

ANNEXE 1

Rapport sectoriel (Koutitonsky, 2002)



## INSTITUT DES SCIENCES DE LA MER DE RIMOUSKI

Étude d'impact sur l'environnement du projet de reconstruction du pont et de la route 199 dans les municipalités du Hâvre-aux-Maisons et de Fatima, aux Îles-de-la-Madeleine.

MODÉLISATION NUMÉRIQUE INTÉGRÉE DES COURANTS, DES VAGUES ET DU TRANSPORT DES SÉDIMENTS À L'ENTRÉE DE LA LAGUNE DU HÂVRE-AUX-MAISONS.



V. G. Koutitonsky, Ph.D.

Rapport de recherche : LHE-1-02  
Laboratoire d'hydraulique environnementale.

Avril 2002

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES .....	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
RÉSUMÉ.....	1
1. LA ZONE D'ÉTUDE.....	5
2. OBJECTIFS.....	14
3. LE MILIEU PHYSIQUE .....	15
3.1 MESURES EN MER.....	15
3.1.1 MÉTHODES D'ANALYSE .....	16
3.1.1.1 Séries temporelles des courants, des niveaux d'eau et des vents.....	16
3.1.1.3 Analyse des vagues.....	17
3.1.1.2 Analyse des sédiments.....	17
3.1.2 PARAMÈTRES DU MILIEU PHYSIQUE.....	18
3.1.2.1 Vents .....	18
3.1.2.2 Vagues .....	19
3.1.2.2 Marées et niveaux d'eau.....	20
3.1.2.3 Courants .....	22
3.2 MODÉLISATION INTÉGRÉE DU MILIEU PHYSIQUE.....	41
3.2.1 PROPAGATION DE LA MARÉE DANS LES DEUX LAGUNES.....	41
3.2.1.1 Approche.....	41
3.2.1.2 Modèle hydrodynamique MIKE21-HD.....	42
3.2.1.3 Simulation numérique.....	43
3.2.2 TRANSPORT DE SÉDIMENTS .....	47
3.2.2.1 Approche.....	47
3.2.2.2 Modèle de vagues MIKE21-NSW.....	48
3.2.2.2 Modèles hydrodynamiques MIKE21-NHD .....	50
3.2.2.4 Modèle de transport de sédiments non-cohésifs MIKE21-ST .....	50
3.2.2.5 Simulations numériques .....	51
4. SIMULATION DES IMPACTS .....	76
4.1 APPROCHE.....	76
4.2 IMPACTS DES PILIERS DU PONT DE LA VARIANTE 1.....	78
4.3 IMPACTS DES PILIERS DU PONT DE LA VARIANTE 2.....	78

6. RECOMMANDATIONS.....	79
RÉFÉRENCES.....	80
ANNEXE A : MESURES DES PARAMÈTRES PHYSIQUES DU MILIEU .....	82
LISTE DES FIGURES – ANNEXE A.....	83
A.1 INTRODUCTION .....	84
A.2 OBJECTIF .....	84
A.3 MISSIONS 2001 .....	85
A.3.1 Dates .....	85
A.3.2 Membres.....	85
A.3.3 Logistique .....	85
A.4 DÉPLOIEMENT ET RÉCUPÉRATION DES INSTRUMENTS DE MESURE.....	86
A.4.1 Station M: Paramètres météorologiques .....	87
A.4.2 Station 1 : Marégraphe, houlographe et thermistor.....	87
A.4.3 Station 2 : Marégraphe, courantomètre, salinomètre et thermistor .....	88
A.4.4 Station 3 : Marégraphe et thermistor .....	89
A.4.5 Station 4 : Marégraphe et thermistor .....	89
A.4.6 Station 5 : Marégraphe, courantomètre, salinomètre et thermistor .....	90
A.4.7 Station 6 : Marégraphe et thermistor .....	90
A.4.8 Station 7 : Marégraphe, courantomètre, salinomètre et thermistor .....	91
A.4.9 Station 8 : Courantomètre.....	92
A.4.10 Station 9 : Marégraphe et thermistor .....	93
A.4.11 Station 10 : Marégraphe et thermistor .....	93
A.4.12 Station 11 : Marégraphe et thermistor .....	94
A.4.13 Station 12 : Marégraphe et thermistor .....	94
A.4.14 Station 13 : Marégraphe et thermistor .....	95
A.5. PRÉLÈVEMENTS DE SÉDIMENTS.....	96
ANNEXE B : MÉTHODES D'ANALYSE DES MESURES DE TERRAIN .....	115
B.1 SÉRIES DES NIVEAUX, COURANTS ET DES VENTS .....	117
B.1.1 EXTRACTION DE LA TENDANCE.....	118
B.1.2 LISSAGE ET DÉCIMATION .....	118
B.1.3 ANALYSE HARMONIQUE.....	119
B.1.4 ANALYSE SPECTRALE.....	122
ANNEXE C : THÉORIE DU MODÈLE NUMÉRIQUE DES VAGUES (MIKE21-NSW).....	127
A.1 PROPAGATION ET RÉFRACTION .....	131

A.2	GÉNÉRATION ET DISSIPATION .....	132
A.2.1	GÉNÉRATION PAR LE VENT .....	134
A.2.2	DISSIPATION PAR LE FOND .....	136
A.2.3	DISSIPATION PAR DÉFERLEMENT .....	139
ANNEXE D : THÉORIE DU MODÈLE NUMÉRIQUE HYDRODYNAMIQUE (MIKE21-HD).....		142
ANNEXE E : THÉORIE DU MODÈLE NUMÉRIQUE DE TRANSPORT DE SÉDIMENTS NON-COHÉSIFS (MIKE21-ST) .....		143

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte des Iles de la Madeleine (bas) dans le Golfe du Saint-Laurent (haut).....	10
Figure 2: Photo aérienne de la passe d'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons datant du 22 juillet 1992, indiquant la présence des deltas interne et externe et l'emplacement du pont actuel en 2002.....	11
Figure 3: Bathymétrie reconstituée des lagunes du Hâvre-aux-Maisons et de Grande-Entrée aux Iles-de-la-Madeleine.....	12
Figure 4: Dimensions des passes de Grande-Entrée (haut), du Hâvre-aux-Maisons (centre) et du Pont du Détroit (bas). Les passes ne sont pas représentées à la même échelle spatiale.....	13
Figure 5 : Position des stations de mesure de paramètres hydrodynamiques aux Iles-de-la-Madeleine du 23 mai au 13 juillet 2001. Les coordonnées sont en unités UTM ( <i>Universal Transverse Mercator</i> ).....	29
Figure 6: Statistiques mensuelles des vents : fréquence d'occurrence (%) par classe de vitesse des vents en provenance de huit points cardinaux dans la région centrale du Golfe Saint-Laurent (Mclaren Plansearch Ltd., 1991).....	30
Figure 7: Vitesses et directions des vents mesurées à la station M de mai à juillet 2001.....	31
Figure 8 : Rose des vents mesurés à la station M de mai à juillet 2001.....	32
Figure 9: Hauteurs significatives et périodes des vagues mesurées à la station 1 (bleu) et données de vent à la station M (rouge) de mai à juillet 2001.....	33
Figure 10 : Densité spectrale de la variance des vagues enregistrées à 03 :00 et à 21 :00 le 4 juin 2001 à la station 1 en fonction de la vitesse des vents d'est.....	34
Figure 11 : Niveaux d'eau mesurés à l'intérieur (2, 3, 4, 5, 6, 7) et à l'extérieur des lagunes de Hâvre-aux-Maisons et Grande-Entrée du 23 mai au 12 juillet 2001.....	35
Figure 12: Variations des niveaux d'eau par rapport à la moyenne à l'intérieur (2, 3, 4, 5, 6, 7) et à l'extérieur des lagunes du Hâvre-aux-Maisons et de Grande-Entrée du 3 au 6 juin 2001. L'intervalle en ordonnée est de 0.5 m. Les lignes verticales en pointillés sont des lignes d'égales phases et la ligne verticale pleine est un repère temporel.....	36
Figure 13 : Variations des niveaux d'eau sous le pont du Hâvre-aux-Maisons en fonction des vents et de la pression atmosphérique du 30 mai au 14 juin 2001. La période des vents d'est est encadrée.....	37
Figure 14 : Données de courants (m/s) à la passe du Hâvre-aux-Maisons (courant 2 V, positif vers le nord), à la passe du Pont du Détroit (courant 5 U. positif vers l'est) et à la passe de Grande-Entrée (courant 8 V, positif vers le nord).....	38
Figure 15 : Données de courants et niveaux d'eau à l'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons (courant 2 V et niveau 1) et à l'entrée de la lagune de Grande-Entrée (courant 8 V et niveau 9).....	39
Figure 16 : Relation temporelle entre les niveaux d'eau à la station 1 à l'extérieur de la passe du Hâvre-aux-Maisons et les niveaux et courants sous le pont à la station 2 durant un cycle de marée diurne.....	40

Figure 17 : Grille de calcul du modèle hydrodynamique des deux lagunes, G0m30, avec plus de détails pour la lagune du Havre-aux-Maisons (centre) et la région de la passe à son entrée (bas).....	58
Figure 18 : Comparaison des niveaux d'eau observés (ligne pointillée) et simulés par le modèle (ligne pleine) aux stations 1, 2, 3 et 4 dans la lagune du Havre-aux-Maisons, du 4 au 6 juin 2001. ....	59
Figure 19: Amplitude des composantes harmoniques diurne (K1) et semi-diurne (M2) dans la lagune du Havre-aux-Maisons.....	60
Figure 20 : Phase des composantes harmoniques diurne (K1) et semi-diurne (M2) dans la lagune du Havre-aux-Maisons.....	61
Figure 21 : Amplitude des composantes harmoniques diurne (K1) et semi-diurne (M2) dans la lagune de Grande-Entrée.....	62
Figure 22 : Phase des composantes harmoniques diurne (K1) et semi-diurne (M2) dans la lagune de Grande-Entrée.....	63
Figure 23 : Amplitude des composantes harmoniques diurne (K1) et semi-diurne (M2) dans la lagune de Grande-Entrée.....	64
Figure 24 : Phase des composantes harmoniques diurne (K1) et semi-diurne (M2) dans la lagune de Grande-Entrée.....	65
Figure 25 : Courants et niveaux d'eau simulés par vents de l'est à marée basse (haut ) et marée haute (bas). Niveaux à la station 1 et vitesse et direction des vents au centre.....	66
Figure 26: Courants et niveaux d'eau simulés par vents du nord-ouest à marée basse (haut ) et marée haute (bas). Niveaux à la station 1 et vitesse et direction des vents au centre.....	67
Figure 27 : Approche méthodologique adoptée pour de la modélisation intégrée du transport de sédiment non-cohésif.....	68
Figure 28 : Grilles utilisées pour le calcul des vagues (G0W, G1w, G2W), pour le calcul des courants de marée, de vents et de vagues (G0m90, G1m30, G2m10) et pour le calcul du transport de sédiments dans la zone d'étude (G2m10).....	69
Figure 29 : Vecteurs de réfraction de hauteurs significatives des vagues de 2.5 m de hauteur en provenance de l'est vers la zone d'étude, par vents d'est de 11 m/s. Les résultats de cette grille de calcul G0w sont imposés à la frontière de la grille de calcul G1w (rectangle vert).....	70
Figure 30 : Vecteurs de réfraction des hauteurs significatives des vagues en provenance de G0w et imposées à la frontière est par vents d'est de 11 m/s. Les résultats de cette grille de calcul G1w seront interpolés vers la grille plus fine G2m10. ....	71
Figure 31 : Hauteurs significatives et des périodes détaillées dans la zone d'étude calculées sur la grille G1w par le modèle NSW.....	72
Figure 32 : Courants maximum et niveaux d'eau aux alentours de la passe de la lagune du Havre-aux-Maisons, sous l'effet combiné des vents d'est, des marées hautes (haut) et basses (bas) et des vagues en provenance de l'est dans le Golfe. ....	73
Figure 33 : Transport de sédiment instantané calculé par le modèle ST sur la grille G2m10. lors des plus forts courants de flot (haut) et de jusant (bas) calculés par le modèle HD sur la même grille, voir figure précédente (32).....	74
Figure 34 : Transport net (m3/s/m) de sédiments non-cohésifs calculé par le modèle MIKE21-ST sur une période d'exactly deux cycles de marée diurne, du 4 au 6 juin 2001. ....	75





## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Dimensions des passes du Hâvre-aux-Maisons, du Pont du Détroit et de la Grande-Entrée telles que calculées numériquement d'après les graphiques sur les cartes de Tiphane (1976).....	9
Tableau 2: Stations de mesure, positions géographiques, profondeurs moyennes, les dates et heures locales de début et fin des enregistrements dans l'eau et paramètres mesurés (C=courant, Z=niveau d'eau, V=vague, T=temp�rature et S=salinit�). .....	25
Tableau 3: Amplitude et phase des composantes K1 (marée diurne) et M2 (marée semi-diurne) extraites par l'analyse harmonique des niveaux d'eau enregistrés du 23 mai au 12 juillet 2001 dans les lagunes de Hâvre-aux-Maisons et Grande-Entrée et à l'extérieur dans le Golfe, avec leurs intervalles de confiance à 95%.....	26
Tableau 4 : Résultats des analyses granulométriques, Lagune du Hâvre-aux-Maisons.....	27
Tableau 5: Comparaison des amplitudes et des phases des constituantes harmoniques K1 et M2 de la marée obtenues par l'analyse harmonique des niveaux observés (OBS) et simulés (MOD) aux stations 1 à 7 et 9 durant 15 jours.....	56
Tableau 6: Grilles de calcul utilisées pour les simulations du transport de sédiments dans la zone d'étude sous l'influence des marées, des vents et des vagues, selon l'approche décrite à la figure 27.....	57

## RÉSUMÉ

La construction d'un nouveau pont sur piliers dans la zone d'écoulement de la passe d'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons pourrait avoir des impacts sur le milieu physique des lagunes du Hâvre-aux-Maisons et de Grande-Entrée. D'une part, ces piliers pourraient changer la phase et l'amplitude de la marée dans ces lagunes et ainsi affecter la circulation résiduelle et les processus biogéochimiques qui lui sont associés et, d'autre part, ces piliers pourraient modifier le transport de sédiments dans la zone immédiate de l'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons.

Cette étude décrit les paramètres physiques du milieu en l'absence de piliers et cela à l'aide de mesures temporelles de ces paramètres et de la modélisation numérique intégrée du transport de sédiments sous l'effet combiné des marées, des vents et des courants.

Des séries temporelles de la vitesse et de la direction des vents, de la pression atmosphérique, des niveaux d'eau, des courants marins, et des vagues ont été enregistrées du 23 mai au 13 juillet 2001 à divers endroits à l'intérieur et l'extérieur des lagunes. Au total treize stations de mesures en mer et une station météorologique autonome ont été déployées. Des échantillons de sédiments ont aussi été recueillis dans la zone de la passe d'entrée du Hâvre-aux-Maisons.

L'analyse des séries chronologiques a permis d'établir que les vents ont soufflé majoritairement du sud durant la période de mesure, avec des vitesses atteignant 10 à 15 m/s au cours des tempêtes. Normalement, les vents dans la région soufflent du cadran sud-ouest en été et nord-ouest en hiver. La baie de Plaisance au large de la passe d'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons sera protégée des vagues générées par ces vents. Par contre, les vents du cadran est produiront des vagues qui seront réfractées vers la zone d'étude par les hauts fonds dans la baie de Plaisance. Les mesures de vagues ont révélé que les vents d'est produisent les plus grandes vagues dans la zone d'étude.

Cependant, ces hauteurs diminuent rapidement avant d'arriver dans la zone d'étude à cause du déferlement sur les hauts fonds.

Les analyses harmoniques effectuées sur un total de 11 séries temporelles de niveau d'eau ont permis de décrire avec précision la propagation de la marée du Golfe vers les lagunes. La marée atteint une amplitude de 0.6 m en marée de vive-eau et de 0.2 m en mare de morte-eau. La marée est mixte et ses principales composantes harmoniques sont les composante semi-diurnes M2 et diurnes K1. La propagation de la marée du Golfe vers la lagune du Hâvre-aux-Maisons est fortement influencée par l'étranglement de la passe de Hâvre-aux-Maisons. Cet étranglement cause une diminution de l'amplitude de la marée et un retard de phase de l'ordre de 100 minutes entre l'extérieur et l'intérieur de cette lagune. Des piliers construits dans la passe pourront amplifier ce retard de phase et changer la circulation résiduelle dans la lagune.

L'analyse des niveaux d'eau en fonction des paramètres météorologiques a permis d'établir que les changements du niveau lors des tempêtes de vents d'est et des baisses de la pression atmosphérique sont de l'ordre de 1 m dans la zone d'étude.

Les plus forts courants mesurés sous le pont actuel surviennent juste avant les marées hautes et les marées basses. Ils atteignent des vitesses supérieures à 1 m/s dans la passe et dans le chenal de navigation à l'extérieur de la passe dans le Golfe.

Finalement, l'analyse granulométrique des sédiments échantillonnés dans la région de la passe d'entrée a révélé que la majorité des sédiments sont composées de sables fins dont la taille moyenne varie entre 150 et 250  $\mu\text{m}$ . Une forte proportion de graviers a été retrouvée dans les sédiments sous le pont actuel et dans le chenal de navigation à l'extérieur de la passe d'entrée.

Ces observations ont ensuite servi à développer des modèles numériques pour simuler d'une part la propagation de la marée dans les deux lagunes, et d'autre part le transport local des sédiments dans la zone d'étude sous l'effet combiné

des marées, des vents et des vagues. Ce dernier objectif a été atteint par une approche de modélisation intégrée comprenant un modèle hydrodynamique, un modèle de génération de vague et un modèle de transport des sédiments non-cohésifs. Les modèles numériques utilisés sont tous des modules du système intégré de modélisation MIKE21 offert par de l'institut hydraulique Danois ([www.dhi.dk](http://www.dhi.dk)).

La simulation de la propagation de la marée dans les deux lagune a bien reproduit les phases et amplitudes des composantes M2 et K1 en tout points de mesure par marégraphe à l'exception des niveaux sous le pont actuel. Un manque d'information sur la bathymétrie du delta interne de la lagune semble être à l'origine de l'écart entre les phases observées et simulées. Ce modèle permettra d'évaluer l'impact des piliers sur la phase des marées dans les deux lagune.

Le transport des sédiments nécessite une connaissance de la distribution de l'énergie des vagues dans la région. Cette distribution fut calculée à l'aide d'un modèle numérique qui tient compte de la génération, de la réfraction, du déferlement et de la dissipation des vagues en eau peu profonde dans un région côtière à fetch limité. Les simulations indiquent que les hauteurs des vagues en provenance du cadran est vont toutes être réfractées de la même façon dans la zone d'étude à cause des faibles profondeurs qui les guident. Les simulations suggèrent aussi que les vagues déferlent avant d'arriver à la zone d'étude, de sorte que les hauteurs significatives diminuent à près de 0.25 m dans la zone d'étranglement menant à la passe. À toute fin pratique, cette zone ne sera pas affectée par les vagues. Par contre, les tenseurs de cisaillement de la radiation de la vague vont générer une circulation particulière des eaux de l'est vers l'ouest, avec un transport longitudinal de sédiments dirigé aussi d'est en ouest près du rivage.

Lorsque les courants générés par les vagues sont ajoutés aux courants de marée par vents d'est, la distribution des courants dans la région de la passe d'entrée est telle que les plus forts courants surviennent durant le jusant et le flot. Ces courants se manifestent à la passe d'entrée de la lagune du Håvre-aux-

Maisons et dans le chenal de navigation à l'extérieur. Les analyses granulométriques des échantillons de sédiment ont d'ailleurs indiqué la présence de graviers à ces endroits. Les vitesses du courant dépassent 1 m/s et la composante latérale de la circulation affiche une tendance marquée de l'est vers l'ouest. Ceci correspond au sens de la dérive littorale des sédiments à cet endroit.

Les transports de sédiment sont finalement calculés dans la zone d'étude à l'aide d'un modèle numérique de transport de sédiments non-cohésifs. De façon générale, une tendance de dérive littorale des sédiments de l'est vers l'ouest semble persister à la fois durant les marées montantes et descendantes. La principale zone d'érosion demeure le chenal de navigation et de façon plus prononcée durant le jusant. Ceci explique la présence de graviers et l'absence de sable à cet endroit. Une zone d'accumulation semble exister à l'emplacement actuel des hauts fonds du côté droit du chenal de navigation et proche de la rive droite. Une flèche de haut fond sableux semble enfin persister à la droite du chenal de navigation proche de la passe d'entrée de la lagune. Cette flèche est visible sur une photographie aérienne de la zone d'étude.

Finalement le transport net de sédiment en  $m^3/s/m$  durant exactement deux cycles de marée diurne a été estimé par le modèle numérique en tenant compte des marées et des vagues en provenance de l'est dans le Golfe. La dérive littorale des sédiments de l'est vers l'est est bien évidente, tout comme la zone d'érosion potentielle dans le chenal de navigation. Il ne semble pas y avoir de transport net de sédiments en travers de la passe d'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons.

Cet ensemble de modèle numérique peut maintenant être appliqué à l'étude de l'impact des piliers sur le transport local dans la région.

## 1. LA ZONE D'ÉTUDE

L'archipel des Iles-de-la-Madeleine est situé sur le plateau Madelinois dans la partie sud du Golfe Saint-Laurent, dans l'est du Canada (figure 1). Près de 42% de sa superficie est constituée d'îles rocheuses, 30% par des cordons sableux (30%) et 28% par des lagunes (Tiphane, 1976). Les principales lagunes sont la lagune de Grande-Entrée au nord-est, la lagune du Havre-aux-Maisons au centre, la lagune du Hâvre-aux-Basques au sud-ouest et les lagunes Le Bassin et Hâvre-Aubert au sud. Ces lagunes sont des lieux de refuge pour plusieurs espèces marine tels que des oiseaux, des crustacés, des poissons, des mollusques et autres. Elles sont aussi exploitées par diverses activités socio-économiques telles que la pêche, la mariculture et le tourisme. Il est donc important de bien comprendre le milieu physique et les interactions biogéochimiques dans les lagunes afin d'assurer le développement durable de leurs ressources face aux contraintes imposées par les activités socio-économiques sans cesse grandissantes.

La présente étude vise à caractériser le milieu physique à l'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons où le ministère des Transports du Québec envisage la construction d'un pont en remplacement du pont existant. Quelques variantes exploratoires du tracé de ce nouveau pont prévoient la mise en place d'un pont supporté par des piliers dans l'eau dans la zone d'approche de la lagune par le Golfe. Cette zone qui comprend aussi la passe d'entrée et la région immédiate à l'intérieur de la lagune constituent la zone d'étude. La figure 2 est une photo aérienne de cette zone d'étude datant de juillet 1992.

Par ailleurs, la lagune du Hâvre-aux-Maisons communique au nord-est avec la lagune de Grande-Entrée par la passe du pont du Déroit (figure 1). La construction d'une jetée pour le pont du Déroit a déjà restreint le libre échange des eaux entre les deux lagunes à cet endroit et provoque en certaines conditions de vents et marées une eutrophisation locale du milieu (Tiphane, 1976). Au nord-est, la lagune de Grande-Entrée communique à son tour avec le Golfe-du Saint-Laurent par la passe de la Grande-Entrée (figure 1). Les eaux des

deux lagunes sont donc échangées avec les eaux du Golfe par les passes de Grande-Entrée et de Hâvre-aux-Maisons.

La bathymétrie de la lagune du Hâvre-aux-Maisons est encore mal connue. Une carte bathymétrique du Service hydrographique Canadien (SHC) datant de 1935 (carte 4451) est encore disponible mais les profondeurs ont probablement changé depuis.

Une bathymétrie géoréférencée des lagunes du Hâvre-aux-Maisons et de Grande-Entrée a été reconstituée pour la présente étude à partir des cartes marines 4022, 4024, 4451, 4951, 4952, 4954 et 4955 du SHC, des relevés bathymétriques sur cartes en papier effectués par Tiphane (1976) et des récents relevés bathymétriques du Ministère du Transport du Québec en 1998 à l'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons. Cette bathymétrie reconstituée est présentée à la figure 3.

Tiphane (1976) a aussi mesuré les profils des profondeurs en travers des passes du Hâvre-aux-Maisons, du Pont du Détroit et de la Grande-Entrée et il les présente graphiquement sur ses cartes bathymétriques. Ces profils ont été numérisés à l'aide d'un numériseur Calcomp 9000 et ils sont reproduits à la figure 4. Leurs dimensions sont présentées au tableau 1. Le niveau de référence des profondeurs n'étant pas clairement défini dans la référence, ces dimensions sont présentées seulement à titre comparatif.

De façon générale, à part les données du Ministère du Transport, les données de bathymétrie disponibles sont approximatives, surtout dans les régions d'approche de la passe de la lagune du Hâvre-aux-Maisons à partir du Golfe et dans la région du delta interne. En fait, il n'existe aucune donnée de profondeur pour les chenaux et les hauts fonds dans ce delta interne, excepté pour le chenal menant au quai de Fatima à l'ouest de la lagune (carte SHC 4955). Ce manque de donnée pourrait être à l'origine d'erreurs de calculs de la modélisation numérique de la circulation des eaux dans les lagunes (section 3.2.3.1) et du transport des sédiments à la passe d'entrée (section 3.2.3.3). Toute étude

quantitative du transport de sédiment dans la région devra prévoir une nouvelle couverture bathymétrique de la région dans le future.

La circulation des eaux dans les lagunes du Hâvre-aux-Maisons et de Grande-Entrée est causée par les variations du niveau de l'eau à leurs passes ouvertes sur le Golfe et par les vents locaux à la surface des lagunes. Les variations du niveau aux entrées sont causées par les variations temporelles de la marée, des vents et de la pression atmosphérique dans le Golfe Saint-Laurent (Koutitonsky and Bugden, 1991; Koutitonsky et al., 2002). Les marées dans la région centrales du Golfe sont de nature mixte, c'est à dire qu'il existe une superposition de deux marées semi-diurnes à une marée diurne par jour (Godin, 1979). Il existe aussi un point amphidromique (pas de changement de l'élévation de la marée) de la principale composante semi-diurne M2 au nord-ouest des Iles-de-la-Madeleine. Ceci affectera la phase et l'amplitude de la cette composante M2 autour des îles. Les différences de phase et d'amplitude aux entrées des deux lagunes vont modifier les courants de marées dans les lagunes. Il est donc important de bien caractériser les phases et les amplitudes de la marée à l'extérieur et l'intérieur des deux lagunes afin d'être en mesure d'évaluer l'impact de la construction des piliers du nouveau pont dans la zone de la passe de la lagune du Hâvre-aux-Maisons. Un changement de phase de marée à cette passe pourrait changer la circulation résiduelle de la marée dans les deux lagunes et avoir des conséquences sur la dérive des larves et autre processus biogéochimique associés à cette circulation résiduelle.

La marée à l'entrée des deux lagunes à été étudiée en détails par Mayzaud et al. (1991) et Koutitonsky et Booth (1996) à partir de mesures de niveau aux deux entrées en 1988 et 1989. Les résultats de ces analyses ont révélé la présence de forts courants de marée dans les passes d'entrée des deux lagunes ( $> 1$  m/s) ainsi qu'un retard de phase d'environ 40 minutes de la marée à la passe de Hâvre-aux-Maisons par rapport à celle de la Grande-Entrée. Cependant, tel que démontré dans la présente étude, la phase de la marée à l'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons affiche un fort gradient spatial de sorte que la mesure de 1988 effectuée en un seul point dans l'espace n'est pas suffisante pour caractériser la propagation de la marée à cet endroit. Ceci explique le nombre



élevé de marégraphes déployés dans les deux lagunes par l'ISMER pour cette étude.

Un autre impact potentiel associé à la construction de piliers dans l'eau est celui du changement du régime actuel de transport de sédiments dans les deltas externe et interne de la passe de la lagune du Hâvre-aux-Maisons. Un examen de la photo aérienne de la zone d'étude (figure 2) permet de déceler un transport littoral de sédiments de l'est vers le sud-ouest à l'extérieur de la passe et la présence d'un delta interne sous forme de panache sédimentaire. Drapeau (1988) a étudié la dynamique sédimentaire à la passe de la lagune de Grande-Entrée et il a conclu que cette passe était en équilibre. Il ne semble pas exister d'étude équivalente pour la passe du Hâvre-aux-Maisons ou tout autre étude de la dynamique sédimentaire dans cette zone d'étude. La stabilité de cette passe est assurée artificiellement par la présence des supports en béton aux extrémités du pont actuel. À défaut d'étude approfondie de la dynamique sédimentaire dans la zone d'étude, ces supports en béton devront demeurer en place après la construction du nouveau pont.

Tableau 1 : Dimensions des passes du Hâvre-aux-Maisons, du Pont du Détroit et de la Grande-Entrée telles que calculées numériquement d'après les graphiques sur les cartes de Tiphane (1976).

Passe	Hâvre-aux-Maisons	Pont du Détroit	Grande-Entrée
Largeur	84 m	62 m	460 m
Profondeur	-7.4 m	-4.8 m	-7.2 m
Surface mouillée	622 m <sup>2</sup>	298 m <sup>2</sup>	3312 m <sup>2</sup>

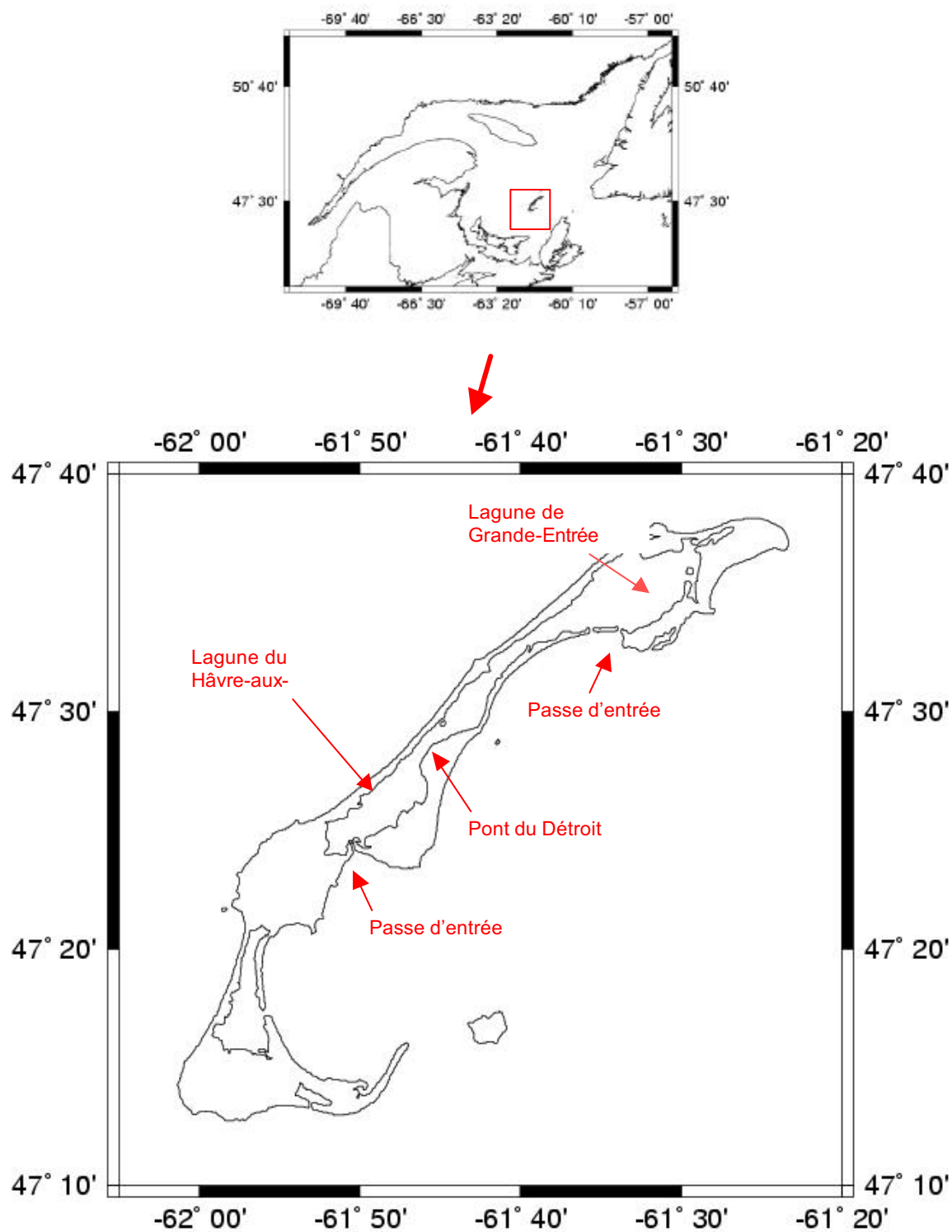


Figure 1 : Carte des Iles de la Madeleine (bas) dans le Golfe du Saint-Laurent (haut).



Figure 2: Photo aérienne de la passe d'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons datant du 22 juillet 1992, indiquant la présence des deltas interne et externe et l'emplacement du pont actuel en 2002.

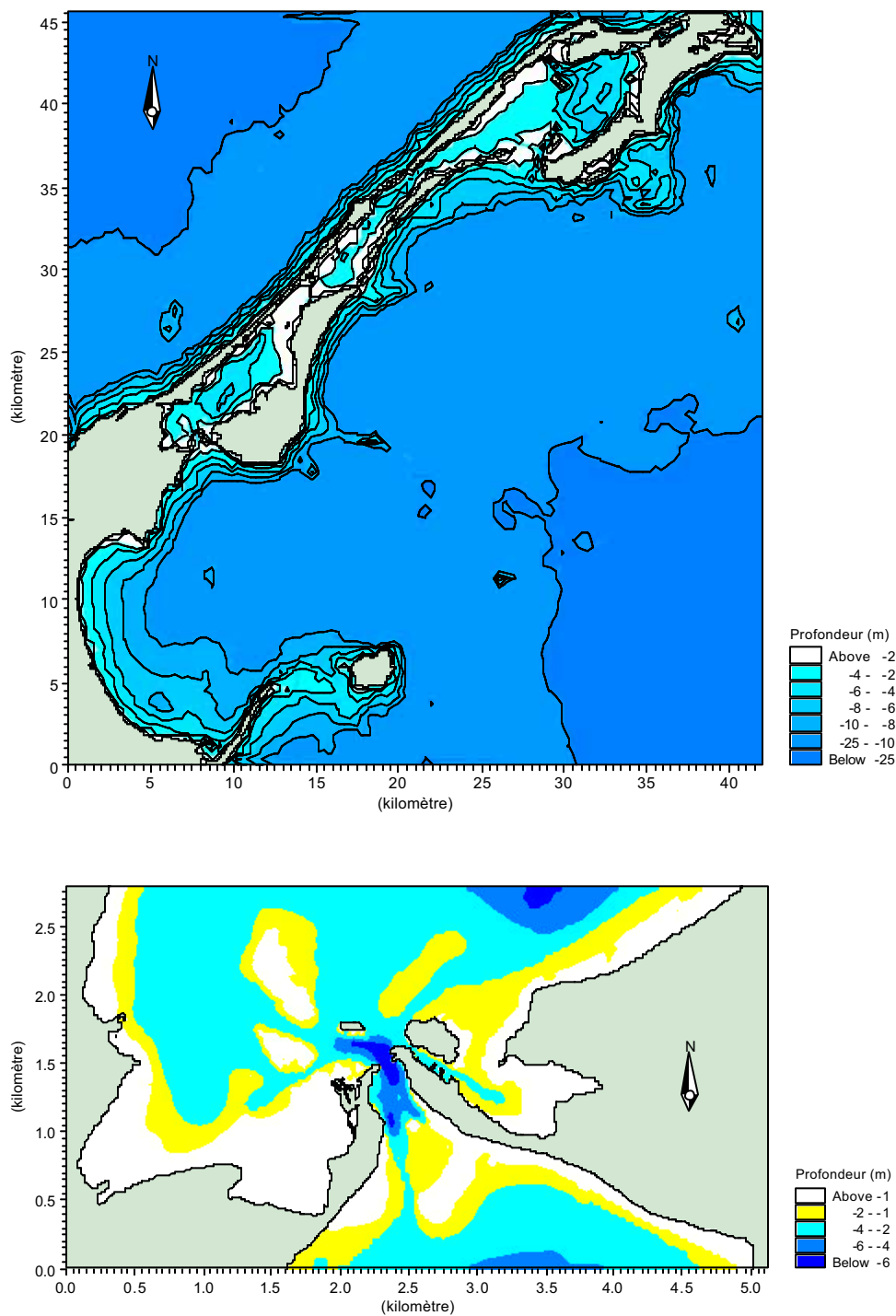


Figure 3 : Bathymétrie reconstituée des lagunes du Hâvre-aux-Maisons et de Grande-Entrée aux Iles-de-la-Madeleine.

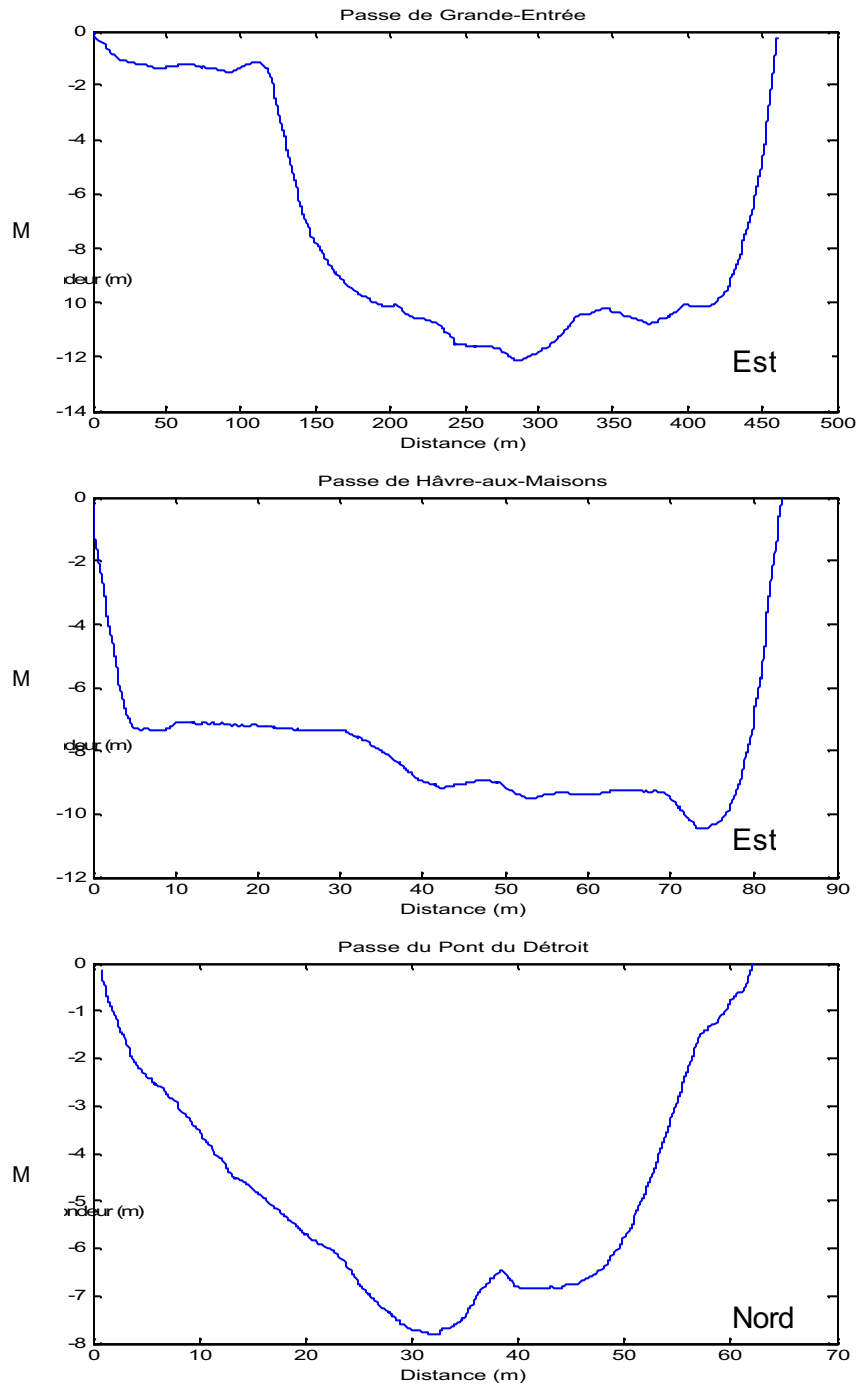


Figure 4 : Dimensions des passes de Grande-Entrée (haut), du Hâvre-aux-Maisons (centre) et du Pont du Déroit (bas). Les passes ne sont pas représentées à la même échelle spatiale.

## 2. OBJECTIFS

Les objectifs de la présente étude sont de décrire le milieu physique dans la zone d'étude et dans sa zone d'influence et, dans un deuxième temps, d'évaluer l'impact des piliers du nouveau pont sur ce milieu physique.

Les paramètres du milieu physique considérés sont :

- (1) La circulation des eaux dans les lagunes de Hâvre-aux-Maisons et de Grande-Entrée sous l'influence des vents et des marées pour établir les amplitudes et les phases de la marée qui serviront de référence lors de l'évaluation des impacts des piliers.
- (2) La circulation détaillée des eaux dans la zone de la passe du Hâvre-aux-Maisons avant et après la construction des piliers.
- (3) Les vagues dans la zone d'approche de la passe du Hâvre-aux-Maisons pour le calcul du transport des sédiments.
- (4) Le transport des sédiments non-cohésifs dans la région de la passe de Hâvre-aux-Maisons avant et après la construction des piliers du nouveau pont.

### 3. LE MILIEU PHYSIQUE

#### 3.1 MESURES EN MER

Des mesures de terrain ont été effectuées par l'ISMER en 2001 pour décrire le milieu physique de la zone d'étude et des lagunes communicantes de Hâvre-aux-Maisons (HAM) et de Grande-Entrée (GE). Les mesures consistent en des séries temporelles de pression atmosphérique, de vitesse et de direction du vent, de niveau d'eau, de vagues et des courants marins. Ces mesures ont été complétées par des mesures spatiales de la taille des sédiments dans la zone d'étude.

Les positions des stations de mesure sont présentées à la figure 5. Le tableau 2 affiche la position géographique des stations, les dates et durées des enregistrements et les paramètres mesurés à chaque station. Une description détaillée des stations d'échantillonnage, des instruments utilisés, des opérations de déploiement et de récupération ainsi que les positions et les durées des paramètres mesurés est présentée à l'annexe A.

En résumé, la vitesse et la direction du vent et la pression atmosphérique ont été mesurés à 12 stations. Les niveaux d'eau ont été enregistrés dans la zone d'étude, sur le cap Alright à HAM0. Les niveaux d'eau ont été enregistrés à 12 stations disposées juste à l'extérieur de la passe d'entrée de la lagune HAM (station 1), à la passe d'entrée de la lagune HAM sous le pont existant (station 2), à l'intérieur de la lagune HAM du côté sud-ouest (station 3) et du côté nord-est (station 4), à l'intersection des lagunes HAM et GE sous le pont du Détroit (station 5), du côté sud-ouest de la lagune GE (station 6) et du côté nord-est à l'entrée de la baie de Clarke (station 7), à l'extérieur de la passe d'entrée de la lagune GE (station 9), au large de l'entrée de la lagune GE dans le Golfe du Saint-Laurent (station 10), à l'île d'Entrée dans la baie de Plaisance (station 11), au large de l'ancienne ouverture de la lagune du Hâvre-aux-Basques dans la baie de Plaisance (station 12) et dans le Golfe du côté ouest de la lagune du Hâvre-aux-Basque. Les courants ont été mesurés aux entrées des deux lagunes (stations 2 et 8) et à leur intersection



sous le pont du Déroit (station 5). Les vagues ont été enregistrées à la station 1 à l'extérieur de la passe d'entrée de la lagune du HAM.

### 3.1.1 MÉTHODES D'ANALYSE

#### 3.1.1.1 Séries temporelles des courants, des niveaux d'eau et des vents.

Toutes les séries temporelles, à part celle de la hauteur des vagues, ont été traitées de la même façon. La variabilité temporelle des paramètres hydrodynamiques dans le Golfe Saint-Laurent (Koutitonsky and Bugden, 1991) suggère que, de façon générale, une série temporelle peut être représentée par les composantes suivantes :

$$y(t) = y_T(t) + y_A(t) + y_M(t) + y_R(t) \quad (1)$$

où :  $y_T(t)$  est la tendance de la série;

$y_A(t)$  sont les oscillations d'origine météorologique;

$y_M(t)$  sont les oscillations de la marée;

$y_R(t)$  sont les oscillations résiduelles.

La tendance de la série  $y_T$  est la variation temporelle de la moyenne  $y_0$  de la série durant une période d'enregistrement qualifiée de courte par rapport à la période des plus longues oscillations présentes dans cette série (e.g. changements saisonniers). Les oscillations météorologiques  $y_A$  sont la manifestation des effets locaux et de grande échelle de la pression atmosphérique et des vents sur les paramètres hydrodynamiques. Leurs périodes sont généralement de l'ordre de 2 à 20 jours. Les oscillations de la marée sont la résultante de l'effet combiné du soleil et de la lune sur les mouvements des masses d'eau et sur leurs propriétés. Elles sont la résultante de plusieurs composantes harmoniques de périodes annuelles, semi-annuelles, mensuelles, semi-mensuelles, diurnes et semi-diurnes. Ces périodes sont connues avec précision. Finalement, les oscillations résiduelles sont des oscillations dont l'origine ou la cause n'est pas connue. Les méthodes d'analyses

de séries chronologiques utilisées permettent de différencier entre les contributions respectives des forces et elles sont décrites en détails à l'annexe B.

### 3.1.1.3 Analyse des vagues

Les mesures de vagues ont été enregistrées par un houlographe submersible posé sur le fond à la station 1 dans la zone d'étude (figure 5). Le pas temporel d'enregistrement était de 2 Hz et la période d'enregistrement était de 20 minutes aux 3 heures. L'analyse de chaque enregistrement de 20 minutes a consisté en les étapes suivantes :

- Soustraction de la pression atmosphérique mesurée à la station M.
- Conversion des mesures de pression en mesures de hauteur d'eau.
- Calcul et soustraction du niveau moyen.
- Analyse spectrale de l'enregistrement pour estimer la période.
- Calcul de la longueur d'onde.
- Calcul de la hauteur instantanée de la vague en surface en fonction de la profondeur, de la période et de la longueur d'onde.
- Calcul de la hauteur significative de l'enregistrement de 20 minutes.

Une série temporelle de hauteur significative de vague est enfin reconstituée à un pas temporel de 3 heures.

### 3.1.1.2 Analyse des sédiments

Les échantillons de sédiments recueillis à l'aide d'une benne à 46 stations aux alentours de la passe d'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons (Figure A.18) ont été soumis à une analyse granulométrique à l'ISMER. L'appareil utilisé est un compteur au laser de taille de particule du type Coulter modèle LS100. Les paramètres estimés sont les pourcentages de graviers, de sables, de silts et d'argiles contenues dans le sédiment, la taille moyenne des grains, sa déviation standard, sa variance et l'écart de la distribution normale (*kurtosis* et *skewness* en anglais).

### 3.1.2 PARAMÈTRES DU MILIEU PHYSIQUE.

#### 3.1.2.1 Vents

Les vents mensuels aux Iles-de-la-Madeleine ont été analysés par McLaren Plansearch Ltd., (1991) et les roses sont présentées à la figure 6. Les vents soufflent généralement du cadran ouest. En hiver, ils soufflent du nord-ouest alors qu'en été ils soufflent plutôt du sud-ouest. Koutitonsky et al. (2002) ont étudié l'effet des vents sur la circulation dans les lagunes à partir de mesures de niveau effectuées en 1988 et 1989. De façon générale, un vent soufflant du cadran ouest aura tendance à causer une circulation de la lagune du Hâvre-aux-Maisons vers la lagune de Grande-Entrée. Ceci favorise une entrée des eaux de la baie de Plaisance vers la lagune du Hâvre-aux-Maisons et une sortie des eaux par la passe de Grande-Entrée, en moyenne. Ces vents par contre ne produisent pas de vagues dans la baie de Plaisance à cause du très court « fetch » dont ils disposent. Par conséquent, ils ne constituent pas une source d'énergie pour le transport de sédiments à l'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons. A l'intérieur des lagunes, les vents produisent des courants près de rives dans la même direction et un retour d'eau quelque part au milieu.

Les vents du cadran est (nord-est, est et sud-est) sont moins fréquents mais plus intenses. Les vagues associées à ces vents arriveront dans la baie de Plaisance et seront réfractées vers la passe d'entrée de la lagune du HAM par les faibles profondeurs tout en déferlant au cours de leur trajectoire. Ces vents produiront aussi un empilement des eaux dans la baie de Plaisance et dans zone d'approche de la passe d'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons. Cet empilement pourrait être de l'ordre de 0.5 m à 1.0 m pour des vents d'est soufflant vers la baie de Plaisance à 20 m/s et plus (Bowden, 1983).

Les vitesses et les directions des vents mesurés par la station météorologique sur le cap Alright (station M, figure A-2) et la rose des vents correspondante sont respectivement présentés aux figures 7 et 8. On constate que les vitesses ont

dépassé 10 m/s en provenance du sud à quelques reprises, une fois de l'est du 4 au 6 juin 2001 et le reste du temps du cadran ouest.

### 3.1.2.2 Vagues

La figure 9 présente les données des hauteurs significatives et des périodes des vagues à la station 1, en fonction des vitesses et des directions des vents à la station M. Les périodes dont les hauteurs significatives sont inférieures à 0.2 m ne sont pas présentées.

Ces résultats suggèrent que les hauteurs significatives des vagues dans la zone d'étude sont généralement inférieures à 1 m et cela même par vents soufflant du sud à plus de 10 m/s. La raison est que ces vagues déferlent avant d'arriver à la station 1. Par contre, la seule fois que des vents ont soufflé de l'est, du 4 au 6 juin 2001, la hauteur des vagues a atteint 1.3 m à la station 1. L'événement est arrivé lors d'une tempête de vents d'est au cours de laquelle la vitesse maximale du vent a atteint 11 m/s en provenance de 110 degrés à 21 :00 le 4 juin 2001. La période des vagues correspondante était de 6.8 s. Les analyses spectrales des enregistrements de vague le même jour (figure 10), avant le passage de la tempête (03 :00 heures) et durant la tempête (21:00 heures) permettent de constater clairement la formation de l'énergie des vagues entre 03 et 21 heures, avec une augmentation correspondante de la période.

En résumé, les vagues arrivant dans la zone d'étude au niveau de la station 1 auront normalement des hauteurs de l'ordre de 1 m lorsque les vents soufflent à des vitesses de 10 m/s en provenance du cadran est. Ces hauteurs sont relativement faibles car les vagues du Golfe déferlent à cause des faibles profondeurs de l'eau sur leurs trajectoires d'approche. Cependant, même si les hauteurs significatives sont relativement faibles, elles vont quand même causer un empilement d'eau qui s'ajoutera à l'empilement occasionné par le cisaillement des vents d'est dans la baie de Plaisance. Les courants orbitaux des vagues près du fond ajoutés aux courants résultants des tensions de radiation (*radiation stresses*) associés aux vagues vont causer le transport des sédiments observé le long du littoral dans la zone d'étude (e.g. figure 2). Les vagues en provenance du

cadran est sont donc responsables du transport littoral de sédiments de l'est vers l'ouest dans la zone de l'entrée de la lagune du Havre-aux-Maisons.

### 3.1.2.2 Marées et niveaux d'eau.

Les séries de niveaux d'eau enregistrées du 23 mai au 12 juillet à toutes les stations de mesure excepté la station 13 sont présentées à la figure 11. Les intervalles en ordonnée sont de 0.5 m. La régularité temporelle des oscillations suggère que les marées sont la cause principale des variations du niveau de l'eau à l'extérieur et à l'intérieur des lagunes. Les séries révèlent aussi la présence de marées de vive-eau et de morte-eau dont la période est d'environ 15 jours. Finalement, les séries indiquent que les amplitudes du niveau à l'extérieur des lagunes (stations 1, 9, 10, 11 et 12) sont atténuées à l'intérieur des lagunes (bloc des stations 2, 3, 4, 5, 6, 7).

L'atténuation des niveaux à l'intérieur des lagunes est mise en évidence à la figure 12. Cette figure présente les mêmes variations du niveau de l'eau sur une période de 15 jours. Les lignes verticales en pointillés mettent en évidence l'ampleur du retard de la phase de la marée à l'intérieur des lagunes (stations 2, 3, 4, 5, 6, 7) par rapport à la marée à l'extérieur dans le Golfe (stations 1, 10, 11, 12). En d'autres termes, les marées hautes ou basses dans les lagunes sont en retard par rapport à celles de l'extérieur. Le plus grand retard est enregistré au pont du Déroit (station 5). Ceci fut déjà constaté par Mayzaud et al.(1991) et Koutitonsky et al. (2002). La figure 12 indique aussi la présence d'une marée semi-diurne superposée à une marée diurne. Des analyses harmoniques des enregistrements (Foreman, 1977, annexe B) ont été effectuées sur toutes les séries de niveaux d'eau. Elles ont révélé que les principales composantes harmoniques de la marée aux Iles-de-la-Madeleine sont les composantes semi-diurnes M2 et diurne K1. Ceci est conforme à la description des marées dans le Golfe (Godin, 1979). Les phases des composantes M2 et K1 font en sorte que leur superposition produit deux crêtes et un creux de marée par jour. En réalité, un des creux de la marée semi-diurne M2 coïncide exactement avec le creux de la marée diurne K1 la plupart du temps.

Le retard de la marée dans les lagunes peut être quantifié plus exactement à l'aide des résultats des analyses harmoniques des ondes M2 et K1 présentés au tableau 3. On y trouve les estimés des amplitudes et des phases des composantes K1 et M2 ainsi que l'erreur (95%) associée à ces estimés. Ces résultats confirment que les amplitudes des principales composantes de la marée sont atténuées dans les lagunes et que les deux composantes accusent un retard à mesure qu'elles pénètrent et se propagent dans les lagunes. En connaissant les périodes des ondes K1 et M2 qui sont respectivement de 23.928 heures et 12.432 heures, il est possible d'estimer les retards de ces composantes d'un endroit à l'autre. Par exemple, le retard de la phase de la composante K1 à la station 3 par rapport à sa phase à la station 1 sera de :

$$\text{Retard de phase} = (289 - 266) / 360 \times 23.928 = 1.53 \text{ heures.}$$

Un calcul équivalent pour l'onde M2 donne un retard de 1.93 heures entre ces mêmes stations. Compte tenu des erreurs des estimés, ces retards sont du même ordre de grandeur. Le plus long retard de pénétration de la marée se manifeste à la station 5 sous le pont du Déroit. Les ondes K1 et M2 mettent respectivement 2.25 et 2.49 heures pour y arriver à partir de la station 1, et 3.65 et 2.87 heures à partir de la station 9 à la sortie de la Grande-Entrée.

L'effet des vents et du baromètre inverse de la pression atmosphérique (-1 mb = +1 cm) sur le niveau de l'eau à la passe de Hâvre-aux-Maisons peut être décelé en examinant les séries présentées à la figure 13. On y retrouve la pression atmosphérique, la vitesse et le vecteur du vent et le niveau d'eau durant une période de 15 jours, du 30 mai au 14 juin 2001. Les fluctuations de pression atmosphérique sont de l'ordre de 40 mb, ce qui selon l'effet du baromètre inverse, peut causer un changement de niveau de l'ordre de 0.4 m. Un examen attentif de la figure 13 révèle que du 30 mai au 1 juin, les vents soufflent du sud à 8 m/s et la pression atmosphérique est basse. L'effet est le suivant : le niveau est relativement haut sous le pont à cause de l'empilement des eaux par le vent du sud et de la basse pression, avec un niveau moyen de près de 9.2 m. Du 2 au 5 juin, les vents soufflent de l'est en s'intensifiant et la pression atmosphérique

monte. Le niveau moyen baisse à près de 9.0 m car d'une part les vents de l'est empilent des eaux de la lagune de Grande-Entrée vers la lagune du Hâvre-aux-Maisons et dans la baie de Plaisance mais d'autre part la haute pression atmosphérique force le niveau vers la baisse. La résultante est quand même une petite baisse du niveau sous le pont. Finalement, la vitesse des vents diminue le 5 juin et les vents du nord-ouest suivent. Ceci provoque une relaxation du niveau dans la lagune HAM, sous le pont et dans la baie de Plaisance. Le niveau moyen sous le pont est à environ 8.9 m à ce moment. Il ressort de cette brève analyse que de fortes baisses de pression atmosphérique et de forts vents du cadran est pourront faire monter le niveau moyen de l'eau au creux de la tempête d'environ 0.5 m à 1 m dans la région de la passe d'entrée de la lagune du HAM.

En résumé, la surface mouillée de la passe du HAM sous le pont actuel est telle qu'elle empêche la libre propagation de la marée du Golfe dans la lagune. Cette passe occasionne un retard d'environ 1 heure et demi à la propagation de la marée. Tout changement de la surface de la passe, par la présence de piliers d'un nouveau pont à cet endroit, pourra occasionner un changement de la phase de la marée à l'intérieur de la lagune du HAM. Ceci aura pour effet de changer la circulation de la marée dans les deux lagunes et, par conséquent, de modifier tout processus associé à la circulation résiduelle à la marée dans les deux lagunes tel que la dérive de larves d'espèces marines, le transport de sédiments fins, le temps de renouvellement des eaux ou autre. L'impact des piliers de pont sur les phases et les amplitudes des marées dans les lagunes sera évalué à la section 4. Il faudra prévoir aussi un dégagement d'au moins 1 m pour tenir compte des fluctuations du niveau de l'eau associées aux tempêtes d'origine météorologiques.

### 3.1.2.3 Courants

Des mesures de courant à 1 m au-dessus du fond ont été enregistrées aux trois passes (voir figures 1, 3 et 4) : la passe du HAM (station 2), la passe du Pont du Détroit (station 5) et la passe de GE (station 8). Même si les mesures à la passe du HAM ont été enregistrées de mai à juillet 2001, seules les données du 25 mai

au 4 juin 2001 sont de bonne qualité car le reste du temps le trépied supportant le courantomètre était en position couchée suite à deux renversements par les forts courants. Le premier renversement est survenu au début et une inspection de routine par un plongeur a permis de rétablir le trépied en le consolidant au fond. Mais il a été renversé à nouveau le 4 juin 2001 par les forts courants et ceci n'a pas été corrigé. Par ailleurs, les données de courants à la station 5 semblent douteuses. En effet, la profondeur indiquée sur les cartes du SHC (e.g 4951) au niveau du pont du Détroit sont de l'ordre de 1m, alors qu'en réalité il fut constaté après l'installation du mouillage que la profondeur était de 9 m. Il semble donc y avoir un trou isolé au-dessous du pont et le courantomètre était au fond. Donc, les courants enregistrés à la station 5 ne sont probablement pas représentatifs de l'écoulement à cet endroit. Finalement, les données enregistrées par le courantomètre dans la passe de Grande-Entrée sont d'excellente qualité et cela durant toute la période d'enregistrement.

Les séries complètes des vitesses horaires du courant perpendiculaire à chacune des passes sont présentées à la figure 14. Les courants dans les passes du HAM et de GE se renversent régulièrement avec la marée et leurs vitesses dépassent 1 m/s. Les courants à la passe du HAM ont des vitesses plus élevées car la surface transversale de cette passe est nettement plus petite que celle de la passe de GE.

Un examen plus détaillé des séries de courants à ces passes, en fonction des niveaux d'eau mesurés juste à l'extérieur des passes (figure 15), permet de caractériser la relation qui existe entre ces courants et les niveaux d'eau. On constate par exemple que les courants aux deux passes ont bien une période semi-diurne. Par ailleurs, ces courants ne sont pas en phase : la phase du courant à la passe du HAM accuse un retard par rapport à celle du courant à la passe de GE. Finalement, les phases des courants aux deux passes sont légèrement en avance par rapport à celles des niveaux d'eau. Du côté de la passe de HAM, les relations temporelles entre les niveaux à l'extérieur à la station 1 et les courants et niveaux sous le pont à la station 2 sont présentées à la figure 16. On constate que les courants sous le pont précèdent le niveau au même endroit par environ 3 heures. Ceci indique que l'onde de marée semi-



diurne à cet endroit est de nature progressive, avec le maximum des courants survenant à la marée baissante ou montante. Par contre les niveaux sous le pont sont atténués et en retard par rapport aux niveaux à l'extérieur de la passe dans le Golfe. Les plus forts courants sous le pont se manifestent environ 30 minutes avant la marée haute et deux heures avant la marée basse à la station 1.

#### 3.1.2.4 Sédiments.

Les résultats des analyses granulométriques des 46 échantillons de sédiments recueillis aux alentours de la passe du HAM sont présentés au tableau 4. Ils indiquent que la majorité des sédiments dans la zone d'étude sont des sables fins dont la taille moyenne se situe entre 150 et 250  $\mu\text{m}$ . Les déviations standard sont de l'ordre de 50 à 100  $\mu\text{m}$ . À quelques endroits, une fraction importante des sédiments sont des silts. Ceci est le cas par exemple pour les stations 1, 7 et 11 dans le delta interne de la lagune (voir figure A.18). Par contre, on retrouve à certains endroits dans les chenaux d'écoulement des sédiments composés de graviers. C'est le cas par exemple à la station 44 dans le chenal au nord de la baie du sud, à la station 13 dans le chenal au sud de l'île Rouge, sous le pont à la station 15, et plus au large dans le chenal de navigation aux stations 22, 24, 25, 27 et 30. Ceci témoigne de la présence de forts courants à ces endroits. Il n'est donc pas surprenant de constater une absence totale d'argiles dans les sédiments à l'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons.

Tableau 2: Stations de mesure, positions géographiques, profondeurs moyennes, les dates et heures locales de début et fin des enregistrements dans l'eau et paramètres mesurés (C=courant, Z=niveau d'eau, V=vague, T=température et S=salinité).

Station	Latitude / Longitude	Prof. (m)	Début Mai 2001	Fin Juillet 2001	C	Z	V	T	S
1	47° 23.6255' N 61° 49.9879' O	3.4	16 :40 / 23	15 :35 / 12		√	√	√	
2	47° 23.6255' N 61° 49.9879' O	9.2	17 :00 / 23	09 :15 / 13	√	√		√	√
3	47° 24.6516' N 61° 51.9822' O	2.4	14 :40 / 23	16 :06 / 12		√		√	
4	47° 27.7717' N 61° 46.5865' O	1.5	11 :00 / 24	16 :39 / 12		√		√	
5	47° 28.7150' N 61° 45.0090' O	10.0	13 :00 / 24	17 :10 / 11	√	√		√	√
6	47° 32.9785' N 61° 39.5109' O	3.5	10 :20 / 25	18 :14 / 11		√		√	
7	47° 37.0923' N 61° 28.5242' O	3.3	12 :00 / 25	12 :42 / 12	√	√		√	√
8	47° 33.3735' N 61° 33.8320' O	9.0	16 :20 / 24	11 :15 / 10	√				
9	47° 33.3735' N 61° 33.8320' O	6.5	17 :20 / 24	18 :14 / 10		√		√	
10	47° 30.9042' N 61° 27.9767' O	16.0	18 :00 / 24	10 :17 / 12		√		√	
11	47° 16.8126' N 61° 43.0530' O	3.5	20 :20 / 23	12 :17 / 11		√		√	
12	47° 17.0000' N 61° 54.4990' O	5.2	16 :20 / 25	13 :18 / 11		√		√	
13	47° 32.9785' N 61° 39.5109' O	3.3	10 :20 / 25	09 :02 / 11		√		√	

Tableau 3: Amplitude et phase des composantes K1 (marée diurne) et M2 (marée semi-diurne) extraites par l'analyse harmonique des niveaux d'eau enregistrés du 23 mai au 12 juillet 2001 dans les lagunes de Hâvre-aux-Maisons et Grande-Entrée et à l'extérieur dans le Golfe, avec leurs intervalles de confiance à 95%.

Station	Marée diurne <b>K1</b>		Marée semi-diurne <b>M2</b>	
	Amplitude (m)	Phase (deg)	Amplitude (m)	Phase (deg)
1	0.19 ± 0.07	266 ± 23	0.20 ± 0.07	294 ± 22
2	0.12 ± 0.01	270 ± 5	0.11 ± 0.01	316 ± 6
3	0.11 ± 0.01	289 ± 3	0.10 ± 0.01	350 ± 21
4	0.12 ± 0.01	294 ± 3	0.10 ± 0.01	352 ± 3
5	0.13 ± 0.01	300 ± 3	0.12 ± 0.01	6 ± 3
6	0.13 ± 0.01	278 ± 3	0.14 ± 0.01	329 ± 2
7	0.13 ± 0.01	278 ± 4	0.13 ± 0.01	322 ± 4
9	0.16 ± 0.01	245 ± 2	0.19 ± 0.01	283 ± 2
10	0.15 ± 0.01	246 ± 2	0.18 ± 0.01	281 ± 2
11	0.16 ± 0.01	244 ± 3	0.18 ± 0.01	289 ± 2
12	0.16 ± 0.01	243 ± 4	0.19 ± 0.01	287 ± 3
13	0.20 ± 0.01	235 ± 9	0.03 ± 0.03	30 ± 66

Tableau 4 : Résultats des analyses granulométriques, Lagune du Hâvre-aux-Maisons.

Ech	% Gravier	% Sable	% Silt	% Argile	Moy. ( $\mu\text{m}$ )	Median ( $\mu\text{m}$ )	Dev.Std. ( $\mu\text{m}$ )	Skewness	Kurtosis
1	0.0	68.3	30.3	1.4	166.1	126.2	158.2	1.709	3.076
2	0.0	98.0	2.0	0.0	186.5	183.4	53.0	0.055	0.513
3	0.0	98.6	1.3	0.1	271.2	261.8	88.4	0.446	1.051
4	0.0	96.1	3.7	0.2	181.2	176.9	64.2	0.253	0.530
5	0.0	99.5	0.5	0.0	293.7	272.9	116.5	1.107	1.740
6	0.0	98.7	1.2	0.1	247.3	235.3	85.9	0.842	1.671
7	0.0	46.7	50.5	2.8	96.9	61.6	111.6	2.340	6.762
8	0.0	94.6	5.2	0.3	178.1	175.2	68.8	0.174	0.302
9	0.0	98.6	1.3	0.1	224.2	217.9	69.7	0.887	3.684
10	0.0	97.4	2.4	0.1	233.8	221.3	90.3	0.909	2.091
11	0.0	76.6	22.4	1.1	179.8	149.3	143.5	1.328	2.128
12	38.1	61.9	0.0	0.0	4100.0	309.3	5080.0	0.936	-0.584
13	36.7	63.3	0.0	0.0	1460.0	478.2	1555.0	1.338	1.704
14	0.0	100.0	0.0	0.0	240.4	232.2	67.8	0.980	2.094
15	90.7	9.3	0.0	0.0	19496.0	23840.0	9284.0	-0.719	-0.929
16	0.0	97.4	2.4	0.2	207.9	198.5	79.8	1.365	4.625
18	0.0	97.1	2.8	0.1	195.8	191.5	61.3	0.074	0.774
20	0.0	100.0	0.0	0.0	254.9	247.3	68.1	0.615	0.559
21	0.0	100.0	0.0	0.0	208.7	204.4	51.3	0.411	-0.231
22	93.0	7.0	0.0	0.0	17974.0	15905.0	8636.0	0.068	-1.206
23	0.0	98.3	1.6	0.1	210.6	200.1	75.8	1.892	6.874
24	25.0	75.0	0.0	0.0	2250.0	300.4	3289.0	1.297	-0.121
25	20.2	79.8	0.0	0.0	3317.0	251.5	6201.0	1.687	1.030
26	6.1	93.9	0.0	0.0	604.9	224.9	1457.0	3.928	14.120
27	81.3	18.8	0.0	0.0	8748.0	8526.0	4910.0	0.115	-0.912
28	0.0	100.0	0.0	0.0	227.0	216.9	70.6	1.603	4.757
29	0.0	98.2	1.7	0.1	200.3	197.2	53.8	-0.030	0.774
30	58.0	42.0	0.0	0.0	4391.0	3317.0	3989.0	0.831	-0.259

Tableau 4 (suite) : Résultats des analyses granulométriques, Lagune du Hâvre-aux-Maisons.

Ech	% Gravier	% Sable	% Silt	% Argile	Moy. ( $\mu\text{m}$ )	Median ( $\mu\text{m}$ )	Dev.Std. ( $\mu\text{m}$ )	Skewness	Kurtosis
31	0.0	100.0	0.0	0.0	185.5	158.7	197.5	14.840	243.10
32	0.0	97.9	2.1	0.0	179.8	177.1	49.5	0.026	0.648
33	1.0	99.0	0.0	0.0	279.2	223.5	284.9	6.651	51.410
34	0.0	100.0	0.0	0.0	261.1	240.1	198.1	13.200	209.70
35	2.0	98.0	0.0	0.0	339.9	227.7	633.9	5.911	33.800
36	0.0	97.5	2.3	0.2	165.2	161.3	49.7	0.433	1.958
37	0.0	98.6	1.4	0.0	192.8	188.0	53.4	0.345	0.500
38	0.0	99.0	1.0	0.0	221.2	210.4	75.3	1.515	4.511
39	0.0	100.0	0.0	0.0	223.5	212.5	71.9	1.598	4.434
40	0.0	100.0	0.0	0.0	209.9	205.5	51.2	0.418	-0.225
41	0.0	97.5	2.3	0.2	158.5	155.3	47.7	0.323	1.762
42	0.0	97.4	2.4	0.2	166.6	161.0	54.4	0.669	1.959
43	0.0	74.8	23.7	1.5	151.4	133.8	131.1	2.369	7.993
44	43.8	56.3	0.0	0.0	3055.0	945.2	3453.0	1.109	0.274
45	0.0	97.2	2.7	0.1	196.0	193.8	58.6	-0.141	0.887
46	0.0	97.0	2.8	0.2	184.1	181.8	56.5	-0.052	0.959

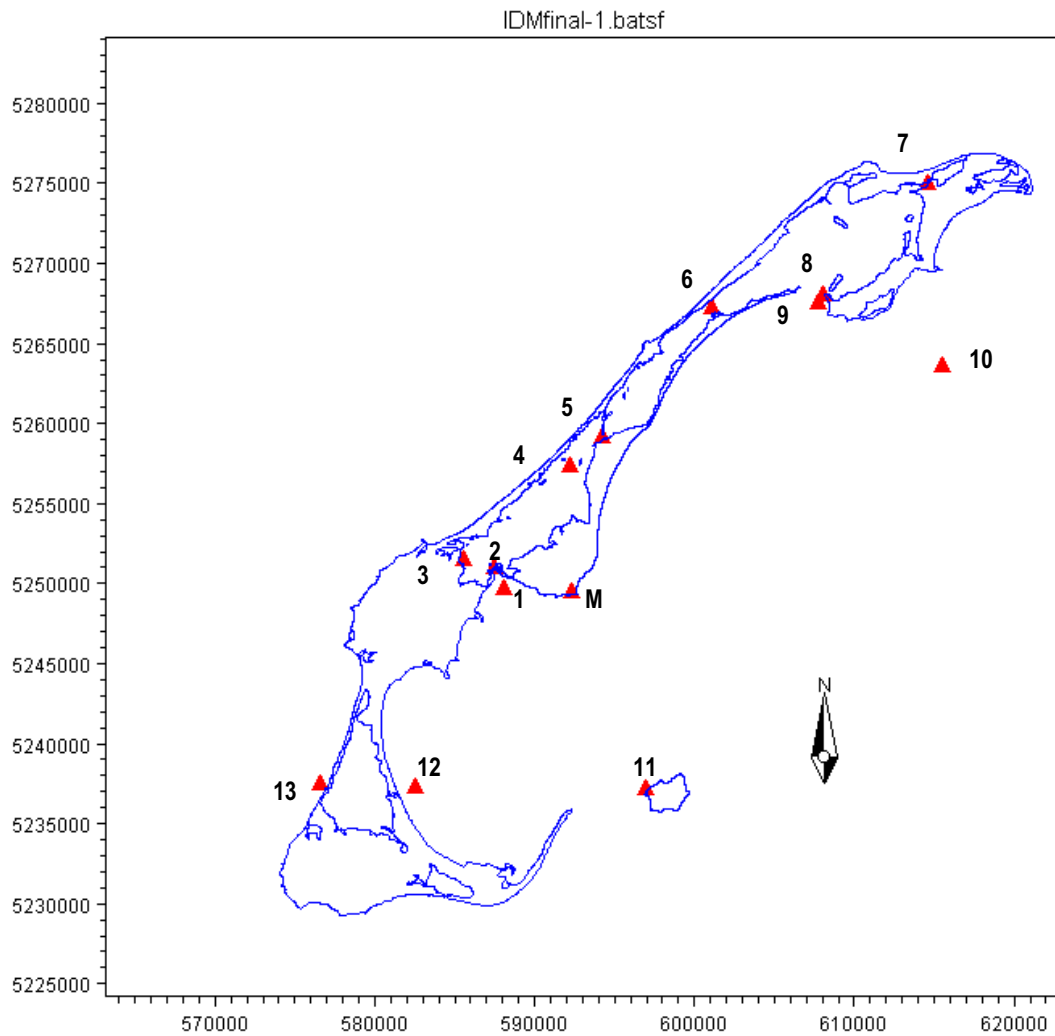


Figure 5 : Position des stations de mesure de paramètres hydrodynamiques aux Iles-de-la-Madeleine du 23 mai au 13 juillet 2001. Les coordonnées sont en unités UTM (*Universal Transverse Mercator*).

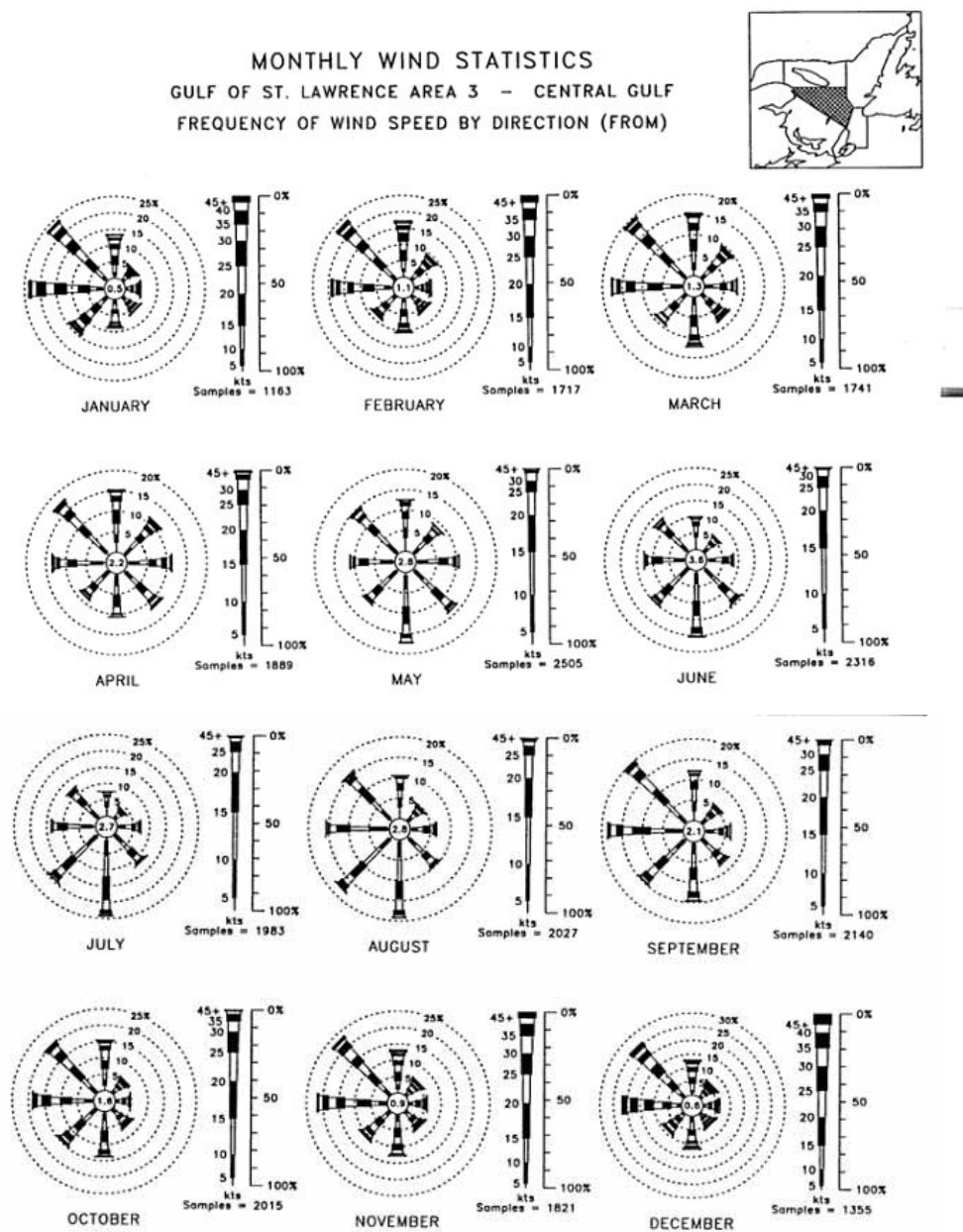


Figure 6 : Statistiques mensuelles des vents : fréquence d'occurrence (%) par classe de vitesse des vents en provenance de huit points cardinaux dans la région centrale du Golfe Saint-Laurent (McLaren Plansearch Ltd., 1991).

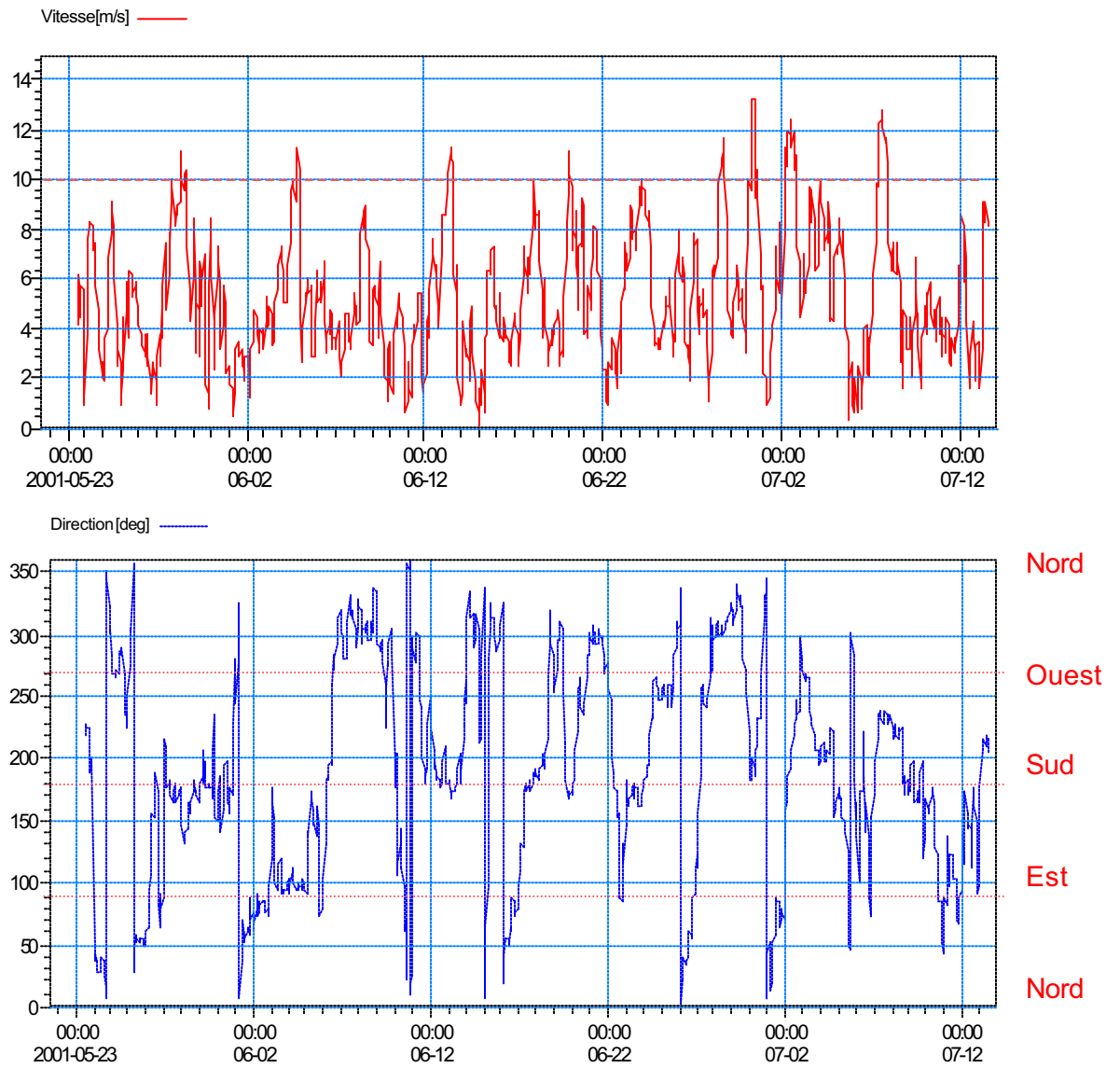


Figure 7 : Vitesses et directions des vents mesurées à la station M de mai à juillet 2001.



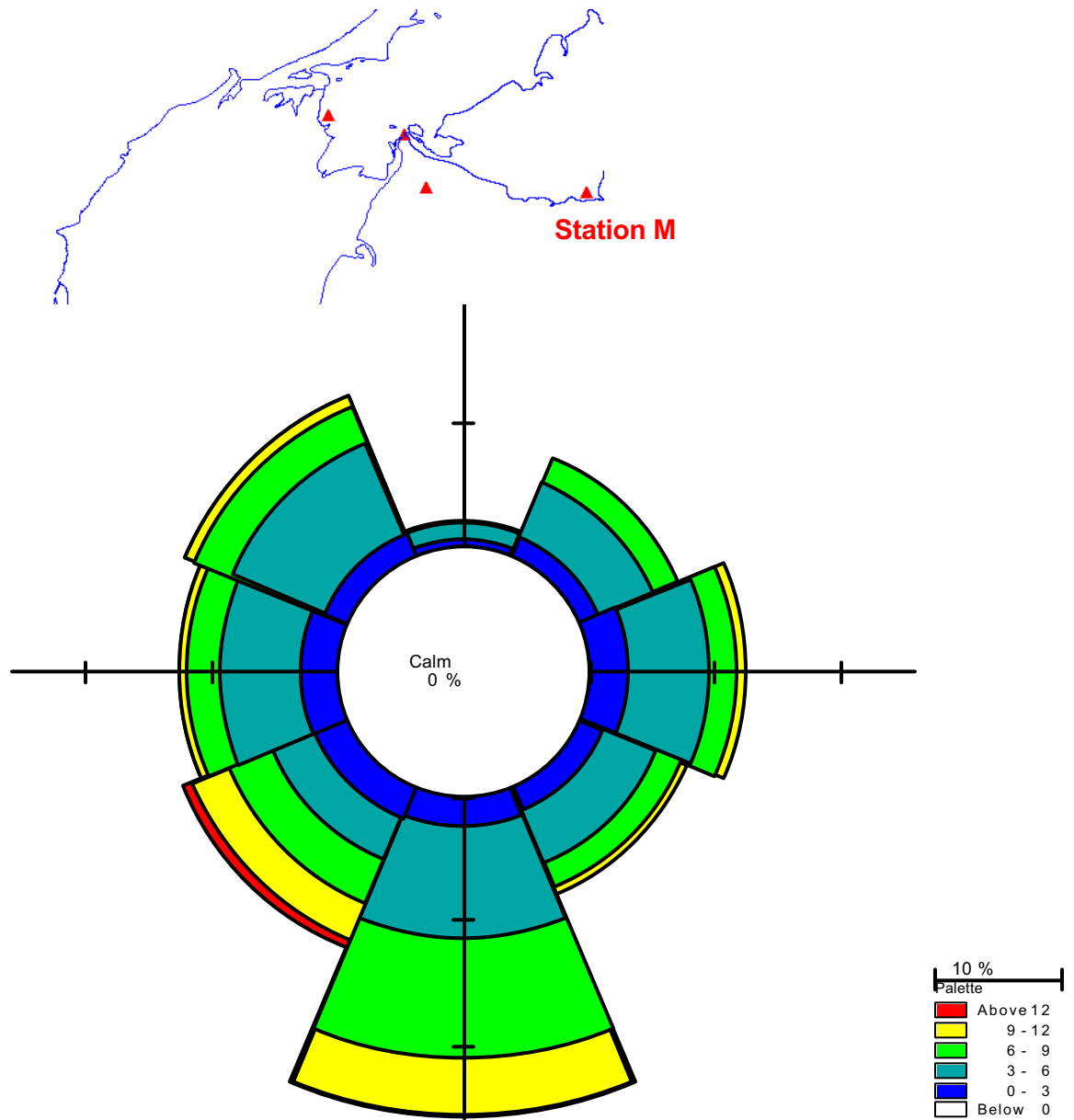


Figure 8 : Rose des vents mesurés à la station M de mai à juillet 2001.

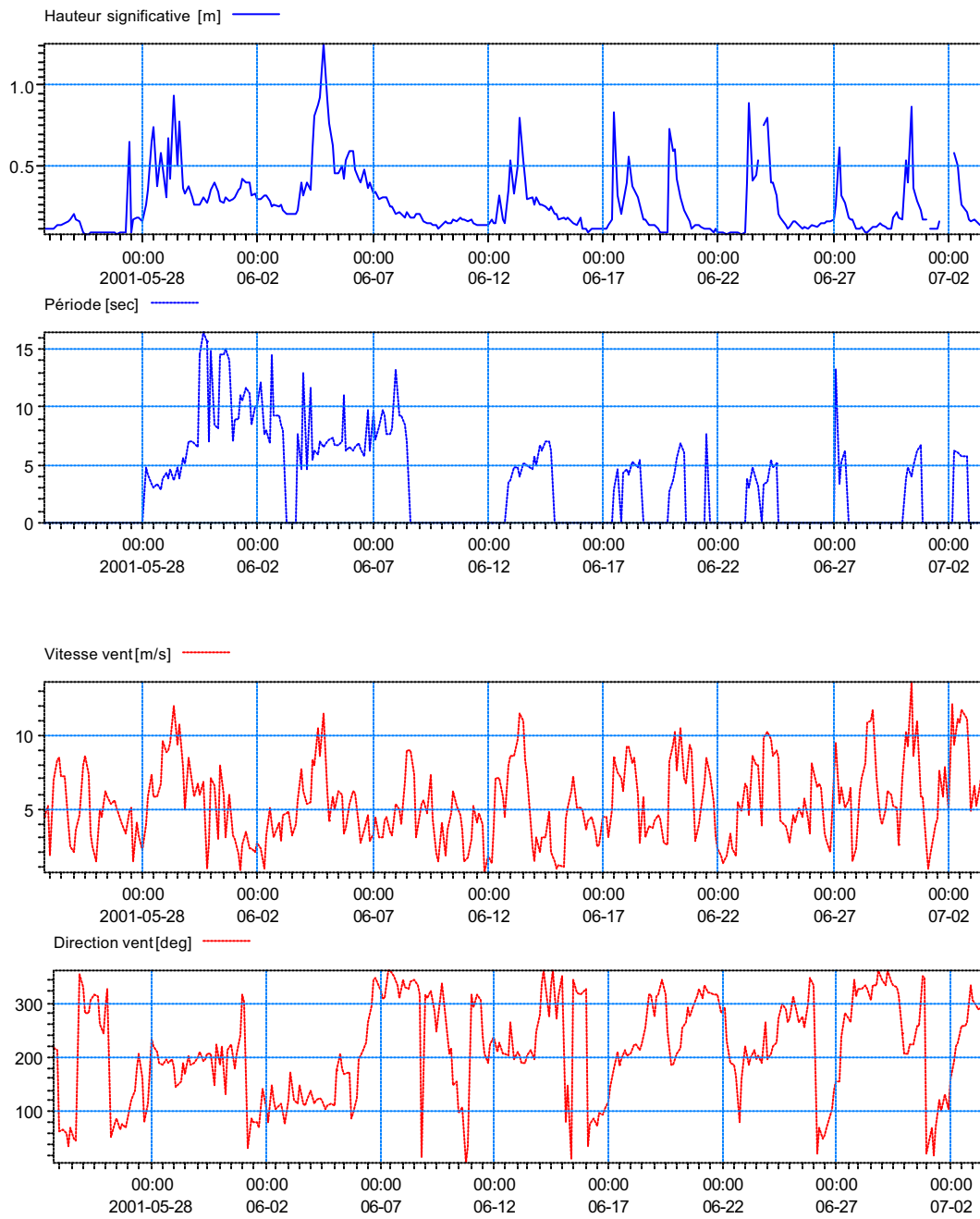


Figure 9 : Hauteurs significatives et périodes des vagues mesurées à la station 1 (bleu) et données de vent à la station M (rouge) de mai à juillet 2001.

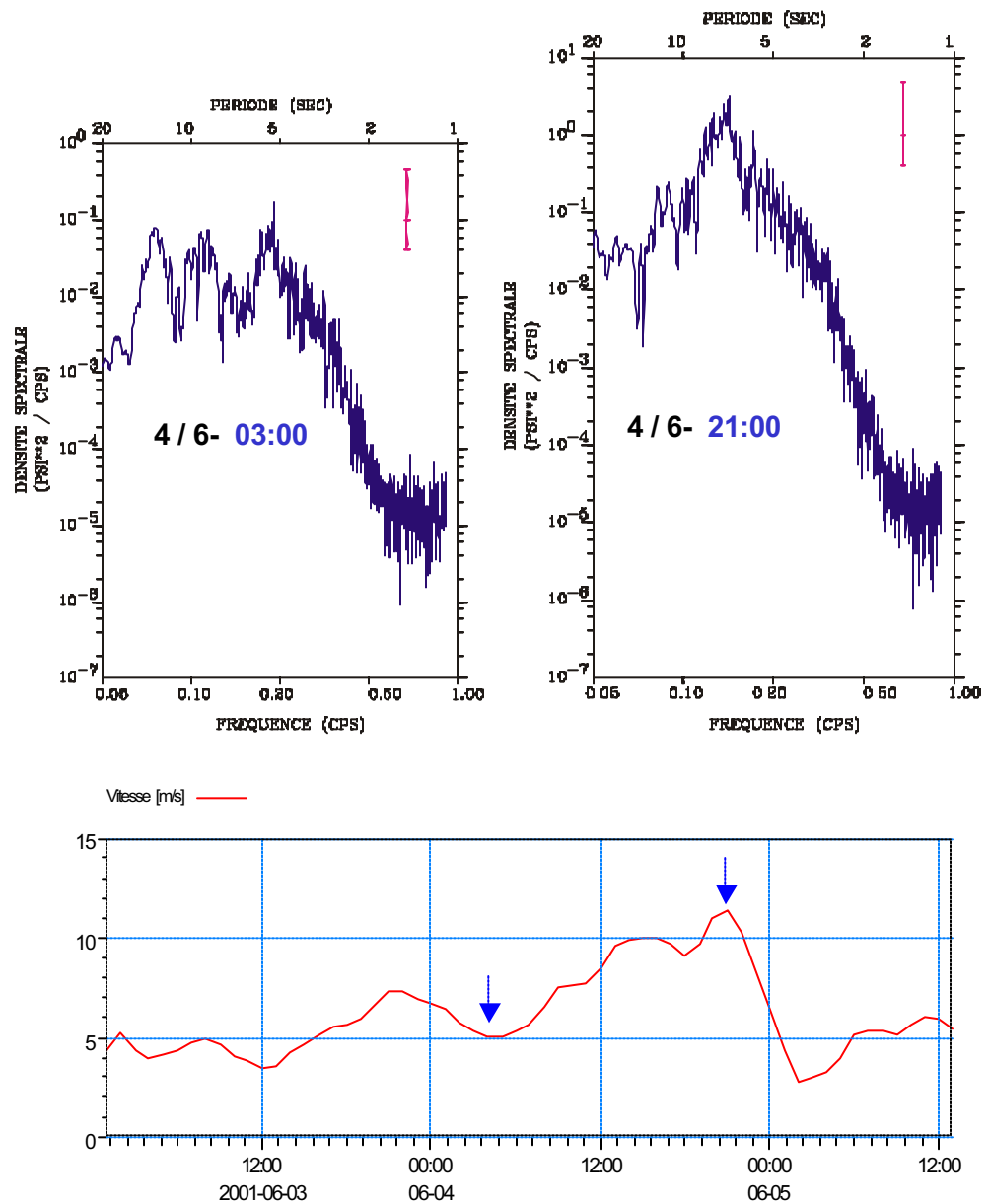
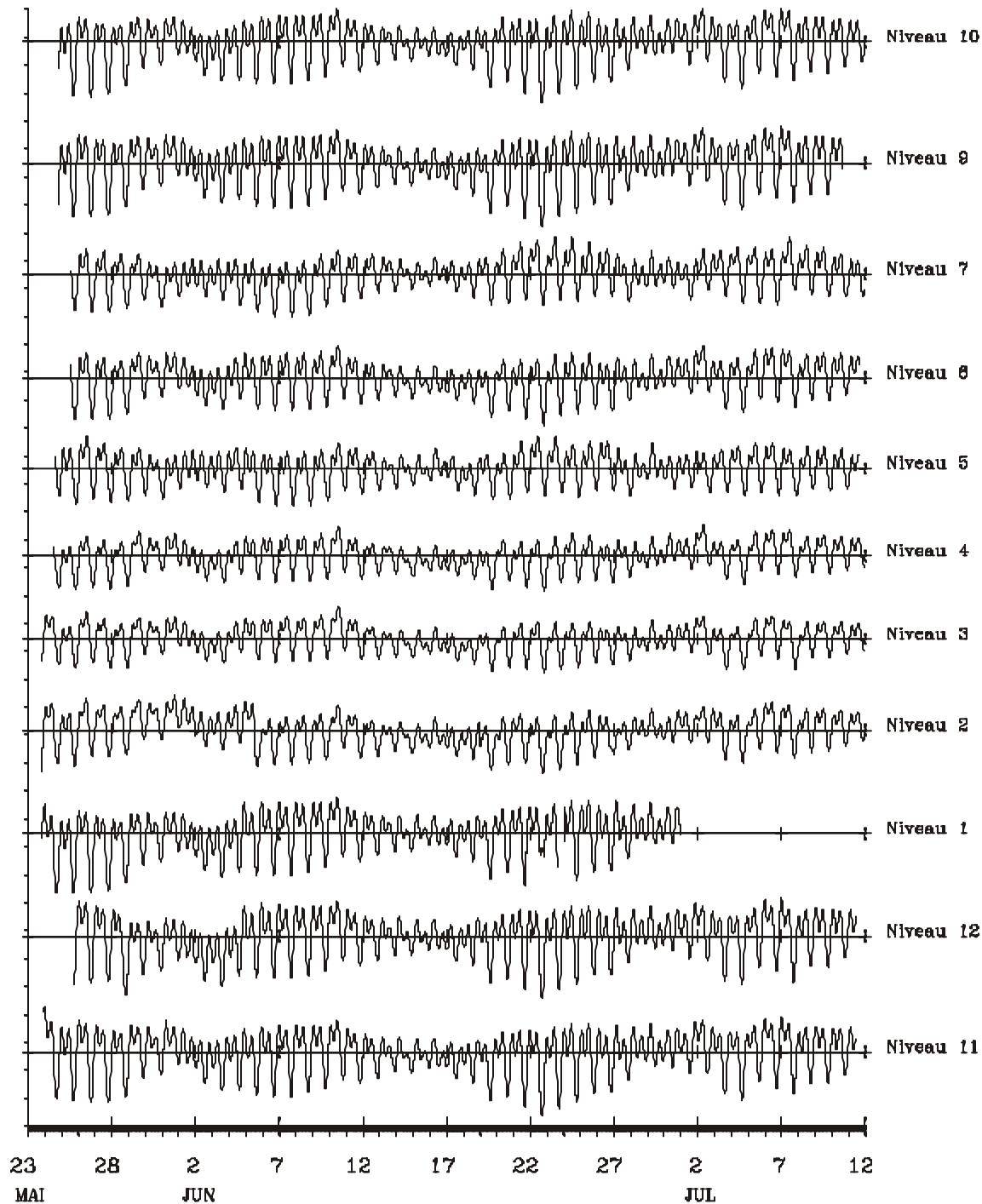


Figure 10 : Densité spectrale de la variance des vagues enregistrées à 03 :00 et à 21 :00 le 4 juin 2001 à la station 1 en fonction de la vitesse des vents d'est.



Niveaux d'eau 2001

Figure 11 : Niveaux d'eau mesurés à l'intérieur (2, 3, 4, 5, 6, 7) et à l'extérieur des lagunes de Hâvre-aux-Maisons et Grande-Entrée du 23 mai au 12 juillet 2001.

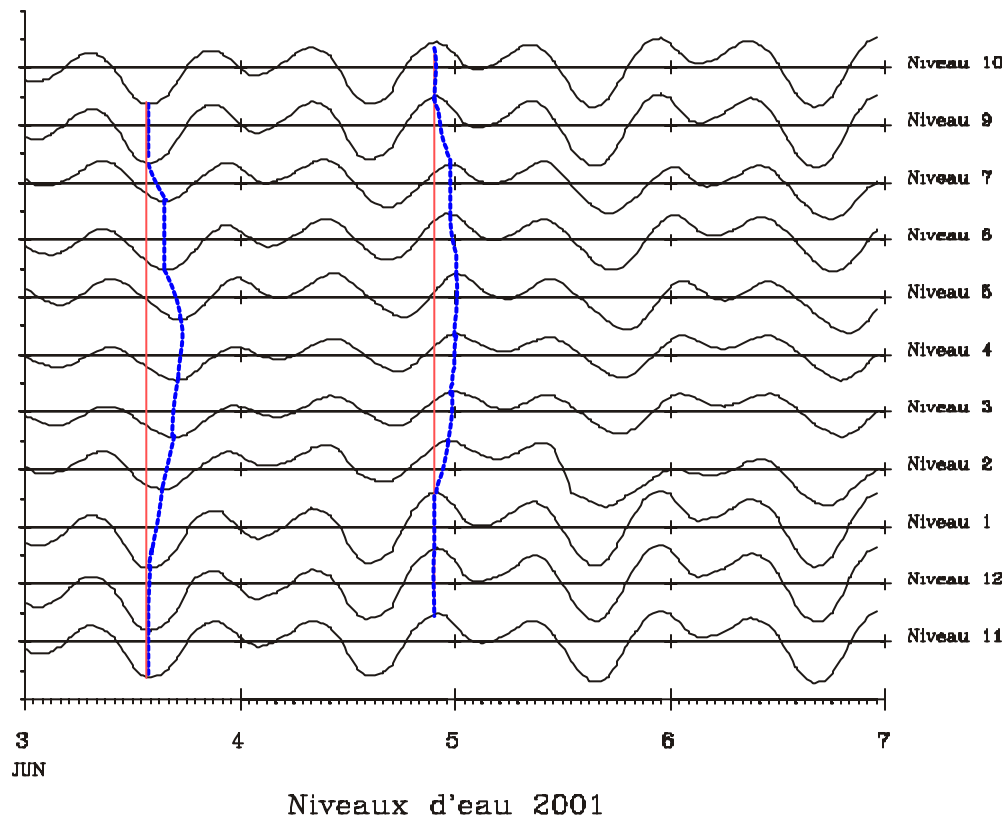


Figure 12: Variations des niveaux d'eau par rapport à la moyenne à l'intérieur (2, 3, 4, 5, 6, 7) et à l'extérieur des lagunes du Hâvre-aux-Maisons et de Grande-Entrée du 3 au 6 juin 2001. L'intervalle en ordonnée est de 0.5 m. Les lignes verticales en pointillés sont des lignes d'égal phase et la ligne verticale pleine est un repère temporel.

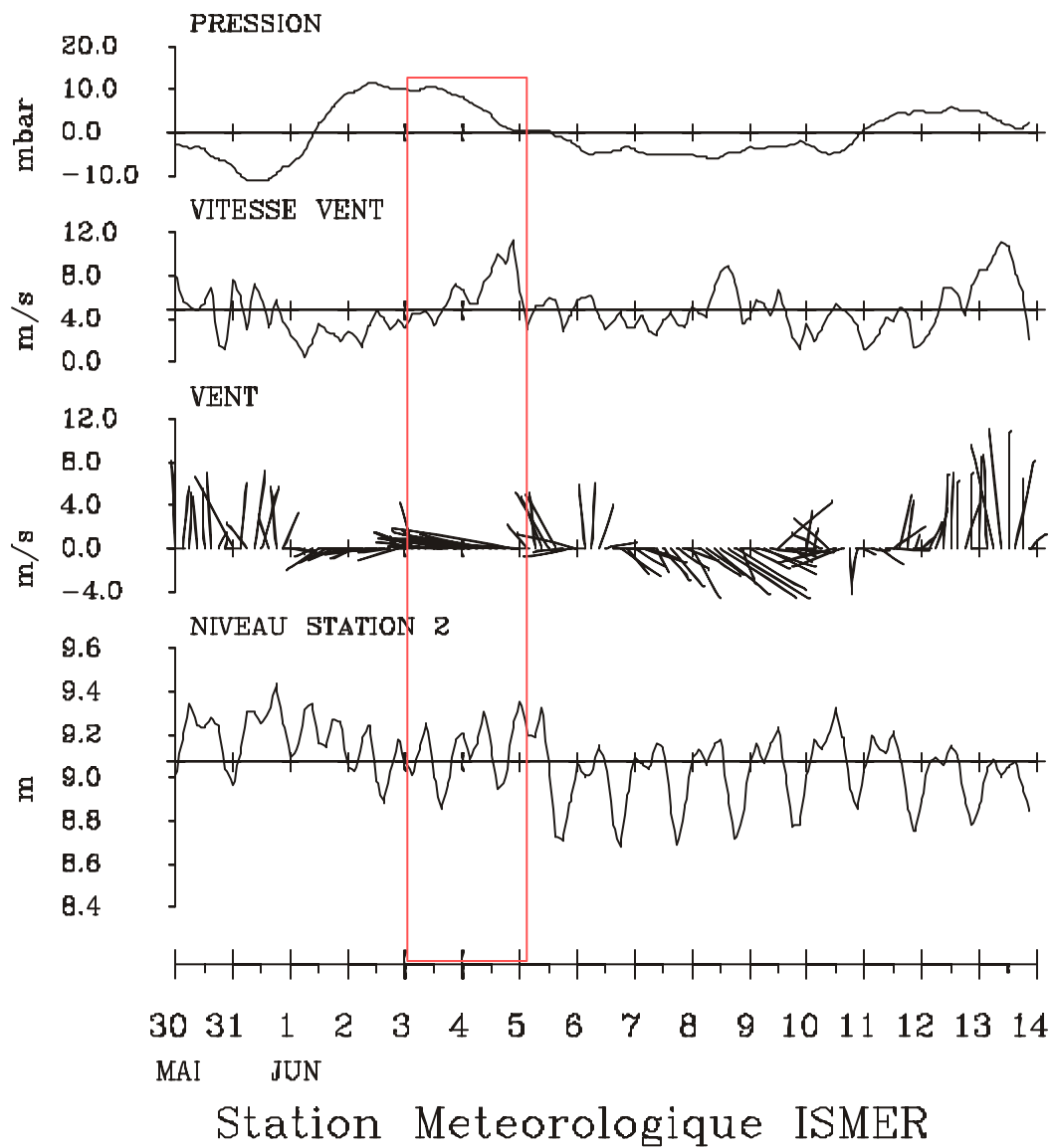


Figure 13 : Variations des niveaux d'eau sous le pont du Hâvre-aux-Maisons en fonction des vents et de la pression atmosphérique du 30 mai au 14 juin 2001. La période des vents d'est est encadrée.

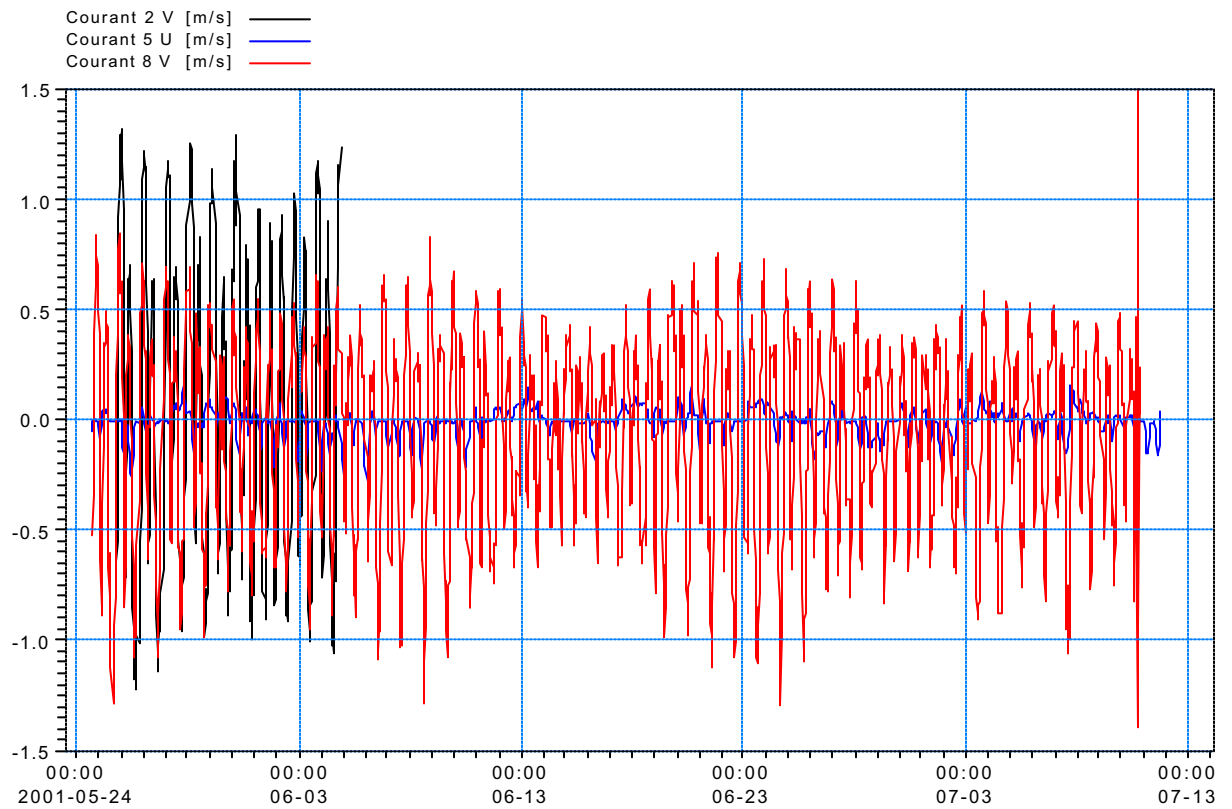


Figure 14 : Données de courants (m/s) à la passe du Hâvre-aux-Maisons (courant 2 V, positif vers le nord), à la passe du Pont du Déroit (courant 5 U, positif vers l'est) et à la passe de Grande-Entrée (courant 8 V, positif vers le nord).

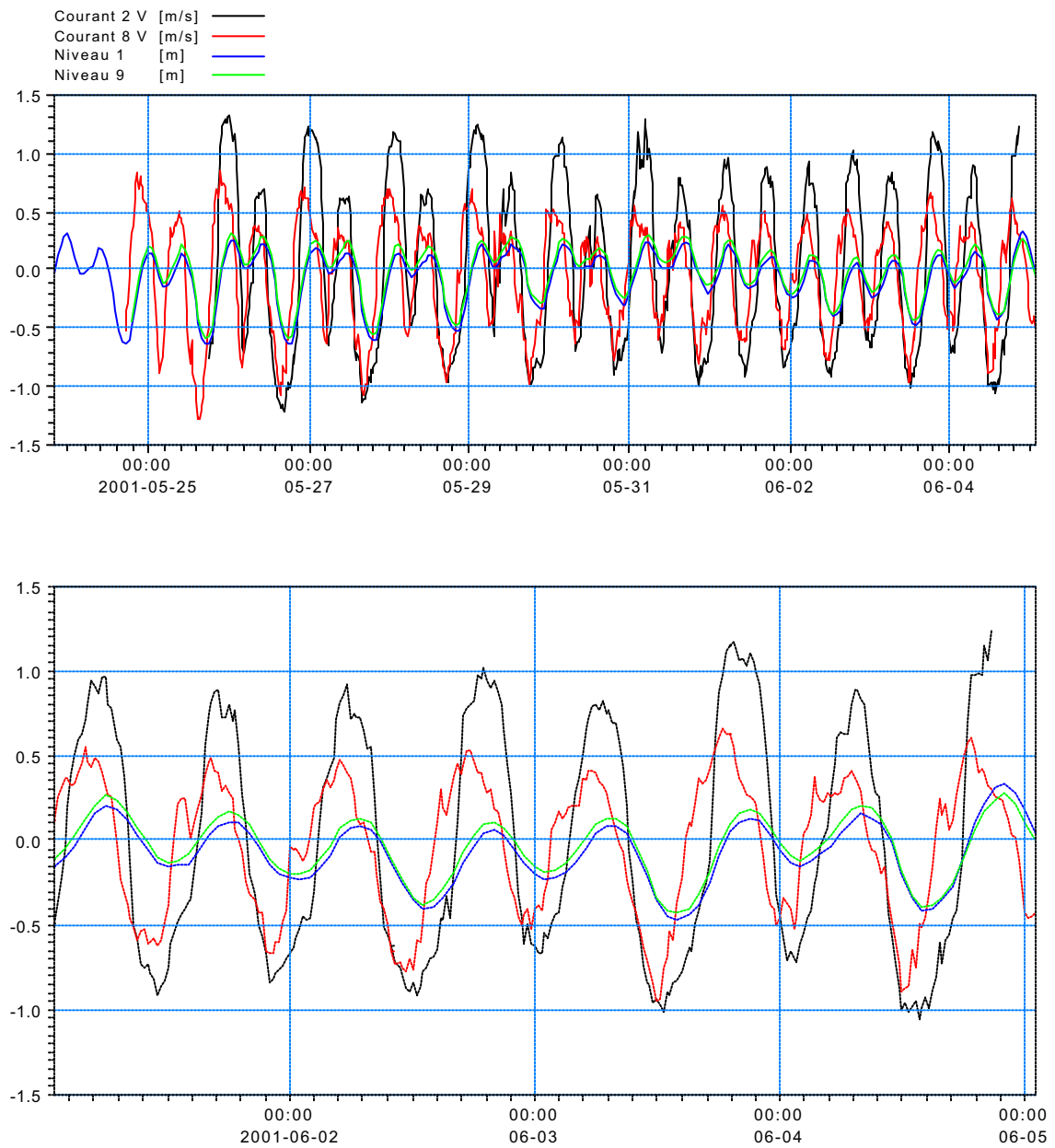


Figure 15 : Données de courants et niveaux d'eau à l'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons (courant 2 V et niveau 1) et à l'entrée de la lagune de Grande-Entrée (courant 8 V et niveau 9).



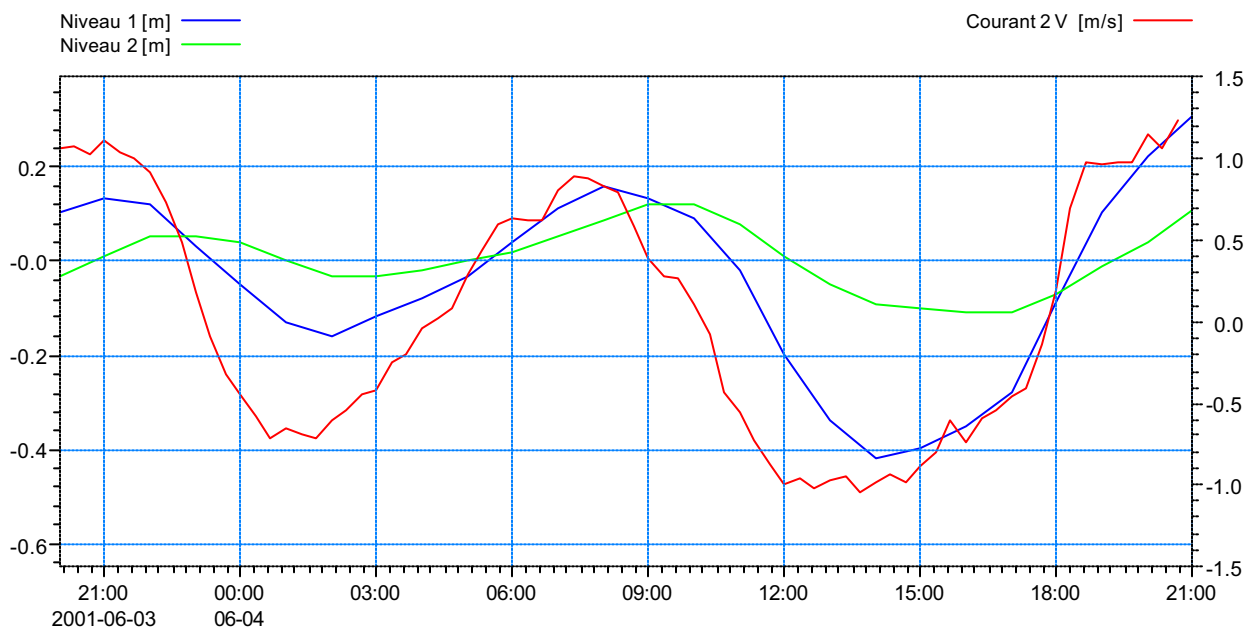


Figure 16 : Relation temporelle entre les niveaux d'eau à la station 1 à l'extérieur de la passe du Hâvre-aux-Maisons et les niveaux et courants sous le pont à la station 2 durant un cycle de marée diurne.

## 3.2 MODÉLISATION INTÉGRÉE DU MILIEU PHYSIQUE

L'objectif général étant d'étudier l'impact des piliers du nouveau pont dans la zone d'étude, l'approche de la modélisation numérique adoptée consiste à simuler le milieu physique sans piliers et ensuite avec les piliers pour en évaluer les impacts. Les impacts à évaluer sont : (1) le changement de la phase de la marée à la passe d'entrée et dans les deux lagunes et (2) le changement du transport des sédiments dans la région de l'entrée de la lagune du HAM suite à l'introduction des piliers.

Cette section traite de la simulation du milieu physique sans les piliers. Les simulations numériques sont divisées en deux blocs :

- (1) Simulation de la propagation de la marée dans les deux lagunes durant 15 jours (section 3.2.1);
- (2) Simulation du transport de sédiment sous l'effet des marées, des vents et des vagues durant deux cycles complets de marées diurnes (section 3.2.2).

Ceci permettra d'aborder à la section 4 les deux types d'impact : le retard de la phase de la marée dans les lagunes et le transports des sédiments à la passe de la lagune du HAM.

### 3.2.1 PROPAGATION DE LA MARÉE DANS LES DEUX LAGUNES.

#### 3.2.1.1 Approche

La propagation de la marée dans les deux lagunes est étudiée à l'aide d'un modèle hydrodynamique décrivant la circulation des eaux. En plus des deux lagunes, le domaine simulé inclus une zone d'approche à l'extérieur des lagunes où la marée n'est pas influencée par les passes d'entrée. Le modèle numérique

choisi est un modèle bi-dimensionnel (2D) sur le plan horizontal, la stratification verticale des eaux dans les lagunes étant négligeable (Koutitonsky et al., 2002). Ce modèle est forcé par les niveaux d'eau mesurés juste à l'extérieur des entrées des deux lagunes aux stations 1 et 9 et par les vents mesurés durant la même période à la station météorologique M (figure 4). La période de simulation prévue est d'une durée de quinze jours. Ceci permet de caractériser avec assez de précision les amplitudes et les phases des principales composantes de la marée à toutes les mailles de la grille de calcul. La période de 15 jours débute à le 2 juin 2002 et se termine le 17 juin 2001. Cette période est choisi car elle inclut, entre autre, la seule tempête de vent d'est qui s'est manifestée durant les mesures de vagues, le 4-5 juin 2001. Les résultats de cette simulation permettront aussi d'examiner l'effet des vents sur la circulation des eaux dans les lagunes.

L'impact de la construction des piliers du nouveau pont sur les phases des marées dans les lagunes sera évalué à la section 4 en répétant exactement la même simulation de 15 jours, mais cette fois-ci en introduisant dans les calculs la tension de cisaillement additionnelle résultante de la présence des piliers. Une nouvelle analyse harmonique des niveaux d'eau calculés permettra de déceler avec précision tout changement des amplitudes et/ou des phases des principales composantes semi-diurnes et diurnes de la marée causées par la présence de ces piliers à l'embouchure de la lagune HM.

### 3.2.1.2 Modèle hydrodynamique MIKE21-HD

Le modèle numérique utilisé est le modèle MIKE21-HD de l'institut hydraulique Danois ([www.DHI.dk](http://www.DHI.dk)). Une description détaillée de ce modèle est fournie à l'annexe D.

Le modèle MIKE21-HD est un modèle hydrodynamique qui simule l'évolution temporelle de l'écoulement non-linéaire en deux dimensions horizontales, sous l'effet de la rotation de la terre, de la pression atmosphérique, du cisaillement du vent, du débit des rivières et des conditions variables dans l'espace et le temps

aux frontières ouvertes d'une grille de calcul rectangulaire. Le modèle intègre dans le temps, à chaque maille de la grille de calcul, les équations de la conservation de la masse et de la conservation du mouvement de Navier-Stokes et cela à l'aide d'un schéma numérique en différences finies sur mailles du type Arakawa-C. Une formulation semi-implicite des schémas numériques permet de résoudre les équations avec un nombre de Courant pouvant atteindre 8 lorsque la bathymétrie est bien régulière. Le modèle offre aussi l'option découvrir certaines zones intertidales peu profondes à marée basse et de les recouvrir à marée haute. Finalement, les dimensions des mailles de la grille de calcul peuvent être réduites par un facteur 3 dans des régions d'intérêt. Par exemple, si la grille originale a des mailles de 90m x 90m, une sous-grille avec des mailles de 30m x 30m peut être incluse dans cette grille et les calculs numériques procèdent dans les deux grilles en même temps, avec les échanges appropriés aux frontières des grilles. Cette option sera utilisée dans la région de l'entrée de la lagune du HAM lors des simulations du transport de sédiments (section 3.2.2).

La grille de calcul utilisée pour l'étude de la propagation de la marée dans les deux lagunes est la grille G0m30 présentée à la figure 17. C'est une grille de 1350 x 500 mailles carrées de 30 m de côté. Elle présente une largeur de 90 m en dessous du pont actuel de Hâvre-aux-Maisons et une largeur de 2 mailles sous le pont du Déroit.

### 3.2.1.3 Simulation numérique

La simulation numérique a débuté plus exactement à 17 :40 le 2 juin 2001 et s'est terminée à 18 :00 le 17 juin 2001, à un pas temporel de 10 secondes (nombre de Courant = 6.6) pour un total de 129720 pas de calcul. Les solutions des 120 premiers pas de calcul (20 min) ont été multipliées par un facteur grandissant de 0 à 1 afin d'assurer une stabilité numérique initiale aux calculs. Les frontières ouvertes du modèle se situent à l'extérieur des passes du HAM et de GE. Les fluctuations du niveau de l'eau par rapport à la moyenne, mesurées aux stations 1 et 9 ont été respectivement imposées comme conditions de frontière ouverte à ces frontières ouvertes. Les vents mesurés à la station M ont aussi été imposés à la simulation. La formulation du coefficient de mélange

adoptée est celle de Smagorinsky (1963), avec un facteur de 0.5. La formulation de Manning a été adoptée pour la friction au fond, avec un nombre constant dans tout le domaine et égal à 32. Compte tenu des restrictions de mémoire de stockage pour une si grande grille (1350 x 500), les niveaux d'eau et les courants calculés ont été sauvegardés à un pas temporel horaire dans trois régions : la lagune du Hâvre-aux-Maisons, le tronçon vers l'est du Pont du Détroit jusqu'à la station 6 et la lagune de Grande-Entrée avec son chenal de navigation et son bassin profond. La taille de ces trois fichiers de sortie est de 1400 Gb. Au total, 16706534400 points de calculs ont été effectués à une cadence de 144308 points par seconde. La durée physique de la simulation a été de 115770 [s] sur un ordinateur du type Compaq AP550, muni d'un processeur Intel P3 de 1 Ghz et opérant le système MIKE21 dans un environnement Windows NT 4.0.

L'exactitude d'une simulation hydrodynamique dans un environnement côtier sous l'influence des marées peut être évaluée en calculant les amplitudes et les phases des composantes harmoniques de la marée à partir des niveaux calculés par le modèle et des niveaux observés aux mêmes endroits et pour la même période de temps. Les principales composantes des marées étant les composantes K1 et M2, le tableau 5 présente les amplitudes et les phases de ces composantes extraites par analyse harmonique (Foreman, 1977) des observations et des calculs du modèle aux stations 1 à 7 et 9 dans les deux lagunes pour la même période de 15 jours débutant le 2 juin 2001. La comparaison est très satisfaisante compte tenu des erreurs de l'analyse (e.g. tableau 3) excepté pour les phases à la station 2 sous le pont du HAM. En effet, les phases simulées à la station 2 sont en retard par rapport aux phases observées. Ceci est aussi évident sur la figure 18 qui présente l'évolution des niveaux d'eau observés (traits discontinus) et calculés (traits pleins) par le modèle aux stations 1, 2 et 3. Compte tenu du fait que les phases simulées aux stations 1 et 3, soit des deux côtés de la station 2 sont identiques aux phases observées (tableau 5, figure 18) ceci suggère que la bathymétrie assignée aux mailles du modèle dans le delta interne est trop profonde, en moyenne. Si cette bathymétrie était moins profonde, la marée serait plus affectée par la friction au fond à cet endroit et le retard de phase se manifesterait à cet endroit au lieu de se manifester à la constriction sous le pont.

L'efficacité du modèle pour le calcul des marées ayant été démontrée, il est alors possible d'étudier les distributions spatiales des amplitudes et des phases de la marée dans les deux lagunes. Ces distributions ont été calculées à l'aide du post processeur hydrodynamique du système MIKE21 selon la méthode proposée par Foreman (1977). Ces distributions sont présentées pour la lagune du HAM aux figures 19 et 20, pour la lagune de GE-ouest aux figures 21 et 22 et pour la lagune GE-est aux figures 23 et 24.

On constate que la passe du HAM présente un obstacle majeur à la propagation de la marée du Golfe dans cette lagune. Les amplitudes des ondes K1 et M2 dans le Golfe sont de 0.15 m et 0.18 m respectivement (figure 19) alors que dans la lagune du HAM elles sont atténuées à 0.10 m et 0.09 m. Les retards de phase (figure 20) entre le Golfe et l'intérieur de la lagune sont d'environ 50 degrés pour l'onde K1 ( $\approx$  3.3 heures) et d'environ 70 degrés pour l'onde M2 ( $\approx$  2.4 heures). La région du Pont du Détroit offre déjà moins de résistance à la propagation des marées (figure 21 et 22) tout comme celle de la passe de Grande-Entrée (figure 23 et 24). Ces résultats sont en accord avec les travaux de Koutitonsky et al. (2002) qui ont qualifié cette lagune comme étant une lagune « étouffée » ou *choked* selon la terminologie anglaise de Kjerfve (1989) alors que la lagune de GE a été qualifiée de « coulante » ou *leaky* par rapport à leur pénétration par la marée.

L'impact des piliers du pont sur la propagation de la marée dans les lagunes sera évalué en répétant ces mêmes calculs de phase et d'amplitude à l'aide d'une simulation hydrodynamique identique mais cette fois-ci avec des piliers dans l'eau aux endroits retenus par les concepteurs du pont.

Finalement, il est aussi intéressant de constater l'effet des vents sur la circulation dans la lagune du HAM. Cet effet peut être apprécié en examinant les résultats de la simulation hydrodynamique aux mêmes phases de marée mais pour des conditions de vents différentes. Les courants et les niveaux d'eau calculés à marée basse et à marée haute sont présentés à la figure 25 pour des vents d'est et à la figure 26 pour des vents du nord-ouest. On y retrouve en référence les

niveaux d'eau mesurés à la station 1, es vitesses et les directions des vents correspondants avec des points noirs indiquant l'heure des résultats présentés.

De façon générale, les vents ont une forte emprise sur les courants dans des lagunes peu profondes. Un vent soufflant selon l'axe longitudinal d'une lagune va produire un courant côtier de chaque côté de la lagune et un courant de retour quelque part au milieu, soit en surface soit près du fond s'il existe un bassin central (Koutitonsky et al. 2002).

Dans le cas de la lagune du Hâvre-aux-Maisons, on aperçoit sur la figure 25 que des vents d'est produisent effectivement des courants près des deux rives dirigés vers l'ouest, et cela même lorsque les courants entrent dans la lagune à marée haute (figure 25 bas). Les courants simulés mettent aussi en évidence des tourbillons dans la zone centrale de la lagune. Ces tourbillons tournent dans le même sens à marée basse et marée haute. Les courants près des rives sont aussi présents par vents du nord-ouest (figure 26) et les tourbillons au centre tournent en direction opposée à celle des tourbillons produits par les vents d'est. Finalement, le niveau de la surface subit un empiement dans le sens de la direction vers laquelle souffle le vent.

<

## 3.2.2 TRANSPORT DE SÉDIMENTS

### 3.2.2.1 Approche

La modélisation intégrée du transport de sédiments dans la région de la passe du HAM doit tenir compte à la fois des courants de marée, des courants de vent et des courants associées aux vagues. Dans ce cas, l'approche est plus complexe car elle doit faire appel à un système de modélisation intégrée comprenant trois modèles numériques : un modèle hydrodynamique, un modèle de vagues et un modèle de transport de sédiments non-cohésifs (sables) sous l'effet combiné des vagues et des courants.

Les modèles numériques choisis sont les modules NSW (*Near-shore Spectral Wave model*), HD (*Hydrodynamic model*) et ST (*Sand Transport model*) du système MIKE21. Ces modèles se prêtent bien à une approche intégrée car ils sont déjà intégrés dans un même environnement de calcul du système MIKE21.

Les étapes successives de l'approche proposée pour l'étude du transport de sédiments non-cohésif sous l'effet combiné des vagues et des courants sont schématisées à la figure 27.

Dans un premier temps, il s'agit de calculer à l'aide du modèle MIKE21-NSW les vagues dans la région d'intérêt en utilisant en entrée une grille bathymétrique, les conditions de vents pour la génération locale des vagues et les conditions de vagues en provenance du large aux frontières ouvertes de la grille. En sortie, le modèle calcule la hauteur significative, la période moyenne, la direction de propagation, la déviation standard de cette direction et les tenseurs du cisaillement de la radiation des vagues (*wave radiation stresses*) à chaque maille de la grille de calcul utilisée.

Les calculs du modèle MIKE21-NSW sont pris en entrée par le modèle MIKE21-HD, qui avec les niveaux d'eau aux frontières ouvertes de la grille de calculs



hydrodynamiques et les vents en surface permettent de calculer les courants causés par l'effet combiné des vents, des marées et des vagues.

Finalement, les courants générés par le modèle MIKE21-HD et les données de vagues générées par le modèle MIKE21-NSW sont pris en entrée par le modèle de transport de sédiment MIKE21-ST qui calcul alors le transport de sédiments à chaque pas temporel des simulations hydrodynamiques ainsi que le transport net de sédiments durant la période de simulation.

L'hypothèse sous-jacente aux calculs du transport des sédiments est que les sédiments sont disponibles en tout temps dans la région, ce qui peut ne pas être le cas. L'objectif de la présente étude étant de comparer le transport des sédiments non-cohésifs en l'absence et en présence des piliers du pont dans la région de la passe de HAM, l'étude demeure à un niveau comparatif et cette hypothèse est donc acceptable. Le calcul des transports absolus nécessitera une approche numérique différente (e.g. le module géomorphologique MIKE21-CAM) ainsi qu'un échantillonnage temporel des distributions de sédiments plus élaboré que celui prévu pour l'étude en cours.

Les sections suivantes décrivent brièvement les modèles numériques MIKE21-NSW, MIKE21-H et MIKE21-ST alors qu'une description plus détaillée de ces modèles est fournie respectivement aux annexes C, D et E.

#### 3.2.2.2 Modèle de vagues MIKE21-NSW.

Le modèle utilisé pour calculer la réfraction et les autres paramètres des vagues est le module *Nearshore Spectral Wave (NSW)* du système MIKE21. C'est un modèle numérique Eulérien, spectral et quasi-stationnaire qui calcule la génération des vagues par le vent et la propagation de ces vagues en eaux peu profondes. La profondeur de l'eau peut changer avec les marées, ce qui affecte les propriétés des vagues, mais les calculs à chaque pas de temps sont indépendants les uns des autres, d'où l'appellation quasi-stationnaire de l'option pour la profondeur variable dans le temps.

Ce modèle a été vérifié et appliqué à plusieurs sites dans le monde (e.g. Johnson, 1998). Les calculs tiennent compte de la réfraction, de la propagation directionnelle de l'énergie, de l'effet de la friction au fond, de la levée (*shoaling*), du déferlement en surface et de l'interaction vagues-courants. Il peut être appliqué à des régions de fetch limité, de profondeur variable à pente douce et pour des vagues dont les périodes varient de 0.21 s à 21 s. Ces applications permettent, entre autre, le calcul du transport de sédiments non-cohésifs dans ces régions.

Le modèle NSW est basé sur la théorie de Holthuijsen et al. (1989). Les principaux éléments de cette théorie sont présentés à l'annexe C. La théorie est un compromis entre celle des modèles plus complexes qui décrivent la propagation des vagues dans le temps à partir de notions fondamentales (e.g. modèle WAM, Komen et al. 1994) et celle des modèles plus simples basés sur la méthode Lagrangienne du rayon de vague (e.g. Arthur, 1952; Cavaleri and Malanotte Rizzoli, 1981). Les équations intégrées numériquement par le modèle NSW sont les équations de la conservation de l'action de la densité des vagues (voir annexe C). Ce sont des équations différentielles partielles du premier ordre où les variables indépendantes sont les coordonnées spatiales  $x$ ,  $y$  et la direction spectrale  $\theta$ . Le calcul de l'état de la vague en un point de grille procède à partir de l'état de la vague en amont, l'amont étant établi par la direction du vecteur de vitesse de propagation et par le taux de changement de cette direction. Les calculs sont donc effectués en suivant une direction approximativement parallèle à la propagation des vagues. Cette approche numérique oblige la frontière océanique ouverte à être localisée du côté gauche ( $x = 0$ ) de la grille de calcul de sorte que les calculs procèdent à partir de  $x = 0$  vers la côte. Les calculs de propagation dans le domaine ( $x$ ,  $y$ ) sont effectués par un schéma numérique en différence finie du type « leap-frog » alors que les calculs de propagation dans l'espace directionnel ( $\theta$ ) sont effectués à l'aide d'un schéma du type « upstream » (Roache, 1985). Ces schémas sont soumis à des conditions de stabilité numérique qui restreignent, entre autre, l'angle d'approche de la vague à la frontière océanique par rapport à l'axe  $X$ . Normalement, cet angle sera inférieur 90 degrés de chaque côté de l'axe  $X$ . Il est suggéré que cet angle soit égal ou inférieur à 60 degrés. Finalement, les conditions de stabilité numérique

imposent une contrainte sur le rapport des dimensions des côtés des mailles  $DX/DY$  qui doit être égal à 1/4.

#### 3.2.2.2 Modèles hydrodynamiques MIKE21-NHD

Le module MIKE21-NHD (*Nested Hydrodynamic model*) offre l'option « nesting » c'est à dire l'option de grilles télescopiques qui permet d'insérer des grilles de plus haute résolution spatiale dans une grille plus grossière afin de réduire l'effort de calcul d'une part tout en assurant une haute résolution spatiale dans une ou plusieurs régions d'intérêt d'autre part. Les calculs sont alors effectués entre toutes les grilles de façon interactive (voir Annexe D). C'est l'équivalent en différences finies de la haute résolution spatiale offerte normalement par des calculs en élément finis. De façon générale, les calculs en différences finies sont souvent plus rapides que les calculs en éléments finis.

Description à l'annexe D.

#### 3.2.2.4 Modèle de transport de sédiments non-cohésifs MIKE21-ST

Description à venir ici et à l'annexe E.

### 3.2.2.5 Simulations numériques

Les grilles requises pour effectuer les calculs du transport des sédiments selon l'approche prescrite en 3.2.2.1 sont présentées à la figure 28. Des détails sur chaque grille, incluant le nombre de mailles dans l'axe X et dans l'axe Y ainsi que leurs dimensions, sont donnés au tableau 6.

La grande grille G0W sert au calcul des vagues en provenance de la direction est dans le Golfe et qui se propageront vers la zone d'étude. La raison motivant l'étude des vagues en provenance de l'est est que les vents d'est ont été identifiés à la section des mesures de vagues (section 3.1.2.2) comme étant ceux qui génèrent les plus grandes vagues dans la zone d'étude à la station 1 (figure 9). Les conditions à la frontière ouverte à l'est sont des vagues de 2.5 m de hauteur significative et de 8 secondes de période. Cette période est proche de la période estimée par analyse spectrale (figure 10). Elle permet aussi de reproduire à l'aide du modèle NSW une hauteur significative de 1.3 m à la station 1, ce qui est similaire à la hauteur mesurée à 21 h le 4 juin 2001 le 4 juin 2001. Le vent mesuré à la station M et le niveau de l'eau mesuré à la station 1 furent aussi imposés à la simulation. Ce vent soufflait de l'est (100 degrés) durant la période de simulation (figure 7). La simulation a été effectuée en mode quasi stationnaire, débutant à 18 :00 le 4 juin 2001 pour finir à 22 :00 le 6 juin 2001. La variation de la profondeur de la grille durant la simulation correspondait à celle des niveaux enregistrés à la station 1. La grille G0W a été tournée de 180 degrés pour ces calculs (voir annexe C) et les résultats ont ensuite été retournés de 180 degrés pour présentation.

Un de ces résultats est présenté à la figure 29. Il montre entre autres que les hauteurs significatives diminuent à l'entrée de la baie de Plaisance et que les vagues sont réfractées par les hauts fonds à l'approche de la zone d'étude. Les vagues simulées déferlent dans ces zones peu profondes lorsque la hauteur simulée est égale à 0.8 fois la profondeur. L'effet de l'île d'Entrée sur la réfraction des vagues est aussi intéressant alors qu'au nord-ouest des îles, ce sont les vents locaux qui génèrent des vagues à partir du rivage.

Normalement, le calcul du transport des sédiments sous l'effet combiné des vagues et des courants doit être effectué sur une grille dont les mailles sont assez fines afin de résoudre l'énergie des vagues sur une distance d'au moins 8 mailles dans la zone du déferlement près du rivage. Une grille G1W couvrant la zone d'étude fut donc construite avec des mailles dont les dimensions sont de 2.5 m x 10 m (figure 28).

Une série temporelle de paramètres de vague (hauteur significative, période, direction de propagation et sa déviation standard) a ensuite été extraite des calculs effectués avec la grille G0w à toutes ses mailles bordant le côté est de la grille G1W (rectangle vert, figure 29). Ces séries temporelles ont ensuite été imposées comme conditions aux frontières ouvertes lors d'une simulation quasi-stationnaire à l'aide du modèle NSW sur la grille G1W. Les niveaux d'eau mesurés à la station 1 ainsi que les vents d'est ont aussi été imposés à cette simulation. En plus des paramètres de vagues, cette simulation à haute résolution a permis de calculer les tenseurs du cisaillement de la radiation des vagues (wave radiation stresses). Ces derniers sont nécessaires aux calculs des courants sous l'action combinée des vents, marées et vagues. Les paramètres de vagues et les tenseurs de radiation ont finalement été interpolés sur une maille de 10m par 10m afin de les transposer aux calculs des courants et du transport de sédiments sur la grille G2m10 dont les dimensions sont de 10 m x 10 m.

Un des résultats de cette simulation de vagues sur la grille G1W est présenté à la figures 30, et avec plus de détails à la figure 31. Il en ressort que les hauteurs des vagues en provenance du quadrant est (c'est-à-dire nord-est, est et sud-est) vont être réfractées de la même façon dans la zone d'étude par les faibles profondeurs qui s'y trouvent. Les résultats suggèrent aussi que les vagues déferlent avant d'arriver à la zone d'étude, de sorte que les hauteurs significatives diminuent à près de 0.25 m dans la zone d'étranglement menant à la passe. À toute fin pratique, cette zone ne sera pas affectée par les vagues. Cependant, les tenseurs de cisaillement de la radiation de la vague vont produire une circulation particulière d'est en ouest caractérisée par un transport longitudinal de sédiments dirigé aussi d'est en ouest près du rivage.

Les courants générés par l'effet combiné des vents, des marées et des vagues sont maintenant à l'aide du modèle MIKE21-HD durant les 52 heures entourant la tempête de vents d'est. Ces courants serviront à calculer le transport des sédiments durant exactement deux cycles de marée diurne (48 heures). Le choix d'une durée de 52 heures de simulation au lieu de 48 heures est dû au fait que l'onde de marée prend quelque trois heures pour se propager de l'entrée de la lagune du HAM jusqu'au pont du Déroit. Par conséquent, si l'on doit effectuer un calcul de transport net de sédiments durant 48 heures, le calcul de la moyenne doit débiter lorsque l'écoulement est bien établi dans les deux lagunes, c'est-à-dire environ 3 heures après le début des simulations.

Les courants ont été ensuite calculés à l'aide des grilles télescopiques G0m90, G1m30 et G2m10 (voir figure 28) en utilisant l'option «nesting» offerte par MIKE21-NHD pour obtenir une meilleure résolution des courants dans la zone d'étude et en travers de la passe du HAM. La grille G0m90 a des mailles de 90 m x 90 m. Elle couvre le domaine des deux lagunes mais aussi la baie de Plaisance. Les niveaux d'eau empilés par un vent d'est dans la baie de Plaisance vont affecter la circulation dans la zone d'étude par l'entremise des gradients de pression résultants de cet empilement. C'est pourquoi la baie de Plaisance est incluse dans la grille G0. Une grille G1m30 dont les mailles ont des dimensions de 30 m par 30 m fut insérée dans la grille G0m90 à l'endroit approprié. Enfin la grille G2m10 fut à son tour insérée dans la grille G1m30. Cette approche «télescopique» est cependant contrainte par la nécessité d'avoir un rapport de 1 / 3 entre les dimensions des mailles de la grille fine et celles de la grille grossière. C'est pourquoi les dimensions des mailles des grilles G0m90, G1m30 et G2m10 sont respectivement de 90m, 30m et 10m.

Les résultats des calculs de courants obtenus dans la grille d'intérêt G2m10 sont présentés à la figure 32. Les vecteurs sont tracés à des intervalles de 4 mailles. Encore une fois, ils sont produits par l'effet combiné des marées, des vents et des vagues. Les plus forts courants de flot surviennent une heure avant la marée haute à la station 1 et les plus forts courants du jusant surviennent 2.5 heures avant la marée basse à cette station. Ces plus forts courants se manifestent à la

passer et dans le chenal de navigation où les analyses granulométriques ont indiqué la présence de graviers. Les vitesses dépassent 1 m/s et la circulation latérale affiche une tendance marquée de l'est vers l'ouest. Des résultats similaires sont disponibles à chaque heure durant 52 heures.

Il est finalement possible de calculer le transport de sédiments non-cohésifs dans la région d'étude à l'aide du modèle MIKE21-ST. La simulation a été effectuée en utilisant en entrée la grille de calcul G2m10, les séries temporelles matricielles des courants calculés dans G2 par MIKE21-HD et les séries temporelles matricielles des propriétés des vagues calculées par MIKE21-NSW dans la grille G1W et ensuite interpolées dans G2m10. Cette simulation du transport des sédiments a duré 48 heures, soit de 22 :00 le 4 juin à 22 heures le 6 juin 2001. La taille des sédiments imposée en entrée au modèle MIKE21-ST est de 200  $\mu\text{m}$  (tableau 4) et leur distribution spatiale a été spécifiée comme étant constante.

Les transports des sédiments calculés aux 15 minutes dans la zone d'étude adoptent des unités de  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Ils sont présentés à la figure 33 pour les situations des plus forts courants de flot et de jusant sous l'effet des vagues et des vents d'est. L'interprétation de ces transports est basée sur le changement de l'intensité du transport d'une maille à l'autre. Par exemple, une diminution des vecteurs de transport d'une maille à l'autre indique une zone de convergence ou de dépôt potentiel des sédiments à cet endroit alors qu'une augmentation des vecteurs adjacents indique une divergence ou un potentiel d'érosion à cet endroit. De façon générale, une tendance de drif littoral de l'est vers l'ouest semble persister à la fois durant les marées montantes et descendantes. La principale zone d'érosion demeure le chenal de navigation et de façon plus évidente lors du jusant. Ceci explique la présence de graviers et l'absence de sable à cet endroit (tableau 4). Une zone d'accumulation semble exister à l'emplacement des hauts fonds du côté droit du chenal de navigation et proche de la rive droite. Une flèche de haut fond sableux semble enfin persister dans la région droite, proche de la passe d'entrée de la lagune.

Les transports nets de sédiments durant exactement deux cycles de marée diurne, sous l'effet des vagues et des vents de l'est, est présenté à la figure 34. La

dérive littorale du sédiment de l'est vers l'est est bien évidente tout comme la zone d'érosion potentielle dans le chenal de navigation. Il ne semble pas y avoir de transport net de sédiments en travers de la passe d'entrée de la lagune.

L'impact des piliers du nouveau pont sur le potentiel de transport des sédiments dans la zone d'étude sera étudié à la section 4 en comparant les transports calculés en condition naturelle (ci-haut) avec les transports calculés dans des conditions hydrodynamiques similaires mais auxquelles seront ajoutées la résistance offerte par les piliers à l'écoulement aux mailles appropriées dans la grille G2m10.



Tableau 5 : Comparaison des amplitudes et des phases des constituantes harmoniques K1 et M2 de la marée obtenues par l'analyse harmonique des niveaux observés (OBS) et simulés (MOD) aux stations 1 à 7 et 9 durant 15 jours.

Station	K 1				M 2			
	AMPLITUDE		PHASE		AMPLITUDE		PHASE	
	OBS	MOD	OBS	MOD	OBS	MOD	OBS	MOD
1	0.15	0.15	242	242	0.17	0.17	287	287
2	0.08	0.10	266	287	0.07	0.08	313	344
3	0.11	0.10	286	292	0.09	0.09	347	352
4	0.11	0.11	288	293	0.10	0.09	350	353
5	0.13	0.11	294	291	0.12	0.10	361	353
6	0.13	0.13	273	279	0.13	0.13	327	333
7	0.13	0.14	275	272	0.12	0.13	320	319
9	0.15	0.15	243	244	0.18	0.17	283	284

Tableau 6 : Grilles de calcul utilisées pour les simulations du transport de sédiments dans la zone d'étude sous l'influence des marées, des vents et des vagues, selon l'approche décrite à la figure 27.

Grille	Nombre de mailles NX x NY	Dimensions DX x DY (m)	Localité
G0W (vagues)	1400 x 381	30 m x 120 m	Golfe et lagunes
G1W (vagues)	2748 x 614	2.5 m x 10 m	Approche passe de Hâvre-aux-Maisons
G0m90 (Courants)	466 x 507	90 m x 90 m	Baie de Plaisance et deux lagunes
G1m30 (Courants)	228 x 204	30 m x 30 m	Approche passe de Hâvre-aux-Maisons
G2m10 (Courants) (Vagues) (Sédiments))	514 x 280	10 m x 10 m	Zone d'étude, Passe de Hâvre-aux- Maisons

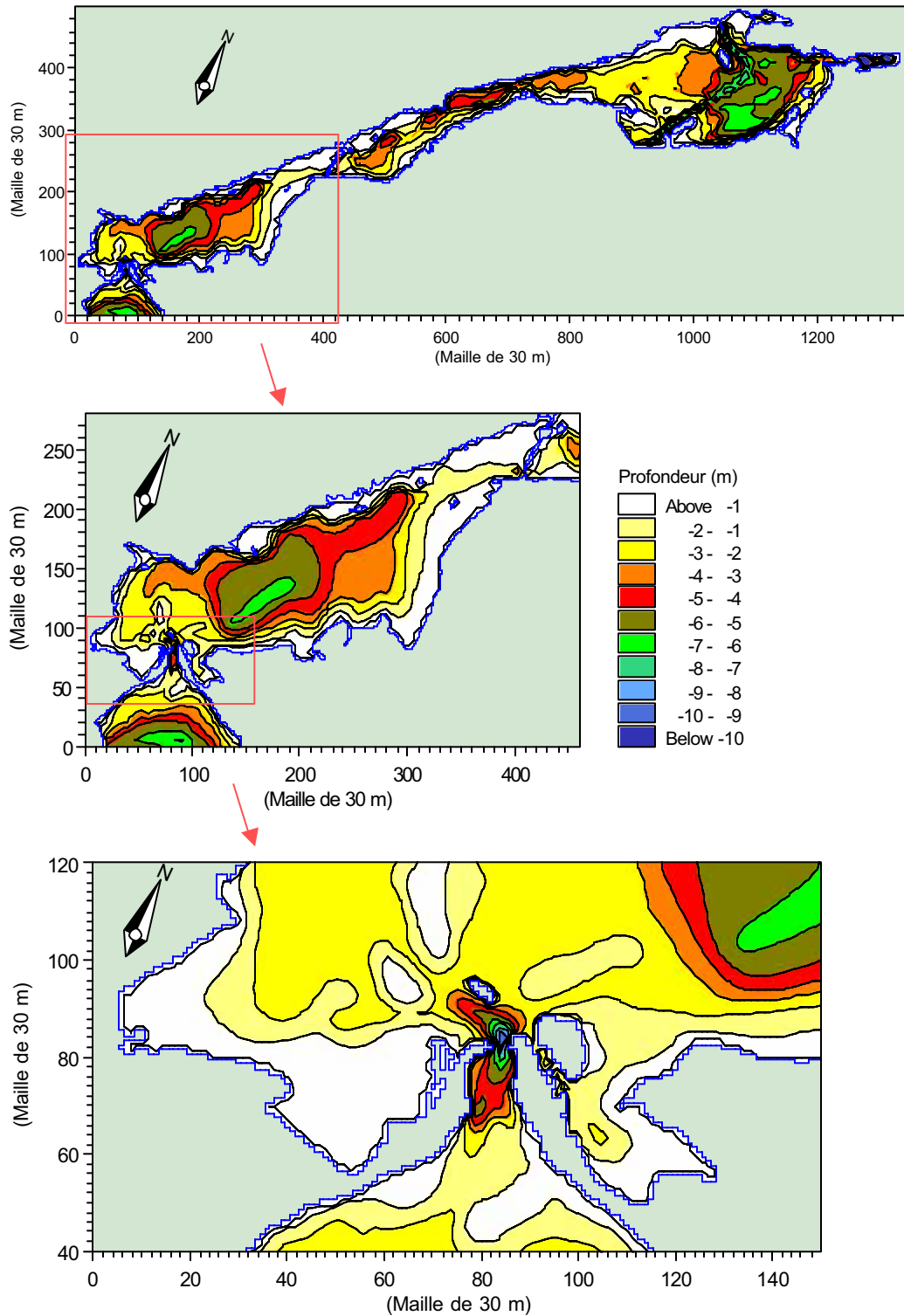


Figure 17 : Grille de calcul du modèle hydrodynamique des deux lagunes, G0m30, avec plus de détails pour la lagune du Hâvre-aux-Maisons (centre) et la région de la passe à son entrée (bas)

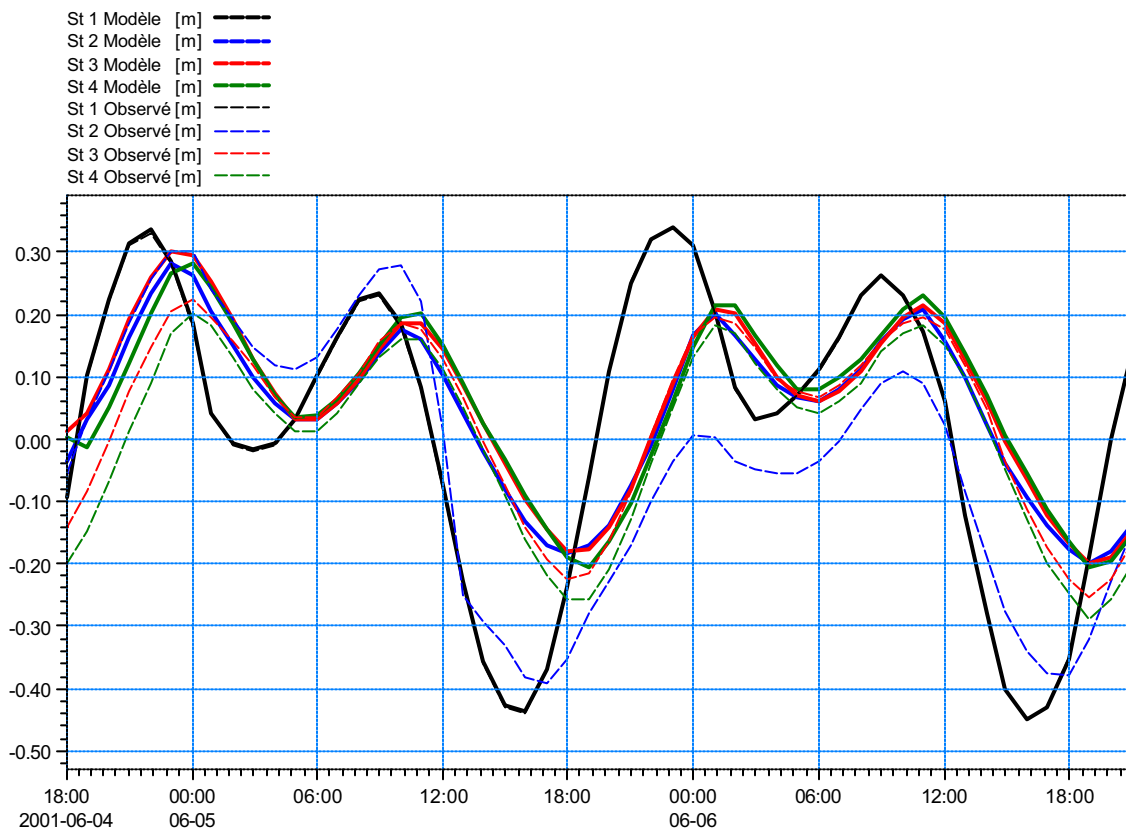


Figure 18 : Comparaison des niveaux d'eau observés (ligne pointillée) et simulés par le modèle (ligne pleine) aux stations 1, 2, 3 et 4 dans la lagune du Havre-aux-Maisons, du 4 au 6 juin 2001.

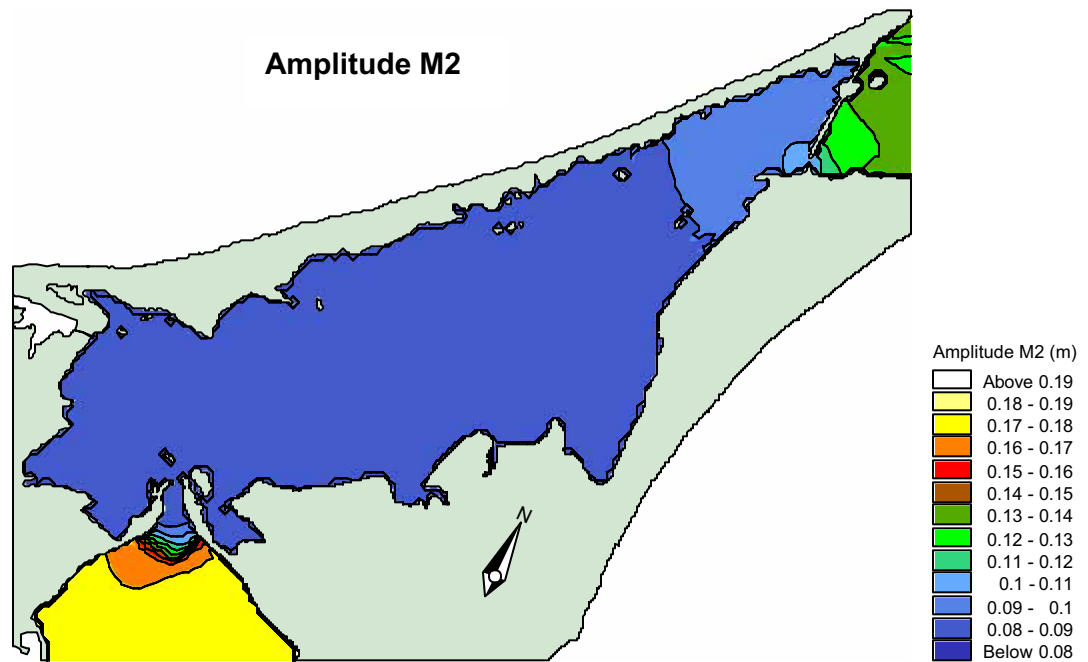
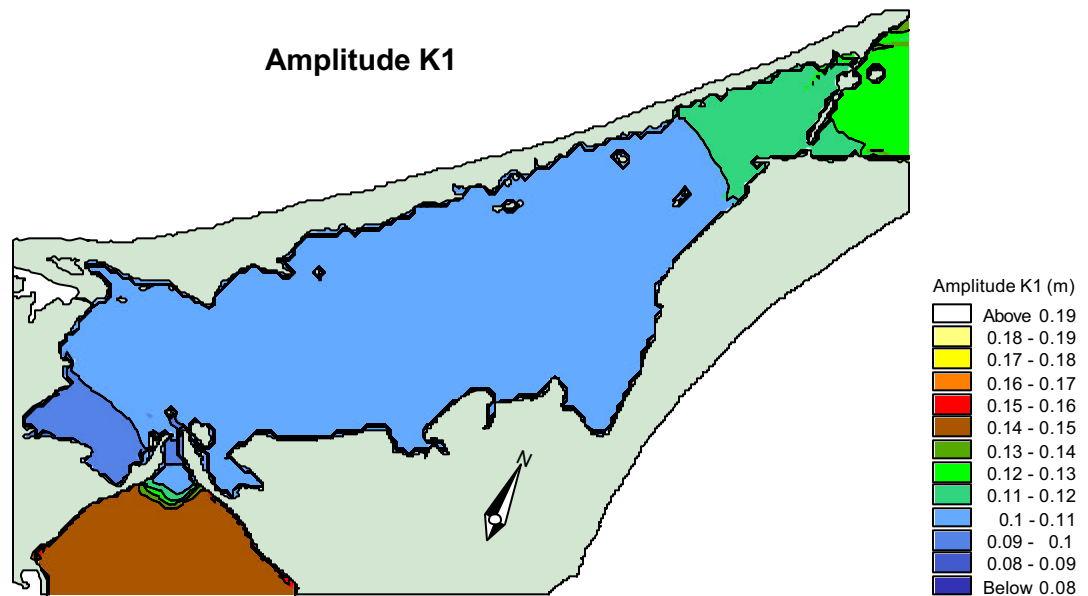


Figure 19: Amplitude des composantes harmoniques diurne (K1) et semi-diurne (M2) dans la lagune du Hâvre-aux-Maisons.

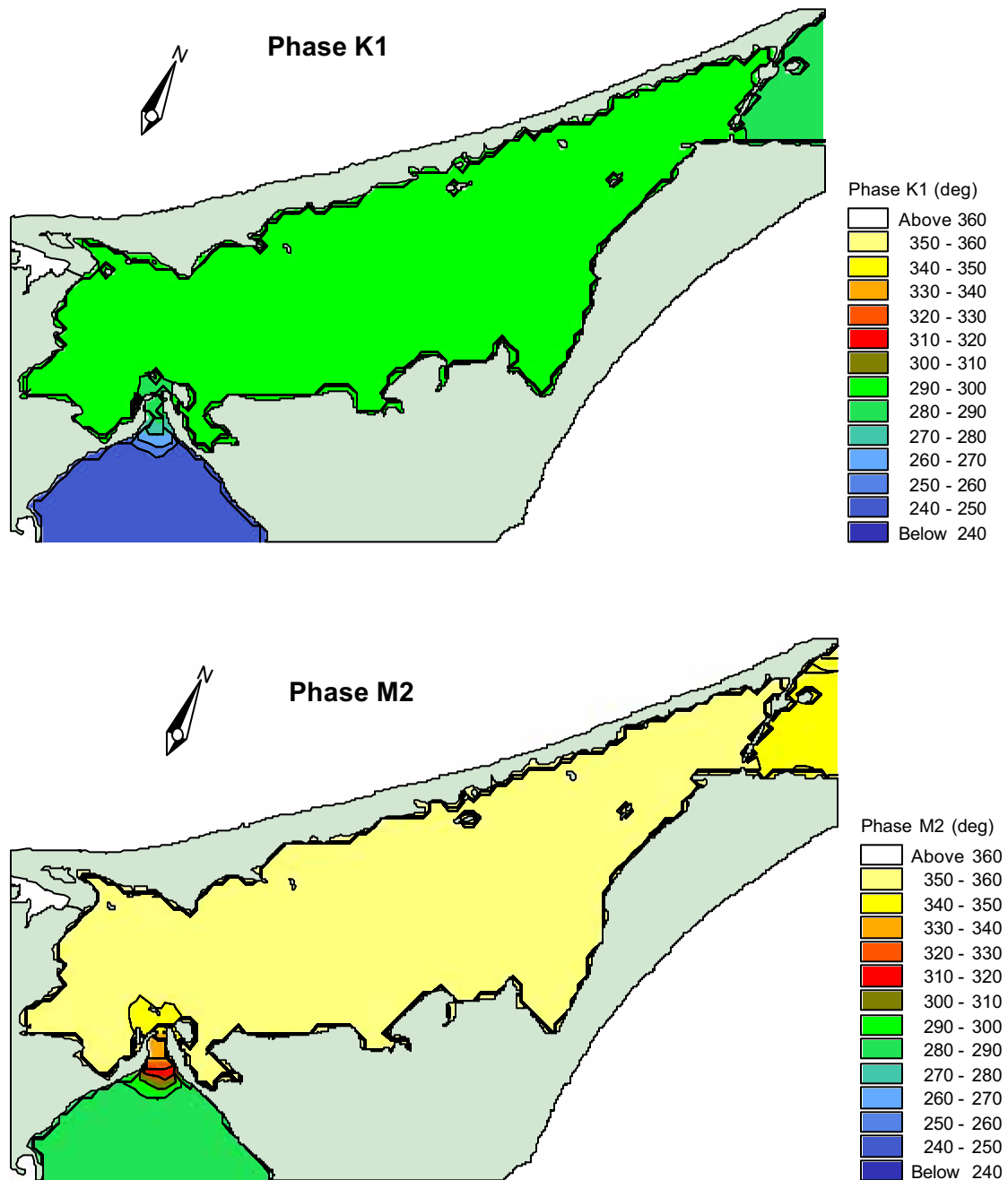


Figure 20 : Phase des composantes harmoniques diurne (K1) et semi-diurne (M2) dans la lagune du Hâvre-aux-Maisons.

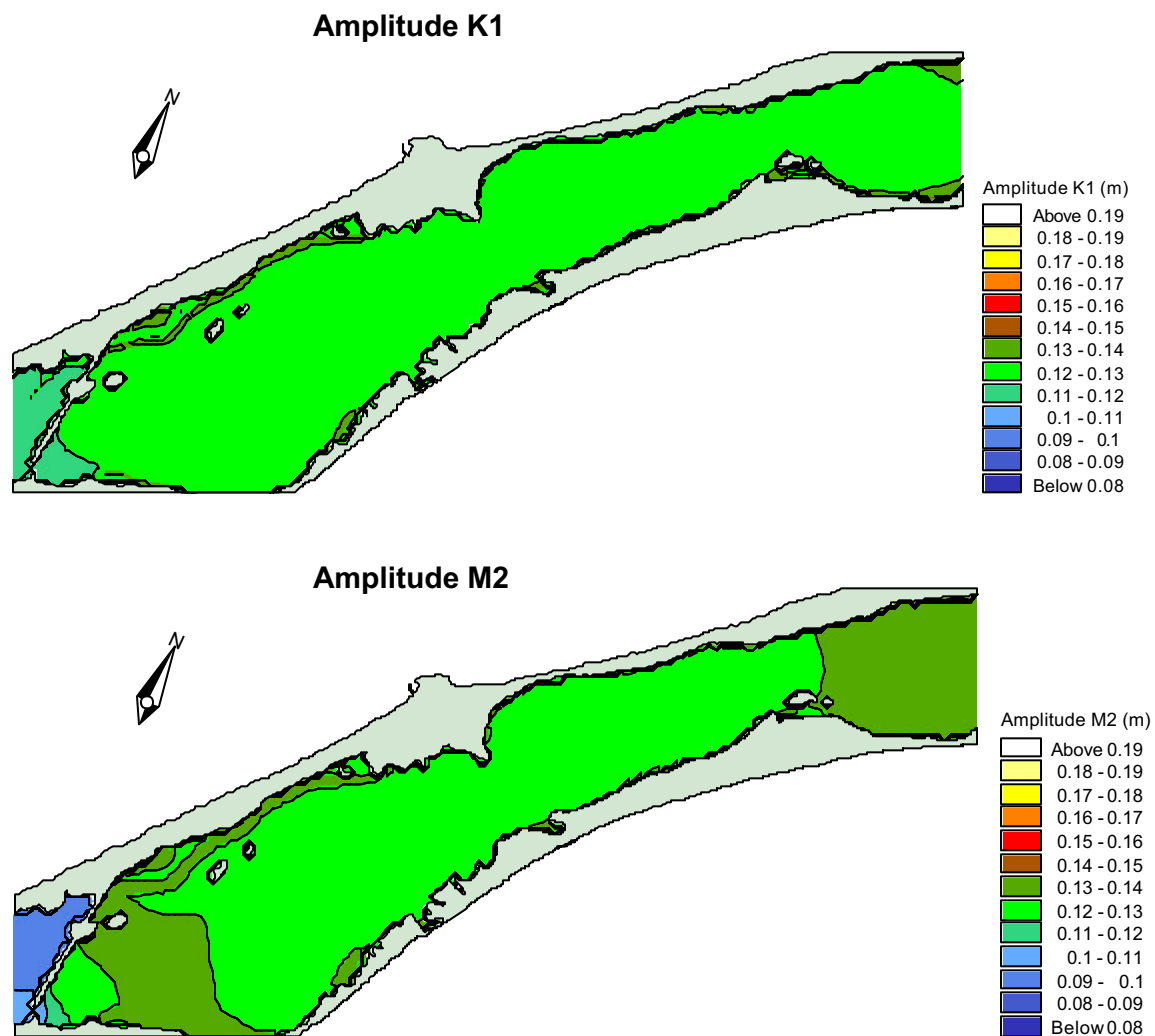


Figure 21 : Amplitude des composantes harmoniques diurne (K1) et semi-diurne (M2) dans la lagune de Grande-Entrée.

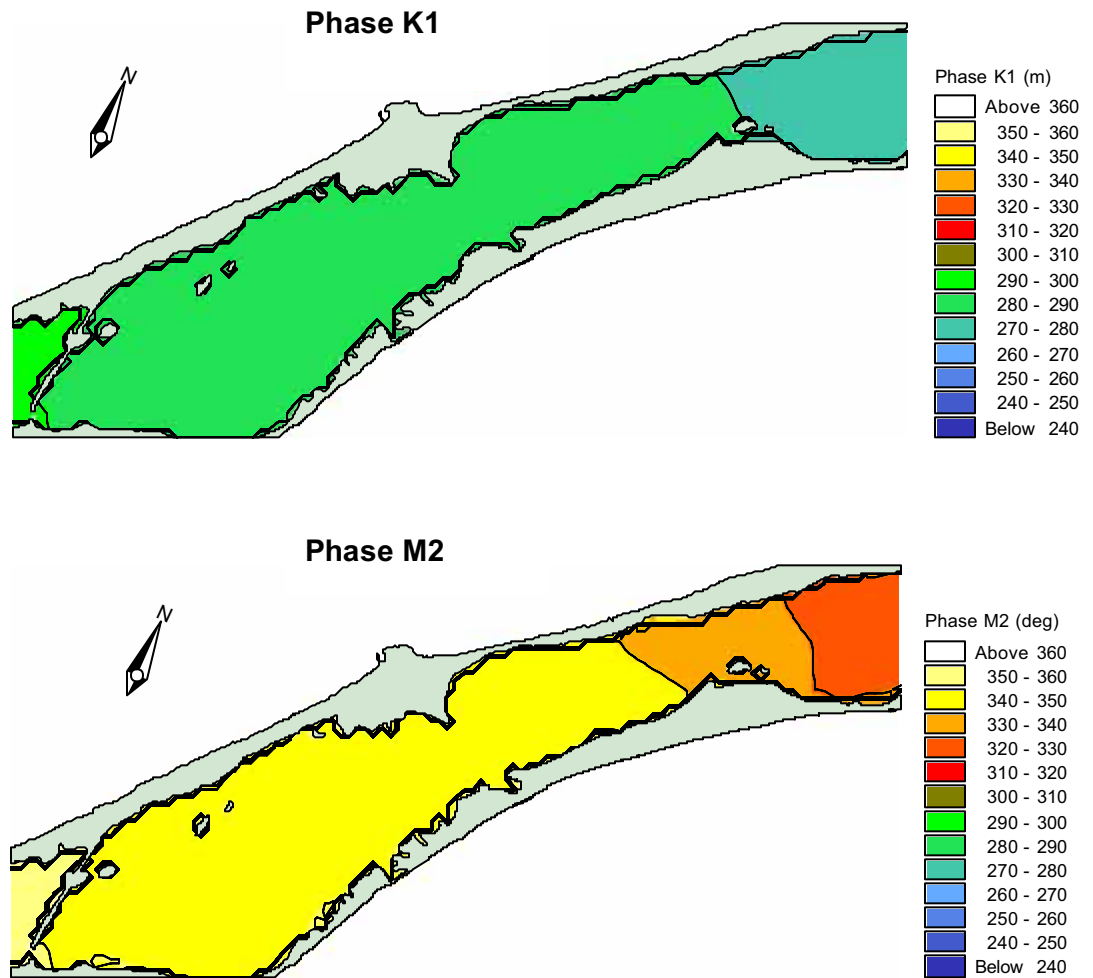


Figure 22 : Phase des composantes harmoniques diurne (K1) et semi-diurne (M2) dans la lagune de Grande-Entrée.



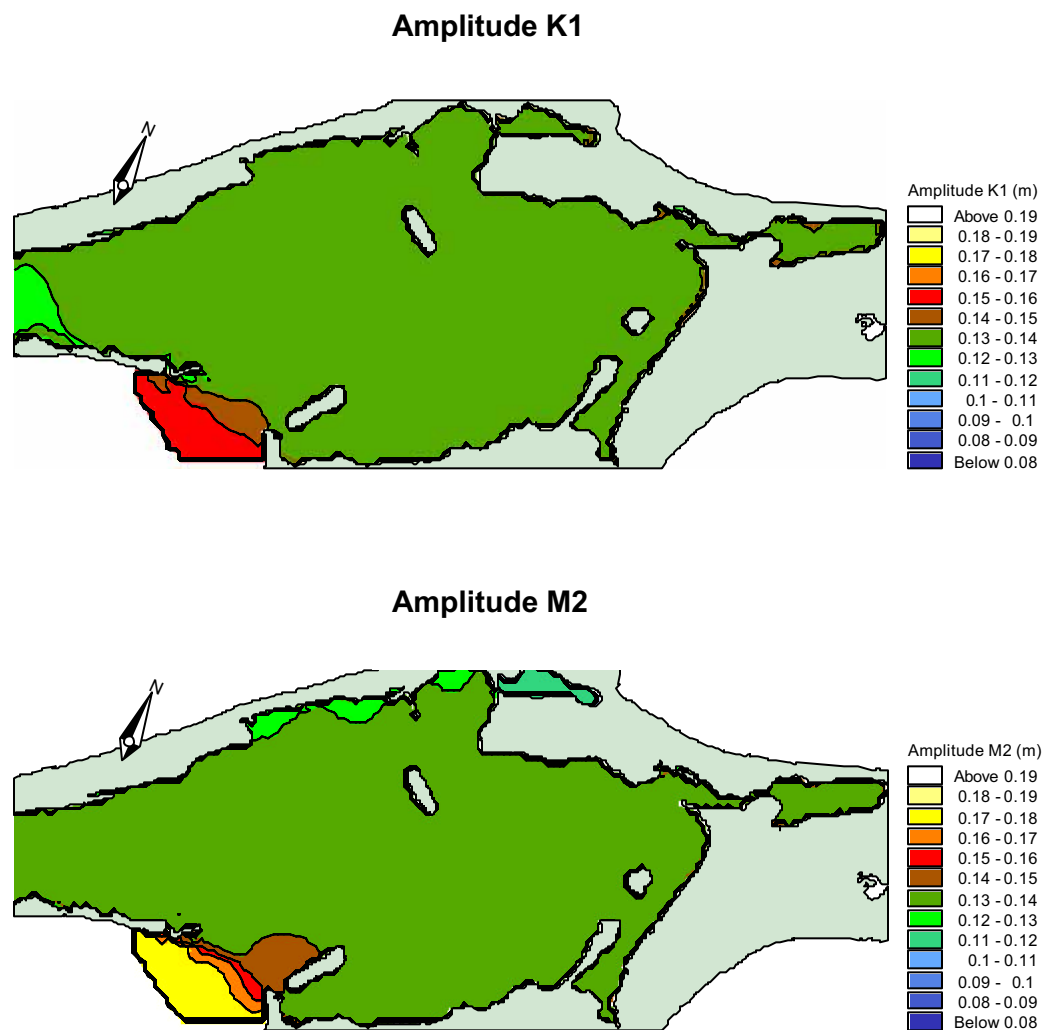


Figure 23 : Amplitude des composantes harmoniques diurne (K1) et semi-diurne (M2) dans la lagune de Grande-Entrée.

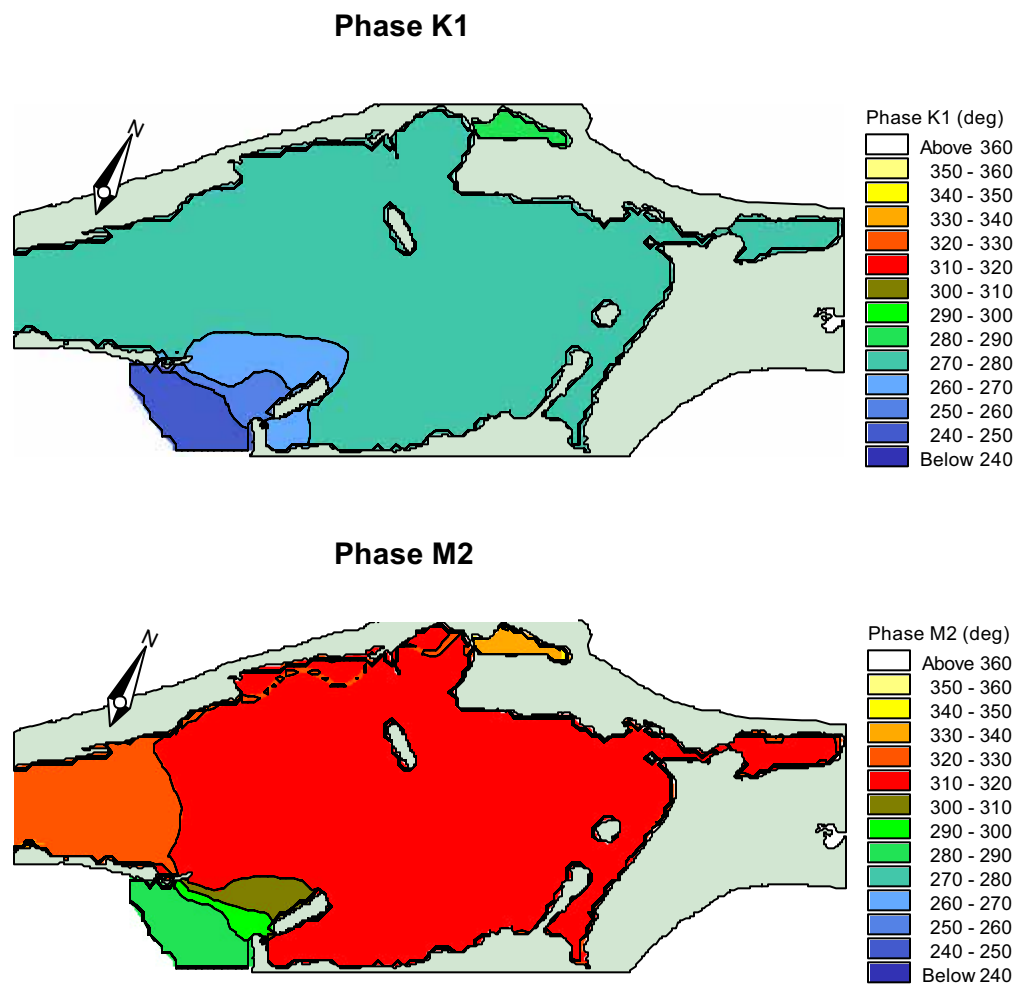


Figure 24 : Phase des composantes harmoniques diurne (K1) et semi-diurne (M2) dans la lagune de Grande-Entrée.

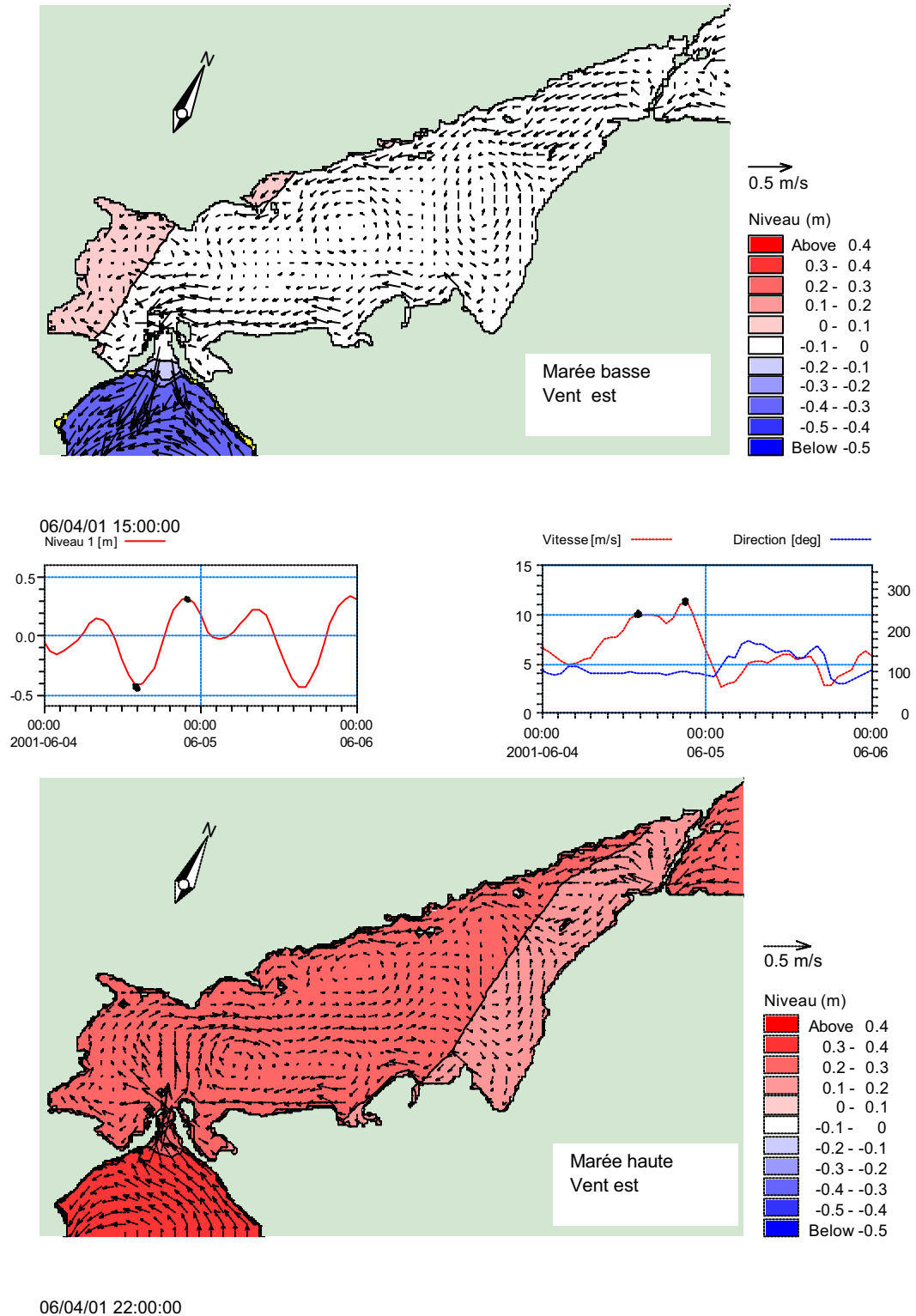
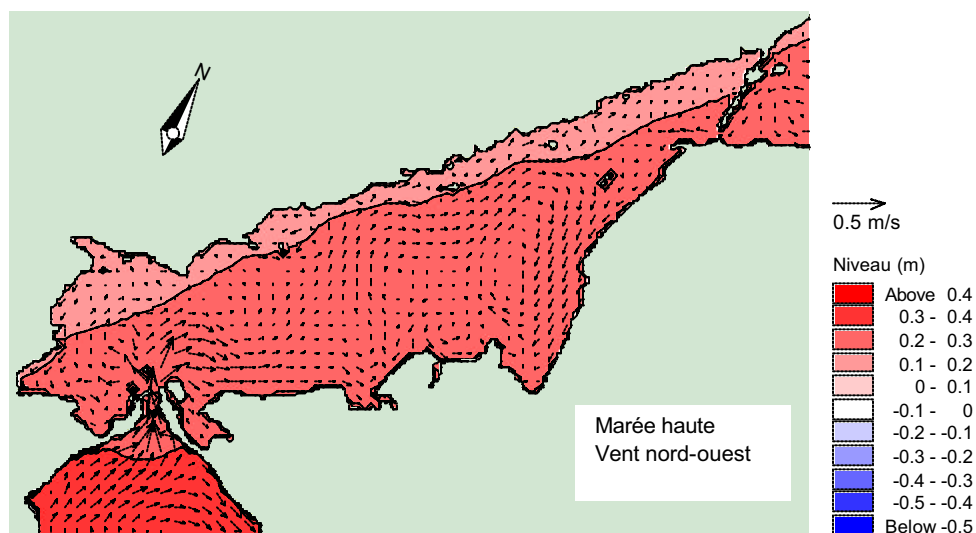
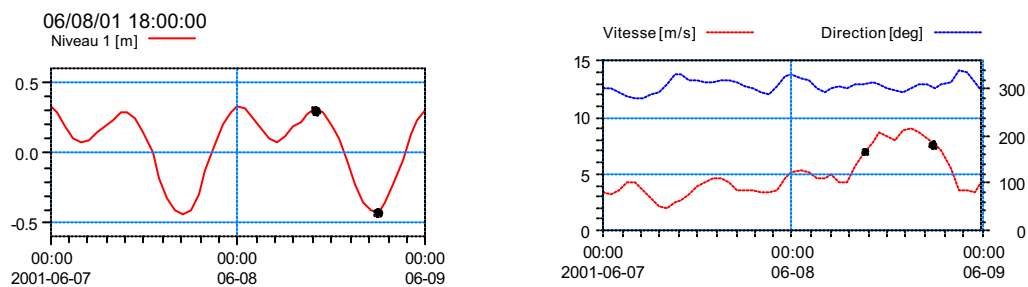
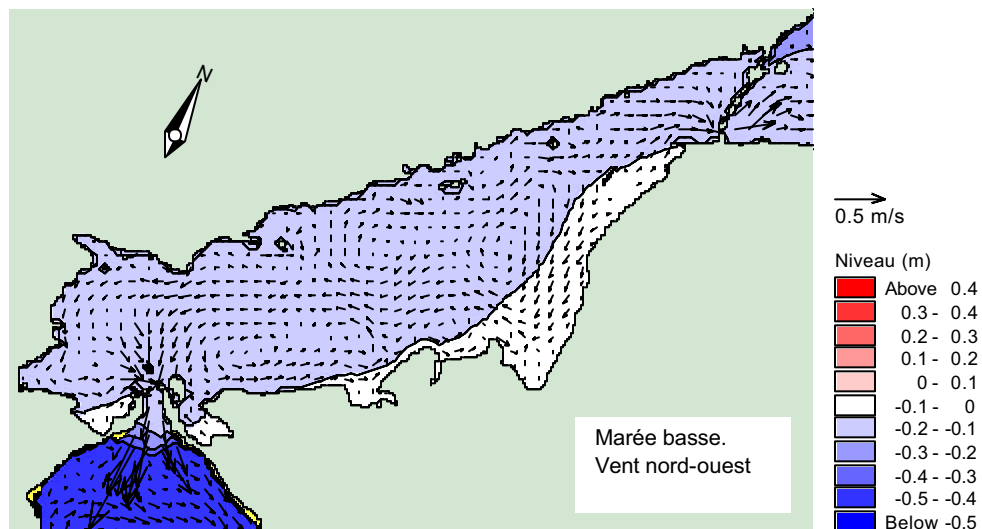


Figure 25 : Courants et niveaux d'eau simulés par vents de l'est à marée basse (haut ) et marée haute (bas). Niveaux à la station 1 et vitesse et direction des vents au centre.



06/08/01 10:00:00

Figure 26: Courants et niveaux d'eau simulés par vents du nord-ouest à marée basse (haut) et marée haute (bas). Niveaux à la station 1 et vitesse et direction des vents au centre.

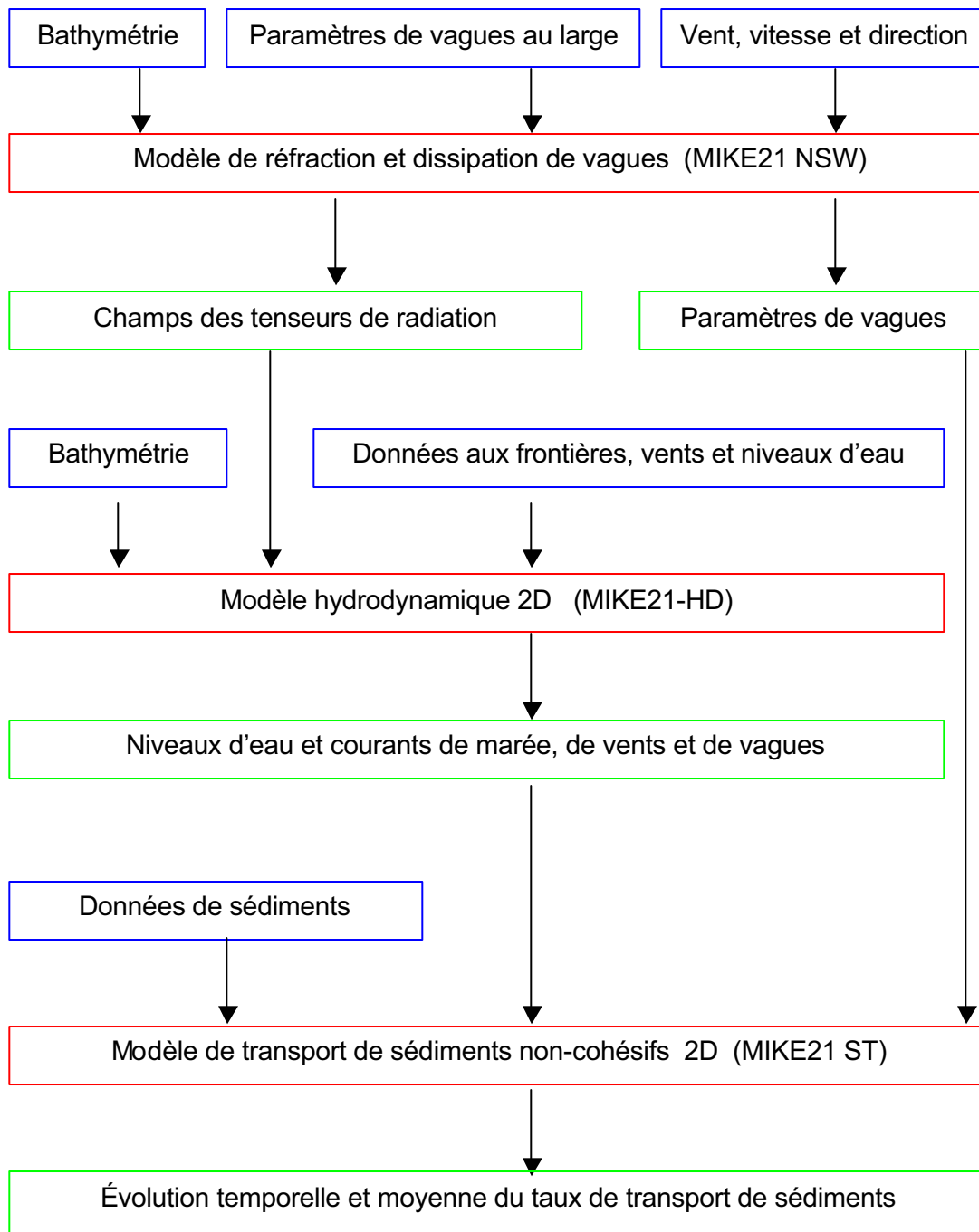
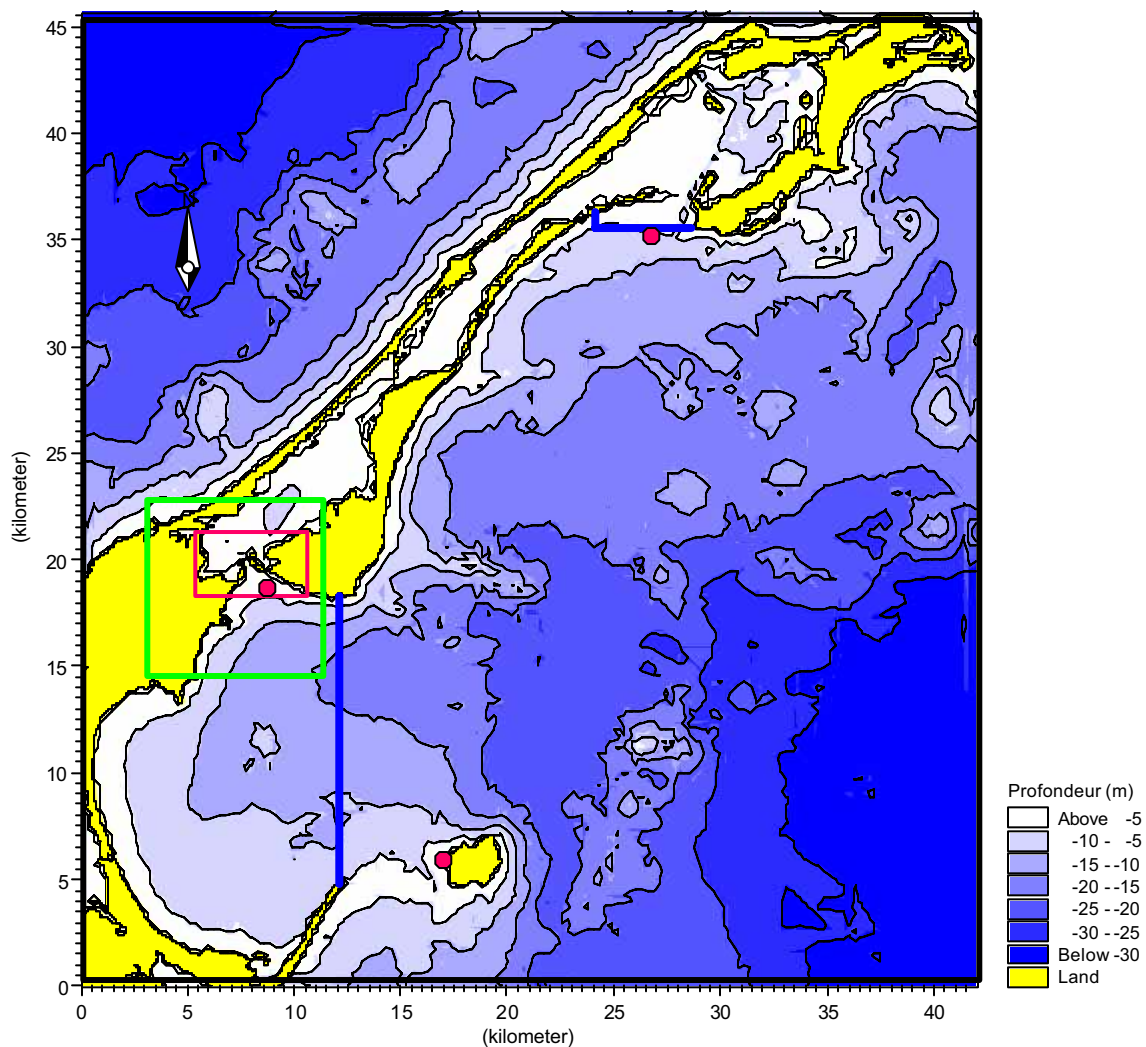


Figure 27 : Approche méthodologique adoptée pour de la modélisation intégrée du transport de sédiment non-cohésif.



Vagues

G0w



G1w



G2m10



Hydrodynamique

G0m90



G1m30



G2m10



Transport de sédiments

G2m10



Figure 28 : Grilles utilisées pour le calcul des vagues (G0W, G1w, G2W), pour le calcul des courants de marée, de vents et de vagues (G0m90, G1m30, G2m10) et pour le calcul du transport de sédiments dans la zone d'étude (G2m10).

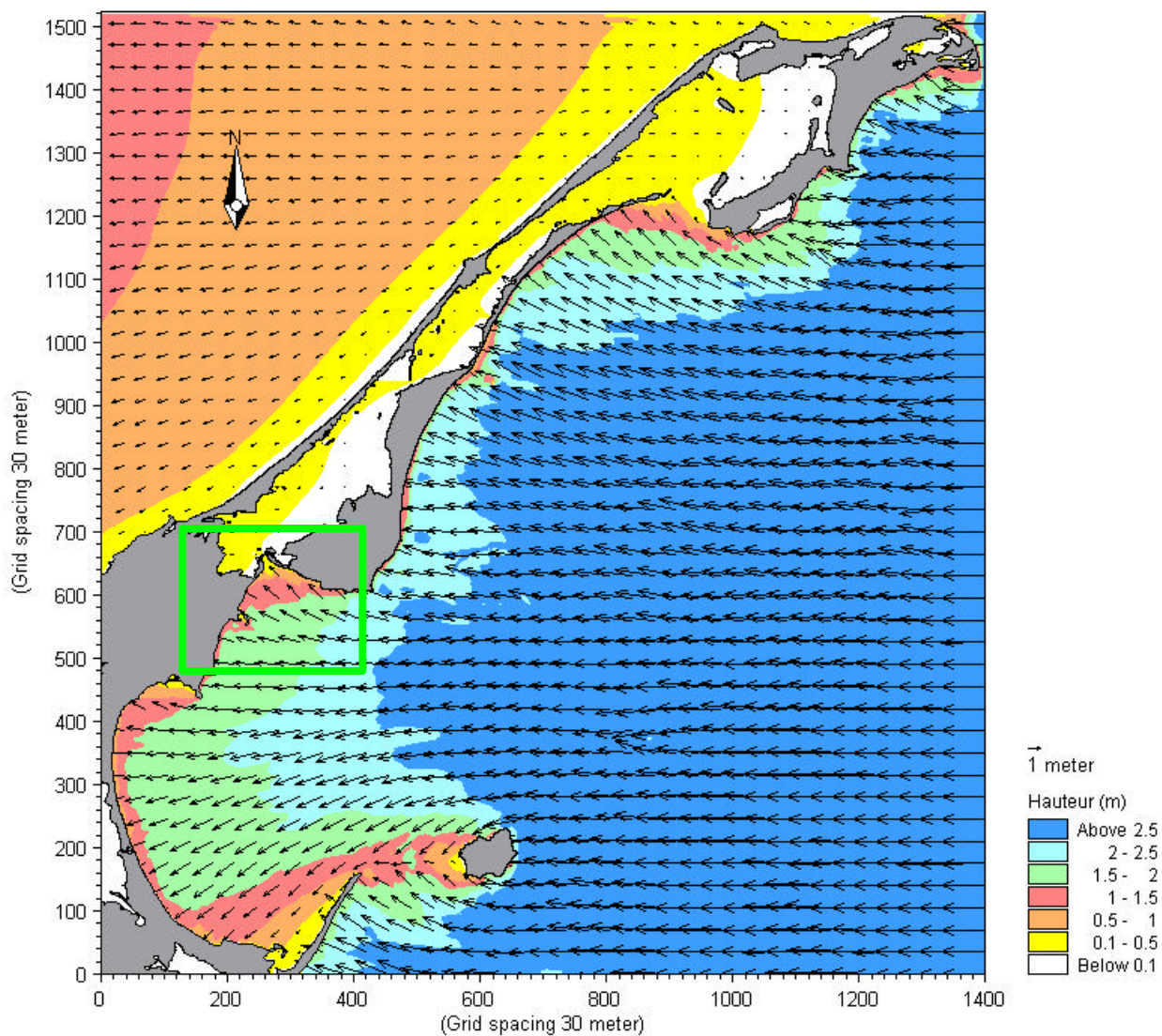


Figure 29 : Vecteurs de réfraction de hauteurs significatives des vagues de 2.5 m de hauteur en provenance de l'est vers la zone d'étude, par vents d'est de 11 m/s. Les résultats de cette grille de calcul G0w sont imposés à la frontière de la grille de calcul G1w (rectangle vert).

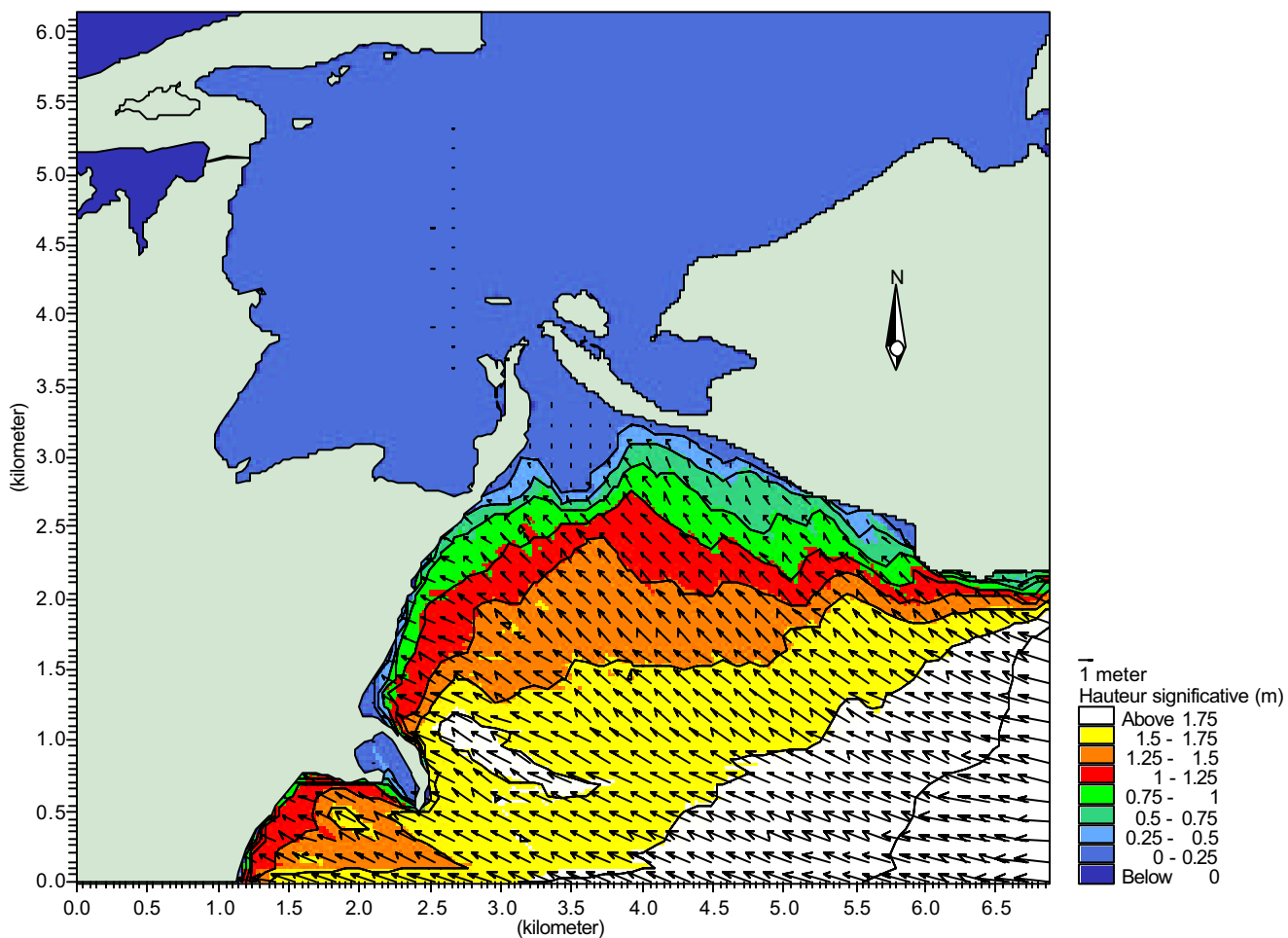


Figure 30 : Vecteurs de réfraction des hauteurs significatives des vagues en provenance de G0w et imposées à la frontière est par vents d'est de 11 m/s. Les résultats de cette grille de calcul G1w seront interpolés vers la grille plus fine G2m10.



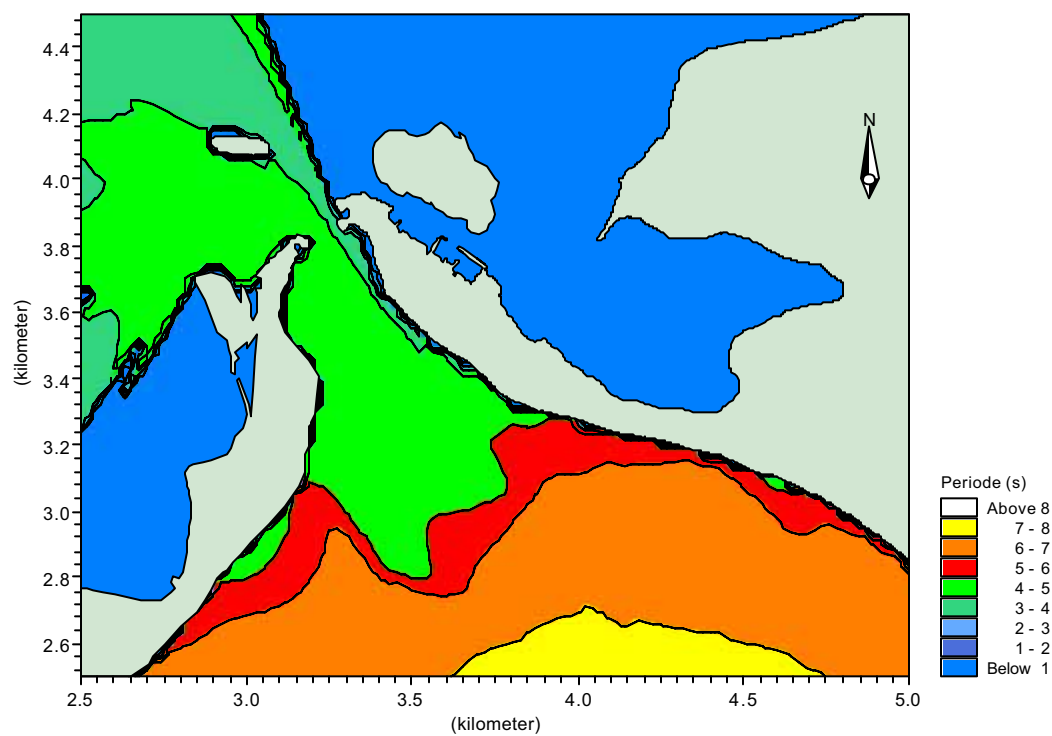
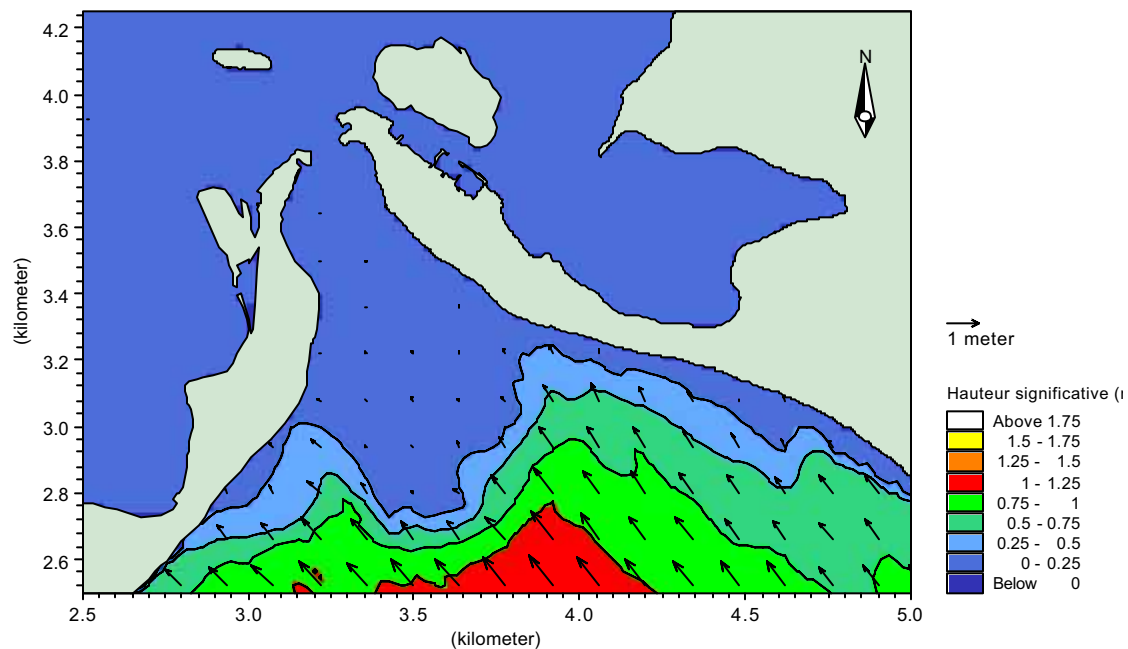


Figure 31 : Hauteurs significatives et des périodes détaillées dans la zone d'étude calculées sur la grille G1w par le modèle NSW.

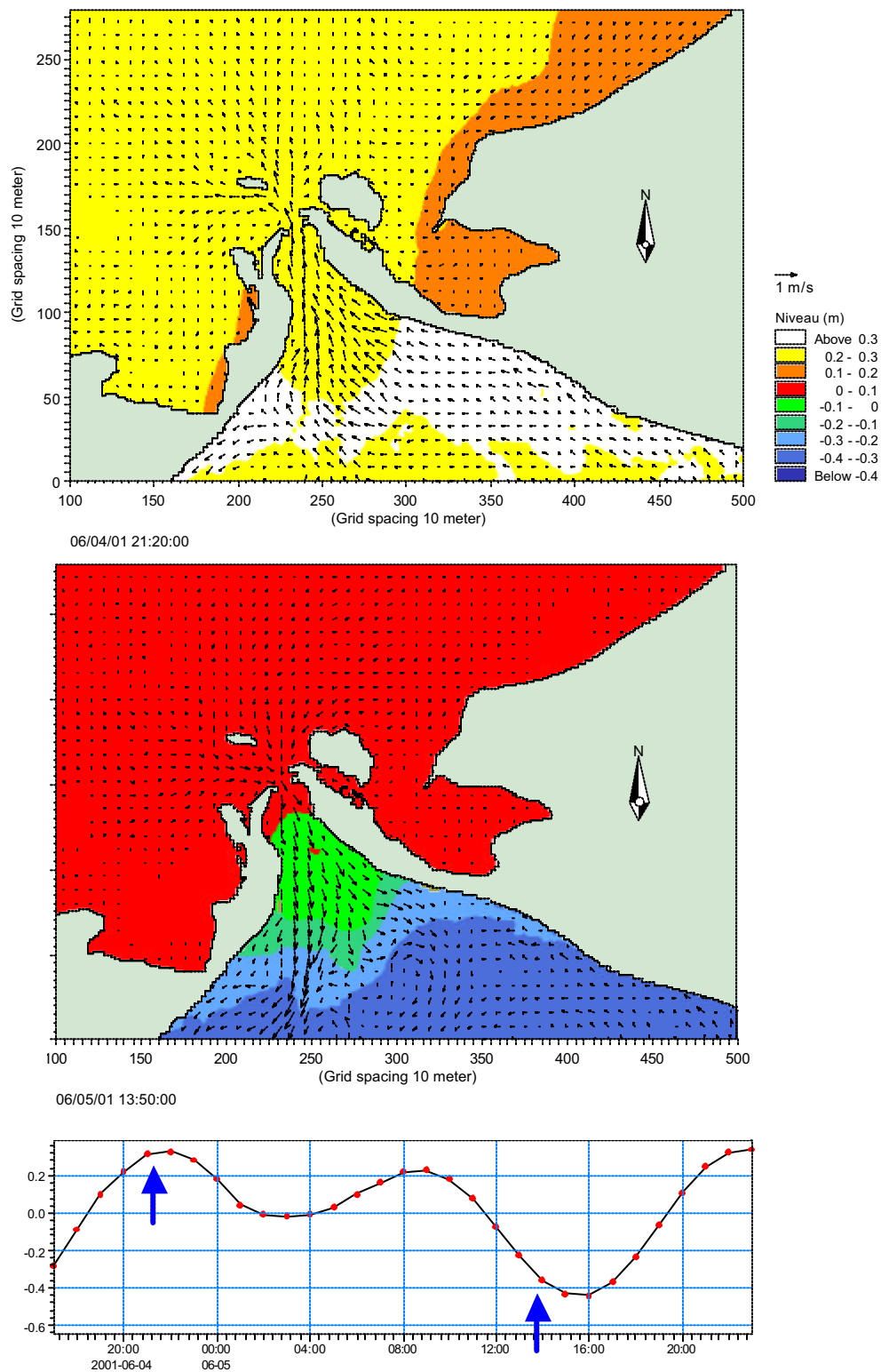


Figure 32 : Courants maximum et niveaux d'eau aux alentours de la passe de la lagune du Hâvre-aux-Maisons, sous l'effet combiné des vents d'est, des marées hautes (haut) et basses (bas) et des vagues en provenance de lest dans le Golfe.

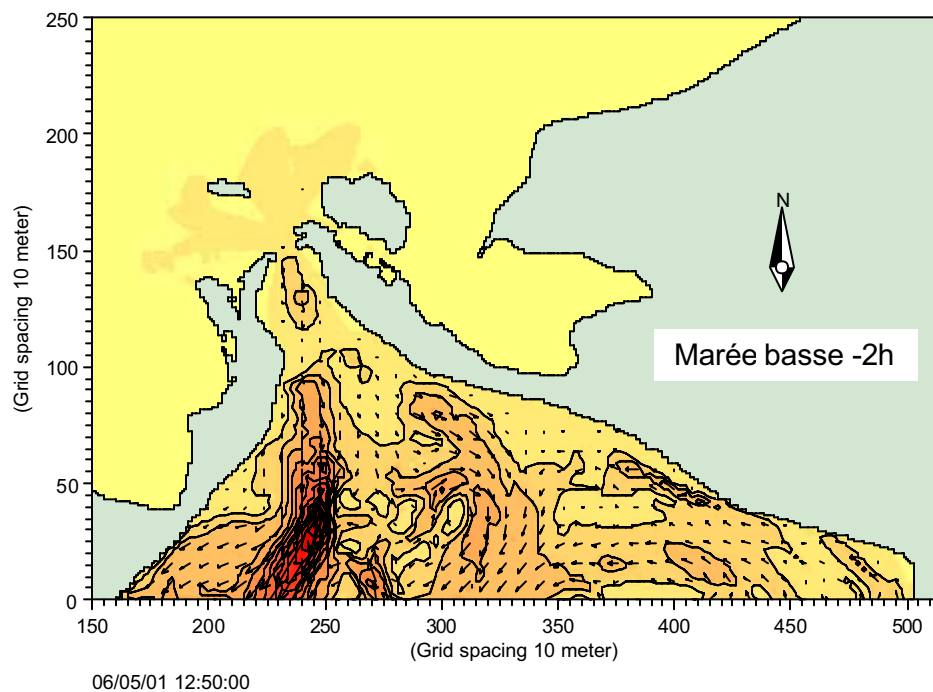
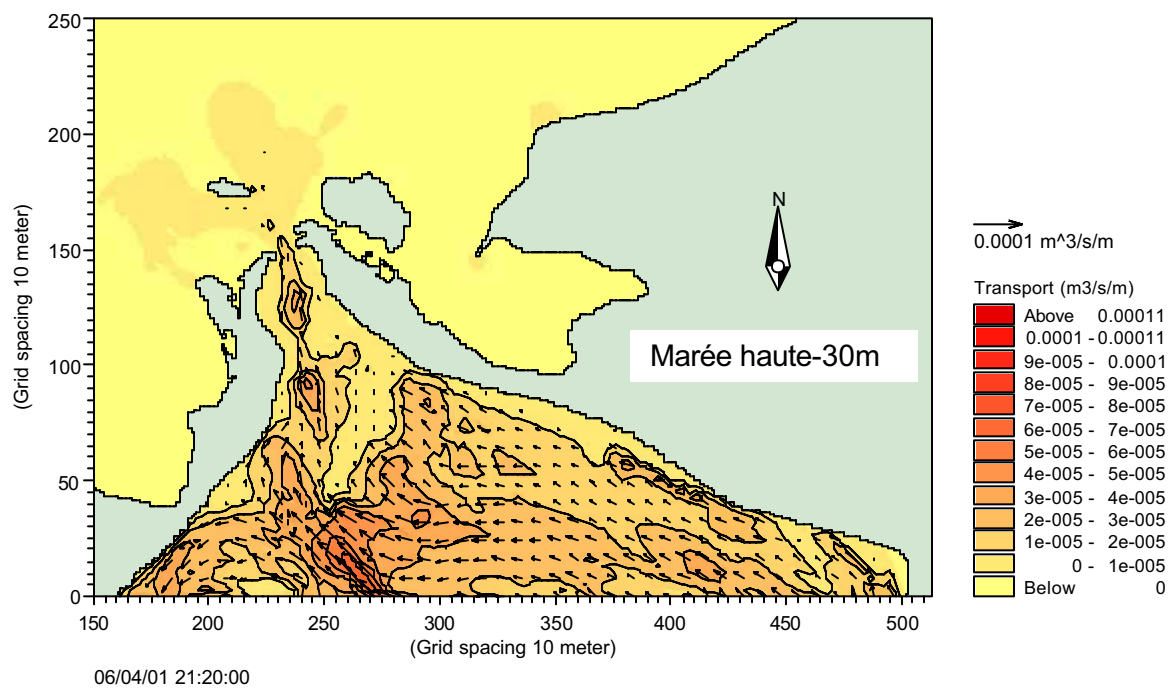


Figure 33 : Transport de sédiment instantané calculé par le modèle ST sur la grille G2m10. lors des plus forts courants de flot (haut) et de jusant (bas) calculés par le modèle HD sur la même grille, voir figure précédente (32).

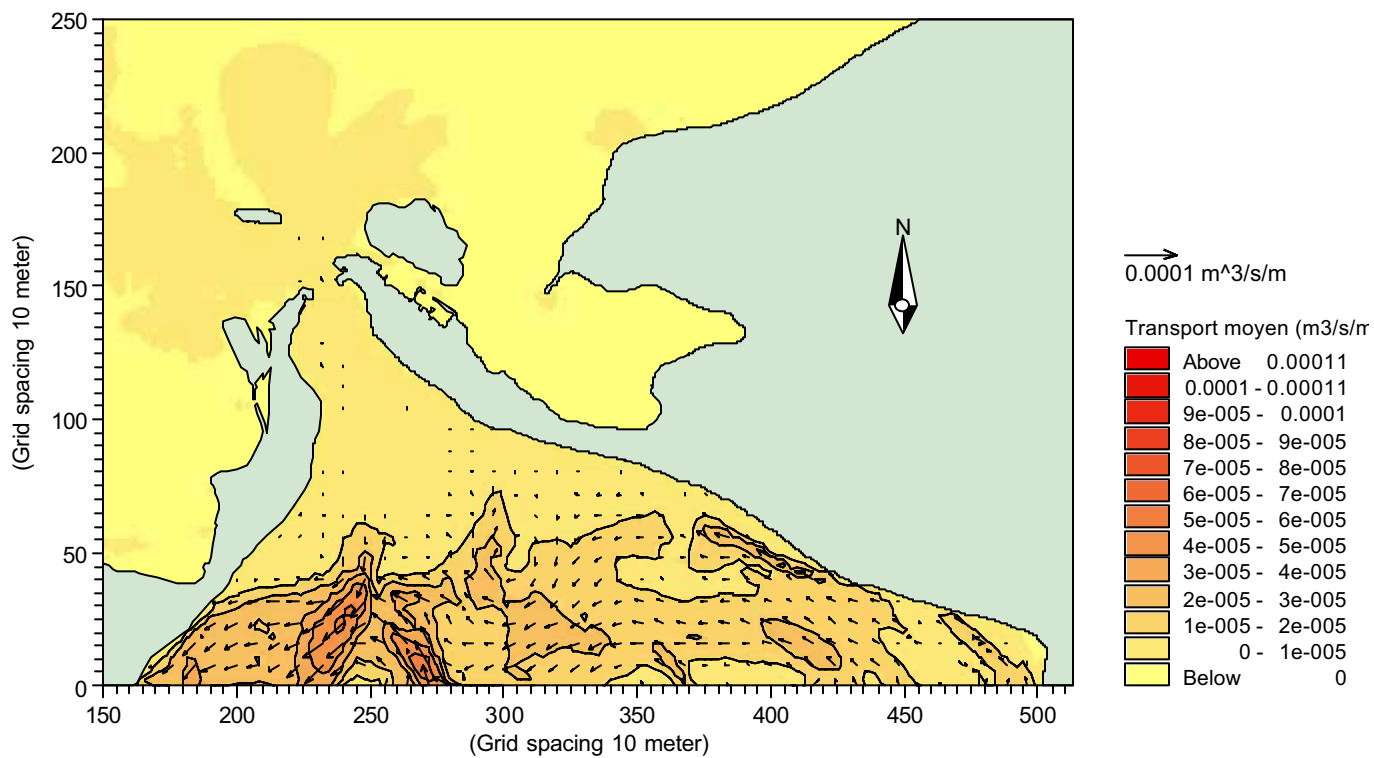


Figure 34 : Transport net ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) de sédiments non-cohésifs calculé par le modèle MIKE21-ST sur une période d'exactly deux cycles de marée diurne, du 4 au 6 juin 2001.

## 4. SIMULATION DES IMPACTS

### 4.1 APPROCHE

L'impact d'un ou de plusieurs piliers sur l'écoulement peuvent être inclus dans un modèle hydrodynamique en 2D horizontal en ajoutant à la tension du cisaillement du fond normale une tension équivalente  $\tau$  offerte par un pilier à l'écoulement dans l'eau. La force d'entraînement sur l'écoulement  $F$  s'exprime par :

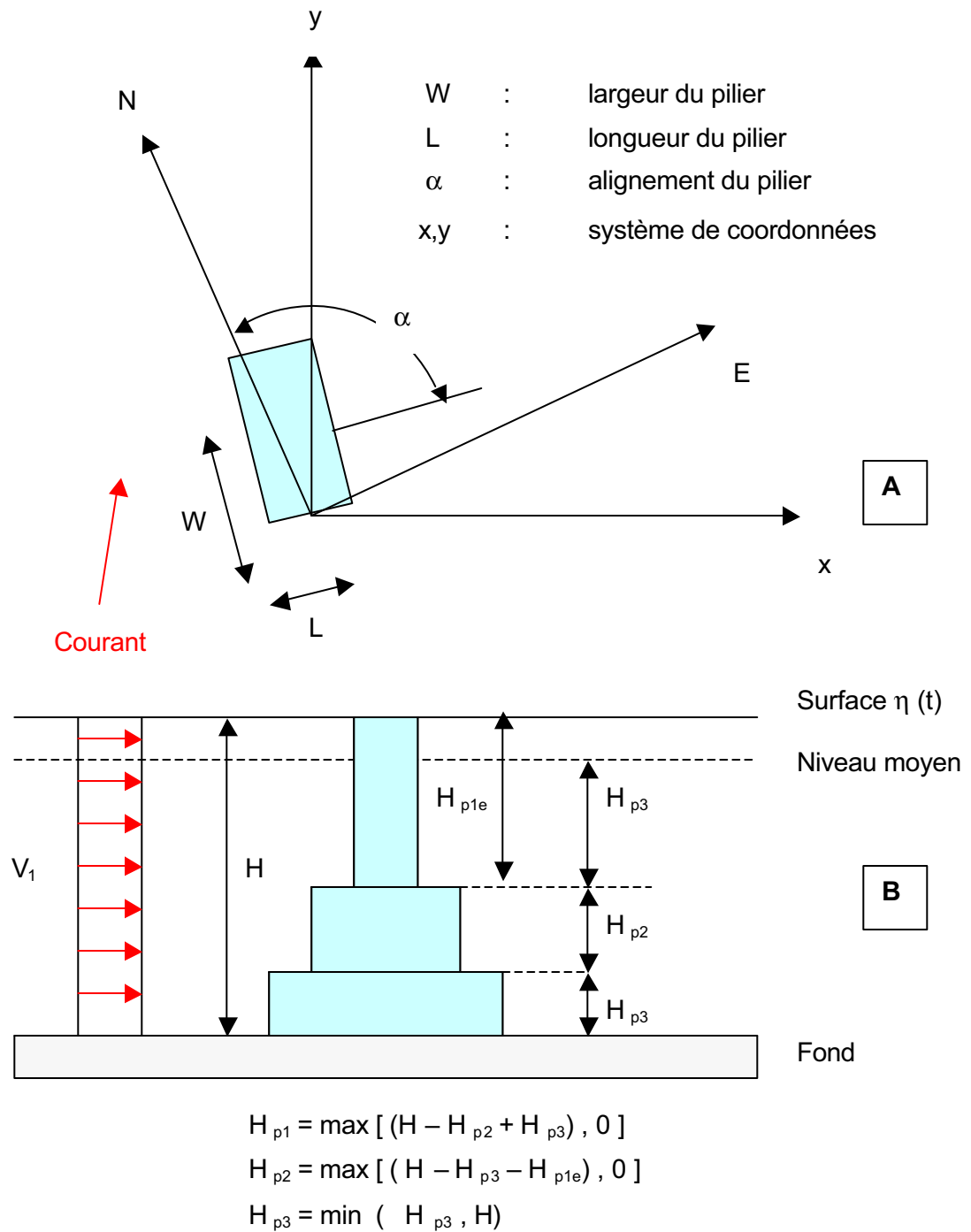
$$\tau_p \cdot \Delta x \cdot \Delta y = n \cdot F$$

où  $\tau_p$  : tension de cisaillement équivalente des piliers ;  
 $F$  : force d'entraînement (opposée au courant) ;  
 $n$  : nombre de piliers à l'intérieur d'une maille ;  
 $\Delta x, \Delta y$  : dimensions des mailles en x et y dans la grille.

La force d'entraînement est calculée en fonction des dimensions géométriques des piliers :

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D B_e H_e V^2$$

où  $C_D$  : coefficient d'entraînement ;  
 $\rho$  : densité de l'eau ;  
 $B_e$  : largeur effective du pilier ;  
 $H_e$  : hauteur du pilier exposée au courant ;  
 $V$  : vitesse de l'écoulement.



Figure

4.2 IMPACTS DES PILIERS DU PONT DE LA VARIANTE 1.

4.3 IMPACTS DES PILIERS DU PONT DE LA VARIANTE 2.

## 6. RECOMMANDATIONS



## RÉFÉRENCES

- Bendat, J.S. and A.G. Piersol. 1986. Random data. Analysis and measurement procedures. John Wiley & Sons, N.Y. 566 p.
- Booth, D. 1991. Flushing of Lagune de la Grande-Entrée. p. 29-35, *In* [B. Myrand, Coord.) Atelier de travail sur la mortalité estivale des moules aux îles-de-la-Madeleine, 22-24 avril 1991, Québec. Conseil de l'aquiculture et des Pêches du Québec, 196 p.
- Booth, D. 1994. Tidal flushing of semi-enclosed bays. P.203 - 219, *In* [K. Beven, P. Chatwin and J. Millbank Eds.], Mixing and Transport in the Environment. John Wiley & Sons, N.Y.
- Bowden, K. F. 1983. Physical oceanography of coastal waters. Ellis Horwood Limited, Chichester, 302 p.
- Cavaleri, L. and P. Malanotte Rizzoli. 1981. Wind wave prediction in shallow water : theory and applications. *J. Geophys. Res.*, 86 : 10961-10973.
- Drapeau, G. 1988. Stability of tidal inlet navigation channels and adjacent dredge spoil islands. *In* : D. G. Aubrey and L. Weisher (Eds.) Hydrodynamics and sediment dynamics of tidal inlets, p. 226-244. Lecture Notes on Coastal and Estuarine studies, Vol. 29. Springer-Verlag, N.Y.
- Foreman, M. G. 1977. Manual for tidal heights analysis and previsions. Pacific Marine Science. Report 77-10, 101 p.
- Foreman, M. G. 1978. Manual for tidal currents analysis and previsions. Pacific Marine Science Report 78-6, 70 p.
- Godin, G. 1979. La marée dans le Golfe et l'estuaire du Saint-Laurent. *Le Naturaliste Canadien*, 106 : 105-121.
- Godin, G. 1988. Tides. Anadyomene Edition. Ottawa, Canada. 348 p.
- Johnson, H. K. 1998. On modeling wind-waves in shallow and fetch limited areas using the method of Holthuijsen, Booij and Herbers. *Journal of coastal research*, 143 (3) : 917-932.
- Holthuijsen, L.H., N, Booij et T.H.C. Herbers (1989). A prediction model for stationary short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering*, 13 : 23-54.
- Kjerfve, B. and K. E. Magill. 1989. Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology*, 88 : 187-199.
- Komen, G.J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselman, and P.A.E.M. Janssen. 1994. Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press. 532 p.
- Koutitonsky, V. G. and G. Bugden. 1991. The physical oceanography of the Gulf of St. Lawrence: a review with emphasis on the synoptic variability of the motion, p. 57-90. *In* : J.-C. Therriault (Ed.) The Gulf of St. Lawrence : small ocean or big estuary ? Canadian Special Publication in Fisheries and Aquatic Science 113.
- Koutitonsky, V.G. et D. Booth. 1996. Modélisation numérique de la circulation dans les lagunes de Grande-Entrée, de Hâvre-aux-Maisons et Le Bassin aux Iles-de-la-Madeleine, Golfe Saint-Laurent. Contrat INRS-Océanologie pour le MAPAQ, 37 p. + 2 Atlas en couleur.
- Koutitonsky, V.G. N. Navarro and D. Booth. 2002. Description of the physical oceanography of Great Entry lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences* (Sous presse).

- Mayzaud, P., V. G. Koutitonsky, P. Souchu, S. Roy, N. Navarro et E. Gomez-Reyez. 1992. L'impact de l'activité mytilicole sur la capacité de production du milieu lagunaire des îles-de-la-Madeleine. Rapport de recherche scientifique FP707-8-5140. INRS-Océanologie, Rimouski, Canada, 312 p.
- Roache, P. J. 1985. Computational fluid dynamics. Hermosa Publishers, Albuquerque, N.M. 87108, 446 p.
- Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiment with the primitive equations. Monthly Weather Review, 91: 91-164.
- Tiphane, M. 1976. Les Iles-de-la-Madeleine : Bathymétrie et sédiments des dunes et des lagunes. Direction des études biophysiques, Office de planification et développement du Québec, Gouvernement du Québec, 25 p.
- Walters, R. A. and C. Heston. 1982. Removing tidal-period variations from time series data using low-pass digital filters. Journal of Physical Oceanography, 12 : 112-115.

## ANNEXE A : MESURES DES PARAMÈTRES PHYSIQUES DU MILIEU

## LISTE DES FIGURES – ANNEXE A

Figure A 1 : Position des stations de mesure de paramètres hydrodynamiques aux Iles-de-la-Madeleine du 23 mai au 13 juillet 2001. Les coordonnées sont en unités UTM (Universal Transverse Mercator). .....	97
Figure A 2: Position de la station météorologique M. ....	98
Figure A 3 : Station météorologique M sur le Cap Alright, Hâvre-aux-Maisons.....	99
Figure A 4: Positions des stations 1, 2 et 3 dans la zone d'étude.....	100
Figure A 5 : Marégraphe-houlographe déployé à la station 1.....	101
Figure A 6: Courantomètre Sontek ADCP déployé à la station 2 sous le pont de Hâvre-aux-Maisons.....	102
Figure A 7: Marégraphe Coastal Leasing déployé à la station 3.....	103
Figure A 8: Position des stations 4, 5 et 6.....	104
Figure A 9: Position de la station 5, sous le pont du Déroit. Le mouillage se situe entre le premier et le deuxième pilier. Le nord est à l'extrémité éloignée du pont. ....	105
Figure A 10: Mouillage à la station 5 comprenant un courantomètre S4 (boule jaune) et un courantomètre RCM4 (non-installé sur la photo) couché sur la base.....	106
Figure A 11: Position de la station 7 dans la Baie de Clark, lagune de Grande-Entrée. ....	107
Figure A 12 : Mouillage du courantomètre S4 installé à la station 7 à l'entrée de la Baie Clarke.....	108
Figure A 13: Positions des stations 8 et 9 dans la passe de Grande-Entrée.....	109
Figure A 14 : Mouillages de marégraphe Aanderaa WLR7 installés aux stations 9 et 10.....	110
Figure A 15: Position de la station 10 dans le Golfe Saint-Laurent. Voir A-13.....	111
Figure A 16: Position de la station 11 à l'île d'Entrée, Golfe Saint-Laurent.....	112
Figure A 17 : Position des stations 12 et 13 des deux côtés de la lagune du Hâvre-aux-Basques.....	113
Figure A 18: Positions des stations de prélèvement d'échantillons de sédiment à l'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons, le 26 mai 2001. ....	114

## A.1 INTRODUCTION

Cette annexe décrit les missions de déploiement (2001-A) et de récupération (2001-B) d'instruments de mesure effectués en 2001 aux Iles-de-la-Madeleine par l'équipe de l'ISMER. Ces mesures servent à décrire la circulation des eaux et à forcer et valider les modèles numériques permettant d'étudier l'impact de la construction d'un nouveau pont à l'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons.

## A.2 OBJECTIF

La mission 2001-A aux Iles-de-la-Madeleine avait deux objectifs :

- Déployer des instruments de mesures temporelles des courants, des niveaux d'eau, de la salinité et de la température dans les lagunes de Hâvre-aux-Maisons et de Grande-Entrée et dans le Golfe du Saint-Laurent à proximité des lagunes. Ces mesures serviront à décrire la variabilité spatiale et temporelle de ces paramètres, à forcer les modèles numériques de circulation et de génération de vagues et à valider les résultats de ces modèles.
- Recueillir des échantillons de sédiments aux alentours de la passe d'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons pour caractériser le fond marin et fournir des données d'entrée au numérique de transport de sédiments non-cohésifs.

La mission 2001-B avait pour objectif la récupération des instruments déployés au cours de la mission 2001-A.

### A.3 MISSIONS 2001

#### A.3.1 Dates

La mission 2001-A s'est déroulée du 21 mai au 26 mai 2001. La mission 2001-B s'est déroulée du 9 au 14 juillet 2001.

#### A.3.2 Membres

Les membres de l'ISMER qui ont participé aux deux missions sont :

Vladimir G. Koutitonsky, chef de mission;  
Sylvain Leblanc, responsable des opérations en mer;  
Gilles Desmeules, technicien en électronique) de l'ISMER.

Monsieur Jean Boudreault de la firme GÉNIVAR s'est joint à l'équipe lors de la mission 2001-A, au cours de la journée du 24 mai 2001.

#### A.3.3 Logistique

Les instruments de mesure ont été mis en état d'opération à l'ISMER au cours des quatre semaines précédant la mise à l'eau en mai 2001. Les composantes des ancrages ont été préparées à l'ISMER au cours de la même période. Les instruments, leurs ancrages et autre matériel de terrain ont été transportés aux Iles de la Madeleine et retournés à Rimouski par camion loué, en empruntant le traversier de Souris à l'Île-du-Prince-Edward à Cap-aux-Meules aux Iles de la Madeleine. Une embarcation du type Boston Whaler de l'ISMER a été remorquée à l'arrière du camion durant ces trajets. Le Boston Whaler a servi au déploiement et à la récupération des instruments de mesures dans les lagunes alors que de plus grandes embarcations (10 à 15 m) ont été utilisées pour le déploiement hors des lagunes. Deux embarcations furent gracieusement mises à la disposition de l'ISMER par la direction du MAPAQ aux Iles-de-la-Madeleine (monsieur B. Myrand) alors qu'une troisième embarcation de 15 mètres a été louée à Grande-Entrée pour le déploiement et la récupération des instruments au sud-est des Iles, dans le Golfe du Saint-Laurent. Les services d'un plongeur des

Iles ont été requis pour vérifier les ancrages des courantomètres déployés aux entrées de la lagune de Havre aux maisons (LHM) et de la lagune de Grande-Entrée (LGE) et pour la récupération d'un courantomètre enfoui sous le sable à l'entrée de la lagune de Grande-Entrée.

Le départ pour la mission 2001 s'est effectué le lundi 21 mai à 09 :00. L'équipe a passé la nuit dans un motel à Shédiac et a repris la route pour arriver à Cap-aux-Meules aux Iles-de-la-Madeleine le lendemain, le 22 mai à 19 :00 à bord du traversier « Madeleine ». Le retour de cette mission a eu lieu le dimanche 27 mai à 08 :00 avec le camion et le Boston Whaler et ils sont arrivés à Rimouski le même soir à 22 :00 HAE. Le camion a été déchargé le lendemain matin.

La mission 2001-B a débuté À Rimouski le lundi 9 juillet à 04 :00 et l'équipe est arrivée le même jour aux Iles de la Madeleine à 19 :00 heures. Le retour de cette mission s'est déroulé de la même façon, avec un départ des Iles le vendredi 13 juillet à 20 :00 par le traversier, une arrivée à Souris à 01 :00 le lendemain matin et une conduite toute la nuit pour arriver à Rimouski vers 10 :00 le samedi 14 juillet 2001.

Les données brutes ont été extraites à l'ISMER la semaine du 16 au 20 juillet et les instruments de mesure ont été démobilisés la semaine suivante.

#### A.4 DÉPLOIEMENT ET RÉCUPÉRATION DES INSTRUMENTS DE MESURE

La figure A.1 montre la position des treize stations de mesure déployées du 23 mai au 13 juillet 2001 à l'intérieur des lagunes, aux passes d'entrée et à l'extérieur dans le Golfe Saint-Laurent. Les positions géographiques des stations ont été relevées à l'aide d'un système de positionnement DGPS du type Trimble ND-3000. Une description détaillée de chaque station et des instruments de mesure qu'elle comprend est présentée ci-dessous. À moins d'indication du contraire, toutes les heures citées dans ce rapport de mission sont des heures locales aux Iles-de-la-Madeleine, c'est-à-dire du fuseau Heure Atlantique Avancée (HAA).

#### A.4.1 Station M: Paramètres météorologiques

Une station météorologique M a été installée le 23 mai 2001 du côté est de la passe d'entrée de LHM, proche du phare du cap Alright à Pointe Basse (figure A.2). Cette station du type *Aanderaa Automatic Weather Station* (figure A.3) comprend des senseurs qui mesurent la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique, la température de l'air et l'ensoleillement. Elle est alimentée en puissance par une batterie 12 volts. Un système d'acquisition programmable assure un enregistrement digital des données mesurées à un pas temporel établi à 20 minutes. L'enregistrement des données a débuté à 10:40 heures, le 23 mai 2001. La station fut démontée le 13 juillet 2001 et la dernière lecture fut enregistrée à 12 :00.. La position géographique de la station relevée par le système DGPS est :

47 ° 24.6516 ' Nord

61 ° 46.6040 ' Ouest

Le système DGPS a aussi permis d'établir que les senseurs sont à environ 30 mètres d'élévation au-dessus du niveau de la mer.

#### A.4.2 Station 1 : Marégraphe, houlographe et thermistor

La station 1 est située à l'extérieur de la passe de Havre aux Maison (figure A.4). La profondeur à cet endroit est de 3.4 m. Cette station comprend un marégraphe et un houlographe combiné du type Coastal Leasing Miniwave portant le numéro de série 10126. L'instrument Miniwave a été fixé en position couchée sur une plaque d'aluminium au centre de trois pattes horizontales lestées par du plomb à leur extrémité (figure A.5). Cet ancrage a été déposé au fond à l'aide d'une corde à partir du Boston Whaler. Une corde de fond en polypropylène d'environ 20 m, fixée à la base d'aluminium et attachée à son autre extrémité à une ancre d'environ 25 kg a ensuite été tendue sur le fond. Cette corde de fond sert à récupérer le mouillage à l'aide d'un grappin à la fin de la période de mesure. Le mouillage a été mis à l'eau à l'aide du Boston Whaler à 16 :22 h le 23/05/2001 et le premier ensemble de données a été enregistré à 18 :00 h le 23/05/2001.



L'instrument a été récupéré le 12 juillet 2001 à 15 :35 h. Le pas d'enregistrement des données de marée a été fixé à 20 minutes alors que celui des enregistrements de houles a été fixé à 2 Hz durant 20 minutes à chaque trois heures. Les positions géographiques de l'instrument et de l'ancre à la station 1 sont :

Instrument : 47 ° 23.6255 ' Nord  
61 ° 49.9879 ' Ouest  
Ancre : 47 ° 23.6318 ' Nord  
61 ° 49.9857 ' Ouest

#### A.4.3 Station 2 : Marégraphe, courantomètre, salinomètre et thermistor

La station 2 est située sous le pont à l'entrée de la lagune de Havre-aux-Maisons (figure A.4). La profondeur à cet endroit est de 9.3 m. Cette station comprend un courantomètre à effet Doppler du type Argonaute de SonTek fixé sur une base en aluminium montée sur un tripode qui place l'instrument à 1 m au dessus du fond (figureA.6). Le courantomètre Argonaute comprend aussi un marégraphe et des senseurs de conductivité (salinité) et de température. Le pas d'enregistrement a été fixé à 20 minutes. L'instrument a été déployé à l'aide de l'embarcation «Picasse » du MAPAQ à 16 :55 h le 23/05/2001. Une chaîne galvanisée attachée à la base du mouillage a été fixée à son autre extrémité à l'un des piliers latéraux qui supportent le pont. Par précaution, un plongeur a été mandaté par l'ISMER d'inspecter l'état du mouillage sous le pont le 27 mai 2001, après sa mise à l'eau. Il a rapporté que le mouillage été en position renversée sur le côté et qu'il l'avait redressé au cours de sa plongée. Le même plongeur a ensuite été mandaté d'inspecter le mouillage une semaine plus tard. Il a alors constaté que le mouillage était bien en place, stable et en bonne position de mesure. Le mouillage a été récupéré à 09 :15 le 13 juillet 2001 à l'aide de la « Picasse ». La position de la station 2 est :

Instrument : 47 ° 23.6255 ' Nord  
61 ° 49.9879 ' Ouest

#### A.4.4 Station 3 : Marégraphe et thermistor

La station 3 est située à la limite ouest de la lagune de Havre-aux-Maisons, à une centaine de mètres au nord du petit quai de Fatima (figure A.4). La profondeur à cet endroit est de 2.4 m. L'instrument mouillé à cette station est un marégraphe du type Coastal Leasing MicroTide portant le numéro de série 10147 et muni d'un senseur de température à l'intérieur du boîtier. Le marégraphe est fixé en position couchée sur une plaque de métal rectangulaire lestée à ses coins et déposée sur le fond (figure A.7). Une corde de fond est attachée à cette plaque et, à son autre extrémité, à une ancre de 20 kg. L'instrument a été mis à l'eau à l'aide du Boston Whaler à 14 :30 heures le 23 mai 2001 et l'enregistrement a débuté à 18 :00 heures le même jour. Le pas d'enregistrement a été fixé à 20 minutes. Le mouillage a été récupéré le 12 juillet 2001 à 16 :06 h. La position de cette station est :

Instrument : 47 ° 24.6516 ' Nord  
61 ° 51.9822 ' Ouest

Ancre : 47 ° 24.6501 ' Nord  
61 ° 51.9634 ' Ouest

#### A.4.5 Station 4 : Marégraphe et thermistor

La station 4 est située au nord-est de la lagune de Havre-aux-Maisons, dans le chenal à l'approche du pont du Déroit (figure A.8). La profondeur à cet endroit est de 1.5 m. Cette station comprend un marégraphe du type Coastal Leasing MicroTide portant le numéro de série 10149 et muni d'un senseur de température à l'intérieur du boîtier. Le marégraphe est fixé sur une plaque d'aluminium au centre de trois pattes lestées à leur extrémité, le tout posé sur le fond. L'instrument a été mis à l'eau à 10 :50 heures le 24 mai 2001 et l'enregistrement a débuté à 10 :00 heures le même jour. Le pas d'enregistrement a été fixé à 20 minutes. Le mouillage a été récupéré le 12 juillet 2001 à 16 :39 h. La position de cette station est :

Instrument : 47 ° 27.7717 ' Nord  
 61 ° 46.5865 ' Ouest  
 Ancre : 47 ° 27.7615 ' Nord  
 61 ° 46.5927 ' Ouest

#### A.4.6 Station 5 : Marégraphe, courantomètre, salinomètre et thermistor

La station 5 est située sous le pont du Déroit entre les lagunes de Havre-aux-Maisons et de Grande-Entrée (figure A.8). Plus exactement, le mouillage a été déposé entre le deuxième et le troisième pilier (figure A.9) à partir du haut du pont avec une corde coulissante. La profondeur sous le pont, mesurée par l'échosondeur du Baston Whaler, est de 10 m. Les instruments mouillés à cet endroit sont un courantomètre InterOcean S4 portant le numéro de série 1681 et un courantomètre Aanderaa RCM4 dépourvu de ses senseurs de vitesse et de direction. Le courantomètre S4 mesure la vitesse et la direction du courant et le niveau de l'eau alors que le RCM4 enregistre uniquement la conductivité et la température de l'eau. Un trépied en acier inoxydable place le courantomètre S4 à 1 m au dessus du fond alors que le RCM4 est fixé à la base du trépied en position couchée (figure A.10 ). L'ensemble du mouillage a été descendu à l'eau à 12 :44 le 24 mai 2001 et déposé au fond à l'aide d'une corde à partir du haut du pont. Il a ensuite été rattaché à l'un des piliers du pont à l'aide d'une chaîne galvanisée. Le mouillage a été récupéré à l'aide du Boston Whaler le 11 juillet 2001 à 17 :10 h. La position de cette station est :

Instruments : 47 ° 28.715 ' Nord  
 61 ° 45.009 ' Ouest

#### A.4.7 Station 6 : Marégraphe et thermistor

La station 6 est située au sud-est de la lagune de Grande-Entrée, près du pont du Déroit (figure A.8). La profondeur à cet endroit est de 3.5 m. Cette station comprend un marégraphe du type Coastal Leasing MicroTide portant le numéro

de série 10148 et muni d'un senseur de température à l'intérieur du boîtier. Le marégraphe est fixé sur une plaque d'aluminium au centre de trois pattes lestées à leur extrémité, le tout posé sur le fond. L'instrument a été mis à l'eau à 10 :09 heures le 25 mai 2001 et l'enregistrement a débuté à 10 :00 heures le 24 mai 2001. Le pas d'enregistrement a été fixé à 20 minutes. Le mouillage a été récupéré le 11 juillet 2001 à 18 :14 h. La position de cette station est :

Instrument : 47 ° 32.9785 ' Nord  
 61 ° 39.5109 ' Ouest  
 Ancre : 47 ° 32.9679 ' Nord  
 61 ° 39.5157 ' Ouest

#### A.4.8 Station 7 : Marégraphe, courantomètre, salinomètre et thermistor

La station 7 est située à l'entrée de la baie Clarke, au nord-est de la lagune de Grande-Entrée. Plus précisément, cette station est située du côté de la baie, tout près du pont de la route 199 qui traverse l'entrée de la baie (figure A.11). La profondeur à cet endroit est 3.3 m. La station comprend un courantomètre InterOcean S4 portant le numéro de série 0707 et muni de senseurs de vitesse et direction du courant, de niveau d'eau, de température et de salinité de l'eau. Le courantomètre est monté sur une tige rigide d'environ 0.5 m fixée à une base de métal au centre de trois pattes lestées à leur extrémité (figure A.12). Le mouillage a été mis à l'eau en Boston Whaler à 11 :58 heures le 25 mai 2001 et le pas d'enregistrement a été fixé à 20 minutes. Le mouillage a été récupéré le 12 juillet à 12 :42 h. La position de cette station est :

Instrument : 47 ° 37.0923 ' Nord  
 61 ° 28.5242 ' Ouest  
 Ancre : 47 ° 37.0988 ' Nord  
 61 ° 28.5156 ' Ouest

#### A.4.9 Station 8 : Courantomètre

La station 8 est localisée dans le chenal de la passe à l'entrée de la lagune de Grande-Entrée, tout près de la bouée rouge (figure A.13). Le mouillage comprend un courantomètre InterOcean S4 portant le numéro de série 786 et monté sur un trépied en acier inoxydable qui le place à 1 m au dessus du fond (similaire à figure A.10). Ce courantomètre mesure uniquement la vitesse et la direction de l'eau. Une corde de fond d'environ 20 m est fixée au trépied et, à son autre extrémité, à une ancre d'environ 30 kg. La profondeur à cet endroit est de 9 m. Le courantomètre a été mis à l'eau à l'aide d'un bateau de pêche de 15 m nolisé à 50 \$ par heure d'un pêcheur (Lucien Cyr) de Grande-Entrée à 16 :05 le 24 mai 2001. L'enregistrement a débuté à 12 :00 le 23 mai 2001 et le pas d'enregistrement a été fixé à 20 minutes. Deux jours après le déploiement, un plongeur fut mandaté d'examiner la disposition de l'ancrage du courantomètre au fond. Son inspection a permis de confirmer que le courantomètre et son ancrage étaient bien en position verticale tel que requis pour de bonnes mesures. La récupération du mouillage a débuté à 9:15 h, le 10 juillet 2001 avec le même bateau de pêcheur. Lors de la récupération le mouillage semblait être coincé au fond et ne pouvait être récupéré à l'aide du grappin. Par chance, un pêcheur de pétoncle plongeur passait par-là au même moment. Il fut interpellé afin de plonger pour évaluer la situation au fond. Il a rapporté que le mouillage était enseveli sous le sable et que seul la boule jaune apparaissait en dessus du sable. On lui a demandé de dévisser la boule de son support métallique. Le courantomètre S4 sortait de l'eau à 11 :15 le 10 juillet 2001. La position de cette station est :

Instrument : 47 ° 33.3735 ' Nord  
61 ° 33.8320 ' Ouest  
Ancre : 47 ° 33.3426 ' Nord  
61 ° 33.8481 ' Ouest

#### A.4.10 Station 9 : Marégraphe et thermistor

La station 9 est localisée dans le Golfe du Saint-Laurent, à côté du chenal de navigation menant à la passe d'entrée de la lagune de Grande-Entrée (figure A.13), tout près de la bouée verte. Elle comprend un marégraphe Aanderaa WLR7 portant le numéro de série 1340 fixé en position couchée sur une plaque de métal au centre de trois pattes lestées à leur extrémité (figure A.14). Une corde de fond d'environ 30 m est fixée à la plaque et, à son autre extrémité, à une ancre d'environ 30 kg. La profondeur à cet endroit est de 6.5 m. Le marégraphe a été mis à l'eau à l'aide du bateau du pêche de Grande-Entrée à 17 :03 le 24 mai 2001. L'enregistrement a débuté à 06 :20 le 24 mai 2001 et le pas d'enregistrement a été fixé à 20 minutes. Ce marégraphe mesure la pression hydrostatique et la température de l'eau. Le mouillage a été récupéré le 10 juillet à 18 :14 h. La position de cette station est :

Instrument : 47 ° 33.0844 ' Nord  
61 ° 34.1126 ' Ouest

Ancre : 47 ° 33.0752 ' Nord  
61 ° 33.1231 ' Ouest

#### A.4.11 Station 10 : Marégraphe et thermistor

La station 10 est localisée à l'extérieur de la lagune de Grande-Entrée, du côté sud-est, dans le Golfe du Saint-Laurent (figure A.15 ). La profondeur à cet endroit est de 16 m. Le mouillage à cette station comprend un marégraphe du type Aanderaa WLR7 portant le numéro de série 1444 qui mesure la pression hydrostatique et la température de l'eau. Le marégraphe est fixé en position couchée sur une base de métal attachée au centre de trois pattes d'aluminium lestées à leur extrémité (figure A.14). L'ancrage a été déployé à l'aide du bateau de pêcheur de Grande-Entrée à 17 :58 heures le 24 mai 2001. L'enregistrement a débuté à 06 :40 le 24 mai 2001 et le pas d'enregistrement a été fixé à 20

minutes. Le mouillage a été récupéré avec le même bateau le 12 juillet à 10 :17 h. La position géographique est :

Instrument : 47 ° 30.9042 ' Nord  
61 ° 27.9767 ' Ouest  
Ancre : 47 ° 30.9142 ' Nord  
61 ° 27.9477 ' Ouest

#### A.4.12 Station 11 : Marégraphe et thermistor

La station 11 est localisée dans la baie de Plaisance, tout près de l'île d'Entrée (figure A.16). La profondeur à cet endroit est de 3.5 m. Cette station comprend un marégraphe du type Aanderaa WLR7 portant le numéro de série 1333 qui mesure la pression hydrostatique et la température de l'eau. Le marégraphe est fixé en position couchée sur une base de métal attachée au centre de trois pattes d'aluminium lestées à leur extrémité. L'ancrage a été déployé à l'aide du bateau du MAPAQ à 20 :06 heures le 23 mai 2001. L'enregistrement a débuté à 00 :00 le 23 mai 2001 et le pas d'enregistrement a été fixé à 20 minutes. Le mouillage a été récupéré avec le même bateau le 11 juillet à 12 :17 h. La position géographique est :

Instrument : 47 ° 16.8126 ' Nord  
61 ° 43.0530 ' Ouest  
Ancre : 47 ° 16.847 ' Nord  
61 ° 43.072 ' Ouest

#### A.4.13 Station 12 : Marégraphe et thermistor

La station 12 est localisée à l'extérieur de la lagune du Hâvre-aux-Maisons dans la baie de Plaisance, près de la passe d'entrée de la lagune de Havre aux Basques qui est maintenant fermée par la route 199 (figure A.17). La profondeur à cet endroit est de 5.2 m. Cette station comprend un marégraphe du type Coastal Leasing Micro-Tide portant le numéro de série 10185 qui mesure la pression hydrostatique et la température à l'intérieur du boîtier. Le marégraphe

est fixé en position couchée sur une base de métal attachée au centre de trois pattes d'aluminium lestées à leur extrémité. L'ancrage a été déployé à l'aide du bateau du MAPAQ à 16 :17 heures le 25 mai 2001. L'enregistrement a débuté à 12 :00 le 25 mai 2001 et le pas d'enregistrement a été fixé à 20 minutes. Quelques jours après la mise à l'eau, un pêcheur a accidentellement relevé le mouillage dans ses filets. Il a appelé le Jean-Guy Turbide MAPAQ et ce dernier est allé récupérer le mouillage et le replacer au même endroit un jour plus tard. Le mouillage a été récupéré le 11 juillet 2001 à 13 :18 h. La position géographique est :

Instrument : 47 ° 17.000 ' Nord  
 61 ° 54.499 ' Ouest  
 Ancre : 47 ° 16.986 ' Nord  
 61 ° 54.483 ' Ouest

#### A.4.14 Station 13 : Marégraphe et thermistor

La station 13 est localisée dans le Golfe du Saint-Laurent du côté ouest de la lagune du Hâvre-aux-Basques près de son ouverture intermittente avec le Golfe (figure 17). La profondeur à cet endroit est de 3.3 m. Cette station comprend un marégraphe du type Aanderaa WLR7 portant le numéro de série 1332 qui mesure la pression hydrostatique et la température de l'eau. Le marégraphe est fixé en position couchée sur une base de métal attachée au centre de trois pattes d'aluminium lestées à leur extrémité (e.g. figure 14). L'ancrage a été déployé à l'aide du Boston Whaler à 10 :09 heures le 25 mai 2001. L'enregistrement a débuté à 10 :00 le 24 mai 2001 et le pas d'enregistrement a été fixé à 20 minutes. Le mouillage a été récupéré le 11 juillet 2001 à 09 :02 h. La position géographique est :

Instrument : 47 ° 32.9785 ' Nord  
 61 ° 39.5109 ' Ouest  
 Ancre : 47 ° 32.9679 ' Nord  
 61 ° 39.5157 ' Ouest



#### A.5. PRÉLÈVEMENTS DE SÉDIMENTS

Des échantillons de sédiment de surface ont été prélevés le 26 mai 2001 à l'aide d'une benne et du Boston Whaler aux alentours de l'entrée de la lagune du Havre-aux-Maisons. Les échantillons ont été placés dans des sacs de nylon pour analyse granulométrique à l'ISMER à l'aide d'un Compteur Coulter modèle LS100.

La figure A.18 présente les positions des 46 stations d'échantillonnage relevées par le système de positionnement DGPS.

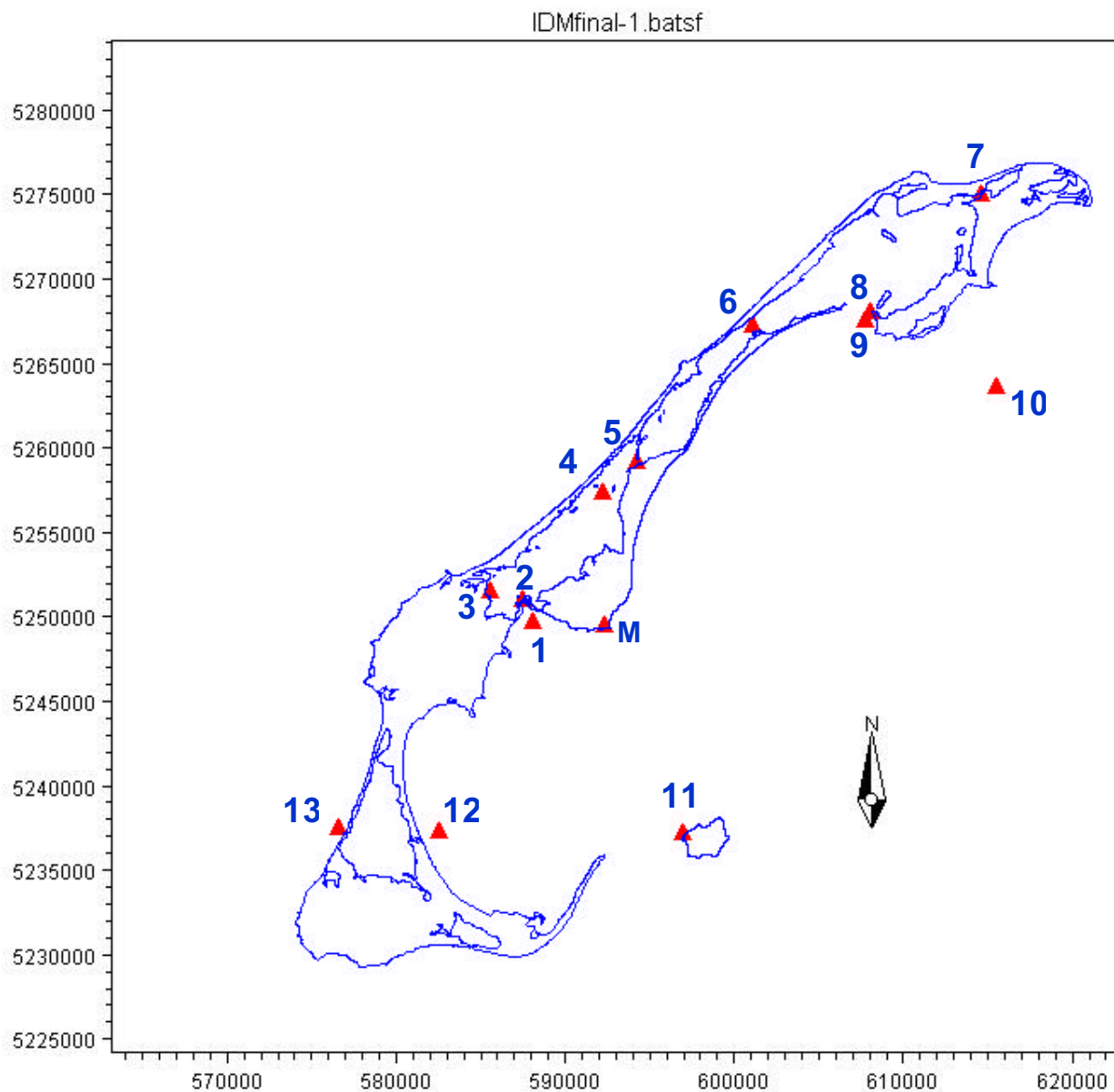


Figure A 1 : Position des stations de mesure de paramètres hydrodynamiques aux Iles-de-la-Madeleine du 23 mai au 13 juillet 2001. Les coordonnées sont en unités UTM (Universal Transverse Mercator).

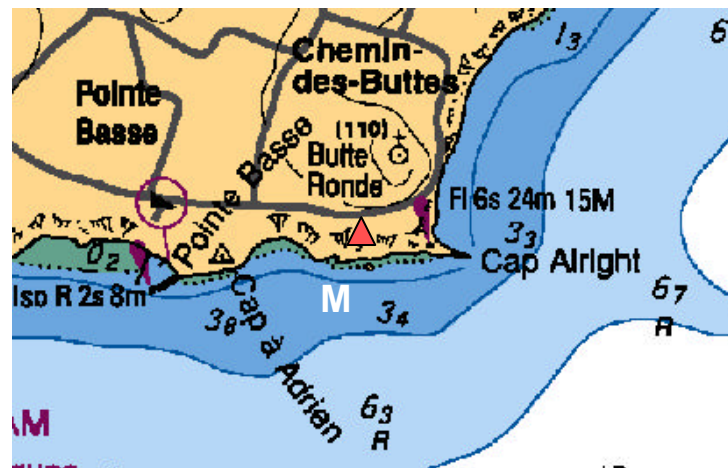
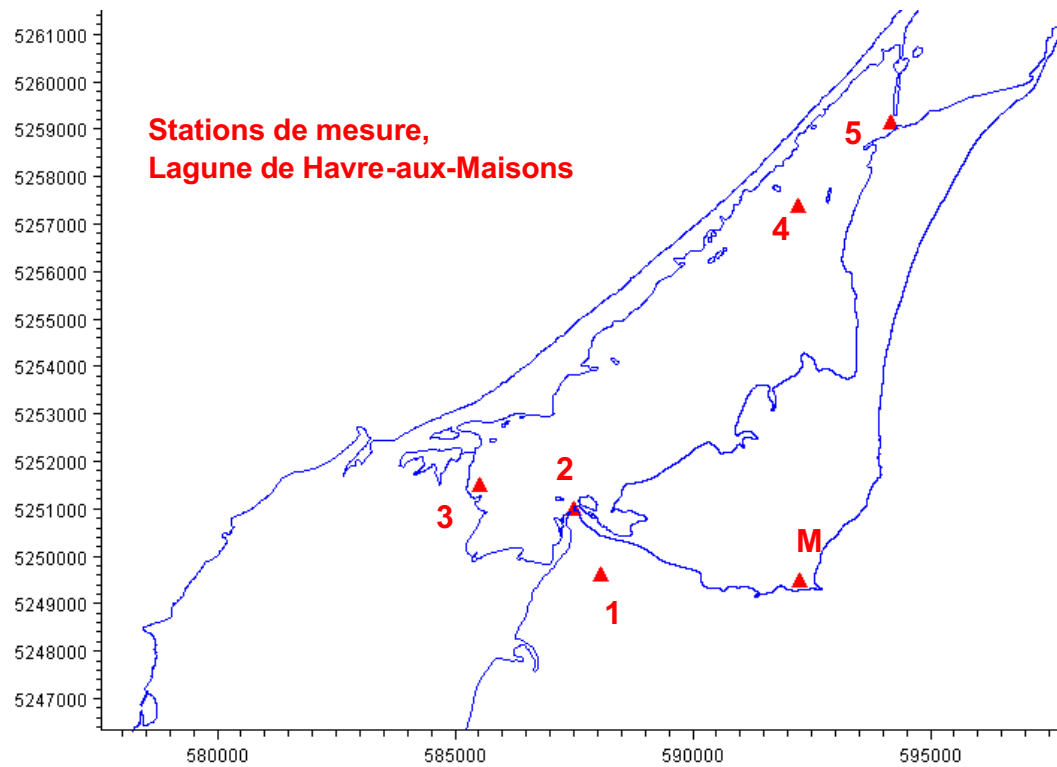


Figure A 2: Position de la station météorologique M.



Figure A 3 : Station météorologique M sur le Cap Alright, Hâvre-aux-Maisons.

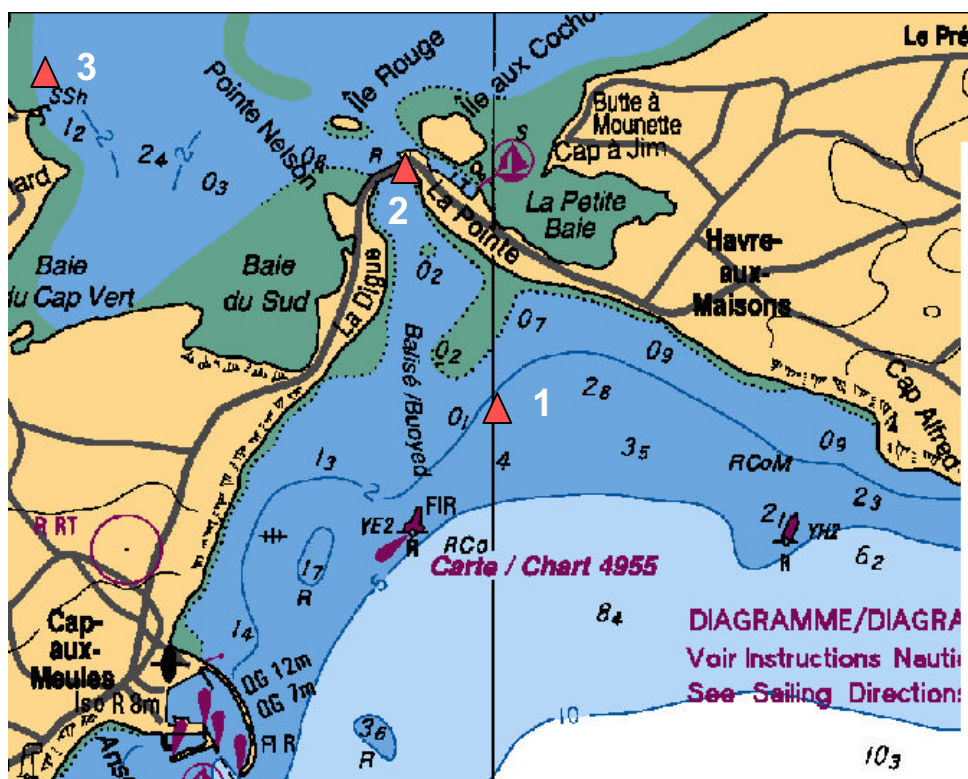
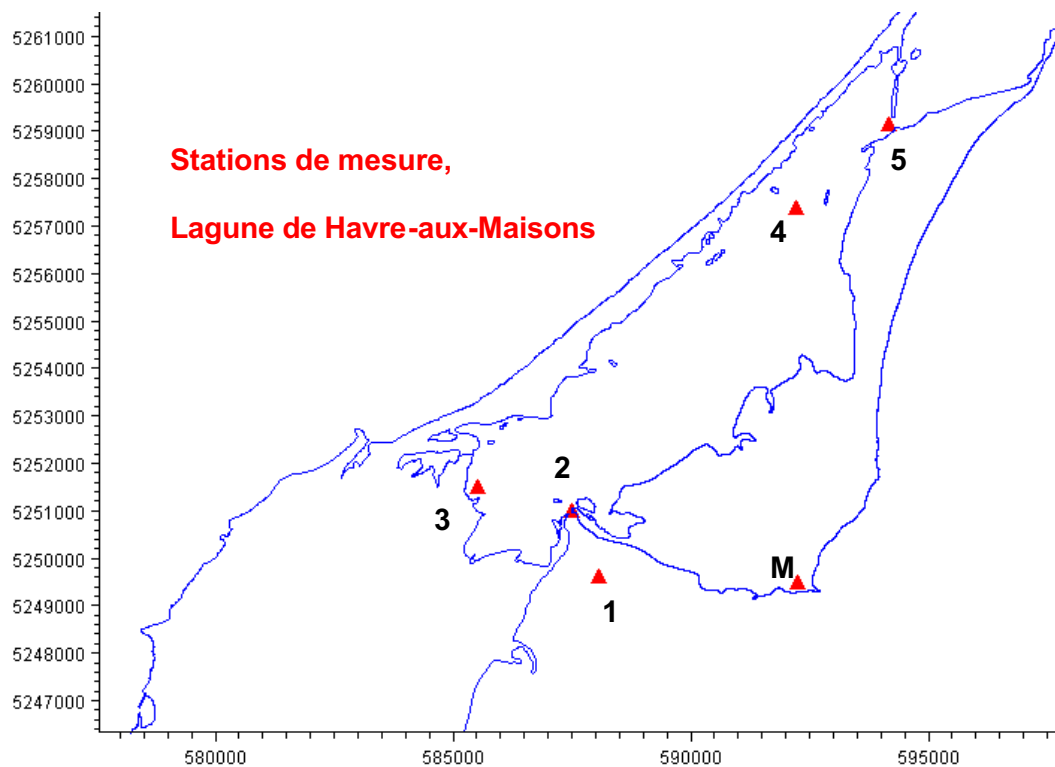


Figure A 4: Positions des stations 1, 2 et 3 dans la zone d'étude.



Figure A 5 : Marégraphe-houlographe déployé à la station 1.



Figure A 6: Courantomètre Sontek ADCP déployé à la station 2 sous le pont de Hâvre-aux-Maisons.



Figure A 7: Marégraphe Coastal Leasing déployé à la station 3.



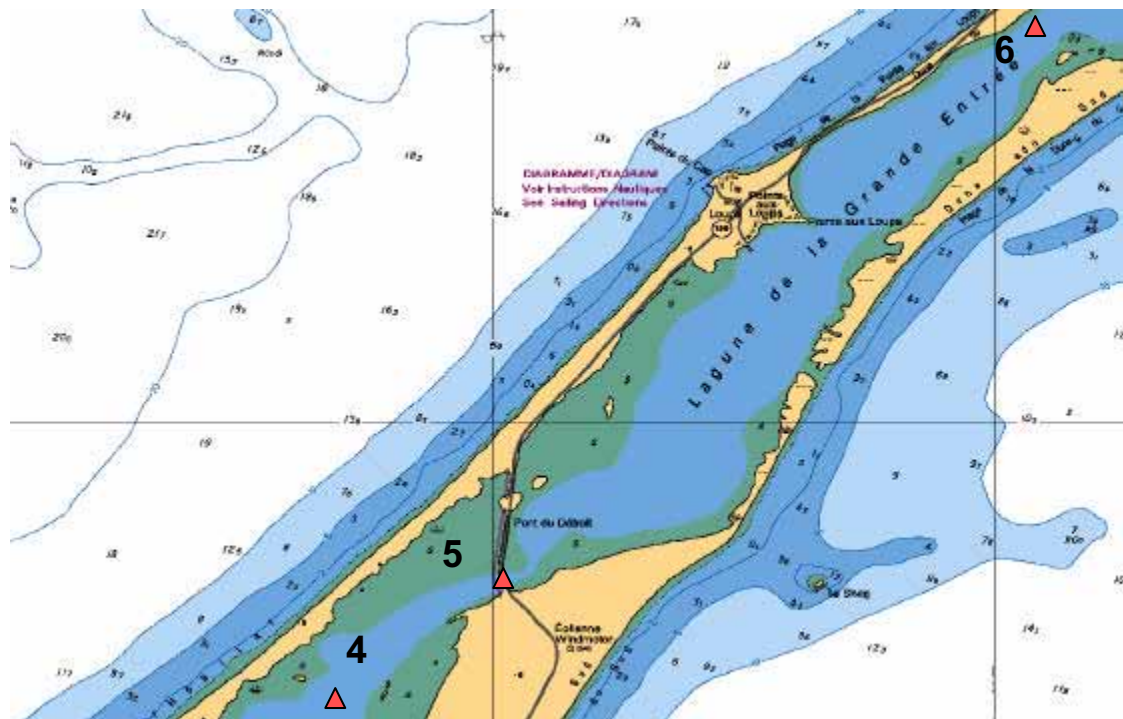


Figure A 8: Position des stations 4, 5 et 6.



Figure A 9: Position de la station 5, sous le pont du Déroit. Le mouillage se situe entre le premier et le deuxième pilier. Le nord est à l'extrémité éloignée du pont.



Figure A 10 : Mouillage à la station 5 comprenant un courantomètre S4 (boule jaune) et un courantomètre RCM4 (non-installé sur la photo) couché sur la base.

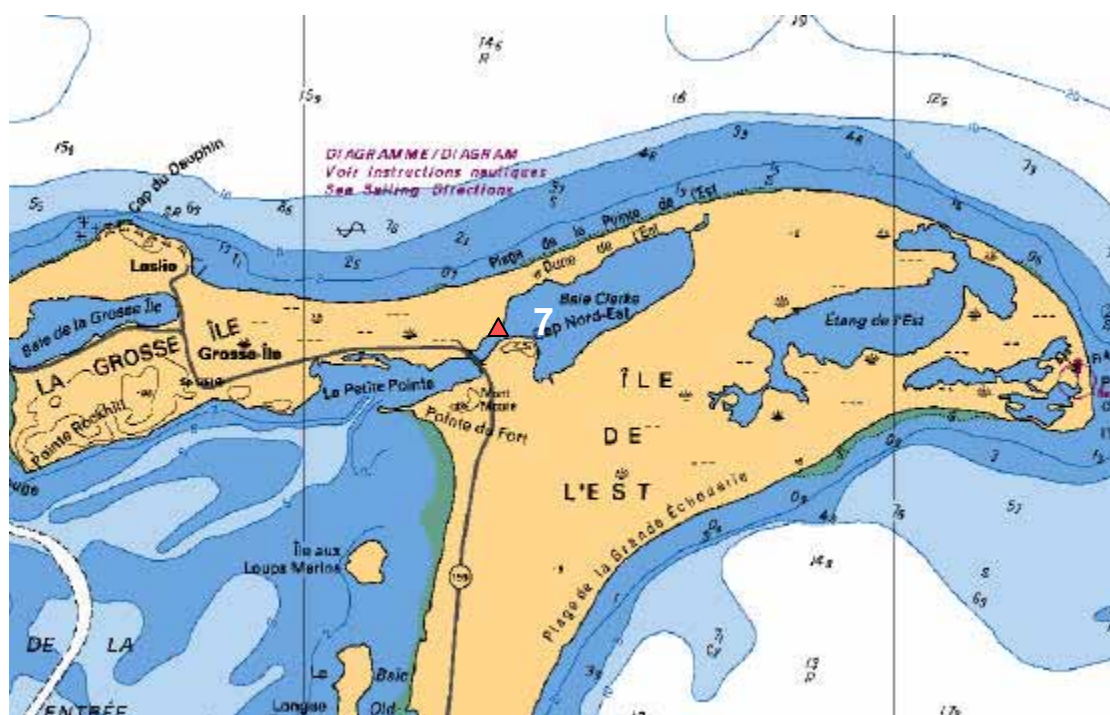


Figure A 11: Position de la station 7 dans la Baie de Clark, lagune de Grande-Entrée.



Figure A 12 : Mouillage du courantomètre S4 installé à la station 7 à l'entrée de la Baie Clarke.

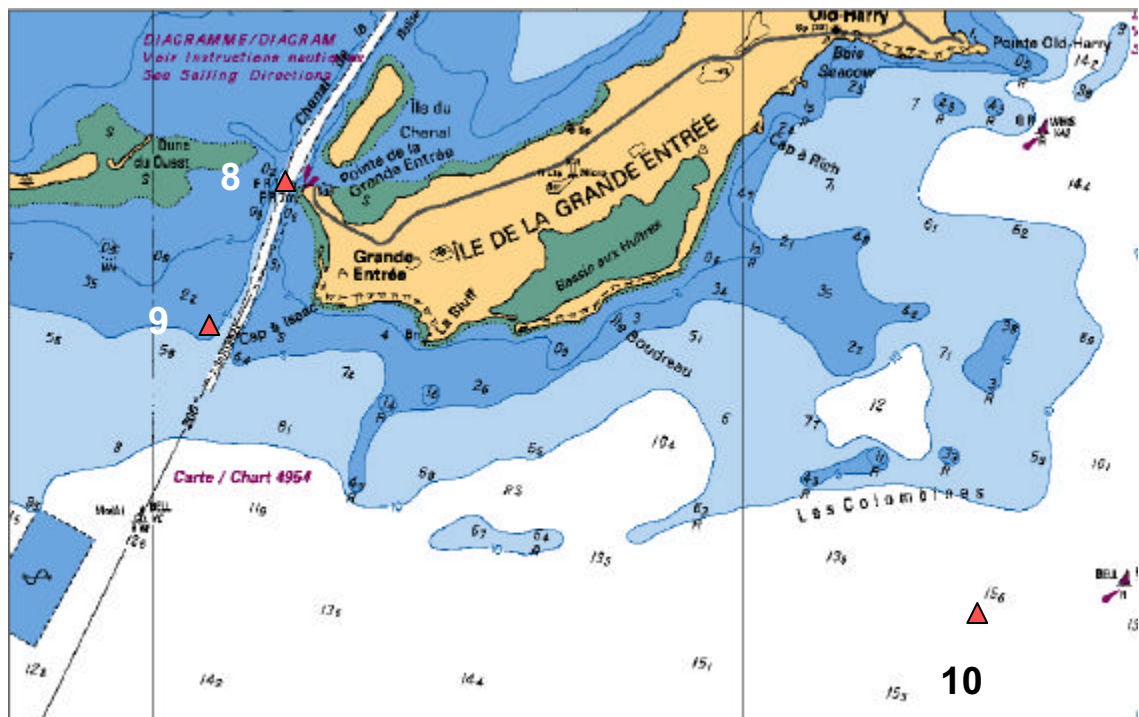


Figure A 13: Positions des stations 8 et 9 dans la passe de Grande-Entrée.



Figure A 14 : Mouillages de marégraphe Aanderaa WLR7 installés aux stations 9 et 10.

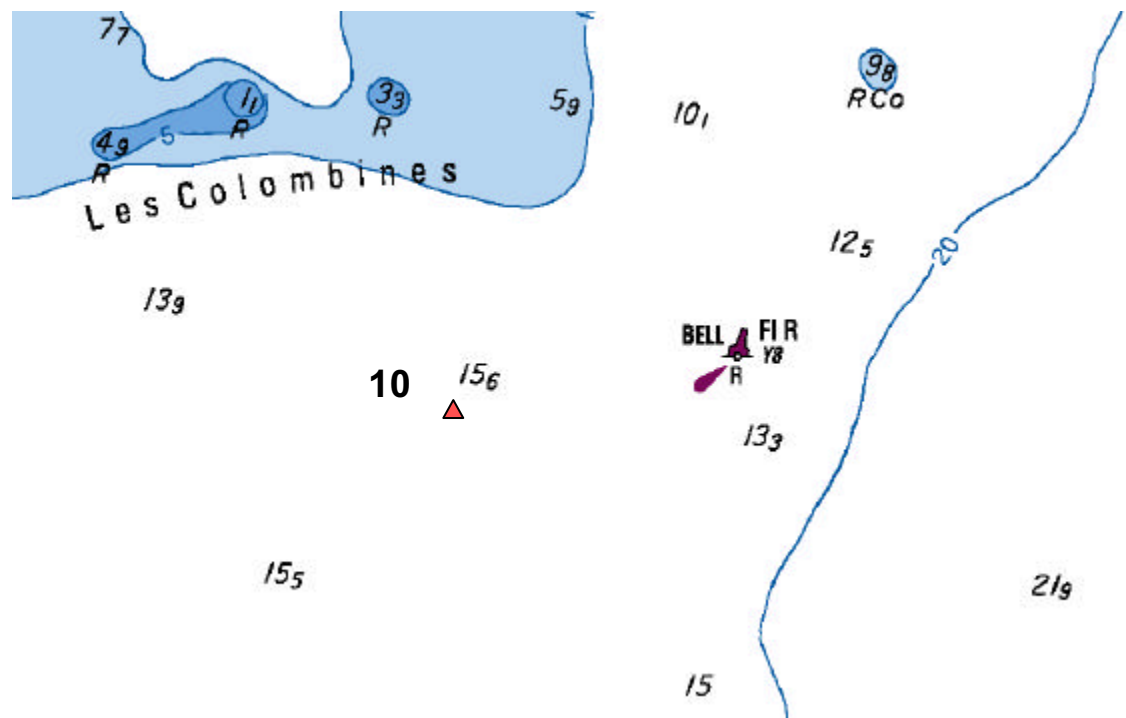


Figure A 15: Position de la station 10 dans le Golfe Saint-Laurent. Voir A-13.





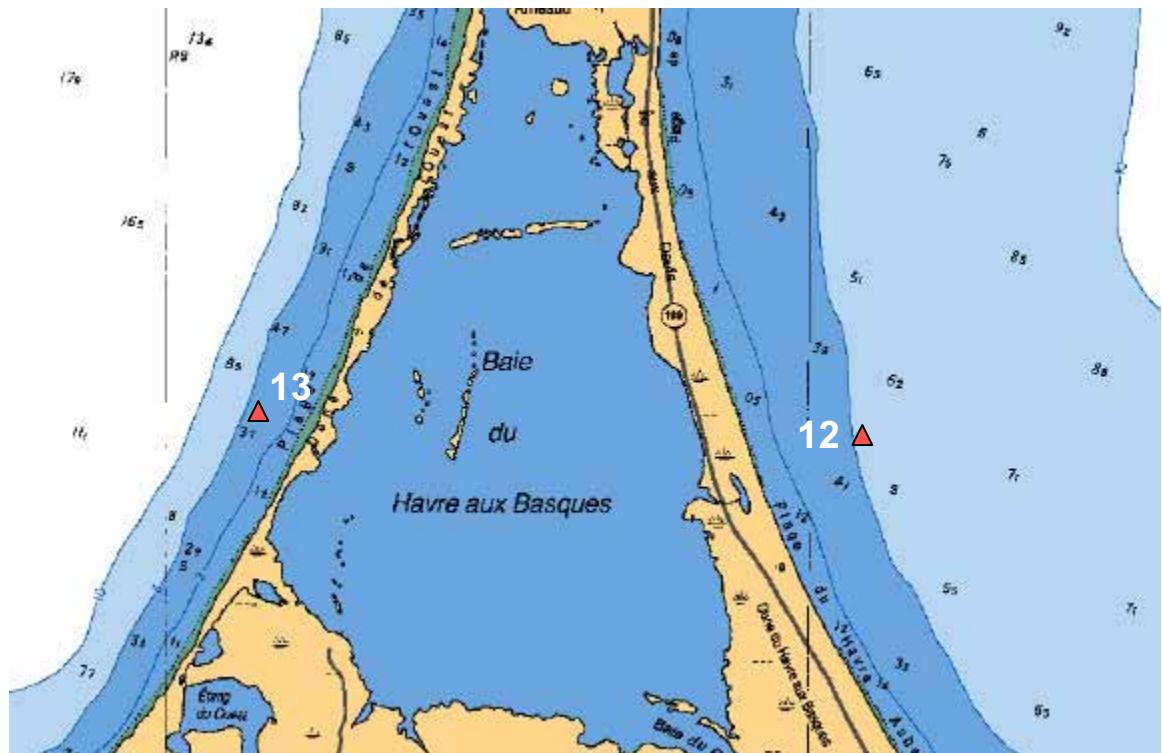


Figure A 17 : Position des stations 12 et 13 des deux côtés de la lagune du Havre-aux-Basques.

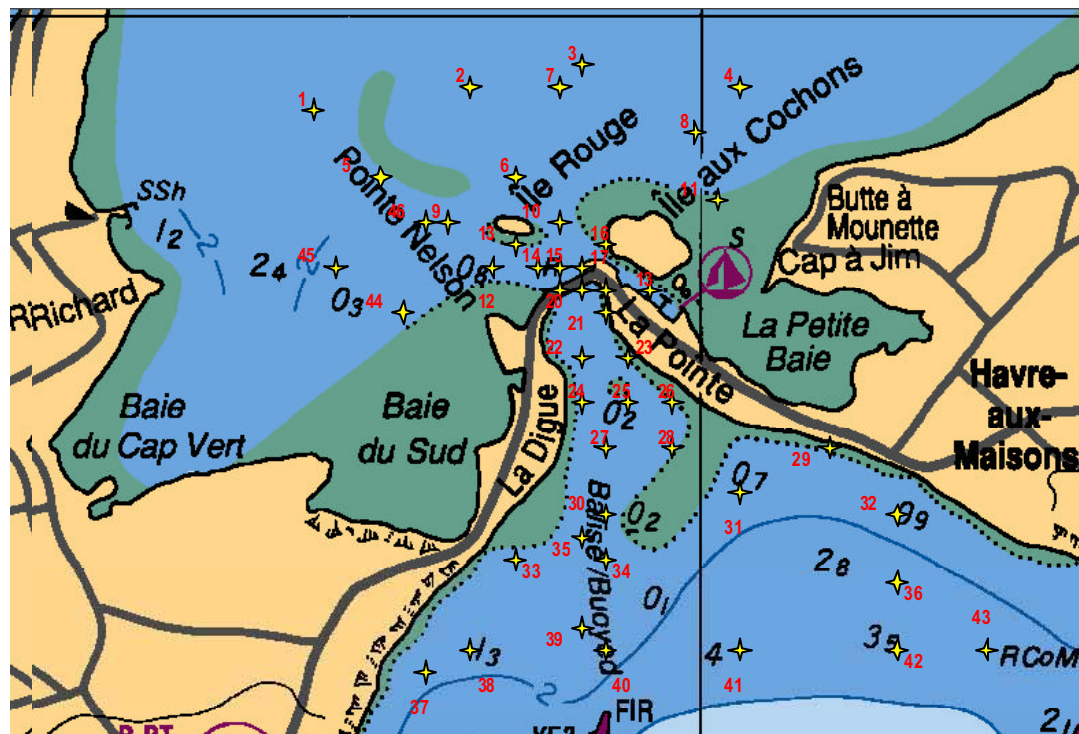


Figure A 18: Positions des stations de prélèvement d'échantillons de sédiment à l'entrée de la lagune du Hâvre-aux-Maisons, le 26 mai 2001.

## ANNEXE B : MÉTHODES D'ANALYSE DES MESURES DE TERRAIN

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau B-1 : Équation matricielle $Bx = y$ dont la solution par la méthode des moindres carrés donne les amplitudes et phases des composantes harmoniques de la marée. ....	125
Tableau B-2 : Principales composantes harmoniques de la marée, leurs périodes et leur origine (soleil ou lune) : .....	126

## B.1 SÉRIES DES NIVEAUX, COURANTS ET DES VENTS.

Une série temporelle d'un paramètre hydrodynamique peut être représentée par les composantes suivantes :

$$y(t) = y_T(t) + y_A(t) + y_M(t) + y_R(t) \quad (\text{B-1})$$

où :  $y_T(t)$  est la tendance de la série;  
 $y_A(t)$  sont les oscillations d'origine météorologique;  
 $y_M(t)$  sont les oscillations de la marée;  
 $y_R(t)$  sont les oscillations résiduelles.

Au niveau pratique, une série temporelle est un ensemble d'observations discrètes enregistrées durant une période de mesure  $T$  à un pas temporel initial  $\Delta t$ . Les traitements successifs normalement appliqués à une série temporelle sont :

- Calcul de la tendance par régression polynomiale cubique.
- Soustraction de la tendance pour rendre la série stationnaire.
- Lissage de la série stationnaire pour éliminer les oscillations résiduelles de haute fréquence (périodes de 3 heures et moins). Ces oscillations n'ont pas d'intérêt au niveau de l'interprétation mais peuvent introduire des oscillations fictives lors de la décimation de la série vers un pas horaire.
- Décimation de la série à un pas d'échantillonnage horaire, si le pas de l'enregistrement initial est différent.
- Analyse harmonique des composantes de la marée.
- Application d'un filtre passe-bas avec une fréquence de coupure entre 30 et 40 heures pour extraire des séries les oscillations atmosphériques de basses fréquences.
- Analyses spectrales des oscillations de basses fréquences.

Ces traitements sont décrits si-dessous. Ils sont effectués à l'aide de logiciels d'analyse de séries chronologiques développés en FORTRAN et MATLAB .

#### B.1.1 EXTRACTION DE LA TENDANCE.

La moyenne ou la tendance est estimée par une régression polynomiale cubique de la forme suivante :

$$y_T(t) = y_0 + a \cdot y(t) + b \cdot y^2(t) + c \cdot y^3(t) \quad (\text{B-2})$$

Cette fonction est ensuite soustraite de la série originale afin de la rendre « stationnaire » dans le temps.

#### B.1.2 LISSAGE ET DÉCIMATION

Lorsque le pas temporel d'une série est différent de 60 minutes, la série est lissée, décimée à un pas horaire et forcée à débiter à une heure intégrale (e.g. 09 :00 et non 08 :20 ou 08 :40). Ce traitement a pour but d'éliminer des oscillations dont la période est de moins de 3 heures et qui sont généralement considérées comme étant du « bruit » ambiant. La décimation horaire permet de réduire le nombre de données dans une série et comparer des séries horaires de différents paramètres physiques en provenance de diverses sources.

L'opérateur de lissage utilisé est un opérateur du type

$$\left\{ \left[ y_{n+1}^2 \cdot y_n \right] / \left[ (n+1)^2 \cdot n \right] \right\} \quad (\text{B-3})$$

Par exemple, pour une série  $y(m)$ ,  $m = 1, \dots, N$ , échantillonnée à un pas temporel de  $\Delta t = 20$  minutes, l'opération de lissage proposée est la suivante :

$$\begin{aligned}
 w_j &= [y_i + y_{i+1} + y_{i+2} + y_{i+3}] / 4 ; & j &= 1, \dots, N-3 ; & i &= 1, \dots, N \\
 x_k &= [w_j + w_{j+1} + w_{j+2} + w_{j+3}] / 4 ; & k &= 1, \dots, N-6 ; \\
 z_m &= [x_k + x_{k+1} + x_{k+2}] / 3 ; & m &= 1, \dots, N-8 ;
 \end{aligned}
 \tag{B-4}$$

Pour un pas d'échantillonnage de  $\Delta t = 20$  minutes, cet opérateur s'exprime par :

$$[(A_4^2 A_3) / (4^2 \cdot 3)], \quad n = 3. \tag{B-5}$$

Une fois lissée, la série originale perd ses 4 premières et 4 dernières données. Elle est ensuite décimée aux 3 valeurs, en commençant par une valeur à une heure intégrale, afin d'obtenir une série horaire et stationnaire  $w(m)$ . Les propriétés de ce type d'opérateur de lissage sont décrites par Godin (1979).

### B.1.3 ANALYSE HARMONIQUE

La méthode d'analyse harmonique des composantes de la marée est décrite en détails par Foreman (1977). Le logiciel peut être obtenu à l'adresse suivante :

[www.ios.bc.ca/ios/iap/pages/tidpack.htm](http://www.ios.bc.ca/ios/iap/pages/tidpack.htm)

L'analyse est basée sur la représentation des oscillations  $y_M(n \Delta t)$  causées par la marée par une somme de  $M$  composantes harmoniques sinusoïdales de marée dont les fréquences  $\sigma_j, j = 1, \dots, M$  sont connues :

$$y_M(n \Delta t) = \sum_{j=1}^M A_j \cos(2\pi (\sigma_j n \Delta t - \phi_j)) \tag{B-6}$$

où  $A_j$  est l'amplitude de la composante harmonique  $j$ , et  $s_j$  est la phase de cette composante. Ici,  $s_j$  est la phase de la composante statique à Greenwich (longitude  $0^\circ$ ) à l'heure de Greenwich, et  $\phi_j$  est le retard de phase de la composante locale sur sa phase à Greenwich  $s_j$ . Il est important de noter que la phase de Greenwich utilisée ici est la phase réelle de la composante d'équilibre à Greenwich seulement si les niveaux d'eau sont enregistrés selon le fuseau horaire de Greenwich (GMT). Si par exemple les niveaux d'eau sont enregistrés



dans un fuseau horaire de Y heures à l'est de Greenwich,  $s_j$  sera la phase de la composante à Greenwich Y heures plus tard.

Le but de l'analyse harmonique est de déterminer les valeurs des amplitudes  $A_j$  et des phases  $\phi_j$  qui représentent le mieux les observations  $y_M(n\Delta t)$ . En supposant que  $N > 2M + 1$ , on s'aperçoit qu'il est impossible de résoudre le système d'équation puisqu'il est surdéterminé. Il est donc nécessaire d'adopter un critère qui permettra d'obtenir des valeurs uniques et optimales des paramètres  $A_j$  et  $\phi_j$ . Le critère d'optimisation le plus couramment utilisé est celui de la méthode des moindres carrés.

La série en (B-6) peut aussi s'exprimer par :

$$y_M(n\Delta t) = \sum_{j=1}^M \left[ (C_j \cos(2\pi \sigma_j n\Delta t) + S_j \sin(2\pi \sigma_j n\Delta t)) \right] \quad (\text{B-7})$$

avec :

$$A_j = \sqrt{C_j^2 + S_j^2}$$

et: (B-8)

$$\phi_j = (\arctan S_j / C_j) / 2\pi$$

Ceci rend le système linéaire et facilite l'estimation des amplitudes  $S_j$  et  $C_j$ . L'objectif de l'analyse harmonique est donc de minimiser l'expression :

$$T = \sum_{n=1}^N \left[ y(n\Delta t) - y_0 - y_T(n\Delta t) - \sum_{j=1}^M (C_j \cos(2\pi \sigma_j n\Delta t) + S_j \sin(2\pi \sigma_j n\Delta t)) \right]^2 \quad (\text{B-9})$$

par la méthode des moindres carrés pour  $y_0$  et tous les  $S_j$  et  $C_j$ . Ceci consiste à résoudre les  $2M + 1$  équations simultanées suivantes (B-10):

$$0 = \frac{\delta T}{\delta C_0} = 2 \sum_{n=1}^N \left( y_n - y_0 - \sum_{j=1}^M C_j \cos 2\pi \sigma_j t_n - \sum_{j=1}^M S_j \sin 2\pi \sigma_j t_n \right) (-1)$$

$$0 = \frac{\delta T}{\delta C_j} = 2 \sum_{n=1}^N \left( y_n - y_0 - \sum_{j=1}^M C_j \cos 2\pi \sigma_j t_n - \sum_{j=1}^M S_j \sin 2\pi \sigma_j t_i \right) (-\cos 2\pi \sigma_j t_n)$$

$$0 = \frac{\delta T}{\delta S_j} = 2 \sum_{n=1}^N \left( y_n - y_0 - \sum_{j=1}^M C_j \cos 2\pi \sigma_j t_n - \sum_{j=1}^M S_j \sin 2\pi \sigma_j t_i \right) (-\sin 2\pi \sigma_j t_n)$$

pour  $j = 1, \dots, M$  et  $t_n = n \cdot t, n = 1, \dots, N$ .

En d'autres termes, ceci consiste à résoudre une équation matricielle  $B \underline{x} = \underline{y}$  par la méthode des moindres carrés. Cette équation est détaillée au tableau B-1. Il s'agit de trouver le vecteur  $\underline{x}$  dans le système  $\underline{y} = A \underline{x} + \underline{e}$  qui fait en sorte que  $[\underline{e}^T \underline{e}]$  est minimisé. Ici, la matrice B est remplacée par  $B = A^T A$ , où  $A = 2M + 1$  est le nombre de paramètres que la méthode cherche à déterminer, et  $\underline{e}$  est le vecteur du résiduel.

La solution est  $\underline{x} = (A^T A)^{-1} A^T \underline{y}$ . La somme totale des carrés est  $\underline{y}^T \underline{y}$  et la somme des carrés due à la régression est  $\underline{x}^T A^T \underline{y}$ . Leur différence est l'erreur résiduelle de la somme des carrés. Cette différence divisée par le nombre de degrés de liberté donne l'erreur au carré moyenne résiduelle ("*MSE = residual Mean Square Error*" en anglais). Le nombre de degrés de liberté est la différence entre le nombre d'observations (en excluant les valeurs manquantes) et A. Par exemple, s'il y a M composantes harmoniques à déterminer, incluant  $y_0$ , le nombre de degrés de liberté pour N points de mesure serait :  $N(2M+1)$ . La méthode numérique utilisée est l'algorithme de factorisation de Cholesky présenté en détails par Foreman (1977).

En supposant, comme de coutume, que le vecteur  $\underline{e}$  est normalement distribué, avec une variance  $s^2 I$ , où I est la matrice unitaire, la variance de  $\hat{x}$  sera de  $(A^T A)^{-1} s^2$ . Étant donné que MSE est un estimé non biaisé de  $s^2$ , l'estimé de la déviation standard de  $\hat{x}_i$ , le i me terme de  $\hat{x}$ , sera :

$$\left[ (\mu_i^T (A^T A)^{-1} \mu_i) \text{MSE} \right]^{1/2} \quad (\text{B-11})$$

où  $\mu_i$  est le vecteur contenant le chiffre 1 en sa composante  $i$  et 0 ailleurs. On obtient ainsi un estimé de l'erreur des estimés de  $S_j$  et  $C_j$ . Ces erreurs sont ensuite combinées pour calculer les erreurs des estimés des phases  $f_j$  et des amplitudes  $A_j$  de la façon suivante. Soient  $e_{C_j}$  et  $e_{S_j}$  les erreurs associées aux estimés des coefficients  $C_j$  et  $S_j$ , respectivement. En multipliant ces erreurs par 1,96, on obtient les intervalles de confiance à 95%. Les erreurs des estimés de l'amplitude  $A_j$  et de la phase  $f_j$  sont :

$$e_{A_j} = \sqrt{e_{C_j}^2 + e_{S_j}^2}$$

et

(B-12)

$$e_{\phi} = \frac{180}{\pi} \text{ATAN} \left[ \frac{e_{A_j}}{\sqrt{A_j^2 - e_{A_j}^2}} \right]$$

Une fois que les amplitudes et les phases des diverses composantes sont obtenues, elles peuvent être utilisées pour reconstituer ou prédire la série temporelle de la marée pour la même période de temps ou pour toutes autres périodes futures ou passées.

Le tableau (B-2) présente les principales composantes harmoniques de la marée. Les autres composantes de la série  $y(t)$ , voir équation (xx), sont finalement obtenues en soustrayant la prédiction horaire de la marée de la série horaire initiale  $y(t)$ .

#### B.1.4 ANALYSE SPECTRALE

Les fluctuations résiduelles à la marée sont de nature stochastique, de sorte que leurs fréquences dominantes d'énergie ne sont pas connues à priori, comme c'était le cas pour la marée. Par conséquent, la recherche de ces fréquences dominantes se fait par analyse spectrale. L'équivalent de l'analyse spectrale dans le domaine du temps est la fonction d'auto-corrélation.

Le principe de l'analyse spectrale est le même que celui de l'analyse harmonique: la variance totale du signal est répartie en variances partielles associées à des bandes de fréquences déterminées par la période fondamentale  $T$  de la série. Dans le cas de l'analyse harmonique, les fréquences sont connues (tableau B-2, composantes harmoniques de la marée) alors que dans l'analyse spectrale, ces fréquences sont déterminées par la transformée de Fourier de la série.

Par exemple, pour une série qui s'étend sur une période d'échantillonnage  $T = n \cdot \Delta t$ , et qui comprend  $n$  observations mesurées à un pas temporel  $\Delta t$ , ces fréquences seront :

$$f_j = \frac{1}{T}, \frac{2}{T}, \frac{3}{T}, \dots, \frac{j}{T}, \dots, \frac{1}{2 \Delta t} \quad (\text{B-13})$$

On remarque que ces fréquences dépendent de la durée de l'enregistrement  $T$  et que plus la série est longue, meilleure sera la résolution des basses fréquences. La plus basse fréquence est l'inverse de la période de l'enregistrement,  $f=1/T$  et la plus haute est la fréquence de Nyquist,  $f=1/(2\Delta t)$ .

Contrairement à l'analyse harmonique, l'analyse spectrale peut être appliquée à plus d'une série. Dans le cas d'une seule série, on recherche la densité auto-spectrale  $G_{xx}(f)$  qui révèle à quelles fréquences se retrouvent les principales à la variance totale de la série analysée.

Considérons à nouveau la série  $y_A(n\Delta t)$ . La transformée de Fourier de cette série est :

$$Z(f) = \sum_{n=0}^{N-1} y_A(n \Delta t) \cdot \exp \left[ -i \frac{2 \pi k n}{N} \right]; \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{B-14})$$

La fonction de la densité auto-spectrale est donnée, pour des fréquences positives par :

$$G_{xx}(f_k) = \frac{2 \Delta t}{N} \cdot |Z(f_k)|^2; \quad f_k = \frac{k}{N \Delta t}; \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{B-15})$$

Lorsqu'on recherche une relation entre deux séries  $x(n\Delta t)$  et  $y(n\Delta t)$ , comme par exemple le niveau d'eau et la pression atmosphérique, on recherche alors la densité spectrale croisée  $G_{xy}(f)$ . Cette fonction permet de savoir si les deux séries sont cohérentes et à quelles bandes de fréquences elles le sont.

La densité spectrale croisée est une fonction complexe définie par :

$$G_{xy}(f) = C_{xy}(f) - j Q_{xy}(f) = |G_{xy}(f)| \cdot e^{-j\theta_{xy}(f)} \quad (\text{B-16})$$

$C_{xy}$  est la densité spectrale en phase coïncidente et  $Q_{xy}$  est la densité spectrale en quadrature de phase.

La fonction de cohérence  $\gamma(f)$  entre les deux séries est la valeur absolue de  $G_{xy}$  normalisée par le produit des densités auto-spectrales des deux séries :

$$\gamma^2(f_k) = \frac{|G_{xy}(f_k)|^2}{G_{xx}(f_k) \cdot G_{yy}(f_k)} \quad (\text{B-17})$$

Elle adopte des valeurs positives comprises entre 0 et 1. Une valeur élevée révèle que les séries  $x(n\Delta t)$  et  $y(n\Delta t)$  sont cohérentes à la fréquence  $f_k$ .

La phase relative entre les deux séries  $\theta_{xy}$  est une mesure du retard temporel d'une série par rapport à l'autre. Elle s'exprime par :

$$\theta_{xy}(f_k) = \tan^{-1} \frac{Q_{xy}(f_k)}{C_{xy}(f_k)} \quad (\text{B-18})$$

Tableau B-1 : Équation matricielle  $B \underline{x} = \underline{y}$  dont la solution par la méthode des moindres carrés donne les amplitudes et phases des composantes harmoniques de la marée.

$$\begin{bmatrix}
 N & C_1 & C_2 & \dots & C_M & S_1 & S_2 & S_M \\
 C_1 & CC_{11} & CC_{12} & \dots & CC_{1M} & CS_{11} & CS_{12} & \dots & CS_{1M} \\
 C_2 & CC_{21} & CC_{22} & \dots & CC_{2M} & CS_{21} & CS_{22} & \dots & CS_{2M} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 C_M & CC_{M1} & CC_{M2} & \dots & CC_{MM} & CS_{M1} & CS_{M2} & \dots & CS_{MM} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 S_1 & SC_{11} & SC_{12} & \dots & SC_{1M} & SS_{11} & SS_{12} & \dots & SS_{1M} \\
 S_2 & SC_{21} & SC_{22} & \dots & SC_{2M} & SS_{21} & SS_{22} & \dots & SS_{2M} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 S_M & SC_{M1} & SC_{M2} & \dots & SC_{MM} & SS_{M1} & SS_{M2} & \dots & SS_{MM}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 y_0 \\
 C_1 \\
 C_2 \\
 \dots \\
 \dots \\
 C_M \\
 \dots \\
 \dots \\
 S_1 \\
 S_2 \\
 \dots \\
 \dots \\
 S_M
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \sum_{n=1}^N y_n \\
 \sum_{n=1}^N y_n \cos 2\pi \sigma_1 t_n \\
 \sum_{n=1}^N y_n \cos 2\pi \sigma_2 t_n \\
 \dots \\
 \dots \\
 \sum_{n=1}^N y_n \cos 2\pi \sigma_M t_n \\
 \dots \\
 \dots \\
 \sum_{n=1}^N y_n \sin 2\pi \sigma_1 t_n \\
 \sum_{n=1}^N y_n \sin 2\pi \sigma_2 t_n \\
 \dots \\
 \dots \\
 \sum_{n=1}^N y_n \sin 2\pi \sigma_M t_n
 \end{bmatrix}$$

où :

$$S_j = \sum_{n=1}^N \sin 2\pi \sigma_j t_n$$

$$C_j = \sum_{n=1}^N \cos 2\pi \sigma_j t_n$$

$$CC_{jk} = \sum_{n=1}^N (\cos 2\pi \sigma_j t_n) (\cos 2\pi \sigma_k t_n) = CC_{kj}$$

$$SS_{jk} = \sum_{n=1}^N (\sin 2\pi \sigma_j t_n) (\sin 2\pi \sigma_k t_n) = SS_{kj}$$

$$CS_{jk} = \sum_{n=1}^N (\cos 2\pi \sigma_j t_n) (\sin 2\pi \sigma_k t_n) = SC_{kj}$$

Tableau B-2 : Principales composantes harmoniques de la marée, leurs périodes et leur origine (soleil ou lune) :

Composante harmonique	Période (heures)	Origine
SSA	4383.00	<i>Solaire, bisannuelle</i>
MM	661.30	<i>Lunaire, mensuelle</i>
MSF	354.48	<i>Luni-solaire, bimensuelle</i>
MF	327.90	<i>Lunaire, bimensuelle</i>
Q1	26.87	<i>Lunaire, elliptique</i>
O1	25.82	<i>Lunaire principale, diurne</i>
P1	24.07	<i>Solaire principale, diurne</i>
K1	23.93	<i>Luni-solaire, diurne</i>
N2	12.66	<i>Lunaire elliptique, semi-diurne</i>
M2	12.42	<i>Lunaire principale, semi-diurne</i>
S2	12.00	<i>Solaire principale, semi-diurne</i>
K2	11.97	<i>Luni-solaire, semi-diurne</i>
M4	6.21	<i>Lunaire composée, quart-diurne</i>
MS4	6.10	<i>Luni-solaire composée, quart-diurne</i>

ANNEXE C : THÉORIE DU MODÈLE NUMÉRIQUE DES VAGUES  
(MIKE21-NSW)



## Théorie du modèle NSW

Les modèles de prédiction des vagues sont généralement basés sur l'équation de l'énergie de la vague où la densité de l'énergie de la vague  $E$ , une fonction de la fréquence  $\omega$  et de la direction  $\theta$  de la vague, varie lentement en fonction de l'espace  $(x, y)$  et du temps  $t$  (Phillips, 1977).

De façon générale, ces modèles simulent bien la génération, la propagation et la dissipation des vagues dans des milieux océaniques sans courants. Cependant, en présence d'un courant ambiant, il est plus pertinent de simuler la densité de « l'action » de la vague  $A$  plutôt que la densité de l'énergie de la vague. La densité de l'action de la vague est définie par (Whitham, 1965) :

$$A(\omega, \theta; x, y, t) = E(\omega, \theta; x, y, t) / \sigma \quad (\text{C-1})$$

Ici, la fréquence relative  $\sigma$  de la vague est :

$$\sigma = \omega - \boldsymbol{\kappa} \cdot \mathbf{V} \quad (\text{C-2})$$

où  $\boldsymbol{\kappa}$  est le vecteur du nombre d'onde de la vague dans la direction  $\theta$  et  $\mathbf{V}$  est le vecteur du courant ambiant.

Le modèle MIKE21-NSW est basé sur l'équation de la conservation de l'action de la vague et sur la formulation théorique développée par Holthuijsen et al., 1989). L'équation de la conservation de la vague est exprimée par:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_x A) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y A) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta A) + \frac{\partial}{\partial \omega}(c_\omega A) = T \quad (\text{C-3})$$

Le premier terme à gauche représente le changement local de la densité de l'action de la vague. Les autres termes à gauche représentent les transports net de l'action dans les domaines  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$  et  $\omega$  respectivement. Le terme  $T$  à droite est

la fonction « source » qui varie en fonction de  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$  et  $\omega$ . Elle représente l'effet combiné de la génération et de la dissipation de l'action de la vague.

Les vitesses de propagation  $c_x$  et  $c_y$  en (3) sont les composantes du vecteur de vitesse de groupe  $\mathbf{c}$  dans les directions  $x$  et  $y$ , respectivement. Pour des vagues linéaires, ce vecteur  $\mathbf{c}$  est défini par :

$$\mathbf{c} = \frac{\partial \sigma}{\partial \mathbf{k}} \frac{\mathbf{k}}{k} + \mathbf{V} \quad (\text{C-4})$$

Il est à noter qu'en présence d'un courant, la direction de la vitesse de groupe  $\mathbf{c}$  n'est pas nécessairement la même que la direction de la vague  $\theta$ , c'est-à-dire la direction perpendiculaire à la crête de la composante de la vague  $(\theta, \omega)$ .

Selon la théorie linéaire, la vitesse de propagation  $c_\theta$  associée à la réfraction est:

$$c_\theta = -\frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial n} - \frac{\mathbf{k}}{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial n} \quad (\text{C-5})$$

où  $d$  est la profondeur locale et  $n$  est la direction perpendiculaire à la direction de propagation  $\theta$  de la vague spectrale  $(\theta, \omega)$  dans l'espace  $(x, y)$ .

Finalement, la vitesse de propagation  $c_\omega$  représente le changement de l'action de la vague dans le domaine de la fréquence induit par une variation temporelle du médium de propagation (e.g. une variation de la profondeur ou du courant ambiant). Elle s'exprime par :

$$c_\omega = \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial t} \quad (\text{C-6})$$

Dans des conditions stationnaires, c'est-à-dire lorsque le courant et les paramètres de vagues ne changent pas dans le temps (relativement à l'échelle temporelle de la période de la vague), l'équation (3) est réduite à :

$$\frac{\partial}{\partial x}(c_x A) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y A) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta A) = T \quad (\text{C-7})$$

La solution numérique de cette équation étant trop complexe, Holthuijsen et al. (1989) proposent de paramétriser l'équation au complet dans le domaine de la fréquence, tout en gardant les caractéristiques des vagues dans l'espace directionnel. Ils effectuent cette paramétrisation en fonction des moments d'ordre zéro et d'ordre un du spectre de l'action des vagues dans le domaine de la fréquence. Les deux fonctions des vagues correspondantes sont le spectre directionnel unidimensionnel de l'action de la vague  $A_0(\theta)$  et la fréquence moyenne en fonction de la direction spectrale  $\omega_0(\theta)$ . Ces fonctions sont définies par:

$$A_0(\theta) = m_0(\theta) \quad (\text{C-8})$$

$$\omega_0(\theta) = m_1(\theta) / m_0(\theta) \quad (\text{C-9})$$

où les moments  $m_n$  du spectre de densité de l'action des vagues sont définis par :

$$m_n(\theta) = \int_0^{\infty} \omega^n A(\omega, \theta) d\omega \quad (\text{C-10})$$

Holthuijsen et al. (1989) expliquent que  $A_0(\theta)$  est un spectre directionnel qui représente la distribution, dans l'axe directionnel, de l'action des vagues intégrée sur toutes ses fréquences et non le spectre directionnel conventionnel donné en deux dimensions, e.g.  $A(\omega, \theta)$ .

La paramétrisation des équations de l'action des vagues est ensuite obtenue en appliquant à l'équation (7) l'opérateur défini en (10), avec  $n=0$  et  $n=1$ . Ceci

donne deux équations d'évolution, l'une pour  $m_0(\theta)$  et l'autre pour  $m_1(\theta)$ . En omettant la dépendance sur  $(\theta)$ , ces équations sont :

$$\frac{\partial}{\partial x}(c_{0x}m_0) + \frac{\partial}{\partial y}(c_{0y}m_0) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_{0\theta}m_0) = T_0 \quad (C-11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(c_{0x}m_1) + \frac{\partial}{\partial y}(c_{0y}m_1) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_{0\theta}m_1) = T_1 \quad (C-12)$$

où  $c_{0x}$  et  $c_{0y}$  sont les vitesses de groupe de  $m_0$  et  $m_1$  dans les directions  $x$  et  $y$ , respectivement et  $c_{0\theta}$  est la vitesse de propagation du changement de l'action de la vague dans l'axe directionnel  $\theta$ . Les termes  $T_0(x,y,\theta)$  et  $T_1(x,y,\theta)$  sont les termes sources des moments  $m_0$  et  $m_1$  de l'action des vagues.

Le modèle NSW résout numériquement les équations (C-11) et (C-12). Les termes de gauche représentent la propagation de l'action de la vague, la réfraction et la levée (« *shoaling* ») de la vague alors que les termes de droite représentent la génération locale de l'action de la vague par le vent et sa dissipation par la friction au fond et le déferlement.

#### A.1 PROPAGATION ET RÉFRACTION

Dans le modèle NSW les vitesses de propagations dans les directions  $x$  et  $y$  sont les composantes cartésiennes de la vitesse de groupe à la fréquence moyenne  $\omega_0$  :

$$\mathbf{c}_0 = \frac{\partial \sigma_0}{\partial \mathbf{k}_0} \frac{\mathbf{k}_0}{k_0} + \mathbf{V} \quad (C-13)$$

où  $k_0$  est le nombre d'onde correspondant à la fréquence moyenne  $\omega_0(\theta)$  dans la direction  $\theta$ , cette fréquence moyenne étant déterminée par la théorie linéaire des vagues :

$$\omega_0 = \sigma_0 + \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{V} \quad (\text{C-14})$$

avec :

$$\sigma_0 = \{gk_0 \tanh(k_0 d)\}^{1/2} \quad (\text{C-15})$$

La vitesse de propagation associée à la réfraction de l'action de la vague à la fréquence moyenne  $\omega_0(\theta)$  devient :

$$c_{0\omega} = -\frac{1}{k_0} \frac{\partial \sigma_0}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial n} - \frac{\mathbf{k}_0 \cdot \partial \mathbf{V}}{k_0 \partial n} \quad (\text{C-16})$$

## A.2 GÉNÉRATION ET DISSIPATION

Les fonctions sources  $T_0$  et  $T_1$  dans (11) et (12) représentent respectivement l'effet de la génération des vagues par les vents locaux et l'effet de la dissipation de l'énergie des vagues par la friction au fond, par le déferlement en eau peu profonde et par le blocage par les courants.

Ces fonctions sont exprimées dans le modèle NSW en fonction du taux de changement de l'énergie des vagues intégrée dans le domaine de la fréquence,  $S_E$ , et en fonction du taux de changement de la fréquence moyenne du spectre d'énergie,  $S_\omega$  :

$$T_1(\theta) = \frac{\omega_0}{\sigma_0} S_E(\theta); \quad S_E(\theta) = \frac{dE_0}{dt} \quad (\text{C-17})$$

$$T_0(\theta) = \frac{1}{\sigma_0} \left\{ S_E(\theta) - \frac{E_0(\theta)}{\omega_0} \right\}; \quad S_\omega(\theta) = \frac{d\omega_0}{dt} \quad (C-18)$$

Ici, l'énergie des vagues  $E_0(\theta)$  est définie par :

$$E_0(\theta) = \int_0^\infty E(\omega, \theta) d\omega \quad (C-19)$$

et la fréquence moyenne du spectre de l'action des vagues est calculée par :

$$S_\omega(\theta) = \frac{\omega_0}{\Omega_0} S_\Omega \quad (C-20)$$

où  $\Omega_0$  est la fréquence moyenne de l'énergie des vagues données par :

$$\Omega_0(\theta) = \frac{1}{E_0(\theta)} \int_0^\infty \omega E(\omega, \theta) d\omega \quad (C-21)$$

Dans le modèle NSW, le rapport  $\omega_0 / \Omega_0 = 0.92$ , ce qui correspond au spectre JONSWAP moyen (Hasselmann et al. 1973).

Les nouvelles fonctions sources  $S_E(\theta)$  et  $S_\omega(\theta)$  sont donc la somme de leurs composantes individuelles :

$$S_E(\theta) = S_E(\theta)_{\text{vent}} + S_E(\theta)_{\text{friction}} + S_E(\theta)_{\text{déferlement}} + S_E(\theta)_{\text{blocage}} \quad (C-22)$$

$$S_\omega(\theta) = S_\omega(\theta)_{\text{vent}} + S_\omega(\theta)_{\text{friction}} + S_\omega(\theta)_{\text{déferlement}} + S_\omega(\theta)_{\text{blocage}}$$

### A.2.1 GÉNÉRATION PAR LE VENT

La génération des vagues par le vent local est calculée dans le modèle NSW selon des relations empiriques de génération de vagues en eau profonde. Ainsi, l'énergie totale des vagues  $E_1$  est :

$$E_1 = \int_0^{2\pi} E_0(\theta) d\theta = H_{m0}^2 / 16 \quad (C-23)$$

où  $H_{m0}$  est la hauteur significative de la vague.

La fréquence de l'énergie moyenne des vagues  $\Omega_1$  est :

$$\Omega_1 = \frac{1}{E_1} \int_0^{2\pi} \Omega_0(\theta) E_0(\theta) d\theta \quad (C-24)$$

Ces fonctions sont respectivement calculées pour une durée « t » définie comme étant la durée requise pour la génération d'une même vague par un vent stationnaire soufflant à partir du temps  $t = 0$  le long d'un même fetch.

Ces fonctions deviennent :

$$\begin{aligned} \tilde{E}_1 &= a \tilde{t}^b & \text{pour } \tilde{t} < \tilde{t}_{mE} \\ \tilde{E}_1 &= a \tilde{t}_{mE}^b & \text{pour } \tilde{t} \geq \tilde{t}_{mE} \end{aligned} \quad (C-25)$$

et

$$\begin{aligned} \tilde{\Omega}_1 &= c \tilde{t}^d & \text{pour } \tilde{t} < \tilde{t}_{m\Omega} \\ \tilde{\Omega}_1 &= c \tilde{t}_{m\Omega}^d & \text{pour } \tilde{t} \geq \tilde{t}_{m\Omega} \end{aligned} \quad (C-26)$$

où  $t_m$  est la durée équivalente d'une vague pleinement développée. Les termes  $\tilde{E}_1$ ,  $\tilde{\Omega}_1$  et  $\tilde{t}$  sont les formes non-dimensionnelles de  $E_1$ ,  $\Omega_1$  et  $t$  pour un vent de

vitesse  $\mathbf{U}$  et une accélération gravitationnelle  $g$ . Les coefficients empiriques  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $t_{mE}$  et  $t_{m\Omega}$  sont obtenus de la littérature, à partir des mesures de génération de vagues en eau profonde (e.g. CERC, 1973). Dans le modèle NSW, ces coefficients adoptent les valeurs suivantes :  $a = 1.44 \times 10^{-8}$  ;  $b = 1.12$  ;  $c = 43.59$  ;  $d = -1/3$  et  $\tilde{t}_m = 6.6 \times 10^4$ . Johnson (1998) discute ces coefficients en détails.

Les fonctions sources non-dimensionnelles (C-25) et (C-26) sont évaluées séparément pour chacune des directions, en utilisant le concept de l'énergie totale «équivalente»  $E^*(\theta)$  et celui de la fréquence moyenne  $\Omega^*(\theta)$  selon chaque direction  $\theta$ .

L'énergie totale équivalente  $E^*(\theta)$  est :

$$E^*(\theta) = E_0(\theta) / D_{\text{vent}}(\theta) \quad (\text{C-27})$$

où la fonction  $D_{\text{vent}}(\theta)$  est une fonction de distribution normale de l'énergie des vagues dans l'espace directionnel. Dans le modèle NSW, cette fonction est du type:

$$D_{\text{vent}}(\theta) = A \cos^2(\theta - \theta_w) \quad (28)$$

où  $\theta_w$  est la direction du vent et  $A$  est une constante.

La fréquence moyenne  $\Omega^*(\theta)$  selon chaque direction  $\theta$  est simplement:

$$\Omega^*(\theta) = \Omega_0(\theta) \quad (29)$$

Les fonctions (C-27) et (C-29) servent ensuite à calculer les durées équivalentes en (C-25) et (C-26). Ces durées permettent finalement de calculer les fonctions recherchées:



$$S_E(\theta)_{\text{vent}} = \frac{dE^*(\theta)}{dt} \cdot D_{\text{vent}}(\theta) \quad (\text{C-30})$$

et

$$S_\omega(\theta)_{\text{vent}} = \omega_0 / \Omega_0 \cdot \frac{d\Omega^*(\theta)}{dt} \quad (\text{C-31})$$

Plus de détails la génération des vagues dans le modèle NSW sont donnés par Holthuijsen et al. (1989).

## A.2.2 DISSIPATION PAR LE FOND

La dissipation de l'action des vagues par la friction sur le fond dans le modèle NSW est basée sur une loi de friction quadratique qui fait intervenir la tension de cisaillement (*shear stress*) au fond et qui suppose que la distribution des hauteurs de vagues dans un train de vagues aléatoires suit une distribution de Rayleigh. Le terme source correspondant est basé sur l'expression de la dissipation de l'énergie de vagues unidirectionnelles et aléatoires, pour une seule fréquence  $\omega$  (Dingemans, 1983) :

$$\left( \frac{dE_1}{dt} \right)_{\text{friction}} = - \frac{1}{8\pi^{1/2}} \frac{C_{fw}}{g} \frac{\omega^3}{\sinh^3(kd)} H_{\text{rms}}^3 \quad (\text{C-32})$$

où  $C_{fw}$  est un coefficient de friction et  $H_{\text{rms}}$  est la hauteur « rms » (*Root Mean Square*, équivalent à la déviation standard) de la vague  $H_{\text{rms}} = 2(2 E_1)^{1/2}$ . Le coefficient de friction  $c_{fw} = f_w/2$  peut être calculé selon une expression empirique (Jonsson, 1966) :

$$\begin{aligned} f_w &= \exp \left[ -5.977 + 5.213 (a_b/k_N)^{-0.194} \right] && \text{pour } a_b/k_N \geq 2 \\ f_w &= 0.24 && \text{pour } a_b/k_N < 2 \end{aligned} \quad (32a)$$

où  $a_b$  est l'amplitude de l'oscillation d'une parcelle d'eau au fond et  $k_N$  est le coefficient de rugosité de Nikuradse (Jonsson, 1966). L'expression (C-32) peut aussi s'écrire sous la forme du produit  $\langle \tau \rangle \langle v \rangle$ , où  $\tau$  est une tension de cisaillement proportionnelle au carré de la vitesse orbitale :

$$\langle \tau \rangle = (8/\pi)^{1/2} \frac{c_{fw}}{g} \frac{\omega^2}{\sinh^2(kd)} E_1 \quad (C-33)$$

et  $\langle v \rangle$  est une vitesse orbitale au fond :

$$\langle v \rangle = \frac{\omega}{\sinh(kd)} E_1^{1/2} \quad (C-34)$$

Ces expressions peuvent aussi être formulées avec une dépendance directionnelle, en supposant que la tension de cisaillement est distribuée dans l'axe directionnel selon le carré de la vitesse orbitale dans chaque direction :

$$\langle \tau(\theta) \rangle = (8/\pi)^{1/2} \frac{c_{fw}}{g} \frac{\Omega_0^2(\theta)}{\sinh^2\{k_0(\theta)d\}} E_0(\theta) \quad (C-35)$$

Par ailleurs, compte tenu du caractère non-linéaire de la friction au fond, la dissipation d'énergie dans chaque direction est couplée aux autres directions par le biais de la vitesse orbitale au fond :

$$\langle v_1 \rangle = \left[ \int_0^{2\pi} \frac{\Omega_0^2(\theta) E_0(\theta)}{\sinh^2\{k_0(\theta)d\}} d\theta \right] \quad (C-36)$$

La distribution directionnelle de la dissipation au fond peut alors être exprimée par :

$$S_E(\theta)_{\text{friction}} = - \langle \tau(\theta) \rangle \langle v_1 \rangle \quad (C-37)$$

L'effet d'un courant ambiant sur la dissipation sur le fond est pris en considération en ajoutant à la vitesse orbitale  $\langle v_1 \rangle$  la composante  $V_\theta$  de ce courant dans la direction  $\theta$  avec son propre coefficient de friction  $c_{fc}$ , et en remplaçant la fréquence absolue  $\Omega_0(\theta)$  par la fréquence relative  $\sigma_0(\theta)$  dans le terme source  $S_E(\theta)_{\text{friction}}$  :

$$S_E(\theta)_{\text{friction}} = -(8/\pi)^{1/2} \frac{(c_{fw} \langle v_1 \rangle + c_{fc} V_\theta)}{g} \frac{\sigma_0^2(\theta)}{\sinh^2\{k_0(\theta) d\}} E_0(\theta) \quad (\text{C-38})$$

Le calcul du deuxième terme source,  $S_\Omega(\theta)_{\text{friction}}$ , dans le modèle NSW est basé sur l'hypothèse que l'effet de la dissipation par le fond sur la fréquence moyenne  $\Omega_0(\theta)$  agit plutôt sur les basses fréquences du spectre des vagues. Cette hypothèse est bien justifiée étant donné que les longues vagues sont plus affectées par le fond que les courtes vagues. On suppose aussi que le spectre est caractérisé par une distribution universelle des hautes fréquences qui s'exprime en fonction du nombre d'onde  $k$  par :

$$\begin{aligned} E(k, \theta) &= \alpha(\theta) k^{-n} && \text{pour } k \geq k_p \\ E(k, \theta) &= 0 && \text{pour } k < k_p \end{aligned} \quad (\text{C-39})$$

où  $k_p$  est le nombre d'onde maximum et  $n = 3$  (Kitaigorodskii et al. 1975; Thornton, 1977). Le taux de changement de la fréquence moyenne  $\Omega_0(\theta)$  induit par cette dissipation de basse fréquence est estimé en considérant d'abord le taux de changement du nombre d'onde directionnel moyen  $K_0(\theta)$  défini par :

$$K_0(\theta) = \frac{1}{E_0(\theta)} \int_0^\infty k E(k, \theta) dk \quad (\text{C-40})$$

Le taux de changement de ce nombre d'onde est :

$$\frac{d}{dt}[K_0(\theta)] = \frac{1}{1-n} \frac{K_0(\theta)}{E_0(\theta)} S_{E(\theta)_{\text{friction}}} \quad (\text{C-41})$$

En remplaçant  $\omega_0$  et  $k_0$  par  $\Omega_0(\theta)$  et  $K_0(\theta)$  dans (14) et (15) et en supposant que ces équations sont valides pour  $\Omega_0(\theta)$  et  $K_0(\theta)$ , le taux de changement de  $\Omega_0(\theta)$  peut être estimé par (41) :

$$S_{\Omega(\theta)_{\text{friction}}} = \frac{1}{1-n} \frac{c_0(\theta) K_0(\theta)}{E_0(\theta)} S_{E(\theta)_{\text{friction}}} \quad (\text{C-42})$$

L'effet du courant ambiant sur la fréquence moyenne se retrouve implicitement dans la formulation du terme  $S_{E(\theta)_{\text{friction}}}$  en (38).

### A.2.3 DISSIPATION PAR DÉFERLEMENT

La formulation des termes source de dissipation par le déferlement des vagues est basée sur la théorie de Battjes and Janssen (1979) qui propose que la distribution des vagues suit une distribution de Rayleigh tronquée à une hauteur maximale critique  $H_{\text{mx}}$  au delà de laquelle les vagues déferlent. Ce déferlement survient en eau profonde lorsque la hauteur de la vague devient instable (par rapport à sa longueur d'onde) ou en eau peu profonde lorsque la profondeur devient comparable à la hauteur de la vague.

La hauteur  $H_{\text{mx}}$  est définie par le critère de déferlement de Miche (1944) :

$$H_{\text{mx}} = \frac{\gamma_1}{k} \tanh\left(\frac{\gamma_2 k d}{\gamma_1}\right) \quad (\text{C-43})$$

où  $\gamma_1$  est un paramètre qui contrôle l'escarpement (« *steepness* » en anglais) qui provoque le déferlement de la vague en eau profonde, alors que  $\gamma_2$  est un paramètre qui contrôle la hauteur maximale qui provoque le déferlement en eau peu-profonde.

Le terme source  $S_E(\theta)_{\text{déferlement}}$  est alors estimé par :

$$S_E(\theta)_{\text{déferlement}} = \frac{-\alpha_1 Q_b \Omega_0(\theta) H_{mx}^2 E_0(\theta)}{(8 \pi E_1)} \quad (\text{C-44})$$

où  $Q_b$  est la fraction des vagues déferlantes et  $\alpha_1$  est une constante numérique ajustable. La fraction des vagues déferlantes  $Q_b$  est une fonction de la hauteur maximale des vagues  $H_{mx}$  et de la valeur *rms* (« *root mean square* ») des vagues  $H_{rms}$  :

$$\frac{1-Q_b}{\ln(Q_b)} = -\left(\frac{H_{rms}}{H_{mx}}\right)^2 \quad (\text{C-45})$$

Les valeurs des constantes  $\alpha_1$ ,  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$  dans le modèle NSW sont 1.0, 0.88 et 0.8 respectivement, tel que suggéré par Battjes and Janssen (1979).

L'effet des vagues déferlantes sur la fréquence moyenne en eau peu profonde est similaire à celui de l'effet de la dissipation par la friction au fond, étant donné que ce sont les vagues de basses fréquences qui déferlent plutôt. En eau profonde, le déferlement en surface n'affectera pas la fréquence moyenne des vagues. Ainsi, l'effet du déferlement  $S_{\Omega}(\theta)_{\text{déferlement}}$  est équivalent à celui de la friction au fond, excepté qu'il est multiplié par un facteur de réduction  $R$  :

$$S_{\Omega}(\theta)_{\text{déferlement}} = \frac{R}{1-n} \frac{c_0(\theta)K_0(\theta)}{E_0(\theta)} S_E(\theta)_{\text{déferlement}} \quad (\text{C-46})$$

Le facteur  $R$  varie de 0 en eau profonde et 1 en eau peu profonde selon:

$$R = 1 - \left\{ \tanh(\gamma_2 k_1 d) \right\}^2 \quad (\text{C-47})$$

L'effet du courant ambiant sur le déferlement est pris en compte de façon implicite étant donné que la vitesse du courant affecte la vitesse de propagation  $c_0(\theta)$  et que  $K_0(\theta)$  est calculé à l'aide des relations (14) et (15).

Finalement, les courants modifient la propagation des vagues (eq.4) et par conséquent leur temps de résidence dans une région. Ils vont aussi influencer le processus de levée des vagues. Ceci va contribuer à augmenter ou diminuer l'énergie des vagues en eau peu-profonde et donc affecter le déferlement.

ANNEXE D : THÉORIE DU MODÈLE NUMÉRIQUE HYDRODYNAMIQUE  
(MIKE21-HD)

ANNEXE E : THÉORIE DU MODÈLE NUMÉRIQUE DE TRANSPORT DE  
SÉDIMENTS NON-COHÉSIFS (MIKE21-ST)