'équation de conservation de l'énergie:

$$\frac{\partial S_{\eta}(f, \theta)}{\partial t} + \bar{c}_g \nabla S_{\eta} = Q \equiv Q_{in} + Q_{nl} + Q_{ds} \quad (2.1)$$

dans laquelle $S_{\eta}(f, \theta)$ désigne la fonction de densité spectro-angulaire d'énergie, $\bar{c}_g$, la vitesse de groupe moyenne et Q , la fonction source. Cette dernière peut comprendre trois termes:

- Q_{in} , l'énergie fournie aux vagues par l'atmosphère;
- Q_{nl} , le transfert non linéaire d'énergie entre les composantes du train de vagues;
- Q_{ds} , la dissipation d'énergie.

D'autres modèles, dont le modèle WAWSP étudié ici (Donelan, 1977), reposent sur l'équation de conservation de la quantité de mouvement, M . L'énergie totale par unité de surface, E , est reliée à la quantité de mouvement par la relation $M = E/c$, où c représente la célérité des vagues.

Selon la manière dont ils évaluent la fonction de densité $S_{\eta}(f, \theta)$, les modèles numériques se divisent en trois catégories: spectraux discrets, paramétriques et hybrides (Sobey, 1986). Dans le cas des *modèles spectraux discrets*, un spectre discret est évalué à chaque point de la grille de calcul, c'est-à-dire que l'intégrale de la fonction de densité est remplacée par une sommation de bandes de fréquences et de bandes de directions. Quant aux *modèles paramétriques*, des hypothèses sont formulées sur la forme du spectre, ce qui permet de réduire le problème à la prévision, en chaque point de la grille, de quelques paramètres caractéristiques du spectre. D'autres modèles combinent un modèle paramétrique pour les vagues générées par le vent et un modèle spectral discret pour la houle; c'est ce qu'on appelle des *modèles hybrides*.

Par ailleurs, les modèles numériques peuvent être classés comme modèles de première, deuxième ou troisième génération, selon la manière dont ils tiennent compte du terme de transfert d'énergie entre les vagues, Q_{nl} (The SWAMP Group, 1985).

2.3.1 Modèles de première génération

Les modèles de première génération ne tiennent pas compte du terme Q_{nl} ou, s'ils en tiennent compte, son influence est négligeable. Comme les interactions non linéaires entre les vagues ne sont pas prises en compte, les composantes du spectre évoluent indépendamment les unes des autres: on parle de *modèles de propagation découplée*. Il existe plusieurs modèles spectraux discrets appartenant à cette catégorie (Gelci *et al.*, 1957; Pierson *et al.*, 1966; Barnett, 1968; Ewing, 1971; Cardone *et al.*, 1976; Uji, 1986; etc.). Le modèle WAWSP (Donelan, 1977) est un modèle paramétrique de première génération.

2.3.2 Modèles de deuxième génération

Les modèles de deuxième génération effectuent un couplage entre les composantes du spectre par le biais du terme de transfert non linéaire d'énergie, Q_{nl} , qui est évalué paramétriquement. Ces modèles sont désignés comme *modèles couplés*. Voici quelques exemples de modèles de deuxième génération, regroupés selon la méthode d'évaluation des spectres d'énergie:

- les modèles paramétriques: Hasselmann *et al.*, 1976;
- les modèles couplés discrets: Resio, 1981; Golding, 1983;
- les modèles couplés hybrides: Günther et Rosenthal, 1985; De Voogt *et al.*, 1986.

2.3.3 Modèles de troisième génération

Les modèles de troisième génération utilisent des méthodes de calcul exact de la fonction non linéaire de transfert d'énergie, Q_{nl} . Les modèles EXACT-NL (Hasselmann et Hasselmann, 1985) et WAM (The WAMDI Group, 1988) appartiennent à cette catégorie.

CHAPITRE 3

LE MODÈLE WAWSP

3.1 Introduction

Le modèle WAWSP (Wave And Wind Stress Prediction) est un modèle bidimensionnel conçu par Donelan (1977, 1978) pour prévoir les vagues en eau profonde sur un plan d'eau fermé, c'est-à-dire dans des conditions de vagues limitées par le fetch. À partir d'un champ de vent non uniforme, il permet de calculer la hauteur, la période et la direction des vagues en chaque point du domaine. Comme son nom l'indique, ce modèle permet aussi d'évaluer la contrainte de vent, mais cette étude porte uniquement sur la prévision des vagues.

Les sections suivantes décrivent le modèle mathématique sur lequel repose le modèle WAWSP (section 3.2), la fonction source du modèle (section 3.3), le schéma numérique utilisé pour résoudre les équations différentielles (section 3.4) et les entrées et sorties du programme (section 3.5). On y présente aussi une revue des applications du modèle WAWSP réalisées par d'autres auteurs (section 3.6).

3.2 Modèle mathématique

Le modèle WAWSP (Donelan, 1977) est basé sur l'équation de conservation de la quantité de mouvement:

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{c}_g \bar{M} = \bar{\tau}_n \quad (3.1)$$

dans laquelle $\bar{M}$ représente la quantité de mouvement totale, $\bar{c}_g$, la vitesse de groupe moyenne et $\bar{\tau}_n$, la fonction source de quantité de mouvement.

Si on suppose que l'énergie potentielle des vagues est égale à leur énergie cinétique, la quantité de mouvement totale M , la direction de propagation moyenne $\bar{\theta}$ et la vitesse de groupe moyenne c_g sont données par les intégrales suivantes:

$$M = |\bar{M}| = \rho_w g \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{S_\eta(f, \theta)}{c(f)} d\theta df \quad (3.2)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\rho_w g}{M} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{S_\eta(f, \theta)}{c(f)} \theta d\theta df \quad (3.3)$$

$$c_g = |\bar{c}_g| = \frac{\rho_w g}{M} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{S_\eta(f, \theta)}{c(f)} c_g(f) \cos(\theta - \bar{\theta}) d\theta df \quad (3.4)$$

dans lesquelles $S_\eta(f, \theta)$ représente la fonction de densité spectro-angulaire d'énergie, $c(f)$, la célérité et $c_g(f)$, la vitesse de groupe.

La densité spectro-angulaire d'énergie est définie comme le produit de deux fonctions:

$$S_\eta(f, \theta) = S_\eta(f) \cdot D(f, \theta) \quad (3.5)$$

où $S_\eta(f)$ désigne la fonction de densité spectrale et $D(f, \theta)$, la fonction de répartition angulaire. Le modèle repose sur l'hypothèse que la distribution de l'énergie des vagues selon leur fréquence est celle d'un spectre JONSWAP (Hasselmann *et al.*, 1973):

$$S_{\eta}(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left\{ -\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right\} \gamma^a \quad (3.6)$$

dans lequel f_p désigne la fréquence de pointe du spectre et où les paramètres suivants sont considérés constants:

$$\gamma = 3,3 \quad (3.7)$$

$$a = \exp \left\{ -\frac{(f - f_p)^2}{2 b^2 f_p^2} \right\} \quad (3.8)$$

$$b = \begin{cases} 0,07 & \text{si } f \leq f_p \\ 0,09 & \text{si } f > f_p \end{cases} \quad (3.9)$$

Comme la fréquence de pointe (f_p) et le paramètre de Phillips (α) dépendent du fetch adimensionnel, α peut être défini en fonction de f_p :

$$\alpha = 0,033 \left(\frac{U_{10} f_p}{g} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.10)$$

dans laquelle U_{10} désigne la vitesse moyenne du vent à 10 m au-dessus de la surface de l'eau.

La fonction de densité spectrale ne dépend donc plus que de la fréquence de pointe et de la vitesse du vent.

Par ailleurs, le modèle suppose que l'énergie des vagues varie de part et d'autre de leur direction moyenne comme une fonction cosinus au carré:

$$D(f, \theta) \equiv D(\theta) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta - \bar{\theta}) & \text{si } |\theta - \bar{\theta}| \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.11)$$

Par l'intégration numérique de la fonction de densité spectro-angulaire, Donelan (1977) obtient les approximations suivantes de la variance du profil de surface $\eta(t)$:

$$\sigma_{\eta}^2 \approx \frac{0,86 M c_p}{\rho_w g} \quad (3.12)$$

$$\sigma_{\eta}^2 \approx 0,294 \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f_p^{-4} \quad (3.13)$$

où c_p , qui représente la célérité de la composante du spectre à la fréquence f_p , est définie comme suit:

$$c_p = \frac{g}{2\pi f_p} \quad (3.14)$$

De la même façon, à partir des équations (3.3) et (3.4) et en considérant qu'en eau profonde la vitesse d'un groupe d'ondes est égale à la moitié de la célérité d'une onde, il obtient l'estimation suivante de la vitesse de groupe moyenne²:

$$c_g = |\bar{c}_g| \approx 0.365 c_p \quad (3.15)$$

En utilisant les définitions précédentes, le modèle de prévision de vagues se réduit à la résolution de l'équation de la quantité de mouvement locale:

$$\frac{\partial M_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s_m} (c_{gm} M_k) = (\tau_n)_k \quad k=x, y, \quad m=x, y \quad (3.16)$$

où M_k et $(\tau_n)_k$ sont les composantes des vecteurs de la quantité de mouvement totale et de la source de quantité de mouvement, et où c_{gm} représente les composantes des vitesses de groupe correspondantes.

Lorsque la quantité de mouvement M est connue en un point donné, la fréquence de pointe peut être calculée (équations 3.12 et 3.13), puis la hauteur significative et la période de pointe:

$$H_s \approx 4\sigma_{\eta} \quad (3.17)$$

² L'auteur a modifié ultérieurement l'estimation de la vitesse de groupe moyenne en la définissant par 0.2609 c_p .

$$\tau_p = \frac{1}{f_p} \quad (3.18)$$

La direction de propagation moyenne des vagues³ ($\bar{\theta}$) est considérée comme étant celle du vecteur de la quantité de mouvement totale ($\bar{M}$).

3.3 Fonction source

Selon Donelan (1977), la contrainte τ engendrée par le vent soufflant sur un plan d'eau serait due en partie au frottement de surface (τ_s) et en partie au frottement de forme (τ_f):

$$\tau = \tau_s + \tau_f \quad (3.19)$$

En faisant l'hypothèse qu'une fraction constante de τ_f produit une augmentation ou une diminution nette de la quantité de mouvement (τ_n) et que τ_f et τ_n sont nuls pour une mer complètement levée, c'est-à-dire lorsque $c_p/U_{10} = 1,2$, Donelan définit la fonction source de quantité de mouvement comme suit:

$$\tau_n = \lambda \tau_f = \lambda \rho_a C_{Df} (U_{10} \cos \phi - 0,83 c_p) |U_{10} \cos \phi - 0,83 c_p| \quad (3.20)$$

dans laquelle λ représente une fraction de la contrainte τ_f , C_{Df} , le coefficient de traînée de forme et ϕ , l'angle entre la direction de propagation des vagues et celle du vent.

La définition du coefficient de traînée de forme est basée sur l'hypothèse que le profil de vitesse du vent dans la couche limite de surface de l'atmosphère est décrit par une loi logarithmique:

$$C_{Df} = \left(\frac{\kappa}{\ln \frac{10}{Z_0}} \right)^2 \quad (3.21)$$

³ Le symbole $\bar{\theta}$ représente ici la valeur moyenne des directions des composantes du spectre. Dans la suite de l'étude, cette valeur sera désignée par le terme "direction de propagation des vagues" et sera représentée par le symbole θ .

dans laquelle la constante de von Karman et le paramètre de rugosité prennent respectivement les valeurs suivantes:

$$\kappa = 0,4 \quad (3.22)$$

$$Z_0 = \frac{\sigma_\eta}{5} \quad (3.23)$$

La valeur du coefficient C_{Df} augmente donc avec la hauteur des vagues.

Quant au facteur λ , Donelan (1977) estime qu'il est de l'ordre de 10 %, mais que sa valeur doit être ajustée pour chaque plan d'eau étudié.

L'expression (3.20) décrit la contrainte τ_n dans la direction de propagation du champ de vagues existant, contrainte causée par un vent de vitesse U_{10} soufflant avec un angle de ϕ° par rapport à la célérité du train de vagues. En réalité, un tel vent donnera rapidement naissance à des vagues voyageant dans la direction du vent. Donelan divise donc τ_n en deux parties égales, une agissant dans la direction du train de vagues existant, $\tau_{n(1)}$, et l'autre dans la direction du vent, $\tau_{n(U)}$: $\tau_{n(1)}$ et $\tau_{n(U)}$ sont additionnés vectoriellement pour donner la source de quantité de mouvement du champ de vagues dit "actif".

Donelan considère aussi ce qu'il appelle un champ de vagues "fossile". Celui-ci est créé lorsque la direction de propagation des vagues et celle du vent diffèrent de plus de 90° . Dans ce cas, les composantes de la quantité de mouvement associée aux vagues dans la direction du vent deviennent le nouveau champ de vagues actif, tandis que les composantes associées à l'ancien champ de vagues actif deviennent le champ de vagues fossile, dont la fonction source est définie par $\tau_{n(2)}$. L'angle entre les deux champs de vagues est donc toujours supérieur à 90° .

Les trois composantes de la fonction source $\tau_{n(\ell=U,1,2)}$ sont définies comme suit:

$$\tau_{n(\ell)} = \frac{\lambda \rho_a C_{Df(\ell)}}{A_{(\ell)}} \left(U_{10(\ell)} - 0,83 c_{p(\ell)} \right) \left| U_{10(\ell)} - 0,83 c_{p(\ell)} \right| \quad (3.24)$$

Le tableau 3.1 définit les termes portant l'indice ℓ .

Tableau 3.1 - Paramètres de la fonction source de quantité de mouvement τ_n (Donelan, 1977)

Composante de τ_n	Direction de $\tau_n(r)$	$A(r)$	$U_{10}(r)$	$c_{p(r)}$	$Z_{0(r)}$	Limites de $\alpha_{(r)}$
$\tau_{n(U)}$	vent	2	U_{10}	$c_{p(1)} \cos(\phi_1)$	$\frac{\sigma_{\eta(1)}}{5} \cos(\phi_1) \geq 0,001$	
$\tau_{n(1)}$	champ de vagues actif	2	$U_{10} \cos(\phi_1)$	$c_{p(1)}$	$\frac{\sigma_{\eta(1)}}{5} \geq 0,001$ (1)	$\geq 0,006$
$\tau_{n(2)}$	champ de vagues fossile	1 (2)	$U_{10} \cos(\phi_2)$	$c_{p(2)}$	$\frac{\sigma_{\eta(2)}}{5} \geq 0,001$ si $\frac{\sigma_{\eta(2)}}{5} < 0,001$, alors $C_{Df(2)} = 0$	$= 0,006$

(1) L'auteur a modifié ultérieurement cette valeur pour l'établir à 0,000001.

(2) L'auteur a modifié ultérieurement cette valeur pour l'établir à 2 afin de tenir compte du fait que le transfert d'énergie entre l'atmosphère et les vagues est moins efficace quand les vagues voyagent dans le sens contraire du vent.

3.4 Schéma numérique

Le développement de l'équation de quantité de mouvement locale (équation 3.16) conduit au système d'équations suivant:

$$\frac{\partial M_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_{gx} M_x) + \frac{\partial}{\partial y}(c_{gy} M_x) = (\tau_n)_x \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial M_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_{gx} M_y) + \frac{\partial}{\partial y}(c_{gy} M_y) = (\tau_n)_y \quad (3.26)$$

Ces équations sont résolues par la méthode des différences finies. Un schéma d'Euler explicite est utilisé dans le domaine temporel, tandis que, dans le domaine spatial, un schéma décentré amont est combiné à un schéma centré.

3.4.1 Schéma temporel

La méthode d'Euler explicite conduit aux approximations suivantes de M_x et de M_y au temps $t+1$:

$$M_x^{t+1} \approx M_x^t + \Delta t \left\{ (\tau_n)_x - \left[\frac{\partial}{\partial x}(c_{gx} M_x) + \frac{\partial}{\partial y}(c_{gy} M_x) \right] \right\}^t \quad (3.27)$$

$$M_y^{t+1} \approx M_y^t + \Delta t \left\{ (\tau_n)_y - \left[\frac{\partial}{\partial x}(c_{gx} M_y) + \frac{\partial}{\partial y}(c_{gy} M_y) \right] \right\}^t \quad (3.28)$$

Le pas de temps Δt correspond à l'intervalle de temps entre deux données de vent fournies à l'entrée du modèle. Cependant, pour assurer la stabilité du schéma numérique, ce pas de temps principal peut être subdivisé en pas de temps intermédiaires de façon à respecter la condition de Courant:

$$\frac{\Delta t c_g}{\Delta s} \leq 1 \quad \text{où } \Delta s = \Delta x = \Delta y \quad (3.29)$$

Pour ce faire, avant d'évaluer la quantité de mouvement M au temps $t+1$, le modèle calcule un pas de temps intermédiaire à partir de la plus grande valeur de c_g trouvée au temps t . Durant les calculs aux pas de temps intermédiaires, les conditions de vent restent constantes.

3.4.2 Schéma spatial

Les dérivées spatiales des équations précédentes au point (i, j) sont approximées par un schéma décentré amont combiné à un schéma centré:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} (c_{gx} M_x) + \frac{\partial}{\partial y} (c_{gy} M_x) \right]_{i,j} \approx \frac{1}{\Delta s} \left\{ \pm \left[(c_{gx} M_x)_{i,j} - (c_{gx} M_x)_{i \mp 1, j} \right] \right. \\ \left. \pm \left[(c_{gy} M_x)_{i,j} - (c_{gy} M_x)_{i, j \mp 1} \right] + \text{CORRX} \right\} \quad (3.30)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} (c_{gx} M_y) + \frac{\partial}{\partial y} (c_{gy} M_y) \right]_{i,j} \approx \frac{1}{\Delta s} \left\{ \pm \left[(c_{gx} M_y)_{i,j} - (c_{gx} M_y)_{i \mp 1, j} \right] \right. \\ \left. \pm \left[(c_{gy} M_y)_{i,j} - (c_{gy} M_y)_{i, j \mp 1} \right] + \text{CORRY} \right\} \quad (3.31)$$

Les signes du haut sont utilisés lorsque le terme c_g est positif et ceux du bas lorsqu'il est négatif. Chaque point (i, j) est situé au centre d'une cellule de dimensions Δx par Δy . Les cellules utilisées dans le schéma spatial sont illustrées à la figure 3.1.

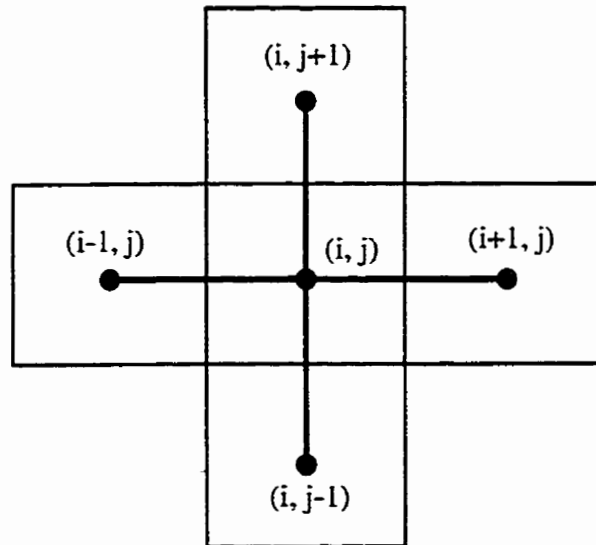


Figure 3.1 - Molécule de différences finies

Quant aux termes CORRX et CORRY, ils sont définis comme suit lorsque le point (i, j) n'est pas situé sur une frontière du domaine:

$$\text{CORRX} = \frac{1}{4} \left[(c_{gx} M_x)_{i+1,j} + (c_{gy} M_y)_{i+1,j} - (c_{gx} M_x)_{i-1,j} - (c_{gy} M_y)_{i-1,j} \right] \quad (3.32)$$

$$\text{CORRY} = \frac{1}{4} \left[(c_{gx} M_x)_{i,j+1} + (c_{gy} M_y)_{i,j+1} - (c_{gx} M_x)_{i,j-1} - (c_{gy} M_y)_{i,j-1} \right] \quad (3.33)$$

3.4.3 Conditions aux limites

Dans le modèle WAWSP, une cellule située hors du domaine est considérée comme étant située sur la terre. Le modèle pose donc comme conditions aux limites que, si le point $(i \pm 1, j)$ ou $(i, j \pm 1)$ est situé sur la terre ou hors du domaine, en ce point:

$$c_{gx} = c_{gy} = 0 \quad (3.34)$$

$$M_x = M_y = 0 \quad (3.35)$$

3.5 Programme

Pour cette étude, le programme WAWSP (Hodson et Donelan, 1979) a été modifié, principalement en ce qui concerne l'entrée des données. Par exemple, comme le programme original avait été conçu pour la prévision des vagues sur de courtes périodes, la lecture des données de vent a été modifiée afin de pouvoir reconstituer les vagues sur de longues périodes. La nouvelle version du programme (WAWSP_UL) est présentée à l'annexe C. Les paragraphes qui suivent contiennent quelques informations sur les entrées et sorties de ce programme.

3.5.1 Grille de calcul

Le plan d'eau où les vagues sont générées est représenté par une grille rectangulaire composée de cellules carrées de 2 km de côté. Les profondeurs attribuées aux cellules sont positives sur l'eau et négatives sur la terre. Toutefois, comme le modèle génère des vagues en eau profonde et, de ce fait, ne tient pas compte des effets de profondeur, la grille peut être simplifiée en attribuant une valeur de 1 aux cellules situées sur l'eau et une valeur de 0 aux autres. Le

programme permet de diminuer le temps de calcul en agrandissant la dimension des cellules à 4, 8, 16, 32 ou 64 km. Les calculs sont effectués au point situé au centre de chaque cellule (cf. figure 3.1).

3.5.2 Champ de vent

En plus de la profondeur, le modèle doit connaître les conditions de vent en chaque point de la grille de calcul. Les données de vent sont fournies au modèle à un ou plusieurs points de la grille. L'intervalle entre deux données de vent correspond au pas de temps principal du programme. Les vitesses de vent doivent être données à 10 m au-dessus de la surface de l'eau .

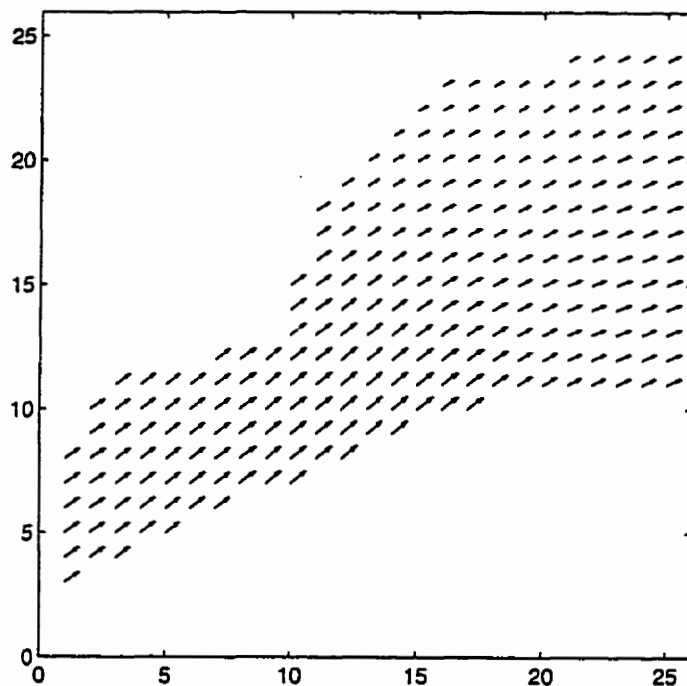
Si on ne dispose que d'une station de vent, le programme générera un champ de vent uniforme sur tout le domaine. Si plusieurs stations sont disponibles, les conditions de vent aux points autres que ceux des stations seront interpolées à partir des données aux trois stations les plus proches. données qui seront pondérées par l'inverse de la distance au carré entre le point de calcul et la station de vent.

3.5.3 Valeurs initiales et autres paramètres

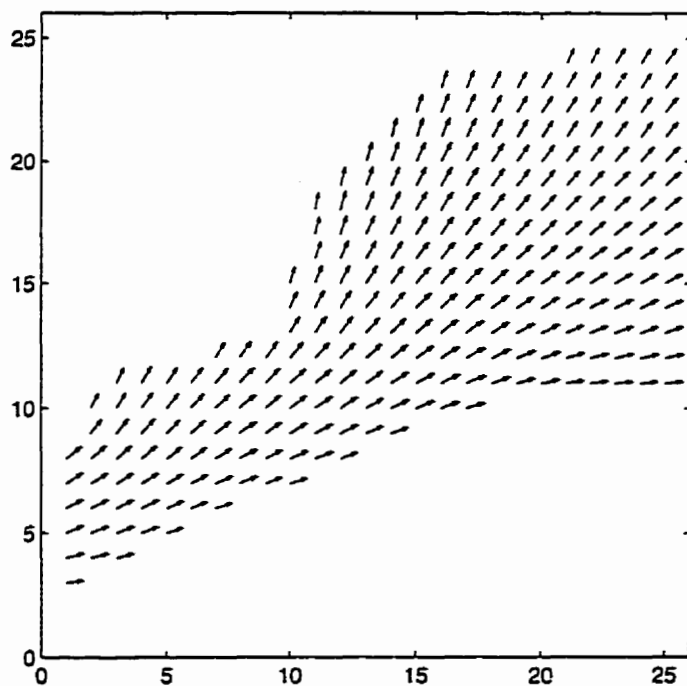
Le programme démarre avec des valeurs nulles de la quantité de mouvement (M) et de la vitesse de groupe (c_g). Cependant, lors du calcul de la fonction source (τ_n), des valeurs minimales doivent être attribuées au paramètre de rugosité (Z_0) afin d'éviter que cette fonction soit nulle en dépit de la présence de vent; ces valeurs sont données dans le tableau 3.1. On doit aussi fournir au modèle la masse volumique de l'air (ρ_a) et celle de l'eau (ρ_w), ainsi que la valeur du paramètre λ (cf. équation 3.20).

3.5.4 Sorties

Le programme calcule les caractéristiques des vagues à chaque pas de temps et à chaque point de la grille: la hauteur significative (H_s), la période de pointe (T_p) et la direction de propagation moyenne ($\bar{\theta}$). Selon les demandes de l'utilisateur, le programme peut enregistrer les séries chronologiques de H_s , T_p et $\bar{\theta}$ à certains points de la grille de calcul. Il peut aussi enregistrer, à des moments particuliers, les caractéristiques du vent et des vagues à tous les points de la grille. Ces données peuvent ensuite servir à tracer le champ de vent ($\bar{U}_{10}$), le champ de la célérité des vagues ($\bar{c}_p$), ainsi que les courbes d'isovaleurs des hauteurs significatives (H_s) et des périodes (T_p). La figure 3.2 montre un exemple de cette utilisation des sorties du programme WAWSP.

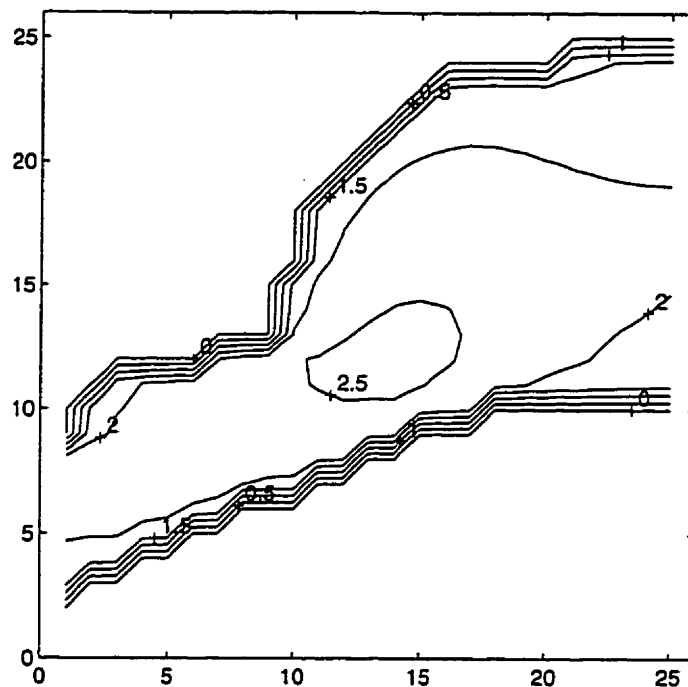


a) Champ de vent, $\bar{U}_{10}$ ($U_{10,\max} = 16,4 \text{ m/s}$)

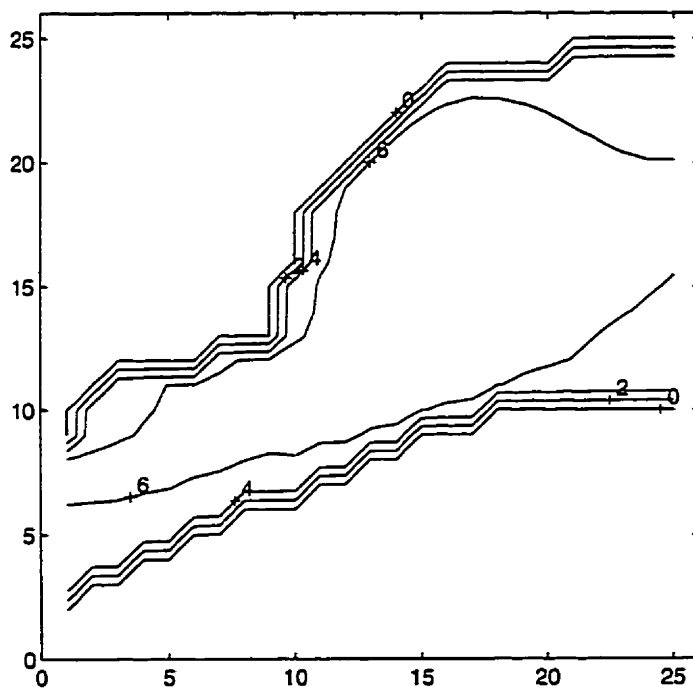


b) Champ de la célérité des vagues, $\bar{c}_p$ ($c_{p,\max} = 10,4 \text{ m/s}$)

Figure 3.2 - Exemple de graphiques tracés à partir des sorties du programme WAWSP



c) Hauteurs significatives, H_s (m)



d) Périodes, T_p (s)

Figure 3.2 - Exemple de graphiques tracés à partir des sorties du programme WAWSP (suite)

3.6 Revue des applications antérieures

3.6.1 Donelan 1978

Donelan (1978) a comparé les vagues calculées par le modèle WAWSP à celles mesurées sur le lac Ontario durant deux tempêtes, l'une en août 1972 (84 h) et la seconde en novembre de la même année (90 h). La hauteur significative des vagues (H_s) et la période de pointe (T_p) ont été enregistrées en trois endroits au moyen de bouées Waverider. Les données de vent ont été recueillies à toutes les 10 min par 11 bouées météorologiques, puis des moyennes horaires de la vitesse et de la direction du vent ont été calculées. Les conditions de vent aux autres points de la grille de calcul ont été interpolées en utilisant les données aux trois bouées les plus proches de chaque point. Pour la tempête du mois d'août seulement, des données de vent aux 20 min ont été interpolées linéairement à partir des séries horaires.

Deux simulations ont été effectuées pour la tempête d'août 1972, l'une en utilisant un pas de temps de 10 min et des cellules de 5,08 km, et l'autre avec un pas de temps de 40 min et des cellules de 20,32 km. L'auteur ne donne pas de détails sur la simulation de la tempête de novembre.

Les graphiques illustrant les séries chronologiques des valeurs calculées et des valeurs observées de H_s et de T_p montrent que les courbes des valeurs calculées s'ajustent bien aux observations, particulièrement pour les hauteurs significatives; les différences sont un peu plus grandes pour les périodes. Par ailleurs, les résultats obtenus avec des cellules de différentes grandeurs ne présentent pas de différences appréciables, ce qui démontre, selon l'auteur, l'insensibilité du modèle à la résolution de la grille de calcul. La meilleure correspondance entre les vagues reconstituées et celles observées a été obtenue en utilisant un facteur λ de 3,3 % (cf. section 3.3).

3.6.2 Clodman 1983

Une évaluation du modèle WAWSP a été effectuée par le Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada (Clodman, 1983) afin de vérifier s'il était opérationnel pour la prévision automatique des vagues sur les Grands Lacs et les mers fermées du Canada. La version du modèle qui a été testée permettait de tenir compte des conditions en eau peu profonde. Les tests ont porté sur des cas théoriques et des cas réels, en eau profonde et peu profonde, mais nous ne considérons ici que les résultats des tests en eau profonde.

Un test théorique effectué avec un champ de vent uniforme et constant visait à comparer les hauteurs significatives et les périodes calculées par le modèle WAWSP à celles obtenues avec la méthode S.M.B. (Bretschneider, 1973). Dans le cas des vagues limitées par le fetch, l'étude a montré que les valeurs de H_s et de T_p prévues par le modèle WAWSP étaient inférieures à celles obtenues avec la méthode S.M.B. lorsque les fetchs étaient courts et les vents faibles, mais supérieures lorsque les fetchs étaient longs et les vents forts. Dans des conditions de vagues limitées par la durée, l'étude a montré que les valeurs de H_s prévues par le modèle WAWSP étaient légèrement inférieures à celles calculées par la méthode S.M.B. pour des durées de trois heures et moins, et légèrement supérieures pour des durées plus longues.

Par ailleurs, l'auteur a effectué des tests avec les données de Donelan (1978) concernant les tempêtes d'août et novembre 1972 sur le lac Ontario (cf. section 3.6.1). Il a trouvé que le modèle WAWSP fournissait des résultats assez précis si on les comparait aux mesures effectuées aux trois bouées Waverider, en notant que les hauteurs significatives prévues par le modèle avaient tendance à réagir moins rapidement aux changements de la vitesse du vent que les hauteurs observées. Des tests ont aussi été effectués avec les données de novembre en faisant varier la grandeur des cellules de la grille (5,1, 10,2 et 20,3 km). Les résultats ont été jugés satisfaisants pour les deux premiers cas, mais non satisfaisants pour le dernier⁴.

L'auteur conclut que, pour les prévisions de vagues en eau profonde, le modèle WAWSP produisait de bons résultats et qu'il était prêt à être développé pour la prévision automatique des vagues sur les lacs, mais que sa version qui tenait compte des effets d'eau peu profonde requerrait des améliorations.

3.6.3 Schwab, Bennett, Liu et Donelan 1984

Schwab *et al.* (1984a) ont ajusté le modèle WAWSP (Donelan, 1977) en modifiant certains paramètres, puis l'ont appliqué à des cas théoriques et réels. Ils ont d'abord comparé ce modèle au modèle empirique de Donelan (1980), conçu pour prévoir les vagues limitées par le fetch. Le test a porté sur le cas théorique d'un bassin circulaire de 100 km de diamètre sur lequel soufflait un vent uniforme et constant. Les résultats montrent que les directions des vagues et les hauteurs significatives prévues par le modèle numérique sont semblables à celles calculées au moyen des formules empiriques.

⁴ Donelan avait effectué des simulations pour la tempête du mois d'août avec des cellules de 20,32 km et avait trouvé que les résultats étaient semblables à ceux obtenus avec des cellules de 5,08 km (cf. section 3.6.1).

Le modèle WAWSP a aussi été testé en le comparant à des données recueillies au cours des mois de septembre et octobre 1981 à deux sites dans le bassin central du lac Érié: une tour du Great Lakes Environmental Research Laboratory (GLERL) et une bouée NOMAD du NOAA Data Buoy Center (NDBC). Les données recueillies à la tour étaient la vitesse et la direction du vent, les températures de l'air et de l'eau, la hauteur significative des vagues, leur période et leur direction. À la bouée, les données étaient les mêmes, sans la direction des vagues cependant. La grille de calcul était constituée de cellules de 5 km. Aux deux points d'observation, le champ de vent était égal aux vents mesurés et les données de vent fournies au modèle ont été interpolées linéairement dans le temps à partir des observations horaires. Aux autres points de la grille, le champ de vent a été interpolé de façon à varier linéairement le long de l'axe longitudinal du lac.

La comparaison entre les hauteurs significatives calculées par le modèle WAWSP et celles mesurées montre que la concordance est excellente à la tour du GLERL, mais un peu moins bonne à la bouée du NDBC (erreurs quadratiques moyennes de 0,20 et 0,33 m respectivement, et coefficients de corrélation de 0,93 et 0,88). Les auteurs croient que les hauteurs de vagues enregistrées à la bouée pourraient avoir été trop élevées en raison d'un problème de calibration.

Quant aux périodes, elles sont définies par la période de pointe (T_p) à la tour et par la période "dominante" à la bouée. La comparaison avec les périodes calculées par le modèle WAWSP montre que celles-ci sont systématiquement inférieures aux valeurs observées. L'erreur quadratique moyenne est de 1,16 s à la tour et de 0,94 s à la bouée, tandis que le coefficient de corrélation est de 0,81 et de 0,72 respectivement. Comme la différence est plus importante pour les périodes longues, les auteurs suggèrent que cette différence pourrait être due en partie au fait que le spectre JONSWAP représente une mer en croissance et qu'à mesure que les conditions se rapprochent d'une mer complètement levée, ce spectre représente moins adéquatement la réalité.

Les auteurs ont également comparé la direction des vagues observées à la tour avec celles du vent, ainsi que la direction des vagues calculées par le modèle avec la direction du vent au même endroit. Les différences entre la direction des vagues et celle du vent sont semblables dans les deux cas; elles peuvent aller jusqu'à 50°. Quant à la concordance entre les directions des vagues observées et celles calculées, elle est excellente selon les auteurs, mises à part celles correspondant aux vagues venant de la terre. Comme ces directions ont des fetchs de 6 à 10 km, elles correspondent probablement aux vagues les plus courtes, pour lesquelles les auteurs s'attendaient à trouver des directions moins exactes en raison des hypothèses du modèle.

Les auteurs concluent que le modèle WAWSP fournit d'excellentes estimations de la hauteur et de la direction des vagues, en autant que les données de vent fournies au modèle soient adéquates, et que les estimations des périodes sont acceptables. Ils ont utilisé un facteur λ de 2,8 % (cf. section 3.3).

3.6.4 Schwab, Bennett et Lynn 1984

Dans un rapport du Great Lakes Environmental Research Laboratory, les auteurs (Schwab *et al.*, 1984b) ont simplifié le modèle WAWSP (Donelan, 1977) afin de le rendre opérationnel pour la prévision des vagues sur les Grands Lacs (lacs Supérieur, Michigan, Huron, St. Clair, Érié et Ontario).

Le modèle a d'abord été simplifié par l'entrée d'un champ de vent uniforme sur tout le plan d'eau. Si des conditions de vent très différentes étaient prévues pour deux régions d'un lac, les auteurs suggèrent de faire deux simulations, une pour chaque champ de vent.

La seconde simplification a consisté à éliminer le champ de vagues "fossile" généré par le modèle original (cf. section 3.3). Les auteurs ont constaté qu'un tel changement avait une faible influence sur la précision des estimations. En effet, en reprenant les données utilisées dans une étude antérieure (Schwab *et al.*, 1984a) décrite à la section 3.6.3, ils ont trouvé qu'à la tour du GLERL (lac Érié), l'erreur quadratique moyenne entre les hauteurs significatives observées et calculées était de 0,21 m au lieu de 0,20 m, et que le coefficient de corrélation restait inchangé à 0,93. À la bouée du NDBC, l'erreur quadratique moyenne passait de 0,33 m à 0,30 m et le coefficient de corrélation, de 0,88 à 0,87. Avec les mêmes données et sans champ de vagues "fossile", ils ont repris les simulations avec une grille constituée de cellules de 10 km au lieu de 5 km. Les résultats concernant les hauteurs significatives ont alors conduit à une erreur quadratique moyenne de 0,24 m à la tour et de 0,28 m à la bouée, tandis que le coefficient de corrélation passait à 0,90 et à 0,87 respectivement. À partir de ces résultats, les auteurs concluent que, dans une situation réelle de prévision, ce sont les inexactitudes dans les prévisions de vent qui semblent constituer la principale source d'erreur dans les prévisions de vagues.

3.6.5 Liu, Schwab et Bennett 1984

Dans l'article de Liu *et al.* (1984), les caractéristiques des vagues prévues par la version du modèle WAWSP adaptée par Schwab *et al.* (1984a) sont comparées à des cartes synoptiques des hauteurs de vagues sur le lac Michigan.

Deux séries de mesures permettant de tracer des cartes synoptiques des hauteurs de vagues ont été recueillies lors du passage d'un intense front froid les 20 et 21 novembre 1977, une série pendant que le vent soufflait du sud et l'autre lorsque le vent soufflait de l'ouest. Les mesures ont été effectuées par un altimètre au laser placé à bord d'un avion. Les hauteurs de vagues ainsi mesurées concordaient généralement bien avec les mesures effectuées au même moment par des bouées Waverider.

Pour la simulation avec le modèle numérique, les champs de vent ont été estimés à partir des enregistrements effectués à toutes les deux heures aux neuf stations de la Garde côtière américaine réparties autour du lac. Une correction à la vitesse et à la direction du vent a été appliquée lorsque celui-ci soufflait de la terre, correction qui tenait compte de la différence de température entre l'eau et l'air. À partir de ces neuf séries de données, des champs de vent ont été générés en considérant les composantes des vecteurs vent comme des fonctions linéaires des coordonnées spatiales.

La comparaison des hauteurs significatives mesurées et prévues par le modèle montre une excellente concordance entre les cartes synoptiques pour les deux événements, autant pour le patron des courbes de niveau que pour l'amplitude des vagues. Les hauteurs significatives estimées par le modèle ont aussi été comparées à des mesures effectuées à différents endroits sur le lac; l'erreur quadratique moyenne était de 0,3 m.

Les auteurs concluent que le modèle WAWSP s'est montré efficace pour prévoir les vagues dans des conditions de vent stable. Ils n'ont cependant pu vérifier son efficacité durant des changements dans les conditions de vent.

3.6.6 Schwab 1989

Dans son article de 1989, Schwab reprend les résultats des tests effectués avec le modèle WAWSP sur le lac Érié (Schwab *et al.*, 1984a). Il ajoute que le modèle a été largement testé sur les Grands Lacs, dans le détroit Puget, dans la baie d'Hudson et dans la mer de Beaufort. Selon l'auteur, ces tests ont montré qu'en eau profonde et intermédiaire, l'erreur était généralement de 10 à 20 % pour les hauteurs de vagues et de 20 à 30 % pour les périodes.

3.6.7 Skafel et Bishop 1991

L'étude de Skafel et Bishop (1991) compare la capacité de plusieurs modèles de prévision de vagues à reconstituer le climat des vagues, c'est-à-dire leur hauteur, leur période et leur direction pour une période de quelques mois à quelques années. Un des modèles utilisés est le modèle WAWSP. Les autres sont des modèles unidimensionnels: le modèle PHEW (Fleming *et al.*, 1984), le modèle Hindwave (Hawkes, 1987), ainsi que deux modèles basés sur les travaux de Baird et Glodowski (1978), l'un de Travaux Publics Canada et l'autre de Baird and Associates. Ces modèles utilisent des équations développées pour des vents stationnaires et les combinent avec des relations empiriques de façon à permettre aux modèles de s'ajuster aux changements de vitesse et de direction du vent. Le modèle PHEW permet de choisir entre plusieurs équations semi-empiriques de prévision de vagues; les auteurs ont utilisé les équations de la méthode S.M.B. (Bretschneider, 1973) et celles de Donelan (1980). Le modèle Hindwave est basé sur la définition du spectre JONSWAP (Hasselmann *et al.*, 1973), tandis que les modèles de Travaux publics Canada et de Baird utilisent les équations de la méthode S.M.B. (Bretschneider, 1973). La principale différence entre les deux derniers modèles et les précédents est qu'un facteur de 1,25 a été appliqué à la période significative pour estimer la période de pointe (T_p); le modèle PHEW-Donelan et le modèle Hindwave calculent directement T_p , alors que, pour le modèle PHEW-S.M.B., les auteurs ont considéré que T_p était égale à la période significative calculée. Pour un site donné, tous ces modèles utilisent les mêmes fetchs.

Les séries de données de vagues utilisées pour tester les modèles numériques provenaient des Grands Lacs et du golfe du Saint-Laurent (cf. tableau 3.2). Toutes les données de vent ont été mesurées sur l'eau, au même endroit que les vagues ou à proximité, et elles n'ont subi aucune correction.

Tableau 3.2 - Sommaire des données de vagues (Skafel et Bishop, 1991)

Lieu de collecte	Appareil de mesure	Période
Lac Ontario (Toronto)	Bouée Waverider	Avril à décembre 1972
Lac Ontario (Main Duck Island)	Bouée Waverider	Avril à novembre 1972
Lac Ontario (extrémité ouest)	Tour de l'INRE ⁽¹⁾	Juin 1976 à juillet 1977
Lac Érié (Pointe-aux-Pins)	Bouée directionnelle	Août à octobre 1979
Lac Érié (bassin central)	Tour du GLERL ⁽²⁾	Septembre et octobre 1981
Lac St. Clair	Tour C2	Octobre à novembre 1985
Golfe du Saint-Laurent (Pointe-Sapin, N.B.)	Bouée directionnelle	Juillet à novembre 1983
Golfe du Saint-Laurent (Stanhope, I.P.E.)	Bouée directionnelle	Septembre à novembre 1984

(1) Institut national de recherche sur les eaux

(2) Great Lakes Environmental Research Laboratory

Dans la comparaison entre les enregistrements de vagues et les prévisions des modèles PHEW et Hindwave, le modèle PHEW-Donelan s'est montré, dans l'ensemble, légèrement plus performant que les autres modèles unidimensionnels pour les estimations des hauteurs et des directions de vagues. Cependant, ce modèle sous-estime légèrement les périodes des vagues, pour lesquelles le modèle Hindwave s'est plutôt bien comporté. Le modèle WAWSP, qui n'a pas été utilisé pour reconstituer les vagues aux deux sites du golfe du Saint-Laurent, ne s'est pas montré plus performant que les modèles unidimensionnels pour reconstituer les vagues en un point donné. Toutefois, en raison du nombre limité de stations d'enregistrement des vents, les auteurs ont utilisé ce modèle avec un champ de vent uniforme alors qu'il a été conçu pour générer les vagues à partir d'un champ de vent variable dans le temps et dans l'espace. Utilisé avec différentes grandeurs de cellules (4, 8, 16 et 32 km), le modèle WAWSP n'a pas systématiquement produit de meilleurs résultats avec des cellules plus petites; certains tests ont même donné de meilleurs résultats avec les plus grandes cellules.

Par ailleurs, les modèles de prévision de vagues ont été utilisés pour reconstituer les vagues durant une période de 12 ans près de Stoney Creek, à l'extrémité ouest du lac Ontario, où on ne disposait pas d'enregistrements de vagues. Les auteurs ont utilisé les enregistrements de vent à l'aéroport de l'île de Toronto pour reconstituer les vagues à l'aide des modèles PHEW, Hindwave et WAWSP. Le modèle WAWSP, utilisé avec des cellules de 32 km afin de réduire le temps de calcul, a produit des résultats souvent différents de ceux des modèles unidimensionnels. Les auteurs expliquent cette différence par le fait que la grandeur des cellules

de la grille peut provoquer une distorsion des fetchs puisque le modèle situe automatiquement le point de calcul des vagues au centre d'une cellule de la grille. Par exemple, pour des cellules de 8, 16 et 32 km, les fetchs minimums sont respectivement de 4, 8 et 16 km.

3.6.8 Skafel et Bishop 1993

Dans leur article de 1993, Skafel et Bishop complètent leur étude de 1991 (Skafel et Bishop, 1991) par l'analyse plus en profondeur des directions estimées. Les modèles de prévision de vagues utilisés pour reconstituer le climat des vagues sont les mêmes que ceux décrits à la section 3.6.7. Les séries de données de vagues utilisées pour tester les modèles numériques sont aussi identiques, à l'exception des données enregistrées par les deux bouées Waverider dans le lac Ontario, qui ne peuvent enregistrer la direction des vagues. Par contre, des données de directions enregistrées en 1987 à la tour de l'Institut national de recherche sur les eaux, dans le lac Ontario, ont été utilisées. Ces données ont la particularité d'avoir été calculées avec la méthode du maximum de vraisemblance, toutes les autres directions ayant été obtenues par l'analyse de Fourier du signal. Les données de vent utilisées pour la reconstitution du modèle sont les mêmes que celles décrites à la section 3.6.7, sauf pour le site du lac St. Clair, où les données de vent provenant de trois bouées ont servi à générer les champs de vent.

Les graphiques de dispersion illustrant les directions calculées en fonction des directions mesurées montrent que tous les modèles (PHEW, Hindwave et WAWSP) reproduisent les tendances des directions mesurées. Cependant, ils présentent aussi une dispersion et un biais qui varient selon le site. Dans l'ensemble, le modèle PHEW-Donelan conduit à des résultats légèrement supérieurs à ceux des autres modèles. Les estimations fournies par ce modèle concordent très bien avec les directions évaluées par la méthode du maximum de vraisemblance à un site du lac Ontario. Les directions obtenues avec le modèle WAWSP à partir de petites cellules sont plus exactes que celles obtenues avec de plus grandes cellules, mais ce modèle bidimensionnel ne s'est pas montré nettement supérieur aux modèles unidimensionnels. Les auteurs rappellent que la qualité des vagues reconstituées dépend avant tout de la qualité des données de vent disponibles puisque les meilleures estimations ont été obtenues pour le lac St. Clair, où les données de vent permettaient de générer un champ de vent non uniforme, alors que les pires résultats ont été obtenus aux sites situés dans le golfe du Saint-Laurent, où l'hypothèse d'un champ de vent uniforme représente le moins bien les conditions de vent.

Les auteurs ont aussi complété l'analyse des vagues reconstituées durant une période de 12 ans à l'extrémité ouest du lac Ontario (cf. section 3.6.7). Ils ont d'abord regroupé les directions

estimées en secteurs de 22,5°. En ne tenant compte que des cinq secteurs correspondant aux plus longs fetchs et en ne compilant que les vagues supérieures à 1,0 m, ils ont trouvé des différences importantes dans les fréquences d'occurrence de chacun des secteurs, selon les modèles de prévision de vagues utilisés. Par exemple, le modèle WAWSP, utilisé avec des cellules de 32 km, a produit des estimations qui ne concordent pas avec celles des autres modèles.

Les auteurs concluent qu'aucun des modèles utilisés ne fournissait de directions satisfaisantes pour la prévision du transport littoral.

3.6.9 April 1995

April (1995) a appliqué le modèle WAWSP à un plan d'eau semi-ouvert situé dans l'estuaire du Saint-Laurent. Il a utilisé une grille de calcul de 200 km de longueur et des cellules de 8 km. Seize événements d'une durée de 25 h ont été modélisés avec le modèle WAWSP en utilisant des valeurs initiales non nulles de la quantité de mouvement (M), de la vitesse de groupe (c_g) et de l'écart type du profil de surface (σ_η). La valeur du paramètre λ a été fixée à 2,8 % (cf. section 3.3). Les résultats des prévisions ont été comparés à des mesures effectuées à deux bouées en 1991 et 1992: la bouée d'Environnement Canada au large de Mont-Louis, qui enregistre la hauteur et la période des vagues, et la bouée de l'université Laval au large de Sainte-Flavie, qui enregistre en plus la direction des vagues. Des prévisions ont aussi été effectuées aux deux endroits avec le modèle unidimensionnel SPM-77 (U.S. Army Corps of Engineers, 1977).

Cette étude n'a pas donné de résultats concluants sur la performance du modèle WAWSP. Selon nous, deux causes peuvent avoir contribué à cette situation: premièrement, les conditions initiales imposées ont influencé grandement les prévisions, d'une durée de 25 h seulement en raison du manque de puissance de l'ordinateur utilisé; deuxièmement, la grille de calcul ne couvrait pas tous les fetchs des points où les vagues ont été calculées. La présente étude a été entreprise dans le but, entre autres, d'étudier l'influence de ces facteurs sur les résultats du modèle 2D.

CHAPITRE 4

RECONSTITUTION DES VAGUES DANS L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT

4.1 Introduction

Le modèle WAWSP (Donelan, 1977) est utilisé pour reconstituer les vagues dans une région de l'estuaire du Saint-Laurent qui s'étend de Mont-Joli à Mont-Louis (cf. figure 4.1). Il s'agit d'un plan d'eau semi-fermé d'environ 200 km de longueur et dont la largeur varie de 45 à 115 km. Cette région appartient au bas estuaire, puisqu'on considère généralement que le golfe du Saint-Laurent commence à l'île d'Anticosti.

Les données de vent utilisées pour les calculs sont décrites à la section 4.2, tandis que la section 4.3 présente les données de vagues enregistrées à deux bouées en 1991, 1992 et 1993: une bouée d'Environnement Canada (ENVC) et une bouée de l'université Laval (ULAV). La figure 4.1 montre l'emplacement de la bouée ENVC au cours des trois saisons d'enregistrement, ainsi que les deux emplacements de la bouée ULAV, celui de 1991 au large de Sainte-Flavie (ULAV-91) et celui de 1992 et 1993 en face de Mont-Louis (ULAV-92-93).

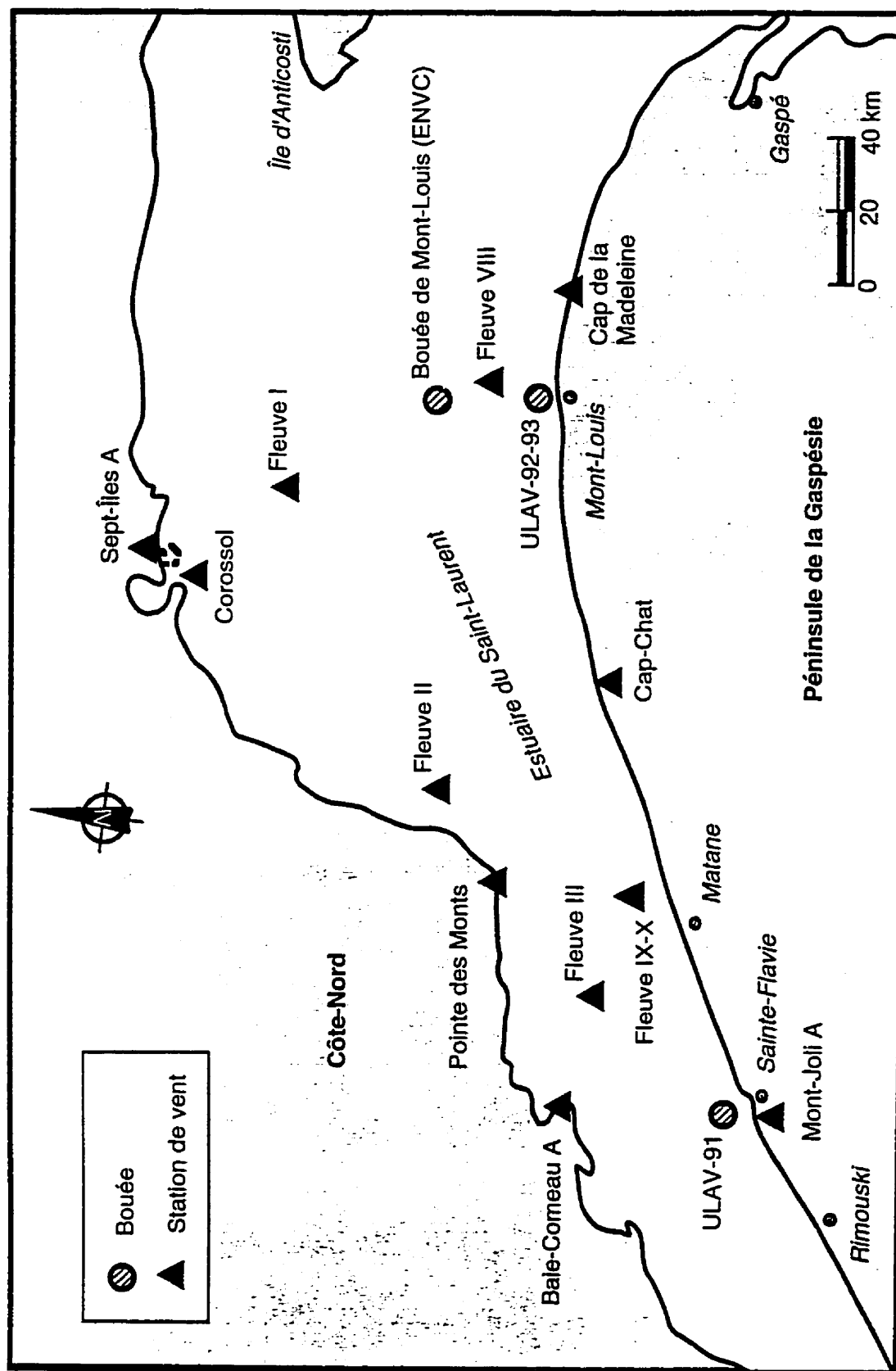


Figure 4.1 - Carte de la région étudiée

La section 4.4 présente les résultats de tests effectués avec le modèle WAWSP sur des cas théoriques. À la section 4.5, le modèle bidimensionnel est utilisé pour reconstituer les vagues dans l'estuaire, tandis qu'à la section 4.6, les vagues sont reconstituées à l'emplacement des bouées avec les modèles unidimensionnels SPM-77 et SPM-84 (U.S. Army Corps of Engineers, 1977 et 1984). Pour chacune des simulations effectuées, les résultats des modèles numériques sont comparés aux enregistrements de vagues. Finalement, la section 4.7 regroupe tous les résultats disponibles à chacun des trois emplacements des bouées afin d'établir le climat des vagues à chaque endroit et le comparer à celui obtenu à partir des mesures de vagues.

4.2 Données de vent

La figure 4.1 montre l'emplacement des 13 stations de vent situées dans la région étudiée. Ces stations peuvent être divisées en trois catégories (cf. tableau 4.1):

- les *stations terrestres*, qui sont des stations météorologiques d'Environnement Canada situées aux aéroports;
- les *stations maritimes*, aussi exploitées par Environnement Canada mais situées sur l'eau ou en bordure de l'eau;
- les *stations synthétiques*, qui correspondent à des endroits où les vents ont été reconstitués par Environnement Canada⁵ à partir d'enregistrements de stations côtières et d'observations effectuées à bord de navires.

Les données de vent sont constituées d'enregistrements horaires de la vitesse et de la direction mesurées à une hauteur de 10 m du sol, sauf pour la bouée de Mont-Louis, où les mesures sont effectuées à 5 m au-dessus de la surface de l'eau. L'annexe A présente les statistiques de ces données pour la période du 1^{er} mai au 30 novembre des années 1991, 1992 et 1993. La figure A.2 montre que les vents ont une distribution bimodale dans cette région, les directions dominantes correspondant aux secteurs E-NE et W-SW. Une analyse par quadrant a aussi été effectuée, un quadrant regroupant quatre secteurs de la rose des vents (cf. figure A.1):

- quadrant I: NE, ENE, E, ESE;
- quadrant II: SE, SSE, S, SSW;
- quadrant III: SW, WSW, W, WNW;
- quadrant IV: NW, NNW, N, NNE.

⁵ Division des services scientifiques du Service de l'Environnement atmosphérique.

En regroupant les secteurs de cette façon, une des directions dominante est comprise dans le quadrant I et l'autre, dans le quadrant III. Le tableau A.1 montre que la direction dominante est associée au quadrant III, sauf pour les stations de Sept-Îles, Corossol et Fleuve I, où la direction dominante est associée au quadrant I. À l'exception de la station Fleuve I, le quadrant ayant la plus grande fréquence est aussi celui comportant les vitesses moyennes les plus élevées.

Le tableau A.1 montre aussi des différences importantes entre les stations quant aux vitesses du vent. Les stations terrestres sont celles ayant les vitesses les plus faibles, tandis que les stations maritimes ont les vitesses les plus élevées.

Tableau 4.1 - Positions des stations de vent

Nom de la station	Numéro	Latitude	Longitude	Hauteur de l'anémomètre
Stations terrestres				
Baie-Comeau	7040440	49° 08'	68° 12'	10 m
Mont-Joli	7055120	48° 36'	68° 13'	10 m
Sept-Îles	7047910	50° 13'	66° 16'	10 m
Stations maritimes				
Bouée de Mont-Louis	7055202	49° 33'	65° 45'	5 m
Cap-Chat	70510M0	49° 05'	66° 44'	10 m
Cap de la Madeleine	7051163	49° 15'	65° 20'	10 m
Corossol	7041934	50° 05'	66° 23'	10 m
Pointe des Monts	704F0PN	49° 19'	67° 23'	10 m
Stations synthétiques				
Fleuve I	9999901	49° 54'	66° 06'	10 m
Fleuve II	9999902	49° 30'	67° 00'	10 m
Fleuve III	9999903	49° 06'	67° 48'	10 m
Fleuve VIII	9999908	49° 24'	65° 42'	10 m
Fleuve IX-X	9999910	49° 00'	67° 24'	10 m

4.3 Données de vagues

Les données de vagues qui serviront à valider les prévisions ont été enregistrées dans l'estuaire du Saint-Laurent en 1991, 1992 et 1993 par deux bouées (cf. figure 4.1): la bouée n° 45138 du Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada⁶ (bouée ENVC) et une bouée directionnelle appartenant à l'université Laval (bouée ULAV). Pour les trois saisons d'enregistrement, la bouée ENVC a été mouillée au centre de l'estuaire, dans 330 m d'eau. Quant à la bouée ULAV, elle se trouvait à environ 5 km au large de Sainte-Flavie en 1991, dans 36 m d'eau, et au large de Mont-Louis les deux années suivantes, à environ 3 km de la côte, dans 95 m d'eau. Les positions des bouées correspondent aux coordonnées suivantes:

- bouée ENVC : 49° 33' N ; 65° 45' W ;
- bouée ULAV-91 : 48° 40' N ; 68° 14' W ;
- bouée ULAV-92 : 49° 16' N ; 65° 45' W ;
- bouée ULAV-93 : 49° 16' N ; 65° 44' W .

4.3.1 Bouée d'Environnement Canada (ENVC)

La bouée d'Environnement Canada (bouée ENVC) est constituée d'une coque de 3 m de diamètre sur laquelle est installé un système d'acquisition et de traitement de données ZENO, conçu par la compagnie Axys Environmental Systems Ltd. de Colombie britannique. L'ensemble s'élève à environ 5 m au-dessus de la surface de l'eau (cf. figure 4.2). Les données sont recueillies et traitées par la bouée à toutes les heures, puis transmises à terre via satellite. Le contenu des fichiers de données est présenté au tableau 4.2.

Les vagues sont mesurées à l'aide d'un accéléromètre dont le signal est intégré pour donner le déplacement vertical. La fréquence d'échantillonnage est d'un hertz. À chaque heure, huit enregistrements consécutifs de 256 s sont recueillis et soumis à une analyse spectrale. La hauteur caractéristique⁷ (H_{m0}) et la période de pointe du spectre (T_p) sont évaluées à partir de la moyenne des huit spectres, en ne conservant que les valeurs comprises entre 0,5 et 0,033 Hz (2 et 30 secondes).

⁶ Cette bouée correspond à la station de vent désignée sous le nom de "bouée de Mont-Louis" à la section 4.2.

⁷ Lorsque la hauteur significative (H_s) est estimée au moyen de l'analyse spectrale, on considère que $H_s = H_{m0}$.

Tableau 4.2 - Contenu des fichiers de données provenant de la bouée ENVC

Colonne	Contenu	Unités
1	Date	an - mois - jour - heure G.M.T.
2	Direction du vent (girouette n° 1)	° (azimut)
3	Vitesse du vent (anémomètre n° 1)	m/s
4	Direction du vent (girouette n° 2)	° (azimut)
5	Vitesse du vent (anémomètre n° 2)	m/s
6	Température de l'air	°C
7	Pression au niveau de la mer	mb
8	Température de l'eau	°C
9	Période de pointe du spectre de vagues (T_p)	s
10	Hauteur caractéristique des vagues (H_{m0})	m
11	Rafale (anémomètre n° 1)	m/s
12	Rafale (anémomètre n° 2)	m/s
13	Hauteur maximale des vagues (H_{max})	m
14	Correction du compas (azimut n° 1)	100°
15	Correction du compas (azimut n° 2)	100°

Comme les paramètres de vagues sont obtenus à partir d'estimations des spectres de vagues, ils comportent une marge d'erreur. À titre d'exemple, Donelan et Pierson (1983) ont établi que, pour un enregistrement d'une durée de 17 min, cette erreur était d'environ $\pm 10-15 \%$ pour la hauteur significative (H_s) et de $\pm 5 \%$ pour la fréquence de pointe (f_p), avec un degré de confiance de 90 %.

Le tableau 4.4 décrit les fichiers de données de vagues traités dans le cadre de cette étude. La période annuelle d'enregistrement à la bouée ENVC s'étend sur environ six mois et demi pour les trois années étudiées, soit du début de mai à la mi-novembre. Les données ont été traitées de la manière suivante. Dans un premier temps, quelques valeurs nulles ou anormales ont été remplacées par des valeurs plus cohérentes. Puis les lignes de données manquantes ont toutes été interpolées linéairement étant donné leur faible nombre. En effet, les fichiers ne contenaient jamais plus de sept heures consécutives de données manquantes, à l'exception d'une série de 23 heures dans le fichier de 1991 et d'une série de 19 heures dans celui de 1992. Par ailleurs, les fichiers contenaient de nombreuses périodes de pointe égales ou supérieures à 15 s. Comme les valeurs de ces périodes étaient concentrées entre 25 et 32 s, et qu'elles voisinaient des périodes beaucoup plus faibles, il ne pouvait s'agir que de valeurs erronées. Ces périodes ont donc été

remplacées par des valeurs plus réalistes, interpolées à partir des valeurs voisines dans le cas où le nombre de valeurs consécutives à remplacer était de 13 ou moins. Dans les autres cas, les valeurs élevées des périodes de pointe n'ont pas été modifiées parce que l'intervalle à combler était trop grand.

Quelques statistiques des hauteurs et des périodes de vagues enregistrées à la bouée sont présentées à l'annexe B. Les graphiques montrant les périodes en fonction des hauteurs significatives ont été tracés en ne retenant que les périodes inférieures à 15 s (cf. figure B.1). On constate que la plupart de ces périodes longues correspondent à des vagues de faible amplitude, ce qui laisse croire qu'il s'agit, en partie, de houle provenant du large.

4.3.2 Bouée de l'université Laval (ULAV)

La bouée de l'université Laval (bouée ULAV) est une bouée directionnelle de type Wavec fabriquée par Datawell (Van der Vlugt, 1982). Elle est composée d'un cylindre central où se trouvent les instruments, auquel est attaché un flotteur d'environ 2,5 m de diamètre (cf. figure 4.3). L'ensemble s'élève à environ 1,3 m au-dessus de la surface de l'eau. Un système de transmission en continu transfère les données à une station terrestre qui les enregistre.

À une fréquence de 1,28 Hz, la bouée mesure son déplacement vertical au moyen d'un accéléromètre, ses angles de tangage et de roulis ainsi que les composantes du champ magnétique. La période d'échantillonnage est d'environ 34 min (2560 valeurs). La bouée est programmée pour que l'intervalle entre deux enregistrements varie selon l'agitation de la mer, le minimum étant de 35 min et le maximum, de 3 h.

Les enregistrements bruts ont été traités par le Service des données sur le milieu marin (SDMM) de Pêches et Océans Canada. Les échantillons ont été divisés en 10 blocs de 200 s (256 valeurs) et chaque bloc a été soumis à une analyse spectrale afin d'évaluer le cospectre et le spectre de quadrature correspondants. Des spectres moyens ont ensuite été calculés en ne conservant que les valeurs comprises entre 0,5 et 0,033 Hz (2 et 30 secondes). Les données utilisées pour cette étude (cf. tableau 4.3) ont été extraites des fichiers fournis par le SDMM.

En ce qui concerne la précision de la direction des vagues mesurée par une bouée de type Wavec, elle varie selon la méthode d'analyse employée. Kuik *et al.* (1988) ont montré que l'erreur statistique (plus précisément, la racine de l'erreur quadratique moyenne) était de l'ordre de 5° à 10° pour la direction moyenne des vagues. Par ailleurs, Allender *et al.* (1989), qui ont

comparé les mesures de vagues obtenues avec différentes bouées directionnelles, ont trouvé que la bouée Wavec estimait les directions moyennes avec un biais moyen de 4° . Il est à noter qu'en raison de problèmes survenus lors du traitement des données, la direction des vagues fournie par le SDMM n'est pas la direction moyenne, mais plutôt la direction de la composante du spectre de période T_p , c'est-à-dire θ_p (cf. tableau 4.3).

Tableau 4.3 - Contenu des fichiers de données provenant de la bouée ULAV

Colonne	Contenu	Unités
1	Date	année
2	Date	mois - jour
3	Heure	heure G.M.T.
4	Moment d'ordre 0 de la densité spectrale (m_0)	m^2
5	Moment d'ordre 1 de la densité spectrale (m_1)	m^2/s
6	Moment d'ordre 2 de la densité spectrale (m_2)	m^2/s^2
7	Moment d'ordre 4 de la densité spectrale (m_4)	m^2/s^4
8	Hauteur significative (H_s)	m
9	Facteur de finesse du pic du spectre	-
10	Minimum de la densité spectrale	m^2/Hz
11	Période du minimum de la densité spectrale	s
12	Maximum de la densité spectrale	m^2/Hz
13	Période de pointe du spectre (T_p)	s
14	Direction de la composante du spectre de période T_p (θ_p)	$^\circ$ (azimut)
15	Indice de largeur du spectre	-
16	Période moyenne	s
17	Période moyenne apparente	s
18	Période apparente de la crête	s
19	Indice d'étroitesse du spectre	-

Les enregistrements à la bouée ULAV ont été de durée très variable d'une année à l'autre (cf. tableau 4.4): cinq mois en 1991, trois mois et demi en 1992 et trois mois en 1993. Les données ont été traitées de la manière suivante. La première étape a consisté à remplacer les quelques valeurs des périodes de pointe (T_p) égales ou supérieures à 15 s par des valeurs interpolées à partir des valeurs voisines. Ensuite, comme l'intervalle entre deux enregistrements varie entre 35 min et 3 h dans ces fichiers, les valeurs de la hauteur significative (H_s), de la période de pointe (T_p) et de la direction correspondante (θ_p) ont été interpolées aux heures. Puis les données manquantes ont été interpolées linéairement, à condition que les fichiers n'en contiennent pas plus de six valeurs horaires consécutives. À la fin du traitement, les fichiers contiennent encore un grand nombre de données manquantes: 43% en 1991, 28% en 1992 et 45% en 1993. Nous avons vérifié si les données manquantes étaient plus fréquentes lorsque les vents étaient forts, mais ce n'est pas le cas. Le système semble donc avoir connu des problèmes de fonctionnement fréquents (panne d'électricité, manque de cassettes d'enregistrement, etc.).

Les statistiques des vagues enregistrées à la bouée ULAV sont présentées à l'annexe B. Le tableau B.1 montre que les hauteurs de vagues et les périodes sont plus faibles que celles mesurées à la bouée ENVC, ce qui peut s'expliquer par la position des bouées et par les périodes d'enregistrement. En effet, la bouée ENVC, située au centre de l'estuaire, est plus exposée au vent que la bouée ULAV. De plus, au cours des trois saisons, les enregistrements se sont terminés plus tôt à la bouée ULAV qu'à la bouée ENVC. Par conséquent, la bouée ENVC a pu enregistrer un plus grand nombre de vagues générées par les vents forts qui soufflent souvent en automne. Par ailleurs, en examinant la figure B.1, on constate qu'un certain nombre de vagues de faible amplitude ont des périodes longues, mais le phénomène est beaucoup moins marqué qu'à la bouée ENVC. Le tableau B.2 montre que la direction dominante des vagues est associée au quadrant III quand la bouée est au large de Sainte-Flavie et au quadrant I quand elle est près de Mont-Louis. On ne note pas de différence dans la distribution des vagues quand on analyse seulement les vagues supérieures à 0,5 m (cf. tableau B.2 et figure B.2).

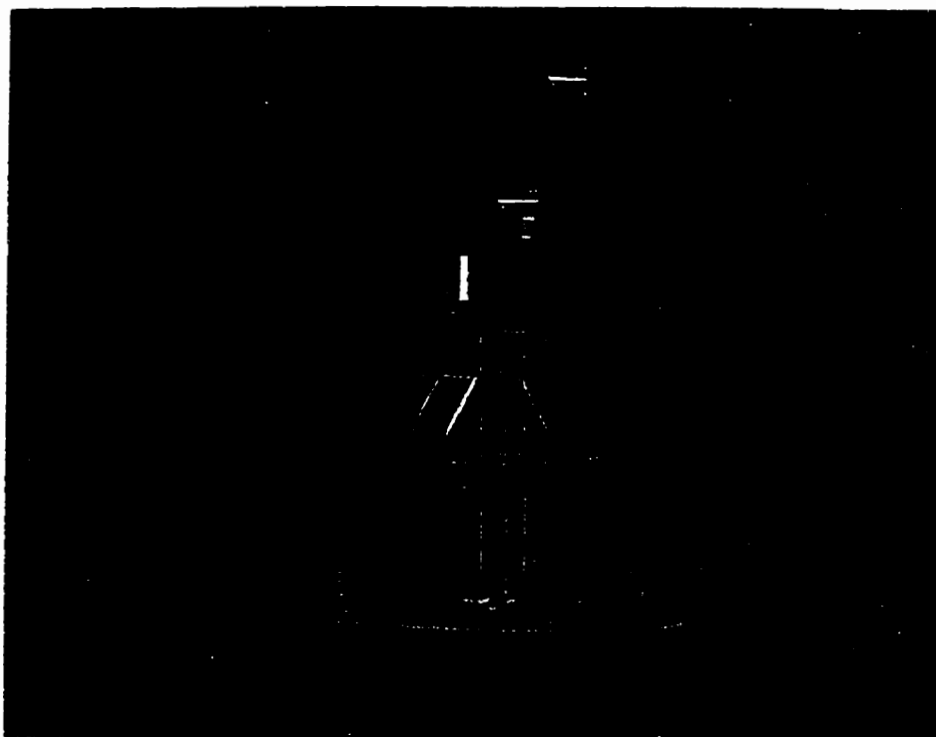


Figure 4.2 - Bouée d'Environnement Canada (ENVC)

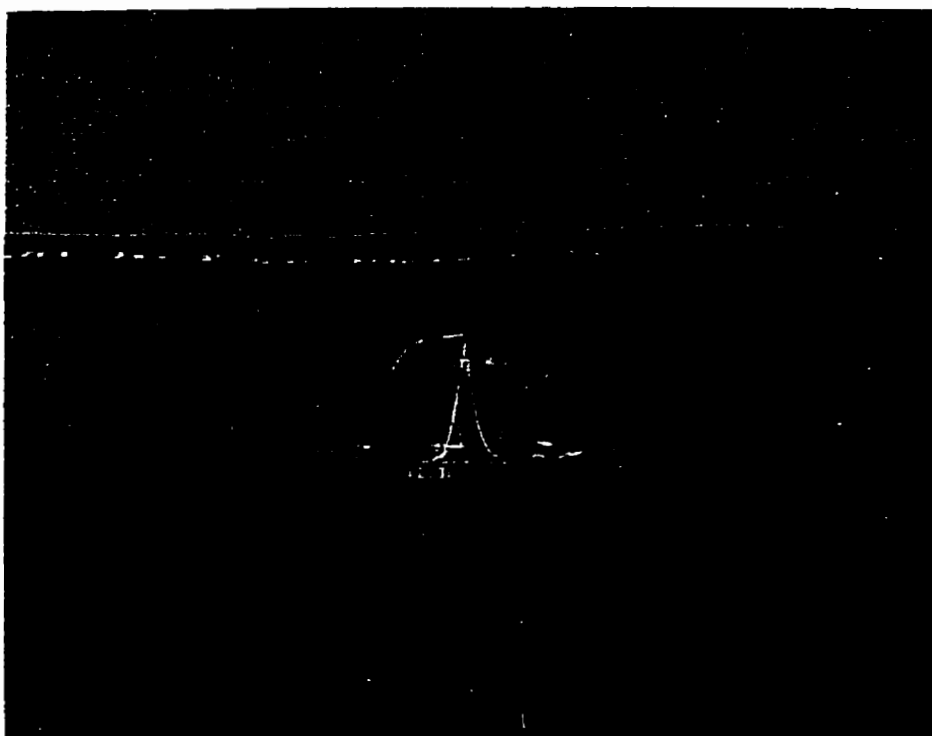


Figure 4.3 - Bouée de l'université Laval (ULAV)

Tableau 4.4 - Fichiers de données de vagues traités

	Bouée ENVC			Bouée ULAV		
	1991	1992	1993	1991	1992	1993
Date de début (1)	91-05-02-11	92-05-07-07	93-04-28-03	91-05-20-10	92-06-02-14	93-05-10-16
Date de fin	91-11-15-09	92-11-19-07	93-11-13-10	91-10-22-04	92-09-20-16	93-08-17-16
Nb de données disponibles (2)	4727	4705	4784	2134	1890	1306
Nb de données manquantes	0	0	0	1581	753	1071
Nb de périodes $T_p \geq 15$ s						
- remplacées	1469	1345	1454	0	4	5
- laissées telles quelles	822	926	957	0	0	0

(1) An - mois - jour - heure normale de l'est (H.N.E.).

(2) Données mesurées (bouée ENVC) ou interpolées (bouée ULAV) aux heures.

4.4 Tests avec le modèle WAWSP

Avant d'appliquer le modèle WAWSP à l'estuaire du Saint-Laurent, des tests sont effectués dans le but:

- 1) de déterminer les conditions aux limites à appliquer à un plan d'eau semi-fermé;
- 2) de vérifier la stabilité du schéma numérique;
- 3) d'étudier le comportement du modèle lors de changements brusques de la direction du vent.

La région modélisée est un plan d'eau rectangulaire, ouvert aux extrémités, de longueur a et de largeur b (cf. figure 4.4). La grille de calcul est constituée de cellules carrées de dimensions Δs . Les résultats des tests sont donnés aux points P_i , situés sur l'axe longitudinal de la grille.

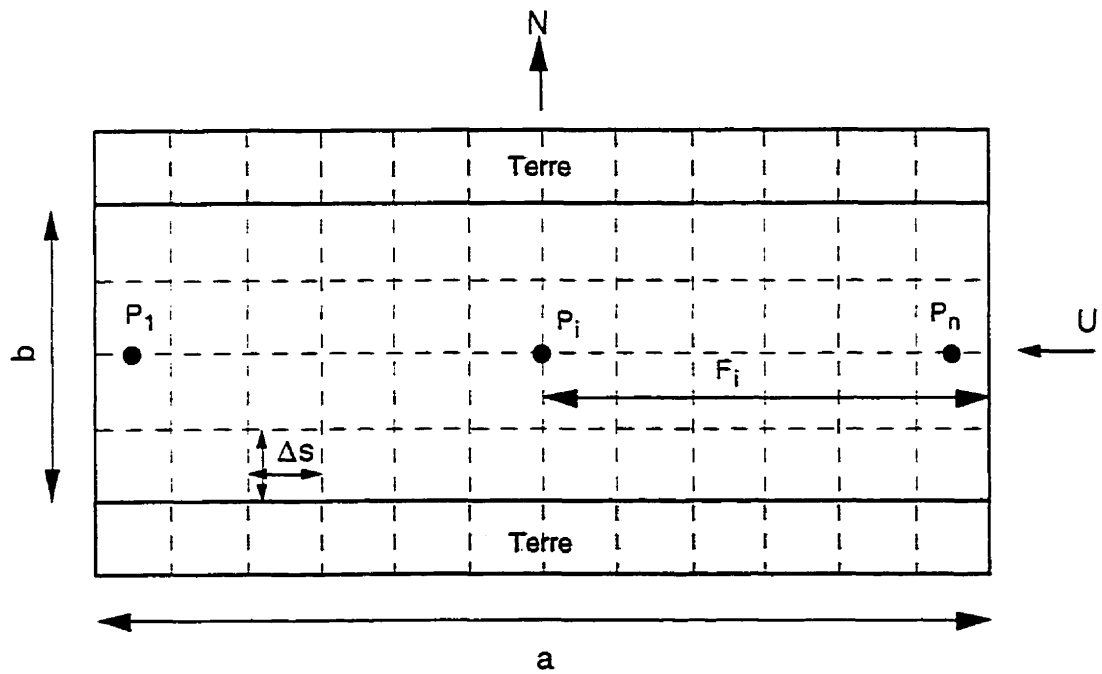


Figure 4.4 - Grille de calcul

4.4.1 Tests sur les conditions aux limites

La grille a une longueur (a) de 200 km et une largeur (b) de 80 km; la dimension des cellules (Δs) est de 8 km. Les vagues sont générées par un vent constant qui souffle de l'est à une vitesse (U) de 10 m/s pendant 96 h. Deux types de conditions aux limites sont appliqués aux extrémités est et ouest de la grille. Dans le premier cas, des frontières fermées sont considérées, ce qui correspond aux conditions décrites par les équations (3.34) et (3.35). Dans le second cas, on impose des frontières ouvertes, c'est-à-dire que la région située au-delà des frontières est considérée comme étant de l'eau. Par conséquent, si le point ($i \pm 1, j$) du schéma de la figure 3.1 est situé hors du domaine, les conditions aux limites sont les suivantes:

$$(c_{gx})_{i \pm 1} = (c_{gx})_i \quad (4.1)$$

$$(c_{gy})_{i \pm 1} = (c_{gy})_i \quad (4.2)$$

$$(M_x)_{i \pm 1} = (M_x)_i \quad (4.3)$$

$$(M_y)_{i \pm 1} = (M_y)_i \quad (4.4)$$

Les hauteurs significatives des vagues (H_s) sont enregistrées à trois points situés à 196, 100 et 4 km de l'extrémité est de la grille. La figure 4.5 montre que, dans le cas de frontières fermées, H_s est limitée par le fetch (F). Dans le cas de frontières ouvertes, H_s est identique aux trois points: le modèle considère donc que les fetchs sont infinis dans la direction est et que H_s n'est limitée que par la durée. Dans ce cas, lorsque les vagues se rapprochent des conditions de mer complètement levée, les valeurs de H_s chutent brusquement puis commencent à osciller, ce qui indique une instabilité numérique du modèle.

Ces résultats montrent que le modèle WAWSP doit être utilisé avec des frontières fermées afin de refléter les conditions de vagues limitées par le fetch et pour éviter des problèmes d'instabilité numérique. Dans le cas d'un plan d'eau semi-fermé comme l'estuaire du Saint-Laurent, ceci implique que la grille de calcul doit couvrir non seulement la région où l'on désire reconstituer les vagues, mais également tous les fetchs des points de calcul situés dans cette région.

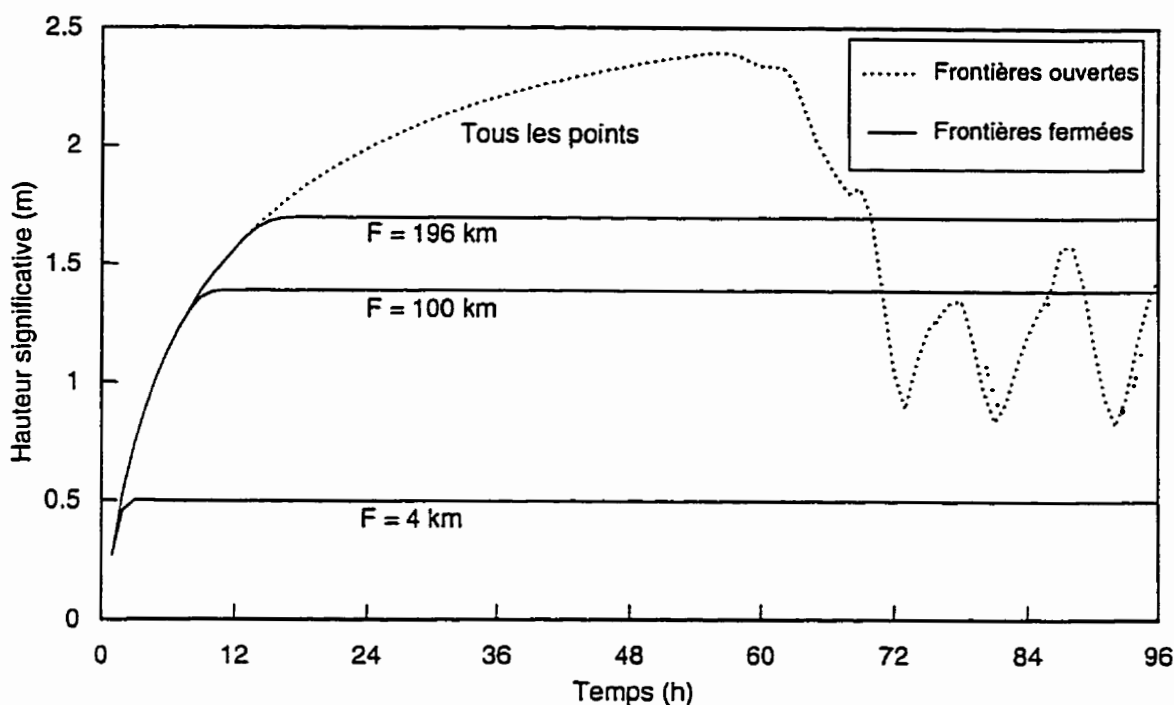


Figure 4.5 - Variation de la hauteur significative en fonction des conditions aux limites et du fetch ($U = 10$ m/s, $\Delta s = 8$ km)

4.4.2 Tests sur la stabilité du schéma numérique

Pour ces tests, la grille mesure 1000 km de longueur (a) et 80 km de largeur (b), et ses frontières est et ouest sont fermées. Les six points où H_s est mesurée ont des fetchs de 800, 600, 400, 200, 100 et 50 km. Deux vitesses de vent sont utilisées pour les tests ($U = 10$ et 25 m/s) et trois dimensions de cellules ($\Delta s = 4, 8$ et 16 km). Les figures 4.6, 4.7 et 4.8 montrent les résultats obtenus avec un vent de 25 m/s: pour les longs fetchs, la stabilité du schéma numérique augmente avec la grandeur des cellules. Un vent de 10 m/s conduit à des résultats semblables, à la différence que les hauteurs de vagues atteintes sont plus faibles et que l'instabilité numérique apparaît après une durée plus longue: 30 h dans le cas des cellules de 4 km (pour des fetchs de 400, 600 et 800 km) et 48 h dans celui des cellules de 8 km (pour un fetch de 800 km).

La stabilité numérique étant fonction du rapport $\Delta t \cdot c_g / \Delta s$, où la vitesse de groupe c_g est fonction de la vitesse du vent, le modèle est conçu pour compenser la variation du rapport $c_g / \Delta s$ par l'ajustement du pas de temps Δt (cf. section 3.4.1). Toutefois, cet ajustement ne semble pas suffire à assurer la stabilité du schéma numérique dans certaines conditions. Par conséquent, avant d'appliquer le modèle à une région particulière, il serait prudent de vérifier si le modèle est stable pour une grandeur de cellules donnée et en fonction des conditions de vent (vitesse, durée et fetch).

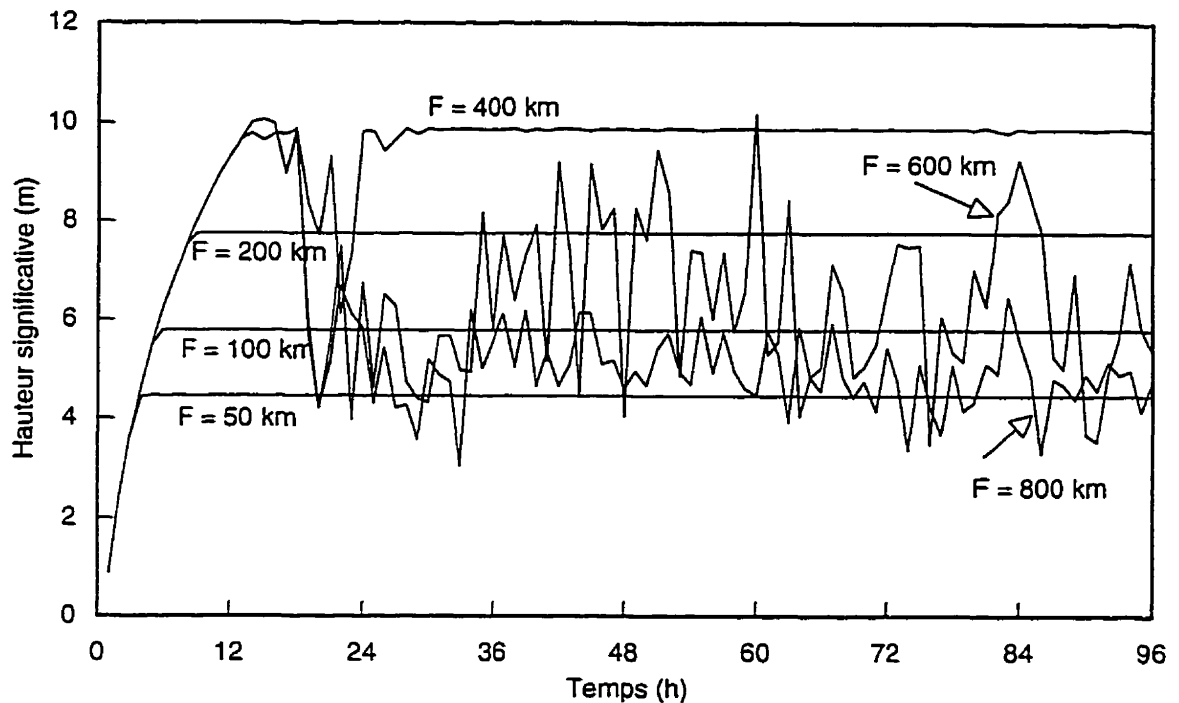


Figure 4.6 - Variation de la hauteur significative en fonction du fetch
($U = 25 \text{ m/s}$, $\Delta s = 4 \text{ km}$)

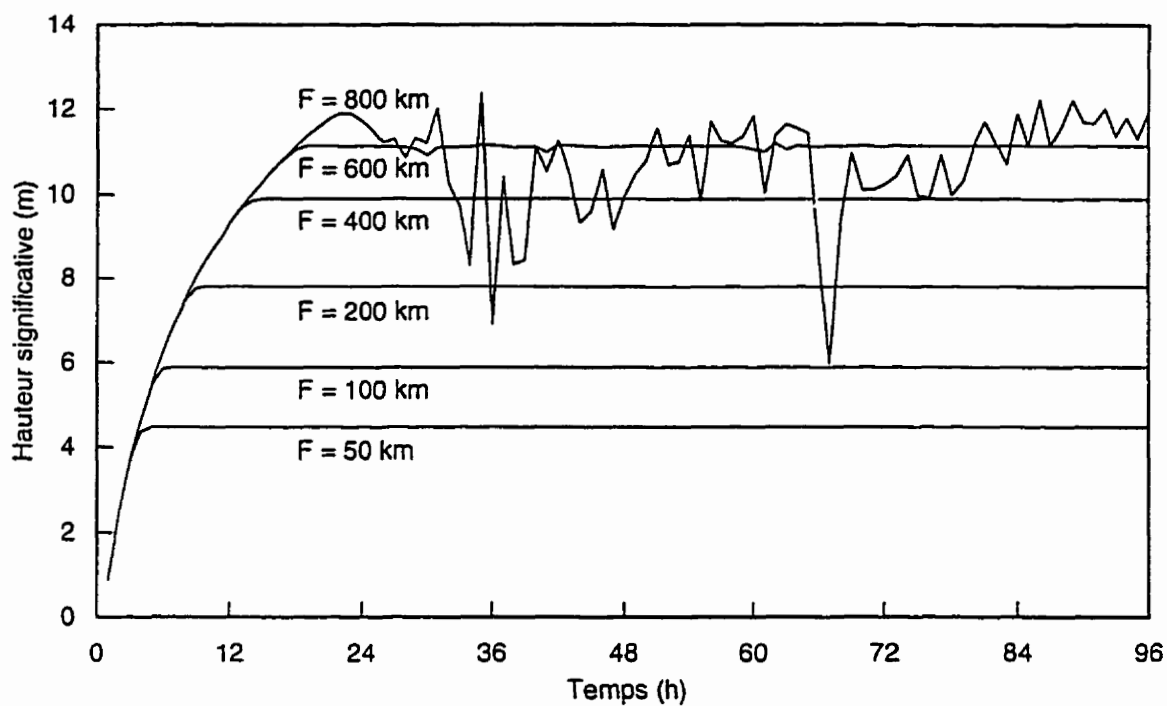


Figure 4.7 - Variation de la hauteur significative en fonction du fetch
($U = 25$ m/s, $\Delta s = 8$ km)

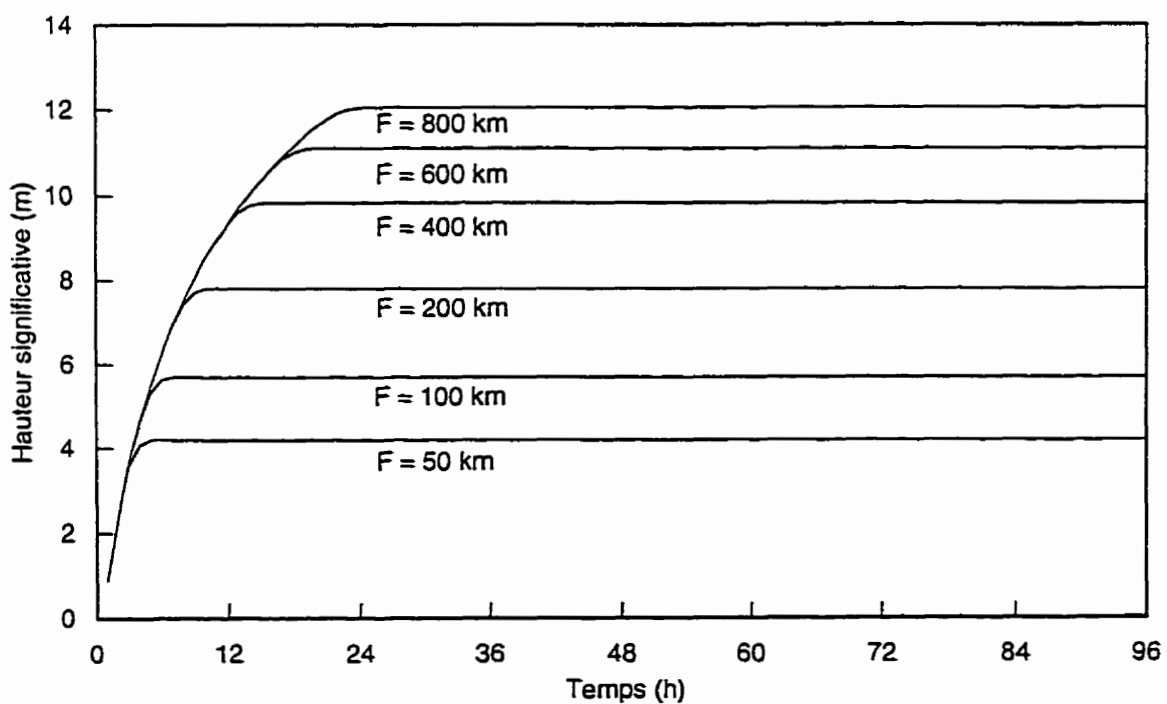


Figure 4.8 - Variation de la hauteur significative en fonction du fetch
($U = 25$ m/s, $\Delta s = 16$ km)

4.4.3 Tests sur les changements de la direction du vent

Les tests sont effectués avec une grille carrée de 200 par 200 km ($a = b$) et des cellules de 8 km (Δs). Les frontières est et ouest sont fermées. Pendant 48 h, le vent souffle du nord à 10 m/s. Dans le premier test, le vent tourne ensuite instantanément de 90° et souffle de l'est pendant les 48 h suivantes; dans le second, il tourne de 180° et souffle du sud pendant 48 h. Comme les vagues sont mesurées au centre de la grille, les fetchs sont de 100 km suivant les quatre directions cardinales. La figure 4.9 montre que, après que le vent a tourné de 90° , les vagues prennent presque 48 h à s'aligner avec la direction du vent. La figure 4.10 illustre la variation de H_s durant ce temps: après le changement de direction du vent, H_s décroît d'environ 40% puis reprend lentement sa croissance. Comme pour la direction, les vagues prennent environ 48 h à retrouver leur hauteur initiale.

Lorsque le vent tourne de 180° , la direction des vagues s'aligne immédiatement avec celle du vent (cf. figure 4.11). Quant à la hauteur des vagues, elle décroît très rapidement de 60%, puis recommence à croître au même rythme qu'au tout début de la simulation (cf. figure 4.12). Dix heures après le changement de direction du vent, les vagues ont retrouvé leur hauteur initiale.

Ces résultats montrent que le modèle réagit différemment aux deux situations. Cette différence vient du fait que, lorsque l'écart entre la direction des vagues et celle du vent est de plus de 90° , le modèle génère un champ de vagues dit "fossile" (cf. section 3.3). Les résultats du tableau 4.5 illustrent ce processus. À $t = 49$ h, les vagues dans la direction du vent ($\theta_u = 180^\circ$) constituent le nouveau champ de vagues actif (représenté par $\sigma_{\eta(1)}$) et les vagues dans l'ancienne direction du vent ($\theta_u = 0^\circ$), le champ de vagues fossile (représenté par $\sigma_{\eta(2)}$). Comme la valeur de $\sigma_{\eta(2)}$ est supérieure à celle de $\sigma_{\eta(1)}$, la direction du train de vagues est celle de $\sigma_{\eta(2)}$ ($\theta = 0^\circ$), et la hauteur de la vague résultante est donnée par l'expression:

$$H_s = 4 \sqrt{\sigma_{\eta(1)}^2 + \sigma_{\eta(2)}^2} \quad (4.5)$$

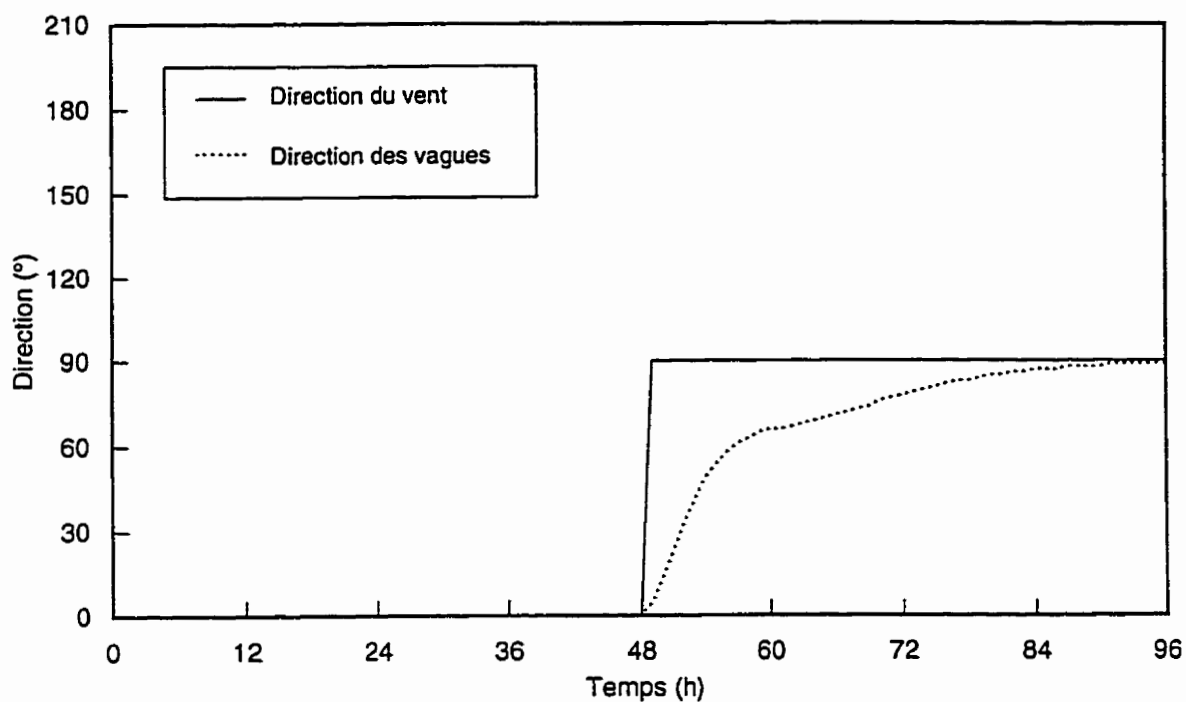


Figure 4.9 - Direction des vagues lors d'un changement de la direction du vent de 90° ($U = 10$ m/s, $\Delta s = 8$ km)

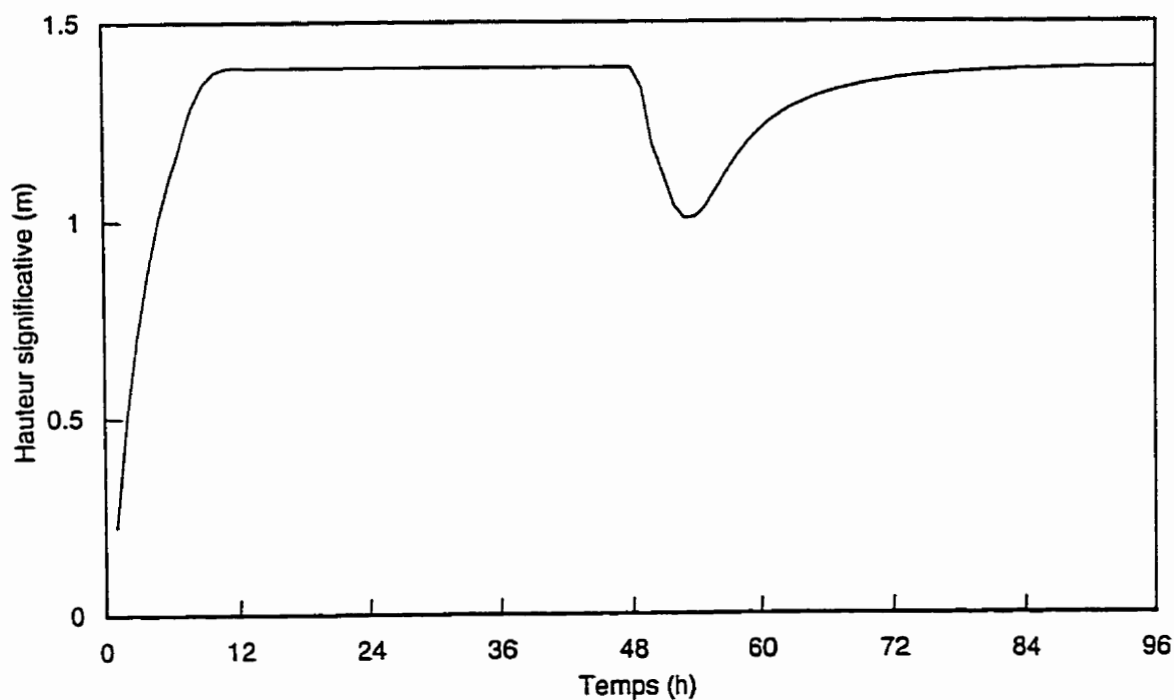


Figure 4.10 - Hauteur significative des vagues lors d'un changement de la direction du vent de 90° ($U = 10$ m/s, $\Delta s = 8$ km)

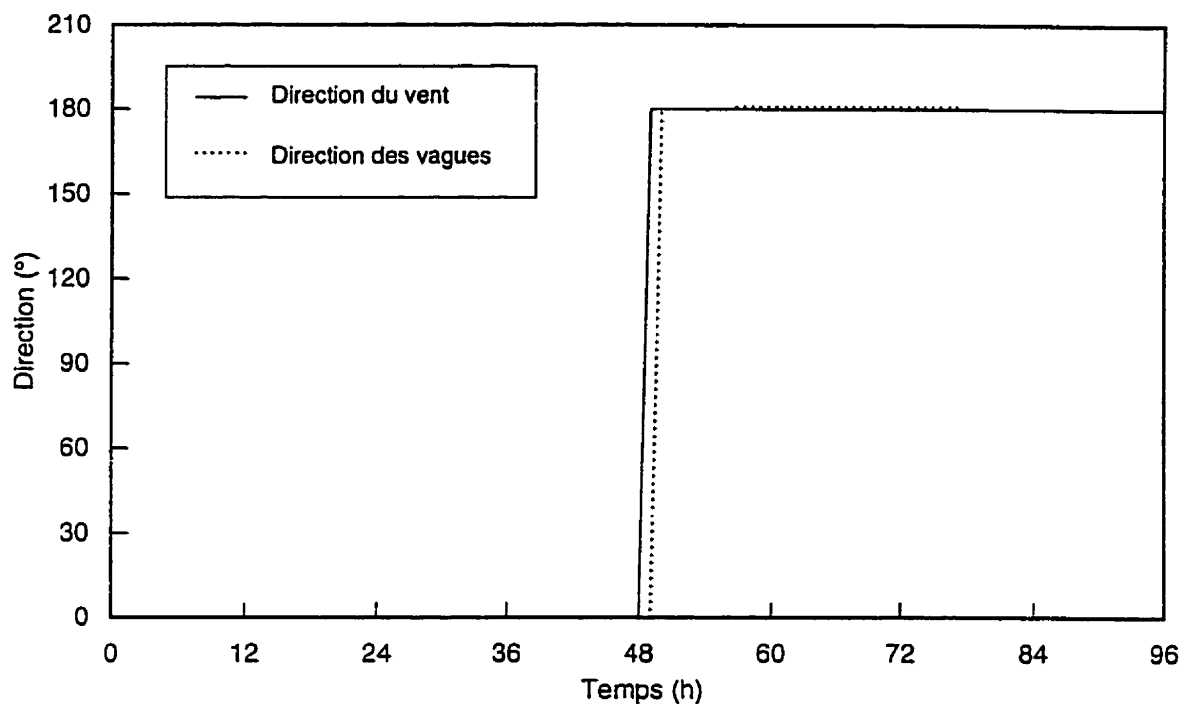


Figure 4.11 - Direction des vagues lors d'un changement de la direction du vent de 180° ($U = 10$ m/s, $\Delta s = 8$ km)

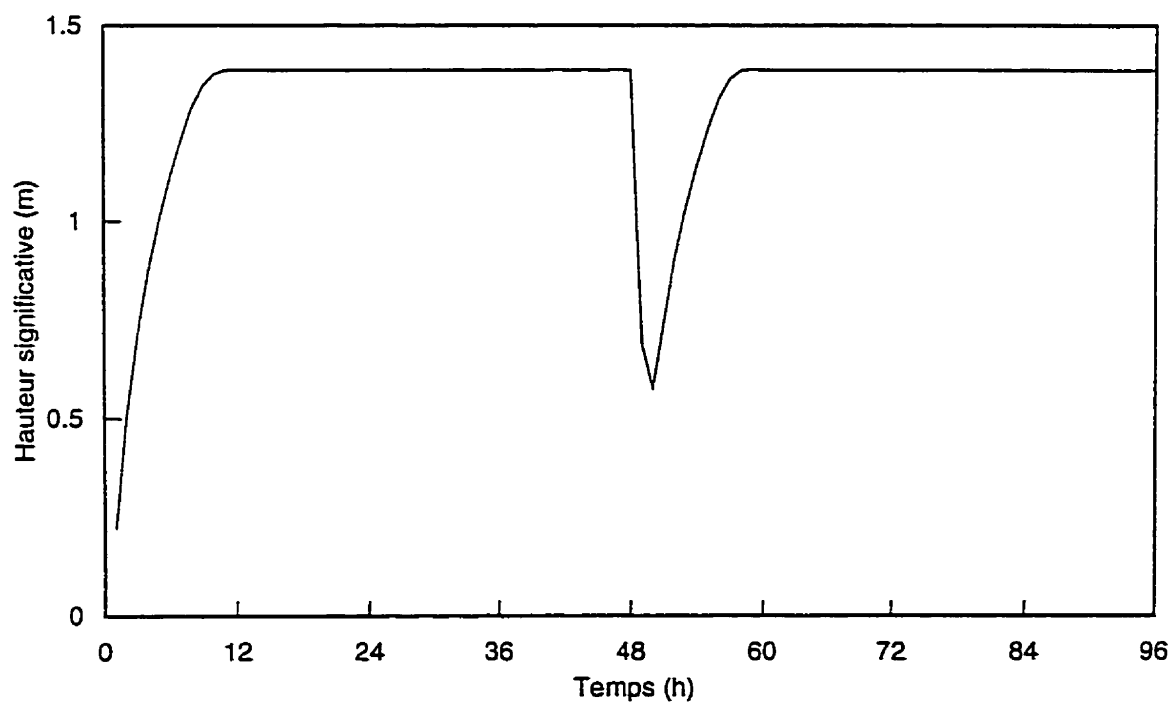


Figure 4.12- Hauteur significative des vagues lors d'un changement de la direction du vent de 180° ($U = 10$ m/s, $\Delta s = 8$ km)

À $t = 50$ h, le train de vagues fossile a disparu et la direction du train de vagues est celle de $\sigma_{\eta(1)}$ ($\theta = 180^\circ$). L'atténuation du champ de vagues fossile est donc très rapide et le nouveau champ de vagues actif croît comme si le précédent n'avait jamais existé. Par contre, dans le cas où le vent tourne de 90° , le modèle ne génère pas de champ de vagues fossile et le champ de vagues actif se modifie lentement.

Tableau 4.5 - Résultats du test de changement de la direction du vent de 180°

t (h)	θ_u (°)	$\sigma_{\eta(1)}$ (m)	$\sigma_{\eta(2)}$ (m)	H_s (m)	θ (°)
48	0	0,346	0	1,386	0
49	180	0,075	0,154	0,684	0
50	180	0,143	0	0,572	180

4.5 Prévisions avec le modèle WAWSP

4.5.1 Grille de calcul

Pour reconstituer les vagues dans la zone de l'estuaire du Saint-Laurent comprise entre Mont-Joli et Mont-Louis (cf. figure 4.1), les tests de la section précédente ont montré que le plan d'eau modélisé devait couvrir tous les fetchs des points de calcul situés dans cette zone. Par conséquent, la grille de calcul utilisée avec le modèle WAWSP s'étend de l'embouchure du Saguenay jusqu'à l'est de l'île d'Anticosti (cf. figure 4.13). Elle mesure 650 km de longueur par 300 km de largeur et est constituée de cellules de 2 km par 2 km. Son origine (le coin sud-ouest) est située à la latitude 47° 50' N et à la longitude 70° 00' W. Le plan d'eau se trouvant au sud de la péninsule de la Gaspésie n'est pas modélisé puisque les vagues générées dans cette région ont une influence négligeable sur les vagues calculées dans l'estuaire.

4.5.2 Programme

Pour cette étude, le programme WAWSP, conçu par Hodson et Donelan (1979), a été modifié principalement pour ce qui concerne les entrées et sorties. Le contenu du nouveau programme, WAWSP_UL, est présenté à l'annexe C.

Les calculs sont effectués avec les valeurs suivantes des paramètres d'entrée (cf. section 3.5.3):

- $\rho_a = 1.247 \text{ kg/m}^3$, la masse volumique de l'air à 10° C, soit la température moyenne de l'air durant les périodes de reconstitution de vagues;
- $\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$, la masse volumique de l'eau salée;
- $\lambda = 3,3 \%$, la fraction de la contrainte de vent qui produit une augmentation ou une diminution de la quantité de mouvement.

La valeur de λ est identique à celle utilisée sur le lac Ontario par Donelan (1978). Ce paramètre devrait être ajusté en fonction du plan d'eau où est appliqué le modèle, mais nous avons choisi de ne pas modifier sa valeur afin d'évaluer, dans un premier temps, la performance générale du modèle. L'ajustement pourrait être effectué dans une étape ultérieure.

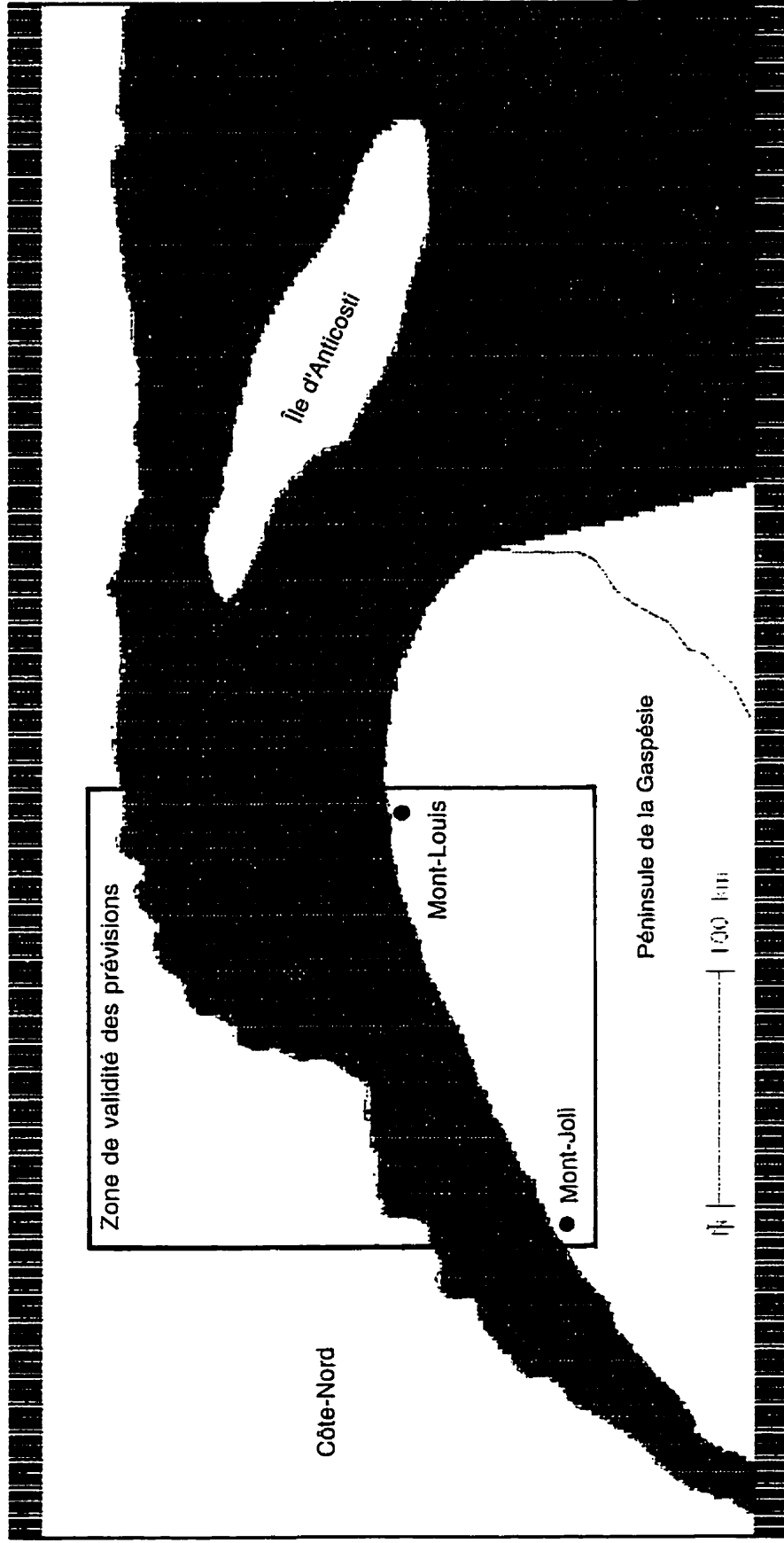


Figure 4.13 - Plan d'eau modélisé

4.5.3 Simulations

Les vagues dans l'estuaire du Saint-Laurent sont reconstituées pour les périodes correspondant aux périodes de mesure de vagues de 1991, 1992 et 1993 (cf. tableau 4.6). Neuf simulations sont effectuées avec le modèle WAWSP en faisant varier la période de reconstitution, les données de vent et la dimension des cellules de la grille de calcul (cf. tableau 4.7). Pour l'année 1992, les vagues sont reconstituées en utilisant trois groupes de stations qui permettent de générer des champs de vent non uniformes (simulations W08-TER, W08-MAR et W08-SYN), ainsi que les données de la bouée de Mont-Louis pour générer un champ de vent uniforme (simulations W08-BOU et W16-BOU). Deux des simulations sont étendues aux années 1991 et 1993 (W08-TER et W08-BOU) afin, d'une part, de vérifier les variations interannuelles des prévisions et, d'autre part, de disposer de périodes de reconstitution plus longues pour analyser le climat des vagues.

Les données de vent provenant du Service de l'environnement atmosphérique (S.E.A.) d'Environnement Canada sont décrites à la section 4.2. Un programme de traitement des fichiers du S.E.A. convertit les données horaires dans un format lisible par le modèle WAWSP, sans les lisser. Il interpole aussi les séries de données manquantes si celles-ci comptent six valeurs ou moins. Quelques séries plus longues ont été interpolées après avoir vérifié qu'elles ne correspondaient pas à des périodes de tempête. Les prévisions avec le modèle WAWSP sont donc effectuées avec des séries de vent complètes. C'est pour cette raison que les données de la station de la pointe des Monts, analysées à la section 4.2, ne sont pas utilisées pour la simulation W08-MAR: elles comptent un trop grand nombre de données manquantes en 1992. Cette simulation n'a pu être étendue à 1991 et 1993 pour la même raison.

Quant au facteur de correction de la vitesse du vent, pour les stations terrestres, il correspond à la valeur généralement utilisée dans cette région pour transformer les vitesses mesurées sur terre en vitesses sur l'eau, soit 1,2. Cette valeur a été ajustée en comparant les hauteurs de vagues calculées au moyen de modèles unidimensionnels à des hauteurs mesurées dans l'estuaire (Ouellet et Pelletier, 1993). Les vitesses de la bouée de Mont-Louis sont multipliées par un facteur de 1,07 afin de tenir compte de la hauteur de l'anémomètre, qui est de 5 m au lieu de la hauteur standard de 10 m (cf. annexe A). Les vitesses du vent des autres stations maritimes ne sont pas corrigées étant donné qu'elles ont été mesurées à proximité de l'eau. Les facteurs appliqués aux stations synthétiques sont ceux recommandés par Environnement Canada.

Tableau 4.6 - Périodes de reconstitution des vagues

	Bouée ENVC			Bouée ULAV		
	1991	1992	1993	1991	1992	1993
Date de début	1991-05-04	1992-05-09	1993-04-30	1991-05-20	1992-06-02	1993-05-10
Date de fin	1991-11-14	1992-11-18	1993-11-12	1991-10-22	1992-09-20	1993-08-17
Nb d'heures	4680	4656	4728	3715	2643	2377

Tableau 4.7 - Simulations effectuées avec le modèle WAWSP

Simulation (1)	Années de reconstitution	Stations de vent	Facteur de correction de la vitesse du vent	Dimension des cellules de la grille de calcul
W08-TER	1991-1992-1993	Stations terrestres Baie-Comeau Mont-Joli Sept-Îles	1,2 1,2 1,2	8 km
W08-MAR	1992	Stations maritimes Bouée de Mont-Louis Cap-Chat Cap de la Madeleine Corossol	1,07 1,0 1,0 1,0	8 km
W08-SYN	1992	Stations synthétiques Fleuve I Fleuve II Fleuve III Fleuve VIII Fleuve IX-X	1,05 1,1 1,1 1,1 1,1	8 km
W08-BOU	1991-1992-1993	Bouée de Mont-Louis	1,07	8 km
W16-BOU	1992	Bouée de Mont-Louis	1,07	16 km

(1) L'identification des simulations comporte deux parties: la première désigne le modèle (Wxx = WAWSP avec cellules de xx km); la deuxième partie réfère aux stations de vent utilisées.

Toutes les simulations sont effectuées avec une grille de calcul dont les cellules sont agrandies à huit kilomètres, à l'exception de la simulation W16-BOU, qui utilise des cellules de 16 km. Les tests de la section 4.4.2 ont montré que, pour des vents de 10 m/s (36 km/h) et 25 m/s (90 km/h), le schéma numérique était stable avec des cellules de 16 km, quelles que soient les conditions de fetch et de durée du vent. Ils ont aussi montré qu'avec des cellules de 8 km, le schéma était stable à condition que les fetchs ne dépassent pas 600 km. La figure 4.13 montre que, sur le plan d'eau modélisé, les fetchs mesurent 500 km au maximum. Par ailleurs, les vents utilisés pour les simulations sont toujours inférieurs à 25 m/s. La stabilité numérique du modèle est donc assurée dans les conditions présentes.

4.5.4 Résultats

Les hauteurs significatives (H_s) et les périodes de pointe (T_p) calculées par le modèle WAWSP sont comparées aux valeurs mesurées à la bouée d'Environnement Canada (bouée ENVC) et à celle de l'université Laval (bouée ULAV). Les résultats sont présentés sous la forme de diagrammes de dispersion illustrant les valeurs calculées (X_{cal}) en fonction des valeurs mesurées (X_{mes}). X représentant soit H_s , soit T_p . De plus, des tableaux présentent les statistiques suivantes:

- la moyenne ($\bar{X}$) et l'écart type (s) de X_{cal} et de X_{mes} ;
- l'écart moyen entre X_{cal} et X_{mes} , en pourcentage:

$$\Delta\bar{X} = \left(\frac{\bar{X}_{cal} - \bar{X}_{mes}}{\bar{X}_{mes}} \right) * 100 \quad (4.6)$$

- la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne:

$$\varepsilon = \sqrt{\bar{e}^2 + s_e^2} \quad (4.7)$$

où $\bar{e}$ et s_e^2 désignent respectivement la moyenne et la variance de l'erreur, définie comme suit:

$$e = X_{cal} - X_{mes} \quad (4.8)$$

- la racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée par la moyenne des valeurs mesurées:

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon}{\overline{X}_{\text{mes}}} \quad (4.9)$$

- le coefficient de corrélation (r) entre X_{cal} et X_{mes} .

Quant aux directions de propagation des vagues (θ), elles ne sont comparées qu'à la bouée directionnelle de l'université Laval (bouée ULAV). Les résultats sont également présentés sous la forme de diagrammes de dispersion et l'analyse statistique est décrite à la section 4.5.4e.

a) Hauteurs significatives à la bouée ENVC

Le tableau 4.8 montre que toutes les prévisions des hauteurs significatives (H_s) sont, en moyenne, inférieures aux observations à la bouée ENVC. Si on ne considère que les simulations effectuées en 1992, l'erreur quadratique la plus faible ($\varepsilon_n = 0,35$) est obtenue avec un champ de vent uniforme généré à partir des données de vent de la bouée de Mont-Louis (W08-BOU-92). L'utilisation d'un champ de vent non uniforme généré à partir des stations maritimes comprenant la bouée de Mont-Louis (W08-MAR-92) ne modifie pas sensiblement les résultats: l'écart moyen entre les hauteurs significatives calculées et mesurées passe de -13 % à -17 %, l'erreur ε_n , de 0,35 à 0,38, et le coefficient de corrélation reste le même ($r = 0,9$). Toutefois, si les simulations sont effectuées avec des champs de vent non uniformes générés à partir des stations terrestres (W08-TER-92) ou synthétiques (W08-SYN-92), les hauteurs significatives moyennes sont grandement sous-estimées (-53 % et -41 % respectivement) et l'erreur ε_n s'en trouve augmentée (0,75 et 0,66 respectivement). Par ailleurs, les prévisions de H_s obtenues avec des cellules de 8 km et celles obtenues avec des cellules de 16 km (W08-BOU-92 et W16-BOU-92) sont pratiquement identiques. Lorsque l'on compare les résultats de 1991 et 1993 à ceux de 1992, pour les mêmes stations de vent, les résultats apparaissent assez semblables, mis à part un coefficient de corrélation de 0,5 pour les stations terrestres en 1991 (W08-TER-91), comparativement à 0,7 pour les deux autres années.

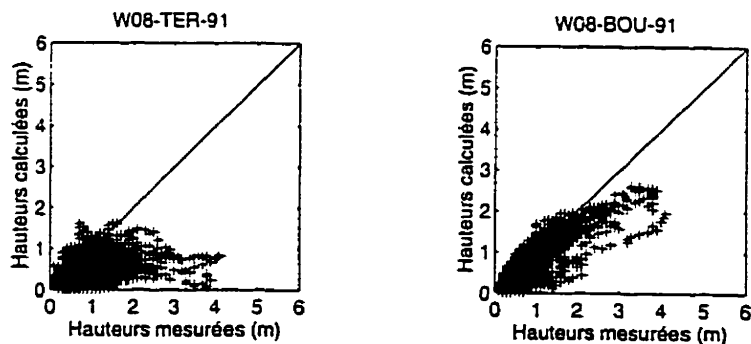
Les graphiques de la figure 4.14 confirment que les stations de vent maritimes (identifiées par MAR et BOU) conduisent à de meilleures estimations des hauteurs significatives que les stations terrestres et synthétiques, qui sous-estiment grandement H_s à la bouée ENVC.

Tableau 4.8 - Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ENVC

Simulation	Hauteurs mesurées		Hauteurs calculées		Écart moyen	Erreur quadratique		Coeff. de corrélation
	$\bar{H}_S$ (m)	s (m)	$\bar{H}_S$ (m)	s (m)	$\Delta\bar{H}_S$ (%)	ε (m) (1)	ε_n (2)	r
W08-TER-91	0,81	0,57	0,36	0,28	- 56	0,66	0,82	0,51
W08-BOU-91	0,81	0,57	0,69	0,47	- 15	0,30	0,37	0,88
W08-TER-92	0,87	0,63	0,41	0,34	- 53	0,66	0,75	0,69
W08-MAR-92	0,87	0,63	0,72	0,54	- 17	0,33	0,38	0,88
W08-SYN-92	0,87	0,63	0,51	0,34	- 41	0,58	0,66	0,72
W08-BOU-92	0,87	0,63	0,76	0,53	- 13	0,31	0,35	0,89
W16-BOU-92	0,87	0,63	0,76	0,53	- 13	0,32	0,36	0,88
W08-TER-93	0,79	0,57	0,37	0,33	- 53	0,59	0,75	0,69
W08-BOU-93	0,79	0,57	0,68	0,52	- 14	0,27	0,35	0,90

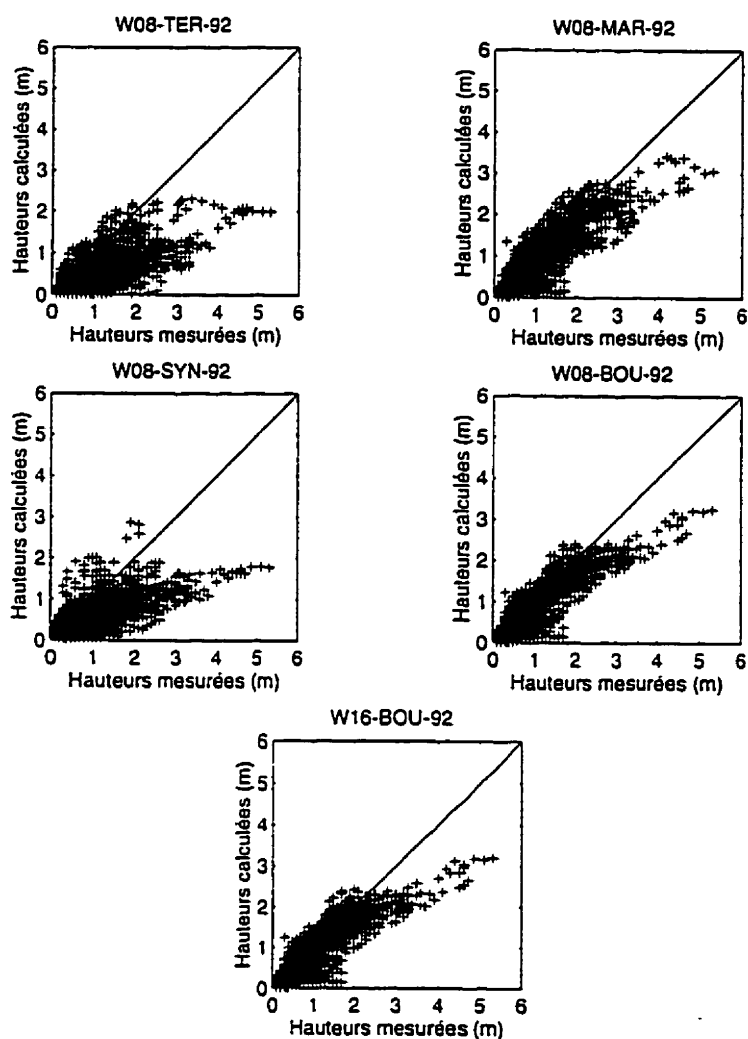
(1) Racine de l'erreur quadratique moyenne.

(2) Racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée ($\varepsilon_n = \varepsilon / \bar{H}_{S,mes}$).

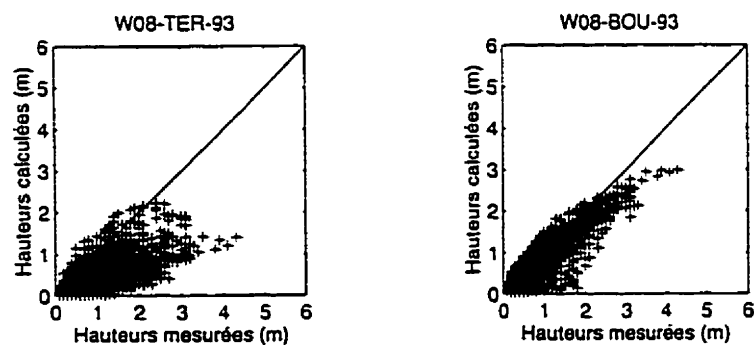


a) Année 1991 (n=4680)

Figure 4.14 - Comparaison des hauteurs significatives mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ENVC



b) Année 1992 (n=4656)



c) Année 1993 (n=4728)

Figure 4.14 - Comparaison des hauteurs significatives mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ENVC (suite)

b) Hauteurs significatives à la bouée ULAV

À la bouée ULAV, le nombre d'heures de comparaison est inférieur au nombre d'heures de reconstitution en raison de données manquantes dans les enregistrements (cf. section 4.3). De plus, les résultats des simulations de 1991 ne peuvent être comparés à ceux de 1992 et 1993 étant donné que la bouée était située au large de Sainte-Flavie la première année et au large de Mont-Louis durant les deux années suivantes.

Le tableau 4.9 montre que, dans l'ensemble, les prévisions de H_s sont supérieures aux observations pour les simulations utilisant des stations de vent maritimes (identifiées par MAR et BOU) et inférieures pour les stations terrestres et synthétiques, à l'exception de la simulation W08-BOU-93, où la moyenne de H_s calculée est légèrement inférieure à celle de H_s mesurée. L'erreur quadratique la plus faible en 1992 est obtenue pour la simulation W08-SYN-92 ($\epsilon_n = 0,61$), qui utilise les stations de vent synthétiques pour générer un champ de vent non uniforme; les simulations effectuées avec des stations de vent maritimes sont celles ayant les plus grandes erreurs quadratiques, quoique les différences entre les simulations ne soient pas très marquées. Par ailleurs, la simulation utilisant des cellules de 16 km (W16-BOU-92) conduit à une erreur supérieure à celle obtenue avec des cellules de 8 km (W08-BOU-92): $\epsilon_n = 0,88$ et $0,68$ respectivement. Lorsque l'on compare les résultats de 1993 à ceux de 1992, on constate que les valeurs de ϵ_n sont plus élevées en 1993 qu'en 1992 pour les mêmes stations de vent. Quant aux simulations de 1991, l'erreur quadratique la plus faible est obtenue avec les stations de vent terrestres ($\epsilon_n = 0,61$), alors que les données de vent de la bouée de Mont-Louis surestiment grandement H_s à cet emplacement. Pour l'ensemble des simulations, le coefficient de corrélation varie entre 0,5 et 0,7.

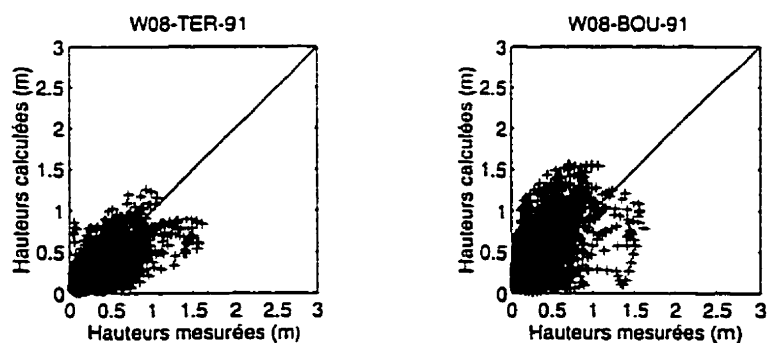
Les diagrammes de la figure 4.15 font ressortir les différences entre les résultats de 1992 et ceux de 1993 à la bouée ULAV: les valeurs calculées de 1993 sont beaucoup plus faibles que celles de 1992 même si la différence entre les moyennes mesurées n'est que de 0,05 m (cf. tableau 4.9). La différence est particulièrement marquée pour les simulations utilisant les stations de vent terrestres.

Tableau 4.9 - Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV

Simulation	Hauteurs mesurées		Hauteurs calculées		Écart moyen	Erreur quadratique		Coeff. de corrélation
	$\bar{H}_S$ (m)	s (m)	$\bar{H}_S$ (m)	s (m)	$\Delta \bar{H}_S$ (%)	ε (m) (1)	ε_n (2)	r
W08-TER-91	0,36	0,29	0,32	0,23	- 11	0,22	0,61	0,68
W08-BOU-91	0,36	0,29	0,51	0,35	+ 42	0,34	0,95	0,55
W08-TER-92	0,46	0,28	0,29	0,22	- 37	0,30	0,65	0,54
W08-MAR-92	0,46	0,28	0,49	0,40	+ 7	0,33	0,72	0,57
W08-SYN-92	0,46	0,28	0,36	0,25	- 22	0,28	0,61	0,51
W08-BOU-92	0,46	0,28	0,55	0,35	+ 20	0,31	0,68	0,57
W16-BOU-92	0,46	0,28	0,69	0,43	+ 50	0,41	0,88	0,63
W08-TER-93	0,41	0,31	0,18	0,18	- 56	0,33	0,81	0,63
W08-BOU-93	0,41	0,31	0,38	0,31	- 7	0,30	0,73	0,54

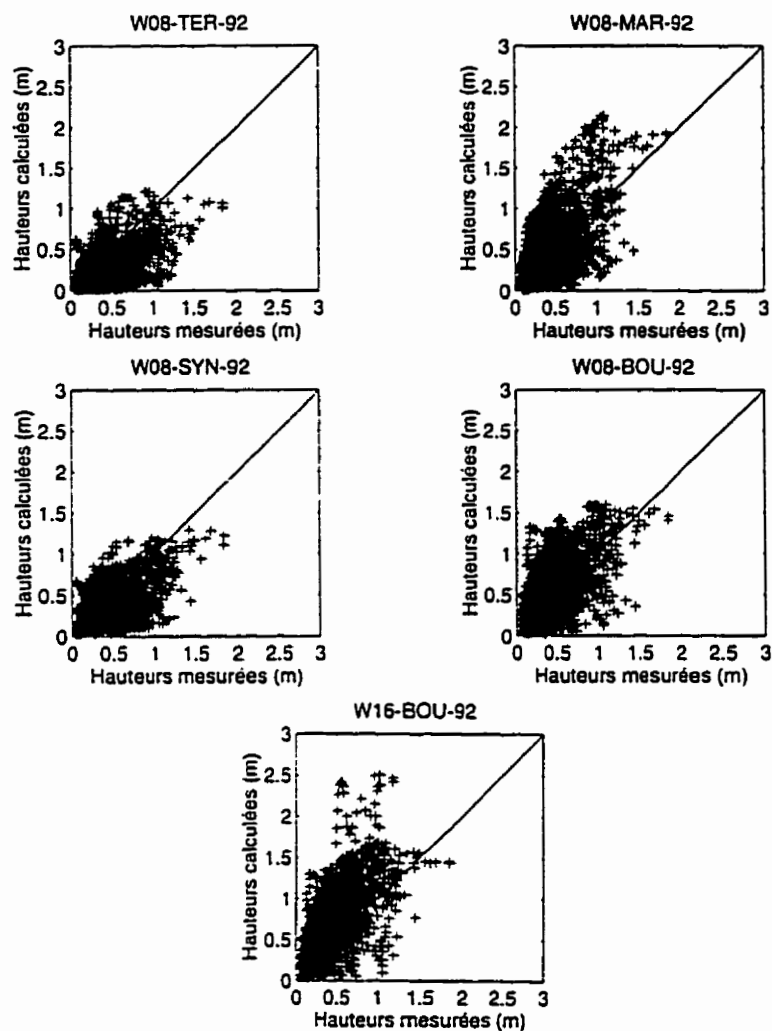
(1) Racine de l'erreur quadratique moyenne.

(2) Racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée ($\varepsilon_n = \varepsilon / \bar{H}_{S,mes}$).

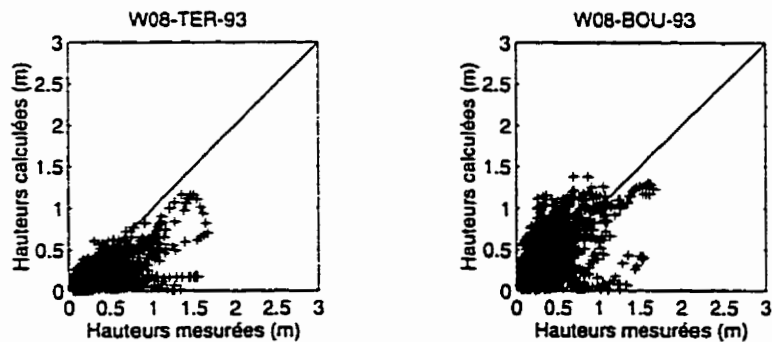


a) Année 1991 (n=2134)

Figure 4.15 - Comparaison des hauteurs significatives mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV



b) Année 1992 (n=1890)



c) Année 1993 (n=1306)

Figure 4.15 - Comparaison des hauteurs significatives mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV (suite)

c) Périodes à la bouée ENVC

Pour l'analyse des périodes de pointe (T_p), les périodes de 15 s et plus enregistrées à la bouée ENVC ne sont pas prises en compte (cf. section 4.3).

Le tableau 4.10 montre que les prévisions des périodes sont largement inférieures aux observations: le pourcentage d'écart entre les moyennes calculées et mesurées varie de -38 % à -59 % selon les simulations. Pour la saison 1992, l'erreur quadratique la plus faible ($\epsilon_n = 0,54-0,55$) est obtenue avec les stations de vent maritimes (identifiées par MAR ou BOU). Si on compare les résultats des deux autres saisons à ceux de 1992, on constate que l'erreur ϵ_n est plus élevée en 1991 et 1993, pour les mêmes stations de vent. Quant au coefficient de corrélation, il est pratiquement nul pour toutes les simulations, r variant de 0 à -0,2.

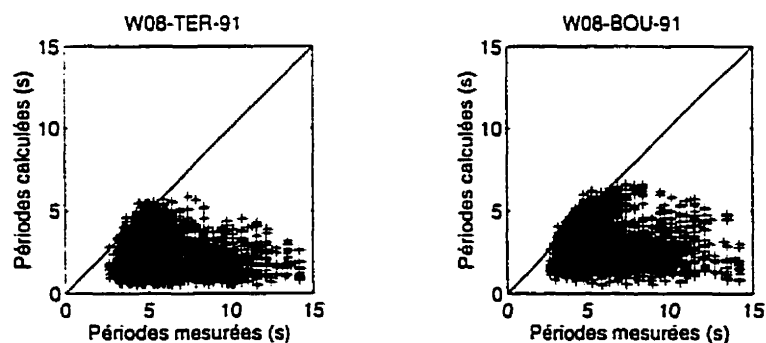
Les diagrammes de la figure 4.16 illustrent l'écart entre les périodes mesurées et celles calculées par le modèle WAWSP à la bouée ENVC.

Tableau 4.10 - Statistiques des périodes mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ENVC

Simulation	Périodes mesurées		Périodes calculées		Écart moyen	Erreur quadratique		Coeff. de corrélation
	$\bar{T}_p$ (s)	s (s)	$\bar{T}_p$ (s)	s (s)	$\Delta \bar{T}_p$ (%)	ε (s) (1)	ε_n (2)	r
W08-TER-91	6,10	2,14	2,52	1,05	- 59	4,39	0,72	-0,18
W08-BOU-91	6,10	2,14	3,38	1,28	- 45	3,82	0,63	-0,18
W08-TER-92	5,75	1,57	2,66	1,15	- 54	3,66	0,64	-0,02
W08-MAR-92	5,75	1,57	3,44	1,39	- 40	3,15	0,55	-0,04
W08-SYN-92	5,75	1,57	2,96	1,07	- 49	3,41	0,59	-0,06
W08-BOU-92	5,75	1,57	3,56	1,38	- 38	3,08	0,54	-0,07
W16-BOU-92	5,75	1,57	3,56	1,38	- 38	3,08	0,54	-0,07
W08-TER-93	6,04	1,81	2,52	1,15	- 58	4,17	0,69	-0,10
W08-BOU-93	6,04	1,81	3,30	1,42	- 45	3,65	0,60	-0,10

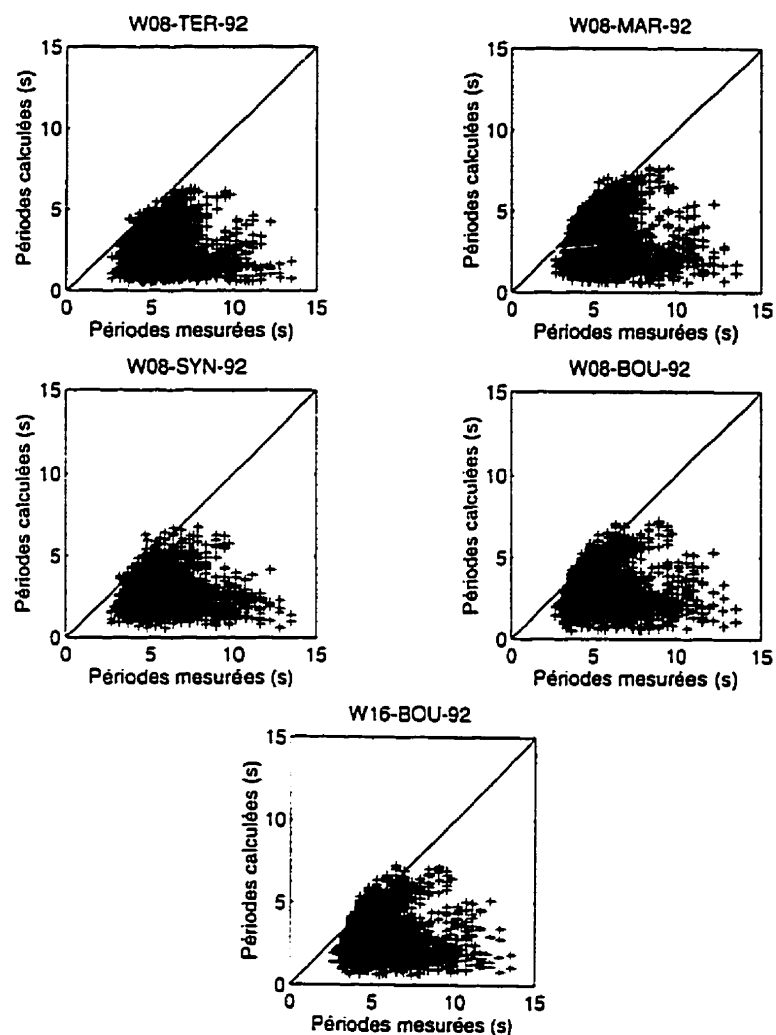
(1) Racine de l'erreur quadratique moyenne.

(2) Racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée ($\varepsilon_n = \varepsilon / \bar{T}_{p,mes}$).

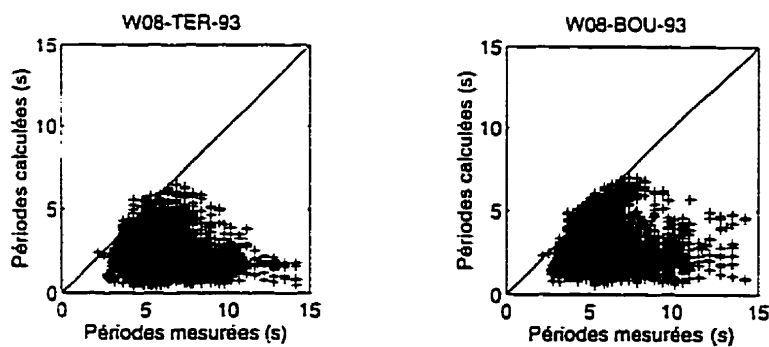


a) Année 1991 (n=3864)

Figure 4.16 - Comparaison des périodes mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ENVC



b) Année 1992 (n=3738)



c) Année 1993 (n=3794)

Figure 4.16 - Comparaison des périodes mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ENVC (suite)

d) Périodes à la bouée ULAV

Le tableau 4.11 indique que les prévisions des périodes de pointe (T_p) sont largement inférieures aux observations à la bouée ULAV: le pourcentage d'écart entre les moyennes calculées et mesurées varie de -26 % à -66 %. Pour chaque année de simulation, ce sont les stations de vent maritimes (identifiées par MAR ou BOU) qui permettent d'obtenir les erreurs quadratiques les plus faibles ($\varepsilon_n = 0,48-0,65$). Toutefois, les simulations dont les erreurs quadratiques sont les plus faibles (W08-BOU-91, W08-BOU-92 et W16-BOU-92) sont aussi celles qui conduisent à des surestimations importantes des hauteurs significatives (cf. tableau 4.9). Quant au coefficient de corrélation, il varie de -0,1 à 0,2.

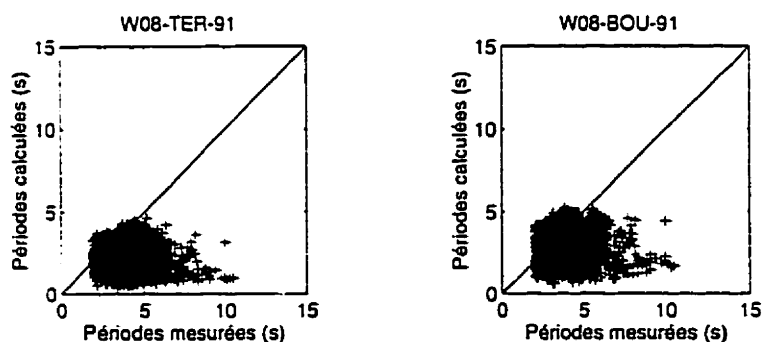
La figure 4.17 illustre le fait que les périodes calculées sont très inférieures aux périodes mesurées à la bouée ULAV.

Tableau 4.11 - Statistiques des périodes mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV

Simulation	Périodes mesurées		Périodes calculées		Écart moyen	Erreur quadratique		Coeff. de corrélation
	$\bar{T}_p$ (s)	s (s)	$\bar{T}_p$ (s)	s (s)	$\Delta \bar{T}_p$ (%)	ε (s) ⁽¹⁾	ε_n ⁽²⁾	r
W08-TER-91	3,94	1,32	2,25	0,84	- 43	2,34	0,59	-0,08
W08-BOU-91	3,94	1,32	2,81	1,01	- 29	2,01	0,51	0,00
W08-TER-92	4,55	1,46	2,20	0,94	- 52	2,92	0,64	0,00
W08-MAR-92	4,55	1,46	2,82	1,22	- 38	2,64	0,58	-0,10
W08-SYN-92	4,55	1,46	2,41	0,92	- 47	2,78	0,61	-0,07
W08-BOU-92	4,55	1,46	2,98	1,07	- 35	2,45	0,54	-0,08
W16-BOU-92	4,55	1,46	3,37	1,15	- 26	2,20	0,48	0,00
W08-TER-93	4,82	1,60	1,66	0,83	- 66	3,57	0,74	0,18
W08-BOU-93	4,82	1,60	2,38	1,10	- 51	3,13	0,65	-0,02

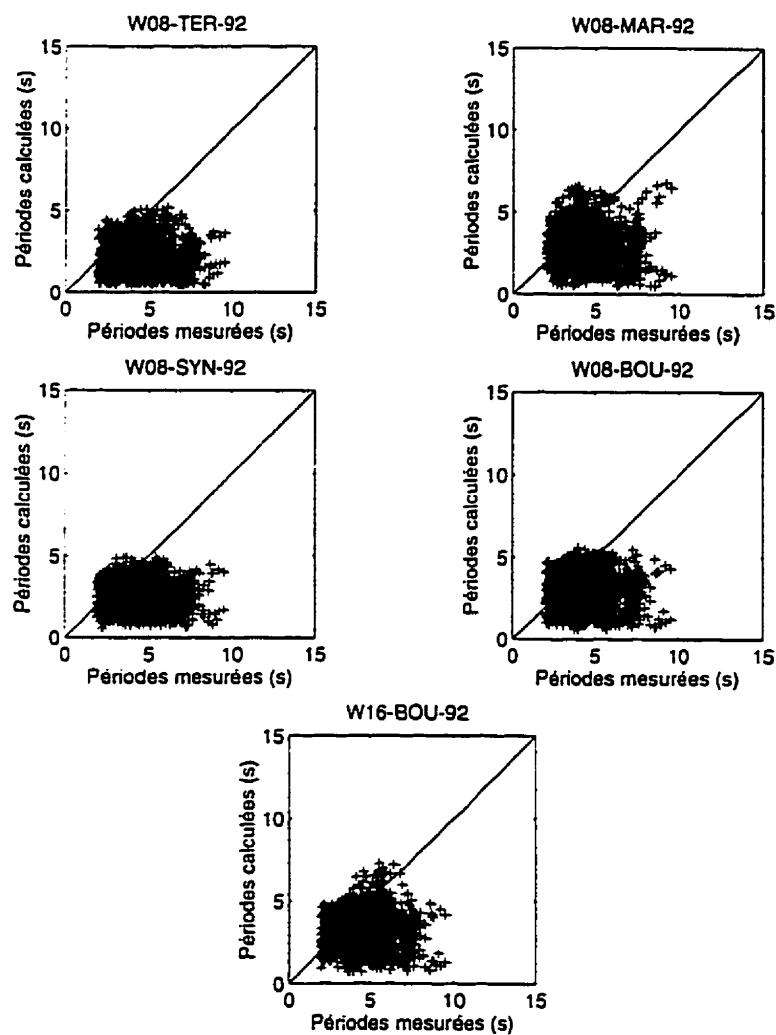
(1) Racine de l'erreur quadratique moyenne.

(2) Racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée ($\varepsilon_n = \varepsilon / \bar{T}_{p,mes}$).

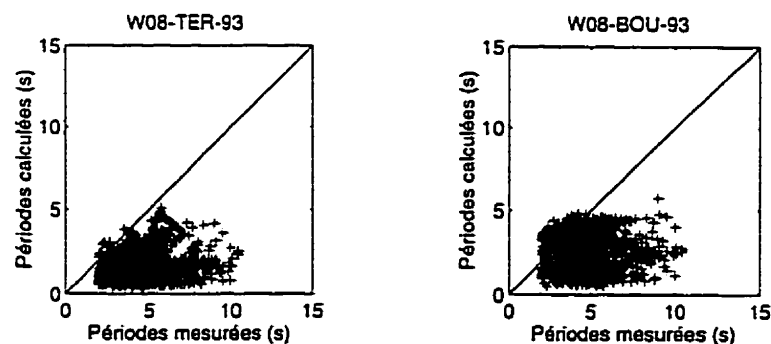


a) Année 1991 (n=2134)

Figure 4.17 - Comparaison des périodes mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV



b) Année 1992 (n=1890)



c) Année 1993 (n=1306)

Figure 4.17 - Comparaison des périodes mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV (suite)

e) Directions à la bouée ULAV

Les directions de propagation des vagues (θ) sont d'abord analysées en considérant toutes les vagues, puis en comparant seulement les vagues mesurées de 0,5 m et plus avec les vagues calculées au même moment, ce qui réduit le nombre de vagues comparées des 2/3 ou des 3/4, selon l'année.

Par ailleurs, les directions sont analysées en considérant les vagues de toutes directions, ainsi qu'en les regroupant en quatre quadrants de 90° chacun, ce qui permet d'obtenir des statistiques de directions plus significatives. En effet, comme la distribution du vent dans l'estuaire est bimodale (cf. annexe A), cette approche permet de regrouper les vagues de telle sorte que deux des quadrants contiennent les deux directions dominantes. Le regroupement est effectué à partir des directions mesurées à la bouée ULAV, chaque quadrant comprenant quatre secteurs de la rose des vents (cf. figure A.1):

- quadrant I: $33,75 \leq \theta_{\text{mes}} < 123,75$; NE, ENE, E, ESE;
- quadrant II: $123,75 \leq \theta_{\text{mes}} < 213,75$; SE, SSE, S, SSW;
- quadrant III: $213,75 \leq \theta_{\text{mes}} < 303,75$; SW, WSW, W, WNW;
- quadrant IV: $303,75 \leq \theta_{\text{mes}} < 33,75$; NW, NNW, N, NNE.

Les tableaux 4.12, 4.13 et 4.14 présentent les statistiques de l'écart entre les directions calculées et celles mesurées:

$$\Delta\theta = \theta_{\text{cal}} - \theta_{\text{mes}} \quad (4.10)$$

La racine de l'erreur quadratique moyenne des directions est définie comme suit:

$$\varepsilon_{\theta} = \sqrt{(\Delta\bar{\theta})^2 + s_{\theta}^2} \quad (4.11)$$

La moyenne des écarts ($\Delta\bar{\theta}$) et leur écart type (s_{θ}) sont donnés par les expressions suivantes (Mardia, 1972):

$$\Delta\bar{\theta} = \arctg\left(\frac{S}{C}\right) \quad (4.12)$$

$$s_{\theta} = \sqrt{-2 \ln(R)} \quad (4.13)$$

dans lesquelles

$$S = \frac{1}{n} \sum \sin(\Delta\theta_i) \quad (4.14)$$

$$C = \frac{1}{n} \sum \cos(\Delta\theta_i) \quad (4.15)$$

$$R = \sqrt{C^2 + S^2} \quad (4.16)$$

Le tableau 4.12 montre qu'au large de Sainte-Flavie, en 1991, la direction dominante des vagues est associée au quadrant III (l'ouest) et que le quadrant I (l'est) est le deuxième plus fréquent. Par contre, en 1992 et 1993, pendant que la bouée était située au large de Mont-Louis, le quadrant I est la direction dominante et le quadrant III vient en deuxième. Dans l'ensemble, le fait de ne considérer que les vagues mesurées de 0,5 m et plus diminue l'erreur quadratique moyenne sur les directions (ϵ_{θ}) de façon importante. Pour 1991, le tableau 4.12b montre que, pour les vagues de 0,5 et plus, l'erreur ϵ_{θ} est semblable pour les deux simulations, soit environ 40°. Par contre, la différence entre les simulations est plus marquée pour le quadrant I. En 1992 (tableau 4.13b), l'erreur ϵ_{θ} est d'environ 50° pour l'ensemble des vagues de 0,5 et plus, la plus faible valeur étant observée pour la simulation W08-TER-92 ($\epsilon_{\theta} = 47,5^{\circ}$) et la plus élevée, pour la simulation W08-SYN-92 ($\epsilon_{\theta} = 54,6^{\circ}$). L'utilisation d'un champ de vent uniforme (W08-BOU-92) ou de cellules de 16 km (W16-BOU-92) ne modifie pas sensiblement l'erreur sur les directions. On observe aussi que l'écart moyen ($\Delta\bar{\theta}$) est systématiquement négatif⁸ pour les vagues de 0,5 m et plus, à l'exception de la simulation W16-BOU-92, où l'utilisation d'une grille de 16 km entraîne un écart positif des directions calculées pour le quadrant I. Pour l'année 1993 (tableau 4.14b), l'erreur quadratique est semblable pour les deux simulations, si on considère l'ensemble des vagues de 0,5 et plus, mais la différence entre les simulations est plus marquée pour le quadrant III. De plus, la valeur de ϵ_{θ} est de près de 65° pour l'ensemble des vagues, comparativement à 50° en 1992, même si la bouée était située au même endroit. Pour les trois années de reconstitution des vagues, le quadrant présentant la plus faible erreur quadratique est le quadrant III.

⁸ Un écart moyen ($\Delta\bar{\theta}$) négatif indique un biais des directions calculées dans le sens trigonométrique par rapport à celles mesurées.

Tableau 4.12 - Statistiques de l'écart entre les directions mesurées et celles calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV en 1991

a) Toutes les vagues (degrés)

Simulation	Quadrant I (n=640)			Quadrant II (n=50)			Quadrant III (n=1055)			Quadrant IV (n=389)			Toutes directions (n=2134)		
	$\Delta\bar{\theta}$ (1)	s_{θ} (2)	ε_{θ} (3)	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}
W08-TER	120,5	144,6	188,2	9,1	48,3	49,1	-11,5	40,2	41,8	-63,0	65,3	90,8	-19,0	71,7	74,2
W08-BOU	-88,4	114,0	144,3	-29,2	91,6	96,1	-4,8	53,3	53,5	-59,9	62,4	86,5	-22,8	76,6	80,0

b) Vagues mesurées de 0,5 m et plus (degrés)

Simulation	Quadrant I (n=154)			Quadrant II (n=0)			Quadrant III (n=333)			Quadrant IV (n=82)			Toutes directions (n=569)		
	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}
W08-TER	8,9	80,8	81,2	-	-	-	-4,8	20,8	21,4	-34,4	31,1	46,3	-7,7	43,0	43,7
W08-BOU	-8,2	50,8	51,4	-	-	-	-3,1	30,1	30,3	-46,8	32,8	57,2	-10,5	39,7	41,0

- (1) Moyenne des écarts
- (2) Écart-type des écarts
- (3) Erreur quadratique moyenne

Tableau 4.13 - Statistiques de l'écart entre les directions mesurées et celles calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV en 1992

a) Toutes les vagues (degrés)

Simulation	Quadrant I (n=1049)			Quadrant II (n=75)			Quadrant III (n=514)			Quadrant IV (n=252)			Toutes directions (n=1890)		
	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}
W08-TER	-37,4	70,6	79,9	-179,1	105,9	208,0	-15,7	31,8	35,4	-43,5	65,7	78,8	-29,5	63,2	69,7
W08-MAR	-40,6	87,5	96,4	52,0	56,1	76,5	-15,5	16,7	22,8	-61,8	50,0	79,5	-28,9	67,1	73,1
W08-SYN	-22,6	100,6	103,1	17,5	53,1	55,9	-14,5	26,1	29,9	-62,6	55,6	83,7	-22,9	72,9	76,4
W08-BOU	-45,0	73,0	85,8	77,6	85,0	115,1	-19,4	22,5	29,7	-59,3	52,1	79,0	-34,9	61,7	70,9
W16-BOU	12,9	77,8	78,9	49,6	73,2	88,4	-30,5	22,2	37,7	-66,2	56,9	87,3	-16,3	67,8	69,7

b) Vagues mesurées de 0,5 m et plus (degrés)

Simulation	Quadrant I (n=386)			Quadrant II (n=6)			Quadrant III (n=246)			Quadrant IV (n=72)			Toutes directions (n=710)		
	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}
W08-TER	-34,6	45,2	56,9	-126,9	10,5	127,4	-12,1	24,1	27,0	-31,7	33,3	45,9	-26,0	39,8	47,5
W08-MAR	-35,2	56,4	66,4	-26,4	5,5	27,0	-11,9	14,5	18,8	-47,1	32,1	57,0	-26,2	43,9	51,2
W08-SYN	-32,5	64,4	72,1	-16,9	28,0	32,7	-10,8	13,3	17,1	-53,5	33,7	63,2	-24,6	48,8	54,6
W08-BOU	-39,5	49,3	63,2	-114,0	13,7	114,8	-16,9	16,6	23,6	-45,4	35,7	57,8	-31,2	40,9	51,4
W16-BOU	16,5	52,8	55,3	-69,6	15,1	71,2	-28,3	17,4	33,2	-49,0	39,0	62,6	-10,3	48,5	49,6

Tableau 4.14 - Statistiques de l'écart entre les directions mesurées et celles calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV en 1993

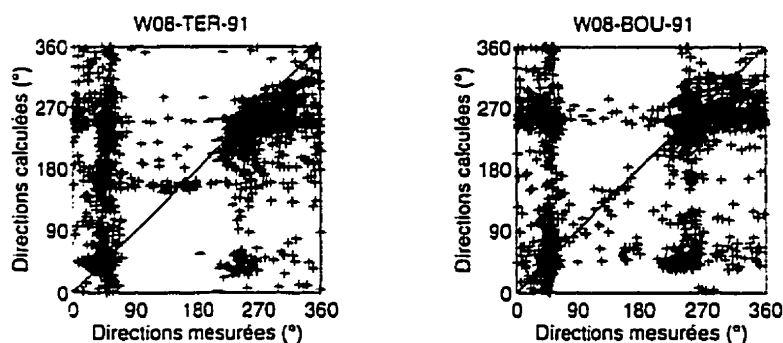
a) Toutes les vagues (degrés)

Simulation	Quadrant I (n=922)			Quadrant II (n=52)			Quadrant III (n=204)			Quadrant IV (n=128)			Toutes directions (n=1306)		
	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ϵ_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ϵ_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ϵ_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ϵ_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ϵ_{θ}
W08-TER	-29,5	85,2	90,2	-47,5	80,8	93,7	-26,1	49,5	55,9	-34,7	89,4	95,9	-29,6	79,3	84,6
W08-BOU	-35,9	80,3	88,0	-16,2	91,7	93,1	-18,8	30,3	35,6	-46,4	65,8	80,5	-31,6	71,8	78,5

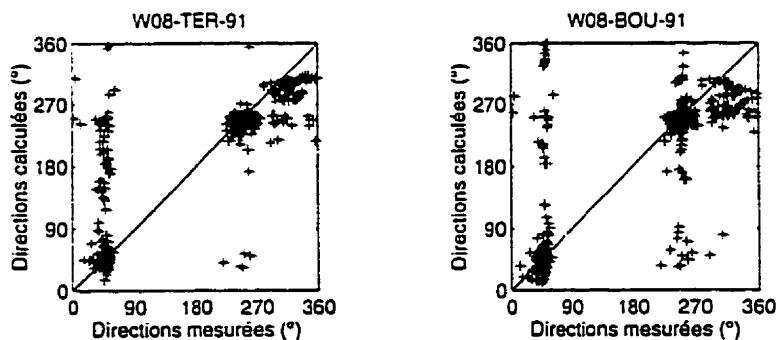
b) Vagues mesurées de 0,5 m et plus (degrés)

Simulation	Quadrant I (n=318)			Quadrant II (n=0)			Quadrant III (n=67)			Quadrant IV (n=1)			Toutes directions (n=406)		
	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ϵ_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ϵ_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ϵ_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ϵ_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ϵ_{θ}
W08-TER	-44,8	54,6	70,6	-	-	-	-23,4	19,3	30,3	-8,9	38,3	39,4	-38,0	50,2	63,0
W08-BOU	-42,0	60,7	73,8	-	-	-	-17,1	7,7	18,7	-28,5	31,6	42,6	-34,9	53,8	64,1

Lorsque toutes les vagues sont considérées, les diagrammes comparant les directions calculées à celles mesurées montrent une grande dispersion des résultats (figures 4.18, 4.19 et 4.20). Les diagrammes montrant seulement les vagues de 0,5 m et plus révèlent que les directions enregistrées au large de Sainte-Flavie en 1991 sont décalées dans le sens antihoraire par rapport à celles enregistrées au large de Mont-Louis en 1992 et 1993. On constate aussi que les directions calculées en 1991 sont moins biaisées que celles de 1992 et 1993, et qu'en général, les directions calculées correspondant aux directions mesurées des secteurs nord-est à est sont plus dispersées que celles correspondant aux directions mesurées des secteurs sud-ouest à nord-ouest.

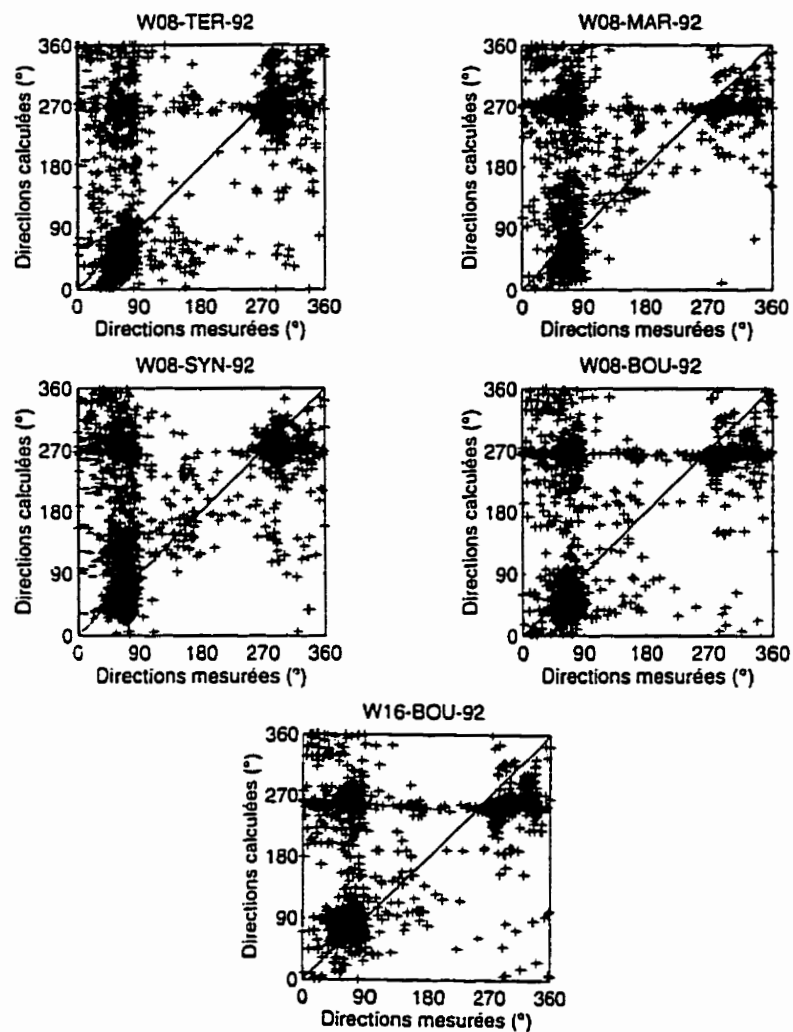


a) Toutes les vagues (n=2134)



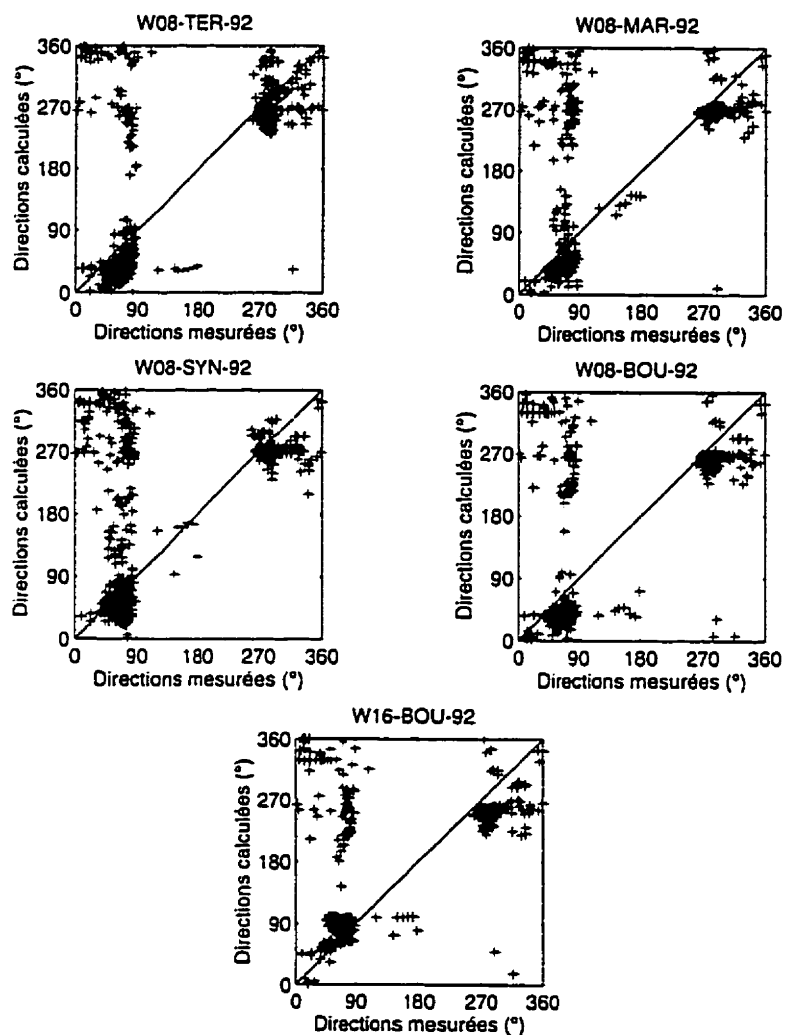
b) Vagues mesurées de 0,5 m et plus (n=569)

Figure 4.18 - Comparaison des directions mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV en 1991



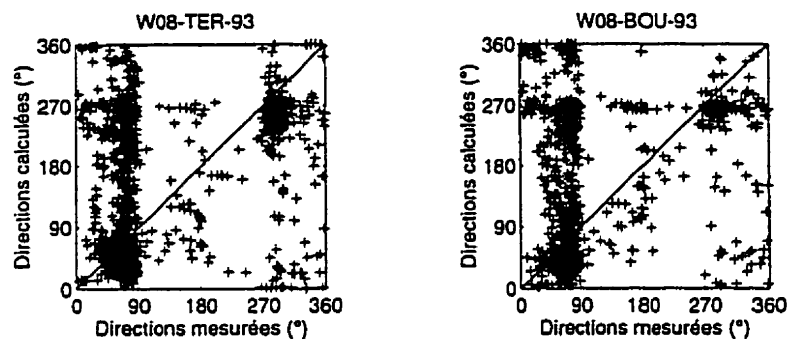
a) Toutes les vagues (n=1890)

Figure 4.19 - Comparaison des directions mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV en 1992

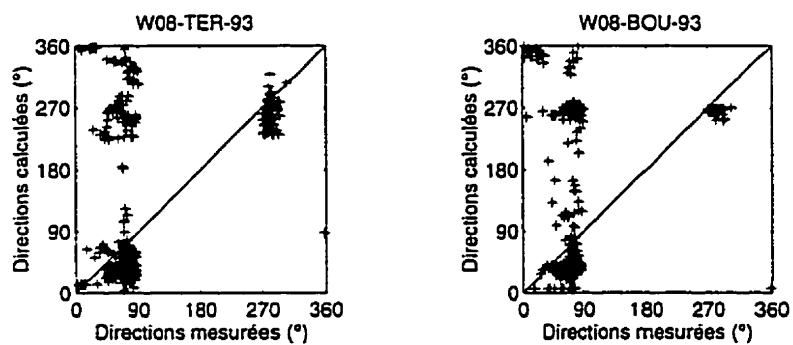


b) Vagues mesurées de 0,5 m et plus (n=710)

Figure 4.19 - Comparaison des directions mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV en 1992 (suite)



a) Toutes les vagues (n=1306)



b) Vagues mesurées de 0,5 m et plus (n=406)

Figure 4.20 - Comparaison des directions mesurées et calculées par le modèle WAWSP à la bouée ULAV en 1993

4.6 Prévisions avec les modèles unidimensionnels

4.6.1 Description des modèles

Les modèles unidimensionnels (1D) permettent d'estimer, en un point et à un instant donnés, la hauteur et la période des vagues générées par un champ de vent uniforme et permanent. La plupart de ces modèles, dont ceux utilisés ici, reposent sur l'hypothèse que les vagues se propagent dans la direction du vent. Pour reconstituer les vagues sur de longues périodes, ils sont intégrés à des méthodes empiriques qui permettent de tenir compte de conditions de vent non permanentes. La méthode utilisée dans cette étude a été développée à l'université Laval (Desjardins et Ouellet, 1984). Elle permet de calculer les vagues avec les deux modèles de prévision du *Shore Protection Manual* (S.P.M.) décrits plus bas. Cette méthode lisse les données de vent sur une période de neuf heures et ramène les directions à 16 secteurs de la rose des vents. À un instant donné, le train de vagues est formé de la vague générée par les conditions actuelles du vent et des vagues de directions différentes qui s'atténuent selon les relations:

$$\frac{H_s}{H_0} = \left(1 - \frac{g T_0 t}{4 \pi F} \right)^\chi \quad (4.17)$$

$$\frac{T_s}{T_0} = \left(1 - \frac{g T_0 t}{4 \pi F} \right)^\chi \quad (4.18)$$

dans lesquelles H_0 et T_0 sont respectivement la hauteur et la période de la vague avant son atténuation, t , le temps écoulé depuis le début du processus d'atténuation et χ , le coefficient d'atténuation, qui est pris égal à un pour une atténuation linéaire. La vague générée par les conditions actuelles du vent est la plus haute vague obtenue en utilisant le processus suivant à la $n^{\text{ième}}$ heure d'un bloc de données de vent de direction constante. La vitesse du vent à cette heure est d'abord utilisée dans les équations du S.P.M. avec une durée d'une heure. Puis la vitesse moyenne du vent pour cette heure et l'heure précédente est utilisée avec une durée de deux heures, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'on ait utilisé la vitesse moyenne du vent pour les n heures écoulées depuis le début du bloc de direction constante. La plus haute vague ainsi obtenue est combinée aux vagues provenant des autres directions et la résultante est conservée pour décrire les conditions de vagues à cet instant. La hauteur de la vague résultante est calculée en prenant la racine carrée de la somme des carrés des hauteurs des vagues constituantes. La

période et la direction retenues pour cette vague résultante sont celles de la composante de hauteur maximale. Le processus est ensuite repris pour l'heure suivante.

a) Modèle SPM-77

Le modèle de prévision de vagues décrit dans le *Shore Protection Manual* de 1977 (U.S. Army Corps of Engineers, 1977) est basé sur les équations semi-empiriques de la méthode S.M.B. (Bretschneider, 1973). Dans des conditions de vagues en eau profonde, la hauteur et la période significatives sont données par les relations suivantes:

$$\frac{g H_s}{U_{10}^2} = 0,283 \operatorname{tgh} \left[0,0125 \left(\frac{g F}{U_{10}^2} \right)^{0,42} \right] \quad (4.19)$$

$$\frac{g T_s}{2 \pi U_{10}} = 1,20 \operatorname{tgh} \left[0,077 \left(\frac{g F}{U_{10}^2} \right)^{0,25} \right] \quad (4.20)$$

dans lesquelles F désigne le fetch géographique lorsque la croissance des vagues est limitée par le fetch. Si la croissance est limitée par la durée (t), F est le fetch équivalent, calculé à partir de la relation suivante:

$$\frac{g t}{U_{10}} = K \exp \left\langle \left\{ A \left[\ln \left(\frac{g F}{U_{10}^2} \right) \right]^2 - B \ln \left(\frac{g F}{U_{10}^2} \right) + C \right\}^{1/2} + D \ln \left(\frac{g F}{U_{10}^2} \right) \right\rangle \quad (4.21)$$

dans laquelle les constantes ont les valeurs suivantes:

$$\begin{aligned} A &= 0,0161 \\ B &= 0,3692 \\ C &= 2,2024 \\ D &= 0,8798 \\ K &= 6,5882 \end{aligned}$$

b) Modèle SPM-84

Le modèle présenté dans le *Shore Protection Manual* de 1984 (U.S. Army Corps of Engineers, 1984) est basé sur les équations de la méthode JONSWAP (Hasselmann *et al.*, 1976). Il permet d'obtenir une description paramétrique des conditions de vagues en eau profonde à partir des équations suivantes:

$$\frac{g H_{m0}}{U_a^2} = 0,0016 \left(\frac{g F}{U_a^2} \right)^{1/2} \quad (4.22)$$

$$\frac{g T_p}{U_a^2} = 0,2857 \left(\frac{g F}{U_a^2} \right)^{1/3} \quad (4.23)$$

dans lesquelles la hauteur caractéristique, H_{m0} , la période de pointe, T_p , et la vitesse du vent corrigée, U_a , sont définies comme suit:

$$H_{m0} = 4 \sigma_\eta \quad (4.24)$$

$$T_p = 1,05 T_s \quad (4.25)$$

$$U_a = 0,71 U_{10}^{1,23} \quad (\text{en m/s}) \quad (4.26)$$

Le fetch équivalent à une durée t est donné par:

$$\frac{g t}{U_a} = 68,8 \left(\frac{g F}{U_a^2} \right)^{2/3} \quad (4.27)$$

4.6.2 Fetchs

Les fetchs sont calculés selon la méthode du fetch effectif modifié (Desjardins et Ouellet, 1984). Cette méthode est basée sur la méthode du fetch effectif proposée par Saville (U.S. Army Corps of Engineers, 1977), qui calcule le fetch dans la direction du vent en considérant les radiales comprises dans un secteur de 42° de part et d'autre de la direction du vent:

$$F_e = \frac{\sum R_i \cos^2(\beta_i)}{\sum \cos(\beta_i)} \quad (4.28)$$

dans laquelle R_i désigne la longueur de la radiale i et β_i , l'angle entre la radiale i et la direction du vent. L'intervalle entre les radiales peut être de $1,5^\circ$, 3° , 6° , etc.

La méthode du fetch effectif modifié applique l'équation précédente en ne considérant d'abord que la radiale dans la direction du vent ($\beta = 0^\circ$), puis les radiales comprises entre -3° et $+3^\circ$, puis celles entre -6° et $+6^\circ$, etc., jusqu'à celles comprises entre -42° et $+42^\circ$. Le fetch est pris égal à la moyenne des fetchs ainsi calculés plus la moitié de leur écart type. Le tableau 4.15 montre, pour les trois emplacements des bouées (ENVC, ULAV-91 et ULAV-92-93), les radiales mesurées à un intervalle de 3° . Les fetchs calculés selon la méthode du fetch effectif modifié sont présentés dans les tableaux 4.16, 4.17 et 4.18.

Tableau 4.15 - Radiales selon les directions à l'emplacement des bouées ENVC, ULAV-91 et ULAV-92-93

Azimut (°)	Radiale (km)			Azimut (°)	Radiale (km)			Azimut (°)	Radiale (km)			Azimut (°)	Radiale (km)		
	ENVC	UL-91	UL-92		ENVC	UL-91	UL-92		ENVC	UL-91	UL-92		ENVC	UL-91	UL-92
0	78,3	46,0	108,9	90	147,0	11,7	183,0	180	33,9	6,2	3,0	270	106,5	62,1	174,0
3	78,0	46,8	109,5	93	153,0	11,7	30,0	183	34,2	6,2	3,0	273	105,9	62,1	116,4
6	79,2	57,2	111,0	96	156,0	11,4	12,0	186	35,1	6,5	3,0	276	103,5	61,1	113,4
9	80,1	65,5	113,1	99	180,0	10,9	9,0	189	34,8	7,0	3,0	279	102,9	59,8	111,0
12	82,8	69,4	115,5	102	255,0	10,4	7,5	192	35,1	7,3	3,0	282	104,1	55,4	108,6
15	84,9	70,5	117,6	105	330,0	9,6	6,0	195	36,6	7,8	3,0	285	103,5	53,6	109,5
18	86,4	72,8	118,5	108	390,0	9,1	6,0	198	36,9	8,3	3,3	288	97,5	52,8	111,6
21	87,9	73,3	120,6	111	450,0	8,8	5,4	201	37,5	9,1	3,3	291	96,0	49,7	111,6
24	89,4	73,3	122,4	114	390,0	7,3	5,1	204	38,7	9,4	3,6	294	96,0	48,4	111,0
27	90,9	79,0	123,6	117	330,0	5,7	4,8	207	39,9	10,4	3,6	297	97,5	47,8	114,0
30	93,9	81,1	126,9	120	198,0	5,7	4,5	210	41,7	12,5	3,9	300	97,5	46,8	115,5
33	95,7	85,0	132,0	123	69,0	5,5	4,5	213	43,5	14,6	4,2	303	94,5	45,5	111,3
36	98,1	90,2	138,0	126	60,0	5,2	4,2	216	46,2	16,4	4,5	306	90,0	43,2	111,0
39	101,4	93,1	147,0	129	54,9	5,2	4,2	219	48,3	16,9	5,4	309	90,3	40,3	112,5
42	107,4	174,2	150,9	132	51,0	4,9	4,2	222	52,2	18,2	6,0	312	91,5	40,3	115,5
45	113,4	254,8	156,0	135	48,0	4,9	3,9	225	57,0	33,8	6,0	315	90,0	40,3	115,5
48	124,5	275,6	159,0	138	43,5	4,9	3,9	228	62,4	39,0	6,0	318	88,5	42,9	111,9
51	129,0	288,6	168,0	141	42,0	4,9	3,9	231	73,5	52,0	6,3	321	82,5	46,0	111,0
54	135,0	314,6	109,5	144	39,9	4,9	3,9	234	83,4	145,6	6,3	324	78,0	46,8	114,9
57	148,5	340,6	111,0	147	38,4	4,9	3,6	237	121,5	130,0	6,6	327	78,0	48,1	114,0
60	150,0	358,8	115,5	150	37,2	4,9	3,6	240	140,1	124,8	6,9	330	75,0	48,1	111,6
63	160,5	299,0	118,5	153	36,3	4,9	3,6	243	360,0	110,5	8,1	333	81,0	48,1	102,0
66	180,0	174,2	126,0	156	35,1	4,9	3,6	246	294,0	92,3	11,4	336	78,0	46,8	106,5
69	93,9	50,7	132,9	159	34,5	4,9	3,6	249	264,0	88,4	11,7	339	75,0	42,9	108,0
72	97,5	35,1	139,5	162	33,9	4,9	3,9	252	249,0	81,9	13,5	342	74,1	42,9	108,0
75	102,0	26,0	144,9	165	33,9	5,2	3,6	255	219,0	78,8	15,9	345	78,0	42,9	104,1
78	109,5	23,7	150,0	168	33,6	5,5	3,6	258	118,5	76,7	31,5	348	81,9	44,2	105,0
81	120,0	21,1	154,5	171	33,3	5,5	3,3	261	112,5	70,2	225,0	351	81,9	46,0	111,9
84	130,5	16,9	156,0	174	33,9	5,7	3,3	264	108,0	63,7	210,0	354	78,9	46,0	112,5
87	139,5	12,2	168,0	177	33,9	6,0	3,0	267	106,2	62,4	177,0	357	78,3	46,0	108,9

Tableau 4.16 - Fetchs effectifs modifiés à la bouée ENV C

Fetchs (km)

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0°	78,3	89,4	113,4	93,9	147,0	390,0	48,0	34,5	33,9	38,7	57,0	264,0	106,5	96,0	90,0	75,0
± 3°	78,1	89,3	115,0	123,7	146,4	389,6	47,5	34,5	34,0	38,7	57,1	268,7	106,1	96,4	89,9	75,6
± 6°	78,3	89,5	114,8	126,4	144,8	350,8	47,7	34,6	34,1	38,8	58,5	276,4	105,7	96,6	88,3	77,0
± 9°	78,8	89,4	114,9	126,9	145,8	307,2	48,2	34,7	34,0	39,0	60,1	234,2	105,9	97,0	86,8	77,1
± 12°	79,2	89,2	115,9	127,9	152,9	273,6	49,1	34,8	33,9	39,2	64,6	207,9	106,6	96,5	86,3	77,4
± 15°	79,1	88,9	116,2	127,9	162,8	245,1	60,6	35,0	33,9	39,4	68,7	187,4	115,3	95,9	85,7	77,1
± 18°	78,7	88,9	116,7	127,9	173,1	223,2	77,6	35,1	33,9	39,7	86,8	172,2	122,7	95,5	85,6	77,0
± 21°	78,3	88,9	117,9	127,7	183,4	206,7	93,0	35,3	33,8	40,1	95,6	160,2	128,5	94,9	85,1	77,1
± 24°	78,1	89,4	114,0	127,1	192,0	193,4	107,3	35,5	33,8	40,5	100,3	150,7	134,0	94,3	84,3	77,1
± 27°	78,0	89,6	110,9	126,1	194,6	182,4	115,2	35,8	33,8	41,2	102,9	142,8	140,8	93,3	83,5	77,0
± 30°	77,6	89,9	108,3	125,8	190,8	173,0	118,9	36,1	33,9	42,0	103,6	136,1	137,5	92,2	83,1	76,7
± 33°	77,2	90,4	106,1	127,5	183,0	164,7	119,1	36,3	33,9	43,8	100,6	130,4	133,9	91,2	82,7	76,4
± 36°	76,8	90,7	104,4	130,6	175,8	157,4	116,8	36,8	34,0	45,7	97,7	125,5	129,5	90,3	82,1	76,1
± 39°	76,4	90,8	102,9	134,2	169,3	150,9	114,1	40,2	34,0	52,4	95,1	121,0	125,3	92,0	81,4	75,8
± 42°	76,2	91,0	101,7	138,0	163,4	145,1	111,6	45,7	34,1	56,3	92,6	117,0	121,5	93,6	80,7	75,4
Moyenne	77,9	89,7	111,5	126,1	168,3	236,9	85,0	36,3	33,9	42,4	82,7	179,6	121,3	94,4	85,0	76,5
Écart-type	0,9	0,7	5,4	9,6	18,1	86,0	31,4	3,0	0,1	5,3	19,0	57,0	12,8	2,2	2,9	0,7
Fetch e.m.	78,4	90,0	114,3	130,9	177,4	279,9	100,7	37,8	34,0	45,0	92,3	208,1	127,7	95,5	86,5	76,9

Tableau 4.17 - Fetchs effectifs modifiés à la bouée ULAV-91

Fetchs (km)

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0°	46,0	73,3	254,8	50,7	11,7	7,3	4,9	4,9	6,2	9,4	33,8	88,4	62,1	48,4	40,3	42,9
± 3°	46,2	75,2	234,7	86,6	11,9	7,3	4,9	4,9	6,1	9,6	30,3	87,5	62,2	48,6	41,1	44,2
± 6°	48,3	75,7	216,8	116,5	12,8	7,3	5,0	5,0	6,1	9,9	31,9	90,1	62,1	49,0	41,8	44,6
± 9°	50,2	76,0	212,0	137,0	13,6	7,4	5,0	5,0	6,1	10,2	45,5	92,8	62,7	48,9	42,6	44,9
± 12°	51,4	76,5	211,1	145,8	14,3	7,4	5,0	5,0	6,2	10,5	51,1	93,9	63,1	48,8	43,3	45,1
± 15°	52,0	76,5	211,4	148,3	14,8	7,5	5,0	5,1	6,2	10,7	53,8	95,2	63,3	48,7	43,7	45,1
± 18°	52,4	81,5	206,7	147,5	15,7	7,5	5,0	5,1	6,2	10,9	54,3	89,1	63,4	48,6	44,0	44,9
± 21°	52,7	89,1	195,0	145,8	17,3	7,6	5,1	5,1	6,2	11,9	53,4	83,8	63,5	48,5	44,1	44,4
± 24°	52,9	95,5	179,7	143,1	24,6	7,6	5,3	5,1	6,3	12,8	52,5	79,3	63,6	48,5	43,9	43,9
± 27°	53,3	100,7	166,8	137,2	35,4	7,6	5,4	5,1	6,3	14,1	51,3	75,0	64,3	48,4	43,7	43,9
± 30°	53,5	105,5	155,9	129,2	46,1	7,7	5,4	5,1	6,4	18,6	50,1	71,4	65,1	48,4	43,6	44,1
± 33°	53,7	109,9	146,9	122,5	53,7	8,0	5,5	5,1	6,6	21,5	48,9	68,2	65,8	48,5	43,4	44,3
± 36°	53,8	113,6	139,1	116,6	59,0	8,2	5,6	5,1	6,7	23,7	47,7	65,4	66,5	48,6	43,4	44,5
± 39°	53,8	114,8	132,2	111,5	62,5	8,5	5,7	5,2	6,8	25,0	46,4	62,9	64,6	48,7	43,3	44,6
± 42°	55,3	112,9	126,0	107,1	64,8	8,8	5,7	5,2	6,9	25,7	45,2	60,6	62,6	48,6	43,1	44,6
Moyenne	51,7	91,8	185,9	123,0	30,5	7,7	5,2	5,1	6,4	15,0	46,4	80,2	63,7	48,6	43,0	44,4
Écart-type	2,8	16,4	39,7	26,9	20,8	0,5	0,3	0,1	0,3	6,1	8,0	12,1	1,4	0,2	1,1	0,6
Fetch e.m.	53,1	100,0	205,8	136,5	40,9	7,9	5,4	5,1	6,5	18,0	50,4	86,3	64,3	48,7	43,6	44,7

Tableau 4.18 - Fetchs effectifs modifiés à la bouée ULAV-92-93

Fetchs (km)

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0°	108,9	122,4	156,0	132,9	183,0	5,1	3,9	3,6	3,0	3,6	6,0	11,7	174,0	111,0	115,5	108,0
± 3°	109,0	122,1	155,2	132,7	126,9	5,1	4,0	3,7	3,0	3,5	6,0	12,2	155,7	112,1	114,2	107,4
± 6°	109,9	122,1	155,7	132,0	109,6	5,1	4,0	3,7	3,1	3,5	5,9	12,1	157,7	112,4	113,0	105,4
± 9°	110,2	122,4	146,2	131,7	101,4	5,2	4,0	3,6	3,1	3,5	5,8	14,0	160,1	111,5	112,6	105,9
± 12°	109,7	122,8	140,2	131,3	96,1	5,3	4,0	3,6	3,1	3,6	5,7	35,8	140,0	110,6	112,1	106,9
± 15°	109,2	123,3	136,1	130,8	91,9	5,5	4,0	3,6	3,1	3,7	5,6	48,0	125,8	110,1	111,6	107,4
± 18°	109,0	123,5	133,0	135,1	88,6	5,8	4,0	3,5	3,2	3,7	5,6	53,9	115,9	109,9	110,3	107,0
± 21°	108,7	123,5	130,8	138,2	85,5	7,1	4,0	3,5	3,2	3,8	5,8	57,7	108,5	109,7	109,2	106,5
± 24°	108,2	123,4	129,1	132,3	82,6	15,8	4,0	3,4	3,2	3,8	5,9	57,5	102,6	112,0	108,2	106,1
± 27°	107,5	123,4	127,7	126,5	79,9	21,7	4,0	3,4	3,2	3,9	6,0	57,1	97,9	113,6	107,2	105,6
± 30°	107,1	121,0	126,5	121,4	77,5	25,9	4,1	3,4	3,2	3,9	6,2	56,5	94,0	116,0	105,9	104,9
± 33°	106,8	118,9	125,3	116,7	75,3	29,0	4,1	3,4	3,2	3,9	6,9	55,8	90,6	118,0	104,6	104,1
± 36°	106,5	116,8	124,2	112,5	73,2	31,3	4,2	3,3	3,2	3,9	12,8	55,1	87,6	113,8	103,6	103,3
± 39°	106,1	114,9	122,9	108,6	72,8	32,9	4,3	3,3	3,2	4,0	17,2	54,5	85,0	109,6	102,6	102,5
± 42°	105,6	113,3	121,8	105,2	72,1	34,1	4,7	3,3	3,3	4,1	20,0	53,8	82,7	105,9	101,6	101,7
Moyenne	108,2	120,9	135,4	125,9	94,4	15,7	4,1	3,5	3,1	3,8	8,1	42,4	118,5	111,7	108,8	105,5
Écart-type	1,5	3,3	12,4	10,4	28,9	12,0	0,2	0,1	0,1	0,2	4,7	19,4	31,4	2,9	4,4	1,9
Fetch e.m.	108,9	122,6	141,6	131,1	108,9	21,7	4,2	3,5	3,2	3,9	10,4	52,1	134,2	113,2	111,0	106,5

4.6.3 Simulations

Les vagues à l'emplacement des bouées ENVC, ULAV-91 et ULAV-92-93 sont reconstituées en utilisant les deux modèles 1D décrits plus haut. Les périodes de reconstitution sont présentées dans le tableau 4.6. Huit simulations sont effectuées en faisant varier le modèle de prévision, la période de reconstitution et les données de vent (cf. tableau 4.19). Pour l'année 1992, le modèle SPM-77 est utilisé avec une station de vent terrestre (S77-MJL), une station maritime (S77-BOU) et une station synthétique (S77-FLV). Les deux premières simulations sont étendues aux années 1991 et 1993. Le modèle SPM-84 est aussi utilisé pour reconstituer les vagues en 1992 avec une station de vent maritime (S84-BOU).

Les données de vent, décrites à la section 4.2, sont lissées sur une période de neuf heures à l'aide d'une moyenne vectorielle mobile et les directions sont ramenées à 16 secteurs de la rose des vents. Contrairement aux prévisions avec le modèle WAWSP, les données de vent manquantes ne sont pas interpolées. Toutefois, les valeurs manquantes dans les résultats des simulations (hauteurs, périodes et directions des vagues) sont interpolées linéairement afin d'obtenir des séries complètes. Les facteurs de correction de la vitesse du vent sont les mêmes que ceux utilisés avec le modèle WAWSP (cf. section 4.5.3).

Tableau 4.19 - Simulations effectuées avec les modèles 1D

Simulation (1)	Années de reconstitution	Station de vent	Facteur de correction de la vitesse du vent
S77-MJL	1991-1992-1993	Mont-Joli	1,2
S77-BOU	1991-1992-1993	Bouée de Mont-Louis	1,07
S77-FLV	1992	Fleuve VIII	1,1
S84-BOU	1992	Bouée de Mont-Louis	1,07

(1) L'identification des simulations comporte deux parties: la première désigne le modèle (Sxx= SPM de l'année xx); la deuxième réfère à la station de vent utilisée.

4.6.4 Résultats

Les hauteurs significatives (H_s) et les périodes de pointe du spectre (T_p) calculées par les modèles 1D sont comparées aux valeurs mesurées à la bouée d'Environnement Canada (bouée ENVC) et à celle de l'université Laval (bouée ULAV). Quant aux directions de propagation des vagues (θ), elles ne sont comparées qu'à la bouée de l'université Laval. La présentation des résultats est décrite à la section 4.5.4.

a) Hauteurs significatives à la bouée ENVC

Le tableau 4.20 montre que toutes les simulations conduisent à des hauteurs significatives moyennes inférieures aux observations à la bouée ENVC, sauf pour la simulation effectuée avec le modèle SPM-84 (S84-BOU-92), où les deux moyennes de H_s sont égales. Toutefois, c'est la simulation S77-BOU-92 qui conduit à la plus faible erreur quadratique moyenne en 1992 ($\epsilon_n = 0.43$) et au coefficient de corrélation le plus élevé ($r \approx 0,8$). Si l'on compare les résultats de 1991 et 1993 à ceux de 1992, pour les mêmes stations de vent, les résultats sont très semblables.

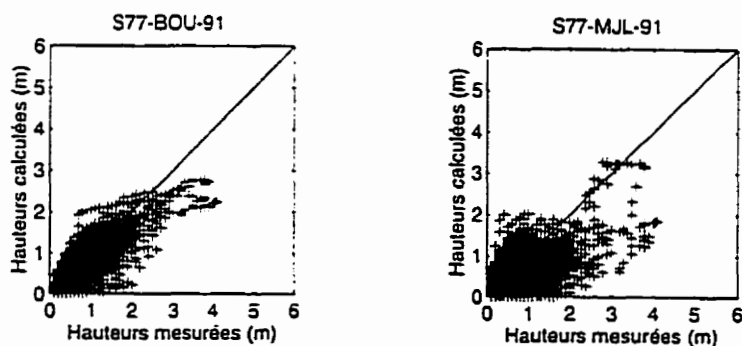
Les graphiques de la figure 4.21 permettent de constater que les données de vent enregistrées à la bouée de Mont-Louis (station identifiée par BOU) conduisent à des estimations des hauteurs significatives moins biaisées et moins dispersées que celles obtenues avec les autres stations de vent.

Tableau 4.20 - Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ENVC

Simulation	Hauteurs mesurées		Hauteurs calculées		Écart moyen	Erreur quadratique		Coeff. de corrélation
	$\bar{H}_s$ (m)	s (m)	$\bar{H}_s$ (m)	s (m)	$\Delta \bar{H}_s$ (%)	ε (m) ⁽¹⁾	ε_n ⁽²⁾	r
S77-MJL-91	0,81	0,57	0,48	0,43	- 41	0,58	0,71	0,58
S77-BOU-91	0,81	0,57	0,68	0,53	- 16	0,34	0,42	0,84
S77-MJL-92	0,87	0,63	0,51	0,43	- 41	0,63	0,72	0,59
S77-BOU-92	0,87	0,63	0,77	0,60	- 11	0,37	0,43	0,83
S77-FLV-92	0,87	0,63	0,54	0,42	- 38	0,64	0,73	0,52
S84-BOU-92	0,87	0,63	0,87	0,75	0	0,48	0,55	0,77
S77-MJL-93	0,79	0,57	0,47	0,43	- 41	0,59	0,74	0,54
S77-BOU-93	0,79	0,57	0,69	0,61	- 13	0,37	0,47	0,82

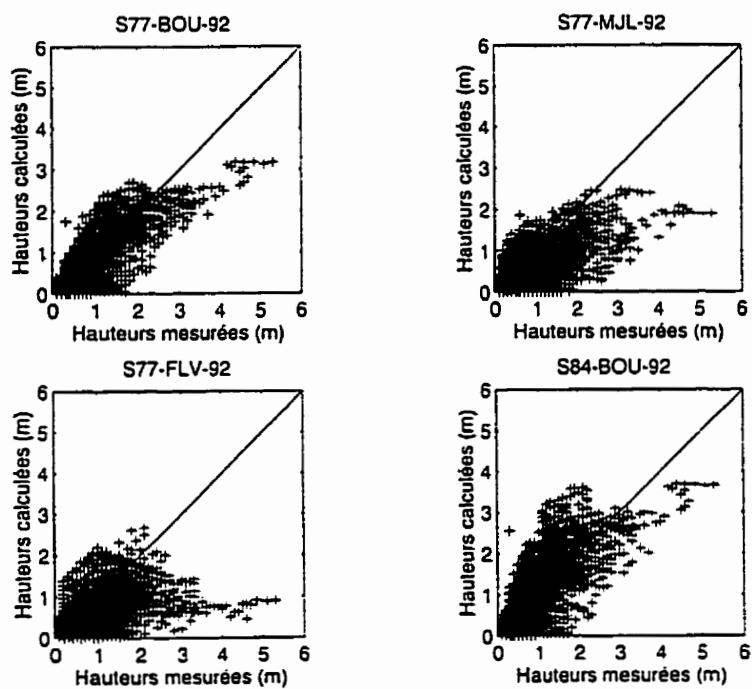
(1) Racine de l'erreur quadratique moyenne.

(2) Racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée ($\varepsilon_n = \varepsilon / \bar{H}_{s,mes}$).

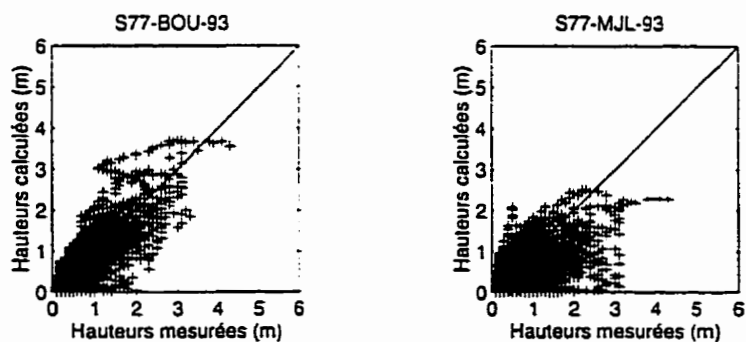


a) Année 1991 (n=4680)

Figure 4.21 - Comparaison des hauteurs significatives mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ENVC



b) Année 1992 (n=4656)



c) Année 1993 (n=4728)

Figure 4.21 - Comparaison des hauteurs significatives mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ENVC (suite)

b) Hauteurs significatives à la bouée ULAV

À la bouée ULAV, le nombre d'heures de comparaison est inférieur au nombre d'heures de reconstitution en raison de données manquantes dans les enregistrements (cf. section 4.3).

Le tableau 4.21 montre qu'en 1991, pendant que la bouée était située au large de Sainte-Flavie, c'est la simulation effectuée avec les vents de la station de Mont-Joli (S77-MJL-91) qui fournit la plus faible erreur quadratique moyenne ($\epsilon_n = 0,79$). Quant à celle effectuée avec les vents de la bouée de Mont-Louis (S77-BOU-91), elle surestime la valeur moyenne de H_s de 69 %. Pour les années 1992 et 1993, pendant que la bouée était ancrée au large de Mont-Louis, les données de vent de la bouée de Mont-Louis surestiment les hauteurs significatives moyennes, tandis que les autres stations les sous-estiment. En 1992, l'erreur quadratique moyenne la plus faible est obtenue pour la simulation S77-FLV-92 ($\epsilon_n = 0,62$) et la plus élevée pour la simulation S84-BOU-92 ($\epsilon_n = 0,97$). Lorsque l'on compare les résultats de 1993 à ceux de 1992, on constate que les valeurs de ϵ_n sont beaucoup plus élevées qu'en 1992 pour les mêmes stations de vent. Quant au coefficient de corrélation, il varie, pour les trois années, de 0,5 à 0,6, sauf pour la simulation S77-MJL-93, où il est de 0,3.

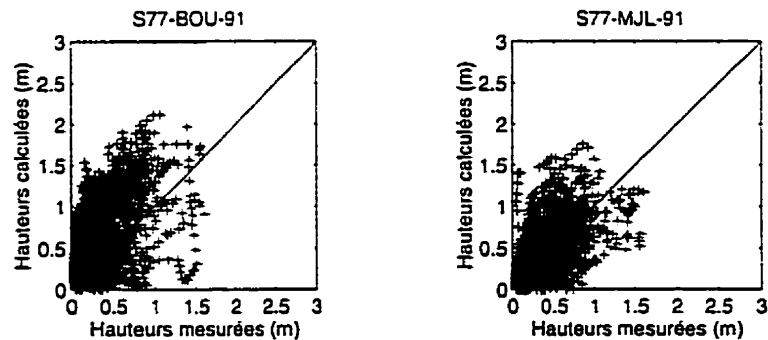
Les diagrammes de la figure 4.22 montrent entre autres que les vents de la bouée de Mont-Louis conduisent à une surestimation des hauteurs significatives des vagues à la bouée ULAV, particulièrement pour la saison 1991, pendant que la bouée était au large de Sainte-Flavie.

Tableau 4.21 - Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV

Simulation	Hauteurs mesurées		Hauteurs calculées		Écart moyen	Erreur quadratique		Coeff. de corrélation
	$\bar{H}_s$ (m)	s (m)	$\bar{H}_s$ (m)	s (m)	$\Delta \bar{H}_s$ (%)	ε (m) ⁽¹⁾	ε_n ⁽²⁾	r
S77-MJL-91	0,36	0,29	0,41	0,33	+ 14	0,28	0,79	0,60
S77-BOU-91	0,36	0,29	0,61	0,44	+ 69	0,45	1,25	0,53
S77-MJL-92	0,46	0,28	0,35	0,31	- 24	0,33	0,70	0,46
S77-BOU-92	0,46	0,28	0,57	0,42	+ 24	0,36	0,78	0,58
S77-FLV-92	0,46	0,28	0,43	0,31	- 7	0,29	0,62	0,54
S84-BOU-92	0,46	0,28	0,59	0,51	+ 28	0,45	0,97	0,54
S77-MJL-93	0,41	0,31	0,28	0,28	- 32	0,37	0,91	0,29
S77-BOU-93	0,41	0,31	0,48	0,46	+17	0,38	0,92	0,60

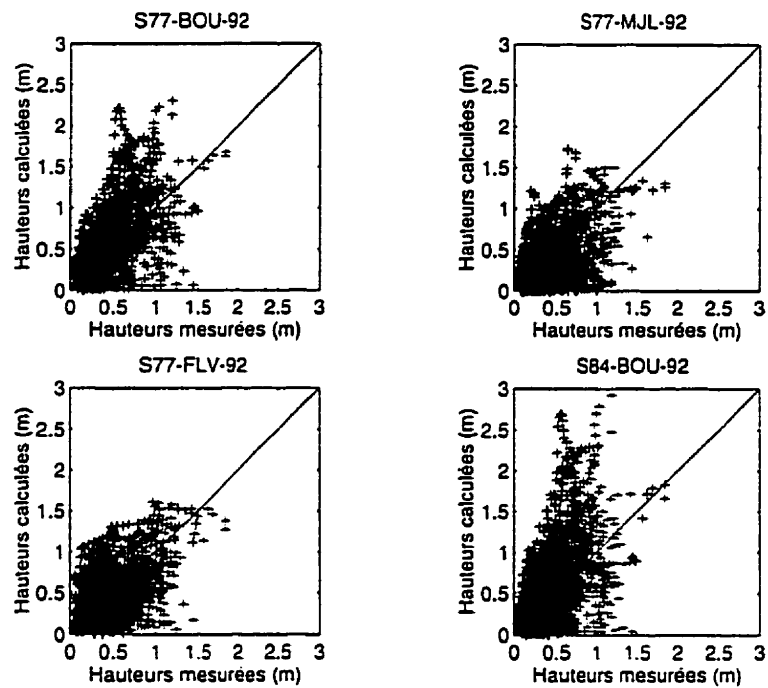
(1) Racine de l'erreur quadratique moyenne.

(2) Racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée ($\varepsilon_n = \varepsilon / \bar{H}_{s,mes}$).

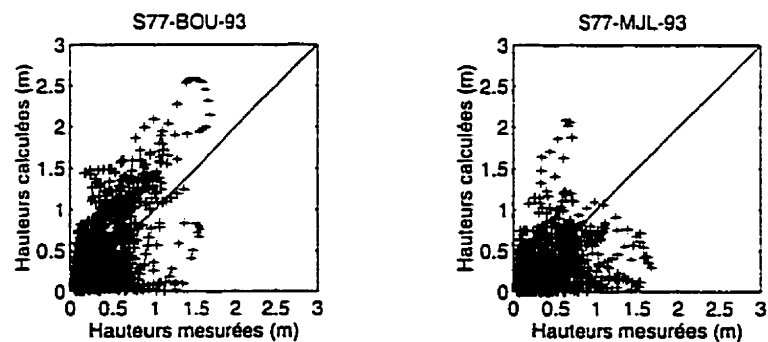


a) Année 1991 (n=2134)

Figure 4.22 - Comparaison des hauteurs significatives mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV



b) Année 1992 (n=1890)



c) Année 1993 (n=1306)

Figure 4.22 - Comparaison des hauteurs significatives mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV (suite)

c) Périodes à la bouée ENVC

Pour l'analyse des périodes de pointe (T_p), les périodes de 15 s et plus enregistrées à la bouée ENVC (cf. section 4.3) ne sont pas prises en compte.

Le tableau 4.22 montre que les prévisions des périodes sont largement inférieures aux observations; le pourcentage d'écart entre les moyennes calculées et mesurées varie de -31 % à -60 %. Pour la saison 1992, c'est la simulation S84-BOU-92 qui conduit à la plus faible erreur quadratique ($\varepsilon_n = 0,57$). Si on compare les résultats des deux autres saisons à ceux de 1992, on constate que l'erreur ε_n est plus élevée en 1991 et 1993, pour les mêmes stations de vent. Quant au coefficient de corrélation, il est pratiquement nul pour toutes les simulations.

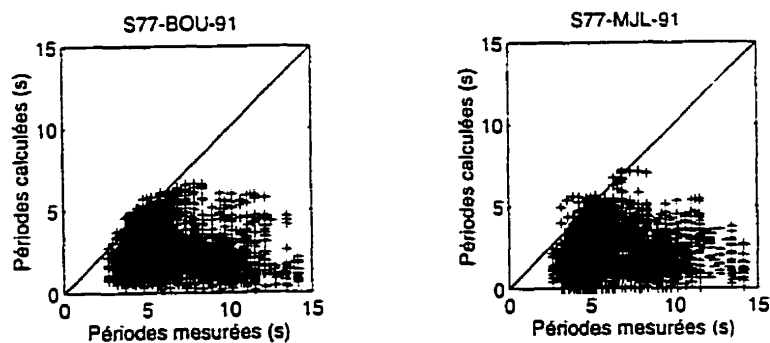
Les diagrammes de la figure 4.23 illustrent l'écart entre les périodes mesurées et celles calculées par les modèles 1D à la bouée ENVC.

Tableau 4.22 - Statistiques des périodes mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ENVC

Simulation	Périodes mesurées		Périodes calculées		Écart moyen	Erreur quadratique		Coeff. de corrélation
	$\bar{T}_p$ (s)	s (s)	$\bar{T}_p$ (s)	s (s)	$\Delta \bar{T}_p$ (%)	ε (s) (1)	ε_n (2)	r
S77-MJL-91	6,10	2,14	2,42	1,27	- 60	4,45	0,73	-0,02
S77-BOU-91	6,10	2,14	2,88	1,39	- 53	4,19	0,69	-0,12
S77-MJL-92	5,75	1,57	2,47	1,29	- 57	3,84	0,67	0,03
S77-BOU-92	5,75	1,57	3,11	1,52	- 46	3,46	0,60	-0,05
S77-FLV-92	5,75	1,57	2,61	1,15	- 55	3,73	0,65	-0,08
S84-BOU-92	5,75	1,57	3,94	2,16	- 31	3,30	0,57	-0,06
S77-MJL-93	6,04	1,81	2,40	1,26	- 60	4,29	0,71	-0,07
S77-BOU-93	6,04	1,81	2,85	1,52	- 53	4,02	0,67	-0,08

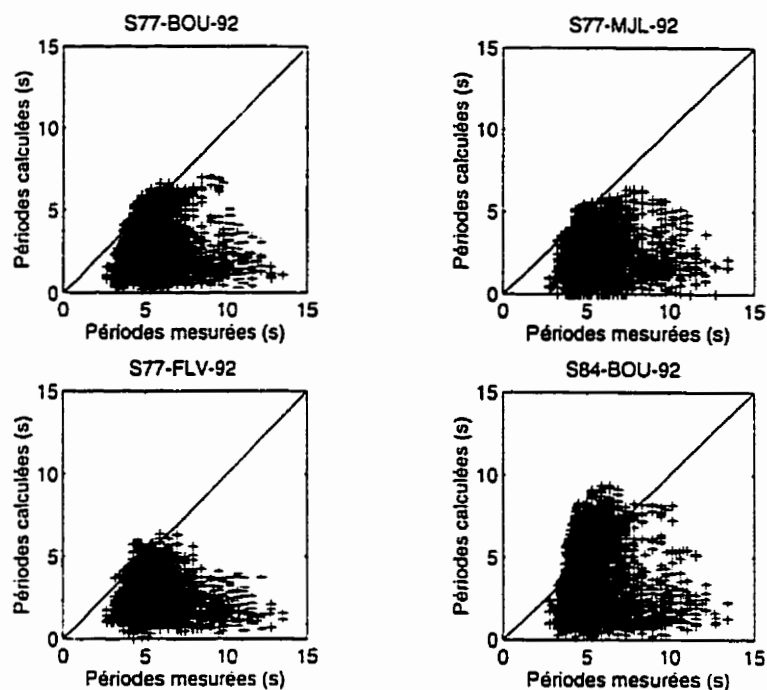
(1) Racine de l'erreur quadratique moyenne.

(2) Racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée ($\varepsilon_n = \varepsilon / \bar{T}_{p,mes}$).

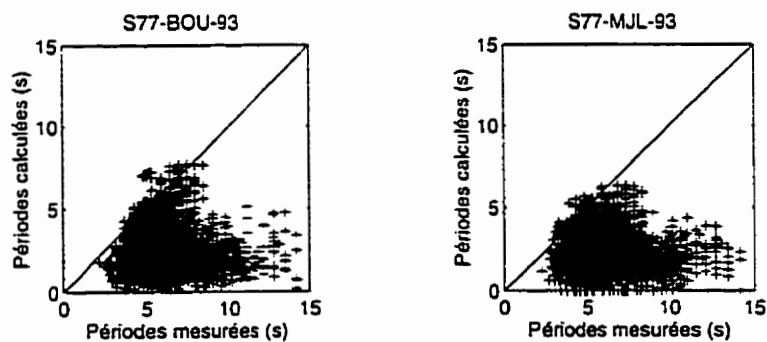


a) Année 1991 (n=4680)

Figure 4.23 - Comparaison des périodes mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ENVC



b) Année 1992 (n=4656)



c) Année 1993 (n=4728)

Figure 4.23 - Comparaison des périodes mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ENVC (suite)

d) Périodes à la bouée ULAV

Le tableau 4.23 indique que les prévisions des périodes de pointe (T_p) sont largement inférieures aux observations à la bouée ULAV; le pourcentage d'écart entre les moyennes calculées et mesurées varie de -31 % à -63 %. Pour chaque année de simulation, c'est la station de vent maritime (identifiée par BOU) qui permet d'obtenir les erreurs quadratiques les plus faibles ($\epsilon_n = 0,54-0,67$). Ces simulations sont aussi celles qui conduisent à une surestimation des hauteurs significatives (cf. tableau 4.21). Le coefficient de corrélation est nul pour toutes les simulations.

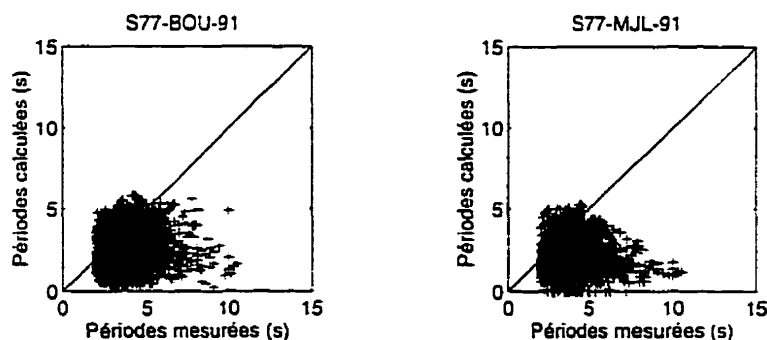
Les diagrammes de la figure 4.24 montrent l'écart entre les périodes calculées et celles mesurées à la bouée ULAV.

Tableau 4.23 - Statistiques des périodes mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV

Simulation	Périodes mesurées		Périodes calculées		Écart moyen	Erreur quadratique		Coeff. de corrélation
	$\bar{T}_p$ (s)	s (s)	$\bar{T}_p$ (s)	s (s)	$\Delta \bar{T}_p$ (%)	ε (s) ⁽¹⁾	ε_n ⁽²⁾	r
S77-MJL-91	3,94	1,32	2,19	1,06	- 44	2,47	0,63	-0,05
S77-BOU-91	3,94	1,32	2,72	1,20	- 31	2,13	0,54	0,04
S77-MJL-92	4,55	1,46	2,03	1,02	- 55	3,09	0,68	-0,01
S77-BOU-92	4,55	1,46	2,68	1,11	- 41	2,63	0,58	-0,01
S77-FLV-92	4,55	1,46	2,30	0,92	- 49	2,81	0,62	0,05
S84-BOU-92	4,55	1,46	3,14	1,58	- 31	2,55	0,56	0,02
S77-MJL-93	4,82	1,60	1,77	0,98	- 63	3,59	0,74	-0,02
S77-BOU-93	4,82	1,60	2,32	1,26	- 52	3,22	0,67	0,02

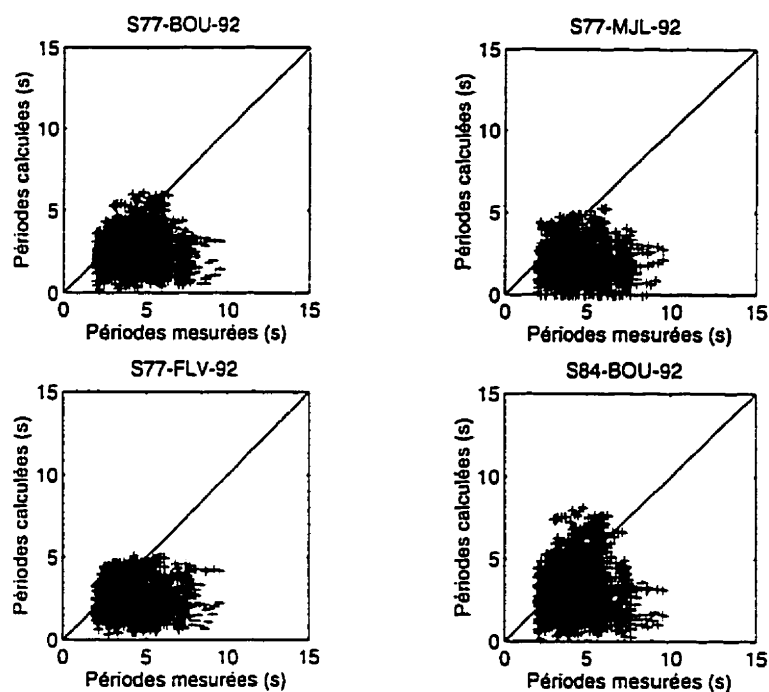
(1) Racine de l'erreur quadratique moyenne.

(2) Racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée ($\varepsilon_n = \varepsilon / \bar{T}_{p,mes}$).

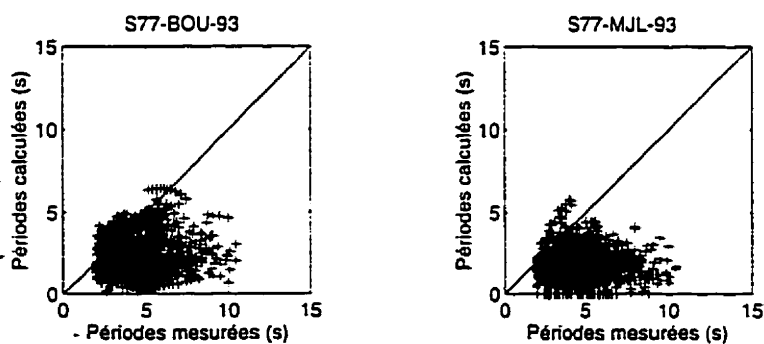


a) Année 1991 (n=2134)

Figure 4.24 - Comparaison des périodes mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV



b) Année 1992 (n=1890)



c) Année 1993 (n=1306)

Figure 4.24 - Comparaison des périodes mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV (suite)

e) *Directions à la bouée ULAV*

Les tableaux 4.24, 4.25 et 4.26 présentent les statistiques de l'écart entre les directions de propagation des vagues (θ) calculées et celles mesurées. Les écarts sont analysés en considérant toutes les vagues, puis en comparant seulement les vagues mesurées de 0,5 m et plus avec les vagues calculées au même moment. Ils sont aussi analysés en considérant les vagues de toutes directions, ainsi qu'en les regroupant en quatre quadrants de 90° chacun. La méthode utilisée pour l'analyse est décrite à la section 4.5.3e.

Dans l'ensemble, le fait de ne considérer que les vagues mesurées de 0,5 m et plus diminue l'erreur quadratique moyenne sur les directions (ϵ_θ) de façon importante. Pour l'année 1991, quand la bouée était située au large de Sainte-Flavie, le tableau 4.24b indique que l'erreur ϵ_θ obtenue pour les deux simulations est de 49° et 45° respectivement, si on ne considère que les vagues de 0,5 m et plus, et que l'erreur quadratique la plus faible est observée pour le quadrant III. En 1992, pendant que la bouée était au large de Mont-Louis, l'erreur ϵ_θ pour les vagues de 0,5 m et plus est de 69° pour la simulation S77-MJL-92, tandis qu'elle est approximativement de 57° pour les autres simulations (tableau 4.25b). Comme en 1991, le quadrant présentant la plus faible erreur quadratique est le quadrant III. On observe également que, pour les vagues de 0,5 m et plus, l'écart moyen ($\Delta\bar{\theta}$) est positif pour le quadrant I et négatif pour les quadrants III et IV, comme en 1991. Pour les vagues de 0,5 m et plus en 1993 (tableau 4.26b), l'erreur ϵ_θ est de 81° et 62° respectivement pour les deux simulations, ce qui constitue une erreur supérieure à celle de 1992, même si la bouée était située au même endroit. Quant à l'écart moyen, il est négatif pour les trois quadrants.

Tableau 4.24 - Statistiques de l'écart entre les directions mesurées et celles calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV en 1991

a) Toutes les vagues (degrés)

Simulation	Quadrant I (n=640)			Quadrant II (n=50)			Quadrant III (n=1055)			Quadrant IV (n=389)			Toutes directions (n=2134)		
	$\Delta\bar{\theta}$ (1)	s_{θ} (2)	ε_{θ} (3)	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}
S77-MJL	98,2	110,0	147,5	6,7	47,2	47,6	-24,9	44,2	50,7	-63,1	80,1	101,9	-24,1	76,6	80,2
S77-BOU	173,4	118,8	210,2	-25,7	66,5	71,3	-18,7	51,8	55,1	-58,3	73,0	93,4	-28,0	80,4	85,1

b) Vagues mesurées de 0,5 m et plus (degrés)

Simulation	Quadrant I (n=154)			Quadrant II (n=0)			Quadrant III (n=333)			Quadrant IV (n=82)			Toutes directions (n=569)		
	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}
S77-MJL	33,0	74,3	81,3	-	-	-	-18,3	27,5	33,1	-26,2	38,2	46,3	-12,3	47,2	48,7
S77-BOU	22,4	62,5	66,4	-	-	-	-18,2	28,9	34,1	-29,2	36,4	46,6	-12,5	43,6	45,4

(1) Moyenne des écarts

(2) Écart-type des écarts

(3) Erreur quadratique moyenne

Tableau 4.25 - Statistiques de l'écart entre les directions mesurées et celles calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV en 1992

a) Toutes les vagues (degrés)

Simulation	Quadrant I (n=1049)			Quadrant II (n=75)			Quadrant III (n=514)			Quadrant IV (n=252)			Toutes directions (n=1890)		
	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}
S77-MJL	64,6	109,1	126,8	31,4	40,9	51,6	-41,4	32,0	52,3	-70,1	86,7	111,5	-20,7	92,5	94,8
S77-BOU	20,5	81,7	84,2	21,6	62,2	65,8	-43,6	23,4	49,5	-69,2	67,4	96,6	-20,7	73,2	76,1
S77-FLV	72,1	83,8	110,5	21,5	34,1	40,3	-26,8	34,3	43,5	-83,6	63,3	104,9	3,7	88,8	88,8
S84-BOU	20,0	81,6	84,0	24,1	61,3	65,8	-43,8	23,3	49,6	-69,8	67,7	97,3	-20,9	73,2	76,1

b) Vagues mesurées de 0,5 m et plus (degrés)

Simulation	Quadrant I (n=386)			Quadrant II (n=6)			Quadrant III (n=246)			Quadrant IV (n=72)			Toutes directions (n=710)		
	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}
S77-MJL	14,2	82,4	83,6	2,0	48,4	48,4	-35,1	23,4	42,2	-43,5	71,3	83,5	-19,0	65,9	68,6
S77-BOU	12,8	61,9	63,2	-56,3	16,2	58,6	-39,8	16,1	42,9	-44,7	39,6	59,8	-18,8	53,4	56,6
S77-FLV	35,4	68,5	77,2	8,2	23,8	25,2	-15,3	19,0	24,4	-53,3	37,3	65,0	0,3	58,9	58,9
S84-BOU	13,3	62,5	63,9	-56,3	16,2	58,6	-40,3	15,8	43,3	-44,0	39,4	59,1	-19,0	53,8	57,1

Tableau 4.26 - Statistiques de l'écart entre les directions mesurées et celles calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV en 1993

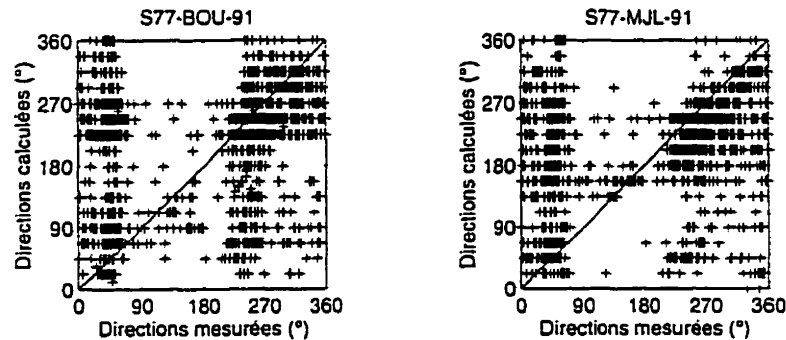
a) Toutes les vagues (degrés)

Simulation	Quadrant I (n=922)			Quadrant II (n=52)			Quadrant III (n=204)			Quadrant IV (n=128)			Toutes directions (n=1306)		
	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}
S77-MJL	23,1	116,2	118,5	-11,0	43,9	45,3	-53,8	47,3	71,6	-102,1	115,0	153,8	-22,6	104,5	106,9
S77-BOU	15,2	78,8	80,2	-12,9	57,6	59,0	-38,1	37,8	53,7	-79,3	90,4	120,3	-5,6	78,2	78,4

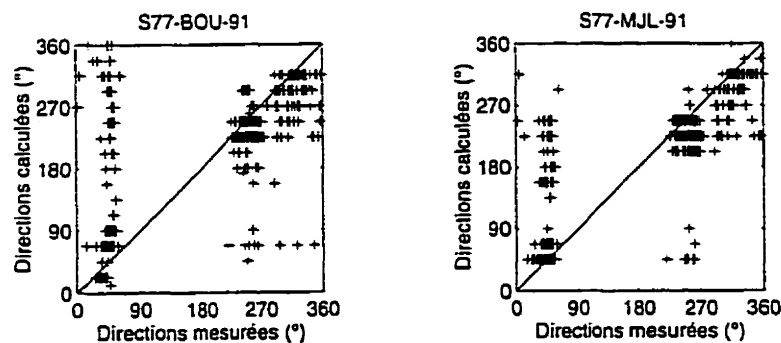
b) Vagues mesurées de 0,5 m et plus (degrés)

Simulation	Quadrant I (n=318)			Quadrant II (n=0)			Quadrant III (n=67)			Quadrant IV (n=1)			Toutes directions (n=406)		
	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}	$\Delta\bar{\theta}$	s_{θ}	ε_{θ}
S77-MJL	-14,0	85,7	86,9	-	-	-	-39,2	13,3	41,4	-121,4	109,7	163,6	-24,8	77,0	80,9
S77-BOU	-3,9	66,1	66,2	-	-	-	-36,8	18,5	41,2	-38,1	41,6	56,4	-14,6	60,1	61,8

Les résultats présentés dans les figures 4.25, 4.26 et 4.27 illustrent le fait que les directions de vagues calculées par les modèles 1D sont regroupées selon 16 secteurs de la rose des vents. Lorsque toutes les vagues sont considérées, on constate une grande dispersion des résultats. Les diagrammes montrant seulement les vagues de 0,5 m et plus révèlent que les vagues mesurées en 1993 sont plus concentrées selon les deux directions principales (quadrants I et III) que celles mesurées au cours des deux autres années. On constate aussi qu'en général, les directions calculées correspondant aux directions mesurées des secteurs nord-est à est sont plus dispersées que celles correspondant aux directions mesurées des secteurs sud-ouest à nord-ouest.

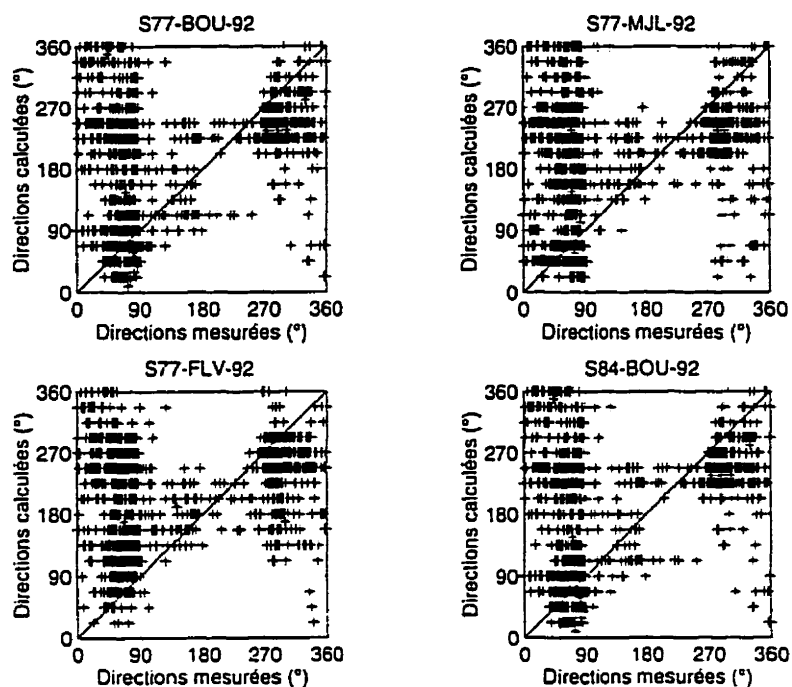


a) Toutes les vagues (n=2134)

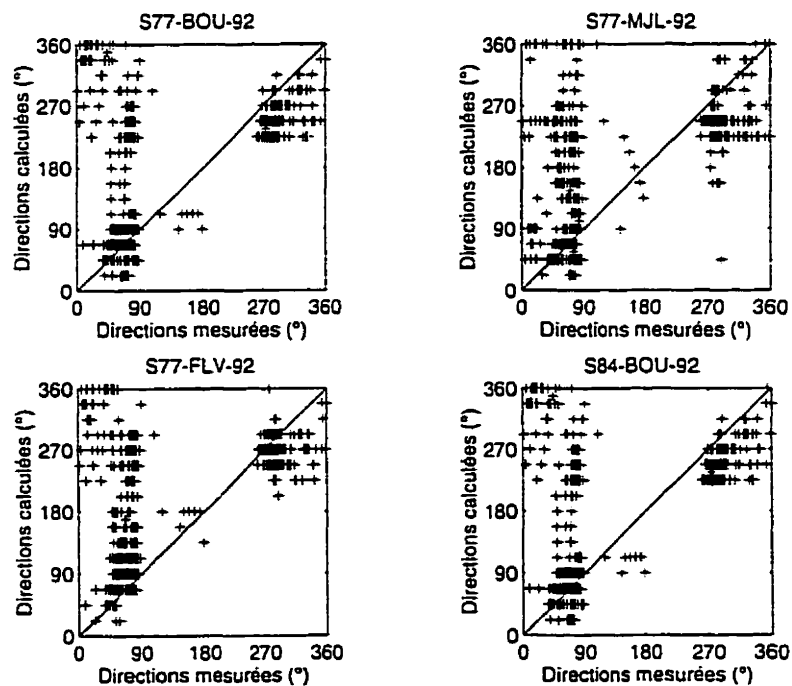


b) Vagues mesurées de 0,5 m et plus (n=569)

Figure 4.25 - Comparaison des directions mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV en 1991



a) Toutes les vagues (n=1890)



b) Vagues mesurées de 0,5 m et plus (n=710)

Figure 4.26 - Comparaison des directions mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV en 1992

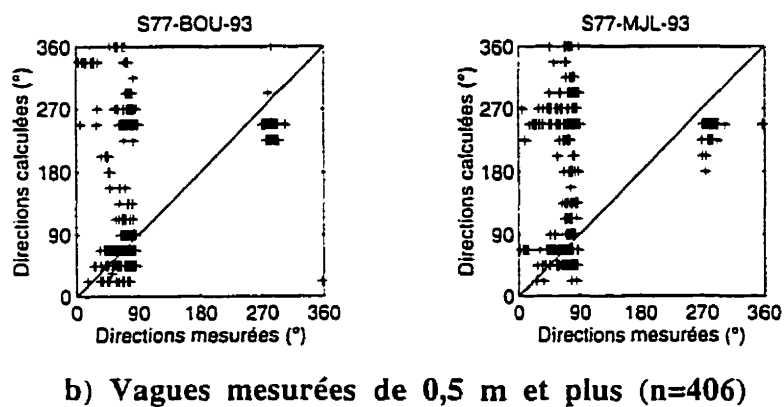
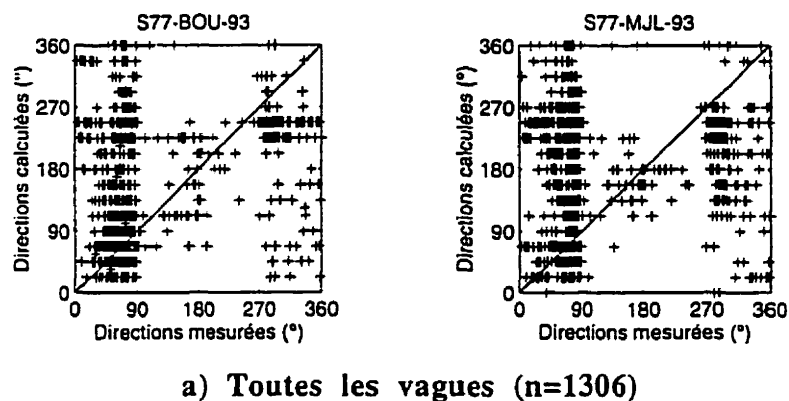


Figure 4.27 - Comparaison des directions mesurées et calculées par les modèles 1D à la bouée ULAV en 1993

4.7 Comparaison des climats de vagues

Dans les sections 4.5 et 4.6, les prévisions de vagues ont été comparées aux vagues mesurées en utilisant principalement la racine de l'erreur quadratique moyenne (ϵ) et le coefficient de corrélation (r). Ces statistiques permettent de comparer une à une les valeurs horaires calculées à celles mesurées. Cette section-ci vise plutôt à comparer les climats de vagues estimés par les modèles numériques avec ceux mesurés à l'emplacement des bouées. Toutes les données disponibles à un site sont regroupées afin de constituer les périodes de comparaison les plus longues possibles. Les climats de vagues sont donc analysés aux trois points suivants (cf. figure 4.1):

- à la bouée ENVC, pour les années 1991, 1992 et 1993⁹ ;
- à la bouée ULAV au large de Mont-Louis, pour les années 1992 et 1993;
- à la bouée ULAV au large de Sainte-Flavie, pour l'année 1991.

Les résultats de quatre simulations sont comparés, soit deux simulations effectuées avec le modèle bidimensionnel WAWSP (W08-TER et W08-BOU) et deux avec le modèle unidimensionnel SPM-77 (S77-MJL et S77-BOU).

4.7.1 Bouée ENVC

Les graphiques de la figure 4.28 présentent les courbes de fréquences des hauteurs significatives (H_s) mesurées et calculées. Les valeurs de H_s étant représentées sur une échelle log-probabilité normale, elles doivent former une droite si la variable H_s est distribuée selon une loi lognormale. On constate que les hauteurs mesurées à la bouée s'alignent sur une droite pour les fréquences cumulées inférieures à 90 %. Pour le 10 % de vagues supérieures à 1,5 m, les valeurs mesurées sont inférieures à celles attendues dans une distribution lognormale. Quant aux vagues calculées par les modèles numériques, les graphiques montrent que les hauteurs obtenues avec les données de vent de la bouée de Mont-Louis (W08-BOU et S77-BOU) sont celles se rapprochant le plus de la distribution des vagues mesurées. Il apparaît que les fréquences des faibles valeurs de H_s sont mieux estimées par le modèle W08-BOU, et celles des valeurs élevées, par le modèle S77-BOU.

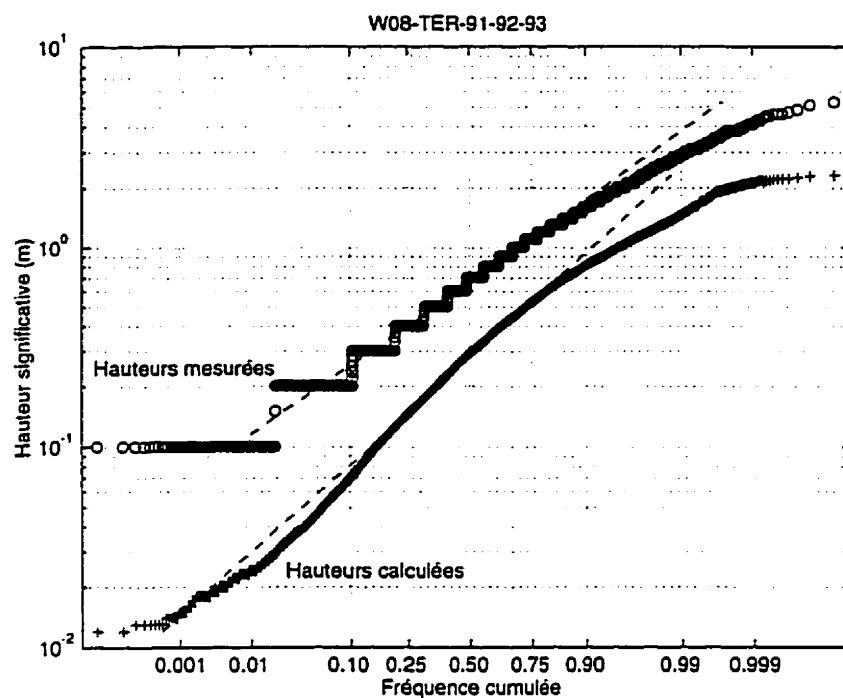
⁹ Les périodes couvertes varient d'une année à l'autre et d'un site à l'autre (cf. tableau 4.6).

Les statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées sont d'abord comparées en considérant toutes les vagues, peu importe leur direction. Le tableau 4.27a montre que les simulations W08-BOU et S77-BOU fournissent la même estimation de la hauteur moyenne des vagues, soit 0,71 m, ce qui représente un écart moyen de -13 % par rapport aux hauteurs significatives mesurées. Les deux autres simulations (W08-TER et S77-MJL), effectuées avec des stations de vent terrestres, sous-estiment davantage les hauteurs de vagues, la première de 54 % et la seconde de 40 %.

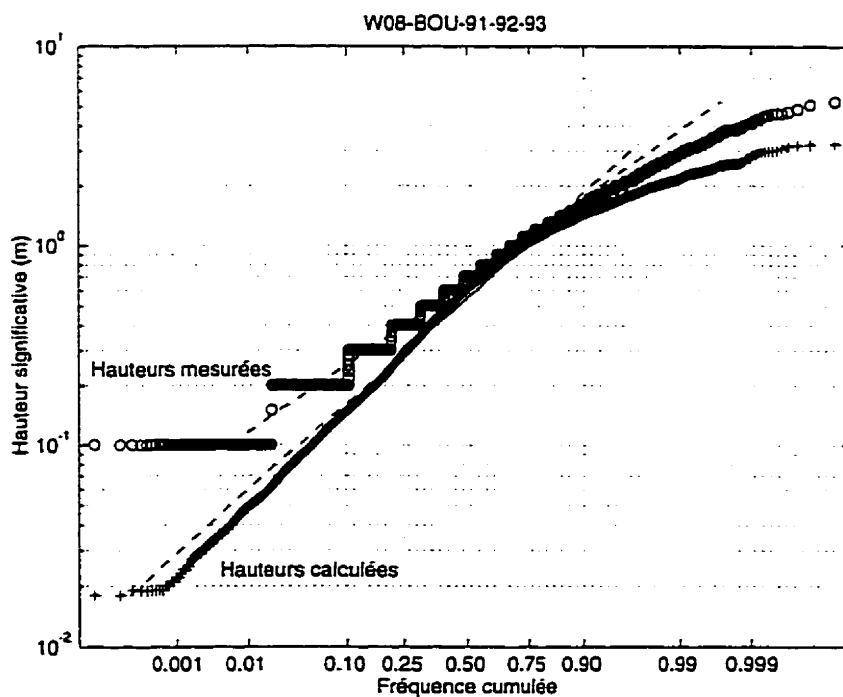
Les hauteurs significatives sont aussi analysées en considérant seulement les vagues appartenant aux deux quadrants associés aux directions dominantes, soit le quadrant I, qui comprend les vagues provenant des secteurs NE, ENE, E et ESE, et le quadrant III, les vagues des secteurs SW, WSW, W et WNW (cf. figure A.1). Comme la bouée ENVC ne permettait pas d'enregistrer la direction des vagues, les tableaux 4.27b et 4.27c ne donnent que les statistiques provenant des modèles numériques. Pour les quatre simulations, le nombre de vagues (n) associé à chaque quadrant montre que les vagues les plus fréquentes proviennent du quadrant III. Les modèles prédisent aussi des hauteurs significatives moyennes plus élevées pour le quadrant III que pour le quadrant I, à l'exception de la simulation W08-TER, où les deux valeurs sont presque égales. Les hauteurs de vagues des quadrants I et III suivent les mêmes tendances que l'ensemble des vagues. Par exemple, les hauteurs significatives moyennes correspondant aux simulations W08-BOU et S77-BOU sont plus élevées que celles des deux autres simulations. De plus, pour le quadrant III, le tableau 4.27c montre que la simulation S77-BOU donne des fréquences plus élevées pour les classes supérieures de H_s que la simulation W08-BOU. Par contre, les deux simulations conduisent à des fréquences très semblables dans le cas du quadrant I.

La distribution des directions de vagues selon 16 secteurs (figure 4.29) montre que les quatre simulations donnent la direction WSW comme dominante, ce qui est cohérent avec les données de vent. Toutefois, la seule simulation effectuée avec un champ de vent non uniforme (W08-TER) laisse voir l'influence de la station de Sept-Îles puisqu'elle comporte une direction E aussi fréquente que la direction WSW. La distribution des directions est très semblable pour les deux simulations effectuées avec les données de vent de la bouée de Mont-Louis (W08-BOU et S77-BOU), sauf que les directions de la première sont plus concentrées dans le secteur WSW. Quant aux hauteurs significatives moyennes par direction, on observe davantage de différences entre les données de vent utilisées pour les simulations qu'entre les modèles numériques. En général, les hauteurs moyennes élevées correspondent aux directions les plus fréquentes.

Pour l'analyse des périodes de pointe (T_p), les enregistrements de vagues à la bouée ENVC ayant une période de 15 s et plus ont été éliminés (cf. section 4.3), de même que les résultats correspondants dans les fichiers de vagues calculées par les modèles numériques. Si on considère l'ensemble des vagues, le tableau 4.28a montre que c'est la simulation W08-BOU qui conduit aux meilleurs estimations de T_p . Toutefois, cette estimation est inférieure de 43 % en moyenne aux valeurs mesurées. Les statistiques des quadrants I et III ne permettent pas de comparer les valeurs calculées de T_p à celles mesurées, mais on constate également que les estimations les plus élevées sont fournies par la simulation W08-BOU.

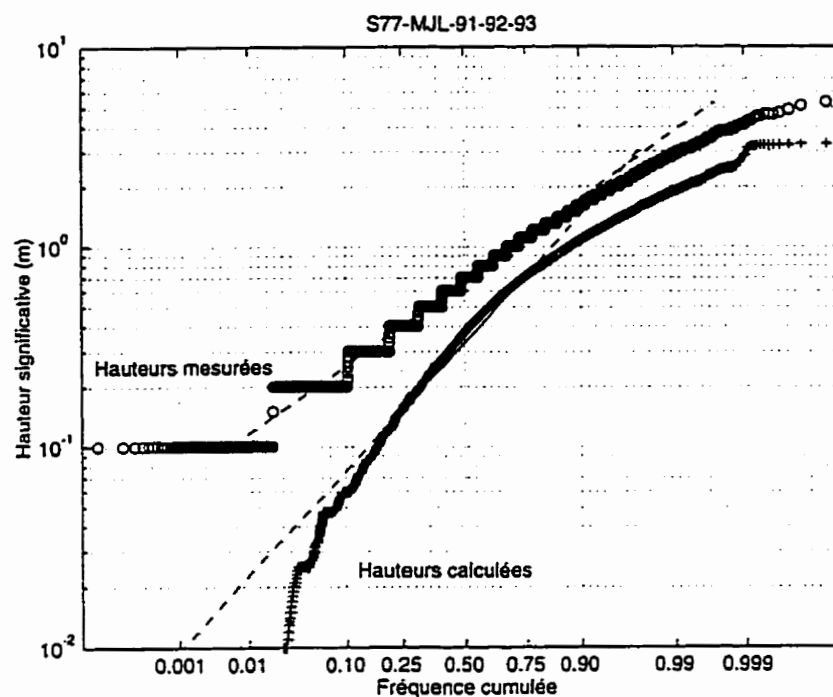


a) Simulation W08-TER

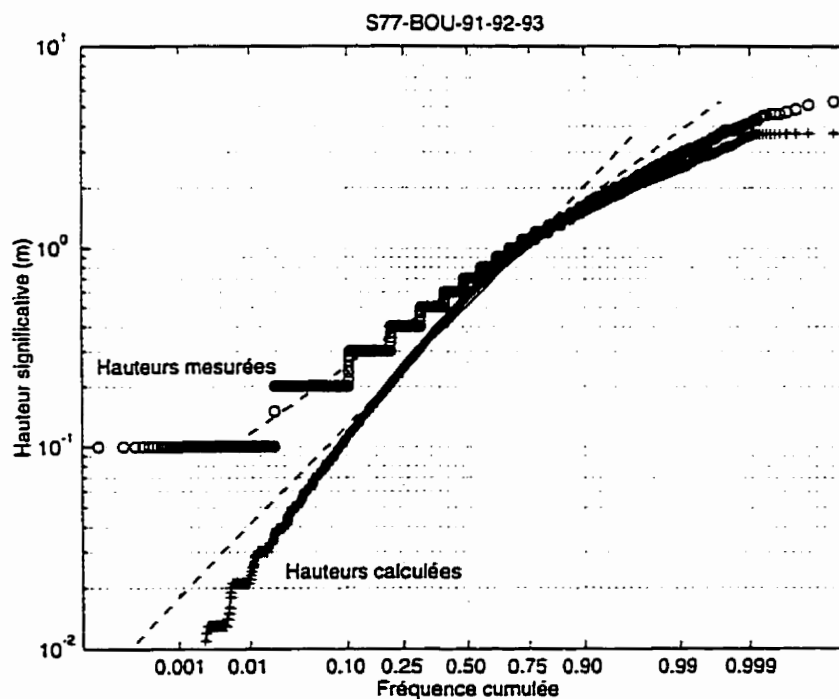


b) Simulation W08-BOU

Figure 4.28 - Courbes de fréquences des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ENVC en 1991, 1992 et 1993



c) Simulation S77-MJL



d) Simulation S77-BOU

Figure 4.28 - Courbes de fréquences des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ENVC en 1991, 1992 et 1993 (suite)

Tableau 4.27 - Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ENVC en 1991, 1992 et 1993

a) Toutes directions

	Bouée ENVC n = 14064 $\bar{H}_S = 0,82$ m		W08-TER n = 14064 $\bar{H}_S = 0,38$ m		W08-BOU n = 14064 $\bar{H}_S = 0,71$ m		S77-MJL n = 14064 $\bar{H}_S = 0,49$ m		S77-BOU n = 14064 $\bar{H}_S = 0,71$ m	
H_S (m)	f (1)	fc (2)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 0,20	10,3	10,3	36,1	36,1	16,4	16,4	31,9	31,9	20,5	20,5
0,20 - 0,40	20,5	30,8	27,5	63,5	18,3	34,7	20,7	52,6	18,0	38,5
0,40 - 0,60	17,7	48,5	16,7	80,2	15,2	49,9	15,5	68,1	13,5	52,1
0,60 - 0,80	13,8	62,4	9,6	89,8	12,8	62,6	12,2	80,2	11,9	63,9
0,80 - 1,00	10,1	72,4	5,2	95,0	10,7	73,4	7,9	88,1	8,9	72,8
1,00 - 1,20	8,8	81,2	2,6	97,6	9,3	82,7	4,9	93,0	7,4	80,3
1,20 - 1,40	6,0	87,2	1,2	98,8	6,5	89,2	3,0	95,9	6,4	86,7
1,40 - 1,60	3,7	91,0	0,5	99,3	4,7	93,9	1,7	97,6	4,9	91,6
1,60 - 1,80	2,7	93,6	0,3	99,6	2,7	96,6	1,1	98,7	2,9	94,5
1,80 - 2,00	2,1	95,8	0,2	99,8	1,6	98,2	0,6	99,3	2,0	96,5
2,00 - 2,20	1,3	97,0	0,1	99,9	1,0	99,1	0,3	99,6	1,3	97,9
2,20 - 2,40	0,8	97,8	0,1	100,0	0,5	99,6	0,1	99,8	0,9	98,8
2,40 - 2,60	0,7	98,5	0,0	100,0	0,2	99,9	0,1	99,9	0,5	99,2
2,60 - 2,80	0,4	98,9	0,0	100,0	0,1	99,9	0,0	99,9	0,2	99,5
2,80 - 3,00	0,3	99,2	0,0	100,0	0,1	100,0	0,0	99,9	0,2	99,7
3,00 - 3,20	0,3	99,5	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	99,9	0,1	99,8
3,20 - 3,40	0,1	99,6	0,0	100,0	0,0	100,0	0,1	100,0	0,1	99,9
3,40 - 3,60	0,1	99,7	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,1	99,9
3,60 - 3,80	0,1	99,8	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,1	100,0
3,80 - 4,00	0,0	99,9	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
> 4,00	0,1	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

(1) Fréquence (%)

(2) Fréquence cumulée (%)

Tableau 4.27 - Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ENVC en 1991, 1992 et 1993 (suite)

b) Quadrant I

	W08-TER n = 4665 $\bar{H}_S = 0,42$ m		W08-BOU n = 4282 $\bar{H}_S = 0,64$ m		S77-MJL n = 2627 $\bar{H}_S = 0,46$ m		S77-BOU n = 4082 $\bar{H}_S = 0,64$ m	
H_S (m)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 0,20	34,8	34,8	19,1	19,1	35,3	35,3	22,9	22,9
0,20 - 0,40	24,5	59,3	23,5	42,5	23,6	58,9	21,5	44,4
0,40 - 0,60	16,0	75,4	16,1	58,6	14,5	73,4	13,4	57,8
0,60 - 0,80	9,9	85,3	10,5	69,1	9,9	83,3	9,9	67,7
0,80 - 1,00	7,2	92,5	8,4	77,5	6,2	89,5	7,5	75,2
1,00 - 1,20	3,5	96,0	7,9	85,4	3,5	93,1	8,1	83,3
1,20 - 1,40	1,8	97,8	5,8	91,2	2,3	95,3	6,5	89,8
1,40 - 1,60	0,9	98,7	4,2	95,4	1,7	97,0	4,0	93,9
1,60 - 1,80	0,7	99,4	1,5	96,9	1,3	98,3	2,9	96,8
1,80 - 2,00	0,4	99,9	1,0	97,9	0,7	99,0	1,5	98,3
2,00 - 2,20	0,1	100,0	1,1	99,0	0,2	99,1	0,8	99,1
2,20 - 2,40	0,0	100,0	0,8	99,8	0,1	99,2	0,6	99,7
2,40 - 2,60	0,0	100,0	0,2	100,0	0,1	99,3	0,3	100,0
2,60 - 2,80	0,0	100,0	0,0	100,0	0,1	99,4	0,0	100,0
2,80 - 3,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,1	99,5	0,0	100,0
3,00 - 3,20	0,0	100,0	0,0	100,0	0,2	99,7	0,0	100,0
3,20 - 3,40	0,0	100,0	0,0	100,0	0,3	100,0	0,0	100,0
3,40 - 3,60	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
3,60 - 3,80	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
3,80 - 4,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
> 4,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

Tableau 4.27 - Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ENVC en 1991, 1992 et 1993 (suite)

c) Quadrant III

	W08-TER n = 5035 $\bar{H}_S = 0,40$ m		W08-BOU n = 7404 $\bar{H}_S = 0,85$ m		S77-MJL n = 6610 $\bar{H}_S = 0,58$ m		S77-BOU n = 7225 $\bar{H}_S = 0,87$ m	
H_S (m)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 0,20	25,6	25,6	7,4	7,4	22,2	22,2	11,0	11,0
0,20 - 0,40	32,4	57,9	13,4	20,8	20,3	42,5	14,0	25,0
0,40 - 0,60	21,7	79,6	14,9	35,7	17,3	59,8	13,8	38,9
0,60 - 0,80	12,0	91,7	15,7	51,3	14,4	74,2	14,6	53,4
0,80 - 1,00	4,5	96,2	13,9	65,3	9,4	83,6	11,7	65,1
1,00 - 1,20	2,4	98,6	12,1	77,4	6,5	90,0	8,5	73,6
1,20 - 1,40	0,8	99,4	8,3	85,7	4,3	94,3	7,9	81,4
1,40 - 1,60	0,1	99,5	6,0	91,7	2,4	96,8	6,2	87,6
1,60 - 1,80	0,1	99,6	3,8	95,5	1,4	98,2	3,9	91,6
1,80 - 2,00	0,1	99,7	2,3	97,7	0,8	99,0	2,9	94,5
2,00 - 2,20	0,2	99,9	1,1	98,9	0,6	99,6	2,0	96,5
2,20 - 2,40	0,1	100,0	0,5	99,4	0,2	99,8	1,3	97,8
2,40 - 2,60	0,0	100,0	0,4	99,7	0,2	100,0	0,8	98,5
2,60 - 2,80	0,0	100,0	0,1	99,8	0,0	100,0	0,4	99,0
2,80 - 3,00	0,0	100,0	0,1	99,9	0,0	100,0	0,5	99,4
3,00 - 3,20	0,0	100,0	0,1	100,0	0,0	100,0	0,2	99,7
3,20 - 3,40	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,1	99,8
3,40 - 3,60	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,1	99,8
3,60 - 3,80	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,2	100,0
3,80 - 4,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
> 4,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

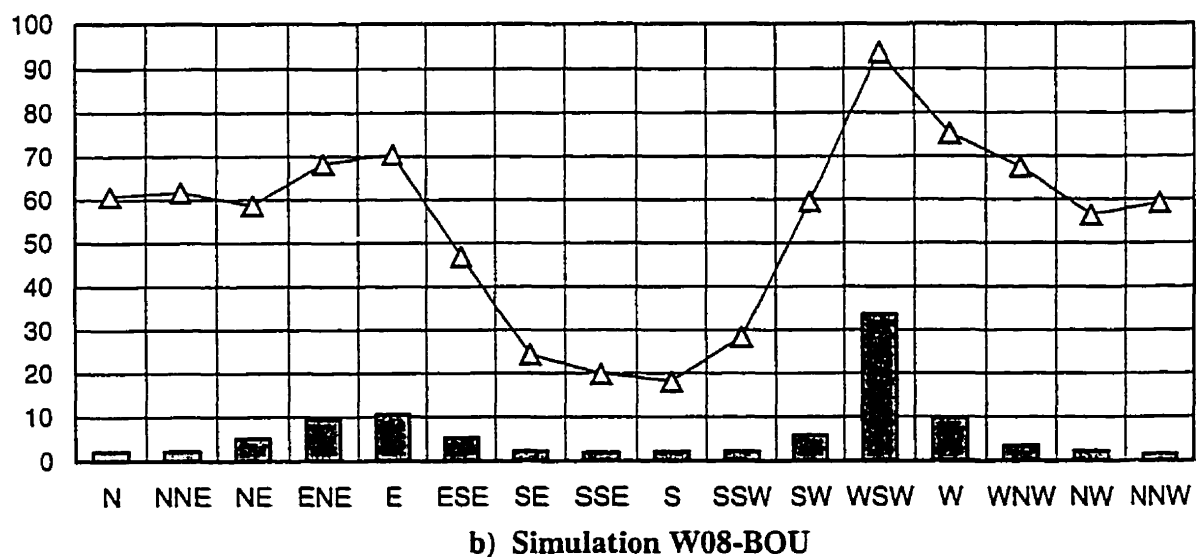
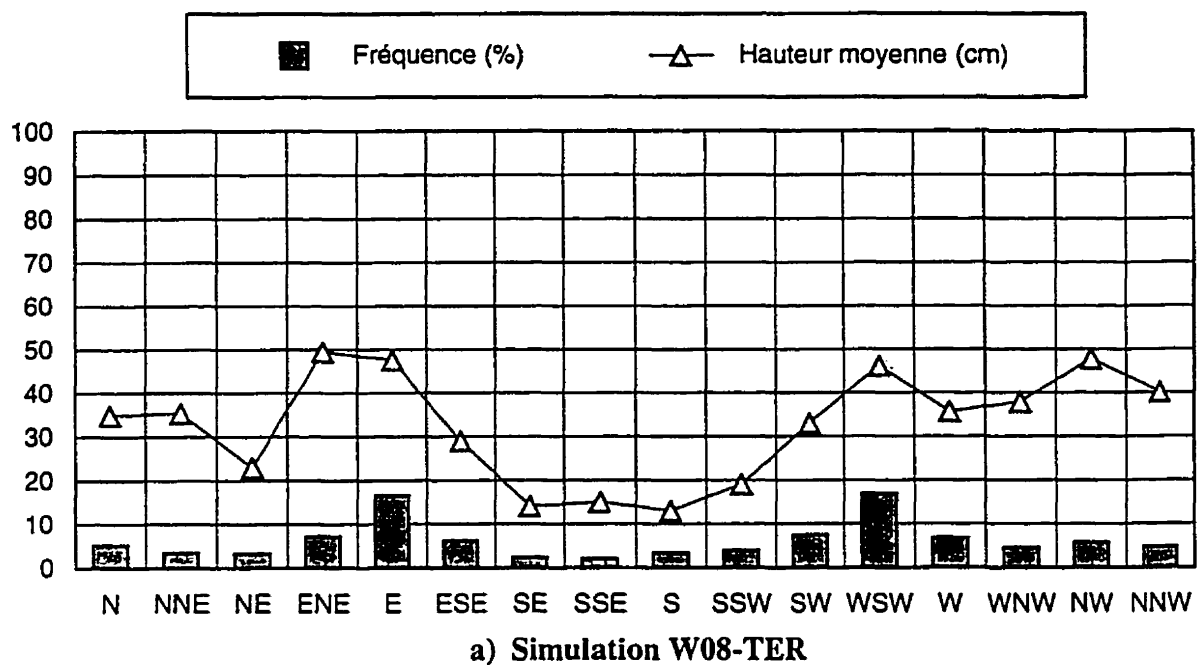
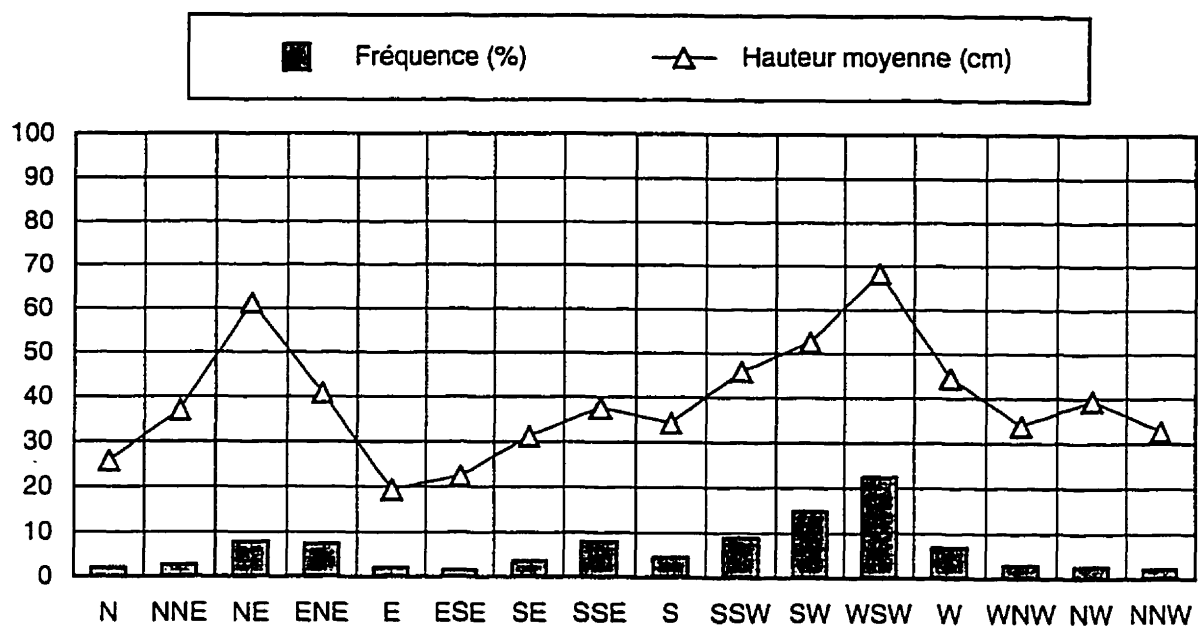
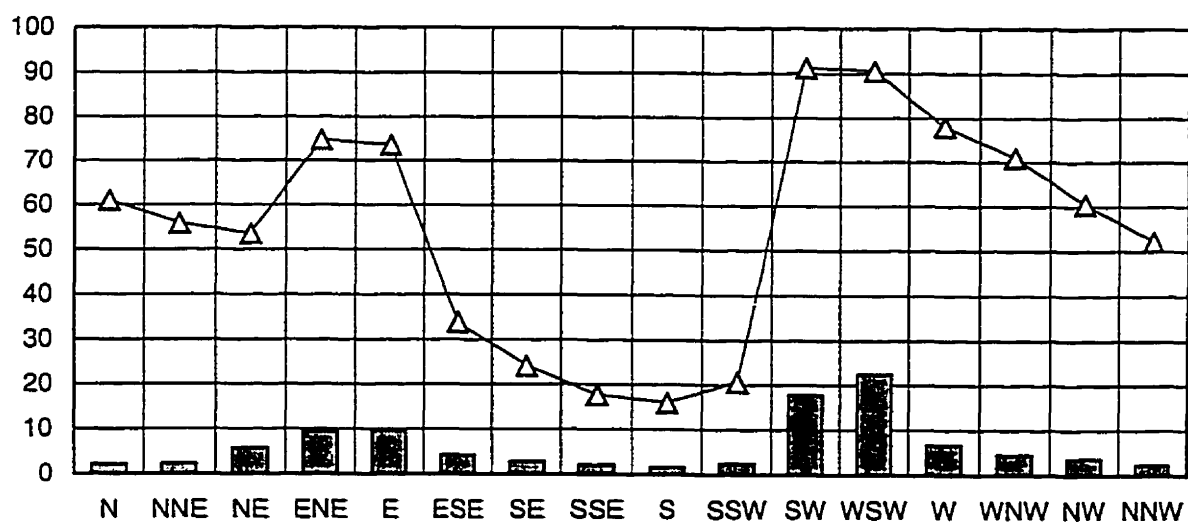


Figure 4.29 - Distributions des directions de vagues calculées à la bouée ENVC en 1991, 1992 et 1993, et hauteurs significatives moyennes par direction



c) Simulation S77-MJL



d) Simulation S77-BOU

Figure 4.29 - Distributions des directions de vagues calculées à la bouée ENVC en 1991, 1992 et 1993, et hauteurs significatives moyennes par direction (suite)

Tableau 4.28 - Statistiques des périodes mesurées et calculées à la bouée ENVC en 1991, 1992 et 1993

a) Toutes directions

	Bouée ENVC n = 11396 $\bar{T}_p = 5,96$ s		W08-TER n = 11396 $\bar{T}_p = 2,57$ s		W08-BOU n = 11396 $\bar{T}_p = 3,41$ s		S77-MJL n = 11396 $\bar{T}_p = 2,43$ s		S77-BOU n = 11396 $\bar{T}_p = 2,95$ s	
T_p (s)	f (1)	fc (2)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 1,00	0,0	0,0	6,8	6,8	1,8	1,8	14,5	14,5	7,8	7,8
1,00 - 2,00	0,0	0,0	28,2	35,0	18,0	19,8	26,1	40,5	24,6	32,4
2,00 - 3,00	0,3	0,3	30,5	65,5	21,1	40,9	26,7	67,2	22,0	54,4
3,00 - 4,00	6,3	6,7	23,4	88,9	20,6	61,5	20,8	88,0	18,7	73,0
4,00 - 5,00	29,4	36,0	9,1	98,0	25,3	86,7	9,1	97,1	17,4	90,5
5,00 - 6,00	30,5	66,5	1,8	99,8	11,6	98,3	2,5	99,6	7,5	97,9
6,00 - 7,00	13,4	79,9	0,2	100,0	1,6	100,0	0,3	99,9	1,7	99,7
7,00 - 8,00	6,9	86,8	0,0	100,0	0,1	100,0	0,1	100,0	0,3	100,0
8,00 - 9,00	4,9	91,7	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
9,00 - 10,00	3,7	95,4	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
10,00 - 11,00	2,3	97,7	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
11,00 - 12,00	1,3	99,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
12,00 - 13,00	0,6	99,5	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
13,00 - 14,00	0,3	99,8	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
14,00 - 15,00	0,2	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

(1) Fréquence (%)

(2) Fréquence cumulée (%)

b) Quadrant I

	W08-TER n = 4027 $\bar{T}_p = 2,67$ s		W08-BOU n = 3626 $\bar{T}_p = 3,25$ s		S77-MJL n = 2104 $\bar{T}_p = 2,26$ s		S77-BOU n = 3470 $\bar{T}_p = 2,78$ s	
T_p (s)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 1,00	6,2	6,2	1,8	1,8	16,4	16,4	8,0	8,0
1,00 - 2,00	26,7	32,8	20,3	22,0	31,4	47,7	27,6	35,5
2,00 - 3,00	30,1	62,9	26,4	48,5	27,4	75,1	23,5	59,0
3,00 - 4,00	22,9	85,8	19,5	68,0	14,3	89,4	17,6	76,6
4,00 - 5,00	11,1	96,9	19,8	87,7	7,1	96,5	16,3	92,9
5,00 - 6,00	2,9	99,8	9,9	97,6	2,5	99,1	6,2	99,2
6,00 - 7,00	0,2	100,0	2,3	100,0	0,3	99,4	0,8	100,0
7,00 - 8,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,6	100,0	0,0	100,0
> 8,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

Tableau 4.28 - Statistiques des périodes mesurées et calculées à la bouée ENVC en 1991, 1992 et 1993 (suite)

c) Quadrant III

	W08-TER n = 4094 $\bar{T}_p = 2,76 \text{ s}$		W08-BOU n = 5770 $\bar{T}_p = 3,85 \text{ s}$		S77-MJL n = 5505 $\bar{T}_p = 2,72 \text{ s}$		S77-BOU n = 5712 $\bar{T}_p = 3,38 \text{ s}$	
$T_p \text{ (s)}$	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 1,00	3,6	3,6	0,9	0,9	9,2	9,2	4,3	4,3
1,00 - 2,00	19,1	22,7	8,5	9,3	21,2	30,4	16,1	20,5
2,00 - 3,00	36,3	59,0	16,0	25,3	28,6	58,9	21,5	42,0
3,00 - 4,00	31,2	90,1	23,2	48,5	25,0	83,9	22,4	64,4
4,00 - 5,00	8,6	98,8	34,2	82,7	12,1	96,0	21,8	86,1
5,00 - 6,00	1,1	99,9	15,6	98,2	3,5	99,5	10,4	96,5
6,00 - 7,00	0,1	100,0	1,7	99,9	0,5	100,0	2,9	99,4
7,00 - 8,00	0,0	100,0	0,1	100,0	0,0	100,0	0,7	100,0
> 8,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

4.7.2 Bouée ULAV au large de Mont-Louis (ULAV-92-93)

Pour l'analyse du climat des vagues, les données manquantes dans les enregistrements à la bouée ULAV (cf. section 4.3) en 1992 et 1993 ont été éliminées, de même que les résultats correspondants dans les fichiers de vagues calculées par les modèles numériques, ce qui réduit le nombre d'heures de comparaison à 3196 pour les deux années.

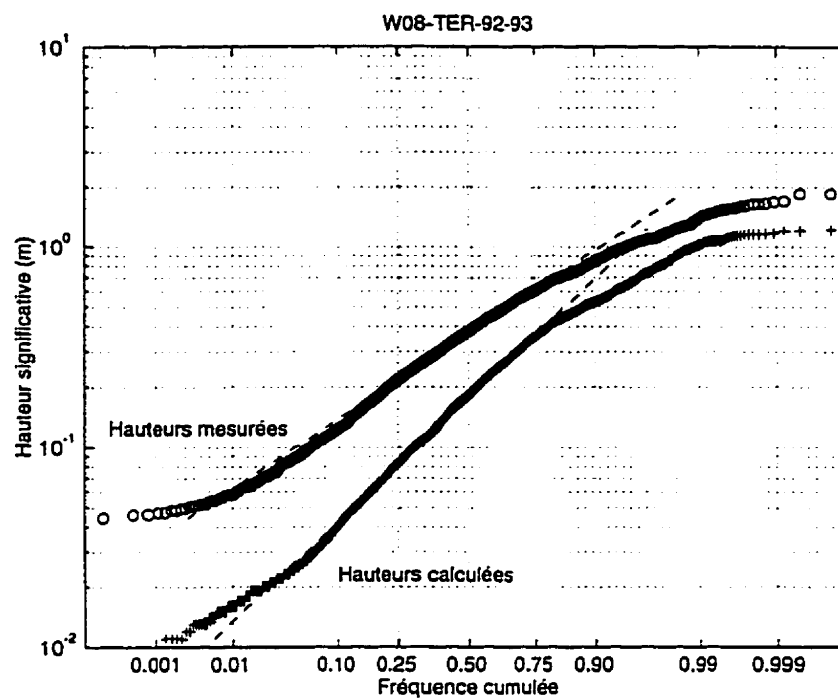
Les courbes de fréquences des hauteurs significatives (figure 4.30) montrent que les hauteurs mesurées s'écartent de la droite représentant une distribution lognormale pour le 20 % des valeurs de H_s supérieures à 0,7 m. On constate également que la distribution de H_s obtenue avec la simulation W08-BOU est celle se rapprochant le plus de la distribution des hauteurs mesurées. L'autre simulation utilisant le modèle WAWSP (W08-TER) sous-estime les hauteurs significatives, de même que la simulation S77-MJL, quoique dans une moindre mesure. Quant à la distribution obtenue avec la simulation S77-BOU, les fréquences des hauteurs inférieures à 0,3 m sont sous-évaluées, alors que celles des hauteurs supérieures sont surévaluées.

Le tableau 4.29a confirme que c'est la simulation W08-BOU qui fournit la meilleure estimation de la hauteur significative moyenne des vagues. Cette estimation est supérieure de 9 % à la valeur mesurée, tandis que la simulation S77-BOU surestime H_s de 23 % en moyenne. Les simulations effectuées avec des données de vent terrestres (W08-TER et S77-MJL) sous-estiment la hauteur significative moyenne de 43 % et 27 % respectivement.

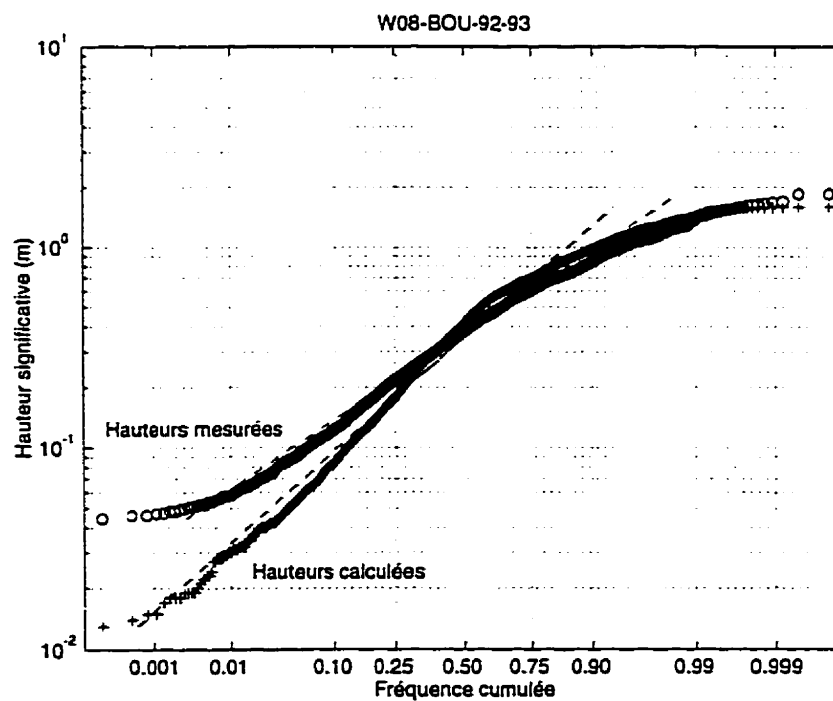
Si on ne considère que les vagues provenant des quadrants I et III (tableaux 4.29b et 4.29c), le nombre de vagues (n) mesurées à la bouée montre que la direction dominante correspond au quadrant I, tandis que toutes les simulations indiquent un plus grand nombre de vagues provenant du quadrant III. Pour le quadrant I, la simulation S77-MJL est celle fournissant la meilleure estimation de la hauteur significative moyenne, celle-ci étant inférieure de 9 % à la moyenne des hauteurs mesurées. Toutefois, il s'agit aussi de la simulation dont le nombre de vagues associées au quadrant I s'écarte le plus du nombre de vagues mesurées. Quant à la distribution de H_s , ce sont les simulations W08-BOU et S77-MJL qui l'estiment le mieux. Pour ce qui concerne le quadrant III, l'estimation la plus juste de la hauteur significative moyenne provient de la simulation S77-BOU, pour laquelle les hauteurs significatives sont supérieures de 10 % en moyenne aux hauteurs mesurées. Cette simulation est aussi celle fournissant la meilleure prévision de la distribution de H_s . Toutefois, toutes les simulations surévaluent le nombre de vagues provenant du quadrant III.

La distribution de la direction des vagues selon 16 secteurs (figure 4.31) confirme une différence importante entre les vagues mesurées et celles calculées. En effet, alors que les mesures effectuées à la bouée indiquent nettement que la direction dominante des vagues correspond au secteur ENE, les modèles numériques estiment plutôt que les vagues dominantes viennent du secteur W (W08-BOU) ou du secteur WSW (S77-MJL et S77-BOU), ou que les secteurs W et NE sont aussi fréquents l'un que l'autre pour la seule simulation qui utilise les données de vent de la station de Sept-Îles (W08-TER). Des différences importantes sont aussi observées du côté des hauteurs significatives moyennes par direction. Dans l'ensemble, c'est la simulation W08-BOU qui présente la courbe des hauteurs moyennes se rapprochant le plus de celle des mesures à la bouée. On note toutefois que, comme les autres simulations, elle sous-estime les hauteurs des vagues provenant des secteurs ESE à SSW.

Quant aux périodes de pointe de l'ensemble des vagues, le tableau 4.30a montre que c'est la simulation W08-BOU qui fournit la meilleure estimation de la période moyenne. Cette estimation reste toutefois inférieure de 41 % à la valeur mesurée. Pour le quadrant I, la meilleure estimation (S77-BOU) est inférieure de 49 % à la période mesurée. Quant au quadrant III, la simulation W08-BOU fournit une meilleure estimation de T_p puisque l'écart moyen entre les valeurs mesurées et celles calculées n'est que de -7 %. Toutefois, le nombre de vagues provenant du quadrant III obtenu avec cette simulation ($n = 1431$) est deux fois plus élevé que celui observé ($n = 718$).

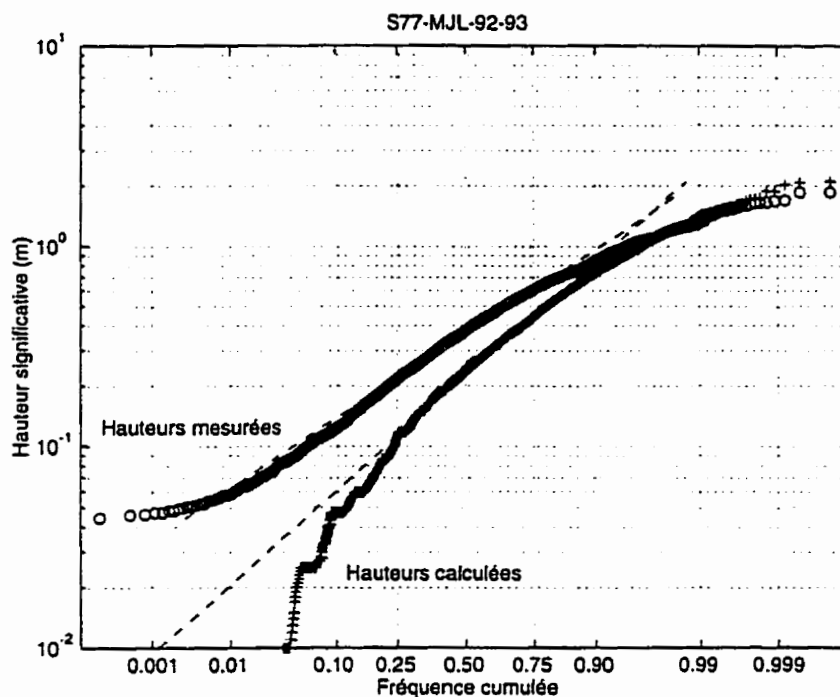


a) Simulation W08-TER

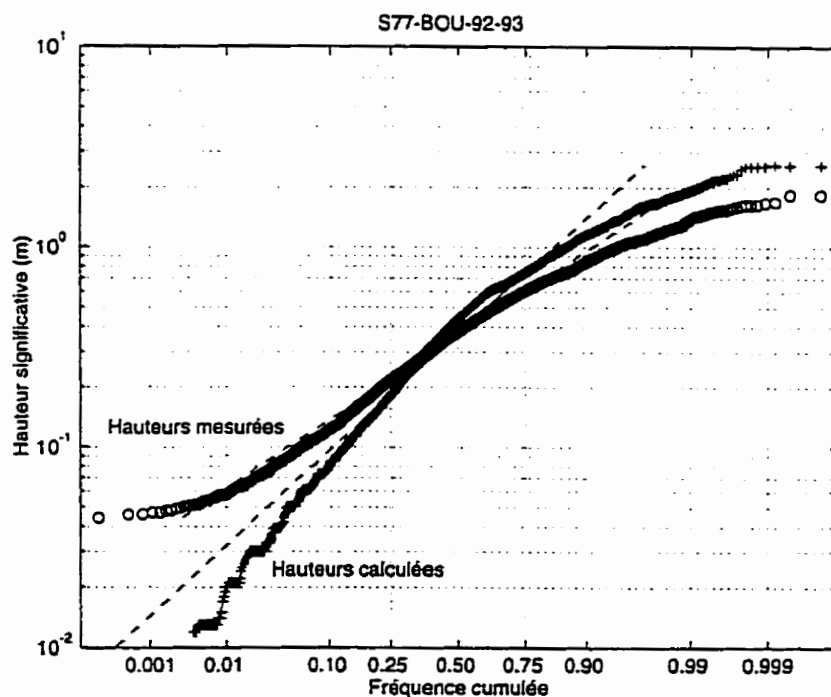


b) Simulation W08-BOU

Figure 4.30 - Courbes de fréquences des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1992 et 1993



c) Simulation S77-MJL



d) Simulation S77-BOU

Figure 4.30 - Courbes de fréquences des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1992 et 1993 (suite)

Tableau 4.29 - Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1992 et 1993

a) Toutes directions

	Bouée ULAV n = 3196 $\bar{H}_S = 0,44$ m		W08-TER n = 3196 $\bar{H}_S = 0,25$ m		W08-BOU n = 3196 $\bar{H}_S = 0,48$ m		S77-MJL n = 3196 $\bar{H}_S = 0,32$ m		S77-BOU n = 3196 $\bar{H}_S = 0,54$ m	
H_S (m)	f (1)	fc (2)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 0,20	22,5	22,5	53,3	53,3	27,9	27,9	43,7	43,7	27,5	27,5
0,20 - 0,40	30,5	53,0	26,1	79,4	21,1	49,0	28,0	71,6	19,1	46,6
0,40 - 0,60	21,9	74,8	13,7	93,2	17,3	66,3	13,0	84,6	16,1	62,6
0,60 - 0,80	13,7	88,5	4,2	97,4	15,5	81,9	7,6	92,2	15,5	78,1
0,80 - 1,00	5,9	94,4	1,6	98,9	8,9	90,7	3,9	96,1	7,8	85,9
1,00 - 1,20	3,6	98,0	1,1	100,0	5,2	95,9	2,1	98,2	5,4	91,2
1,20 - 1,40	1,0	99,0	0,0	100,0	2,9	98,8	1,1	99,3	3,8	95,0
1,40 - 1,60	0,7	99,8	0,0	100,0	1,2	100,0	0,4	99,6	1,9	96,9
1,60 - 1,80	0,2	99,9	0,0	100,0	0,0	100,0	0,2	99,8	1,6	98,5
1,80 - 2,00	0,1	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,1	99,9	0,8	99,3
2,00 - 2,20	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,1	100,0	0,3	99,6
2,20 - 2,40	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,4	100,0

(1) Fréquence (%)

(2) Fréquence cumulée (%)

b) Quadrant I

	Bouée ULAV n = 1971 $\bar{H}_S = 0,44$ m		W08-TER n = 1081 $\bar{H}_S = 0,24$ m		W08-BOU n = 1025 $\bar{H}_S = 0,37$ m		S77-MJL n = 849 $\bar{H}_S = 0,40$ m		S77-BOU n = 1289 $\bar{H}_S = 0,64$ m	
H_S (m)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 0,20	22,0	22,0	54,0	54,0	33,3	33,3	33,3	33,3	23,1	23,1
0,20 - 0,40	30,8	52,8	27,2	81,2	29,5	62,7	28,2	61,5	21,3	44,5
0,40 - 0,60	20,6	73,4	11,9	93,2	17,6	80,3	15,0	76,4	13,8	58,3
0,60 - 0,80	15,6	89,0	4,0	97,1	12,9	93,2	11,4	87,9	10,9	69,1
0,80 - 1,00	6,0	94,9	1,2	98,3	3,3	96,5	5,9	93,8	7,1	76,3
1,00 - 1,20	3,2	98,1	1,7	100,0	2,2	98,6	3,1	96,8	7,5	83,8
1,20 - 1,40	0,9	99,0	0,0	100,0	1,2	99,8	1,3	98,1	5,7	89,5
1,40 - 1,60	0,8	99,8	0,0	100,0	0,2	100,0	0,5	98,6	3,7	93,3
1,60 - 1,80	0,2	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,8	99,4	3,2	96,4
1,80 - 2,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,2	99,7	1,7	98,1
2,00 - 2,20	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,4	100,0	0,8	98,9
2,20 - 2,40	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	1,1	100,0

Tableau 4.29 - Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1992 et 1993 (suite)

c) Quadrant III

	Bouée ULAV n = 718 $\bar{H}_S = 0,52$ m		W08-TER n = 1242 $\bar{H}_S = 0,26$ m		W08-BOU n = 1431 $\bar{H}_S = 0,62$ m		S77-MJL n = 1345 $\bar{H}_S = 0,39$ m		S77-BOU n = 1356 $\bar{H}_S = 0,57$ m	
H_S (m)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 0,20	11,4	11,4	48,3	48,3	13,8	13,8	31,8	31,8	14,5	14,5
0,20 - 0,40	29,5	41,0	30,2	78,5	18,1	31,9	30,3	62,1	18,4	32,8
0,40 - 0,60	28,8	69,8	15,1	93,6	20,4	52,3	17,3	79,4	22,0	54,8
0,60 - 0,80	13,5	83,3	4,1	97,8	17,8	70,1	9,8	89,2	24,7	79,5
0,80 - 1,00	7,9	91,2	1,3	99,0	14,9	85,0	5,4	94,6	10,9	90,4
1,00 - 1,20	5,9	97,1	0,9	99,9	8,5	93,4	3,1	97,7	4,7	95,1
1,20 - 1,40	1,4	98,5	0,1	100,0	4,1	97,6	1,7	99,4	3,2	98,2
1,40 - 1,60	1,0	99,4	0,0	100,0	2,5	100,0	0,6	100,0	1,0	99,2
1,60 - 1,80	0,3	99,7	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,7	99,9
1,80 - 2,00	0,3	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,2	100,0
2,00 - 2,20	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
2,20 - 2,40	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

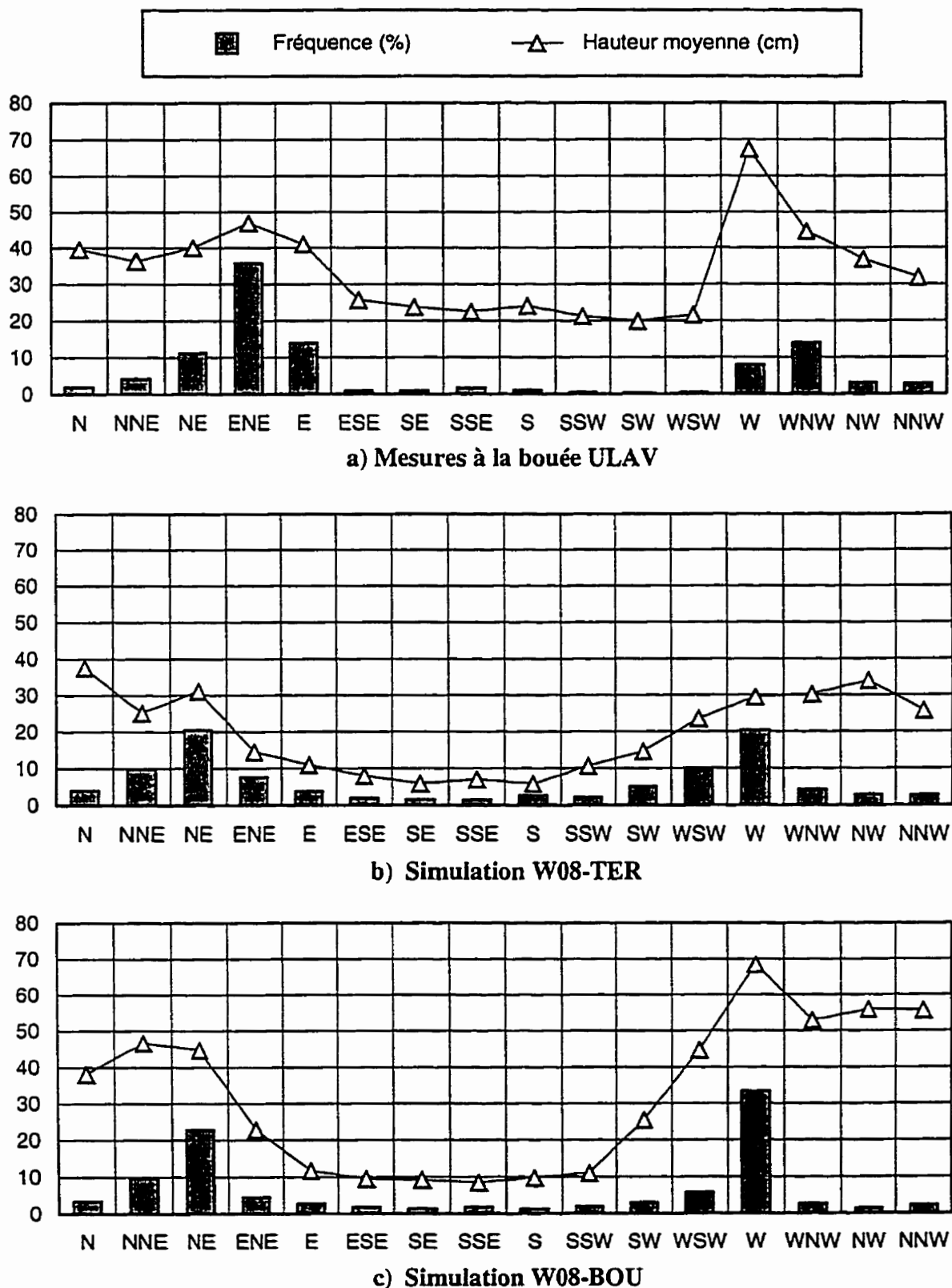


Figure 4.31 - Distributions des directions de vagues mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1992 et 1993, et hauteurs significatives moyennes par direction

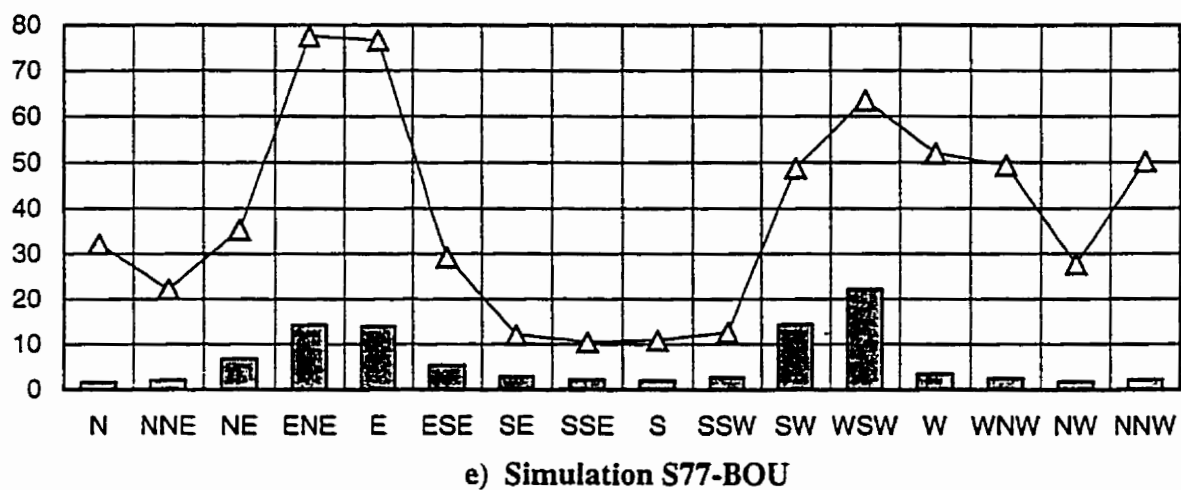
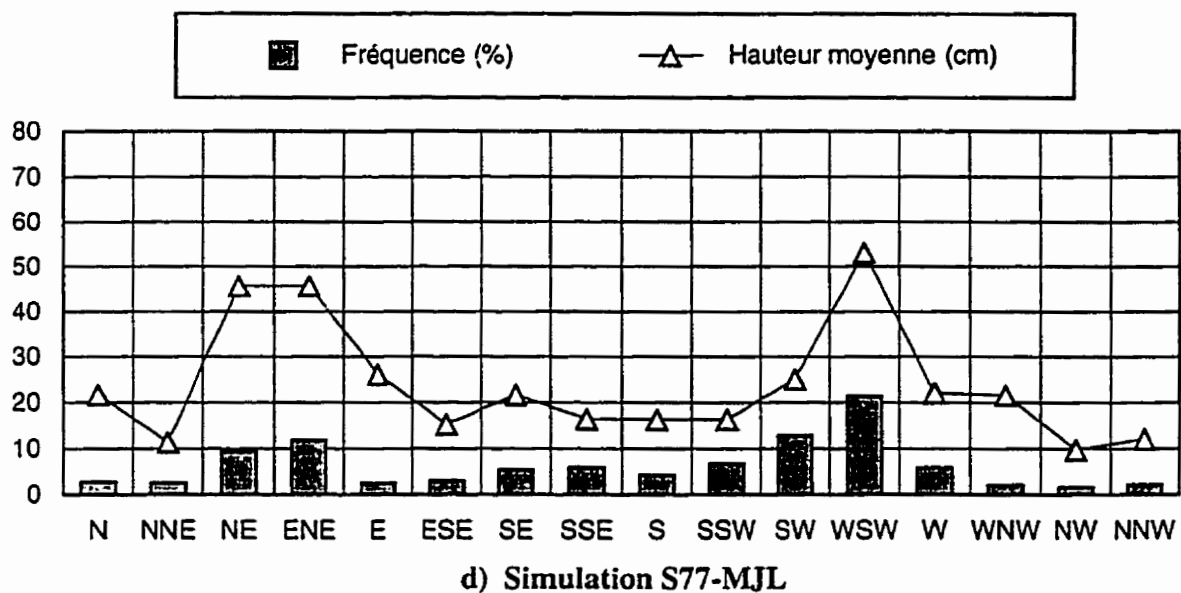


Figure 4.31 - Distributions des directions de vagues mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1992 et 1993, et hauteurs significatives moyennes par direction (suite)

**Tableau 4.30 - Statistiques des périodes mesurées et calculées à la bouée
ULAV en 1992 et 1993**

a) Toutes directions

	Bouée ULAV n = 3196 $\bar{T}_p = 4,66$ s		W08-TER n = 3196 $\bar{T}_p = 1,98$ s		W08-BOU n = 3196 $\bar{T}_p = 2,74$ s		S77-MJL n = 3196 $\bar{T}_p = 1,92$ s		S77-BOU n = 3196 $\bar{T}_p = 2,53$ s	
T_p (s)	f (1)	fc (2)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 1,00	0,0	0,0	15,7	15,7	5,5	5,5	19,5	19,5	9,2	9,2
1,00 - 2,00	0,5	0,5	39,2	54,9	24,5	30,0	37,4	56,9	28,2	37,5
2,00 - 3,00	13,7	14,2	30,0	84,9	25,6	55,6	28,4	85,4	27,2	64,6
3,00 - 4,00	22,0	36,2	12,2	97,1	30,0	85,6	11,0	96,3	23,4	88,1
4,00 - 5,00	24,0	60,2	2,8	99,9	12,9	98,4	3,3	99,6	8,8	96,9
5,00 - 6,00	23,2	83,4	0,2	100,0	1,6	100,0	0,4	100,0	2,8	99,7
6,00 - 7,00	8,5	91,9	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,3	100,0
7,00 - 8,00	5,8	97,7	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
8,00 - 9,00	1,5	99,2	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
9,00 - 10,00	0,7	99,9	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
10,00 - 11,00	0,1	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

(1) Fréquence (%)

(2) Fréquence cumulée (%)

b) Quadrant I

	Bouée ULAV n = 1971 $\bar{T}_p = 5,34$ s		W08-TER n = 1081 $\bar{T}_p = 1,90$ s		W08-BOU n = 1025 $\bar{T}_p = 2,37$ s		S77-MJL n = 849 $\bar{T}_p = 2,15$ s		S77-BOU n = 1289 $\bar{T}_p = 2,74$ s	
T_p (s)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 1,00	0,0	0,0	14,3	14,3	6,8	6,8	16,5	16,5	7,6	7,6
1,00 - 2,00	0,0	0,0	42,7	57,0	31,6	38,4	31,0	47,5	27,2	34,8
2,00 - 3,00	1,8	1,8	31,5	88,5	33,8	72,2	30,4	77,9	25,8	60,6
3,00 - 4,00	13,3	15,1	9,3	97,9	22,8	95,0	16,6	94,5	19,5	80,1
4,00 - 5,00	27,0	42,1	2,0	99,9	4,6	99,6	4,1	98,6	13,1	93,2
5,00 - 6,00	32,6	74,6	0,1	100,0	0,4	100,0	1,4	100,0	6,1	99,2
6,00 - 7,00	12,8	87,4	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,8	100,0
7,00 - 8,00	8,9	96,3	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
8,00 - 9,00	2,4	98,7	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
9,00 - 10,00	1,1	99,8	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
10,00 - 11,00	0,2	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

Tableau 4.30 - Statistiques des périodes mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1992 et 1993 (suite)

c) Quadrant III

	Bouée ULAV n = 718 $\bar{T}_p = 3,42$ s		W08-TER n = 1242 $\bar{T}_p = 2,10$ s		W08-BOU n = 1431 $\bar{T}_p = 3,19$ s		S77-MJL n = 1345 $\bar{T}_p = 2,16$ s		S77-BOU n = 1356 $\bar{T}_p = 2,73$ s	
T_p (s)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 1,00	0,0	0,0	11,3	11,3	2,2	2,2	13,6	13,6	5,0	5,0
1,00 - 2,00	0,6	0,6	38,2	49,5	12,4	14,5	32,7	46,3	17,3	22,3
2,00 - 3,00	38,0	38,6	34,7	84,2	24,1	38,7	33,8	80,2	34,7	57,0
3,00 - 4,00	38,6	77,2	12,9	97,1	37,9	76,5	14,6	94,7	34,7	91,7
4,00 - 5,00	16,4	93,6	2,7	99,8	20,6	97,1	5,3	100,0	7,5	99,2
5,00 - 6,00	4,3	97,9	0,2	100,0	2,9	100,0	0,0	100,0	0,8	100,0
6,00 - 7,00	1,3	99,2	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
7,00 - 8,00	0,7	99,9	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
8,00 - 9,00	0,1	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
9,00 - 10,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
10,00 - 11,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

4.7.3 Bouée ULAV au large de Sainte-Flavie (ULAV-91)

L'élimination des données manquantes dans les enregistrements à la bouée ULAV (cf. section 4.3) en 1991, de même que les résultats correspondants dans les fichiers de vagues calculées par les modèles numériques, réduit le nombre d'heures de comparaison à 2134.

Les courbes de fréquences des hauteurs significatives (figure 4.32) montrent que les hauteurs mesurées s'écartent de la droite représentant une distribution lognormale pour le 20 % des valeurs de H_s supérieures à 0,6 m. On constate également que la distribution de H_s obtenue avec la simulation S77-MJL est celle se rapprochant le plus de la distribution des hauteurs mesurées. La simulation W08-TER fournit aussi une distribution se rapprochant de celle des vagues mesurées, sauf pour les vagues supérieures à 0,5 m, dont la fréquence est sous-estimée. Les deux simulations utilisant les données de vent de la bouée de Mont-Louis (W08-BOU et S77-BOU) surestiment les hauteurs significatives.

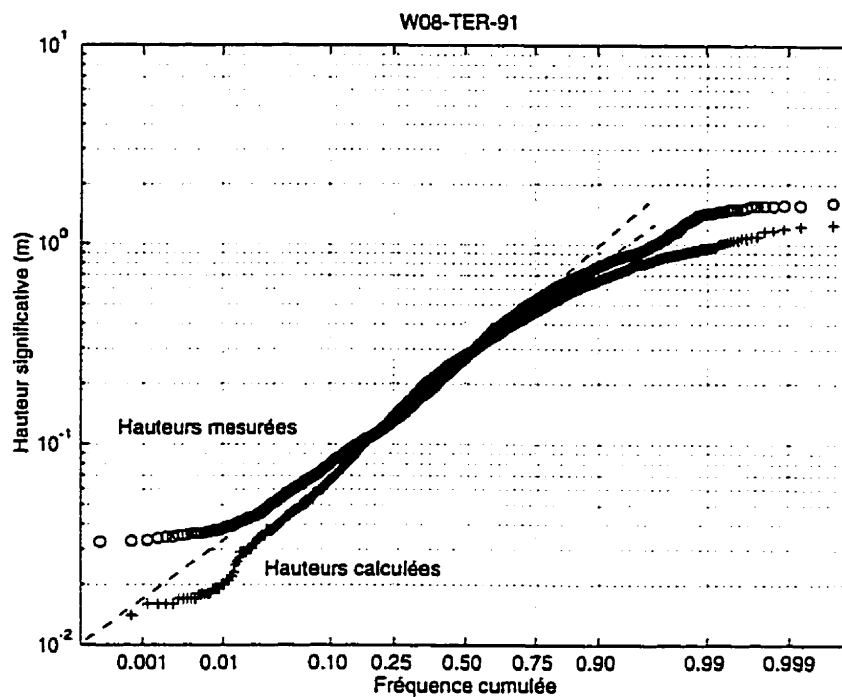
D'après les statistiques du tableau 4.31a, l'estimation la plus juste de la hauteur significative moyenne est fournie par la simulation W08-TER; l'écart entre la moyenne de H_s mesurée et celle calculée est de -11 %. La simulation S77-MJL conduit aussi à une estimation valable de la moyenne de H_s puisque celle-ci est supérieure de 14 % à la moyenne mesurée. Les deux autres simulations (W08-BOU et S77-BOU) surestiment H_s de 42 % et de 69 % respectivement.

Si on ne considère que les vagues provenant des quadrants I et III (tableaux 4.31b et 4.31c), le nombre de vagues (n) associé à chaque quadrant indique que la direction dominante correspond au quadrant III, autant pour les vagues mesurées que pour celles calculées par les modèles numériques. Pour le quadrant I, la simulation S77-MJL est celle fournissant la meilleure estimation de la hauteur significative moyenne, celle-ci étant inférieure de 15 % à la moyenne des hauteurs mesurées. Quant à la distribution de H_s , c'est aussi la simulation S77-MJL qui l'estime le mieux. Pour ce qui concerne le quadrant III, l'estimation la plus juste de la hauteur significative moyenne provient de la simulation W08-TER, pour laquelle les hauteurs significatives sont inférieures de 5 % en moyenne aux hauteurs mesurées. Cette simulation est aussi celle fournissant la meilleure prévision de la distribution de H_s .

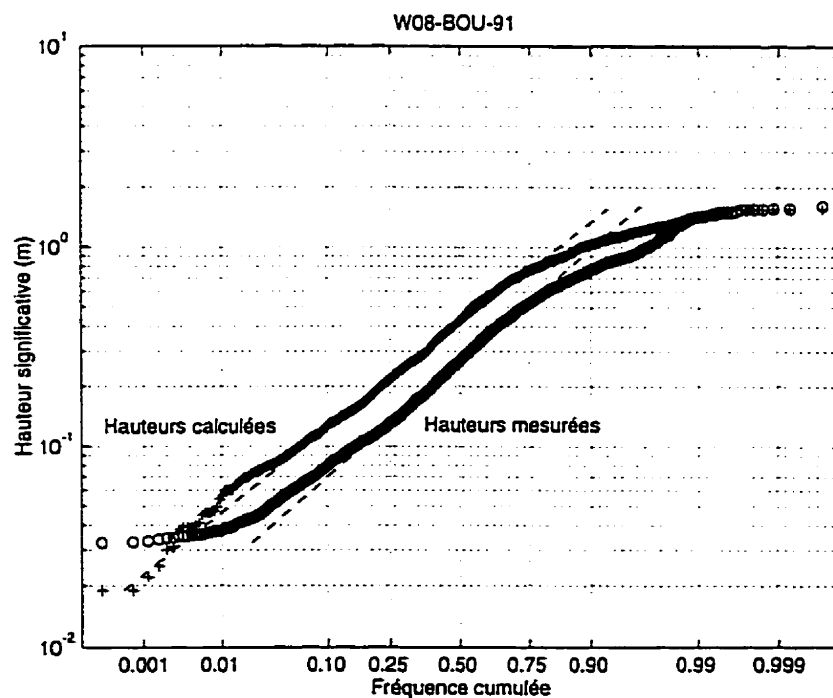
La distribution de la direction des vagues selon 16 secteurs (figure 4.33) indique que les vagues mesurées à la bouée proviennent majoritairement du secteur WSW, mais que le secteur NE est presque aussi fréquent. Par contre, les vagues calculées par les modèles numériques sont concentrées dans le secteur WSW pour le modèle WAWSP et dans les secteurs SW et WSW

pour le modèle SPM-77. Pour ce qui est des hauteurs significatives moyennes par direction, dans l'ensemble, c'est la simulation W08-TER qui présente la courbe des hauteurs moyennes se rapprochant le plus de celle des mesures à la bouée.

Quant aux périodes de pointe de l'ensemble des vagues, le tableau 4.32a montre que c'est la simulation W08-BOU qui fournit la meilleure estimation de la période moyenne. Cette estimation reste toutefois inférieure de 29 % à la valeur mesurée. Pour le quadrant I, la meilleure estimation (S77-BOU) est inférieure de 49 % à la période mesurée. Quant au quadrant III, la simulation W08-BOU fournit une meilleure estimation de T_p puisque l'écart moyen entre les valeurs mesurées et celles calculées n'est que de -10 %.

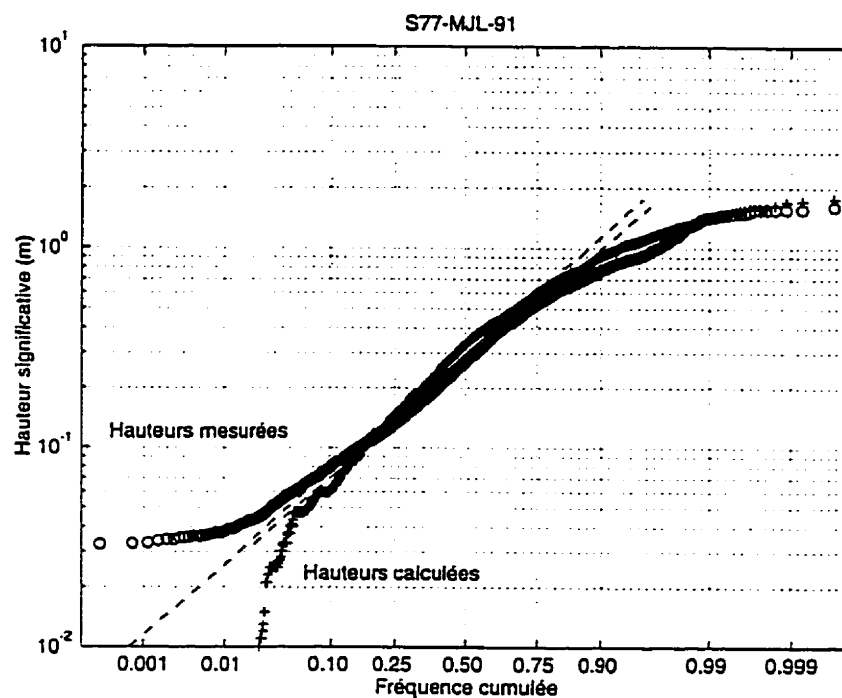


a) Simulation W08-TER

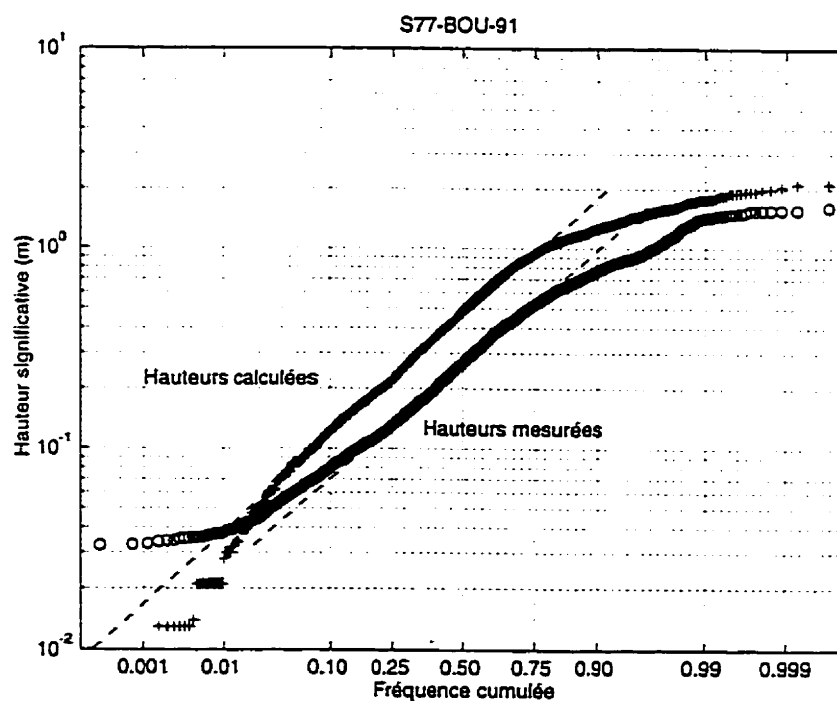


b) Simulation W08-BOU

Figure 4.32 - Courbes de fréquences des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1991



c) Simulation S77-MJL



d) Simulation S77-BOU

Figure 4.32 - Courbes de fréquences des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1991 (suite)

Tableau 4.31 - Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1991

a) Toutes directions

	Bouée ULAV n = 2134 $\bar{H}_S = 0,36$ m		W08-TER n = 2134 $\bar{H}_S = 0,32$ m		W08-BOU n = 2134 $\bar{H}_S = 0,51$ m		S77-MJL n = 2134 $\bar{H}_S = 0,41$ m		S77-BOU n = 2134 $\bar{H}_S = 0,61$ m	
H_S (m)	f (1)	fc (2)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 0,20	39,7	39,7	35,1	35,1	22,3	22,3	34,7	34,7	21,9	21,9
0,20 - 0,40	24,6	64,2	34,2	69,2	25,4	47,7	23,5	58,2	21,5	43,3
0,40 - 0,60	16,3	80,5	17,4	86,6	16,0	63,6	17,3	75,5	13,7	57,1
0,60 - 0,80	10,9	91,4	9,4	96,0	14,8	78,4	11,4	87,0	11,2	68,2
0,80 - 1,00	5,5	96,9	3,4	99,3	10,0	88,4	6,1	93,1	9,5	77,7
1,00 - 1,20	1,3	98,1	0,6	99,9	7,8	96,2	4,2	97,3	10,7	88,5
1,20 - 1,40	0,8	98,9	0,1	100,0	2,6	98,8	1,7	99,0	6,0	94,5
1,40 - 1,60	1,1	100,0	0,0	100,0	1,2	100,0	0,8	99,8	3,5	97,9
1,60 - 1,80	0,1	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,2	100,0	1,3	99,2
1,80 - 2,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,6	99,9
2,00 - 2,20	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,1	100,0
2,20 - 2,40	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

(1) Fréquence (%)

(2) Fréquence cumulée (%)

b) Quadrant I

	Bouée ULAV n = 640 $\bar{H}_S = 0,34$ m		W08-TER n = 283 $\bar{H}_S = 0,27$ m		W08-BOU n = 447 $\bar{H}_S = 0,40$ m		S77-MJL n = 335 $\bar{H}_S = 0,39$ m		S77-BOU n = 409 $\bar{H}_S = 0,55$ m	
H_S (m)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 0,20	47,3	47,3	46,3	46,3	36,9	36,9	41,2	41,2	28,6	28,6
0,20 - 0,40	20,2	67,5	29,3	75,6	26,0	62,9	23,6	64,8	25,7	54,3
0,40 - 0,60	14,2	81,7	15,6	91,2	8,1	70,9	11,0	75,8	8,6	62,8
0,60 - 0,80	10,5	92,2	7,8	98,9	15,2	86,1	11,0	86,9	9,5	72,4
0,80 - 1,00	4,1	96,3	1,1	100,0	9,4	95,5	4,2	91,0	6,6	79,0
1,00 - 1,20	1,6	97,8	0,0	100,0	3,6	99,1	5,1	96,1	10,3	89,3
1,20 - 1,40	0,9	98,8	0,0	100,0	0,9	100,0	1,8	97,9	5,9	95,1
1,40 - 1,60	1,3	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	2,1	100,0	2,2	97,3
1,60 - 1,80	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	2,4	99,8
1,80 - 2,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,2	100,0
2,00 - 2,20	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
2,20 - 2,40	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

Tableau 4.31 - Statistiques des hauteurs significatives mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1991 (suite)

c) Quadrant III

	Bouée ULAV n = 1055 $\bar{H}_S = 0,40$ m		W08-TER n = 1350 $\bar{H}_S = 0,38$ m		W08-BOU n = 1391 $\bar{H}_S = 0,60$ m		S77-MJL n = 1127 $\bar{H}_S = 0,50$ m		S77-BOU n = 1362 $\bar{H}_S = 0,69$ m	
H_S (m)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 0,20	30,4	30,4	23,6	23,6	13,6	13,6	22,0	22,0	15,0	15,0
0,20 - 0,40	28,3	58,7	37,6	61,1	22,7	36,3	25,1	47,1	18,3	33,3
0,40 - 0,60	18,8	77,5	21,1	82,2	18,3	54,6	19,5	66,6	14,7	47,9
0,60 - 0,80	11,9	89,3	12,3	94,5	17,1	71,8	14,9	81,6	13,2	61,2
0,80 - 1,00	7,5	96,8	4,6	99,1	12,2	83,9	8,4	90,0	11,7	72,8
1,00 - 1,20	1,0	97,8	0,7	99,9	10,6	94,5	6,0	96,0	12,3	85,2
1,20 - 1,40	0,9	98,7	0,2	100,0	3,7	98,1	2,7	98,7	7,6	92,8
1,40 - 1,60	1,2	99,9	0,0	100,0	1,9	100,0	1,0	99,7	4,8	97,6
1,60 - 1,80	0,1	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,4	100,0	1,3	98,9
1,80 - 2,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,9	99,8
2,00 - 2,20	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,2	100,0
2,20 - 2,40	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

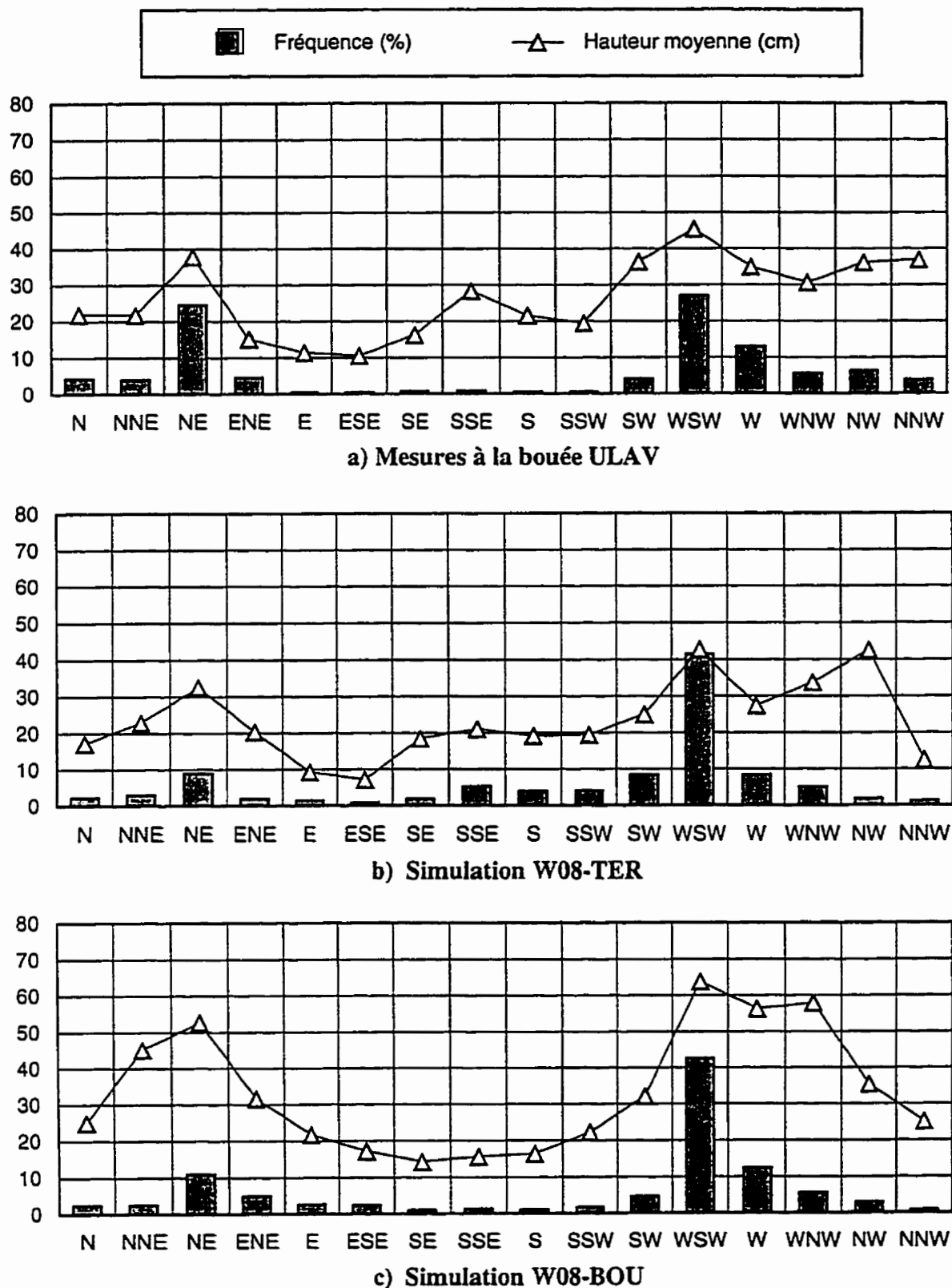


Figure 4.33 - Distributions des directions de vagues mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1991, et hauteurs significatives moyennes par direction

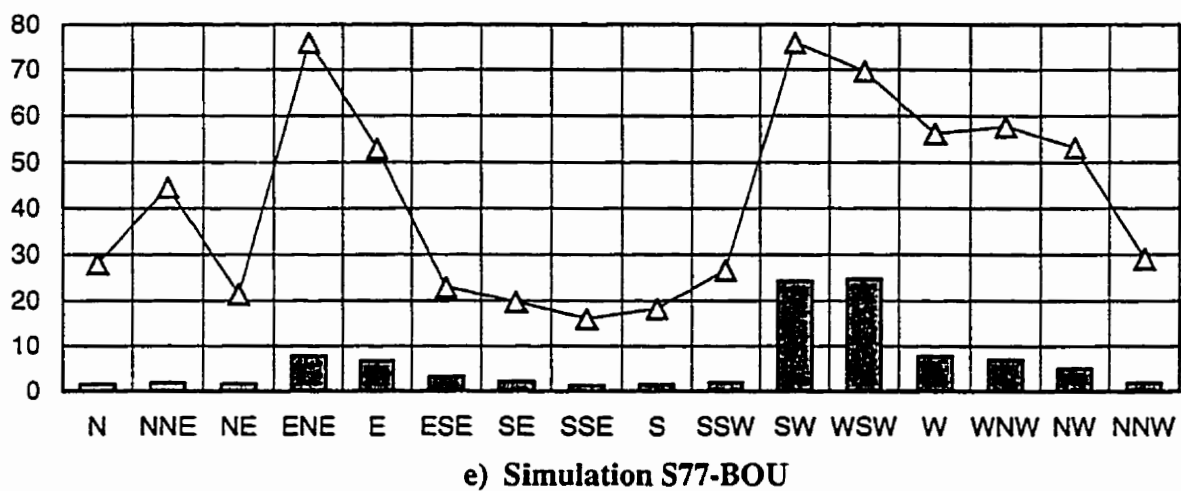
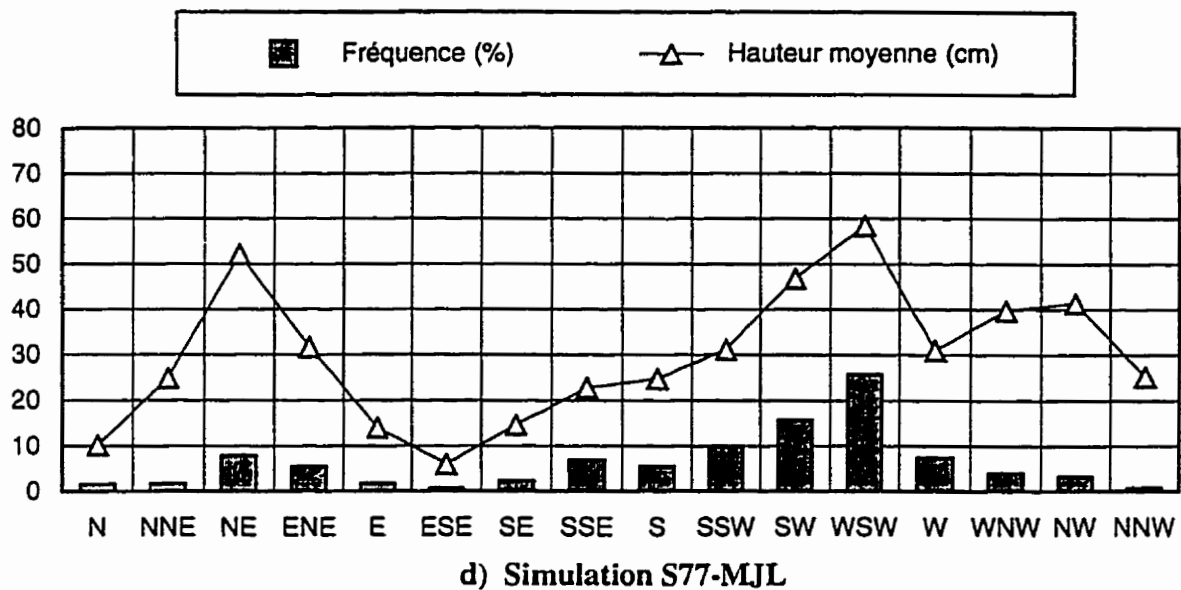


Figure 4.33 - Distributions des directions de vagues mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1991, et hauteurs significatives moyennes par direction (suite)

**Tableau 4.32 - Statistiques des périodes mesurées et calculées à la bouée
ULAV en 1991**

a) Toutes directions

	Bouée ULAV n = 2134 $\bar{T}_p = 3,94$ s		W08-TER n = 2134 $\bar{T}_p = 2,25$ s		W08-BOU n = 2134 $\bar{T}_p = 2,81$ s		S77-MJL n = 2134 $\bar{T}_p = 2,19$ s		S77-BOU n = 2134 $\bar{T}_p = 2,72$ s	
T_p (s)	f (1)	fc (2)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 1,00	0,0	0,0	7,8	7,8	1,4	1,4	13,7	13,7	5,4	5,4
1,00 - 2,00	0,5	0,5	29,8	37,6	25,0	26,4	33,2	46,9	27,9	33,4
2,00 - 3,00	25,2	25,7	42,1	79,7	29,0	55,3	30,0	76,9	26,3	59,7
3,00 - 4,00	33,1	58,8	18,9	98,5	29,8	85,1	17,2	94,0	21,0	80,7
4,00 - 5,00	22,5	81,4	1,5	100,0	14,7	99,8	5,6	99,7	17,3	98,0
5,00 - 6,00	11,4	92,7	0,0	100,0	0,2	100,0	0,3	100,0	2,0	100,0
6,00 - 7,00	4,1	96,9	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
7,00 - 8,00	1,8	98,6	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
8,00 - 9,00	0,8	99,5	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
9,00 - 10,00	0,4	99,9	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
10,00 - 11,00	0,1	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

(1) Fréquence (%)

(2) Fréquence cumulée (%)

b) Quadrant I

	Bouée ULAV n = 640 $\bar{T}_p = 4,98$ s		W08-TER n = 283 $\bar{T}_p = 2,00$ s		W08-BOU n = 447 $\bar{T}_p = 2,47$ s		S77-MJL n = 335 $\bar{T}_p = 2,09$ s		S77-BOU n = 409 $\bar{T}_p = 2,56$ s	
T_p (s)	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 1,00	0,0	0,0	12,7	12,7	2,5	2,5	19,7	19,7	7,3	7,3
1,00 - 2,00	0,0	0,0	36,0	48,8	40,9	43,4	31,6	51,3	32,3	39,6
2,00 - 3,00	6,1	6,1	35,7	84,5	25,7	69,1	27,8	79,1	25,9	65,5
3,00 - 4,00	21,1	27,2	15,6	100,0	20,1	89,3	12,2	91,3	16,9	82,4
4,00 - 5,00	28,4	55,6	0,0	100,0	10,7	100,0	8,4	99,7	14,7	97,1
5,00 - 6,00	24,1	79,7	0,0	100,0	0,0	100,0	0,3	100,0	2,9	100,0
6,00 - 7,00	10,8	90,5	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
7,00 - 8,00	5,5	95,9	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
8,00 - 9,00	2,5	98,4	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
9,00 - 10,00	1,1	99,5	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
10,00 - 11,00	0,5	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

Tableau 4.32 - Statistiques des périodes mesurées et calculées à la bouée ULAV en 1991 (suite)

c) Quadrant III

	Bouée ULAV $n = 1055$ $\bar{T}_p = 3,40 \text{ s}$		W08-TER $n = 1350$ $\bar{T}_p = 2,48 \text{ s}$		W08-BOU $n = 1391$ $\bar{T}_p = 3,07 \text{ s}$		S77-MJL $n = 1127$ $\bar{T}_p = 2,47 \text{ s}$		S77-BOU $n = 1362$ $\bar{T}_p = 2,95 \text{ s}$	
$T_p \text{ (s)}$	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc	f	fc
0,00 - 1,00	0,0	0,0	3,4	3,4	0,3	0,3	8,0	8,0	3,5	3,5
1,00 - 2,00	0,5	0,5	22,5	25,9	15,0	15,2	27,7	35,7	22,0	25,6
2,00 - 3,00	35,9	36,4	47,6	73,6	29,3	44,5	32,6	68,2	25,8	51,3
3,00 - 4,00	39,1	75,4	24,2	97,7	36,6	81,1	23,1	91,3	25,0	76,4
4,00 - 5,00	19,2	94,6	2,3	100,0	18,6	99,7	8,2	99,5	21,4	97,7
5,00 - 6,00	4,7	99,3	0,0	100,0	0,3	100,0	0,5	100,0	2,3	100,0
6,00 - 7,00	0,7	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
7,00 - 8,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
8,00 - 9,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
9,00 - 10,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
10,00 - 11,00	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0

CHAPITRE 5

ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DU MODÈLE WAWSP

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous tentons de répondre aux questions suivantes:

- 1) Le modèle bidimensionnel WAWSP permet-il de reconstituer adéquatement le climat des vagues dans l'estuaire du Saint-Laurent ?
- 2) Le modèle WAWSP fournit-il de meilleures prévisions de vagues que les modèles unidimensionnels en certains points de l'estuaire?

L'évaluation de la performance du modèle WAWSP porte sur trois paramètres: la hauteur significative des vagues (H_s), leur période de pointe (T_p) et leur direction de propagation (θ). Après avoir mis en évidence les principaux résultats des simulations concernant ces paramètres (sections 5.3, 5.4 et 5.5), nous discutons de leur fiabilité et des conclusions que l'on peut en tirer (section 5.6).

Rappelons d'abord quelques faits concernant les données de vent et de vagues utilisées pour cette étude, et les simulations effectuées.

5.2 Données et simulations (rappel)

Dans la région de l'estuaire du Saint-Laurent où les vagues ont été reconstituées, les vents proviennent principalement des secteurs W-SW, sauf ceux des stations situées dans les environs de Sept-Îles (stations de Sept-Îles, Corossol et Fleuve I), où la direction dominante correspond plutôt aux secteurs E-NE. Pour les simulations effectuées avec le modèle WAWSP, seuls les fichiers de données de vent contenant très peu de données manquantes ont été utilisés et ces données ont été interpolées linéairement de façon à constituer des séries complètes. Les données de vent n'ont pas été lissées pour les calculs avec le modèle WAWSP. Pour les simulations effectuées avec les modèles unidimensionnels (1D), les données de vent manquantes n'ont pas été interpolées. Par contre, les données manquantes ont été interpolées linéairement dans les fichiers de résultats des simulations. Les modèles 1D utilisent des données de vent lissées sur une période de neuf heures et dont les directions sont ramenées à 16 secteurs de la rose des vents. Par ailleurs, des facteurs de correction de la vitesse du vent ont été appliqués dans le cas des stations de vent terrestres et synthétiques, et cela, pour tous les modèles numériques (cf. section 4.5.3).

Quant aux "mesures" de vagues utilisées pour valider les prévisions des modèles numériques, rappelons qu'il s'agit d'estimations obtenues par l'analyse spectrale du signal enregistré par les bouées ENVC et ULAV. La bouée ENVC est une station météorologique d'Environnement Canada qui enregistre la hauteur significative (H_s) et la période de pointe (T_p) à toutes les heures. La période annuelle d'enregistrement s'étend sur environ six mois et demi, soit du début de mai à la mi-novembre (cf. tableau 4.4). Ces enregistrements contiennent un grand nombre de périodes supérieures à 15 s, périodes qui ont été remplacées par des valeurs plus cohérentes dans certains cas et laissées telles quelles dans d'autres (cf. section 4.3.1). Cette bouée est située au centre de l'estuaire, dans 330 m d'eau. Quant à la bouée ULAV, il s'agit d'une bouée de type Wavec qui enregistre la direction de propagation des vagues (θ) en plus de leur hauteur et de leur période. L'intervalle entre les enregistrements varie de 35 min à 3 h selon l'agitation de la mer. Par conséquent, les valeurs horaires de H_s , T_p et θ ont dû être interpolées. La période annuelle d'enregistrement est très variable; elle était de cinq mois en 1991, de trois mois et demi en 1992 et de trois mois en 1993 (cf. tableau 4.4). De plus, des problèmes de fonctionnement de la bouée et de son système d'enregistrement ont entraîné un grand nombre de données manquantes dans

les fichiers de données: 43 % en 1991, 28 % en 1992 et 45 % en 1993 (cf. section 4.3.2). Au cours des étés 1992 et 1993, la bouée ULAV était située au large de Mont-Louis, à environ 3 km de la côte. Comme la profondeur d'eau à cet endroit est de 95 m et que les vagues enregistrées à la bouée ont des périodes inférieures à 11 s (cf. tableau 4.30), les conditions de vagues peuvent être considérées comme des conditions d'eau profonde. Au cours de l'été 1991, la bouée ULAV était située au large de Sainte-Flavie, à environ 5 km de la côte, dans 36 m d'eau. À cette profondeur, les vagues doivent avoir une période de moins de 7 s pour que des conditions d'eau profonde soient considérées. Comme 3,1 % des vagues mesurées à cet endroit ont une période supérieure à 7 s (cf. tableau 4.32), il prévaut, à cet emplacement, des conditions d'eau profonde à intermédiaire.

Les caractéristiques des simulations effectuées avec le modèle WAWSP et les modèles 1D sont présentées dans les tableaux 4.7 et 4.19. Quatre simulations ont porté sur trois années¹⁰ (1991, 1992 et 1993). Deux de ces simulations ont été effectuées avec le modèle WAWSP, l'une avec un champ de vent uniforme généré à partir des données de la bouée de Mont-Louis (W08-BOU) et l'autre avec un champ de vent non uniforme obtenu à partir des stations de vent terrestres (W08-TER). Deux simulations ont aussi été effectuées avec le modèle unidimensionnel SPM-77, la première avec les données de vent de la bouée de Mont-Louis (S77-BOU) et la seconde avec celles de la station terrestre de Mont-Joli (S77-MJL). Pour l'année 1992 seulement, des simulations supplémentaires ont été effectuées avec le modèle WAWSP afin de vérifier l'influence des données de vent sur les résultats (W08-MAR et W08-SYN) et celle de la dimension des cellules de la grille de calcul (W16-BOU). Pour l'année 1992 également, le modèle SPM-77 a été utilisé avec une station de vent synthétique (S77-FLV), et le modèle SPM-84 a été testé avec les données de vent de la bouée de Mont-Louis (S84-BOU).

5.3 Hauteur significative

Le tableau 5.1 regroupe les principaux résultats des comparaisons entre les hauteurs significatives calculées et mesurées aux trois emplacements des bouées, pour les simulations qui ont porté sur les années 1991, 1992 et 1993. À la bouée ENVC, la période de comparaison des valeurs calculées et mesurées s'étend sur trois saisons. La bouée ULAV ayant été mouillée au large de Sainte-Flavie en 1991 et au large de Mont-Louis en 1992 et 1993, la période de comparaison n'est que d'une saison au premier emplacement (ULAV-91) et de deux saisons au

¹⁰ Les périodes couvertes varient d'une année à l'autre et d'un site à l'autre (cf. tableau 4.6).

deuxième (ULAV-92-93). L'écart moyen entre les hauteurs significatives calculées et celles mesurées ($\Delta\bar{H}_s$) a été évalué en fusionnant tous les résultats disponibles à un site donné (cf. section 4.7), tandis que l'erreur quadratique moyenne normalisée (ϵ_n) et le coefficient de corrélation (r) sont des valeurs calculées sur une base annuelle¹¹ (cf. section 4.5.4). La simulation donnant les meilleurs prévisions de vagues est définie comme celle dont l'erreur quadratique moyenne normalisée (ϵ_n) est la plus faible.

Les observations suivantes peuvent être tirées du tableau 5.1:

- Aux trois emplacements de bouées, les meilleurs prévisions de H_s ont été calculées avec le modèle WAWSP.

De plus, dans chaque cas, ce sont les stations de vent se trouvant le plus près de l'emplacement des bouées qui ont conduit aux meilleurs résultats: la bouée de Mont-Louis pour les bouées ENVC et ULAV-92-93 (W08-BOU), et les stations terrestres pour la bouée ULAV-91 (W08-TER). Dans les trois cas, l'écart moyen entre les hauteurs calculées et celles mesurées varie de -13 % à +9 %. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par Schwab (1989) qui, après avoir testé le modèle WAWSP sur plusieurs plans d'eau, estime que l'erreur commise sur les hauteurs de vagues est de 10 à 20 % (cf. section 3.6.6). Par ailleurs, lors de tests effectués sur le lac Érié, Schwab *et al.* (1984a) ont trouvé des erreurs quadratiques moyennes (ϵ) de 0,20 et 0,33 m respectivement, à une tour du GLERL et à une bouée du NDBC (cf. section 3.6.3), ce qui correspond à des erreurs normalisées (ϵ_n) de 0,27 et 0,39. L'erreur obtenue à la bouée ENVC ($\epsilon_n = 0,35-0,37$) est donc un peu plus faible que la dernière valeur, tandis qu'elle est plus élevée aux deux autres emplacements. Les mêmes auteurs ont évalué que les coefficients de corrélation entre les hauteurs significatives mesurées et celles calculées étaient de 0,93 et 0,88 respectivement, aux deux points de comparaison. Encore là, le coefficient de corrélation obtenu à la bouée ENVC ($r = 0,88-0,90$) est du même ordre de grandeur que celui calculé à la bouée du NDBC, mais il est plus faible aux deux autres emplacements.

- Les meilleures prévisions de H_s ont été obtenues à la bouée ENVC, en utilisant les vents mesurés à cette bouée.

¹¹ Lorsque la période de comparaison à un emplacement donné s'étend sur plus d'une année, les valeurs indiquées de ϵ_n et de r sont le minimum et le maximum des deux statistiques.

Les simulations effectuées avec les vents de la bouée de Mont-Louis (W08-BOU et S77-BOU) ont donné le même écart moyen entre les hauteurs significatives calculées et celles mesurées. De plus, les erreurs quadratiques correspondant à ces deux simulations sont les plus faibles de toutes les valeurs obtenues, et les coefficients de corrélation, les plus élevés. Ceci s'explique probablement par le fait que les vents utilisés pour les simulations ont été mesurés sur la bouée même qui enregistrait les vagues. D'ailleurs, lorsque les mêmes vents sont utilisés pour reconstituer les vagues aux deux autres emplacements, l'erreur est beaucoup plus grande, particulièrement à la bouée la plus éloignée de la bouée de Mont-Louis, c'est-à-dire la bouée ULAV-91.

- Les prévisions de H_s à la bouée ULAV-91 sont plus précises que celles obtenues à la bouée ULAV-92-93, même si la première bouée était située en eau intermédiaire à profonde.

Seulement 3,1 % des vagues enregistrées à la bouée ULAV-91 peuvent être considérées comme des vagues générées en eau intermédiaire. D'ailleurs, Schwab (1989) mentionne qu'il a testé le modèle WAWSP en eau profonde et intermédiaire, et que le modèle WAWSP prévoit adéquatement les vagues dans les deux cas. La bonne performance de la simulation W08-TER ($\epsilon_n = 0,61$) peut aussi être associée aux stations de vent utilisées, qui comprennent la station de Mont-Joli, située à faible distance de l'emplacement de la bouée ULAV-91.

Le tableau 5.2 résume les résultats de simulations portant sur la saison 1992 seulement et permet de comparer ces résultats avec ceux des simulations précédentes. Voici les principales observations que l'on peut en tirer:

- Avec le modèle WAWSP, l'utilisation de cellules de 16 km au lieu de cellules de 8 km ne modifie pas les résultats à la bouée ENVC mais entraîne une surestimation de H_s à la bouée ULAV-92.

La différence entre les résultats des simulations W08-BOU et W16-BOU à la bouée ULAV-92 peut s'expliquer par le fait que, pour une cellule donnée, les calculs sont effectués à un point situé au centre de la cellule. Comme cette bouée est située à 3 km de la côte, sa position dans la grille de calcul est à 4 km de la côte avec des cellules de 8 km, et à 8 km avec des cellules de 16 km. Tous les fetchs des directions ESE à WSW sont donc

augmentés dans le cas des cellules de 16 km. Par contre, comme la bouée ENVC est située à une grande distance des côtes, modifier sa position de quelques kilomètres n'entraîne pas de modifications sensibles des fetchs. Lors des premiers tests effectués par Donelan (1978) avec des cellules de 5,08 et 20,32 km, celui-ci avait conclu à l'insensibilité du modèle à la résolution de la grille de calcul (cf. section 3.6.1). Par contre, Clodman (1983), qui a utilisé les mêmes données, a conclu que les résultats étaient satisfaisants avec des cellules de 5,1 et 10,2 km, mais ne l'étaient pas avec des cellules de 20,3 km (cf. section 3.6.2). Schwab *et al.* (1984b) ont comparé les résultats obtenus avec des cellules de 5 et 10 km et n'ont pas trouvé de différence importante (cf. section 3.6.4). Par ailleurs, Skafel et Bishop (1991), qui ont utilisé le modèle WAWSP avec des cellules de 4, 8, 16 et 32 km, ont trouvé que les résultats n'étaient pas nécessairement meilleurs avec des cellules plus petites et que certains tests avaient même donné de meilleurs résultats avec les plus grandes cellules (cf. section 3.6.7). À la lumière de ces résultats et de ceux obtenus lors de tests sur la stabilité numérique du modèle WAWSP (cf. section 4.4.2), nous ne pouvons conclure à l'insensibilité du modèle à la résolution de la grille de calcul comme l'avait proposé initialement son concepteur.

- Avec le modèle WAWSP, l'utilisation d'un champ de vent non uniforme au lieu d'un champ de vent uniforme n'améliore pas nécessairement les prévisions de H_s .

Aux deux bouées, l'erreur quadratique ε_n est légèrement plus élevée pour la simulation W08-MAR que pour la simulation W08-BOU. Toutefois, à la bouée ULAV-92, les meilleures prévisions sont obtenues avec un champ de vent non uniforme généré à partir des données de vent synthétiques (W08-SYN). L'utilisation de plusieurs stations de vent permettant de générer un champ de vent non uniforme n'entraîne donc pas nécessairement une meilleure performance du modèle WAWSP, celle-ci semblant dépendre davantage du choix des stations de vent. Schwab *et al.* (1984b) en étaient venus à la même conclusion (cf. section 3.6.4). On pourrait plutôt s'attendre à ce qu'un champ de vent non uniforme, théoriquement plus proche de la réalité, conduise à de meilleures prévisions des conditions de vagues. Trois raisons pourraient expliquer que les résultats obtenus ne permettent pas d'en arriver à cette conclusion: 1) la qualité des données de vent; 2) la méthode utilisée par le modèle WAWSP pour générer un champ de vent non uniforme; 3) le fait que la comparaison ait porté sur les comportements moyens de longues séries de données.

- Tous les modèles sous-estiment les hauteurs de vagues à la bouée ENVC, quelles que soient les données de vent utilisées.

L'écart entre les hauteurs significatives calculées et mesurées est particulièrement grand pour les simulations utilisant des données de vent terrestres ou synthétiques (W08-TER, W08-SYN, S77-MJL et S77-FLV). La seule simulation où la hauteur des vagues n'est pas sous-estimée est celle effectuée avec le modèle SPM-84 et les données de vent de la bouée de Mont-Louis (S84-BOU), qui permet d'évaluer exactement la hauteur significative moyenne. Cette différence entre le modèle SPM-84 et les autres modèles découle probablement du fait qu'il est le seul à ne pas utiliser les vitesses du vent mesurées à une hauteur de 10 m (U_{10}), mais plutôt une vitesse corrigée (U_a) qui tient compte de la relation non linéaire entre la contrainte du vent à la surface de l'eau et la vitesse du vent (cf. section 4.6.1b). Pour des vitesses U_{10} inférieures à 16 km/h, U_a est légèrement inférieure à U_{10} , mais lorsque U_{10} est supérieure à 16 km/h, U_a est supérieure à U_{10} et l'écart est d'autant plus grand que les vitesses U_{10} sont grandes. On peut donc s'attendre à ce que le modèle SPM-84 donne des hauteurs de vagues plus élevées. Toutefois, il conduit à une plus grande erreur quadratique moyenne que le modèle SPM-77 (S77-BOU). La figure 4.21b illustre la plus grande dispersion des résultats obtenus avec le modèle SPM-84.

- À la bouée ULAV-92, les stations de vent maritimes surestiment les hauteurs de vagues tandis que les stations de vent terrestres et synthétiques les sous-estiment.

Ces résultats reflètent les différences entre les régimes de vent à ces stations. Le tableau A.1 montre que les vitesses les plus élevées sont enregistrées aux stations de vent maritimes, et les plus basses aux stations terrestres.

- À la bouée ULAV-92, ce sont les simulations effectuées avec des données de vent synthétiques qui donnent les meilleures prévisions de H_s .

Dans le cas du modèle WAWSP, même si la simulation W08-MAR conduit au plus faible écart moyen, cet avantage est annulé par une grande variabilité des estimations, qui entraîne une erreur quadratique plus élevée que celle de la simulation W08-SYN. Les valeurs de ϵ_n et de r obtenues avec le modèle SPM-77 (S77-FLV) sont du même ordre de grandeur que celles de la simulation W08-SYN à la même bouée. En conséquence, si les stations de vent synthétiques avaient été utilisées pour les simulations de 1993, de meilleures prévisions auraient peut-être été obtenues à la bouée ULAV-92-93.

Tableau 5.1 - Tableau récapitulatif des comparaisons entre les hauteurs significatives calculées et mesurées pour les années 1991, 1992 et 1993

Simulation	ENVC-91-92-93			ULAV-92-93			ULAV-91		
	$\Delta \bar{H}_s$	ε_n	r	$\Delta \bar{H}_s$	ε_n	r	$\Delta \bar{H}_s$	ε_n	r
W08-BOU	- 13 %	0,35 - 0,37	0,88 - 0,90	+ 9 %	0,68 - 0,73	0,54 - 0,57	+ 42 %	0,95	0,55
W08-TER	- 54 %	0,75 - 0,82	0,51 - 0,69	- 43 %	0,65 - 0,81	0,54 - 0,63	- 11 %	0,61	0,68
S77-BOU	- 13 %	0,42 - 0,47	0,82 - 0,84	+ 23 %	0,78 - 0,92	0,58 - 0,60	+ 69 %	1,25	0,53
S77-MJL	- 40 %	0,71 - 0,74	0,54 - 0,59	- 27 %	0,70 - 0,91	0,29 - 0,46	+ 14 %	0,79	0,60

Tableau 5.2 - Tableau récapitulatif des comparaisons entre les hauteurs significatives calculées et mesurées pour l'année 1992

a) Modèle WAWSP

Simulation	ENVC-92			ULAV-92		
	$\Delta \bar{H}_s$	ε_n	r	$\Delta \bar{H}_s$	ε_n	r
W08-BOU	- 13 %	0,35	0,89	+ 20 %	0,68	0,57
W08-MAR	- 17 %	0,38	0,88	+ 7 %	0,72	0,57
W08-TER	- 53 %	0,75	0,69	- 37 %	0,65	0,54
W08-SYN	- 41 %	0,66	0,72	- 22 %	0,61	0,51
W16-BOU	- 13 %	0,36	0,88	+ 50 %	0,88	0,63

b) Modèles 1D

Simulation	ENVC-92			ULAV-92		
	$\Delta \bar{H}_s$	ε_n	r	$\Delta \bar{H}_s$	ε_n	r
S77-BOU	- 11 %	0,43	0,83	+ 24 %	0,78	0,58
S77-MJL	- 41 %	0,72	0,59	- 24 %	0,70	0,46
S77-FLV	- 38 %	0,73	0,52	- 7 %	0,62	0,54
S84-BOU	0 %	0,55	0,72	+ 28 %	0,97	0,54

Simulations présentant les plus faibles erreurs quadratiques moyennes normalisées (ε_n).

5.4 Période de pointe

Les tableaux 5.3 et 5.4 regroupent les principaux résultats des comparaisons entre les périodes de pointe (T_p) calculées et mesurées. On y présente les mêmes informations que celles données pour les hauteurs significatives (cf. section 5.2), à l'exception des coefficients de corrélation, que l'on peut considérer nuls pour toutes les simulations.

Les observations suivantes peuvent être tirées du tableau 5.3:

- Aux trois emplacements de bouées, les meilleures prévisions de T_p ont été calculées avec le modèle WAWSP, mais les valeurs calculées sont largement inférieures aux valeurs mesurées.

De plus, dans les trois cas, les meilleures prévisions ont été obtenues avec les vents de la bouée de Mont-Louis (W08-BOU). Si ces résultats sont mis en parallèle avec ceux du tableau 5.1, on constate que la simulation W08-BOU est la simulation effectuée avec le modèle WAWSP qui donne les plus grandes hauteurs de vagues. Toutefois, même si le modèle SPM-77 surestime davantage H_s que le modèle WAWSP aux bouées ULAV-92-93 et ULAV-91 (S77-BOU), il ne donne pas de meilleures prévisions des périodes. Les meilleures prévisions sous-estiment T_p de 29 à 43 % en moyenne. Schwab (1989) estime que l'erreur commise sur les périodes par le modèle WAWSP est de 20 à 30 % (cf. section 3.6.6). Les résultats obtenus dans cette étude montrent donc des écarts beaucoup plus grands. Par ailleurs, dans leur étude sur le lac Érié, Schwab *et al.* (1984a) avaient aussi conclu que les périodes calculées avec le modèle WAWSP étaient systématiquement inférieures aux observations (cf. section 3.6.3). Ils avaient évalué l'erreur quadratique moyenne à 1,16 s à la tour et à 0,94 s à la bouée, ce qui correspond à des erreurs ε_n de 0,28 et 0,26 respectivement, alors que le tableau 5.3 montre des valeurs variant entre 0,51 et 0,65 pour les meilleures prévisions. Ils avaient aussi estimé les coefficients de corrélation à 0,81 et 0,72 respectivement, alors que cette étude a conduit à des valeurs pratiquement nulles. Ces résultats soulèvent des questions sur la validité des périodes enregistrées par les deux bouées.

- Les résultats varient peu d'une simulation à l'autre et d'un emplacement à l'autre, comparativement à ceux obtenus pour les hauteurs significatives.

Si les résultats du tableau 5.3 sont comparés à ceux du tableau 5.1, on note que l'écart moyen entre les périodes calculées et mesurées ($\Delta\bar{T}_p$) varie de -59 % à -29 %, comparativement à -54 % à +69 % pour $\Delta\bar{H}_s$, tandis que l'erreur quadratique (ϵ_n) varie de 0,51 à 0,74 pour les périodes, comparativement à 0,35 à 1,25 pour les hauteurs significatives.

Comme les précédents, les résultats du tableau 5.4 varient peu d'une simulation à l'autre et d'un emplacement à l'autre. Le tableau 5.4 permet d'ajouter l'observation suivante:

- Si on considère séparément les simulations effectuées avec le modèle WAWSP et celles effectuées avec les modèles 1D, dans les deux cas, les meilleures prévisions de T_p correspondent aux simulations qui donnent les plus grandes hauteurs de vagues.

En mettant en parallèle les résultats des tableaux 5.4 et 5.2, on constate que les valeurs les plus élevées de $\Delta\bar{T}_p$ (les plus faiblement négatives) correspondent aux valeurs les plus élevées de $\Delta\bar{H}_s$. Toutefois, des valeurs élevées de $\Delta\bar{H}_s$ peuvent signifier une surestimation importante des hauteurs de vagues, comme c'est le cas pour la simulation W16-BOU à la bouée ULAV-92.

Tableau 5.3 - Tableau récapitulatif des comparaisons entre les périodes calculées et mesurées pour les années 1991, 1992 et 1993

Simulation	ENVC-91-92-93		ULAV-92-93		ULAV-91	
	$\Delta \bar{T}_p$	ϵ_η	$\Delta \bar{T}_p$	ϵ_η	$\Delta \bar{T}_p$	ϵ_η
W08-BOU	- 43 %	0,54 - 0,63	- 41 %	0,54 - 0,65	- 29 %	0,51
W08-TER	- 57 %	0,64 - 0,72	- 58 %	0,64 - 0,74	- 43 %	0,59
S77-BOU	- 51 %	0,60 - 0,69	- 46 %	0,58 - 0,67	- 31 %	0,54
S77-MJL	- 59 %	0,67 - 0,73	- 59 %	0,68 - 0,74	- 44 %	0,63

Tableau 5.4 - Tableau récapitulatif des comparaisons entre les périodes calculées et mesurées pour l'année 1992

a) Modèle WAWSP

Simulation	ENVC-92		ULAV-92	
	$\Delta \bar{T}_p$	ϵ_η	$\Delta \bar{T}_p$	ϵ_η
W08-BOU	- 38 %	0,54	- 35 %	0,54
W08-MAR	- 40 %	0,55	- 38 %	0,58
W08-TER	- 54 %	0,64	- 52 %	0,64
W08-SYN	- 49 %	0,59	- 47 %	0,61
W16-BOU	- 38 %	0,54	- 26 %	0,48

b) Modèles 1D

Simulation	ENVC-92		ULAV-92	
	$\Delta \bar{T}_p$	ϵ_η	$\Delta \bar{T}_p$	ϵ_η
S77-BOU	- 46 %	0,60	- 41 %	0,58
S77-MJL	- 57 %	0,67	- 55 %	0,68
S77-FLV	- 55 %	0,65	- 49 %	0,62
S84-BOU	- 31 %	0,57	- 31 %	0,56

Figure 5.10 - Simulations présentant les plus faibles erreurs quadratiques moyennes normalisées (ϵ_η).

5.5 Direction de propagation

Les tableaux 5.5 et 5.6 regroupent les erreurs quadratiques moyennes sur les directions (θ) évaluées à la bouée ULAV. L'analyse a été effectuée en considérant toutes les vagues et en ne considérant que les vagues mesurées dont la hauteur significative est égale ou supérieure à 0,5 m.

L'examen du tableau 5.5 conduit aux remarques suivantes:

- Aux deux emplacements de la bouée ULAV, les meilleures prévisions de θ ont été calculées avec le modèle WAWSP.

En raison de la précision des mesures de directions, on peut considérer que les deux simulations effectuées avec le modèle WAWSP donnent des erreurs quadratiques moyennes (ϵ_θ) semblables. Dans le meilleur cas, cette erreur est de 41° si on ne considère que les vagues de 0,5 m et plus. Il est impossible de comparer cette valeur aux résultats obtenus par d'autres auteurs avec le modèle WAWSP puisqu'aucun n'a utilisé de méthodes statistiques pour comparer les directions. Holthuijsen et Smith (1988), qui ont comparé les directions de vagues enregistrées par une bouée Wavec dans la mer du Nord pendant une période de six semaines, à celles calculées par des modèles 1D et 2D, ont trouvé des erreurs ϵ_θ variant de 40° à 70° lorsqu'ils considéraient toutes les vagues, et de 15° à 65° lorsqu'ils ne tenaient compte que des vagues de 1,5 m et plus. Par ailleurs, Schwab *et al.* (1984a) ont comparé, au moyen d'un diagramme de dispersion, les directions mesurées à une tour dans le lac Érié aux directions calculées avec le modèle WAWSP et ont conclu que la concordance était excellente (cf. section 3.6.3). Quant à Skafel et Bishop (1993), qui ont comparé les directions calculées par le modèle WAWSP et certains modèles 1D à des directions mesurées à plusieurs sites, ils estiment que les directions obtenues avec le modèle WAWSP à partir de petites cellules étaient plus exactes que celles obtenues avec de plus grandes cellules, mais que ce modèle ne s'était pas montré nettement supérieur aux modèles 1D (cf. section 3.6.8).

- L'erreur sur les directions est beaucoup plus faible lorsque les comparaisons ne tiennent compte que des vagues mesurées de 0,5 m et plus.

L'erreur ϵ_θ diminue de 15 à 40° si on ne considère que les vagues de 0,5 m et plus. Ces vagues représentent 35 % de toutes les vagues enregistrées à la bouée ULAV-92-93. et

27 % à la bouée ULAV-91. D'autres auteurs ont constaté une meilleure concordance entre les directions mesurées et celles calculées lorsqu'ils ne tenaient pas compte des vagues de faible amplitude (Holthuijsen et Smith, 1988). Dans l'estuaire du Saint-Laurent, cette amélioration des résultats peut être reliée au fait qu'une partie des vagues éliminées est constituée de houle et que cette houle peut avoir une direction différente de celles des vagues du vent (la figure B.1 montre qu'une partie des vagues de moins de 0,5 m enregistrées à la bouée ULAV peuvent être associées à de la houle en raison de leurs périodes longues).

- Pour les vagues de 0,5 m et plus, l'erreur est plus faible à la bouée ULAV-91 qu'à la bouée ULAV-92-93.

Si on ne considère que les résultats du modèle WAWSP, l'erreur ϵ_θ varie de 41° à 44° à la bouée ULAV-91, et de 48° à 64° à la bouée ULAV-92-93. Notons qu'au dernier endroit, les valeurs les plus élevées de ϵ_θ correspondent à la saison 1993.

Quant aux résultats du tableau 5.6, ils peuvent être résumés ainsi:

- À la bouée ULAV-92, dans l'ensemble, les prévisions de θ effectuées avec le modèle WAWSP sont meilleures que celles effectuées avec les modèles 1D.

Pour les vagues de 0,5 m et plus, l'erreur ϵ_θ varie de 48° à 55° avec le modèle WAWSP, et de 57° à 69° avec les modèles 1D, soit une différence d'environ 10° .

Par ailleurs, l'étude du climat des vagues présentée à la section 4.7 permet de tirer certaines conclusions en ce qui concerne la distribution des directions de vagues:

- À la bouée ENVC, les quatre simulations (deux avec le modèle WAWSP et deux avec le modèle SPM-77) donnent le secteur WSW dominant.

Ces prévisions ne peuvent être comparées à des observations étant donné que la bouée ENVC ne mesure pas la direction des vagues.

- À la bouée ULAV-92-93, les enregistrements indiquent que le secteur ENE est le plus fréquent, alors que les simulations donnent le secteur W ou WSW, ou au mieux, que les secteurs NE et W sont aussi fréquents l'un que l'autre (simulation W08-TER).

La figure 4.31 montre que, même si le modèle WAWSP donne des fréquences plus élevées pour le secteur NE que le modèle SPM-77, aucun des modèles n'estime la direction des vagues avec une précision acceptable. Ceci s'explique entre autres par le fait qu'une partie des vagues provenant du secteur ENE enregistrées à la bouée est probablement constituée de houle et qu'aucun des modèles utilisés ne tient compte de ce phénomène.

- À la bouée ULAV-91, les enregistrements montrent que le secteur WSW est dominant, tout comme les quatre simulations.

Toutefois, les enregistrements à la bouée indiquent que la direction NE est presque aussi fréquente que la direction WSW, ce qu'aucune simulation ne parvient à reproduire (cf. figure 4.33). Dans l'ensemble, les prévisions des directions sont meilleures qu'à la bouée ULAV-92-93, tout comme l'ont montré les résultats du tableau 5.5.

Tableau 5.5 - Tableau récapitulatif des erreurs quadratiques moyennes sur les directions pour les années 1991, 1992 et 1993

Simulation	ULAV-92-93		ULAV-91	
	$H_s > 0 \text{ m}$	$H_s \geq 0,5 \text{ m}$	$H_s > 0 \text{ m}$	$H_s \geq 0,5 \text{ m}$
	ϵ_θ	ϵ_θ	ϵ_θ	ϵ_θ
W08-BOU	71° - 79°	51° - 64°	80°	41°
W08-TER	70° - 85°	48° - 63°	74°	44°
S77-BOU	76° - 78°	57° - 62°	85°	45°
S77-MJL	95° - 107°	69° - 81°	80°	49°

Tableau 5.6 - Tableau récapitulatif des erreurs quadratiques moyennes sur les directions pour l'année 1992

a) Modèle WAWSP

Simulation	ULAV-92	
	$H_s > 0 \text{ m}$	$H_s \geq 0,5 \text{ m}$
	ϵ_θ	ϵ_θ
W08-BOU	71°	51°
W08-MAR	73°	51°
W08-TER	70°	48°
W08-SYN	76°	55°
W16-BOU	70°	50°

b) Modèles 1D

Simulation	ULAV-92	
	$H_s > 0 \text{ m}$	$H_s \geq 0,5 \text{ m}$
	ϵ_θ	ϵ_θ
S77-BOU	76°	57°
S77-MJL	95°	69°
S77-FLV	89°	59°
S84-BOU	76°	57°

Simulations présentant les plus faibles erreurs quadratiques moyennes (ϵ_θ).

5.6 Discussion des résultats

À la lumière des résultats qui viennent d'être exposés, nous répondrons d'abord à la première question posée au début de ce chapitre: *le modèle WAWSP permet-il de reconstituer adéquatement le climat des vagues dans l'estuaire du Saint-Laurent?* Il apparaît que le modèle WAWSP reconstitue adéquatement les hauteurs significatives des vagues, à condition que les données de vent utilisées représentent bien les conditions de vent à la surface de l'eau. Dans ce cas, l'écart entre les hauteurs calculées et celles mesurées est de 10 à 15 % en moyenne, une marge d'erreur semblable à celle rapportée par Schwab (cf. section 3.6.6). Quant aux périodes, les meilleurs résultats obtenus montrent qu'elles sont sous-estimées de 30 à 40 % en moyenne par le modèle 2D, ce qui est en deçà de la précision de 20 à 30 % rapportée par le même auteur. De plus, il appert que les simulations où les périodes sont le moins sous-estimées sont aussi celles qui surestiment largement les hauteurs significatives. Pour ce qui est des directions de propagation des vagues, les simulations effectuées avec le modèle WAWSP n'ont pas permis de les reproduire avec une précision acceptable, l'erreur quadratique moyenne variant de 41 à 64° pour les vagues mesurées de 0,5 m et plus. Il semble toutefois que la présence de houle dans l'estuaire peut avoir contribué à ces résultats. Par ailleurs, cette étude a montré que le modèle WAWSP était sensible à la résolution de la grille de calcul, contrairement à ce qu'avait proposé initialement son concepteur (Donelan, 1978).

La deuxième question posée était la suivante: *le modèle WAWSP fournit-il de meilleures prévisions de vagues que les modèles unidimensionnels en certains points de l'estuaire?* D'après les résultats de cette étude, il apparaît que oui, et cela pour les trois paramètres de vagues analysés. Dans certains cas, la différence entre les résultats du modèle WAWSP et ceux du modèle SPM-77 est faible, mais il ressort clairement que, pour l'ensemble des résultats, le modèle 2D permet d'obtenir une meilleure estimation des caractéristiques des vagues.

La faible concordance entre les vagues mesurées et celles calculées par le modèle WAWSP en ce qui regarde les périodes et les directions soulève des questions sur la qualité des données de vagues utilisées pour valider le modèle numérique. La précision des mesures de vagues dépend de deux facteurs: les appareils utilisés pour enregistrer le signal et les méthodes d'analyse du signal. En ce qui concerne les appareils de mesure, il n'a pas été possible d'obtenir d'informations sur la calibration de la bouée d'Environnement Canada (bouée ENVC). Quant à la bouée de l'université Laval (bouée ULAV), elle n'a pas été calibrée au cours des trois années d'enregistrement utilisées dans cette étude. De plus, les enregistrements à cette bouée contiennent de nombreuses données manquantes (de 28 % à 45 % selon l'année) en raison de

défaillances du système d'enregistrement (cf. section 4.3.2). Quant aux méthodes d'analyse, pour les deux bouées, le signal a été soumis à une analyse spectrale, l'une effectuée par le système de traitement de données de la bouée (bouée ENVC) et l'autre par Pêches et Océans Canada (bouée ULAV). Il n'a donc pas été possible d'évaluer les marges d'erreur sur les paramètres de vagues liées aux méthodes d'analyse utilisées. Les différences entre les vagues mesurées et celles calculées dans cette étude laissent toutefois croire que les marges d'erreur sont supérieures à celles obtenues avec d'autres méthodes (cf. section 4.3). En ce qui concerne la direction des vagues, Bishop et Donelan (1988) recommandent d'utiliser la méthode du maximum de vraisemblance au lieu de l'analyse spectrale lorsqu'une précision supérieure à $\pm 30^\circ$ est requise. Skafel et Bishop (1993) ont d'ailleurs observé une meilleure concordance entre les directions calculées et celles mesurées lorsque ces dernières avaient été évaluées par la méthode du maximum de vraisemblance (cf. section 3.6.8). Par conséquent, l'analyse des données brutes du signal aurait peut-être permis d'obtenir de meilleures estimations des paramètres de vagues, mais une telle analyse aurait dépassé le cadre de cette étude, sans compter que les données brutes n'étaient pas disponibles pour la bouée ENVC.

Les résultats de cette étude font aussi ressortir l'importance des données de vent utilisées pour générer les vagues. En effet, dans certains cas, les résultats des prévisions de vagues varient davantage en fonction des données de vent utilisées qu'en fonction du modèle numérique. De plus, le fait que l'utilisation d'un champ de vent non uniforme avec le modèle 2D ne conduise pas nécessairement à de meilleures prévisions de vagues qu'un champ de vent uniforme pourrait aussi dépendre de la qualité des données de vent. La brève analyse des données de vent présentée à l'annexe A révèle d'ailleurs des différences importantes entre les stations de vent de l'estuaire du Saint-Laurent. Il y aurait donc lieu de pousser davantage l'analyse de ces données dans le but d'évaluer adéquatement les vents responsables de la génération des vagues à la surface de l'eau dans cette région.

En ce qui concerne la performance du modèle WAWSP, Donelan (1978) mentionne que le modèle 2D est plus apte à prévoir adéquatement les hauteurs significatives que les périodes de pointe puisque H_s reflète la quantité de mouvement totale dans le champ de vagues, alors que T_p est relié à H_s par le biais d'un spectre moyen obtenu empiriquement. Les hypothèses simplificatrices sur la forme du spectre JONSWAP (cf. section 3.2) ont donc plus d'influence sur le deuxième paramètre que sur le premier. De plus, le modèle WAWSP, conçu pour les Grands Lacs, ne permet pas de tenir compte de la houle. Sur le plan d'eau étudié, ouvert sur le golfe du Saint-Laurent, on peut présumer que de la houle provenant du golfe ou de l'Atlantique influence les conditions de vagues.

Pour améliorer les prévisions du modèle WAWSP, deux avenues pourraient être explorées: lisser les données de vent, comme l'ont fait d'autres auteurs (cf. section 3.6) et ajuster le paramètre λ , qui représente la fraction de la contrainte de vent qui produit une augmentation ou une diminution de la quantité de mouvement, de façon à mieux refléter les conditions de génération des vagues dans l'estuaire du Saint-Laurent (cf. section 3.3). En effet, cette étude montre que les hauteurs significatives et les périodes de pointe sont sous-estimées par le modèle WAWSP. Ces résultats pourraient s'expliquer de deux manières: soit que le processus de croissance des vagues est interrompu par de trop fréquents changements de la direction du vent, soit que le flux de quantité de mouvement transmis à la surface de l'eau par le vent est sous-estimé. Le lissage des données de vent et l'augmentation de la valeur de λ permettraient d'accroître à la fois la hauteur significative et la période de pointe puisque les deux paramètres sont liés par la forme du spectre et les mécanismes de croissance des vagues.

Finalement, notons que cette étude s'est limitée à comparer les vagues prédites par le modèle WAWSP à des vagues mesurées en trois points de l'estuaire, alors qu'un modèle 2D permet de connaître les conditions de vagues sur toute la surface du plan d'eau. D'autres auteurs (Liu *et al.*, 1984) ont observé une très bonne concordance entre les champs de vagues générés par le modèle WAWSP et les cartes synoptiques des hauteurs de vagues (cf. section 3.6.5). Les données disponibles pour cette étude ne permettaient pas de faire une telle comparaison.

CHAPITRE 6

CONCLUSION

Cette étude avait pour but de vérifier si le modèle bidimensionnel WAWSP (Donelan, 1977) pouvait être utilisé pour reconstituer le climat des vagues dans l'estuaire du Saint-Laurent. Il s'agit d'un modèle paramétrique basé sur l'équation de conservation de la quantité de mouvement, contrairement à la majorité des autres modèles bidimensionnels, qui reposent sur l'équation de conservation de l'énergie. Conçu pour prévoir les vagues limitées par le fetch, ce modèle est utilisé depuis plusieurs années pour la prévision journalière des vagues sur les Grands Lacs.

Les prévisions du modèle WAWSP ont été comparées à des mesures effectuées dans l'estuaire du Saint-Laurent au cours de trois saisons (1991, 1992 et 1993) par une bouée météorologique d'Environnement Canada et par une bouée de type Wavec appartenant à l'université Laval. La première permet d'enregistrer la hauteur et la période des vagues, tandis que la seconde enregistre en plus leur direction. Les prévisions du modèle bidimensionnel ont aussi été comparées aux prévisions obtenues à l'aide des modèles unidimensionnels du *Shore Protection Manual* (U.S. Army Corps of Engineers, 1977 et 1984).

Les résultats obtenus montrent que, pour l'ensemble des simulations, le modèle WAWSP fournit de meilleures estimations des paramètres des vagues que les modèles unidimensionnels (1D). Les prévisions sont excellentes pour la hauteur significative des vagues, dans la mesure où les données de vent utilisées représentent bien les conditions de vent à la surface de l'eau. Même si le modèle WAWSP fournit de meilleures estimations des périodes que les modèles 1D, celles-ci restent largement inférieures aux périodes mesurées. Il était prévisible que l'erreur sur les périodes soit supérieure à celle sur les hauteurs de vagues, mais les enregistrements laissent croire qu'à la bouée d'Environnement Canada notamment, les valeurs des périodes sont surévaluées. Quant aux directions de propagation des vagues, le modèle WAWSP fournit des estimations dont l'erreur quadratique moyenne est plus faible que celle obtenue avec les modèles 1D. Toutefois, l'estimation des directions manque de précision, notamment en raison de la présence de houle dans l'estuaire, phénomène dont ne tient pas compte le modèle WAWSP.

La faible concordance entre les vagues mesurées et celles calculées par le modèle WAWSP en ce qui regarde les périodes et les directions soulève des questions sur la qualité des données de vagues utilisées pour valider le modèle numérique. La bouée d'Environnement Canada est d'abord une station météorologique qui n'enregistre pas la direction des vagues, un paramètre essentiel à la définition d'un champ de vagues. De plus, les enregistrements utilisés pour cette étude contenaient de nombreuses valeurs erronées des périodes. Quant à la bouée de l'université Laval, la fiabilité de ses données a été réduite par de fréquentes pannes de son système d'enregistrement et par l'absence de calibration durant la période étudiée. De plus, dans les deux cas, il y a lieu de croire que les méthodes d'analyse du signal utilisées pour estimer les paramètres de vagues n'étaient pas optimales. Les données disponibles actuellement pour valider des modèles de prévision de vagues dans l'estuaire du Saint-Laurent sont donc déficientes.

Par ailleurs, cette étude confirme que les données de vent peuvent constituer une source d'erreur majeure dans la prévision des vagues. D'ailleurs, l'analyse des vents enregistrés aux stations terrestres et maritimes d'Environnement Canada, de même que de ceux reconstitués à des stations dites "synthétiques", révèle des différences importantes entre les stations d'une même région, autant en ce qui regarde la direction du vent que sa vitesse. Étant donné la difficulté de transformer des vents mesurés sur terre en vents sur l'eau, la prévision des vagues serait grandement améliorée si davantage de données de vent mesurées sur l'eau étaient disponibles.

Cette étude permet donc de conclure que le modèle WAWSP peut être utilisé pour reconstituer les vagues sur un plan d'eau semi-ouvert comme l'estuaire du Saint-Laurent, à condition que le champ de vent soit généré adéquatement et que la grille de calcul couvre tous les fetchs des

points où l'on désire connaître les vagues. Dans cette étude, par exemple, la zone de reconstitution des vagues mesure 200 km de longueur, mais la grille de calcul s'étend sur 650 km, ce qui augmente grandement le temps de calcul. Cependant, l'investissement en temps de calcul peut être justifié si on considère que le modèle calcule les paramètres des vagues à tous les points de la grille et que ces résultats peuvent être conservés en vue d'une utilisation future.

Finalement, il y aurait lieu de considérer l'utilisation de données satellitaires pour valider les champs de vagues générés par le modèle WAWSP. Le satellite européen ERS-1, par exemple, fournit des données sur les hauteurs de vagues qui pourraient être comparées aux prévisions du modèle bidimensionnel. Les données qu'il enregistre sur la vitesse et la direction du vent à la surface de l'eau pourraient également servir à valider les champs de vent générés à partir des stations météorologiques terrestres.

RÉFÉRENCES

- Allender, J., Audunson, T., Barstow, S.F., Bjerken, S., Krogstad, H.E., Steinbakke, P., Vartdal, L., Borgman, L.E., Graham, C. (1989). The WADIC project: A comprehensive field evaluation of directional wave instrumentation. *Ocean Engineering*, 16, 5/6: 505-536.
- April, A. (1995). *Application d'un modèle numérique bidimensionnel de prévision de vagues à l'estuaire du Saint-Laurent*. Mémoire de maîtrise, Université Laval.
- Baird, W.F., Glodowski, C.W. (1978). Estimation of wave energy using a wind wave hindcast technique. *Proceedings of the International Symposium on Wave and Tidal Energy*. Canterbury, Angleterre, F3: 39-54.
- Barnett, T.P. (1968). On the generation, dissipation and prediction of ocean wind waves. *Journal of Geophysical Research*, 73: 513-529.
- Bishop, C.T., Donelan, M.A. (1988). Waves and Wave Forecasting, in Cheremisinoff, P.N., Cheremisinoff, N.P., Cheng, S.L. (Éd.): *Civil Engineering Practice, 3: Geotechnical/Ocean Engineering* (pp. 653-695). Lancaster, Technomic.
- Bretschneider, C.L. (1952). Revised wave forecasting relationships. *Proceedings of 2nd Conference on Coastal Engineering*. Berkeley, Council on Wave Research, pp. 1-5.
- Bretschneider, C.L. (1958). Revisions in wave forecasting: deep and shallow water. *Proceedings of 6th Conference on Coastal Engineering*. Berkeley, Council on Wave Research, pp. 30-67.
- Bretschneider, C.L. (1973). Prediction of waves and currents. *Look Laboratory (Hawaii)*, III, 1: 1-17.
- Cardone, V.J., Pierson, W.J., Ward, E.G. (1976). Hindcasting the directional spectra of hurricane-generated waves. *Journal of Petroleum Technology*, 261: 91-127.
- Clodman, S. (1983). *Testing and future application of the Donelan numerical lakewave model*. Rapport interne MSRB-83-4, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview.

- Desjardins, L., Ouellet, Y. (1984). Modèles numériques utilisés pour la conception des ouvrages maritimes. *Comptes rendus du Colloque sur la simulation numérique appliquée au domaine de la ressource hydrique: dans le cadre du 52^e congrès annuel de l'ACFAS, les 9 et 10 mai 1984, Université Laval*. Sainte-Foy, Centre de recherches sur l'eau de l'Université Laval, pp. 187-224.
- De Voogt, W.J.P., Komen, G.J., Bruinsma, J. (1986). The KNMI operational wave prediction model GONO. *Proceedings of the Symposium on Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface, Miami, 1981*. New York, Plenum Press.
- Donelan, M.A. (1977). *A simple numerical model for wave and wind stress prediction*. Rapport non publié. Centre canadien des eaux intérieures, Environnement Canada, Burlington.
- Donelan, M.A. (1978). *A simple numerical model for wave and wind stress prediction* (version révisée). Rapport non publié, Centre canadien des eaux intérieures, Environnement Canada, Burlington.
- Donelan, M.A. (1980). Similarity theory applied to the forecasting of wave heights, periods, and directions. *Comptes rendus de la Conférence canadienne sur le littoral de 1980*. Ottawa, Conseil national de recherches du Canada, pp. 47-61.
- Donelan, M.A., Hamilton, J., Hui, W.H. (1985). Directional spectra of wind-generated waves. *Philosophical Transactions. Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 315: 509-562.
- Donelan, M.A., Pierson, W.J. (1983). The sampling variability of estimates of spectra of wind-generated gravity waves. *Journal of Geophysical Research*, 88, C7: 4381-4392.
- Ewing, J.A. (1971). A numerical wave prediction method for the North Atlantic Ocean. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 24: 241-261.
- Fleming, C.A., Philpott, K.L., Pinchin, B.M. (1984). *Evaluation of coastal sediment transport techniques. Phase 1: Implementation of alongshore sediment transport model and calibration of wave hindcasting procedure*. Canadian Coastal Sediment Study, rapport n° C2S2-10, Conseil national de recherches du Canada.

- Gelci, R., Cazalé, H., Vassal, J. (1957). Prédiction de la houle. La méthode des densités spectroangulaires. *Bulletin d'information du Comité central d'océanographie et d'étude des côtes*, 9: 416-435.
- Golding, B. (1983). A wave prediction system for real-time sea state forecasting. *Quarterly Journal. Royal Meteorological Society*, 109: 393-416.
- Günther, H., Rosenthal, W. (1985). The Hybrid Parametrical (HYPA) Wave Model, in The SWAMP Group: *Ocean wave modeling* (pp. 211-214). New York, Plenum Press.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Suppl. A (8), n° 12.
- Hasselmann, K., Ross, D.B., Sell, W. (1976). A parametric wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 6(2): 200-238.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K. (1985). The wave model EXACT-NL, in The SWAMP Group: *Ocean wave modeling* (pp. 249-251). New York. Plenum Press.
- Hawkes, P.J. (1987). A wave hindcasting model, in Society for Underwater Technology Staff (Éd.): *Advances in underwater technology, ocean science and offshore engineering*, Vol. 12: *Modelling the offshore environment*. Londres, Graham & Trotman.
- Hodson, J., Donelan, M.A. (1979). *The computational scheme of a numerical model for wave and wind stress prediction* (version révisée). Rapport non publié. Centre canadien des eaux intérieures, Environnement Canada, Burlington.
- Holthuijsen, L.H., Smith, D.R. (1988). An evaluation of model estimates of ocean wave directions. *Ocean Engineering*, 15, 2: 127-137.
- Kuik, A.J., Van Vledder, G.P., Holthuijsen, L.H. (1988). A method for the routine analysis of pitch-and-roll buoy wave data. *Journal of Physical Oceanography*, 18: 1020-1034.

- Liu, P.C., Schwab, D.J., Bennett, J.R. (1984). Comparison of a two-dimensional wave prediction model with synoptic measurements in Lake Michigan. *Journal of Physical Oceanography*, 14: 1514-1518.
- Mardia, K.V. (1972). *Statistics of directional data*. New York, Academic Press.
- Massel, S.R. (1989). *Hydrodynamics of coastal zones*. Amsterdam, Elsevier.
- Ouellet, Y., Pelletier, P. (1993). *Climatologie des vagues dans l'estuaire du Saint-Laurent. Ajustement d'un modèle de reconstitution des vagues sur la base des données recueillies en 1991 et 1992 à Mont-Louis*. Rapport GCS-93-03 préparé pour Environnement Canada. Département de génie civil, Université Laval, Sainte-Foy.
- Pierson, W.L., Tick, L.J., Baer, L. (1966). Computer based procedures for preparing global wave forecasts and wind field analysis capable of using wave data obtained by a spacecraft. *Proceedings of Sixth Naval Hydrodynamic Symposium*. Publication ACR-136, Office of Naval Research, Department of the Navy, Washington, D.C., pp. 499-533.
- Pierson, W.L., Moskowitz, L.A. (1964). A proposed spectral form for fully developed sea based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskiy. *Journal of Geophysical Research*, 69: 5181-5190.
- Resio, D.T. (1981). The estimation of wind wave-generation in a discrete spectral model. *Journal of Physical Oceanography*, 11: 510-525.
- Schwab, D.J. (1989). A numerical wave prediction model for personal computers. *Coastal Engineering: Proceedings of 21st Conference, Costa del Sol-Malaga, Spain, 1988*. New York. American Society of Civil Engineers, pp. 2991-2997.
- Schwab, D.J., Bennett, J.R., Liu, P.C., Donelan, M.A. (1984a). Application of a simple numerical wave prediction model to Lake Erie. *Journal of Geophysical Research*, 89. C3: 3586-3592.

- Schwab, D.J., Bennett, J.R., Lynn, E.W. (1984b). *A two-dimensional lake wave prediction system*. NOAA Technical Memorandum ERL GLERL-51, Great Lakes Environmental Research Laboratory, Ann Arbor.
- Skafel, M.G., Bishop, C.T. (1991). *Comparaison of wave climate models*. NWRI Contribution 91-101. Centre canadien des eaux intérieures, Burlington.
- Skafel, M.G., Bishop, C.T. (1993). Validity of wave direction predictions. *Comptes rendus de la Conférence canadienne sur le littoral de 1993*. Ottawa, Conseil national de recherches du Canada, pp. 81-93.
- Sobey, R.J. (1986). Wind-wave prediction. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 18: 149-172.
- Sverdrup, H.U., Munk, W.H. (1947). *Wind, sea, and swell: Theory of relations for forecasting*. Publication n° 601, U.S. Navy Hydrographic Office, Washington, D.C.
- The SWAMP Group (1985). *Ocean wave modeling*. New York, Plenum Press.
- The WAMDI Group (1988). The WAM model. A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12): 1775-1810.
- Uji, T. (1986). The MRI wave model. *Proceedings of the Symposium on Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface, Miami, 1981*. New York. Plenum Press.
- U.S. Army Corps of Engineers (1977). *Shore Protection Manual*. Department of the Army. Washington, D.C.
- U.S. Army Corps of Engineers (1984). *Shore Protection Manual*. Department of the Army. Washington, D.C.
- Van der Vlugt, A.J.M. (1982). The WAVEC buoy for routinely measuring the direction of sea waves. *Proceedings of the International Conference on Wave and Wind Directionality, Paris, 1981*. Paris. Technip, pp. 131-142.

Annexe A

STATISTIQUES DES DONNÉES DE VENT

Les données de vent provenant de 13 stations (cf. section 4.2) sont analysées selon leurs directions. Ces données sont constituées d'enregistrements horaires de la vitesse (U) et de la direction du vent (θ_u), où la direction est donnée en dizaines de degrés (36 secteurs). Une analyse est effectuée en regroupant les données selon 16 secteurs de la rose des vents, puis en regroupant les 16 secteurs en quatre quadrants (cf. figure A.1). Les statistiques sont calculées pour la période du 1^{er} mai au 30 novembre des années 1991, 1992 et 1993.

Toutes les vitesses sont mesurées à une hauteur de 10 m, sauf celles de la bouée de Mont-Louis, dont l'anémomètre est situé à 5 m au-dessus de la surface de l'eau. Les vitesses à cette station sont donc ramenées à une hauteur de 10 m en faisant l'hypothèse d'un profil de vitesse logarithmique:

$$\frac{U_5}{U_{10}} = 1 + \frac{1}{\kappa} C_D^{1/2} \ln\left(\frac{5}{10}\right) \quad (\text{A.1})$$

où la valeur de la constante de von Karman, κ , est de 0,4 et celle du coefficient de traînée, C_D , de 0,0015.

Le tableau A.1 présente, pour chaque station, les statistiques de la vitesse du vent (vitesse moyenne, écart type et vitesses maximale), ainsi que les distributions par quadrant.

La figure A.2 montre les distributions de la direction du vent selon 16 secteurs, de même que les vitesses moyennes par direction.

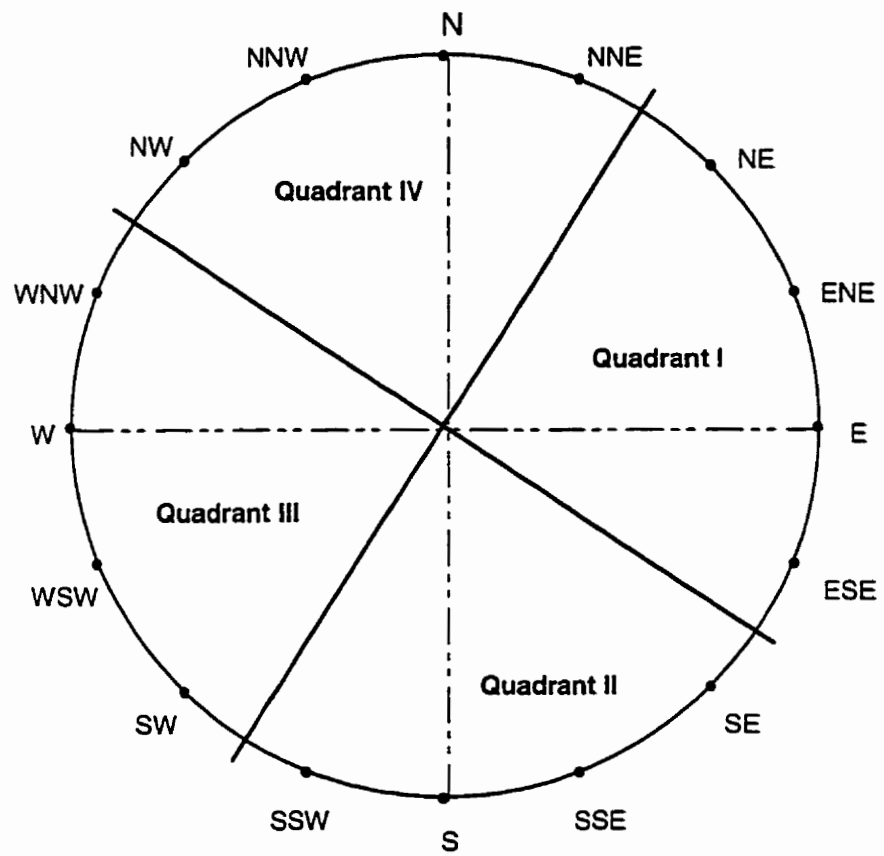


Figure A.1 - Rose des vents

Tableau A.1 - Statistiques de la vitesse du vent et distributions par quadrant
(1^{er} mai 1991 au 30 novembre 1993, n=15408)

Station de vent	Toutes les directions				Quadrant I		Quadrant II		Quadrant III		Quadrant IV	
	ndm (1)	moy (U) (km/h)	s (U) (km/h)	max (U) (km/h)	moy (U) (km/h)	f (%)	moy (U) (km/h)	f (%)	moy (U) (km/h)	f (%)	moy (U) (km/h)	f (%)
Stations terrestres												
Baie-Comeau	31	13,7	8,9	61	14,1	28,7	12,9	10,9	16,0 *	42,0	10,9	18,4
Mont-Joli	39	14,9	9,6	69	15,1	17,2	15,4	29,1	17,6 *	42,9	13,8	10,8
Sept-Îles	43	13,0	8,7	56	15,2 *	34,3	11,5	13,1	14,1	24,7	13,1	27,8
Stations maritimes												
Bouée de Mont-Louis	1558	22,3	12,0	71	20,9	27,3	12,8	12,5	26,3	47,4	19,5	12,8
Cap-Chat	1195	25,5	16,8	102	19,0	17,9	24,3	16,2	29,1 *	54,4	20,7	11,5
Cap de la Madeleine	5567 (2)	19,1	10,9	83	16,0	14,7	17,6	28,3	20,8 *	45,9	20,1	11,1
Corossol	5920 (3)	21,7	13,2	109	26,3 *	31,6	22,6	16,5	20,7	29,7	17,9	22,3
Pointe des Monts	2436	18,8	10,9	72	19,7	20,9	14,6	3,2	21,5 *	53,1	12,8	22,7
Stations synthétiques												
Fleuve I	795	18,4	9,6	59	19,4	36,3	14,2	11,1	23,1 *	26,5	18,8	26,1
Fleuve II	733	19,8	8,7	61	18,5	28,5	18,1	10,6	23,5 *	41,6	18,7	19,3
Fleuve III	733	19,8	8,7	61	21,0	30,4	17,2	8,4	22,4 *	44,6	16,7	16,6
Fleuve VIII	1477	18,4	8,9	89	16,1	19,9	15,5	23,9	21,1 *	48,3	17,4	7,9
Fleuve IX-X	798	19,3	8,9	66	21,2	19,9	18,8	23,1	22,2 *	47,7	17,6	9,3

(1) Nombre de données manquantes

(2) Aucune donnée en 1993

(3) Aucune donnée en 1991

Direction dominante

• Maximum des vitesses moyennes

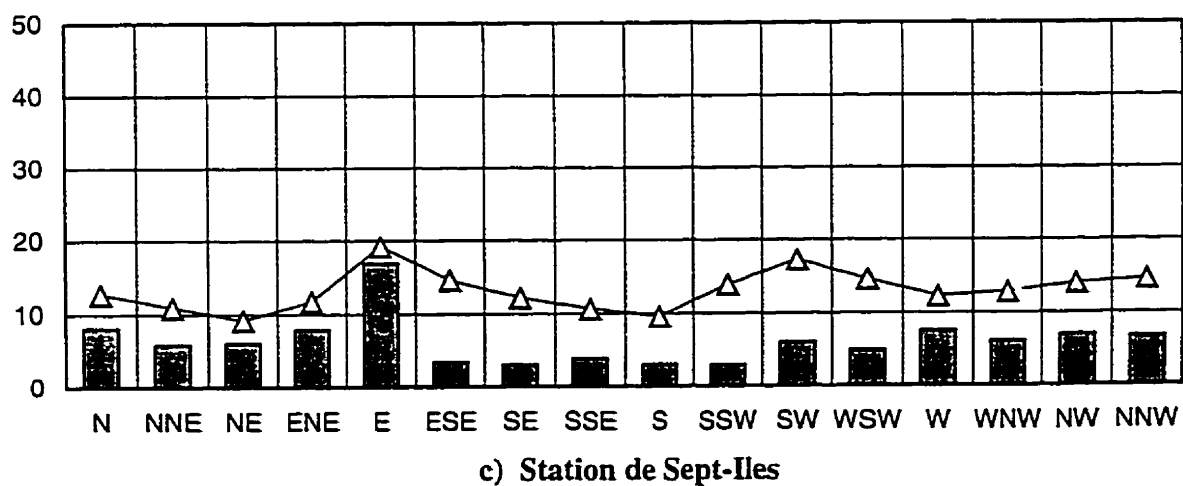
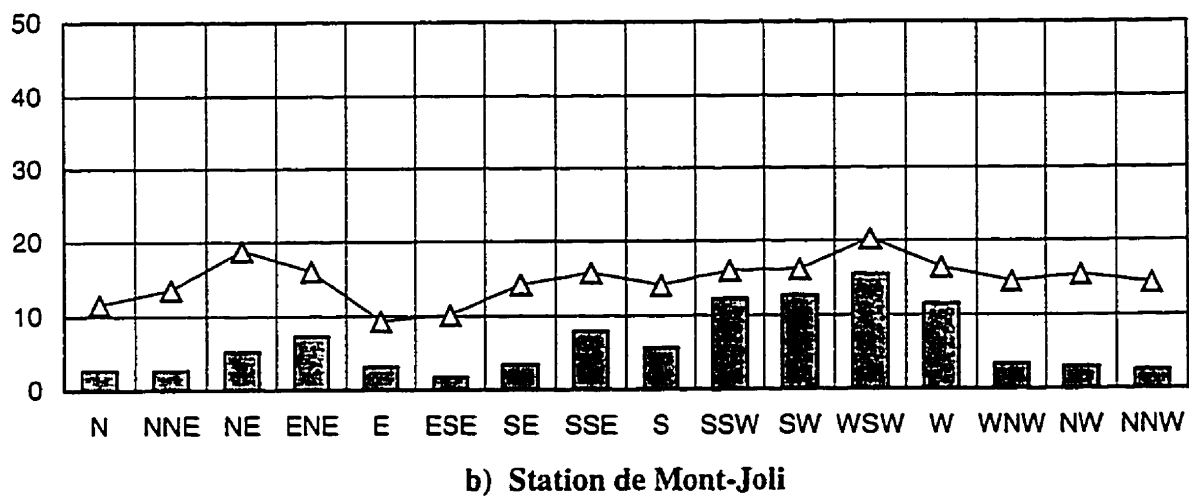
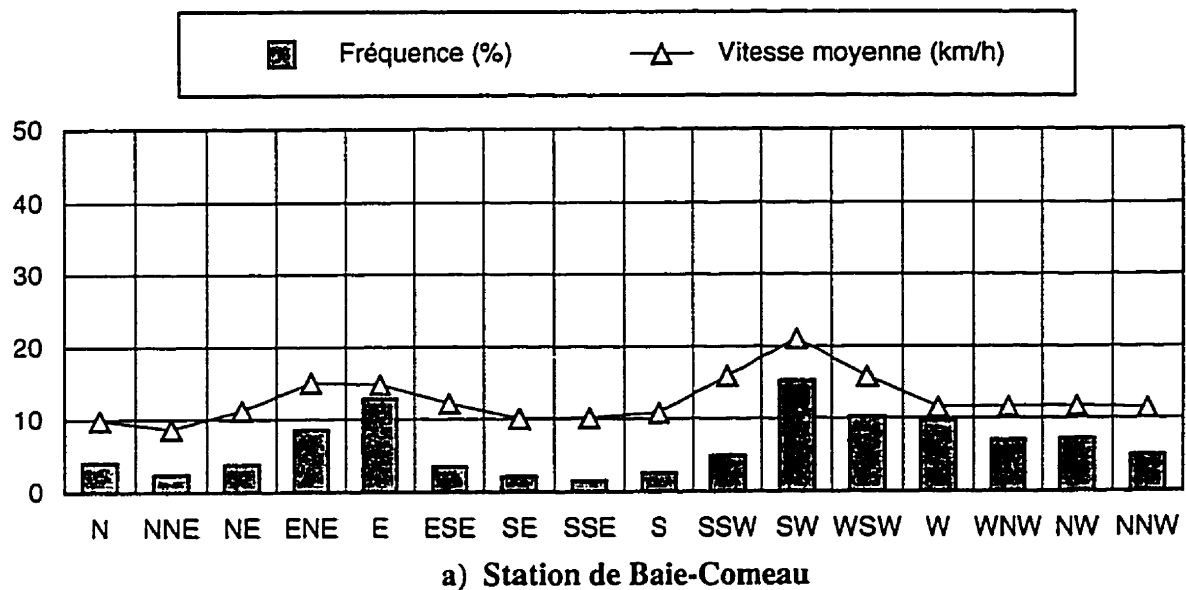
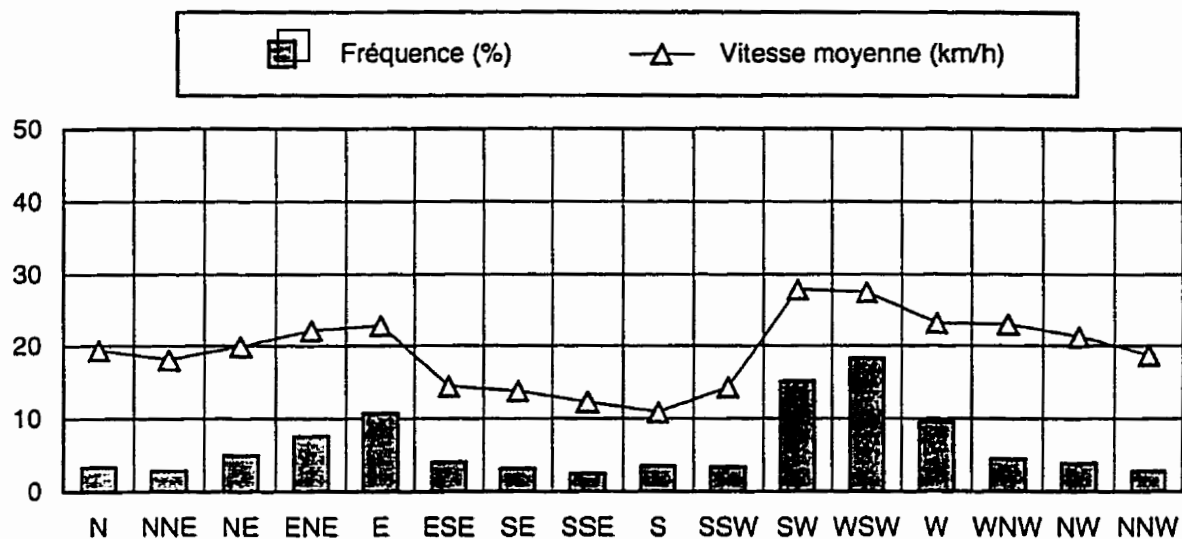
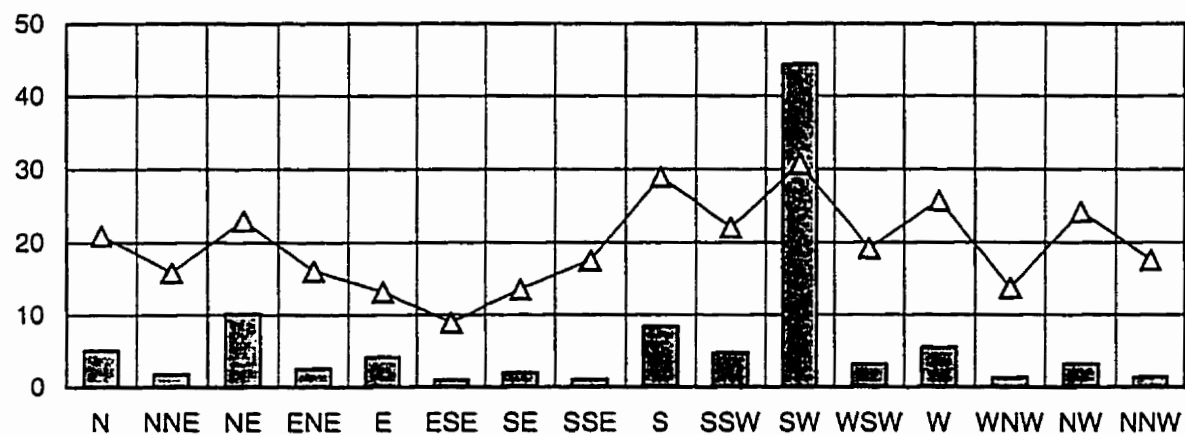


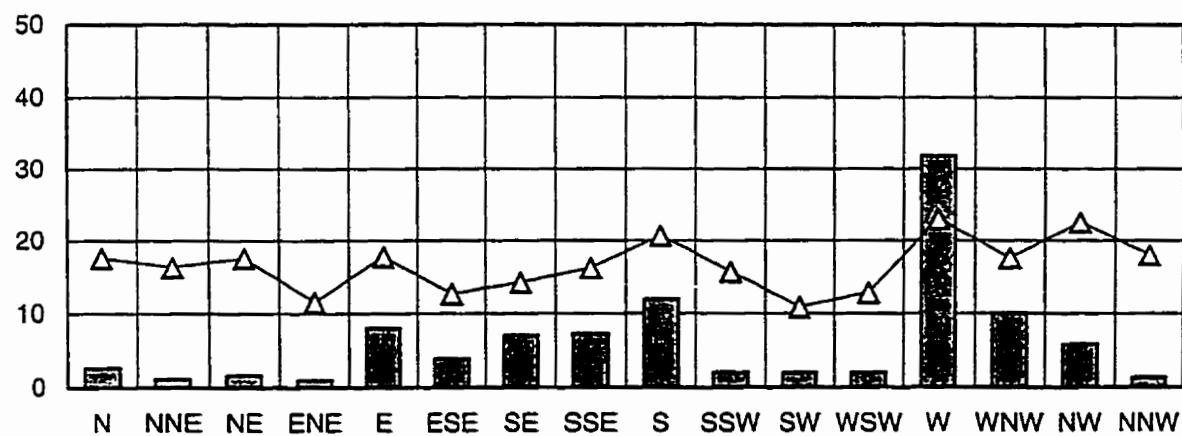
Figure A.2 - Distributions de la direction du vent et vitesses moyennes par direction



d) Bouée de Mont-Louis

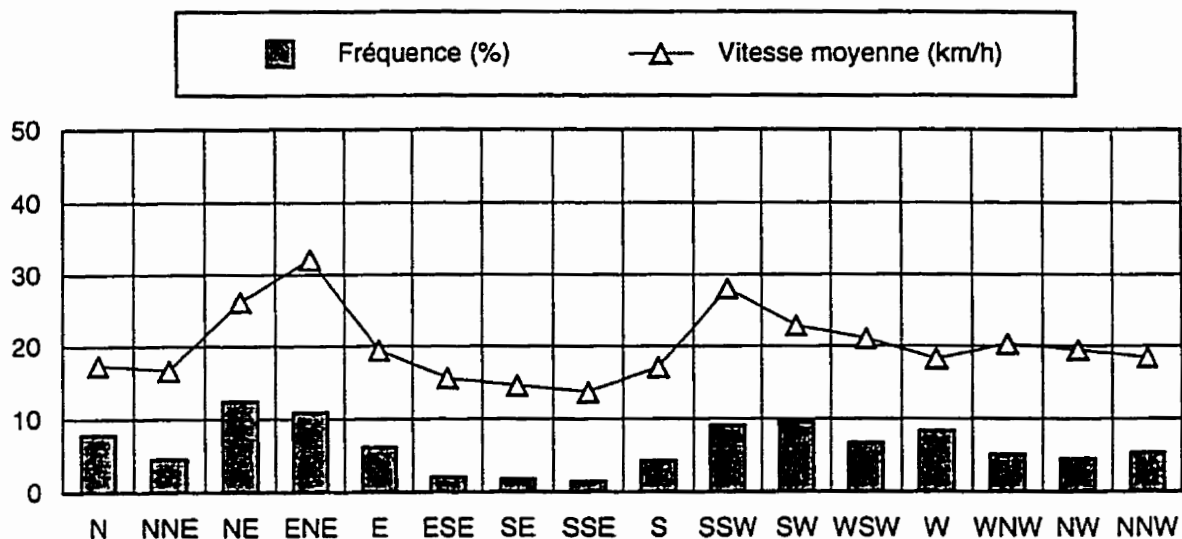


e) Station de Cap-Chat

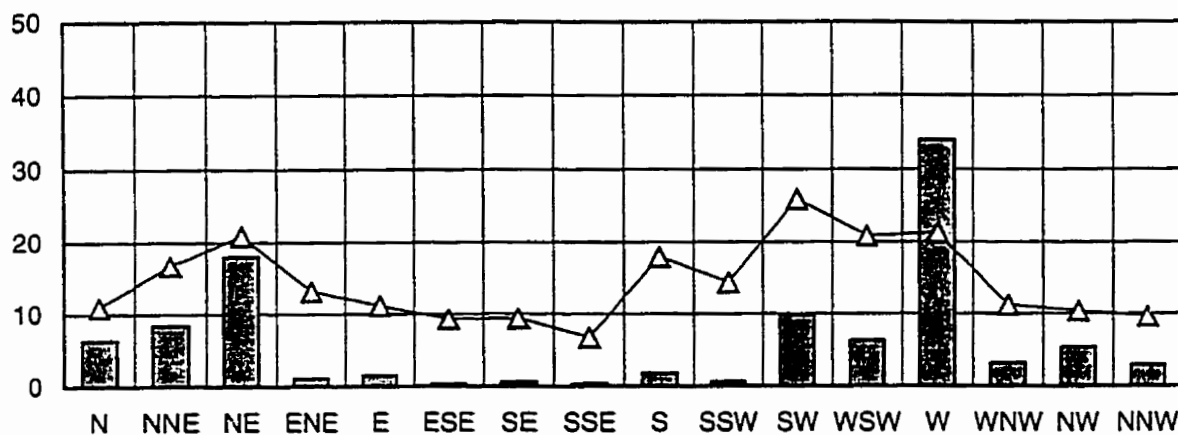


f) Station du cap de la Madeleine

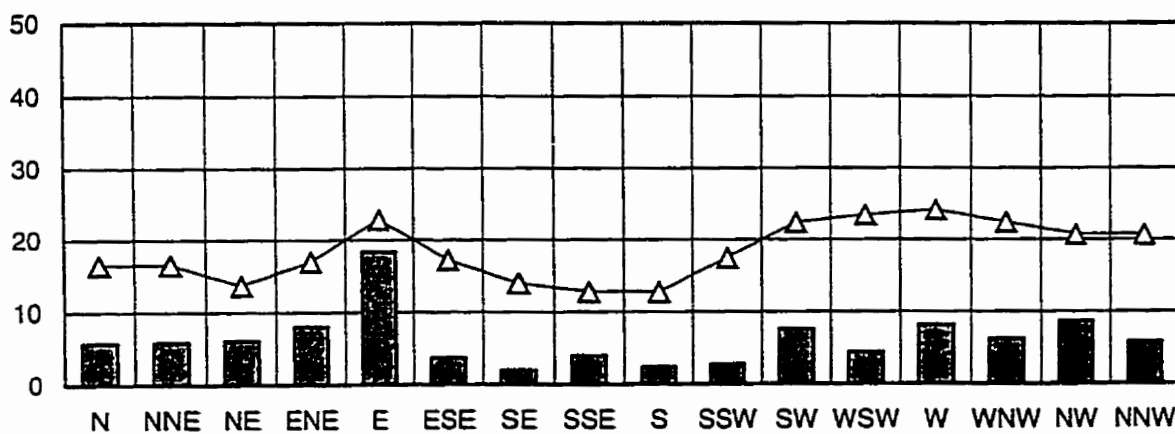
Figure A.2 - Distributions de la direction du vent et vitesses moyennes par direction (suite)



g) Station de Corossol

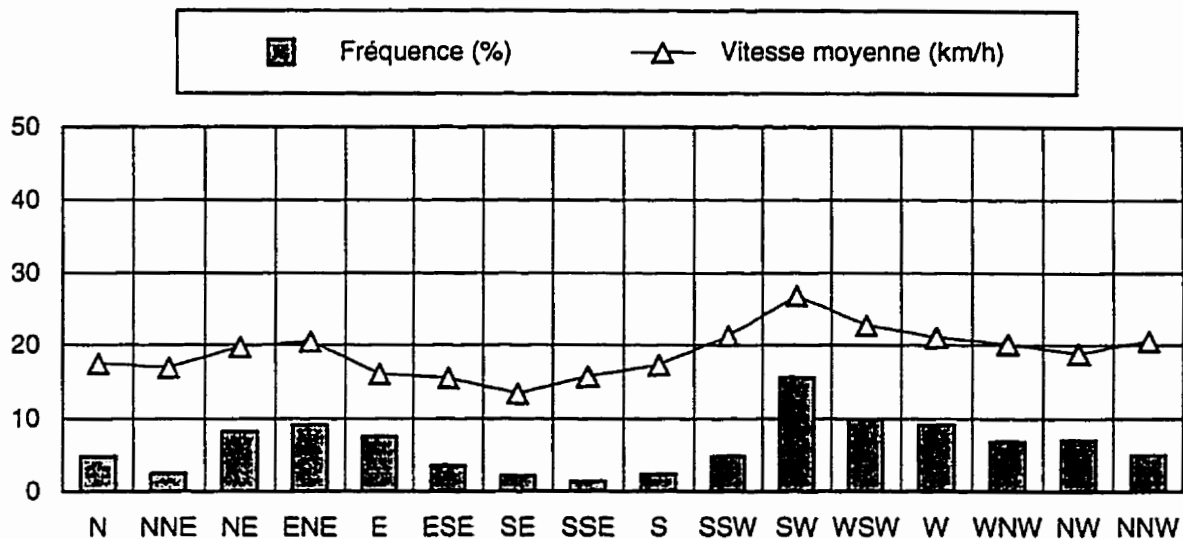


h) Station de la pointe des Monts

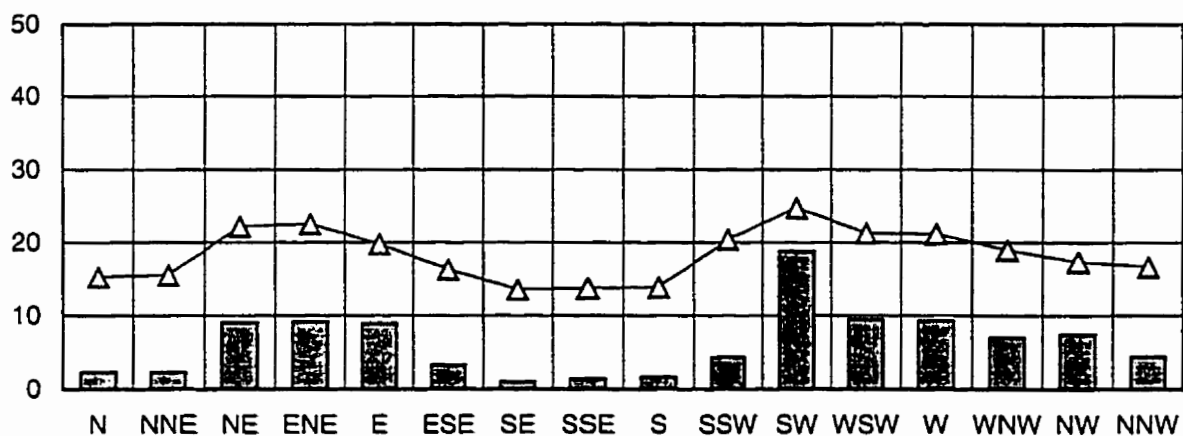


i) Station Fleuve I

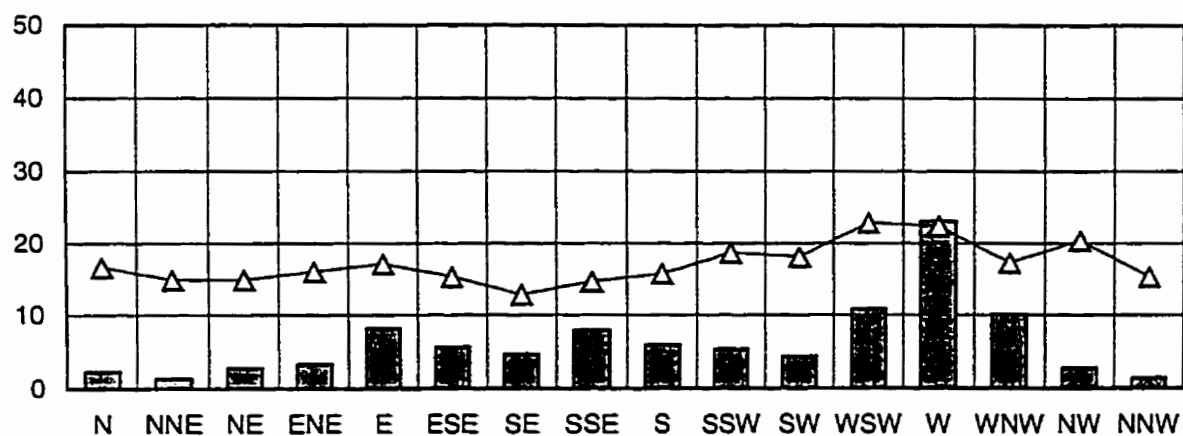
Figure A.2 - Distributions de la direction du vent et vitesses moyennes par direction (suite)



j) Station Fleuve II



k) Station Fleuve III



l) Station Fleuve VIII

Figure A.2 - Distributions de la direction du vent et vitesses moyennes par direction (suite)

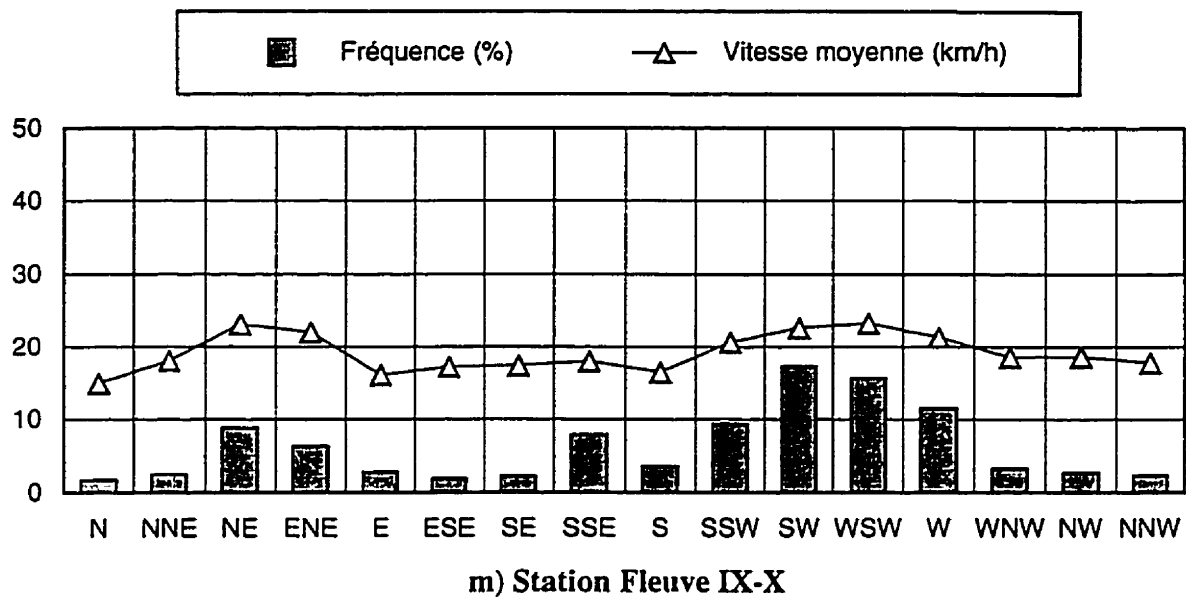


Figure A.2 - Distributions de la direction du vent et vitesses moyennes par direction
(suite)

Annexe B

STATISTIQUES DES DONNÉES DE VAGUES

Les données de vagues enregistrées à la bouée d'Environnement Canada (ENVC) et à celle de l'université Laval (ULAV) au cours des années 1991, 1992 et 1993 sont analysées. Il est à noter que les périodes d'enregistrement ne sont pas identiques pour les deux bouées et diffèrent d'une année à l'autre (cf. tableau 4.4). Pour la bouée ENVC, les données sont constituées d'enregistrements horaires de la hauteur significative (H_S) et de la période de pointe du spectre (T_p). À la bouée ULAV, les enregistrements comprennent en plus la direction des vagues (θ_p). Par ailleurs, comme les enregistrements à cette bouée ont été effectués à des intervalles variables, les données horaires ont dû être interpolées (cf. section 4.3.2).

Le tableau B.1 présente, pour les deux bouées et les trois années d'enregistrement, les statistiques des hauteurs significatives et des périodes de pointe (moyenne, écart type et maximum). Des tests effectués sur les moyennes de H_S et de T_p montrent que les différences observées entre l'année 1992 et les deux autres années sont statistiquement significatives à un niveau de 0,001. Par exemple, les tests comparant les hauteurs significatives à la bouée ENVC permettent de dire que les moyennes de 1991 et de 1993 sont inférieures à celle de 1992 avec un niveau de signification de 0,001.

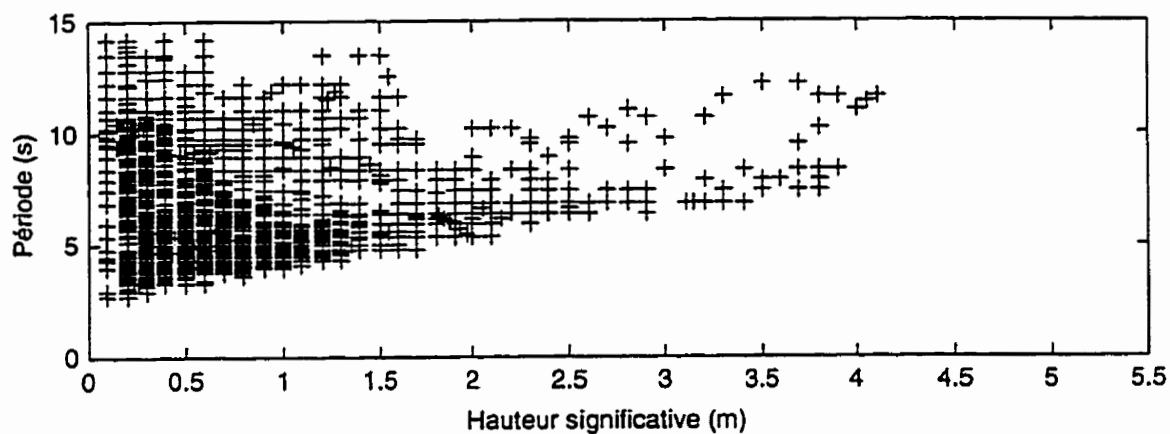
Les graphiques de la figure B.1 illustrent les périodes de pointe en fonction des hauteurs significatives. Les périodes de 15 s et plus enregistrées à la bouée ENVC (cf. section 4.3.1) ne sont pas utilisées dans les calculs ni dans les graphiques.

Pour les données de la bouée ULAV, une analyse est effectuée en regroupant les données selon 16 secteurs, puis en regroupant les 16 secteurs en quatre quadrants (cf. figure A.1). Le tableau B.2 présente la distribution des vagues par quadrant en considérant toutes les vagues et en ne considérant que les vagues supérieures à 0,5 m. La figure B.2 montre les distributions de la direction des vagues selon 16 secteurs, de même que les hauteurs significatives moyennes par direction.

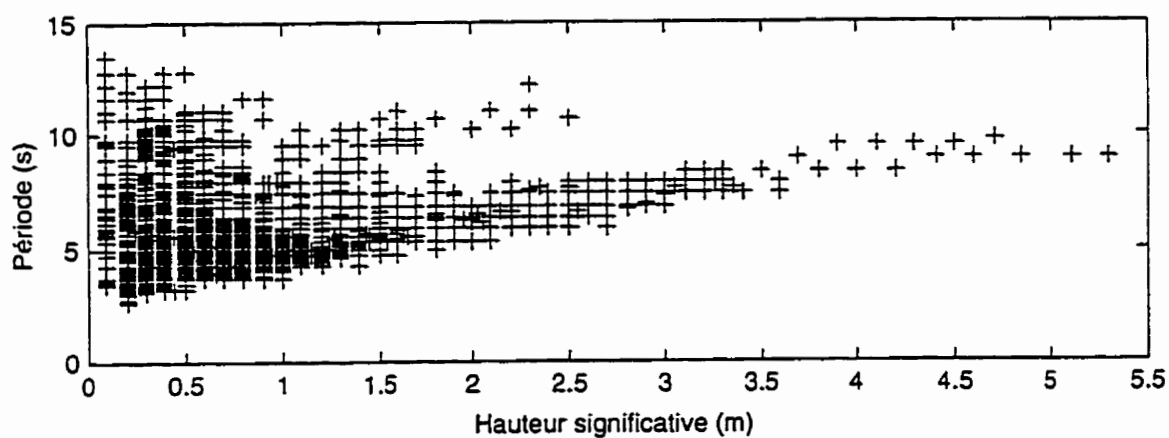
Tableau B.1 - Statistiques des hauteurs significatives et des périodes de pointe

Fichier	Hauteurs significatives (m)				Périodes de pointe (s)			
	n	moy (H_s)	s (H_s)	max (H_s)	n ⁽¹⁾	moy (T_p)	s (T_p)	max (T_p)
ENVC-91	4727	0,81	0,57	4,10	3905	6,09	2,13	14,20
ENVC-92	4705	0,87	0,62	5,30	3779	5,76	1,58	13,50
ENVC-93	4784	0,79	0,57	4,30	3827	6,03	1,81	14,20
ULAV-91	2134	0,36	0,29	1,61	2134	3,94	1,32	10,53
ULAV-92	1890	0,46	0,28	1,85	1890	4,55	1,46	9,52
ULAV-93	1306	0,41	0,31	1,67	1306	4,82	1,60	10,45

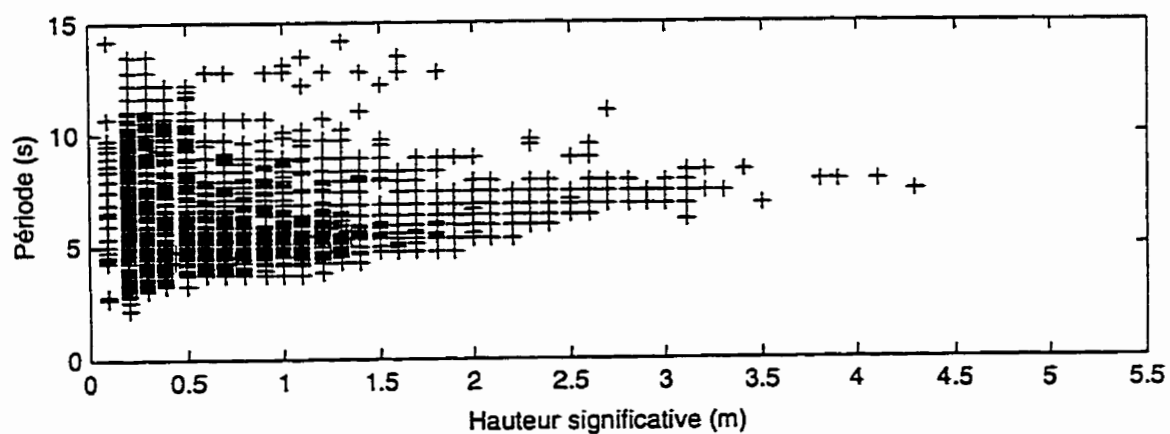
(1) Ne comprend pas les périodes de 15 s et plus dans les fichiers de la bouée ENVC.



a) ENVC-91

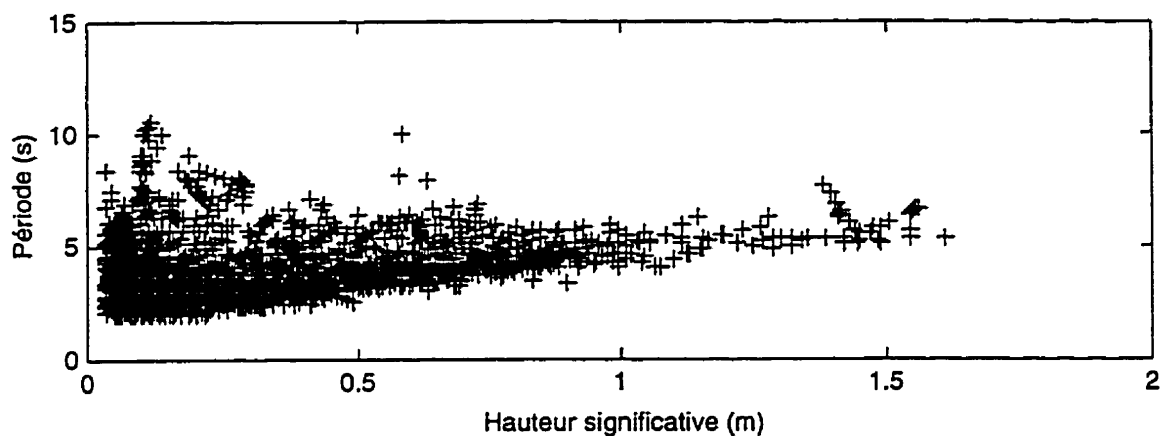


b) ENVC-92

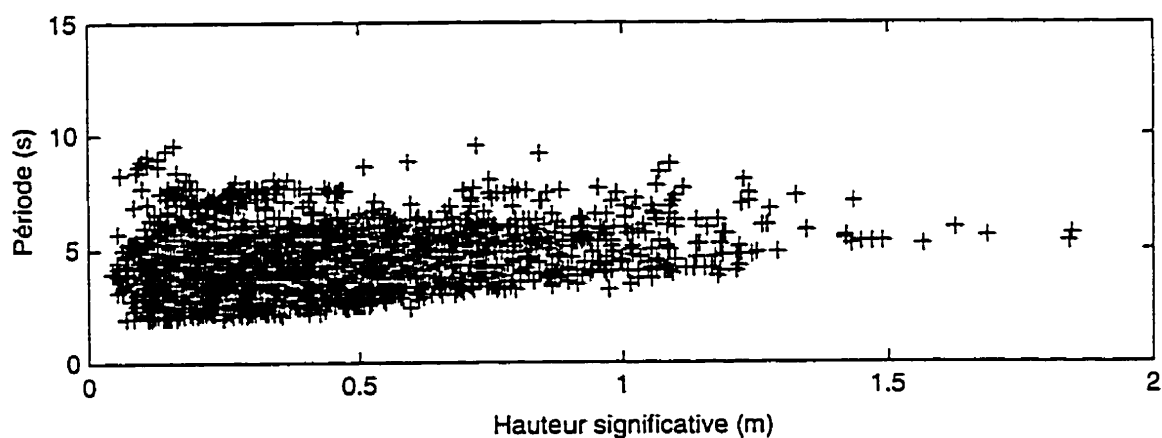


c) ENVC-93

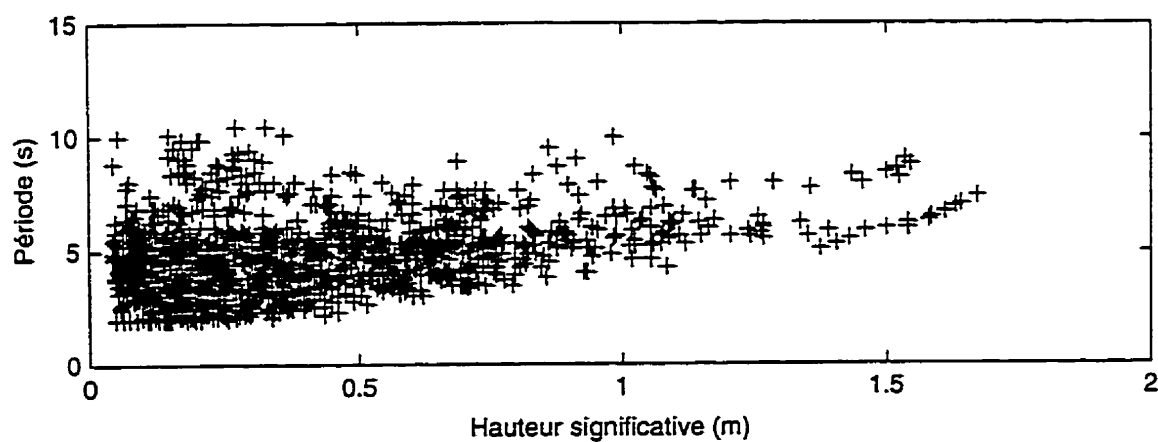
Figure B.1 - Périodes de pointe en fonction des hauteurs significatives



d) ULAV-91



e) ULAV-92



f) ULAV-93

Figure B.1 - Périodes de pointe en fonction des hauteurs significatives (suite)

Tableau B.2 - Distribution des vagues par quadrant à la bouée ULAV

a) Toutes les vagues

Fichier	Toutes directions		Quadrant I		Quadrant II		Quadrant III		Quadrant IV	
	n	moy (H _s) (m)	moy (H _s) (m)	f (%)	moy (H _s) (m)	f (%)	moy (H _s) (m)	f (%)	moy (H _s) (m)	f (%)
ULAV-91	2134	0,36	0,34	30,0	0,22	2,3	0,40 *	49,4	0,30	18,2
ULAV-92	1890	0,46	0,45	55,5	0,25	4,0	0,56 *	27,2	0,39	13,3
ULAV-93	1306	0,41	0,44 *	70,6	0,20	4,0	0,42	15,6	0,30	9,8

b) Vagues supérieures à 0,5 m

Fichier	Toutes directions		Quadrant I		Quadrant II		Quadrant III		Quadrant IV	
	n	moy (H _s) (m)	moy (H _s) (m)	f (%)	moy (H _s) (m)	f (%)	moy (H _s) (m)	f (%)	moy (H _s) (m)	f (%)
ULAV-91	569	0,76	0,78 *	27,1	-	0	0,76	58,5	0,73	14,4
ULAV-92	710	0,76	0,72	54,4	0,55	0,8	0,81 *	34,6	0,74	10,1
ULAV-93	406	0,78	0,80 *	78,3	-	0	0,68	16,5	0,79	5,2

Direction dominante

* Maximum des hauteurs moyennes

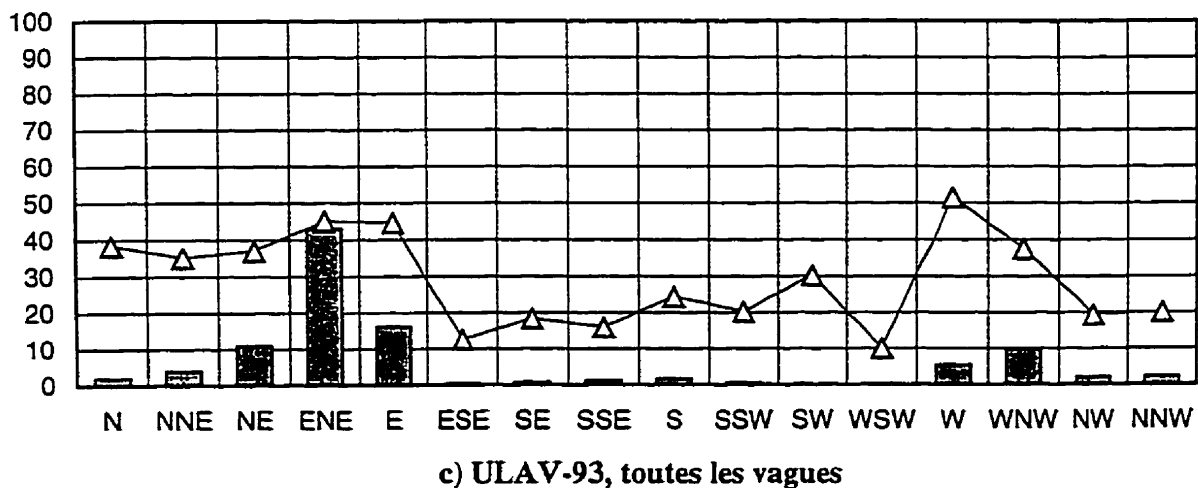
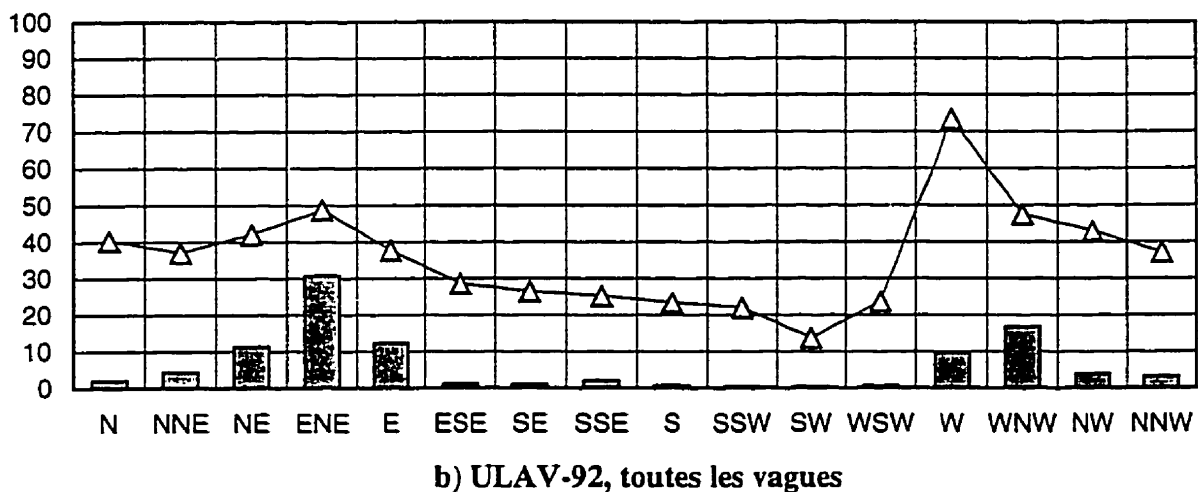
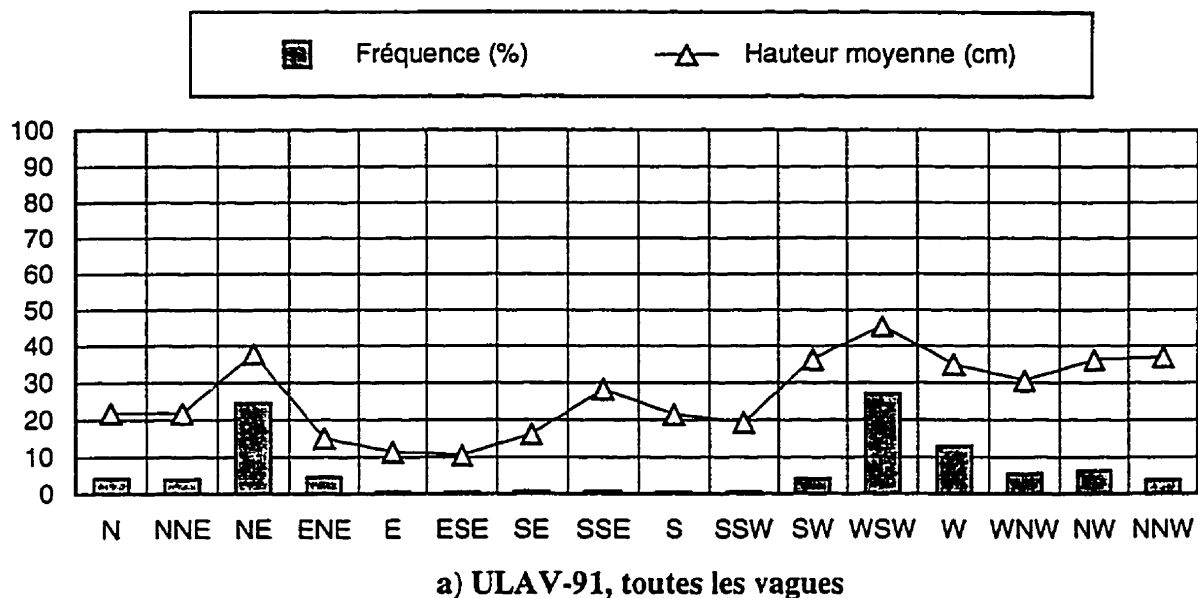
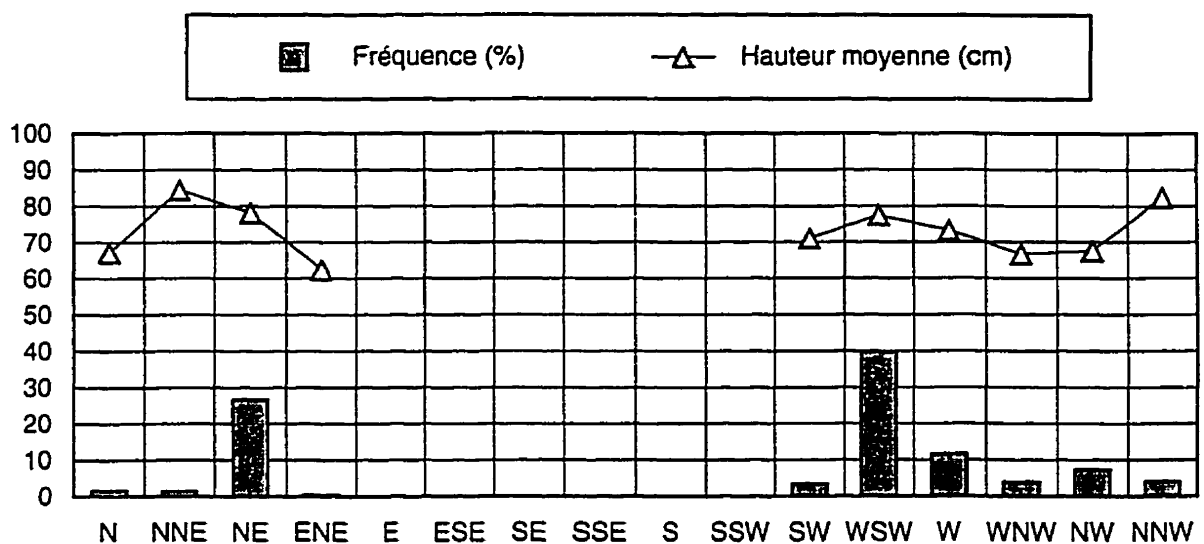
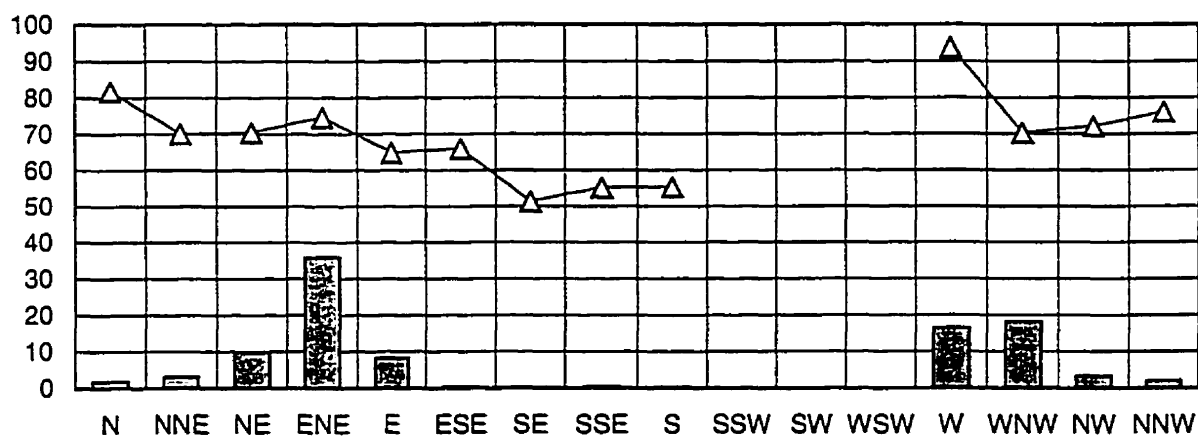


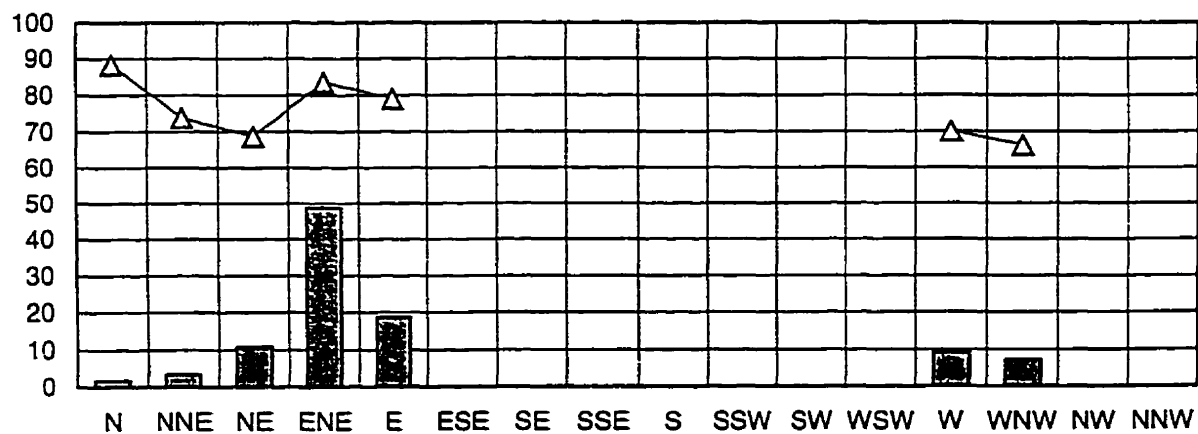
Figure B.2 - Distributions de la direction des vagues et hauteurs significatives moyennes par direction



d) ULA V-91, vagues supérieures à 50 cm



e) ULA V-92, vagues supérieures à 50 cm



f) ULA V-93, vagues supérieures à 50 cm

Figure B.2 - Distributions de la direction des vagues et hauteurs significatives moyennes par direction (suite)

Annexe C

PROGRAMME WAWSP_UL

PROGRAM WAWSP_UL

```

C -----
C
C   Le modele 2D de prevision de vagues WAWSP a ete concu par
C   M.A. Donelan (1977).
C
C   Le programme WAWSP_UL est adapte des programmes WGRD2 et WAWSP
C   (Hodson et Donelan, 1979).
C
C                                     Lise Dupuis
C                                     Departement de genie civil
C                                     Universite Laval
C                                     Juillet 1997
C -----

```

```

C   Les constantes suivantes sont definies par l'usager:
C   MRO=IROWS, MCO=ICOLS, MR=IGD, MC=JGD
C   NPD = nombre d'enregistrements de vent par jour
C   SIGMAO = valeur initiale uniforme du tableau SIGHTL

```

```

PARAMETER (MRO=326, MCO=151, MR=40, MC=18)
PARAMETER (NPD=24, SIGMAO=0.0)

```

```

PARAMETER (PI=3.14159265359, GRAV=9.81)

```

```

CHARACTER*20 BATHFIL, GRIDFIL, STATFIL, WINDFIL(15), NFILE(15)
CHARACTER*20 POINTFIL, NPOINT(50), DATE(4), RES(8)
CHARACTER*2  AYEAR, AMONTH, ADAY, AHOURL
CHARACTER*8  DATESTR

```

```

DIMENSION MESH(MRO,MCO), IYMD1(3), IYMD2(3)
DIMENSION KVECT(15), IFILE(15), Z(15), FLAT(15), FLONG(15)
DIMENSION FACTW(15), LISTST(4), IPLOTST(4)
DIMENSION C(4,MR,MC), CMOM(4,MR,MC), U(2,MR,MC)
DIMENSION SHEIGHT(2,MR,MC), SIGHTL(2,MR,MC)
DIMENSION PLAT(50), FLONG(50), IST(50), JST(50)
DIMENSION CA(50), ICDA(50), W(50), IDA(50), SIG(50)

```

```

COMMON /A/ GRIDSIZ, IROWS, ICOLS, PHIM, GM, A(5), B(5)
COMMON /B/ IGRD, GRDZ, IGD, JGD
COMMON /C/ ISTAT(15), JSTAT(15), N3(3), W3(3)
COMMON /D/ UVAL(15), VVAL(15)
COMMON /E/ ITIMSTP, NSTEPS, IYEAR, MONTH, IDAY, IHOURL

```

```

C -----
C   Lecture des donnees
C -----

```

```

WRITE (*, '("--> Nom du fichier de bathymetrie: ",S)')
READ (*,10000) BATHFIL

```

```

10000 FORMAT (A20)

WRITE (*, '("--> Nom du fichier de la grille: ", $)')
READ (*, 10000) GRIDFIL

OPEN (25, FILE=GRIDFIL, STATUS='OLD')

READ (25, *) PHIM, GM, (A(I), I=1, 5), (B(I), I=1, 5), GRIDSIZ,
& IROWS, ICOLS

      IF (GRIDSIZ.NE.2.) THEN
        WRITE (*, 11000)
11000  FORMAT ('ERREUR --> Les cellules de la bathymetrie originale
& ne sont pas de 2 km.')
        STOP
      END IF

      IF (IROWS.NE.MRO) THEN
        WRITE (*, 11001)
11001  FORMAT ('ERREUR --> Le parametre MRO ne correspond pas au
& nombre de lignes de la bathymetrie originale.')
        STOP
      END IF

      IF (ICOLS.NE.MCO) THEN
        WRITE (*, 11002)
11002  FORMAT ('ERREUR --> Le parametre MCO ne correspond pas au
& nombre de colonnes de la bathymetrie originale.')
        STOP
      END IF

CLOSE (25)

OPEN (30, FILE=BATHFIL, STATUS='OLD')

READ (30, *) ((MESH(IR, IC), IC=1, ICOLS), IR=1, IROWS)

CLOSE (30)

WRITE (*, '("--> Nom du fichier des stations de vent: ", $)')
READ (*, 10000) STATFIL

OPEN (50, FILE=STATFIL, STATUS='OLD')

DO K=1, 15
  READ (50, *) IFILE(K), NFILE(K), WINDFIL(K), Z(K), FLAT(K),
& FLONG(K)
  FACTW(K) = 0.0
END DO

CLOSE (50)

13002 WRITE (*, '("--> Nombre de stations de vent (max=15): ", $)')
      READ (*, *) NSTAT

```

```

      IF ((NSTAT.LT.1).OR.(NSTAT.GT.15)) THEN
        WRITE (*,11003)
11003      FORMAT ('ERREUR --> Le nombre de stations doit etre compris
& entre 1 et 15.')
        GO TO 13002
      END IF

13000 WRITE (*, '("--> Numeros des stations de vent (1-15): ', $)
      READ (*, *) (KVECT(K), K=1, NSTAT)
      DO K=1, NSTAT
        IF ((KVECT(K).LT.1).OR.(KVECT(K).GT.15)) THEN
          WRITE (*,11004)
11004      FORMAT ('ERREUR --> Les numeros des stations doivent etre
& compris entre 1 et 15.')
          GO TO 13000
        END IF
        IF (WINDFIL(KVECT(K)).EQ.'0') THEN
          WRITE (*,11005) KVECT(K)
11005      FORMAT ('ERREUR --> Le fichier de donnees de vent de la
& station ', I12, ' n'est pas disponible.')
          GO TO 13000
        END IF
        OPEN (10-KVECT(K), FILE=WINDFIL(KVECT(K)), STATUS='OLD')
      END DO

      WRITE (*,11025)
11025 FORMAT ('--> Facteur de correction de la vitesse du vent
& (si aucun, entrer 1).')
      DO K = 1, NSTAT
        WRITE (*,11026) NFILE(KVECT(K))
11026      FORMAT ('--> ', A20, ': ', $)
        READ (*, *) FACTW(KVECT(K))
      END DO

      WRITE (*,11022)
11022 FORMAT ('--> Nom du fichier des points d'observation: ', $)
      READ (*,10000) POINTFIL

      WRITE (*,11014)
11014 FORMAT ('--> Date du debut des previsions (AAAA MM JJ): '
& , $)
      READ (*, *) (IYMD1(K), K=1, 3)
      WRITE (*,11015)
11015 FORMAT ('--> Date de la fin des previsions (AAAA MM JJ): '
& , $)
      READ (*, *) (IYMD2(K), K=1, 3)

      WRITE (*,11016)
11016 FORMAT ('--> Heure du debut des graphiques (AAAA MM JJ HH): '
& , $)
      READ (*, *) (IPLST(K), K=1, 4)

      WRITE (*,11017)
11017 FORMAT ('--> Intervalle de temps entre les graphiques

```

```

& (nb d'heures): ', $)
  READ (*,*) INTPLOT

C   Ouverture du fichier gardant la trace des valeurs des variables

  OPEN (60, FILE = 'log')

  WRITE (60,*) 'BATHFIL ',BATHFIL

  WRITE (60,*) 'GRIDFIL ',GRIDFIL

  WRITE (60,*) 'PHIM (lat)',PHIM,' GM (long)',GM

  WRITE (60,*) 'A',(A(I),I=1,5)

  WRITE (60,*) 'B',(B(I),I=1,5)

  WRITE (60,*) 'GRIDSIZ',GRIDSIZ,' IROWS',IROWS,
& ' ICOLS ',ICOLS

  WRITE (60,*) 'STATFIL ',STATFIL,' NSTAT',NSTAT

  WRITE (60,*) ' '
  WRITE (60,11006)
11006 FORMAT ('IFILE',5X,'WINDFIL',9X,'Z',6X,'FLAT',3X,'FLONG',3X,
& 'FACTW')
  DO K=1,NSTAT
    WRITE (60,11008) IFILE(KVECT(K)),WINDFIL(KVECT(K)),
& Z(KVECT(K)),FLAT(KVECT(K)),FLONG(KVECT(K)),FACTW(KVECT(K))
  END DO
11008 FORMAT (I2,6X,A14,1X,F6.2,2(2X,F5.2),3X,F4.2)

  WRITE (60,*) ' '
  WRITE (60,*) 'IYMD1',IYMD1
  WRITE (60,*) 'IYMD2',IYMD2

C -----
C   Agrandissement des cellules de la grille
C -----

  TGRD1 = INT(MFO*2./MR)
  TGRD2 = INT(MCO*2./MC)
  IF (TGRD1.NE.TGRD2) THEN
    WRITE (*,11011)
11011 FORMAT ('ERREUR --> La grandeur des cellules agrandies n'est
& pas identique dans les deux directions.')
    STOP
  END IF
  IGRD = TGRD1

  DO I=1,6
    IF (IGRD.EQ.2**I) GO TO 13001
  END DO
  WRITE (*,11007)

```



```

11007 FORMAT ('ERREUR --> La grandeur des cellules agrandies doit etre de
& 2, 4, 8, 16, 32 ou 64 km.')
```

STOP

```

13001 NC = IGRD/GRIDSIZ
      IGD = MR
      JGD = MC

C Grandeur des cellules en metres
      GRDZ = IGRD*1000.
      GRDZ = GRDZ/0.2533/1.03

      WRITE (60,*) 'IGRD ',IGRD,' IGD ',IGD,' JGD ',JGD,' GRDZ',
& GRDZ

      IF (NC.NE.1) CALL GRIDMOD (NC,MESH)

      OPEN (40,FILE='bathy')

      DO IR=1,IGD
        WRITE(40,*) (MESH(IR,IC),IC=1,JGD)
      END DO

      CLOSE (40)

C -----
C   Conversion des positions LAT/LONG des stations de vent
C   en coordonnees (i,j)
C -----

      DO K=1,NSTAT
        CALL SEED (FLAT(KVECT(K)), FLONG(KVECT(K)), ISTAT(K), JSTAT(K))
      END DO

      WRITE (60,*) 'ISTAT',(ISTAT(K),K=1,NSTAT)
      WRITE (60,*) 'JSTAT',(JSTAT(K),K=1,NSTAT)

C -----
C   Conversion des positions LAT/LONG des points d'observation des
C   vagues en coordonnees (i,j)
C -----

      OPEN (80,FILE=POINTFIL,STATUS = 'OLD')

      K = 0

13003 K = K+1
      IF (K.GT.50) THEN
        WRITE (*,11019)
11019  FORMAT('ATTENTION --> Les caracteristiques des vagues ne
& seront enregistrees qu''aux 50 premiers points d''observation.')
```

GO TO 13014

END IF

```

      READ (80,*,END=13014) IFN ,NPOINT(K), PLAT(K) ,PLONG(K)
      IF (IFN.NE.K) THEN
        WRITE (*,11020)
11020  FORMAT('ERREUR --> Les points d''observation des vagues ne
& sont pas numerotes de 1 a 50.')
        STOP
      END IF
      GO TO 13003

13014 CONTINUE

      CLOSE (80)

      NS = IFN

      DO K=1,NS
        CALL SEED (PLAT(K), PLONG(K), IST(K), JST(K))
        IF (MESH(IST(K),JST(K)).LE.0) THEN
          WRITE (*,11021) K, IST(K), JST(K)
          STOP
        END IF
      END DO

11021 FORMAT('ERREUR --> Le point d''observation ',I2,' est situe
& sur la terre aux coordonnees (',I4,',',I4,')')

      WRITE (60,*) 'POINTFIL ',POINTFIL,' NS',NS
      WRITE (60,*) ' '
      WRITE (60,11023)
11023 FORMAT ('IFN',4X,'NPOINT',15X,'PLAT',5X,'PLONG',6X,'IST',6X,
& 'JST')
      DO K=1,NS
        WRITE (60,11024) K,NPOINT(K),PLAT(K),PLONG(K),IST(K),JST(K)
      END DO
11024 FORMAT (I2,5X,A17,2(4X,F5.2),5X,I3,6X,I3)

C -----
C   Pour chaque point de la grille, calcul des poids statistiques
C   des trois stations de vent les plus proches
C -----

      OPEN (70, STATUS = 'SCRATCH')

      WRITE (60,*) ' '
      WRITE (60,11009)
11009 FORMAT ('Stations les plus pres de chaque point et leurs poids
& statistiques (I,J,N3,W3)')

      DO I=1,IGD
        DO J=1,JGD
          IF (MESH(I,J).GT.0) THEN
            IF (NSTAT.EQ.1) THEN
              N3(1) = 1
              W3(1) = 1.

```

```

        ELSE
          CALL WEIGHT (I, J, NSTAT)
        END IF
        WRITE (70,11010) I, J, N3, W3
        WRITE (60,11010) I, J, N3, W3
      END IF
    END DO
  END DO

11010 FORMAT (2I4,5X,3I3,3(5X,F8.6))
      WRITE (60,*) ' '

C -----
C   Initialisation des compteurs
C -----

C Intervalle de temps entre les enregistrements de vent (min)
      ITIMSTP = 24/NPD*60

C Le premier jour de l'annee des simulations devient le jour 1
C du calendrier julien
      CALL JULBASE (JUL, IYMD1(1), 1, 1)

C Dates de debut et de fin des simulations dans le calendrier julien
      CALL JULIAN (JUL1, IYMD1(1), IYMD1(2), IYMD1(3))
      CALL JULIAN (JUL2, IYMD2(1), IYMD2(2), IYMD2(3))

C Date du debut des graphiques dans le calendrier julien
      CALL JULIAN (JUL3, IPLOTST(1), IPLOTST(2), IPLOTST(3))

C Nombre d'enregistrements de vent a utiliser pour les previsions
      NOSTEP = (JUL2 - JUL1 + 1)*NPD

C Heure du debut des simulations (heure 0 de IYMD1)
      IYEARW = IYMD1(1)
      MONTHW = IYMD1(2)
      IDATEW = IYMD1(3)
      IHOURLW = 0

C Heure du debut de l'enregistrement des resultats = Heure du debut des
C simulations
      LISTST(1) = IYEARW
      LISTST(2) = MONTHW
      LISTST(3) = IDATEW
      LISTST(4) = IHOURLW

C Intervalle entre les enregistrements aux points d'observation (min)
C = Intervalle entre les enregistrements de vent
      INTLIST = ITIMSTP

C Conversion des intervalles de temps entre l'enregistrement des
C resultats en nombre de pas de temps
      INTLIST = INTLIST/ITIMSTP

```

```

      INTPLOT = INTPLOT*60/ITIMSTP

      WRITE (60,*) 'ITIMSTP',ITIMSTP
      WRITE (60,*) 'LISTST',LISTST
      WRITE (60,*) 'IPLOTST',IPLOTST
      WRITE (60,*) 'JUL1',JUL1,' JUL2',JUL2,' NOSTEP',NOSTEP
      WRITE (60,*) 'INTLIST',INTLIST,' INTPLOT',INTPLOT

C -----
C   Initialisation des tableaux C, CMOM, U, SHEIGHT et SIGHTL
C -----

      DO M=1,4
        DO I=1,IGD
          DO J=1,JGD
            C(M,I,J) = 0.0
            CMOM(M,I,J) = 0.0
          END DO
        END DO
      END DO

      DO M=1,2
        DO I=1,IGD
          DO J=1,JGD
            U(M,I,J) = 0.0
            SHEIGHT(M,I,J) = 0.0
            SIGHTL(M,I,J) = SIGMAO
          END DO
        END DO
      END DO

C -----
C   Boucle sur les enregistrements de vent
C -----

      ISTEP = 0

      WRITE (*,('CALCULS !'))

C Pas de temps ou vont commencer les enregistrements des resultats (KL)
C et les graphiques (KP)

      KL = 1
      KP = (JUL3 - JUL1)*NPD + (IPLOTST(4)*60/ITIMSTP - 1)

      OPEN (10, STATUS='SCRATCH')

13004 CONTINUE

      ISTEP = ISTEP + 1

      WRITE (*,11027) ISTEP
11027 FORMAT ('Pas de temps',I8)

```

C Lecture d'un enregistrement de vent a chaque station

```
CALL READONE (ISTEP, JUL1, NSTAT, KVECT, FACTW, Z)
```

```
WRITE (60,*) ' '
```

```
WRITE (60,*) 'ISTEP',ISTEP
```

C Calcul de U et V a chaque point de la grille

```
CALL WINDFLD (NSTAT,MESH,MRO,MCO,U,MR,MC)
```

C Verification de la condition de Courant

```
WMAX = 0.0
```

```
NSTEPS = 1
```

```
DO I=1,IGD
```

```
  DO J=1,JGD
```

```
    IF (MESH(I,J).GT.0) THEN
```

```
      DO M=1,2
```

```
        SP = C(M,I,J)**2 + C(M+2,I,J)**2
```

```
        IF (SP.GT.WMAX) WMAX = SP
```

```
      END DO
```

```
    END IF
```

```
  END DO
```

```
END DO
```

C NSTEPS = nombre de pas de temps intermediaires

```
IF (WMAX.NE.0.0) THEN
```

```
  WMAX = SQRT(WMAX)
```

```
  NSTEPS = (WMAX*ITIMSTP*60./ (IGRD*1000.))/.8 + 1
```

```
END IF
```

```
WRITE (60,*) 'WMAX',WMAX,' NSTEPS',NSTEPS
```

C Boucle sur les pas de temps intermediaires

```
DO NT=1,NSTEPS
```

```
  CALL WAVDEEP (MESH,U,C,CMOM,SHEIGHT,SIGHTL,MRO,MCO,MR,MC)
```

```
END DO
```

C Ecriture des resultats

C Si KL=ISTEP, ecrit les resultats de la simulation dans un fichier

C fort.100+i, pour chacun des points d'observation i

```
IF (KL.EQ.ISTEP) THEN
```

```
  DO 50 I=1,NS
```

```
    IX=IST(I)
```

```
    IY=JST(I)
```

```
    SQ1=C(1,IX,IY)
```

```
    SQ2=C(2,IX,IY)
```

```

      SQ3=C(3,IX,IY)
      SQ4=C(4,IX,IY)
      CA(I) = SQRT(SQ1**2 + SQ3**2) / (GRAV/2/PI)
      ICDA(I)=0
C MET CONVENTION FOR WAVE DIRECTION: SUBTRACT 180 MGS 88-12-5
      IF (SQ1.NE.0.0.OR.SQ3.NE.0.0) ICDA(I)=-1.0*(ATAN2(SQ3,SQ1)*
1      180/PI-90.0)-180.
      ICEA=0
C MET CONVENTION MGS 88-12-5
      IF (SQ2.NE.0.0.OR.SQ4.NE.0.0) ICEA=-1.0*(ATAN2(SQ4,SQ2)
1      *180/PI-90.0)-180.
      CB = SQRT(SQ2**2 + SQ4**2) / (GRAV/2/PI)
      U1=U(1,IX,IY)
      U2=U(2,IX,IY)
      W(I)=SQRT(U1**2+U2**2)
      IDA(I)=0
C MET CONVENTION MGS 88-12-5
      IF (U1.NE.0.0.OR.U2.NE.0.) IDA(I)=-1.0*(ATAN2(U2,U1)*180/PI-90.)
1-180.
      SQ1=SHEIGHT(1,IX,IY)
      SQ2=SHEIGHT(2,IX,IY)
      IF (SQ2.GT.SQ1) CA(I)=CB
      IF (SQ2.GT.SQ1) ICDA(I)=ICEA
C RMS WAVE HEIGHT * 4 = SIGNIFICANT WAVE HEIGHT
      SIG(I)=SQRT(SQ1**2+SQ2**2)*4.
      IF (ICDA(I).LE.0) ICDA(I)=360+ICDA(I)
      IF (IDA(I).LE.0) IDA(I)=360+IDA(I)
50      CONTINUE

      DO 51 I=1,NS
        HT=SIG(I)
        PER=CA(I)
        LFN=I-100
        WRITE (LFN, '(4I4,F6.1,I6,F8.3,F8.3,I6)') IYEAR,MONTH,IDAY,
& IHOURL,W(I),IDA(I),HT,PER,ICDA(I)
51      CONTINUE

      KL = KL + INTLIST

      END IF

C Si KP=ISTEP, enregistre les donnees pour les graphiques (champs de
C vent et champs de vagues)

      IF (KP.EQ.ISTEP) THEN

        IF ((IYEAR.GE.1900).AND.(IYEAR.LT.2000)) THEN
          IYEAR = IYEAR - 1900
        END IF
        WRITE (DATE(1),'(I2)') IYEAR
        WRITE (DATE(2),'(I2)') MONTH
        WRITE (DATE(3),'(I2)') IDAY
        WRITE (DATE(4),'(I2)') IHOURL
        READ (DATE(1),'(A2)') AYEAR

```

```

      READ (DATE(2),'(A2)') AMONTH
      READ (DATE(3),'(A2)') ADAY
      READ (DATE(4),'(A2)') AHOUR
      IF (MONTH.LT.10) AMONTH = '0' // AMONTH(2:2)
      IF (IDAY.LT.10) ADAY = '0' // ADAY(2:2)
      IF (IHOUR.LT.10) AHOUR = '0' // AHOUR(2:2)
      DATESTR = AYEAR // AMONTH // ADAY // AHOUR
      WRITE (RES(1), '("ux_",A8,".res")') DATESTR
      WRITE (RES(2), '("uy_",A8,".res")') DATESTR
      WRITE (RES(3), '("c1x_",A8,".res")') DATESTR
      WRITE (RES(4), '("c2x_",A8,".res")') DATESTR
      WRITE (RES(5), '("c1y_",A8,".res")') DATESTR
      WRITE (RES(6), '("c2y_",A8,".res")') DATESTR
      WRITE (RES(7), '("s1_",A8,".res")') DATESTR
      WRITE (RES(8), '("s2_",A8,".res")') DATESTR
      OPEN (90, FILE=RES(1), STATUS='NEW')
      OPEN (91, FILE=RES(2), STATUS='NEW')
      OPEN (92, FILE=RES(3), STATUS='NEW')
      OPEN (93, FILE=RES(4), STATUS='NEW')
      OPEN (94, FILE=RES(5), STATUS='NEW')
      OPEN (95, FILE=RES(6), STATUS='NEW')
      OPEN (96, FILE=RES(7), STATUS='NEW')
      OPEN (97, FILE=RES(8), STATUS='NEW')
      DO I=1,IGD
        WRITE (90,11018) (U(1,I,J),J=1,JGD)
        WRITE (91,11018) (U(2,I,J),J=1,JGD)
        WRITE (92,11018) (C(1,I,J),J=1,JGD)
        WRITE (93,11018) (C(2,I,J),J=1,JGD)
        WRITE (94,11018) (C(3,I,J),J=1,JGD)
        WRITE (95,11018) (C(4,I,J),J=1,JGD)
        WRITE (96,11018) (SHEIGHT(1,I,J),J=1,JGD)
        WRITE (97,11018) (SHEIGHT(2,I,J),J=1,JGD)
      END DO
11018  FORMAT (<MC>F8.3)

      CLOSE (90)
      CLOSE (91)
      CLOSE (92)
      CLOSE (93)
      CLOSE (94)
      CLOSE (95)
      CLOSE (96)
      CLOSE (97)

      KP = KP + INTPL0T

    END IF

C Fin de la boucle sur les enregistrements de vent

      IF (ISTEP.LT.NOSTEP) GO TO 13004

C Fin -----

```

```

DO K=1,NSTAT
  CLOSE (10+KVECT(K))
END DO

```

```

CLOSE (60)

```

```

END

```

```

C -----
C   Procedure GRIDMOD
C -----

```

```

SUBROUTINE GRIDMOD (NC,MESH)

```

```

COMMON /A/ GRIDSIZ, IROWS, ICOLS

```

```

DIMENSION MESH(IROWS,ICOLS)

```

```

IHALF=NC*NC/2

```

```

DO 12000 II = 1,IROWS,NC

```

```

DO 12000 JJ = 1,ICOLS,NC

```

```

  NG = 0

```

```

  DO 12001 IA=II,II+NC-1

```

```

    IF (IA.GT.IROWS) GO TO 12001

```

```

    DO 12001 IB=JJ,JJ+NC-1

```

```

      IF (IB.GT.ICOLS) GO TO 12001

```

```

      IF (MESH(IA,IB).EQ.0) GO TO 12001

```

```

      NG = NG+1

```

```

12001  CONTINUE

```

```

    IN = (II-1)/NC+1

```

```

    JN = (JJ-1)/NC+1

```

```

    IF (NG.LT.IHALF) MESH(IN,JN)=0

```

```

    IF (NG.GE.IHALF) MESH(IN,JN)=1

```

```

12000  CONTINUE

```

```

END

```

```

C -----
C   Procedure SEED
C -----

```

```

C   Convertit les positions LAT/LONG en coordonnees (i,j)

```

```

SUBROUTINE SEED (FLAT, FLONG, III, JJJ)

```

```

COMMON /A/ GRIDSIZ, IROWS, ICOLS, PHIM, GM, A(5), B(5)

```

```

COMMON /B/ IGRD, GRDZ, IGD, JGD

```

```

G = GM - FLONG

```

```

F = FLAT - PHIM

```



```

C      G1 = difference de longitude sur la carte 1
C      G2 = difference de longitude sur la carte 2

```

```

      G2 = G - 2.678
      IF (G2.LE.0.0) THEN
        G1 = G
        G2 = 0.0
      ELSE
        G1 = 2.678
        G2 = ABS(G2)
      END IF

```

```

      X = G1*A(1) + G2*A(2)
      Y = P*B(2)
      III = X/IGRD + 1.0
      JJJ = Y/IGRD + 1.0

```

```

      END

```

```

C -----
C      Procedure WEIGHT
C -----

```

```

C      Pour un point de la grille, calcule les poids statistiques
C      des trois stations de vent les plus proches

```

```

      SUBROUTINE WEIGHT (I ,J, NSTAT)

```

```

      COMMON /C/ ISTAT(15), JSTAT(15), N3(3), W3(3)

```

```

      DO K=1,3
        N3(K) = 0
        W3(K) = 999999.
      END DO

```

```

      DO N=1,NSTAT
        DIST = (ISTAT(N)-I)**2 + (JSTAT(N)-J)**2
        IF (DIST.EQ.0.0) DIST = .000001
        IF (W3(3).GE.W3(1).AND.W3(3).GE.W3(2)) MAX = 3
        IF (W3(2).GE.W3(1).AND.W3(2).GE.W3(3)) MAX = 2
        IF (W3(1).GE.W3(2).AND.W3(1).GE.W3(3)) MAX = 1
        IF (DIST.LT.W3(MAX)) THEN
          N3(MAX) = N
          W3(MAX) = DIST
        END IF
      END DO

```

```

      NEAR = 3

```

```

      IF (NSTAT.LT.NEAR) NEAR = NSTAT

```

```

      SUMW = 0.

```

```

DO K=1,NEAR
  SUMW = SUMW + 1./W3(K)
END DO

DO K=1,NEAR
  W3(K) = 1./(W3(K)*SUMW)
END DO

END

```

```

C -----
C   Procedure JULIAN
C -----

```

```

SUBROUTINE JULIAN (JUL,Y,M,D)

```

```

C   JUL- JULIAN DAY
C   D - DAY
C   M - MONTH
C   Y - YEAR
C *****
C
C   Y... MUST BE EXPRESSED AS CENTURY PLUS YEAR WITHIN CENTURY
C   E.G.   Y=1977 NOT 77
C *****
C
C
C   CONVERTS GREGORIAN CALENDAR DATES TO THE CORRESPONDING
C   JULIAN DAY NUMBERS
C
C   INTEGER D,Y
C   DATA JB/0/
C   IEN=0
13007 CONTINUE
  IF(Y.GE.1999)GO TO 13008
  IF(Y.LT.1900)GO TO 13008
  IF(M.GT.12)GO TO 13008
  IF(M.LT.1)GO TO 13008
  IF(D.GT.999)GO TO 13008
  IF(D.LT.1)GO TO 13008
  GO TO 13010
13008 JUL=0
  WRITE(61,13009)Y,M,D
13009 FORMAT(36H-INVALID DATE SUPPLIED TO *JULIAN* ,3I5)
  RETURN
13010 CONTINUE
  RY=Y
  RM=M
  I=(M-14)/12
  RI=I
  J=1461.*(RY-4800.+RI)/4
  K=367.*(RM-2.-RI*12.)/12.

```

```

      I=(RY+4900.+RI)/100.
      RI=I
      I=3.*RI/4.
      J=D-32075+J+K-I
      IF(IEN.EQ.1)GO TO 13011
      JUL=J-JB
      RETURN
C*****
C
C
      ENTRY JULBASE (JUL,Y,M,D)
C      SUPPLIES THE BASE DATE FOR THE JULIAN DAYS BEING APPLIED
      IEN=1
      GO TO 13007
13011 CONTINUE

      JB=J-1

      RETURN
C*****
C
C
      ENTRY GREGOR (JUL,Y,M,D)
C      CONVERTS JULIAN DAY NUMBERS TO CORRESPONDING
C      GREGORIAN CALENDAR DATES
      IF(JUL.LT.1)GO TO 13013
      JJ=JUL-JB
      J=JJ-1721119
      R=4.*J-1.
      Y=R/146097.
      R=R-146097.*Y
      D=R/4.
      R=4.*D+3.
      J=R/1461.
      D=((R-1461.*J)+4.)/4.
      R=5.*D-3.
      M=R/153.
      D=((R-153.*M)+5.)/5.
      Y=100*Y+J
      IF(M.GE.10)GO TO 13012
      M=M+3
      RETURN
13012 M=M-9
      Y=Y+1
      RETURN
13013 D=99
      M=D
      Y=1999
      RETURN
      END

C -----
C      Procedure READONE

```

```

C -----
C      Lit un enregistrement dans chaque fichier de donnees de vent.
C      Corrige la vitesse du vent en fonction de la hauteur de
C      l'anemometre. Retourne les composantes est (UVAL) et nord (VVAL)
C      des vitesses de vent.

      SUBROUTINE READONE (ISTEP, JUL1, NSTAT, KVECT, FACTW, Z)

      PARAMETER (PI=3.14159265359)

      DATA CD/0.0015/

      DIMENSION KVECT(15), FACTW(15), Z(15)

      COMMON /D/ UVAL(15), VVAL(15)
      COMMON /E/ ITIMSTP, NSTEPS, IYEAR, MONTH, IDAY, IHOURL

      DO K = 1,NSTAT

C Lecture d'un enregistrement de vent

      13006 READ (10-KVECT(K),*,END=13005) IYEAR, MONTH, IDAY, IHOURL, W, IDIR

      IF (IYEAR.LT.100) IYEAR = IYEAR + 1900

C Si ISTEP=1, lecture du fichier jusqu'au premier enregistrement
C de vent a utiliser

      IF (ISTEP.EQ.1) THEN
        CALL JULIAN (JUL, IYEAR, MONTH, IDAY)
        IF (JUL.LT.JUL1) GO TO 13006
        IF ((JUL.GT.JUL1).OR.(IHOURL.GT.0)) THEN
          WRITE (*,11012) KVECT(K), IYEAR, MONTH, IDAY, IHOURL
11012      FORMAT ('ERREUR --> Les donnees de la station ',I2,' ne
& commencent que le',I5,I3,I3,I3)
          STOP
        END IF
      END IF

C Correction de la vitesse du vent pour la hauteur de l'anemometre

      IF (Z(KVECT(K)).NE.10.) W = W/(1-SQRT(CD)*ALOG(Z(KVECT(K))/
& 10.)/0.4)

C Calcul des composantes est (UVAL) et nord (VVAL) de la vitesse
C du vent

      ANG = (-IDIR+270)/180.*PI
      UVAL(K) = W*FACTW(KVECT(K))*COS(ANG)
      VVAL(K) = W*FACTW(KVECT(K))*SIN(ANG)

      END DO

```

RETURN

C Si un fichier de donnees de vent se termine avant la fin des previsions

```
13005 WRITE (*,11013) K, IYEAR, MONTH, IDAY, IHOOR
11013 FORMAT ('ERREUR --> Les donnees de la station ',I2,' se
& terminent le',I5,I3,I3,I3)
STOP
```

END

```
C -----
C Procedure WINDFLD
C -----
```

C Calcule U et V en chaque point de la grille

SUBROUTINE WINDFLD (NSTAT,MESH,MRO,MCO,U,MR,MC)

DIMENSION MESH(MRO,MCO), N3(3), W3(3), U(2,MR,MC)

```
COMMON /B/ IGRD, GRDZ, IGD, JGD
COMMON /D/ UVAL(15), VVAL(15)
```

REWIND (70)

```
DO 12002 I=1,IGD
DO 12003 J=1,JGD
IF (MESH(I,J).GT.0) THEN
```

```
READ (70,*) II,JJ,(N3(K),K=1,3),(W3(K),K=1,3)
IF (I.NE.II.OR.J.NE.JJ) STOP 'SCRATCH FILE 70 IN WRONG POSITION'
IF (NSTAT.EQ.1) THEN
```

```
U(1,I,J) = UVAL(1)
U(2,I,J) = VVAL(1)
```

ELSE

```
U(1,I,J) = 0.
U(2,I,J) = 0.
```

DO K=1,3

IF (W3(K).NE.999999.) THEN

N = N3(K)

U(1,I,J) = U(1,I,J) + UVAL(N)*W3(K)

U(2,I,J) = U(2,I,J) + VVAL(N)*W3(K)

END IF

END DO

END IF

END IF

12003 CONTINUE

12002 CONTINUE

END

```

C -----
C   Procedure WAVDEEP
C -----

      SUBROUTINE WAVDEEP (MESH,U,C,CMOM,SHEIGHT,SIGHTL,MRO,MCO,MR,MC)
C
C   THIS SUBROUTINE CALCULATES THE NEW WAVES FOR ONE TIMESTEP
C   AND ASSUMES WAVES ARE UNAFFECTED BY THE DEPTH.
C
      PARAMETER (PI=3.14159265359, GRAV=9.81)

      DIMENSION MESH(MRO,MCO),U(2,MR,MC),C(4,MR,MC),CMOM(4,MR,MC)
      DIMENSION CMON(4),CSTOR(4),C5(4,5),CMOM5(4,5)
      DIMENSION VFLUX(2,2),HFLUX(2,2),CM(2),F(2),ALPHA(2)
      DIMENSION SHEIGHT(2,MR,MC),SIGHTL(2,MR,MC)

      COMMON /B/ IGRD, GRDZ, IGD, JGD
      COMMON /E/ ITIMSTP, NSTEPS, IYEAR, MONTH, IDAY, IHOUR
      COMMON /F/ WNDSPD, THETA1, THETA2, C1, C2, SIGMA(2)
C
C   CALCULATIONS ARE DONE AT EACH GRID POINT IN WATER, FOR THIS
C   TIMESTEP.
C
      REWIND (10)

      DO 5 I=1,IGD
      DO 4 J=1,JGD
C
C   **   FOR EACH GRID POINT:   **
C
      IF (MESH(I,J).LE.0) GO TO 4
C
C   U(L,I,J) = THE X AND Y COMPONENTS OF WIND AT (I,J)
C   THETA = ANGLE BETWEEN WIND AND X AXIS
C   F1 AND F2 = THE FREQUENCIES OF THE WAVES IN THE 2 SYSTEMS. (ONE WAVE
C               FIELD TRAVELS MORE OR LESS WITH THE WIND, THE OTHER
C               AGAINST)
C   C1 AND C2 = THE PHASE VELOCITIES OF THE WAVE FIELDS
C   PHI1 AND PHI2 = THE ANGLES BETWEEN THE PHASE VELOCITY VECTORS AND
C               THE POSITIVE X AXIS
C   THETA1 AND THETA2 = THE ANGLES BETWEEN THE WIND VECTOR AND THE
C               PHASE VELOCITY VECTORS
C   CMOM(M,I,J) = 1X, 2X, 1Y, AND 2Y COMPONENTS OF MOMENTUM AT (I,J)
C   C(M,I,J) = THE X AND Y COMPONENTS OF THE 2 PHASE VELOCITIES
C   SHEIGHT(M,I,J) = SIGMA
C   SIGHTL(M,I,J) = SIGMA FROM PREVIOUS TIMESTEP
C   SIGMA(M) = SIGMA OF THE WAVES IN EACH WAVE FIELD
C   CMON(M) = THE NEW COMPONENTS OF MOMENTUM AT ONE GRID POINT
C

```

```

      WNDSPD=SQRT(U(1,I,J)**2+U(2,I,J)**2)
      IF (WNDSPD.LT.0.005) WNDSPD=0.005
      THETA=0.0
      IF (U(1,I,J).NE.0.0.OR.U(2,I,J).NE.0.0)
1        THETA=ATAN2(U(2,I,J),U(1,I,J))
C
C C1 AND C2 ARE USED IN SUBROUTINE WINDINP
C
      C1  =  SQRT(C(1,I,J)**2 + C(3,I,J)**2)
      C2  =  SQRT(C(2,I,J)**2 + C(4,I,J)**2)

      PHI1=0.0
      IF (CMOM(3,I,J).NE.0.0.OR.CMOM(1,I,J).NE.0.0)
1        PHI1=ATAN2(CMOM(3,I,J),CMOM(1,I,J))
      PHI2=PHI1-PI
      IF (CMOM(4,I,J).NE.0.0.OR.CMOM(2,I,J).NE.0.0)
1        PHI2=ATAN2(CMOM(4,I,J),CMOM(2,I,J))
      THETA1=ABS(THETA-PHI1)
      THETA2=ABS(THETA-PHI2)
      SIGMA(1)=SHEIGHT(1,I,J)
      SIGMA(2)=SHEIGHT(2,I,J)

C
C      **  CALCULATE VERTICAL FLUX  **
C
C THE INPUT FROM THE WIND (VERTICAL MOMENTUM FLUX) IS CALCULATED IN
C THE DIRECTIONS OF THE THREE BASIC VECTORS U, C1, AND C2, AND THEN
C CONVERTED TO X AND Y COMPONENTS
C
      CALL WINDINP(WI1,WI2,WI3)

      VFLUX(1,1)=WI1*COS(THETA)+WI2*COS(PHI1)
      VFLUX(2,1)=WI3*COS(PHI2)
      VFLUX(1,2)=WI1*SIN(THETA)+WI2*SIN(PHI1)
      VFLUX(2,2)=WI3*SIN(PHI2)

C
C THE COMPONENTS OF HORIZONTAL MOMENTUM FLUX ARE COMPUTED USING THE
C MOMENTUMS AND PHASE VELOCITIES AT THE GRID POINTS AROUND (I,J)
C
C
C FOR BOUNDARY CONDITIONS - ISH(N,S,E,W)B INDICATES THE CROSSING
C OF A SHORE BOUNDARY IN THESE COMPASS DIRECTIONS
C
      ISHNB = 1
      ISHEB = 1
      ISHSB = 1
      ISHWB = 1
      IF (J.EQ.1) THEN
        ISHNB=-1
      ELSE
        IF (MESH(I,J-1).LE.0) ISHNB=-1
      ENDIF

```

```

      IF (I.EQ.1) THEN
        ISHEB=-1
      ELSE
        IF (MESH(I-1,J).LE.0) ISHEB=-1
      ENDIF
      IF (J.EQ.JGD) THEN
        ISHSB=-1
      ELSE
        IF (MESH(I,J+1).LE.0) ISHSB=-1
      ENDIF
      IF (I.EQ.IGD) THEN
        ISHWB=-1
      ELSE
        IF (MESH(I+1,J).LE.0) ISHWB=-1
      ENDIF

C
C THE CALCULATION OF FLUX AT A GRID CELL USES THE GRID CELLS
C ADJACENT TO IT
C
C
C      E
C      (I-1)
C      1
C      N (J-1)  2 3 4  (J+1) S
C      5
C      (I+1)
C      W
C
C
C FOR C AND CMOM:
C      (1,I,J) IS X COMPONENT OF 1ST WAVE FIELD
C      (2,I,J) IS X COMPONENT OF 2ND WAVE FIELD
C      (3,I,J) IS Y COMPONENT OF 1ST WAVE FIELD
C      (4,I,J) IS Y COMPONENT OF 2ND WAVE FIELD
C
      DO M=1,4
        DO N=1,5
          CS(M,N) = 0.0
          CMOM5(M,N) = 0.0
        END DO
      END DO

      DO 6 M=1,4
        CS(M,3) = C(M,I,J)
        CMOM5(M,3) = CMOM(M,I,J)
        IF (I.NE.1) CS(M,1)=C(M,I-1,J)
        IF (J.NE.1) CS(M,2)=C(M,I,J-1)
        IF (J.NE.JGD) CS(M,4)=C(M,I,J+1)
        IF (I.NE.IGD) CS(M,5)=C(M,I+1,J)
        IF (I.NE.1) CMOM5(M,1)=CMOM(M,I-1,J)
        IF (J.NE.1) CMOM5(M,2)=CMOM(M,I,J-1)
        IF (J.NE.JGD) CMOM5(M,4)=CMOM(M,I,J+1)
        IF (I.NE.IGD) CMOM5(M,5)=CMOM(M,I+1,J)
6      CONTINUE
C

```



```

C      **  CALCULATE HORIZONTAL FLUX  **
C
C      DO 9 M=1,2
C
C      X COMPONENT
C
C      IF (C5(M,3).GE.0.0) THEN
C          HFT1=C5(M,3)*CMOM5(M,3)-CMOM5(M,1)*C5(M,1)
C      ELSE
C          HFT1=C5(M,5)*CMOM5(M,5)-CMOM5(M,3)*C5(M,3)
C      ENDIF
C      IF (C5(M+2,3).GE.0.0) THEN
C          HFT2=C5(M+2,3)*CMOM5(M,3)-CMOM5(M,2)*C5(M+2,2)
C      ELSE
C          HFT2=C5(M+2,4)*CMOM5(M,4)-CMOM5(M,3)*C5(M+2,3)
C      ENDIF
C
C      USE THE SIGNIFICANT HEIGHTS FROM THE PREVIOUS TIMESTEP
C
C      IF (ISHWB.GT.0) THEN
C          SIP = SIGHTL(M,I+1,J)
C      ELSE
C          SIP=2.*SIGHTL(M,I,J)-SIGHTL(M,I-1,J)
C      END IF
C
C      IF (ISHEB.GT.0) THEN
C          SIM = SIGHTL(M,I-1,J)
C      ELSE
C          SIM=2.*SIGHTL(M,I,J)-SIGHTL(M,I+1,J)
C      END IF
C
C      IF ((ISHWB.LT.0).AND.(ISHEB.LT.0)) THEN
C          SIP = SIGHTL(M,I,J)
C          SIM = SIGHTL(M,I,J)
C      END IF
C
C      CORRX=.25*(SIP**2-SIM**2)
C      HFLUX(M,1)=(HFT1+HFT2+CORRX)/GRDZ
C
C      Y COMPONENT
C
C      IF (C5(M,3).GE.0.0) THEN
C          HFT1=C5(M,3)*CMOM5(M+2,3)-CMOM5(M+2,1)*C5(M,1)
C      ELSE
C          HFT1=C5(M,5)*CMOM5(M+2,5)-CMOM5(M+2,3)*C5(M,3)
C      ENDIF
C      IF (C5(M+2,3).GE.0.0) THEN
C          HFT2=C5(M+2,3)*CMOM5(M+2,3)-CMOM5(M+2,2)*C5(M+2,2)
C      ELSE
C          HFT2=C5(M+2,4)*CMOM5(M+2,4)-CMOM5(M+2,3)*C5(M+2,3)
C      ENDIF
C
C      IF (ISHSB.GT.0) THEN

```

```

SJP = SIGHTL(M,I,J+1)
ELSE
SJP=2.*SIGHTL(M,I,J)-SIGHTL(M,I,J-1)
END IF

IF (ISHNB.GT.0) THEN
SJM = SIGHTL(M,I,J-1)
ELSE
SJM=2.*SIGHTL(M,I,J)-SIGHTL(M,I,J+1)
END IF

IF ((ISHSB.LT.0).AND.(ISHNB.LT.0)) THEN
SJP = SIGHTL(M,I,J)
SJM = SIGHTL(M,I,J)
END IF

CORRY=.25*(SJP**2-SJM**2)
HFLUX(M,2)=(HFT1+HFT2+CORRY)/GRDZ

9  CONTINUE

C
C  **  CALCULATE NEW MOMENTUM  **
C
MM=0
DO 14 N=1,2
DO 15 M=1,2
MM=MM+1
C
C  THE NEW MOMENTUMS AT (I,J) ARE FOUND USING THE OLD MOMENTUMS AND
C  THE VERTICAL AND HORIZONTAL FLUXES.
C
CMON(MM)=CMOM(MM,I,J)+(VFLUX(M,N)-HFLUX(M,N))*ITIMSTP*60./NSTEPS
15  CONTINUE
14  CONTINUE

C
C  **  COMBINE MOMENTUM COMPONENTS  **
C
C  THE MOMENTUM COMPONENTS ARE COMBINED WHEN NECESSARY, AND THE NEW
C  ANGLES FOUND
C
CALL COMBINE (U(1,I,J),CMON)

PHI1=0.0
IF (CMON(3).NE.0.0.OR.CMON(1).NE.0.0) PHI1=ATAN2(CMON(3),CMON(1))
PHI2=PHI1-PI
IF (CMON(4).NE.0.0.OR.CMON(2).NE.0.0) PHI2=ATAN2(CMON(4),CMON(2))
THETA1=ABS(THETA-PHI1)
THETA2=ABS(THETA-PHI2)

C
C  **  CALCULATE FREQUENCY AND SIGNIFICANT HEIGHT OF WAVES  **
C

```

C THE MOMENTUM, FREQUENCY, AND SIGNIFICANT HEIGHT OF THE WAVES IN EACH
C WAVE FIELD ARE CALCULATED.

```

C
      DO 10 M=1,2
      CM(M)=SQRT(CMON(M)**2+CMON(M+2)**2)
      IF (M.EQ.1) U1=WNDSPD*COS(THETA1)
      IF (M.EQ.2) U1=WNDSPD*COS(THETA2)
      IF (U1.LE.0.0) ALPHA(M)=0.006
      IF (U1.LE.0.0) GO TO 11
      COEFF=0.03300/(9.81**(2./3.))
      DEN=COEFF*U1**(2./3.)
      IF (CM(M).NE.0.0) F(M)=(0.01162*DEN/CM(M))**(3./7.)
      IF (CM(M).EQ.0.0) F(M)=0.0
      ALPHA(M)=DEN*F(M)**(2./3.)
      IF (ALPHA(M).LT.0.006) ALPHA(M)=0.006
11      IF (ALPHA(M).LT.0.006001.AND.CM(M).NE.0.0)
1      F(M) = (ALPHA(M)*.01162/CM(M))**(1./3.)
      IF (ALPHA(M).LT.0.006001.AND.CM(M).EQ.0.0) F(M) = 0.0
      IF (F(M).NE.0.0) SIGMA(M)=SQRT(CM(M) * (GRAV/2/PI) / F(M))
      IF (F(M).EQ.0.0) SIGMA(M)=0.0
      SHEIGHT(M,I,J)=SIGMA(M)

      IF (F(M).EQ.0.0) F(M)=1.0E38
10      CONTINUE

```

C
C THE COMPONENTS OF THE PHASE VELOCITIES ARE CALCULATED AND STORED
C

```

      C1=(GRAV/2/PI)/F(1)
      C2=(GRAV/2/PI)/F(2)
      CSTOR(1)=C1*COS(PHI1)
      CSTOR(2)= C2*COS(PHI2)
      CSTOR(3)= C1*SIN(PHI1)
      CSTOR(4)= C2*SIN(PHI2)
      WRITE (10,*) I,J,CMON,CSTOR

4      CONTINUE
5      CONTINUE

```

C Fin de la boucle sur les points de la grille (I,J)

C
C AS THE TIMESTEP ENDS, THE NEW MOMENTUMS BECOME THE OLD MOMENTUMS.
C

```

      DO M=1,4
      DO I=1,IGD
      DO J=1,JGD
      CMOM(M,I,J) = 0.0
      C(M,I,J) = 0.0
      END DO
      END DO
      END DO

```

```

REWIND (10)

DO 150 I=1,IGD
DO 151 J=1,JGD
IF (MESH(I,J).LE.0) GO TO 151
READ (10,*) II,JJ,CMON,CSTOR
IF (I.NE.II.OR.J.NE.JJ) STOP 'SCRATCH FILE 11 IN WRONG POSITION'
DO 13 M=1,4
CMOM(M,I,J) = CMON(M)
C(M,I,J) = CSTOR(M)
13 CONTINUE

151 CONTINUE
150 CONTINUE

```

```

C
C SAVE THE SIGNIFICANT HEIGHTS FOR THIS TIMESTEP
C
      DO I=1,IGD
      DO J=1,JGD
      DO M=1,2
      SIGHTL(M,I,J)=SHEIGHT(M,I,J)
      END DO
      END DO
      END DO

RETURN
END

```

```

C -----
C Procedure WINDINP
C -----

```

```

      SUBROUTINE WINDINP(WI1,WI2,WI3)

C
C THE INPUT FROM THE WIND (VERTICAL MOMENTUM FLUX) IS CALCULATED
C
C Les constantes suivantes sont definies par l'usager:
C RHOA = masse volumique de l'air a 10 degres Celsius
C RHOW = masse volumique de l'eau
C GAMMA = fraction de la contrainte de cisaillement

      PARAMETER (RHOA=1.247, RHOW=1025, GAMMA=0.033)
      PARAMETER (GRAV=9.81)

      COMMON /F/ WNDSPD, THETA1, THETA2, C1, C2, SIGMA(2)

C
C THE IMMOBILE SURFACE DRAG COEFFICIENTS ARE CALCULATED
C
      FAC1 = RHOA/RHOW/GRAV

```

```

FAC2 = 0.86*GAMMA/2

Z=SIGMA(1)*COS(THETA1)/5.0
IF (Z.LT.0.001) Z=0.001
DRAG1=0.16/(ALOG(10./Z))**2
Z=SIGMA(1)/5.0
IF (Z.LT.0.000001) Z=0.000001
DRAG2=0.16/(ALOG(10./Z))**2
Z=SIGMA(2)/5.0
IF (Z.GE.0.001) DRAG3=0.16/(ALOG(10./Z))**2
IF (Z.LT.0.001) DRAG3=0.0
FAC = WNDSPD * FAC1 * FAC2

C
C THE VERTICAL MOMENTUM FLUX IS CALCULATED IN EACH OF THE 3 DIRECTIONS
C OF THE WIND, AND THE 2 PHASE VELOCITY VECTORS.
C
  A=1.0-0.83*C1*COS(THETA1)/WNDSPD
  WI1=FAC*ABS(WNDSPD)*DRAG1*A*ABS(A)
  A=1.0-0.83*C1/(WNDSPD*COS(THETA1))
  WI2=FAC*COS(THETA1)*ABS(WNDSPD*COS(THETA1))*DRAG2*A*ABS(A)
  A=1.0-0.83*C2/(WNDSPD*COS(THETA2))
  WI3=FAC*COS(THETA2)*ABS(WNDSPD*COS(THETA2))*DRAG3*A*ABS(A)
  RETURN
  END

C -----
C Procedure COMBINE
C -----

SUBROUTINE COMBINE(VC,CC)

PARAMETER (PI=3.14159265359)

DIMENSION VC(2),CC(4)

C
C THE 4 MOMENTUM COMPONENTS (1X,2X,1Y,2Y) MAKE UP 2 PHASE VELOCITY
C VECTORS. C1 MUST BE LESS THAN 90 DEG. OUT OF PHASE WITH
C THE WIND. IF IT IS
C NOT, THE COMPONENTS ARE RELABELLED SO THAT IT IS IN THE QUADRANT OF
C THE WIND.
C
  PHIV = 0.0
  IF (VC(2).NE.0.0.OR.VC(1).NE.0.0) PHIV=ATAN2(VC(2),VC(1))
  PHI1 = 0.0
  IF (CC(3).NE.0.0.OR.CC(1).NE.0.0) PHI1=ATAN2(CC(3),CC(1))
  DPLUS = ABS(PHI1 - PHIV)
  IF(DPLUS.LT.1.5708.OR.DPLUS.GT.4.7124) GO TO 5

DO 4 M=1,2

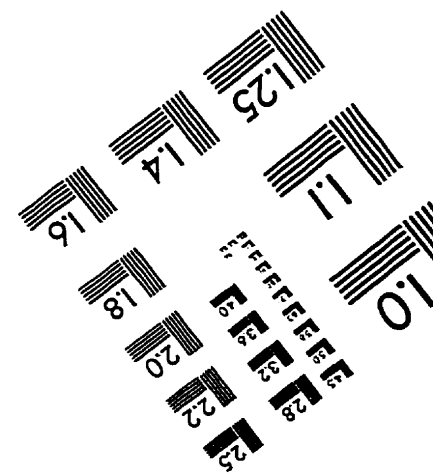
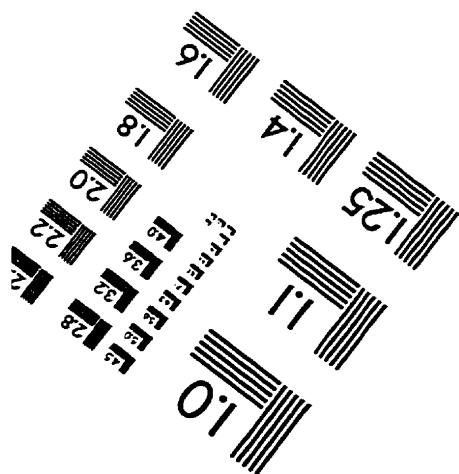
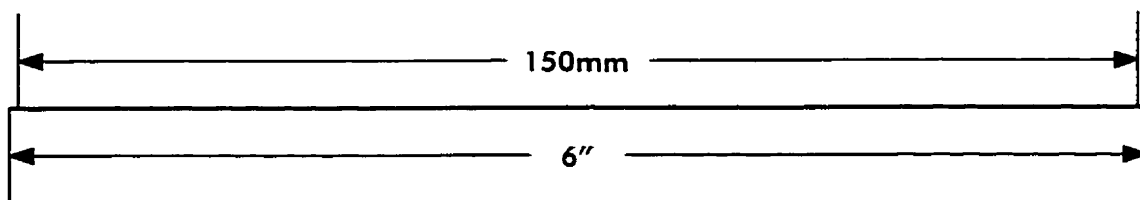
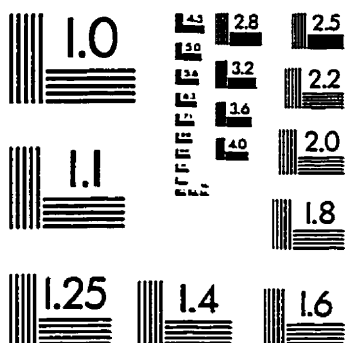
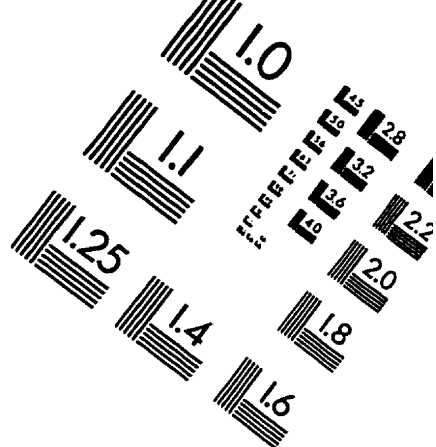
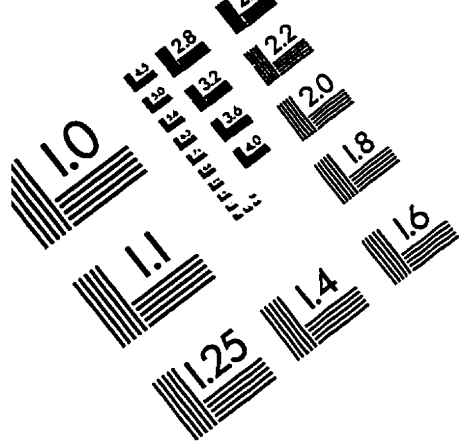
```

```

      I1=M*2-1
      I2=I1+1
      IF (VC(M).GE.0.0.AND.CC(I1).GE.0.0) GO TO 4
      IF (VC(M).LT.0.0.AND.CC(I1).LT.0.0) GO TO 4
      IF (VC(M).GE.0.0.AND.CC(I2).GE.0.0) GO TO 2
      IF (VC(M).LT.0.0.AND.CC(I2).LT.0.0) GO TO 2
      CC(I2)=CC(I2)+CC(I1)
      CC(I1)=0.0
      GO TO 4
2     TEMP=CC(I1)
      CC(I1)=CC(I2)
      CC(I2)=TEMP
4     CONTINUE
5     CONTINUE
C
C
C     CC(I2) IS RESOLVED INTO COMPONENTS IN THE DIRECTION OF CC(I1) AND
C     PERPENDICULAR TO IT.
C     THE COMPONENT IN THE DIRECTION OF CC(I1) IS ADDED TO IT ONLY
C     IF THEY ARE IN THE SAME DIRECTION.
C
      PHI1 = 0.0
      IF (CC(3).NE.0.0.OR.CC(1).NE.0.0) PHI1=ATAN2(CC(3),CC(1))
      PHI2=PHI1-PI
      IF (CC(4).NE.0.0.OR.CC(2).NE.0.0) PHI2=ATAN2(CC(4),CC(2))
      PHID = PHI2 - PHI1
      CC2 = SQRT(CC(2)**2 + CC(4)**2)
      CC2IN = CC2 * COS(PHID)
      IF(CC2IN.LE.0.0) RETURN
      CC2PERP = CC2 * SIN(PHID)
      CC1 = SQRT(CC(1)**2 + CC(3)**2)
      CC1 = CC1 - CC2IN
      CC(1) = CC1 * COS(PHI1)
      CC(3) = CC1 * SIN(PHI1)
      PHIN = PHI1 + 1.5708
      CC(2) = CC2PERP * COS(PHIN)
      CC(4) = CC2PERP * SIN(PHIN)
      RETURN
      END

```

TEST TARGET (QA-5)



APPLIED IMAGE, Inc.
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved